

き裂進展のモニタリング技術開発に関する基礎研究

(先行基礎工学分野に関する平成9年度報告書)

1998年3月

東京大学 先端科学技術研究センター

本資料の全部または一部を複写・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section.
Technology Management Division.
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1998

き裂進展のモニタリング技術開発に関する基礎研究

榎 学* 岸 輝雄*

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。従来のひずみゲージや圧電素子を使う方法に比べて、レーザー超音波を用いる方法では、焦点位置を移動させることにより任意の点における計測が可能であり、また低周波域から高周波域まで一つのセンサーを用いて検出可能である。そこで本研究においては、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を用いて、機器・構造物において発生する振動、き裂やその進展をモニタリングするための装置の開発を試みた。レーザー超音波システムを、Qスイッチを有する Nd-YAG レーザーを入射に用い、受信用として He-Ne レーザーを用いることにより作製した。また受信したレーザーからマイケルソン干渉計の原理を用いて、試料表面での振動の速度成分を計測するシステムを組み立てた。この装置を用いて、鋼材においてレーザーによる超音波の発生とレーザーによる超音波の受信を行うことに成功した。また、これら信号の計測が妥当であることを確認するために、三次元差分を用いて試験片中の波動伝播のシミュレーションを行った。さらに、この装置を用いて材料中に発生する AE 信号を検出することを試み、確かにレーザーにより AE 信号の測定ができるることを明かにした。

なお、本報告書は、東京大学の実施分についてのものである。

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・核燃料開発事業団との共同研究により実施した研究の成果である。

契約番号 : 094F036

事業団担当者 : 安全工学部 機器・構造安全工学室 榎原 安英

*) 東京大学 先端科学技術研究所センター

Basic Study of Monitoring for Crack Propagation

Manabu Enoki*, Teruo Kishi*

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. By comparing with conventional strain gage and PZT, laser based ultrasonic method can sense any points at surface of materials by moving the focus point and it is possible for this method that a signal from low frequency to high frequency can be detected by one sensor. In this study, we have developed the equipment to detect vibration, crack generation and propagation in machine and structure by using the laser based ultrasonic sensor which is the most advanced one. The laser ultrasonic system consists of the incident Nd-YAG laser with Q-switch and the receiving He-Ne laser. The Michelson interferometer was used to detect the surface velocity of steel specimen. This system could be able to generate and detect an ultrasonic wave by laser. This experimental wave was confirmed by the simulation result of wave propagation in the specimen by the three-dimensional finite difference method. Also the acoustic emission signals which were generated in materials could be detected by this laser system.

This report is a work at The University of Tokyo under collaboration study with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

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 : 094F036

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. レーザー超音波技術の原理	2
3. レーザー超音波システム	4
4. 波動伝播のシミュレーション	5
5. レーザー AE 法	6
6. まとめ	7
参考文献	8

図リスト

図 1	レーザー照射により発生する弾性波のモード	9
図 2	レーザー干渉計の原理	9
図 3	レーザー超音波システムの概要	10
図 4	人工欠陥検出試験	10
図 5	人工欠陥がある場合とない場合のレーザー反射波形の違い	11
図 6	レーザー超音波法により計測された表面速度	11
図 7	三次元差分法におけるレーザー照射の際の入力	12
図 8	三次元差分法による表面速度の計算例	12
図 9	三次元差分法による表面変位の計算例	13
図 10	三次元差分法による表面変位の板厚の影響	13
図 11	Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料における模擬音源の入力	14
図 12	シャープペンシル芯圧折の際の信号	14
図 13	Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料の 3 点曲げ試験における AE 計測	15
図 14	3 点曲げ試験における従来型 AE センサーとレーザー AE の比較	15

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研究を行った。材料の内部に生じる損傷は外部からは光学的には観察することができない。そこで種々の非破壊検査手法が開発され実際に用いられている。その中には大きく分けて、放射線を用いるものと超音波を用いるものがある。X線のような放射線を使用して非破壊検査を行うためには、入射したX線を材料中を透過した後に検出する必要があり、そのためどうしても装置が大掛かりとなるので、その用途が限られてしまう欠点がある。しかし、超音波の場合には材料中の欠陥から反射してくる弾性波を使用することにより検査が可能であるので、機器の設置に関する問題は比較的小ない。また、現在用いられている弾性波検出のための圧電素子は比較的小型であるので、その点においても設置に関しては有利である。

また、超音波を非破壊検査に用いる場合、強力な超音波を入力して、その反射波を捕らえて診断を行う、いわゆる超音波探傷と、材料中において微視破壊が生じることにより発生した弾性波を用いるアコースティック・エミッション(AE, Acoustic Emission)がある。超音波探傷においては、その検査の特徴から検査の時期を任意に選ぶことが可能である。しかし、AEの場合にはその発生を待ち構えて検出する必要があり、連続的にモニタリングを行って初めて全体の破壊の特徴を理解できるので、有効な計測のためには常にAEを監視し続けることが必要である。また、超音波探傷において欠陥を見つけるためには強力な超音波の入力が必要であり、さらに小さな欠陥を見つけるためには高い周波数の超音波を用いる必要がある。その場合、材料中での減衰が大きくなるために、深い位置での欠陥は検出が難しいことになる。一方、AEは自発的な弾性波放射現象を捕らえるので、超音波探傷に比べて比較的小さな欠陥を見つけることができる。しかし、小さい割れを検出するためにはそれに合わせて感度を大きくする必要があり、その結果雑音にも敏感になってしまい、本当の信号と雑音を区別することが難しくなる。そのため、機械的な雑音やあるいは電気的な信号が背景に存在するような場合には、AEを利用して非破壊検査を行うことが困難である。

超音波を利用して非破壊検査を行う際に用いられる探傷のためのプローブは圧電素子である。試験片レベルの大きさのものであれば、水中では音波の減衰が非常に小さいことを利用して、水中に試料を入れて検査をするのが一般的であり、検出能力も大きい。しかし、実機の場合にはそのような水槽を用いることが不可能なので、超音波探触子を直接構造物に接触させて超音波を発生させたり、検出することになる。超音波の減衰を少なくするためにには、減衰の少ない接着剤を用いて構造物とセンサーを強固に接着する必要がある。しかし、そのため反ってそれを取り除くのが難しくなるために、非常に使用しにくくなってしまう。また粘性の高いものを用いる方法もあるが、そのような媒体は超音波の減衰が大きくなるため、移動が可能になる分信号が弱くなったりしてしまう問題点が生ずるので、

実際の検査において使用するのが難しい。また電磁超音波法と呼ばれる方法においても、非接触での計測が可能であるが、この方法において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用いるため、材料が導電性でなければならないという条件が付く。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。

そこで、材料の内部の欠陥を本当の意味で非接触で検出できる計測方法が望まれる。そのための有望な手法として、レーザーを用いる方法がある。近年のレーザー技術の発展および普及により、その能力や機能が向上するとともに、民生用機器として広く使われるようになってきており、装置自体の価格も低下しており、装置の開発も容易となってきている。レーザーを用いる非破壊検査手法として、レーザーで超音波を発生させて材料中に入射して、反射波を別のレーザーを用いて検出するレーザー超音波法が考えられる。また、前述したように材料中に発生する微視破壊による弾性波を検出するレーザー AE 法も考えられる。これらの手法の最大の利点は、材料表面での振動を非接触で検出できることであり、またレーザーの性質により空中での減衰が少ないためにレーザー発生点と材料での入射点を大きく離すことができる。このため検査のための空間的な制限が非常に少なくなるという特徴もある。また、そのため対象の材料が高温であっても可能であるし、あるいは材料の存在する雰囲気にもあまり影響を受けないという利点がある。

本研究では、このようなレーザー超音波の原理についてまとめるとともに、レーザー AE 法を用いて AE を計測する装置を開発し、その計測上の問題を明らかにするとともに、波動のシミュレーションを行うことにより、この手法の定量性についての検討を行った。

なお、本報告書は、動燃事業団との共同研究において、東京大学の実施分についてのものである。

2. 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ごく最近である。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。ここではまず、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述べる。

(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

問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とのできる Q スイッチパルスレーザが使用される。Q スイッチパルスレーザー装置としては、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 $10.6 \mu\text{m}$ の CO₂ 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。

(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、レーザー等を用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が、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となっている。

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 2 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、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

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。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。

3. レーザー超音波システム

前章で述べたような原理に基づいてレーザー超音波システムの開発を行った。また、レーザー超音波を用いることによりいわゆる超音波探傷と AE 計測が可能となるが、ここではまず超音波探傷が可能なシステムについて述べる。

(1) レーザー超音波装置

本研究で開発を行っているレーザー超音波システムの概要を図 3 に示す。入射レーザーとして Q スイッチングによる高出力 Nd-YAG レーザーを用いた。このレーザーの性能は最高出力 20mJ、波長 532nm、パルス幅約 6ns である。また、受信用としては、波長 632.8nm の He-Ne レーザーを使用した。内部欠陥の深さ方向の情報を得るために両方のレーザーを同方向より入射する反射方式を採用した。試料内に入力される超音波の強度は入射レーザーの照射面積に依存するため、集光レンズを用いて絞り込むことを行った。これにより照射径を $10\mu\text{m}$ にすることにより、セラミックスなどにおける微小欠陥を検出することが可能になると考えられる。また、波形解析における誤差を少なくするために、両方のレーザーを同軸として、パワー光ファイバーを経由して同一のレンズに入力した。レーザー信号の受信には、マイケルソン型干渉計を組み込んだドップラー振動計を用い、理論上 $0.3\mu\text{m/s}$ までの速度変化を測定することが可能である。また、試料の機械的な振動をさけるためにハイパスフィルター (HPF) を 100Hz とし、さらには除振台を用いた。またローパスフィルター (LPF) は 100kHz および 20MHz とし、雑音の程度および入力信号強度により変化させた。さらに、ドップラー振動計からの信号は波形収録装置に入力し、サンプリング間隔 50ns、波形長 $50\mu\text{s}$ で連続的に取り込み、コンピュータにデータを記録した。

(2) 人工欠陥検出試験

上記のレーザー超音波システムの性能を確かめるために、鋼材 (SUS304) に人工欠陥を導入してその欠陥を検出できるかの試験を行った。試験に用いた試験片形状を図 4 に示す。ファインカッターで試験片側部からノッチを導入し、試験片の上部からレーザーの入力お

より受信を行った。また、その測定点を移動させ、ノッチの上になる場合とノッチから外れる場合の2点における波形を測定した。また、レーザーの入力は3mJ としアブレーションモードで超音波を発生させた。また LPF は 100kHz として計測を行った。図 5 に得られた試験片表面での速度を示す。欠陥がない場合には試料下部での反射による影響のみが見られるが、欠陥がある場合には欠陥からの反射や試験片上部からの反射が続いているのが観察された。このように、レーザー超音波を用いることにより水深での超音波探傷と同様に材料内部に生ずる欠陥の検出が可能であることが確認できた。ただし、その検出能力やあるいは走査して C スキャンを行う際の問題については今後の課題であるといえる。

4. 波動伝播のシミュレーション

レーザー超音波で得られる受信信号は一般的に、圧電素子を用いるものに比べて定量的である。すなわち干渉計を用いることにより、速度成分や変位成分を直接取り出すことが可能である。それに対して圧電素子を用いる場合は、複合的な応答が生じるため、どうしてもセンサーの較正が必要となる。しかし、レーザーを用いる場合では、入力状態については必ずしも明らかではないので、対象材料において発生する超音波に対する何らかの較正が必要となる。そこで、本研究室で開発した三次元の差分法を用いて波動伝播のシミュレーションを行った。

(1) 三次元差分法

実際の試験片で計測される信号を用いて定量的な解析を行うためには、媒体の波動伝播のグリーン関数を求めることが必要となる。有限媒体内での波動伝播を求めるためには、どうしても数値解析手法が必要であり、有限要素法、境界要素法、差分法などを用いることができる。有限要素法はもっとも一般的な方法であるが、本研究で対象としているような弾性波の解析のような動的な問題を解くためには、高価なパッケージを購入する必要があり、またコンピュータに要求されるパワーも大きいものがある。境界要素法は近年盛んに用いられるようになってきた方法であり、要求される記憶容量は大きくはないが、数学上の解析的な技術が要求される。差分法はそのアルゴリズムが比較的簡単であるためによく用いられている方法であり、プログラム開発も比較的容易に行うことが可能である。そこで本研究では三次元の差分法のプログラムを用いて波動伝播の解析を行った。

等方弾性体の弾性波の波動方程式は、次式で与えられる。

$$\rho \ddot{u} = (\lambda + \mu) u_{,ki} + \mu u_{,kk}$$

ここで、 λ 、 μ はラーメの定数であり、 ρ は密度、 u_i は変位、 t は時刻を表す。ここで総和規約を用いた。また、境界条件としては全表面が自由表面であると仮定する。また、表面上の点に力を入力する場合は、入力する力を格子点間隔の平方で割ったものを応力とし

て与えればよい。以上の、波動方程式、境界条件、入力条件をすべて差分化して差分スキームを求めてから、それらを用いて計算を行う。時間ステップ Δt と格子点間隔 Δl の間に収束条件として

$$\Delta t / \Delta l \leq (\alpha^2 + 2\beta^2)^{-1/2}$$

の関係があるのでこれを満たすようにパラメータを設定する必要がある。ただし、 $\alpha^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$ 、 $\beta^2 = \mu / \rho$ である。また境界点の差分を行うためには、格子点の外側に仮想格子点を考える必要があり、表面での変位は内部の点と仮想格子点での値の平均として考えるのが妥当である。またコーナーにおいても特別の扱いを行う必要があり、滑らかなコーナーを仮定して垂直応力と面内せん断応力がゼロであるとして差分式を作った。

(2) 波動伝播解析

前述のように、レーザーで超音波を励起してその反射波形を別のレーザーを用いて計測することが可能となった。図 6 に示したのは、SUS304 鋼の $25 \times 280 \times 110$ mm の板の中央に 20mJ の Nd-YAG レーザーを入力して、表面での速度波形を計測したものである。入力はアブレーションモードであった。また、受信側レーザーの LPF は 20MHz とし、200 回のアベレージング処理とノイズ減算処理を行い、S/N 比の改善と定常雜音の低減を図った。この得られた波形の妥当性を検討するために、三次元差分法を用いて波動伝播のシミュレーションを行った。

SUS304 を想定して、弾性定数を $\lambda = 5.42$ GPa、 $\mu = 2.67$ GPa とし、 $90 \times 90 \times 45$ mm の形状の試験片を考えて計算を行った。差分法の計算においては、空間メッシュの大きさを 1mm とし、時間ステップを $0.1 \mu s$ とした。表面に垂直な方向にレーザーを入射したとして、レーザーの熱応力モードはアブレーション、照射径 2mm、半値幅 $1 \mu s$ 、大きさ 50MPa の初期応力を入力した(図 7)。計算された表面での速度波形を図 8 に示す。解析条件が厳密に一致しないので絶対値の比較はできないが、得られた波形と実験での結果はよい一致を示しており、このシステムの有効性が確認された。また、図 9 に変位波形の例を示す。入力波形の後に試験片底面での反射による縦波と横波の到達がはっきりと観察できた。さらに図 10 に板厚の影響を示した。板厚が大きくなると反射波が小さくなるため、波形の後の部分も小さくなることがわかる。一方、板厚が薄くなると反射波の影響が大きくなるので、波形の後の部分でも大きな信号になっているのがわかる。

5. レーザー AE 法

(1) レーザー AE 装置

前述のレーザー超音波装置の受信部だけを用いることにより、AE 波形の検出が可能であ

る。そこで、このレーザー AE システムの特性を調べるためにまず、AE の擬似信号としてよく用いられるシャープペンシル芯の圧折を行い、それによる信号を従来型の圧電素子からなる AE センサーとレーザーを用いて計測し比較を行った。ただし、図 11 に示すように AE センサーを取り付けた位置においてはレーザーによる計測ができないので、AE センサーはオフエピセンターに取り付けた。また、試料は Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料であり、その大きさは $50 \times 4 \times 3\text{mm}$ であった。この材料は高温酸化雰囲気での使用のために開発された繊維強化複合材料であり、高温での破壊挙動の解明が望まれている。また、同じく高温での非接触の非破壊評価手法の確立が重要となっている。図 12 に両方のセンサーにより記録された信号を示す。センサー位置が対象でないために直接比較はできないが、従来型の AE センサーの方が感度がよいことがわかる。しかし、レーザーを用いてもある程度の信号が検出できると判断される。

(2) レーザー AE 法による AE 計測

上記の Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料の三点曲げ試験を行った。図 13 に示すようにレーザーを用いた場合の信号を増幅するために試験片表面には反射シールを取り付けた。図 14 には、曲げ試験中に計測された AE 信号を、従来型の圧電素子による AE センサーからの出力とレーザー AE 法により得られた結果を示す。一つの AE 事象が両方の方法により計測できることがわかる。ただし感度は、レーザーによるものが圧電素子によるものの半分以下であった。最終的にはっきりと AE と計測されたものは 15 個であった。

6. まとめ

本研究ではレーザー超音波システムを、Q スイッチを有する Nd-YAG レーザーを入射に用い、受信用として He-Ne レーザーを用いることにより作製した。また受信したレーザーからマイケルソン干渉計の原理を用いて、試料表面での振動の速度成分を計測するシステムを組み立てた。この装置を用いて、鋼材においてレーザーによる超音波の発生とレーザーによる超音波の受信を行うことに成功した。また、これら信号の計測が妥当であることを確認するために、三次元差分を用いて試験片中の波動伝播のシミュレーションを行った。またさらに、この装置を用いて材料中に発生する AE 信号を検出することを試み、確かにレーザーにより AE 信号の測定ができるることを明かにした。

このようにレーザーを用いて材料において生じている様々な振動を検出することが可能となったが、実際の構造物にこの手法を適用するためにはより一層の計測感度の向上が望まれる。またレーザー AE の計測においては試験片のたわみのような低周波の振動が問題となるので、このようなノイズを克服してより雑音に強いシステムも望まれる。今後はこれらの点に注目して研究を行う必要があると考えられる。また、超音波探傷として用いるためには、レーザーヘッドをスキャンさせるシステムの開発も必要となることだろう。

参考文献

- 1) M.Enoki and T.Kshi: Theory and analysis of deformation moment tensor due to microcracking, International Journal of Fracture,v38,pp295-310,(1988)
- 2) 金城鉄男, 鈴木裕晶, 竹本幹男:GFRP 中の微小破壊のダイナミックスに及ぼすガラス繊維／マトリックス界面性状の影響(第 2 報, AE 原波形解析法による破壊のダイナミックス), 日本機械学会論文集(A 編), 63 卷, 616 号,pp2649-2654,(1997)
- 3) H.Cho, H.Sato and M.Takemoto: Surface acoustic wave velocity and attenuation dispersion measurement by phase velocity scanning of laser interference fringes: Japanese Journal of Applied Physics,v35,n5B, pp3062-3065,(1996)
- 4) H.Nishino, Y.Tsukahara, C.Hideo, Y.Nagata, T.Koda and K.Yamanaka: Generation and directivity control of bulk acoustic wave by phase velocity scanning of laser interference fringes, Japanese Journal of Applied Physics,v34,n5B,pp2874-2878,(1995)
- 5) 山中一司: 位相速度走査法による非接触超音波計測, 非破壊検査,v45,n5,pp330-336,(1996)
- 6) H.Nakano, S.Nagai and H.Imai: Dtermination of the elastic moduli of a machinable ceramic over the range from room temperature to 800 degree C, International Journal of Thermophysics.,v8,n4,pp437-480,(1987)
- 7) H.Nakano and S.Nagai: Crack measurements by laser ultrasonic at high temperature, Japanese Journal of Applied Physics,v32,n5B,pp2540-2542,(1993)
- 8) R.J.Dewhurst and O.Shan: Through-transmission ultrasonic imaging of sub-surface defects using non-contact laser techniques, Optics and Lasers in Engineering,v16,pp163-178,(1992)
- 9) J.P.Monchalin and R.Heon: Laser Ultrasonic generation and optical detection with a confocal fabry-perot interferometer, Materials Evaluation,v44, pp1231-1237,(1996)
- 10) H.Yamawaki, T.Saito, H.Fukuhara, C.Masuda, Y.Tanaka: Noncontact ultrasonic imaging of subsurface defects using a laser-ultrasonic technique, Japanese Journal of Applied Physics,v35,pp3075-3079,(1996)
- 11) C. Harvey Palmer : Sensitive Laser Interferometer For Acoustic Emission and Ultrasonic NDE, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, v.5A,pp651-658,(1986)
- 12) Douglas A. Bruttomesso, Laurence J. Jacobs, Associate Member, ASCE, and R.Daniel Costley : Development of interferometer for acoustic emission testing, Journal of Engineering Mechanics,v119,n 11,pp2303-2316, (1993)

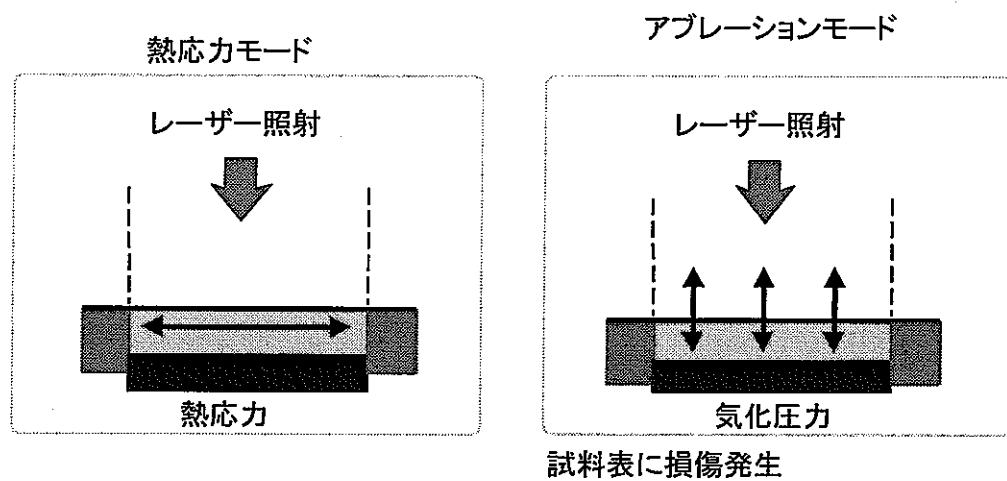


図1 レーザー照射により発生する弾性波のモード

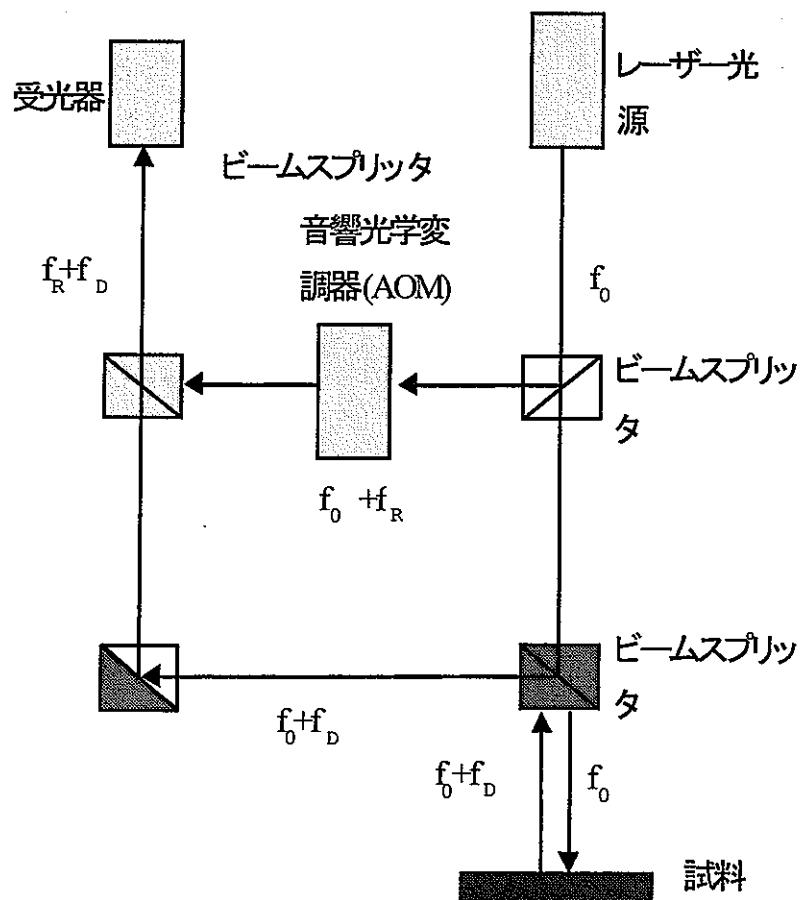


図2 レーザー干渉計の原理

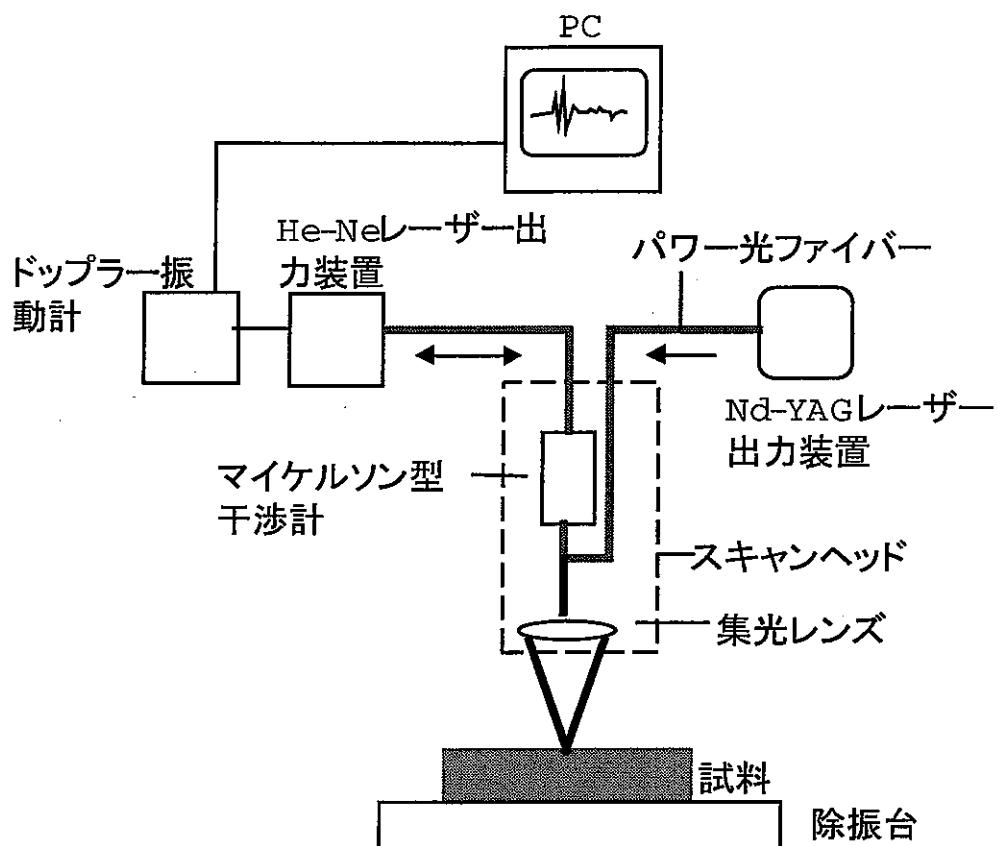


図3 レーザー超音波システムの概要

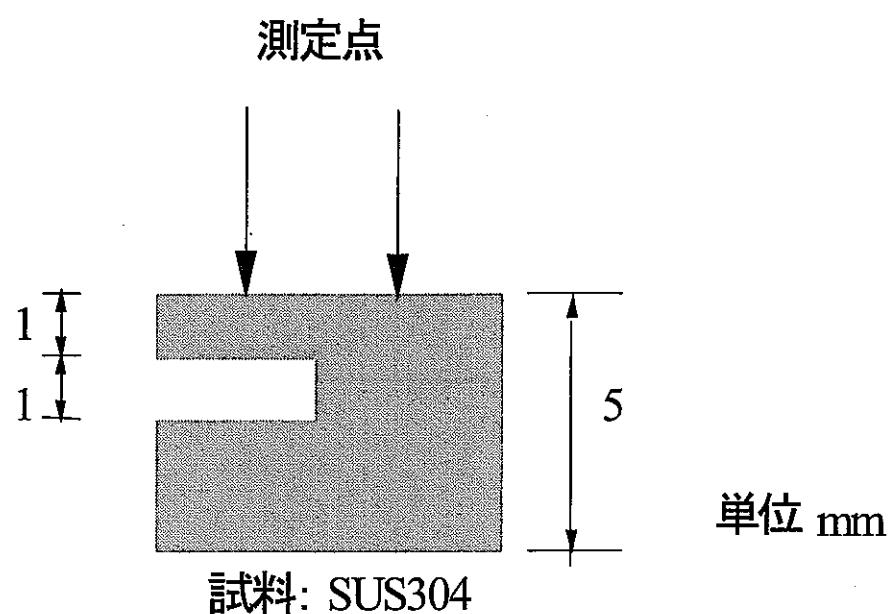


図4 人工欠陥検出試験

H.P.F: 100Hz
L.P.F: 200kHz

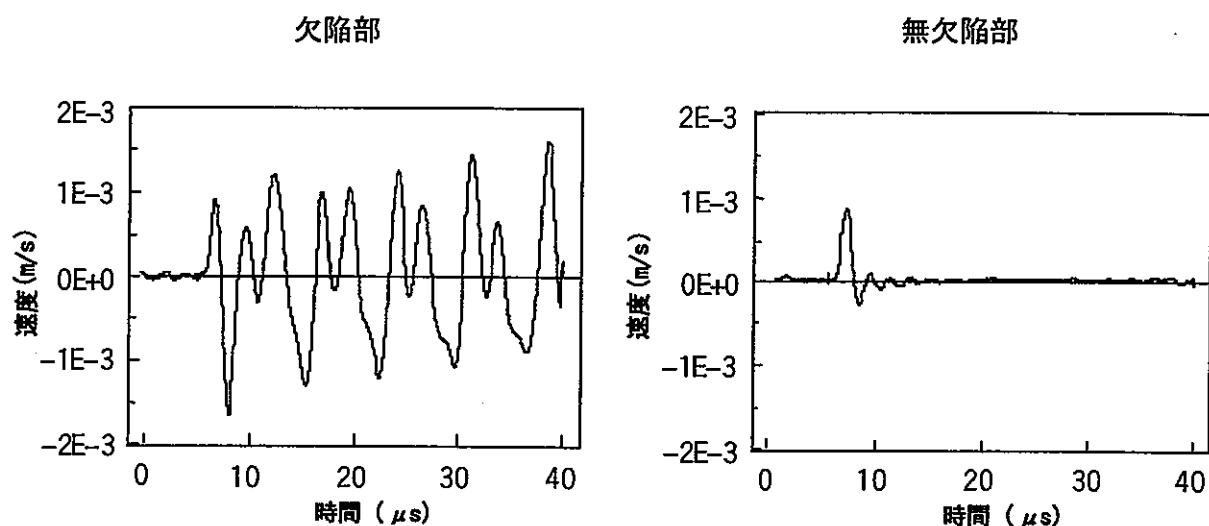


図5 人工欠陥がある場合とない場合のレーザー反射波形の違い

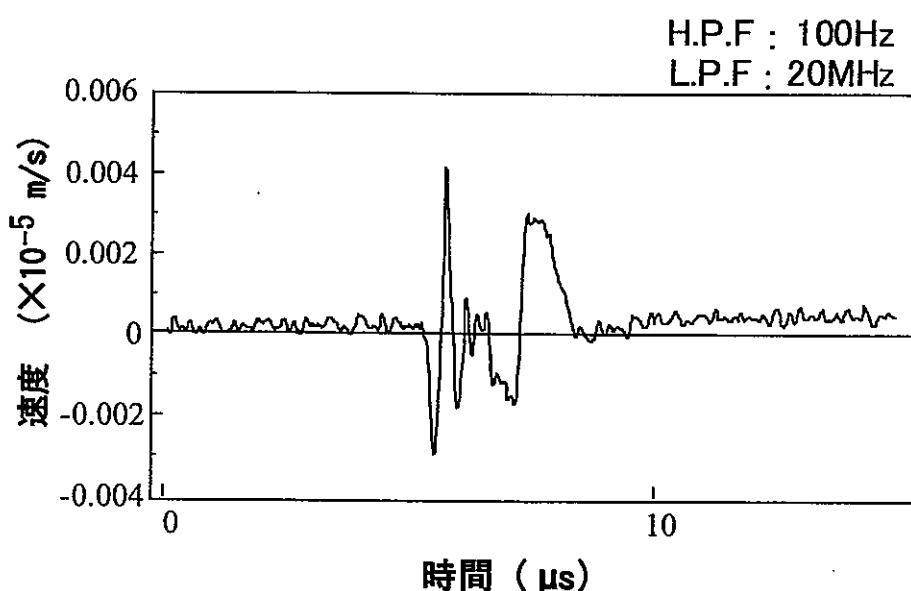


図6 レーザー超音波法により計測された表面速度

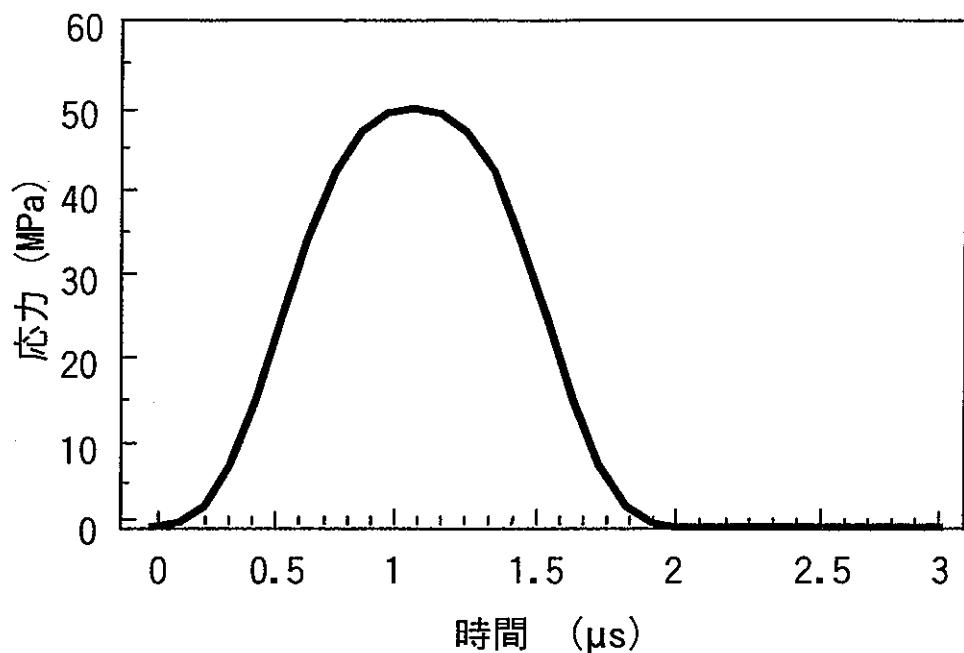


図7 三次元差分法におけるレーザー照射の際の入力

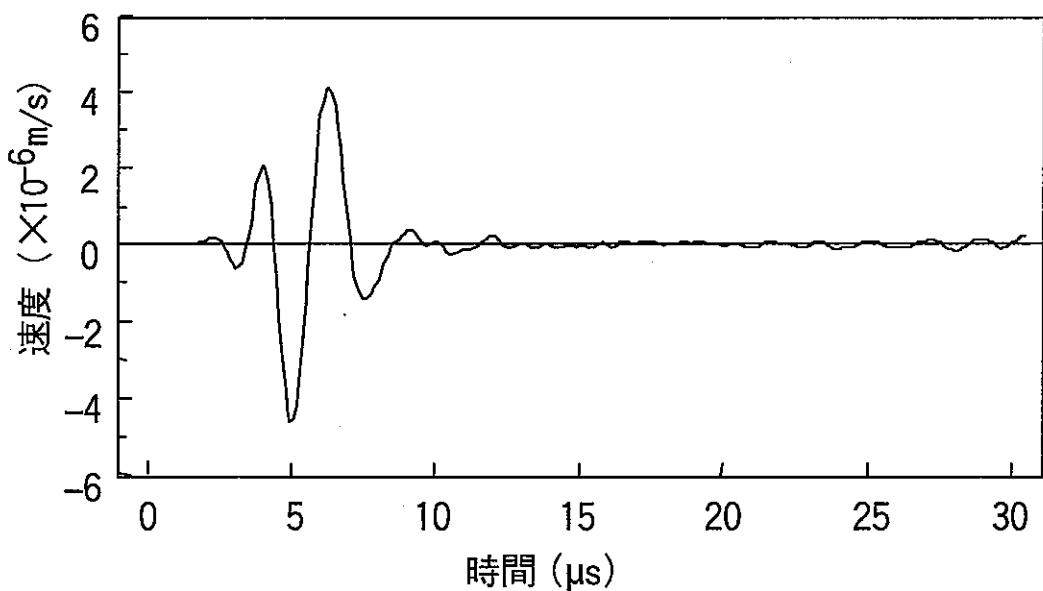


図8 三次元差分法による表面速度の計算例

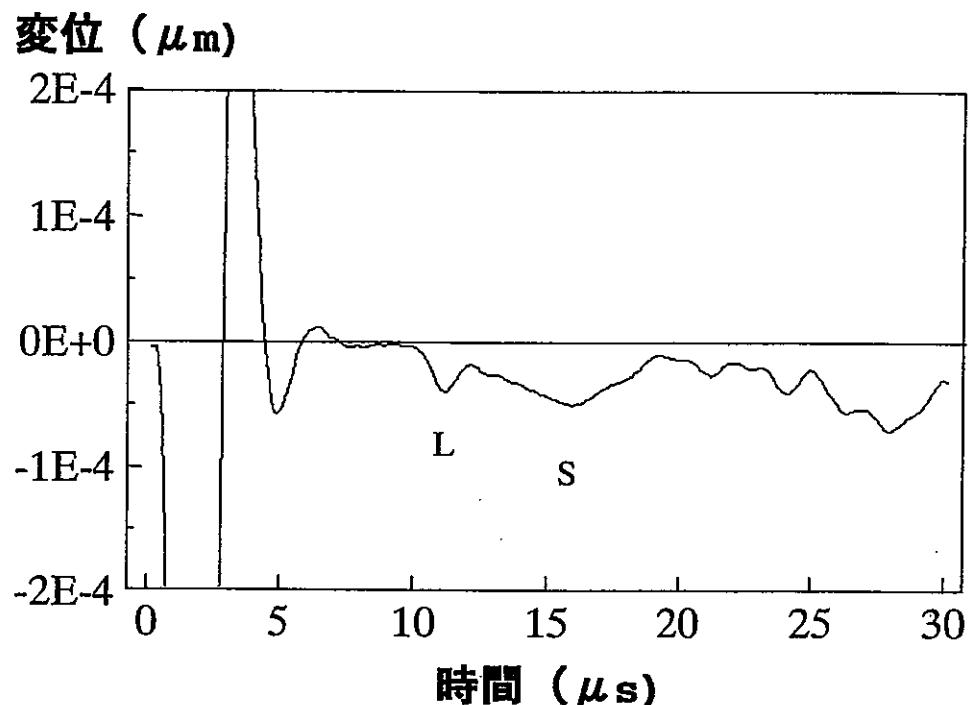


図 9 三次元差分法による表面変位の計算例

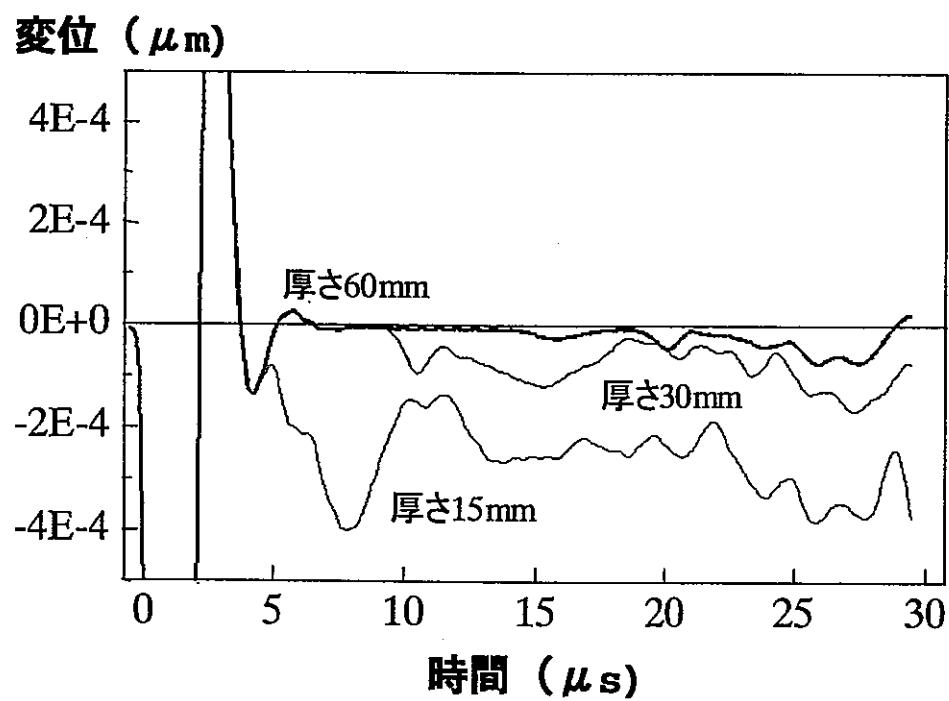


図 10 三次元差分法による表面変位の板厚の影響

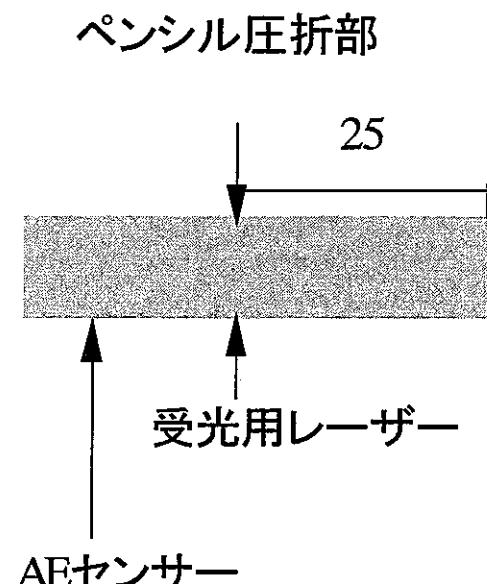


図 11 Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料における擬似音源の入力

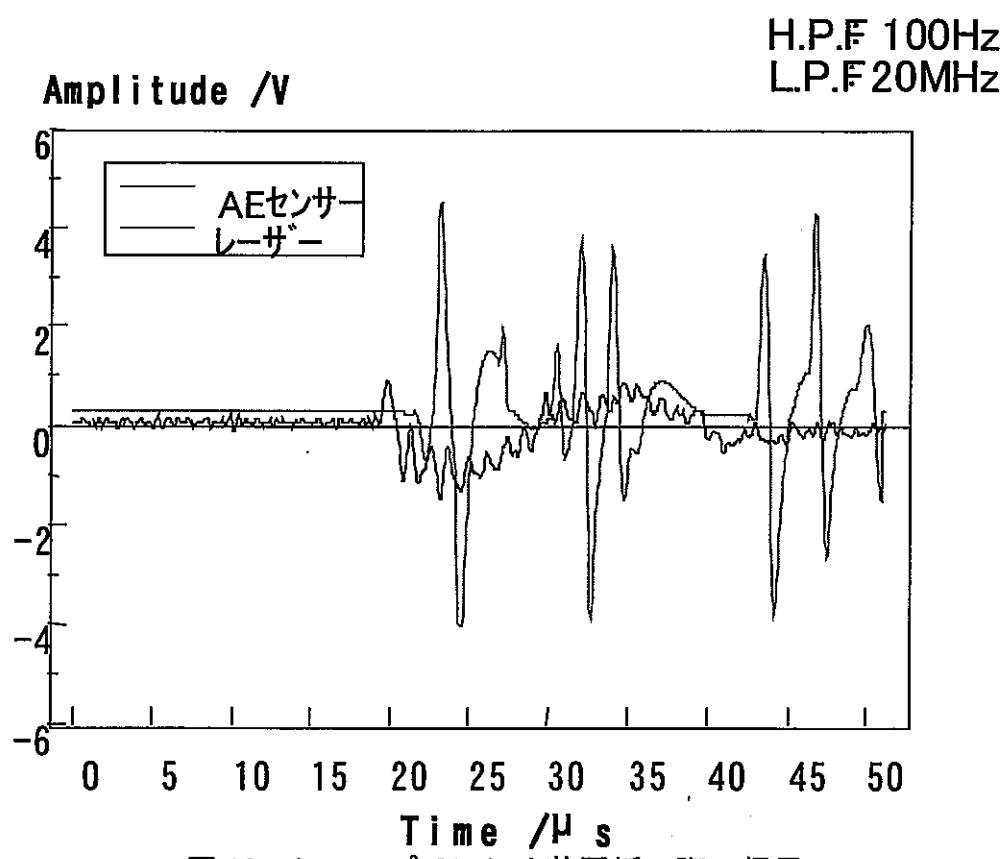


図 12 シャープペンシル芯圧折の際の信号

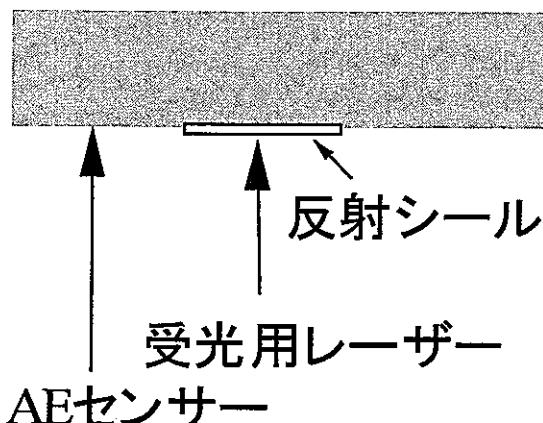


図 13 Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料の 3 点曲げ試験における AE 計測

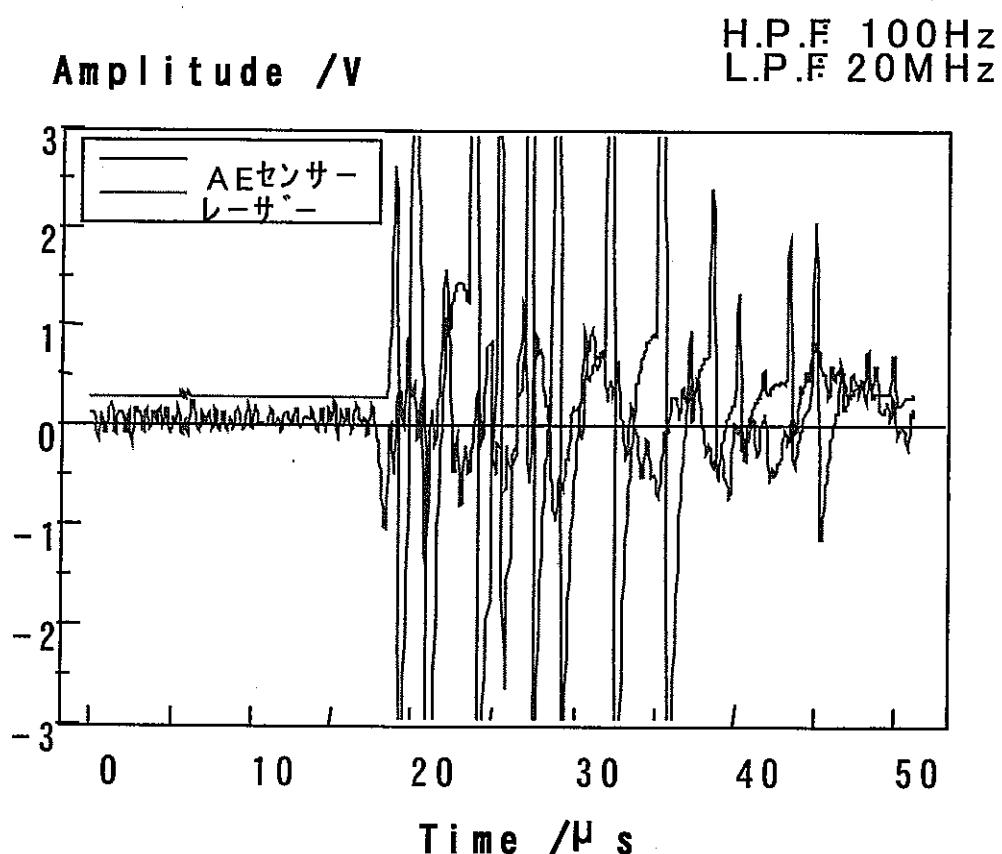


図 14 3 点曲げ試験における従来型 AE センサーとレーザー AE の比較