

# 振動・き裂発生・進展モニタリングに関する基礎研究

(動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書)

1997年3月

東京大学 先端科学技術研究センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997



## 振動・き裂発生・進展モニタリングに関する基礎研究

岸輝雄\* 榎学\*

### 要旨

ナトリウム漏えいを未然に防止するためには、機器・構造物の破損を防ぐことが必要である。したがってそのためには破損に至るまでの前駆現象を検出する技術が重要となってくる。そこで本調査研究においては、そのための先端的なセンサーの一つであると考えられるレーザー超音波センサーについて、その原理および現状についてまとめ、その適用範囲を明らかにすることを試みた。まず、このような非破壊評価手法の重要性およびレーザーを用いた非破壊評価手法の歴史について調べた。さらに、パルスレーザー照射による非接触弾性波発生と、レーザー干渉法による非接触超音波検出について、その技術的な基礎について調査した。パルスレーザー照射による弾性波発生では、熱応力モードとアブレーションモードの2種類があり、その特性の違いについてまとめた。また、レーザー干渉による超音波受信においては、ホモダイン干渉法、時間差干渉法、共焦点ファブリペロー干渉法の各手法の原理と特徴についてまとめた。さらに、この手法の粗面試料への適用例および高温中の材料への適用を考察することにより、これらの条件においてもこの手法が実用化される可能性が示唆された。

---

本報告書は、東京大学先端科学技術研究所センターが動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号 : 080D0384

事業団担当者 : 安全工学部 機器・構造安全工学室 植原 安英

\*) 東京大学 先端科学技術研究所センター

## Basic Study of Monitoring for Vibration, Crack Generation and Propagation

Teruo Kishi\*, Manabu Enoki\*

### Abstract

Failure of machine and structure has to be prohibited to avoid the leak of liquid sodium. The technology of detection of pre-existing phenomena before final failure becomes very important. In this basic study, the laser based ultrasonic sensor technique which is one of promising methods was investigated to summarize its principle and current status and to know the applicability of this method. Firstly the importance of non-destructive evaluation (NDE) method and the history of laser based NDE were reviewed. The technological basic of the non-contact generation of elastic wave by laser radiation and the non-contact detection of ultrasonic wave by laser interference technique. The difference of two modes of generation of elastic wave, that is, thermal stress mode and ablation mode, was reviewed. The detection methods of ultrasonic wave by laser interference such as homodyne interferometer, time-delay interferometer and confocal Fabry-Perot interferometer were investigated and their principle and characteristics were compared. Finally, examples of application of these methods for rough surface samples and high temperature materials were considered. It was concluded that these laser based NDE techniques were able to be used in practical applications.

---

Work performed by Research Center for Advanced and Technology, The University of Tokyo under contact with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contact Number : 080D0384

PNC Liaison : Structure safety Engineering Section, safety Engineering Division.

Y. Sakakibara

\*) Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 非破壊評価による信頼性確保 .....	1
3. レーザー超音波による非破壊評価 .....	2
4. レーザー超音波技術の原理 .....	3
(1)レーザー照射 による超音波発生の原理 .....	4
(2)レーザーによる非接触の超音波検出の原理 .....	6
5. レーザー超音波技術の応用 .....	9
(1)変位計測法としての適用 .....	9
(2)粗面試料への適用 .....	11
(3)高温中の材料への適用 .....	11
6. まとめ .....	13
参考文献 .....	14

## 図リスト

- 図 1 パルスレーザー照射による主な弾性波発生モード（熱応力と気化圧力）
- 図 2 ルビーレーザー照射により発生した弾性波（左：熱応力、右：アブレーションモード）
- 図 3 非接触超音波送受信実験の概略
- 図 4 レーザー光を用いた超音波振動の各種検出法
- 図 5 超音波検出のためのホモダイン干渉計（マイケルソン型）
- 図 6 ホモダイン干渉における光路長変化と干渉光の強度変化との関係
- 図 7 超音波検出のための時間差干渉計（マイケルソン型）
- 図 8 超音波探触子で受信した超音波波形（左）と、ホモダイン干渉法（中）、時間差干渉法（右）で受信した超音波波形（上）とその周波数スペクトラム（下）
- 図 9 超音波検出用共焦点ファブリペロー干渉計の構成
- 図 10 ファブリペロー干渉計の光透過特性

## 1. はじめに

本研究では、超音波センサーを用いて機器の振動、き裂発生、き裂進展を検出することにより、機器・構造の破損によるナトリウム漏えいを未然に防止できるモニタリングシステムの開発を念頭に置いて、最新のセンサーおよび信号処理技術に関する調査研究を行い、本概念のFBRプラントへの適用性や技術的な見通しについて、基礎的な検討をすることを目的としている。

## 2. 非破壊評価による信頼性確保

現代においては、船舶や航空機、高層ビルをはじめとして、技術の発展とともに、これら構造物の規模が大きくなり、それとともにこれらの構造物の破壊がもたらす損害も大規模かつ深刻なものとなっている。とくに、原子力発電設備をはじめとした大規模工業プラントにおいては、その規模のみならず、その事故の及ぼす社会的、経済的影响の大きさゆえに、その構造物の安全性や信頼性の確保は必要不可欠なものである。また、航空機等にみられるように、システムとしての信頼性確保のためには、構造材料だけでなく、部品のような小さな工業製品にいたるまで高い信頼性を要求される。

このような各種構造物の信頼性確保の必要性から、従来より、構造物や製品の欠陥検出、品質検査を目的として、超音波探傷やX線探傷、電磁気探傷を始めとした各種の非破壊検査技術が開発され実用に供されている。非破壊検査とは、材料や構造物の製造時のみならず、供用中においても、検査対象物を壊すことなく検査する計測手法の総称であり、一般には目立たないものの、材料の欠陥あるいは材質を検査・評価する方法として、劣化・損傷が人命に関わる機械や構造物はもちろんのこと、各種工業製品について、材料の信頼性確保のための検査・計測手法として広く用いられている。個々の非破壊検査手法にはそれぞれ適用可能な欠陥や材質に特徴があるが、特に超音波を用いて材料中の欠陥や材質変化を調べる方法は、鋼構造物のような大きな材料への適応性や内部欠陥検出能力の高さなどから供用中の工業プラントの検査を始めとして、鋼構造物などの検査に広く用いられている。

超音波による非破壊検査において、超音波を送受信する方法としては、一般には圧電素子を用いる方法が広く用いられている。この方法では、一般に、圧電素子で発生する超音波振動を検査対象物に効率的に伝えるため、水や油、あるいは接着材のような音響結合媒体を、圧電素子を用いたセンサーと材料の間に入れなければならない。このため計測対象となる材料によっては、適用がはばかられたり、困難である場合もある。特に、材料自体が高温の場合などは、そのままセンサーを接触させることは困難である。実験的には、熱的緩衝材をセンサーと試料の間に挟み、高温中の材料の音速測定などが行われているが、一般に超音波探傷の適用は常温に限られている。

そこで、このような圧電素子による従来法では対応が難しい高温の材料や新材料の非破壊検査を目的として、従来より、非接触超音波計測法の研究開発が行われてきた。その中には、すでに磁性材料や導電性材料に対する非接触超音波送受信法として実用されている電磁超音波法があるが、これから技術発展・応用を期待されているもう一つの非接触超音波送受信法として、レーザーを用いた非接触超音波送受信法、すなわちレーザー超音波がある。レーザー超音波とは、パルスレーザー光等のレーザー光を照射して材料に超音波を発生伝播させ、受信にはレーザー干渉計等の光学的技術を用いて超音波振動を検出する技術の通称であり、遠隔から非接触で超音波を送受でき、しかも微小領域に適用可能であるという特徴がある。電磁超音波法では、外部からの過渡的磁場によって材料内部に生じる渦電流をもちいるため、材料が導電性でなければならず、また、磁場を用いるため、材料とセンサーとの距離を大きくできないなどの制限があるが、レーザー超音波はこのような制限が無いため、非接触超音波計測技術の新しい展開が期待できる。

### 3. レーザー超音波による非破壊評価

レーザー超音波の技術は、非接触超音波発生技術と非接触超音波受信技術の二つのほぼ独立した2つの技術より構成されている。各々の要素技術の学問的歴史は古く、光照射による非接触の超音波発生については、ベルによる光音響の研究が、その発端といわれている。光音響とは、そもそも、光を一定周期で材料に照射すると、その材料より、照射周期に一致した微弱な音あるいは振動が発生する現象である。強度変調

をかけた光を材料に照射すると、その変調周波数に対応した振動が材料あるいはその周辺大気中に生じ、その振動を、音響として検出して、その音響の振幅や位相、さらには、その周波数スペクトルから、材料の熱的性質や、さらに、材質や構造の評価を行おうとする光音響分光法（Photo-Acoustic Spectrometry, PAS）は、この10年ほどの間に、微少領域を対象とした材質評価法としての地位を確立している。この技術では、光が材料に吸収されるときの熱的、電子的物性により、光の吸収率変化や熱的膨張・収縮などの変化が現れ、さらにそれらを、間接的に音響的変化として検出するものである。微小領域における材料表面の材質変化を捕らえる方法として、半導体や薄膜・被覆材料の評価法として研究されている。レーザー超音波における超音波発生も基本原理は、PASと同じく光の吸収等により材料に振動を発生させるものであるが、一般的には、照射する光はパルスであることや、発生した振動そのものではなく、その振動をプローブとして、さらに材料内部を調べようとする点で、PASとはおもむきを異とする。

一方、レーザー超音波における非接触超音波受信は、一般的には、レーザー光などを用いた干渉法による振動・変位計測と同一の技術である。1960年代のレーザーの発明とともに、レーザー光を用いた干渉計測の研究が進められ、その一つとして干渉法による材料表面の非接触振動・変位計測が発展してきた。レーザー超音波の非接触検出法はその技術の延長上にある技術であるが、一般のレーザー干渉による振動計測では、高々100KHzまでの機械振動を検出対象としているのに対し、レーザー超音波では、実用的には数MHz程度、研究的には100MHz～GHzに及ぶ高周波の超音波振動を検出対象としていることが、異なっている点である。このような高周波振動を対象としているため、検出システムの工学的、電気的技術内容は若干異なったものとなる。

#### 4. レーザー超音波技術の原理

レーザー超音波については、海外、特にカナダ、米国を中心として継続的な研究が進められてきたが、日本でのレーザー超音波の研究報告が出てきたのはここ数年である。レーザー超音波の研究を始めるにあたっては、レーザー超音波の市販装置というものも存在せず、レーザー超音波の有用性や現実性についても日本国内ではほとんど

認識されていなかったのが実態であった。そこで、ここでは、レーザー超音波の基礎技術である非接触超音波発生と非接触超音波受信の原理的技術について、基礎の確立を含めて、その技術的有用性を確認し明らかにすることを目的とした。

### (1) レーザー照射による超音波発生の原理

レーザー超音波における、超音波すなわち弾性波の発生は、一般に試料表面へのパルスレーザー光の照射によって行われる。弾性波発生には必ずしもコヒーレント光は必要ではないが、発生する弾性波の周波数帯域と光の照射時間には相関があり、非破壊検査の超音波探傷に用いられる MHz 以上の高周波の超音波を効率的に発生させるためには、光照射時間を相応に短くしなければならない。そのため、数 ns 程度の短い光パルスを発生させることのできる Q スイッチパルスレーザーが使用される。Q スイッチパルスレーザー装置としては、初期にはルビーレーザー等が用いられていたが、現在では、早い繰り返し発光が可能な Nd-YAG レーザーなどが一般的に用いられている。Nd-YAG レーザーに代表される固体レーザーは取り扱いも比較的容易であり、最近では、従来のフラッシュランプに替り、半導体レーザーを、レーザー媒体たとえば Nd-YAG 結晶の励起を利用して小型化を図ったレーザー装置も市販されるようになり、光エネルギーをそれほど必要としない用途においての利用が期待できる。また、計測対象となる材料は、一般に光波長により光の吸収度が変化するため、効率よく超音波を発生させるためには、光波長を変える必要もある。たとえば、樹脂や水の皮膜のある材料では、波長  $10.6 \mu m$  の CO<sub>2</sub> ガスレーザーのパルス光が光吸収率が良いため使われる。

パルスレーザー照射による弾性波発生<sup>(1,2)</sup>のメカニズムは、光の放射圧などさまざまな要因が考えられるが、発生効率や発生強度の点からみると、主として熱応力と溶融蒸発（アブレーション）の2つのモードに分けられる。図1にその模式図を示す。レーザー光のエネルギー密度が低い場合、光吸収により材料表面は急加熱され熱応力が生じる。金属では加熱部分はごく表面に限られるため、熱応力による膨張は表面にたいし平行な方向に生じるもののが主となり、これが弾性波の発生源となる。一方、レーザーのエネルギー密度を増大させてゆくと表面の溶融蒸発が生じ、表面物質の気化膨張に伴う圧力が表面に対し垂直方向に生じ、これが新たな弾性波発生源となる。熱応

力は溶融蒸発が始まる時点で飽和し、さらなるレーザーエネルギーの増加とともに気化圧力は増大し、弾性波発生機構は熱応力モードからアブレーションモードへと移行する。

図2はルビーレーザーパルス光の照射によって発生した弾性波の振動変位をマイケルソン型レーザー干渉計により受信した波形である。図3に実験の構成を示す。レーザーパルスの時間幅は半値幅で約50nsであり、レーザーのパルスエネルギーは約0.3Jで一定であるが、照射面積をレンズによって変化させることにより、単位面積あたりのレーザー強度を変化させ、熱応力モードからアブレーションモードへと変化させている。超音波発生モードにより全く異なった波形となり、いずれも縦波と横波が同時に発生する。また通常の圧電素子によるリング波形やパルス波形とはまったく異なった波形であるのが分かる。試料には厚さ10mmのステンレス鋼板を用いている。

金属材料の場合、レーザー光の浸透深さは電磁波の表皮効果によって決まる。浸透深さ、すなわち表皮厚さ $\delta$ は次式で示される。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma f \mu}} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ ：電気伝導度（ $1/\Omega \text{ m}$ ） $\mu$ ：透磁率（ $=1.256637 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ）、 $f$ ：光の周波数（Hz）である。これをもとに、計算すると、鉄やアルミなどでは、レーザー光の浸透深さ（ $1/e$ ）nmは数～10nm程度になり、レーザーによる加熱は極めて表面に限られることがわかる。したがって表面に垂直方向の熱応力は拘束されることなく、超音波発生への寄与は無視できる大きさである。一方、プラスチックなどの非導電性材料の場合、レーザー光は深く浸透し加熱深さが大きいため内部の熱応力による表面垂直方向の運動質量は大きく、したがって表面に垂直方向の熱応力が無視できなくなる。

レーザー照射によって、縦波や横波だけでなく、材料やその構造、形状によってさまざまなモードの超音波が同時に発生するが、注目されるのは、表面波の発生である。材料中へ伝播する縦波や横波の音場や指向性を制御することは容易ではないが、レーザーによる表面波の発生については、試料表面に照射するレーザーの照射パターン形状を変えることによりパルス幅や指向性、集束度を変えることができる。例えば、円輪状に表面にレーザーを照射すれば円の内外に表面波が伝播し、円の中心へは収束

により振幅の増大した表面波が伝播する。また、シリンドリカルレンズなどを用いて直線状にレーザーを照射すれば、直線に垂直方向に伝播する表面波を発生させることができる。縦波、横波に比べ発生強度も大きく、表面の欠陥検査などに有効と考えられる。

## (2) レーザーによる非接触の超音波検出の原理

レーザー超音波における、超音波の検出とは、レーザー等をもちいた光学的手段によって、試料表面に現れる超音波振動を非接触で検出することであるが、その手法はさまざまである。レーザーによる超音波検出技術の代表的な手法を図4に示す<sup>(3,4)</sup>。レーザーの干渉によらない方法としては、図中に示した、試料表面のうねりによる反射光の角度変化を利用するナイフエッジ法が代表的であるが、原理上、試料表面が鏡面でなければならず、実験的利用のみに制限されるため、光干渉による方法がレーザー超音波における非接触超音波検出技術の主流である。

レーザー干渉法によるもっとも基本的な超音波振動検出法は、ホモダイン干渉法<sup>5)</sup>である。ホモダイン干渉法は2つのレーザー光を重ねあわせる2光波干渉法のうち、2つの光に同一の波長の光を用いるもので、干渉実験に一般的に用いられる方法である。ホモダイン干渉法を用いることにより、超音波の微小振動、特に、その変位波形を検出することができる。図5に実験に用いる光学系を示す。ここではマイケルソン型干渉計を用いている。この方法では、レーザー光をプローブ光と参照光に分け、試料表面で反射したプローブ光を参照光と重ね干渉させ、その干渉光の強度変化から超音波振動波形を得る方法である。原理は極めて簡単であるが、安定に超音波波形を得るためにには、図6に示すように、プローブ光と参照光の光路差の変化によって正弦波的周期変化する干渉光の強度が明暗のほぼ中間になるように参照光用ミラーを位置調節する必要があり、圧電アクチュエータなどを用いた極めて微妙な位置制御が要求される。とくに、超音波振動に比較し、周囲の機械的振動は振幅が大きく、除振などを施した環境でなければ、超音波信号の安定的受信は困難である。しかしながら、本手法の大きな特長は、通常の超音波探触子では不可能な、振動変位波形が直接に、しかも、原理的には受信周波数帯域の制限無しに検出できることである。図4のパルスレーザー照射によって発生した超音波はこの方法を用いて検出しており、変位波形を得ら

れることは、研究的には極めて重要なことである。変位が十分小さい場合、干渉光強度は変位に比例し、超音波変位を干渉光強度変化から直接検出することが可能になる。

図7は、図5のホモダイン干渉計の欠点である、外部振動の影響を排除できることを特長とした、時間差干渉法の光学系である。光学系の特長は、最初にレーザー光を試料表面で反射させた後、その反射光を干渉計に導いていることである。また、干渉計内で2分したレーザー光の一方を長距離引き回すことにより、2つのビームを重ねあわせ、干渉させる時に2つのビームの間に時間差を持たせていることである。このような構成をとることにより、本装置では2つのビームの時間差に対応した変位波形の時間の差分波形を得ることができる。この方法では時間差  $t$  に対して周波数  $f = 1/(2t)$  においてもっとも振動検出感度が高くなり、それより低い周波数帯域では振動速度に対応した信号が得られる。外部機械振動は超音波振動に比較し周波数が低く、従って一般に振動速度は小さいため、本干渉法では高周波の超音波振動が大きく受信でき、外部振動信号を軽減できる。参照光の位置調節は図6と同様に必要であるが、試料で反射した後のビームを2分しているため、やはり、機械振動による光路長差の変動への影響は小さく、容易になっている。技術的問題点としては、例えばピーク周波数 10MHz の振動を測定する場合、15 m もの光路差が必要となるため光学系の構築が難しくなることがあり、光学系を光ファイバーで構成し、光ファイバーの長さによって時間差を得ることも行われている。変位が十分小さい場合、干渉光強度は変位の時間差差分に比例し、干渉光強度変化が超音波変位の時間微分、すなわち振動速度に比例し、振動速度波形を得ることができる。

図8に、ホモダイン干渉計と時間差干渉計の光学系で受信した超音波探触子の信号波形と、その周波数特性を示す。超音波探触子で受信した信号と比較し、図5のマイケルソン干渉計では低周波域の信号強度が高く、一方、図7の時間差干渉法では、高周波域の信号が高く受信されており、各々、変位および振動速度検出の特長が見られる。

光ヘテロダイン干渉法は、光周波数の異なる2つのレーザー光を用い、振動のドップラー効果による光の周波数変化を光検出器よりビート周波数変化として検出するもので、レーザによる超音波受信法の一般的欠点である光量変化による感度変動を、周波数あるいは位相検出によりのがれる方法である。機械振動の検出によく用いられる

方法であるが、超音波検出では、変調周波数が数 MHz 以上と高く、超音波周波数への適用には FM 検波回路に工夫が必要となる。試料表面へ 2 つのレーザー光を交差するように照射し、その散乱光のビート信号を用いれば、試料表面の面内振動も検出可能であり、特長のひとつとなっている。

ファブリペロー干渉法とは、その名のように光学計にファブリペロー干渉計を用いた超音波検出法である。ファブリペロー干渉計は一定の光透過率をもつ 2 つの反射鏡を対向させた構造になっており、その反射鏡の間をレーザ光が多重反射する事により、きわめて狭帯域の光のバンドパスフィルタとしてはたらき、分光器や、フィルタとして用いられている光学装置である。超音波検出には図 9 に示すような球面の反射鏡を焦点を共有するように配置した共焦点型ファブリペロー干渉計を用い、手法としては透過法と反射法の 2 つがある。反射鏡の間隔を微調節することにより透過する光周波数域を調節することができ、透過法では振動のドップラー効果によるレーザー光の周波数変調を、透過光量変化として得て超音波振動の検出を行う。図 1.0 に反射鏡の間隔を変化させた時の透過光量変化を示す。周期的に光の透過光強度が変化し、超音波検出には、透過光の急峻な立ち上がり部分を用い、超音波振動による試料からの反射光の微小な光周波数変化を透過光強度変化として検出する。

この方法では共焦点型の干渉計を用いるため、反射鏡内で多重反射するビームが自分自身と重なり、したがって、レーザー光の波面の乱れに関わらず干渉性が保たれる。そのため試料からの反射光量や散乱光量が有効に利用でき、実用性の面で優れている。超音波探触子で発生した超音波の受信波形は、図 8 の超音波探触子受信波形と類似の受信特性が得られている。またコア径の大きいマルチモードファイバを用いて導いたレーザー光を用いた実験でも超音波受信が可能であり、光波面の乱れに対し有効であることが確認できる。反射鏡間隔は定常状態で全体の光の透過率が最大値の半分になるように調整される。また全体の透過率の最大値は共焦点ファブリペロー干渉計では反射間隔の 4 倍の長がレーザー光波長の整数倍なったときに得られる。

上記はファブリペロー干渉計による超音波検出の透過法の場合であるが、反射法は透過光と、入射光がファブリペローの反身鏡の表面で重ね合わされることになる。ファブリペロー干渉計は光バンドパスフィルタとしての働きをし、反射法では、透過光が最小、すなわち、逆に、干渉計中に入射して再び反射して出てくる光量が最大になるようにすることにより、バンドパスフィルタにより選別された一定光周波数の光と

、試料から反射してきた超音波振動による位相変調を含んだ光とが干渉し、位相変調すなわち超音波振動に相当する干渉光の強度変化が得られる。

一般に、透過法では、特定の超音波周波数にピークをもつ超音波受信周波数特性を持つのに対し、反射法ではその特定の周波数より高周波域でフラットな広帯域受信周波数特性を持ち、透過法では、圧電素子による超音波受信と近似した受信特性や波形となる。

## 5. レーザー超音波技術の応用

レーザ超音波の応用については、実験的なレベルではあるが、接着した材料やFRPの剥離検出、表層欠陥検出、受信のみでは、超音波変位波形検出、アコースティックエミッション検出などをはじめとして数多くの例が示されている。

非接触計測という点で、高温の材料への超音波計測の適用はレーザ超音波の重要な応用分野である。炉中に試料をおき、試料温度を上げながら試料の両面より超音波送受信を行えば、縦波と横波の音速をたやすく知ることができる。試料表面の劣化さえなければ千度以上の材料や液体にさえ適用可能である。

もうひとつの利点である微小域での送受信も利用価値が高い。セラミックの欠陥などに対する微小評価技術が要望されているが、レーザの焦点径は数 $\mu$ mまで容易に小さくでき、極めて小さな試料や領域にも応用可能である。

レーザ超音波で発生する超音波波形はパルス状であり広い周波数成分を含んでいる。また検出法を選択すれば超音波受信も広帯域で行うことが可能である。そこで、鋼などの結晶粒径を超音波減衰の周波数特性から推定する方法をレーザ超音波を用いてオンラインで行なうことが検討されている。また板波のような音速の周波数分散がある波の送受も容易に行える。

このようにレーザー超音波の特長を利用したさまざまな超音波計測への応用が考えられるが、以下では、このような応用分野のうち、変位計測、粗面での超音波計測、高温中の材料の超音波送受について述べる。

### (1) 変位計測法としての適用

従来の超音波計測では、一般に圧電効果（ピエゾエレクトリック効果）を有するセラミック振動子や水晶振動子を用いた超音波センサーを用いて、超音波の送受信を行う。このような圧電素子を用いたセンサーは、その構造上、共振周波数をもち、その共振周波数を中心周波数とした周波数帯で、超音波の送受を行う。AE センサーなどに用いる超音波センサーや、パルス時間幅の短い、一般に広帯域型探触子と呼ばれるものでは、圧電素子の前後に、音響整合層や、超音波吸収材などを設け、超音波共振を抑制することにより受信帯域を広げている。このように圧電素子を用いた超音波送受信では、受信帯域を広げ、AE 信号などの振動波形そのものを計測する努力がされているものの、基本的に限定された周波数帯域と周波数特性を持ち、このような特性では、振動変位や振動速度といった、直接的な超音波振動のパラメータを測定することは難しい。

振動変位を計測する目的には、近接させた2つの平面電極の距離により、電極間の電気容量が変化するのを利用する、容量型変位センサーがあるが、材料を一方の電極とする必要があり、また感度を得るためにには、電極間を近づける必要があるなど、使用上の制限がある。一方、レーザー超音波では、各種の光干渉法が超音波検出に用いられるが、そのなかで、特に、マイケル干渉計に代表される、ホモダイン干渉法は原理的に周波数帯域は無限であり、振動変位を直接計ることが可能であるという、研究上非常に重要な特徴を持っている。また、レーザー干渉法では、レーザービームをレンズで収束させて試料表面に照射すれば、容易に数 $\mu$  m の微小領域での超音波変位計測が可能となる。

また干渉計による超音波変位計測では、探触子では困難な、振動振幅の絶対値測定も可能である。ホモダイン干渉法では、光路差の変化が干渉光の強度変化となって現れる。連続的に光路差が変化すると、干渉光強度は正弦波状に周期変化し、その周期は光波長の1/4である。従って、光路長調節用の圧電素子を貼り付けた参照光ミラーを十分に大きな振幅で振動させ、干渉光強度の振幅を計測すれば、実際の超音波による振動振幅を校正することができる。ちなみに、ここで得た超音波変位の大きさはピーク値で約2nmであった。従来の圧電素子による超音波計測では一般に他の探触子間で感度を校正することは難しくそのため超音波探傷では、感度校正のための標準試験片を必要としていた。レーザー光干渉を用いた超音波計測では、ここに示したホモダ

イン法に限らず、レーザー光の波長を基準として絶対値校正することが技術的に可能であり、利点のひとつとなっている。

### (2) 粗面試料への適用

圧電素子を用いた超音波非破壊検査においては、被検査材の表面性状は超音波送受信強度に大きな影響を及ぼし、欠陥検出・評価精度を左右するため、表面粗さと超音波透過強度の関係などが検討されている。また、粗面試料では、試料表面の凹凸部に水や油などの音響伝播媒体が入り込み、平坦な試料表面に比べ、音響伝播媒体の音響インピーダンスなどの影響が顕著になる。また、ゴム等の弾性膜を音響伝播媒体として、試料に押し付け、試料を汚損することなく粗面試料に対し超音波送受を行う方法もあるが、一般に音響伝播媒体を用いることのできない粗面試料では超音波送受をおこなうことは困難である。一方、レーザー超音波においては、超音波の発生に関しては、レーザー照射によって試料表面を加熱するだけであるため、試料表面の粗さはほとんど問題とならない。超音波検出においては、粗面では、超音波検出用のレーザー光が散乱されるため、試料表面から干渉計へ戻るレーザー光量が減少するとともに、レーザー光の波面が乱されスペックルパターンが生じるため、レーザー光の干渉性が悪くなり、通常、大幅な感度低下が生じる。しかしながら、散乱光により生じる問題は、超音波振動検出の原理に関わるものでないため、干渉信号さえ得られれば、超音波振動振幅を定量的に計測可能である。特に、圧電素子では、粗面による超音波送受信号の低下を校正することは困難であるのに対し、レーザー超音波では、定量化が可能である点で、粗面での超音波受信の優位性は大きい。

### (3) 高温中の材料への適用

レーザー超音波の第一の特長である非接触計測という点で、高温の材料への適用は極めて重要な応用分野である。従来より、高温中の材料の超音波計測、すなわち音速測定などが行われてはいるが、導波用の棒を使うなど容易ではなく、このような実験がレーザー超音波で行うことかできれば、材料物性の研究の有力な計測技術となることが期待できる。高温の材料への超音波送受の技術としては、すでに、磁界と渦電流

との相互作用を利用した電磁超音波の技術がある。超音波伝播媒体が必要無く、非接触で超音波送受か可能であるが、電磁誘導を利用していいるため、センサーと試料との距離を大きくとれること、試料が導電体でなければならぬことなどの制限がある。一方、レーザー超音波では、試料からの反射あるいは散乱光の光量が十分取れさえすれば、遠隔からの超音波受信が可能であり、またさまざまな材質や小さな試料へも適用可能であるなど、たとえば炉の中の試料への適用などでは有利な特徴を持つている。

## 6. まとめ

レーザー超音波の要素技術である、パルスレーザー照射による非接触弹性波発生と、レーザー干渉法による非接触超音波検出について検討を行い、各要素技術の基本特性について明らかにするとともに、レーザー超音波の技術的基礎について調査した。

パルスレーザー照射による弹性波発生では、レーザー強度により区別される弹性波発生の熱応力モードとアブレーションモードがあり、その特異な弹性波振動波形、縦波と横波の同時発生についての知見を得た。

レーザー干渉による超音波受信では、ホモダイン干渉法、時間差干渉法、共焦点ファブリペロー干渉法について、探触子によって発生させた超音波に対する、各検出法の特性について波形および受信周波数特性を考察した。

また、従来の超音波計測技術に対するレーザー超音波技術の利点を明らかにするべく、超音波探触子シミュレーションによる計算波形との比較による超音波変位計測法としての必要性、プラズマ溶射皮膜材料をはじめとした粗面試料での超音波検出による粗面での超音波計測の適用性、高温中の材料への超音波受信の適応性と高温中の材料の評価法としての可能性を考察した。

## 参考文献

- (1) D. A. Hutchins : Mechanisms of Pulsed photoacoustic generation, Can. J. Phys., 64, 1247-1264 (1986)
- (2) C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins and S. B. Palmer : Research Techniques in Nondestructive Testing Vol. 5, Academic Press, London (1992)
- (3) J. -P. Monchalin : Optical detection of ultrasond, IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Contr., UFFFC-35(5), 485-499 (1986)
- (4) R. S. Sharpe : Research Techniques in Nondestructive Testing. Vol. 7, 259-365, Academic Press, London (1984)
- (5) 桑原五郎 : 光学技術、共立出版、143-150 (1984)

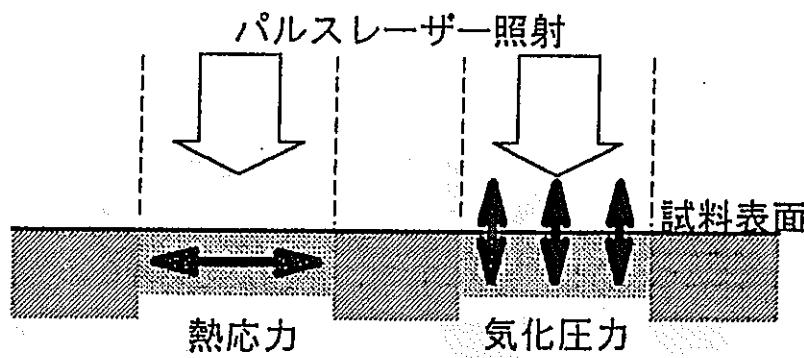


図1 パルスレーザー照射による主な弾性波発生モード（熱応力と気化圧力）

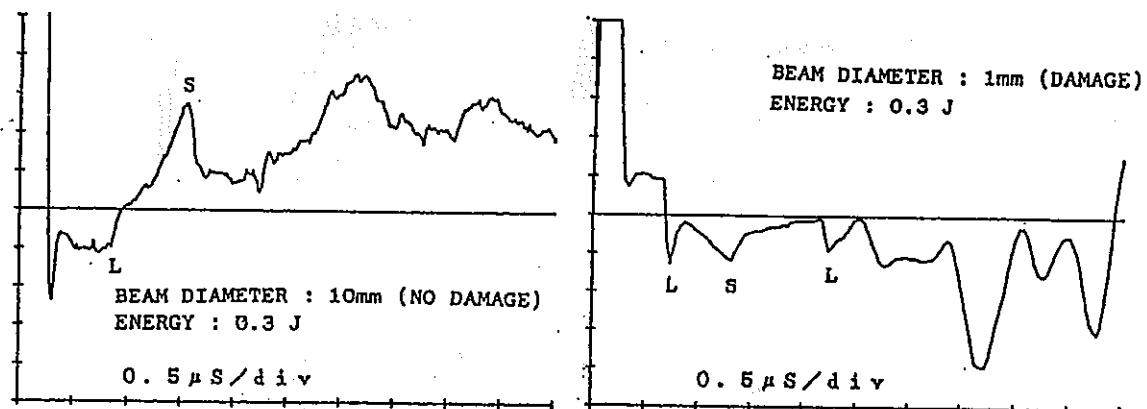


図2 ルビーレーザー照射により発生した弾性波（左：熱応力、右：アブレーションモード）

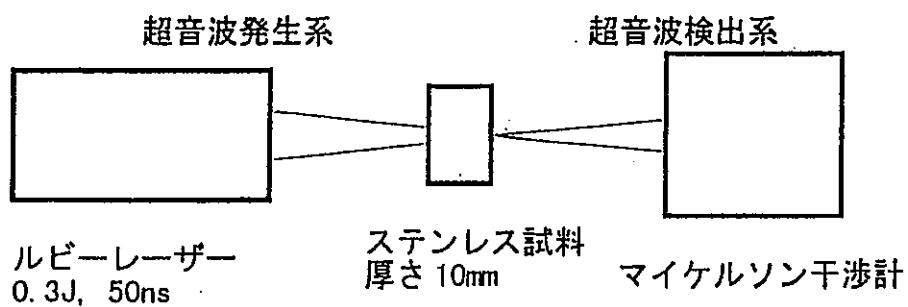


図3 非接触超音波送受信実験の概略

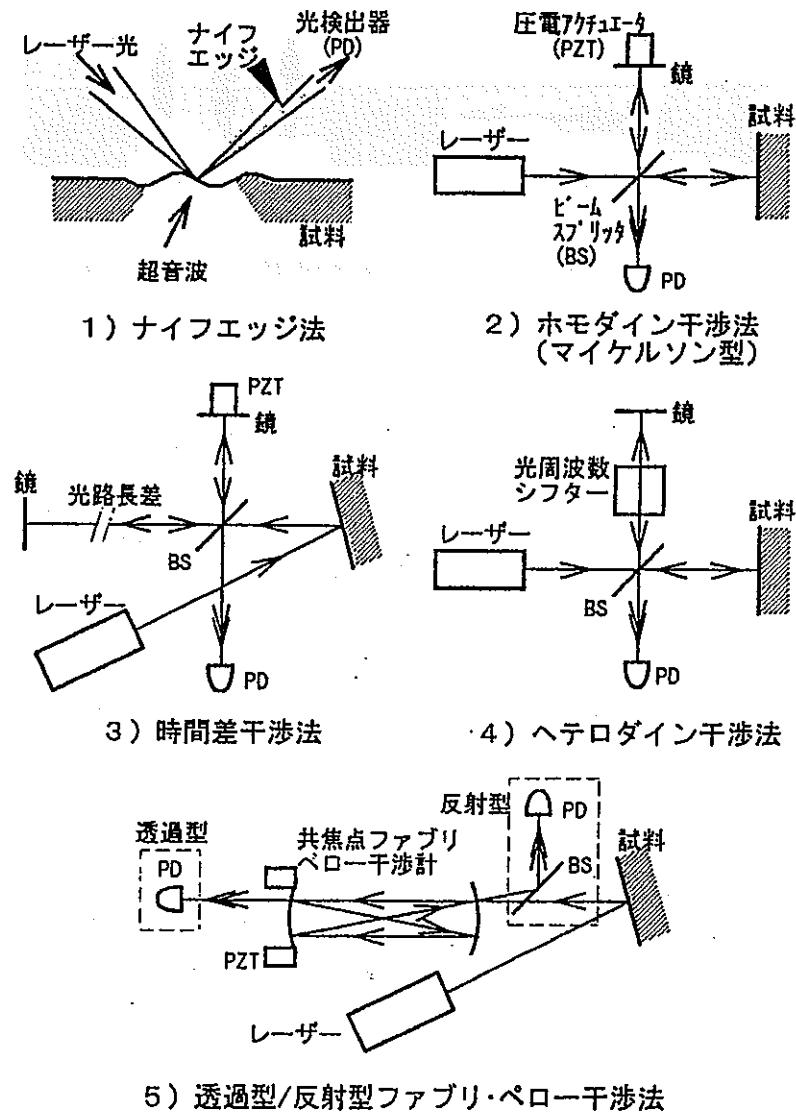


図4 レーザー光を用いた超音波振動の各種検出法

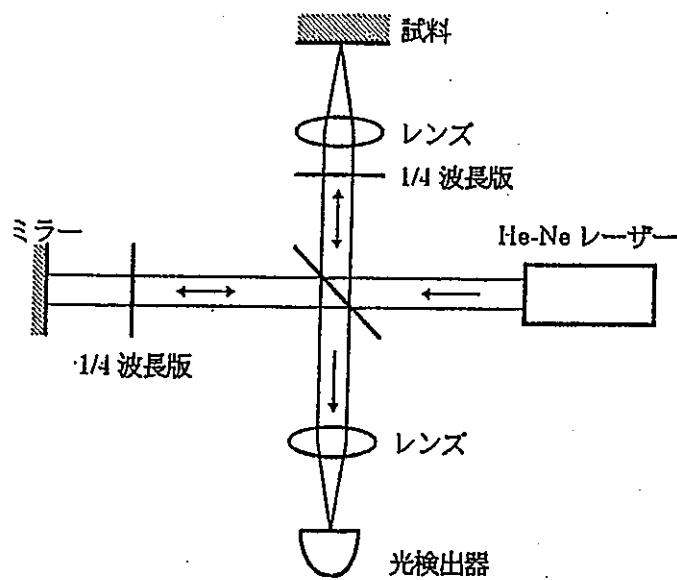


図5 超音波検出のためのホモダイン干渉計（マイケルソン型）

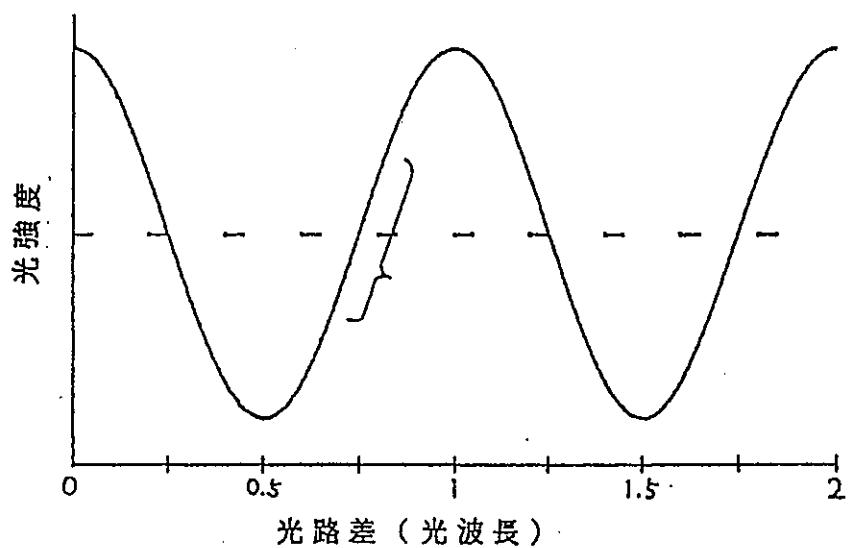


図6 ホモダイン干渉における光路長変化と干渉光の強度変化との関係

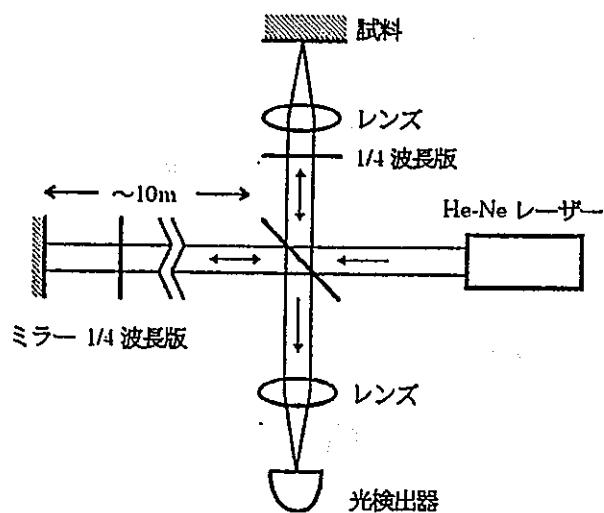


図 7 超音波検出のための時間差干渉計（マイケルソン型）

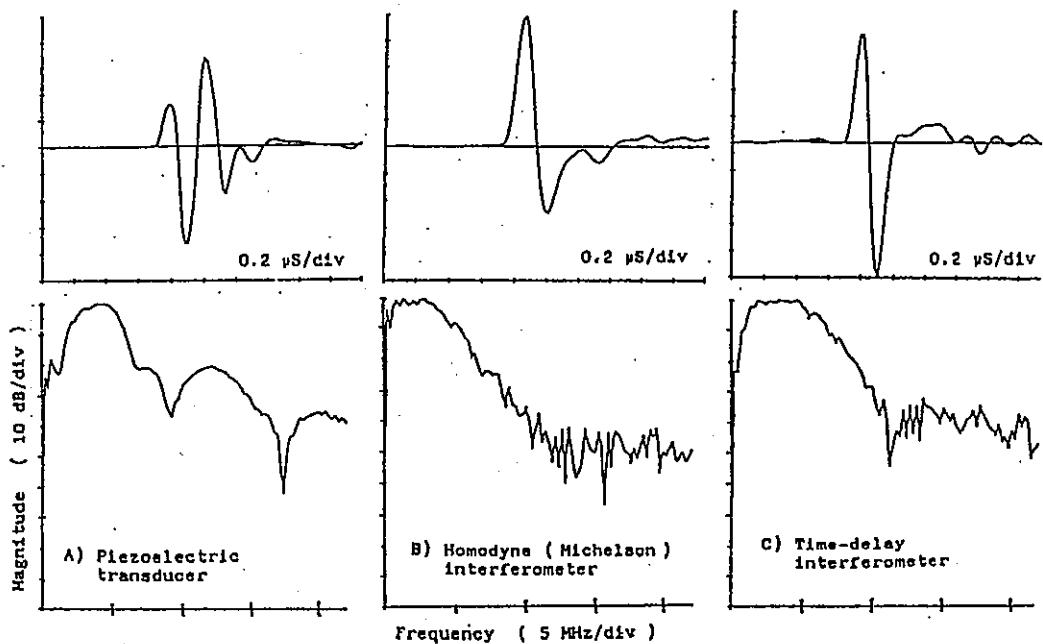


図 8 超音波探触子で受信した超音波波形（左）と、ホモダイン干渉法（中）、時間差干渉法（右）で受信した超音波波形（上）とその周波数スペクトラム（下）

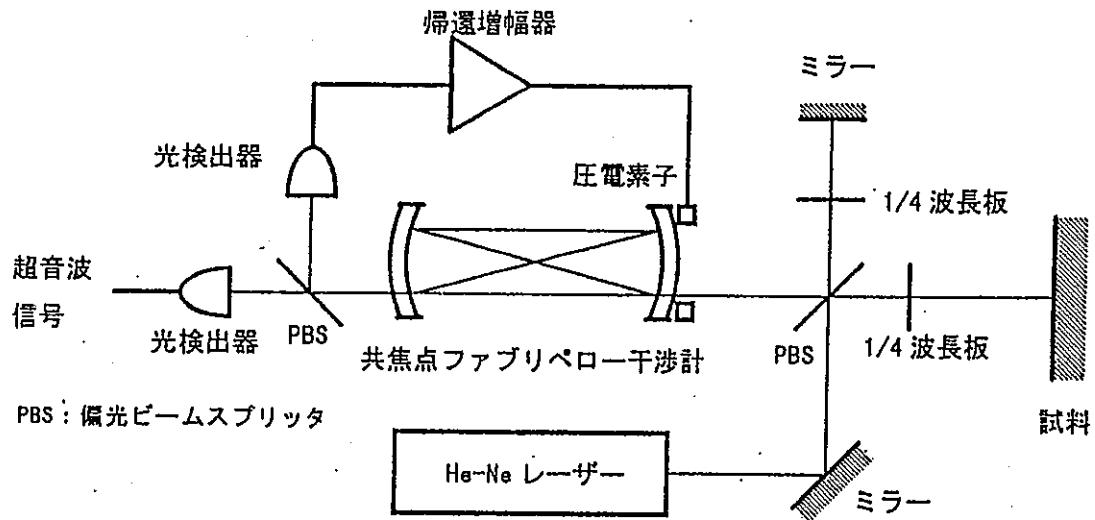


図 9 超音波検出用共焦点ファブリペロー干渉計の構成

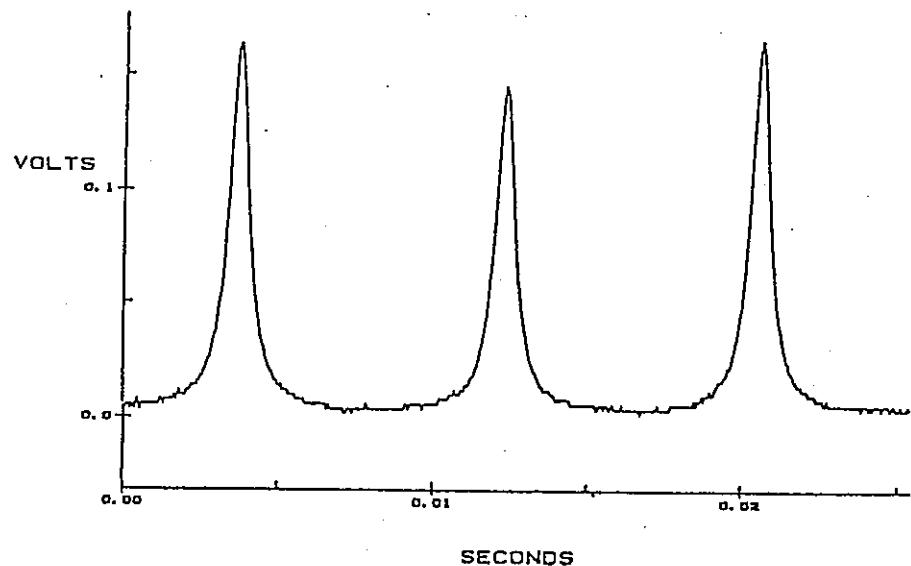


図 10 ファブリペロー干渉計の光透過特性