

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

アルミ平板供試体におけるLamb波伝播特性の把握と損傷同定

佐俣 喜芳, 岡田 孝雄, 神田 淳

2014年12月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1. はじめに.....	2
2. Lamb 波の定式化.....	4
3. 実験装置及び供試体	6
3.1 多軸振動非接触自動計測システム (MaVES)	6
3.2 供試体	7
3.3 AE センサー	9
4. 計測方法.....	10
4.1 計測のセッティング	10
4.2 AE センサーの加振周波数の決定	10
4.3 測定ポイントの作成	12
4.4 データ測定パラメータの設定	12
4.5 計測の概要	13
5. 計測および Lamb 波伝播特性の把握	14
5.1 供試体を伝播する Lamb 波データの取得	14
5.2 計測結果	14
5.3 Lamb 波伝播特性の検討.....	56
6. 損傷同定技術の検討	61
6.1 差分処理法による検討	61
6.2 オリジナルデータと差分法データ処理による比較	145
7. まとめ.....	149
参考文献	150

アルミ平板供試体における Lamb 波伝播特性の把握と損傷同定

佐俣 喜芳^{*1}、岡田 孝雄^{*2}、神田 淳^{*2}

Understanding of Lamb Wave Propagation Characteristic on Flat Aluminum Plate and Damage Detection

Kiyoshi Samata^{*1}, Takao Okada^{*2}, Atsushi Kanda^{*2}

Abstract

The new Non Destructive Inspection (NDI) technology for aircraft has been required to reduce maintenance cost and to increase efficiency for aircraft operation. This document shows the experimental result obtained by ultrasonic Non Destructive test using Lamb wave which is one of the promising new NDI technologies. In this experiment, we used Acoustic Emission (AE) Sensor as the vibration source to propagate Lamb wave into the flat Aluminum panels. We investigate the propagation characteristic of Lamb wave and examine the capability of this method about the damage detection and identification for damages as the NDI technology. The Multi-axis Vibration Evaluating System (MaVES) which JAXA developed is used to detect the Lamb waves in the Aluminum panels.

Keywords: Non Destructive Inspection, Lamb wave, MaVES

概要

航空機の整備コスト削減および運航の効率化に寄与する新たな非破壊検査技術の開発が求められている。本書は有望な NDI の新技術の 1 つである Lamb 波を用いた超音波非破壊検査技術について JAXA が実験を行った結果を示すものである。本実験では、AE センサーを加振源として用い、Lamb 波をアルミ平板中に伝播させることにより、Lamb 波の伝播特性の調査および非破壊検査技術としての損傷検知/同定技術の可能性について検討した。平板中を伝播する Lamb 波の検出は、JAXA が保有する多軸振動非接触自動計測システム MaVES (Multi-axis Vibration Evaluating System) を用いて計測を行った。

* 平成 26 年 8 月 18 日受付 (Received 18 August, 2014)

*1 株式会社 JAL エンジニアリング (JAL Engineering)
(元) 航空本部 運航システム・安全技術研究グループ
(Operation System and Safety Technology Research Group, Institute of Aeronautical Technology)

*2 航空本部 構造技術研究グループ
(Structures Research Group, Institute of Aeronautical Technology)

1. はじめに

日本は狭い国土に多くの航空機が運用されている運用大国である。また、将来的展望を見ても航空機の運用機数は今後増加し、エアラインにとっては安全運航の堅持と航空機の運航効率向上が求められるところである。近年 JAXA が実施した複数のエアラインへの聞き取り調査においても、航空機の整備コスト低減および運航効率の向上に寄与するための新たな技術が求められている。

航空機の構造検査に関しては従来から目視点検および非破壊検査による検査が主流である。しかしいずれの手法も、いくつかの問題点を有している。Table 1.1 にそれぞれの手法に関する問題点を示す。

Table 1.1 航空機構造の主な検査手法と現状の問題点

検査手法	問題点
目視点検	・損傷を見逃す可能性(ヒューマンエラー)がある
非破壊検査 (過流探傷, X線等)	・探傷範囲が狭い ・多様な検査手法に対応する機器の種類が多く高価 ・機器の操作や損傷判定において有資格の検査員が必要

航空機構造に対する検査要件に関しては、疲労損傷や経年航空機への対策のため機体メーカーから多様な非破壊検査(EGI, USI, X線等)の実施が要求されるケースが増えており、エアラインにとっては検査員資格者の養成や装置の購入等コスト高になる傾向にある。また、外的要因による突発的な損傷(落雷, 鳥衝突, ハードランディング, 突風等)を機体が受けた場合、機体の大型化に伴い検査領域が広域に及ぶこともあり、損傷個所の同定に多くの人員と時間を要することもある。従って、コスト軽減および運航効率向上に寄与する簡便で効率的な非破壊検査技術の需要は将来的に高くなると考えられる。

本研究では、将来有望な非破壊検査技術の1つである超音波弾性波(Lamb波)を用いた超音波非破壊検査技術に着目した。Lamb波を用いる利点としては広域を高速に損傷検知でき、さらに伝播する超音波弾性波を可視化することにより非破壊検査の資格に関係なく、誰でも簡単に損傷個所を明確に判別できることにある。Lamb波を用いた非破壊検査技術の研究開発は、多様な分野において世界的に行われており、Staszewskiら¹⁾は金属構造におけるLamb波の疲労亀裂検知への適用について圧電トランスデューサーをアルミ供試体に接着し、検知にレーザー振動計を用いて可視化する技術の研究を行っている。また、Tuaら²⁾は圧電素子をセンサー及びアクチュエーターに用い、Time-of-Flight解析により亀裂を検知する技術の研究を行っている。Tianら³⁾は波数解析を用いて、Lamb波による亀裂検知を3D化する技術の研究を行っている。Rhayら⁴⁾はLamb波による損傷検知をCTスキャンにて可視化する技術の研究を行っている。以上のようにLamb波を用いた非破壊検査技術においては、実用化に向けた損傷検知・可視化技術の研究が数多く行われているが、工業用プラントや原子力設備等に対する適用を研究しているケースが多く、航空

機の非破壊検査技術に適用するための研究は数少ない。また、多くの研究は金属の薄板に発生する亀裂検知に関するものであり、航空機に起こり得る損傷としてアルミ板上のスクラッチ、デントを対象にしたものは殆どない。従って、本研究では Lamb 波が薄板に対して伝播特性が優れている点を活かし、さらに航空機に適用できる損傷検知・可視化技術としての可能性を検証するために様々な損傷に対する Lamb 波の伝播データを捕え、また損傷同定技術の検討を行った。このような例は世界でもまれであり、得られるデータは大変有効であると考えられる。本研究において供試体を伝播する Lamb 波の計測は JAXA が所有する多軸振動非接触自動計測システム (MaVES)⁵⁾ を用いて行った。

2. Lamb 波の定式化

Lamb 波は、平板や棒状材料等の境界面を長手方向に伝播するガイド波の一種である。周波数帯域は超音波領域の 20KHz 以上で発生し、薄板に対する伝播特性が優れている。また、減衰が少なく長距離伝播が可能であるため、広範囲の損傷を一度に検出できる利点がある。一方で、多くの分散性を有する振動モードを持つことから、信号処理が複雑になるという欠点を持つ。

Lamb 波の固体中における伝播特性は物質により異なり、アルミニウムにおいては縦波 6,260m/s、横波 3,080m/s の伝播速度を有する。多くの文献資料^{6, 7)}により Lamb 波の固体中における伝播は、波動 2 次方程式により表わせることが知られている。 x_1 , x_2 , x_3 方向を、それぞれ、板の長手方向、幅方向、厚さ方向と定義し、 x_1 , x_3 平面で平面歪み場を仮定した場合、波動 2 次方程式は以下となる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (2)$$

(1) は縦波、(2) は横波の伝播を表し、定数 c_L は縦波の速度、 c_T は横波の速度を示す。また、板に作用する変位、及び応力は、以下の式で表される。

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi}{\partial x_3}, \quad u_2 = 0, \quad u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} - \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \quad (3)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{33} = \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + 2\mu \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \quad (5)$$

これらの解である ϕ , ψ が、それぞれ x_3 を変数にもつ関数と、 x_1 , t を変数にもつ関数に分離できると仮定した場合、 ϕ , ψ 及び x_3 を変数にもつ関数 Φ , Ψ は、以下のように表わすことができる。

$$\phi = \Phi(x_3) \exp[i(kx_1 - \omega t)], \quad \psi = \Psi(x_3) \exp[i(kx_1 - \omega t)] \quad (6)$$

$$\Phi(x_3) = A_1 \sin(px_3) + A_2 \cos(px_3), \quad \Psi(x_3) = B_1 \sin(qx_3) + B_2 \cos(qx_3) \quad (7)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{wave}}}, \quad (8)$$

ここで、 A_1 , A_2 , B_1 , B_2 は境界条件により決まる定数を表わし、 k , ω , λ_{wave} はそれぞれ波数、円振動数、波長を表わしている。次に、板の上下面の境界条件は次式で与えられる。

$$x_3 = \pm \frac{d}{2} = \pm h \text{ で } \sigma_{31} = \sigma_{33} = 0 \quad (9)$$

ここで, d は板厚, h は板厚の半分を表わす. 以上の式より定数 A_1, A_2, B_1, B_2 に関する関係を求めると, Lamb 波について次式のように表わすことができる.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2 p q \mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)}, \quad (10)$$

3. 実験装置及び供試体

3.1 多軸振動非接触自動計測システム(MaVES)

多軸振動非接触自動計測システム(MaVES)は、3D スキャニング振動計とセンサー位置制御ロボット、これらの制御を同期させる統合ソフトウェア、モーダル解析ソフトウェアから構成される。3D スキャニング振動計、センサー位置制御ロボット、モーダル解析ソフトウェアは汎用品であり、独立して使用することが可能である。

3D スキャニング振動計は、レーザーにより3軸方向の振動(面外、面内)を時間又は周波数領域で計測できる。また内蔵のソフトウェア(PSV ソフトウェア)により、計測点の設定から計測データの表示、実稼働解析結果の表示までを行うプリポスト機能、センサー部のミラーを制御することで一定のエリアのレーザースキャンを行う機能を有している。MaVES の写真を Fig.3.1、システム構成を Fig.3.2 に示す。



Fig.3.1 多軸振動非接触自動計測システム(MaVES)



Fig.3.2 MaVES のシステム構成

3. 2 供試体

供試体は、航空機の外板に多く利用されている 2024-T3 アルミニウム材を使用した。またパネル形状は平板とした。パネルサイズは 400x400mm とし、板厚は航空機の外板で用いられる板厚の中で厚い部類の 2.0mmとした。供試体の写真を Fig.3.3、寸法図を Fig.3.4 に示す。実験に際しては、計測性能を比較するために大きさの異なる亀裂、スクラッチ、デントを模擬した 10 種類のアルミ板供試体を使用した。供試体に付与した損傷をまとめたものを Table 3.1 に示す。

(1) 亀裂

損傷長さ 5mmと 20mmの 2 種類の貫通亀裂を平板パネルに施した。亀裂はレーザーを用いて人工的に付与した。(亀裂幅:0.2mm)

(2) スクラッチ

損傷長さ 5mmと 20mm、損傷深さ 0.2mmと 1.0mmの 4 種類のスクラッチを平板パネルに施した。スクラッチは亀裂と同様にレーザーを用いて人工的に付与した。(スクラッチ幅:0.2mm)

(3) デント

デント深さ 2mm、デント径 $\phi 20$ mm / $\phi 60$ mm / $\phi 100$ mm の 3 種類の損傷を平板パネルに施した。デント径は目視で容易に識別可能な $\phi 20$ mm 及び目視での識別が難しくなる $\phi 100$ mm を参考に決定した。デントはプレス加工にて人工的に付与した。

計測エリアは、端部による反射波の影響を避けるために供試体パネル面の内側 100mm × 100mmの範囲とし、AE センサーはシリコングリースで供試体表面に固定した。Lamb 波の伝播特性に関し、異なる発信方向や複数のセンサーから同時にLamb 波を発信した場合の挙動を把握するため、センサーの取り付け位置を 10 パターン設定して計測を行った。計測エリアとセンサー取り付け位置を Fig.3.5 に示す。またレーザー受光量を十分に確保するため供試体表面に現像液を塗布して実験に望んだ。AE センサーの入力信号は 90.5kHz のサイン波を5波長、測定ポイント数は 1840 ポイント、入力電圧 8.0Vp-p、さらにSN比を高めるため 10 回の測定データを平均した。また、面外方向の波動のみを計測対象としたため、レーザーでは Z 軸方向のみ計測した。本実験では、供試体パネル 1 枚の計測に約 10 分要している。



Fig.3.3 供試体写真

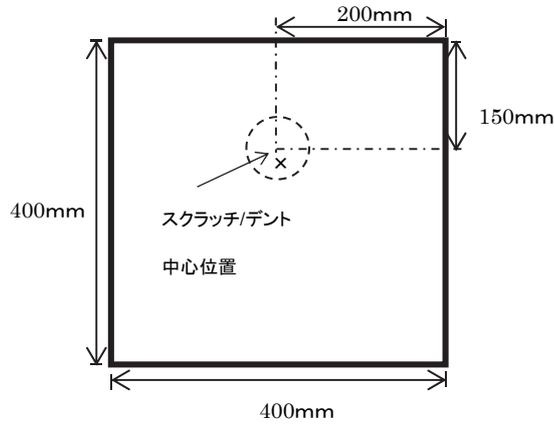


Fig.3.4 供試体寸法

Table 3.1 供試体データ

供試体データ			
材質: 2024-T3 アルミニウム材(平板パネル)			
サイズ: 縦 400mm x 横 400mm x 厚さ 2.0mm			
仕様(枚数は各 1 枚)		単位 (mm)	
A	損傷なし	F	スクラッチⅢ 幅 0.2, 深さ 0.2, 長さ 20
B	亀裂Ⅰ 幅 0.2, 深さ 2.0, 長さ 20	G	スクラッチⅣ 幅 0.2, 深さ 0.2, 長さ 5
C	亀裂Ⅱ 幅 0.2, 深さ 2.0, 長さ 5	H	デントⅠ 深さ 2, φ20
D	スクラッチⅠ 幅 0.2, 深さ 1.0, 長さ 20	I	デントⅡ 深さ 2, φ60
E	スクラッチⅡ 幅 0.2, 深さ 1.0, 長さ 5	J	デントⅢ 深さ 2, φ100

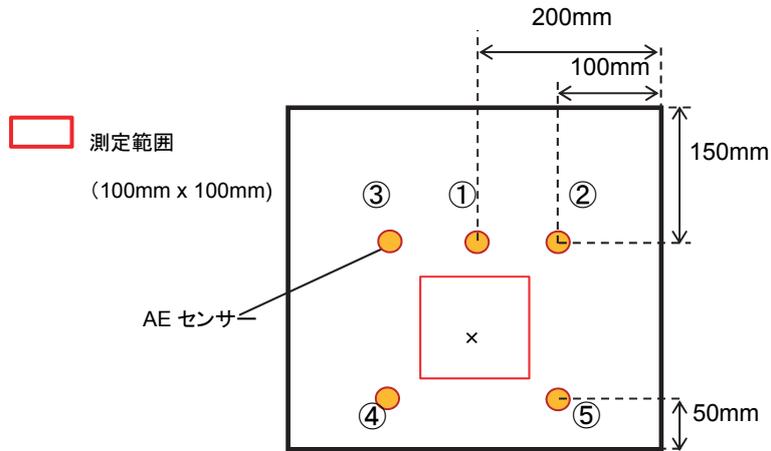


Fig.3.5 計測エリアとセンサー取り付け位置

3.3 AE センサー

本研究においては Lamb 波の発振源として共振型の AE センサーを使用した。AE センサーの内部には、加えられた力を電圧に、あるいは電圧を力に変換することができる圧電素子が内蔵されており、圧電素子が変形するときに弾性波を放出する。平板に Lamb 波を効率的に伝播させる必要があることから、ある特定の周波数で高い振動特性を持つ共振型の AE センサーを採用した。また、パネルとの境界面において Lamb 波の反射を防ぐために、AE センサーをパネル上に取り付けるときはグリス等のカプラを接触面に塗布している。

4. 計測方法

本章では、本実験で行った計測セッティングおよび手法について詳細を示す。

4.1 計測のセッティング

計測において、Lamb 波の計測は表面波のみに限定したため、供試体は作業台上に平置きとし、また計測レーザーは 1 軸(TOP)のみを用いた。ジェネレーターは NF 回路設計ブロック社製 Multifunction Generator WF1974, アンプは NF 回路設計ブロック社製 BA4825, AE センサーは Physical Acoustics 社製 R6(60kHz 共振型)を使用した。加振の原理としては、ジェネレーターから信号を発信して、アンプで増幅し、AE センサーで加振する方式をとった。計測セットアップ状況を Fig.4.1 に示す。



Fig.4.1 計測セットアップ状況

4.2 AE センサーの加振周波数の決定

本実験で用いた AE センサー(Physical Acoustics 社製 R6)に関しては、事前に加振特性を評価するため、Sweep 操作にて加振のピーク値を確認した。計測は AE センサー近傍の 1 点を代表計測点として Periodic Chirp 加振を周波数帯域 0~200kHz(FFT LINE 数 400)で行った。計測の結果、Physical Acoustics 社製 R6 の最大加振周波数は 93.5kHz であった。代表計測点を Fig.4.2, Periodic Chirp 加振を Fig.4.3, AE センサーの応答スペクトルを Fig.4.4 に示す。

ジェネレーターは 93.5kHz の Burst Sine が 30ms 毎に 5 波、Output Range を±150V とし Sine 波の振幅を 7V_{p-p} となるように設定してアンプのゲインを 20 倍とした。加振波形を Fig.4.5, 代表計測点からの応答波形を Fig.4.6 に示す。

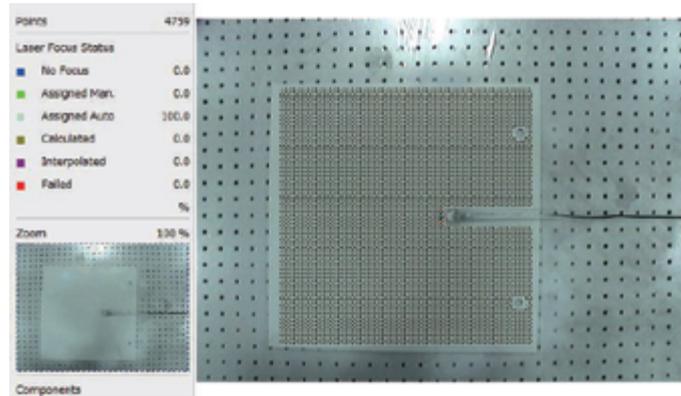


Fig.4.2 代表計測点

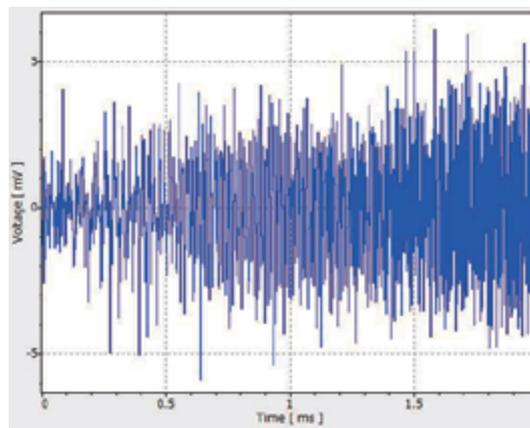


Fig.4.3 Periodic Chirp 加振

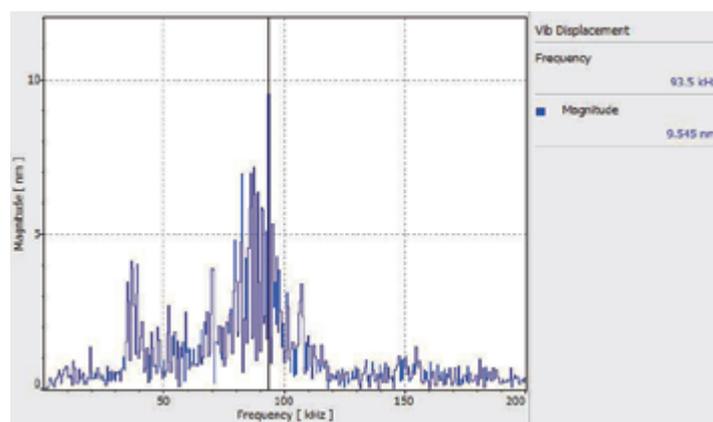


Fig.4.4 応答スペクトル(代表計測点)

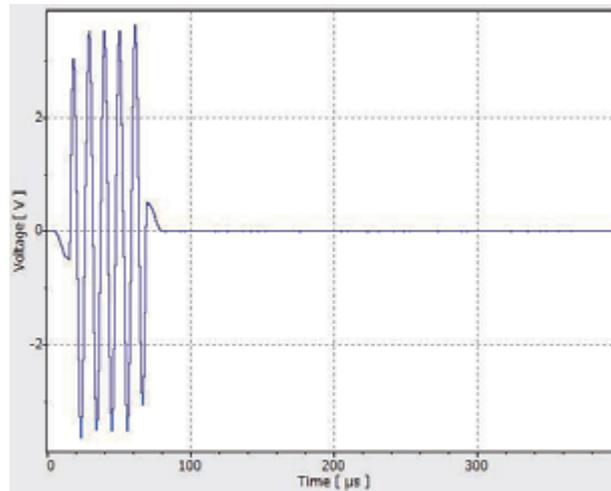


Fig.4.5 加振波形

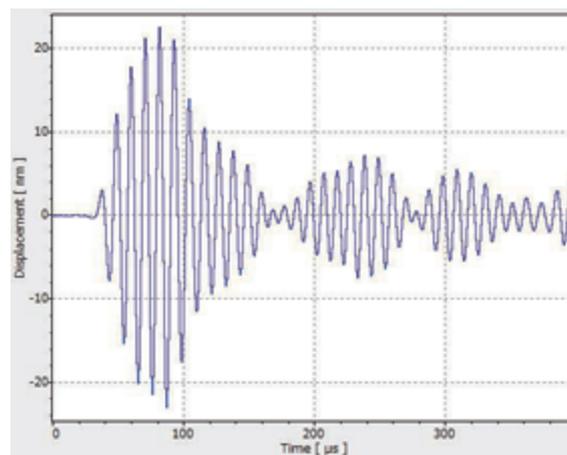


Fig.4.6 応答波形(代表計測点)

4. 3 測定ポイントの作成

ビデオ画像上の供試体に格子図形を描き、計測点を作成していく作業を行う。本実験では、予め供試体上に設定した 100mm × 100mm の計測エリア範囲に合わせて 1849 点の測定ポイントを作成した。これにより測定範囲内を約 2mm 間隔でレーザーを走査させることになる。

4. 4 データ測定パラメータの設定

本実験においては計測時間 400 μs (サンプリング周波数 2560Hz, サンプル数 1024), Data Management System のデコーダーは VD-09 で、レンジは 100mm/s/v を選択し、トリガは計測時間 (400 μs) の 4% の時間をプリトリガとして設定した。参考としてトリガ波を Fig.4.7 に示す。また、周波数に対するフィルタとして Band Pass Filter を Cut Off 1kHz/300kHz で設定した。アベレーシング回数は各測定点に対して 10 回である。

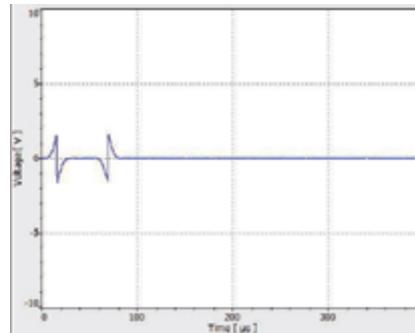


Fig.4.7 トリガ波形

4.5 計測の概要

本実験においてはアルミ供試体上を伝播する Lamb 波外面波の Z 軸成分の振動速度を MaVES に装備されている 1 軸のレーザードップラー式センサーを用いて検出している。1 回の計測では任意の 1 点のレーザの軸方向の振動速度の計測を行い、速度を積分して DC 成分をカットすることにより変位データを構築している。またトリガをかけることにより加振と計測とを同期させ全測定点のデータを合成している。

5. 計測および Lamb 波伝播特性の把握

本章では計測にて得られたデータに基づく Lamb 波の伝播特性を示す。

5.1 供試体を伝播する Lamb 波データの取得

Fig.3.5 に示す測定部の周囲に配置した単体または複数の AE センサーから発振した Lamb 波の Table 3.1 に示す供試体上の損傷部に対する挙動を, MaVES から取得したデータにより調査した. AE センサーの位置パターンは Table 5.1 に示す 10 パターンである.

Table 5.1 AE センサー位置パターン

AE センサーの位置パターン			
パターン	AE センサーの位置	パターン	AE センサーの位置
1	センサー①	6	センサー②+⑤
2	センサー②	7	センサー①+②+③
3	センサー①+②	8	センサー②+③+④
4	センサー②+③	9	センサー①+④+⑤
5	センサー②+④	10	センサー②+③+④+⑤

5.2 計測結果

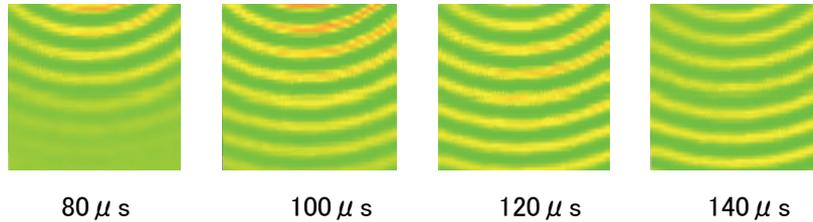
Table 5.1 に示す AE センサーの位置パターンにおける各供試体上の Lamb 波伝播画像を以下に示す. MaVES を用いて Lamb 波伝播画像を, 0 秒から 399.6 μ s までの動画として取得した. ここでは Lamb 波が損傷部を透過するまでの間から 80 μ s, 100 μ s, 120 μ s, 140 μ s における伝播画像を用いて比較を行った. 画像同士の比較を容易にするため, 波動の振幅成分の Time Signal レンジを 2.60E-8(m) ~ -4.60E-8(m) に固定した. Color bar で示される Time Signal レンジを Fig.5.1 に示す. 各供試体上の Lamb 波伝播画像を Fig.5.2 から Fig.5.85 に示す. 上段(a)には供試体 A(損傷なし)の伝播画像を, 下段(b)には Table 3.1 に示す損傷を施した供試体 B~J(損傷あり)の伝播画像を並べて示す.



Fig.5.1 Time Signal レンジ

- (1) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 B (亀裂 I : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.2 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

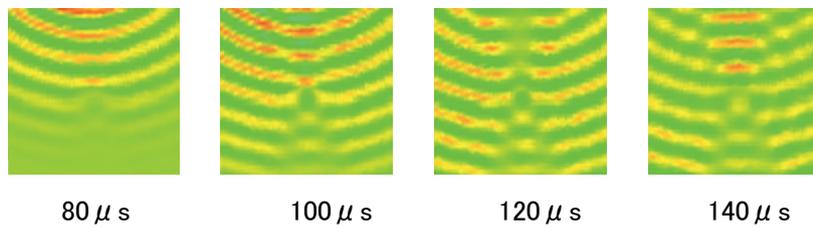
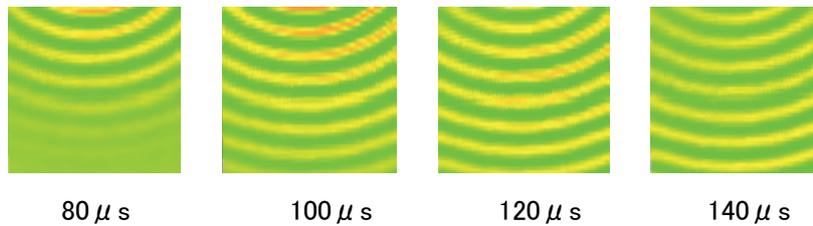


Fig.5.2 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 B

- (2) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 C (亀裂 II : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.3 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

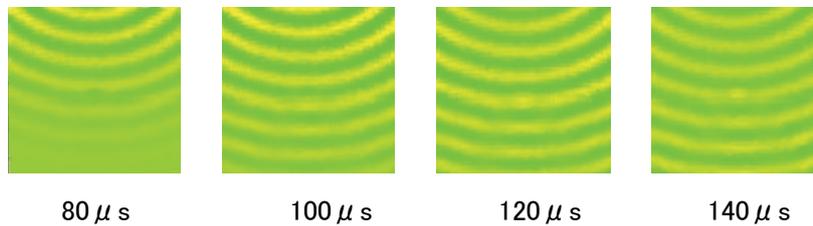
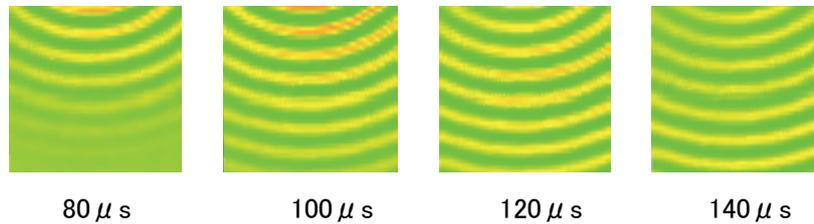


Fig.5.3 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 C

- (3) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 D(スクラッチ I : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.4 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

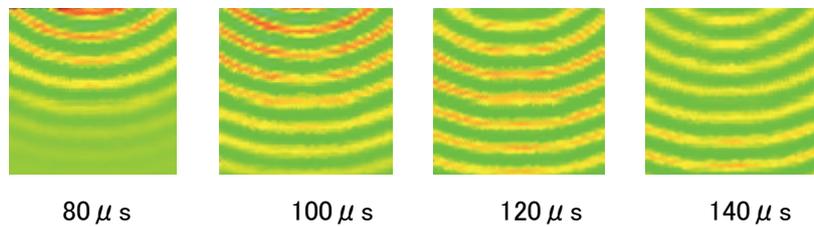
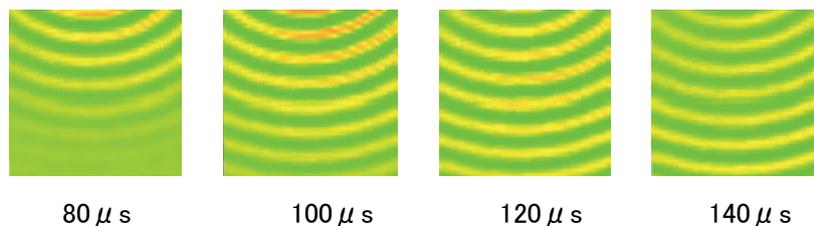


Fig.5.4 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 D

- (4) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 E(スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.5 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

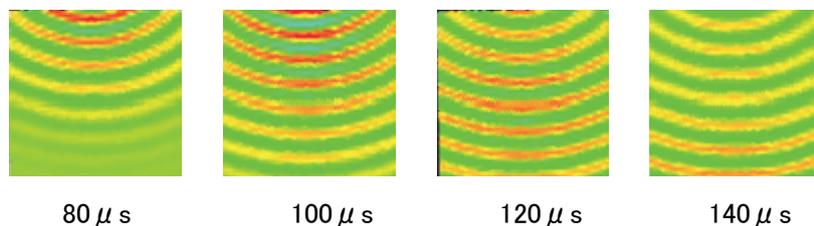
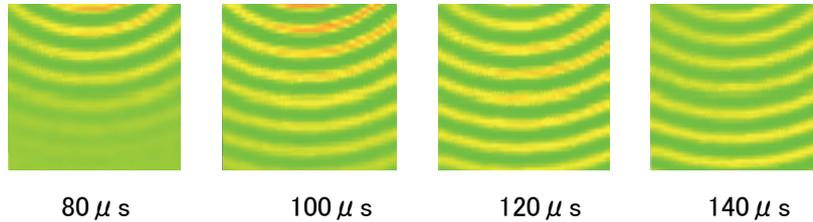


Fig.5.5 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 E

- (5) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 F (スクラッチ III: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.6 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

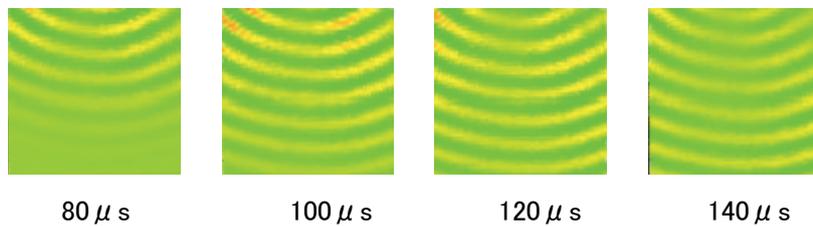
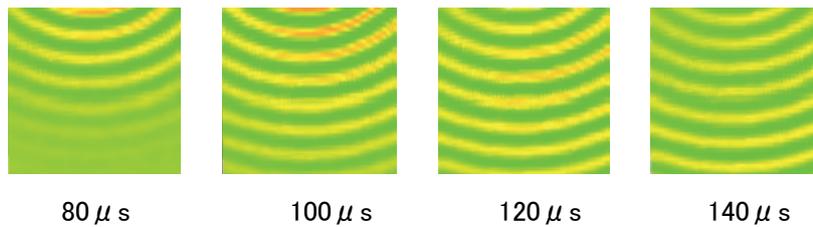


Fig.5.6 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 F

- (6) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 G (スクラッチ IV: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.7 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

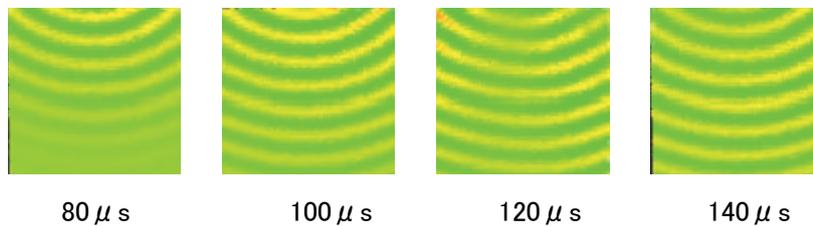
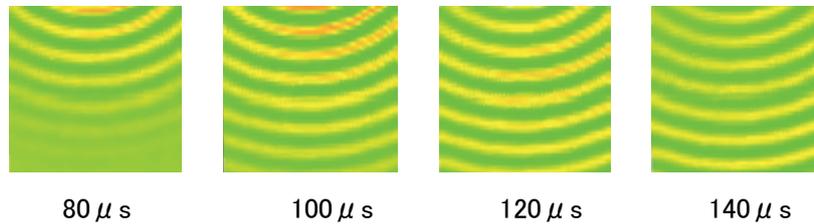


Fig.5.7 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 G

(7) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.8 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

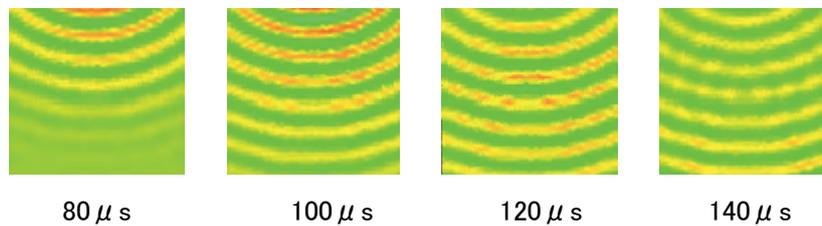
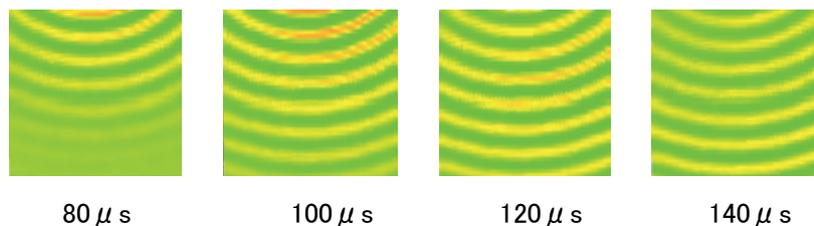


Fig.5.8 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 H

(8) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.9 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

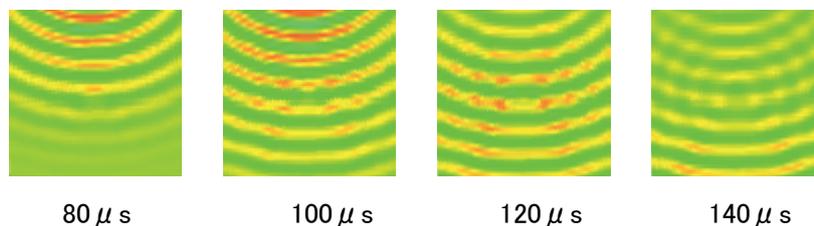
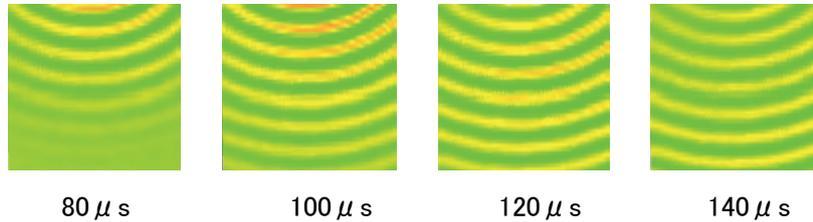


Fig.5.9 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 I

(9) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.10 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

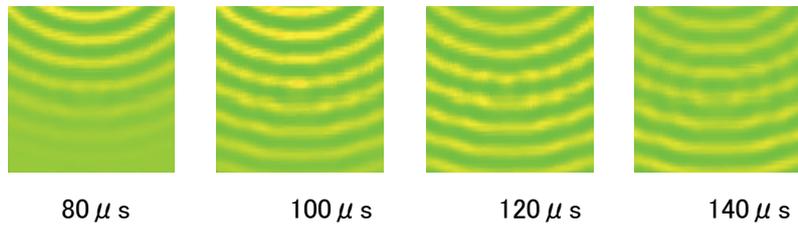
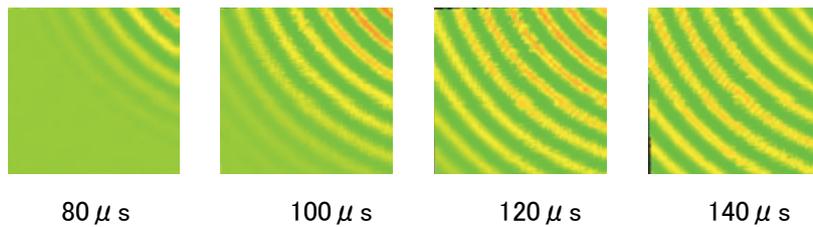


Fig.5.10 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 J

(10) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.11 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

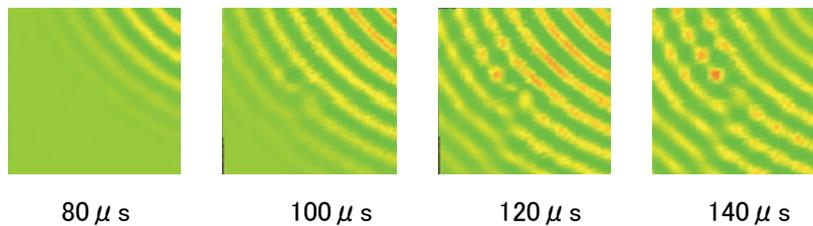
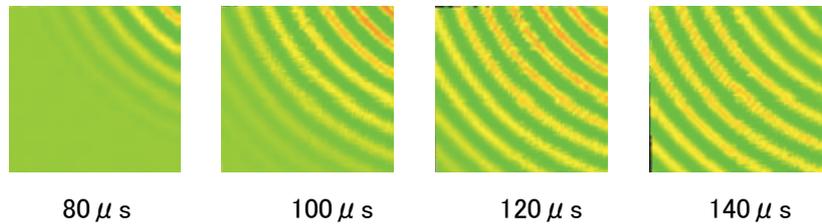


Fig.5.11 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 B

(11) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.12 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

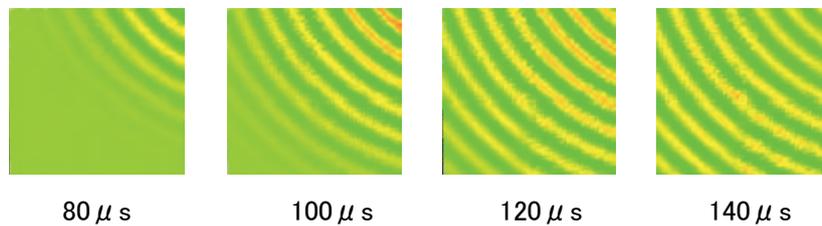
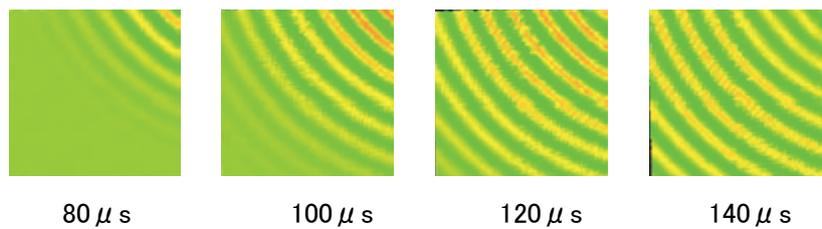


Fig.5.12 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 C

(12) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 D(スクラッチⅠ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.13 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

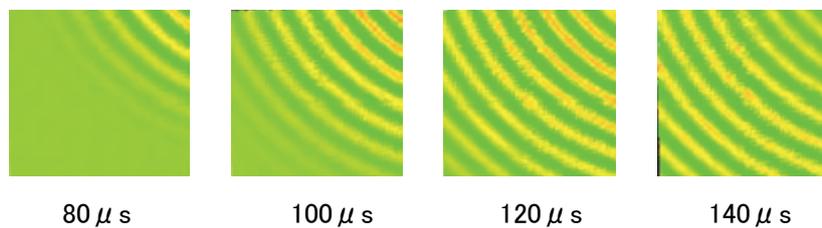
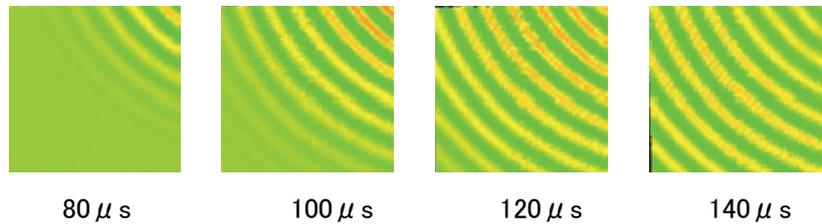


Fig.5.13 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 D

(13) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 E(スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.14 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

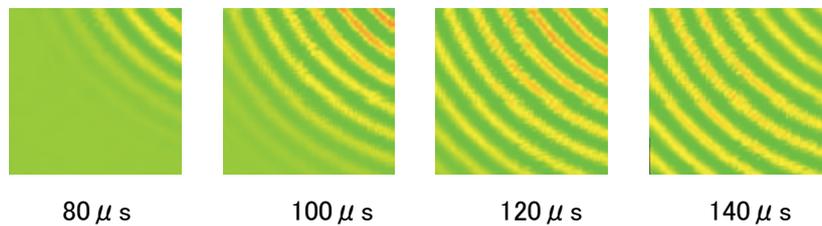
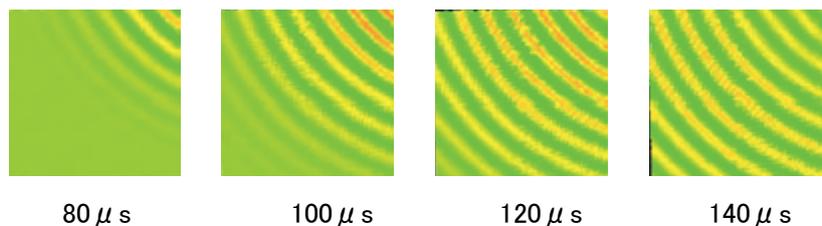


Fig.5.14 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 E

(14) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 F(スクラッチ III : 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.15 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

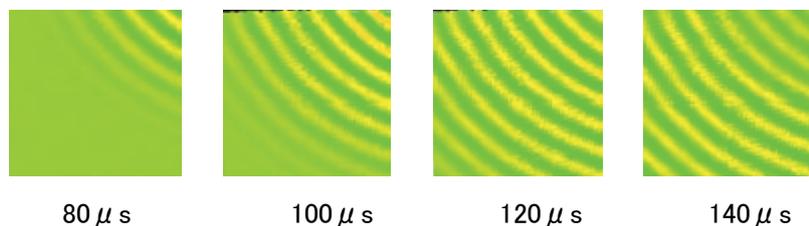
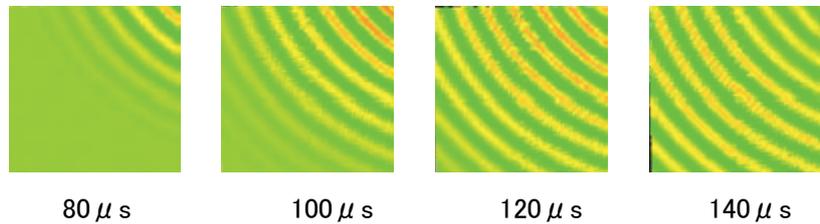


Fig.5.15 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 F

(15) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.16 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

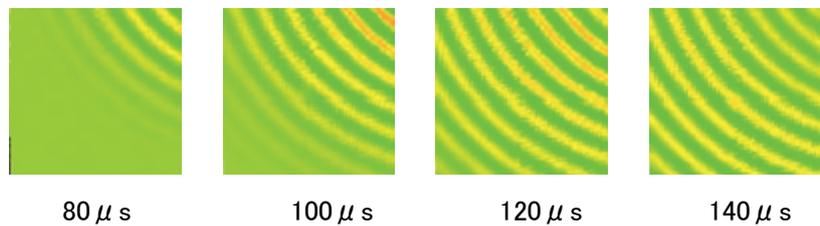
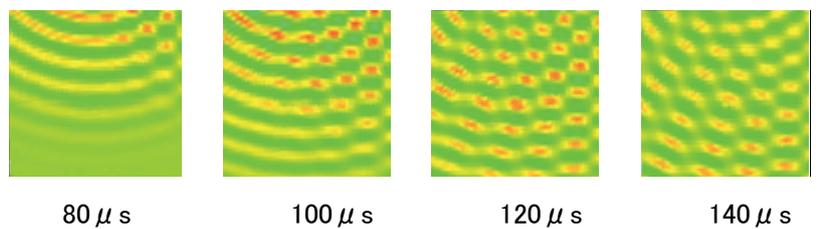


Fig.5.16 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 G

(16) パターン 2 のデントについてはパターン 1 の結果である Fig.5.8~Fig.5.10 と同等の結果となるため未実施とした.

(17) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 B(亀裂Ⅰ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.17 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

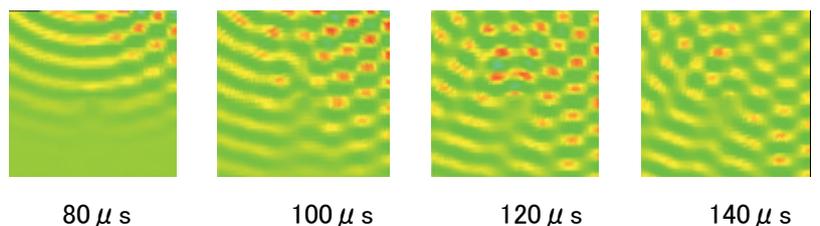
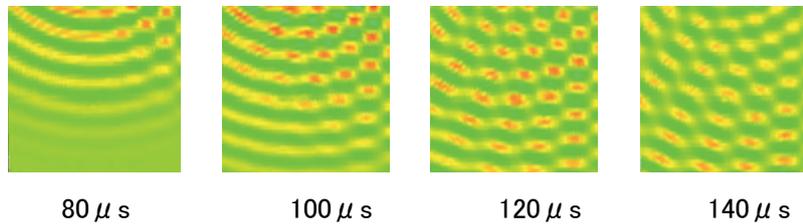


Fig.5.17 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 B

(18) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.18 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

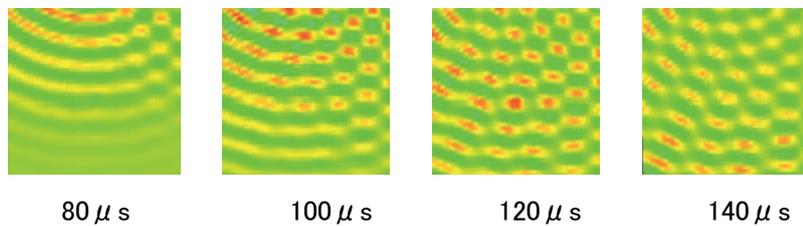
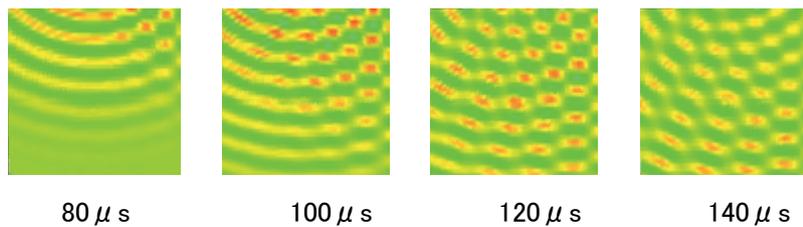


Fig.5.18 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 C

(19) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 D(スクラッチⅠ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.19 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

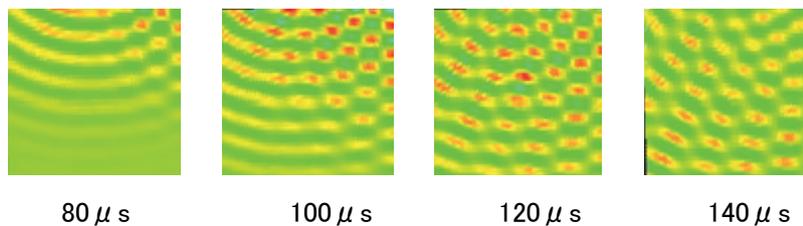
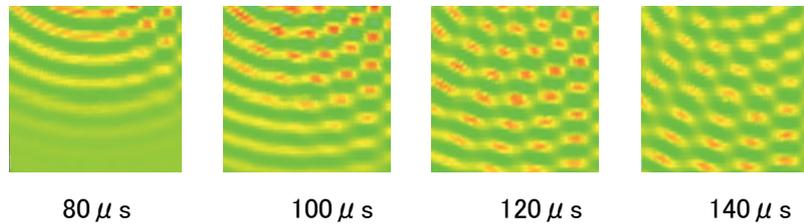


Fig.5.19 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 D

(20) パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体E(スクラッチⅡ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.20 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

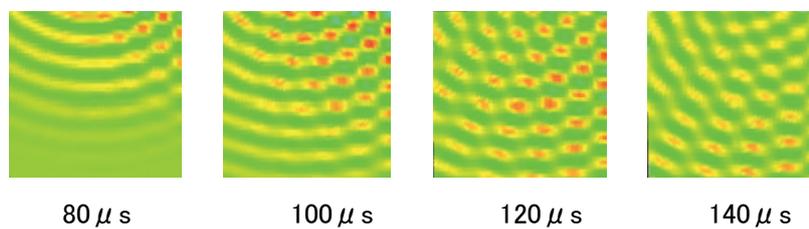
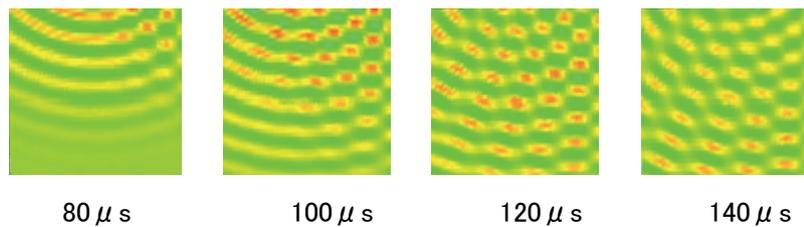


Fig.5.20 パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 E

(21) パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.21 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

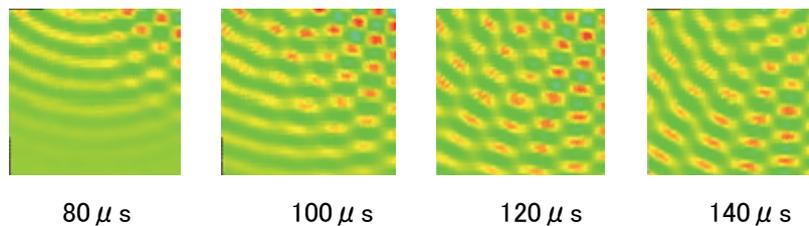
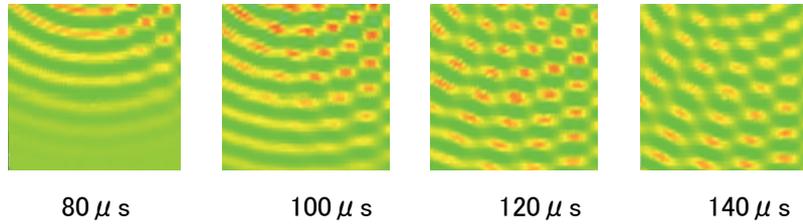


Fig.5.21 パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 F

(22) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.22 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

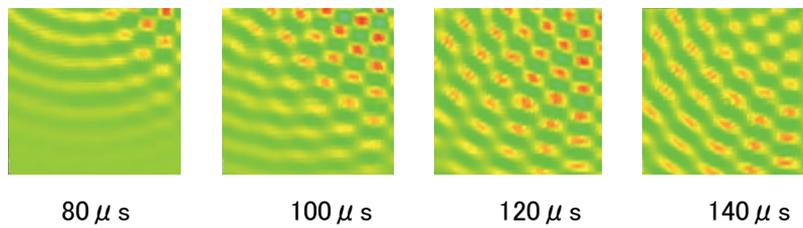
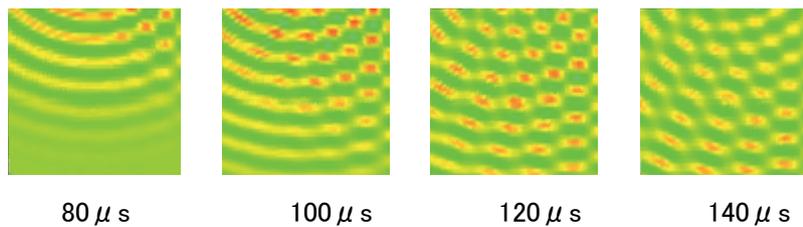


Fig.5.22 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 G

(23) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 H(デントⅠ:深さ2mm, ϕ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.23 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

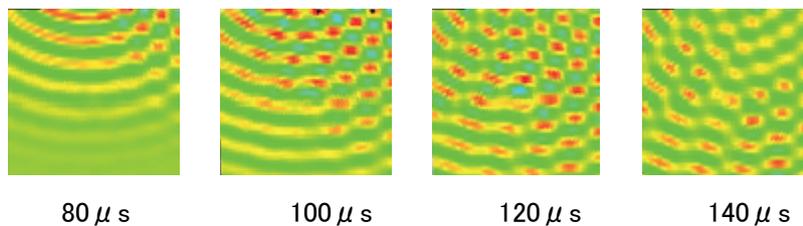
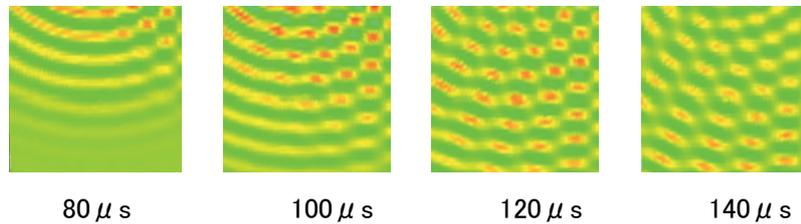


Fig.5.23 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 H

(24) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 I(デントⅡ:深さ 2mm, ϕ 60mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.24 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

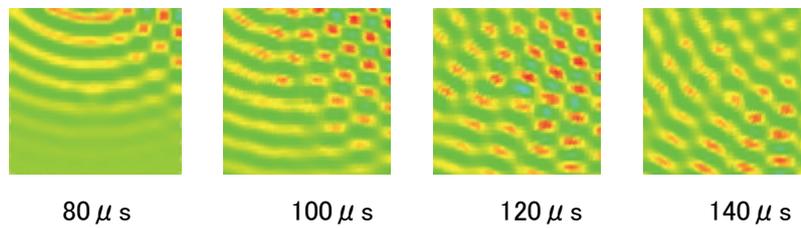
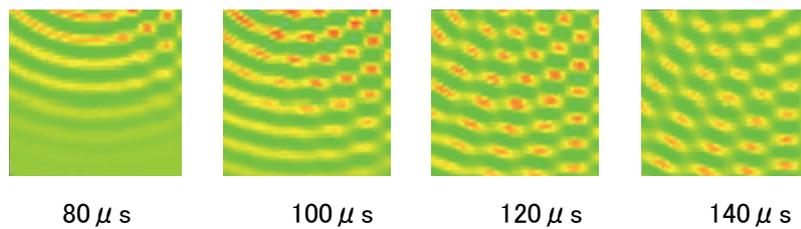


Fig.5.24 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 I

(25) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.25 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

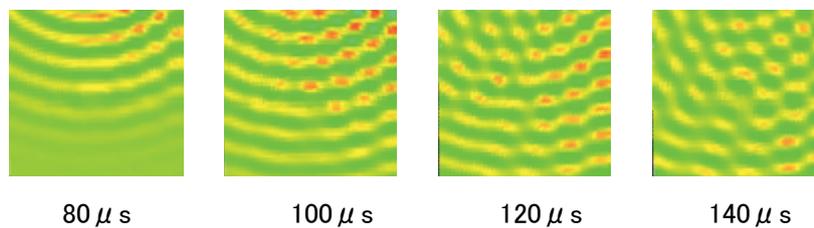
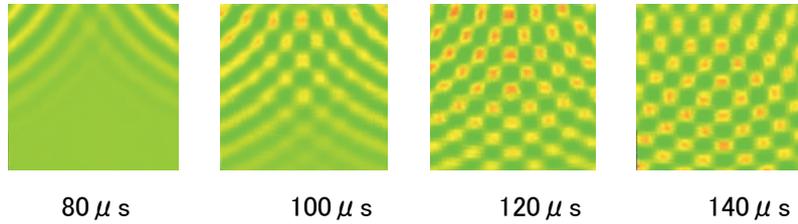


Fig.5.25 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 J

(26) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.26 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

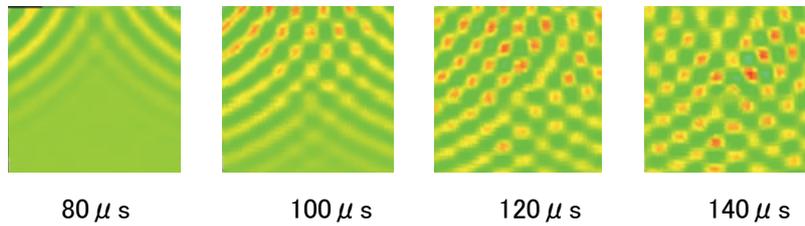
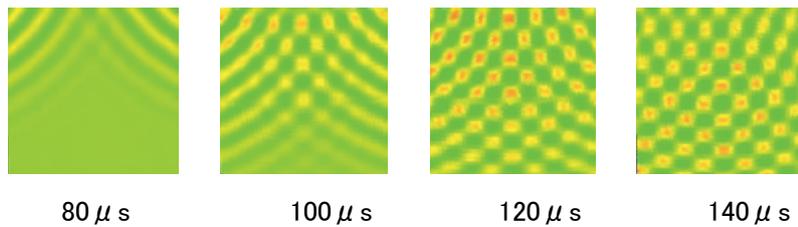


Fig.5.26 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 B

(27) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 C(亀裂 II :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.27 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

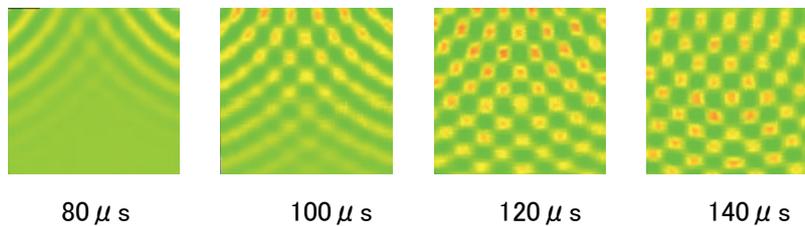
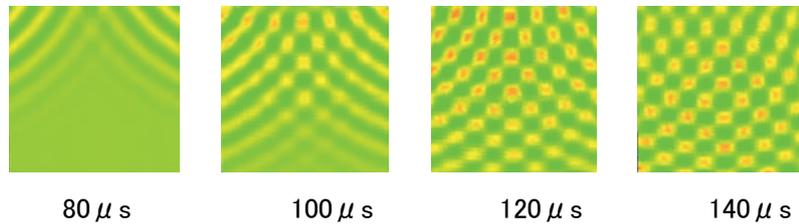


Fig.5.27 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 C

(28) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.28 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

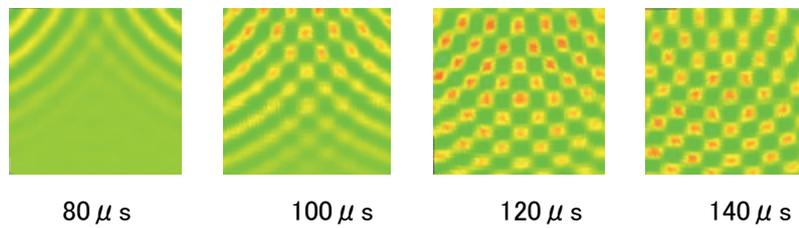
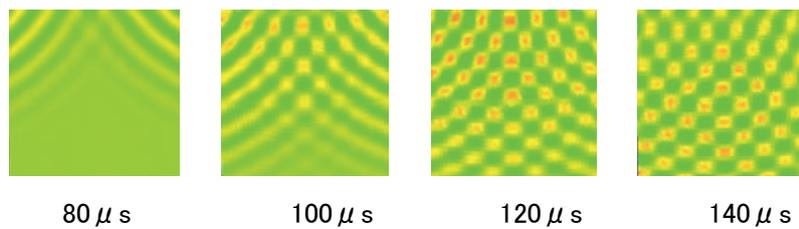


Fig.5.28 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 D

(29) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.29 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

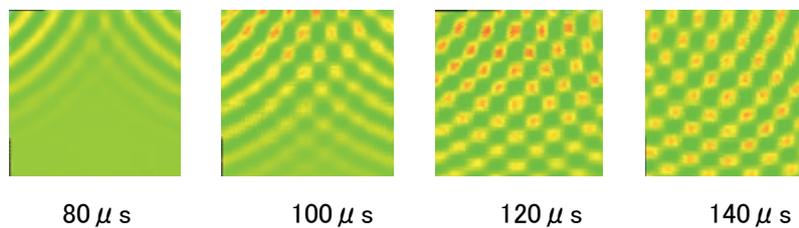
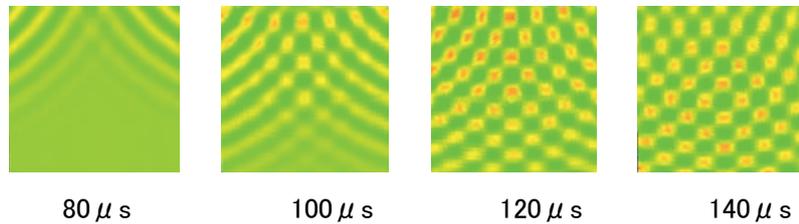


Fig.5.29 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 E

(30) パターン4(AEセンサー位置 ②+③), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)のLamb波伝播画像を Fig.5.30 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

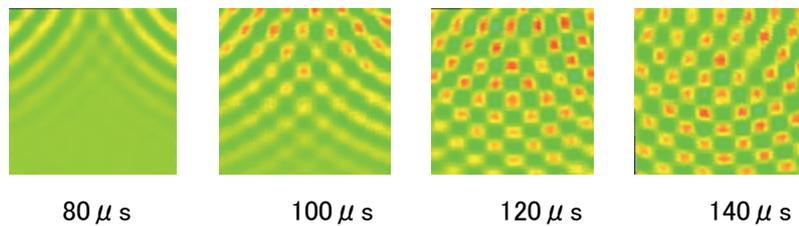
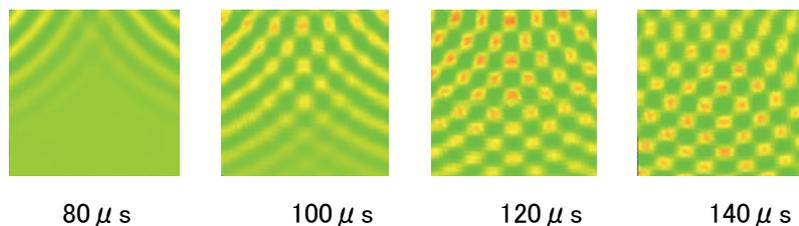


Fig.5.30 パターン4(AEセンサー位置 ②+③), 供試体F

(31) パターン4(AEセンサー位置 ②+③), 供試体G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)のLamb波伝播画像を Fig.5.31 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

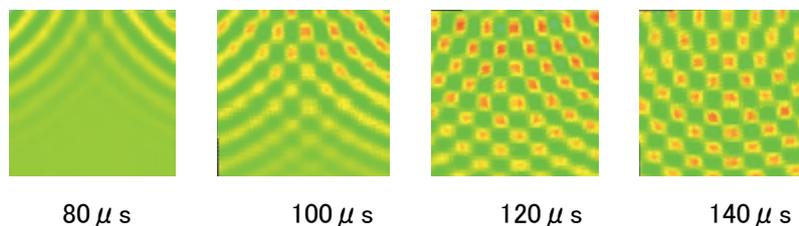
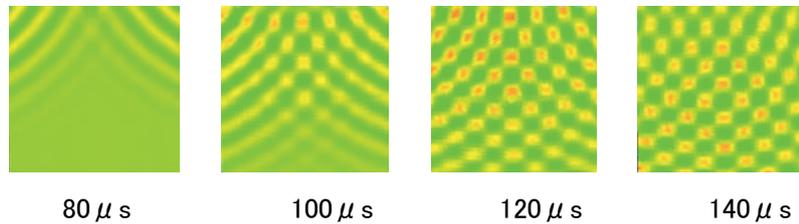


Fig.5.31 パターン4(AEセンサー位置 ②+③), 供試体G

(32) パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体H(デント I : 深さ2mm, ϕ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.32 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

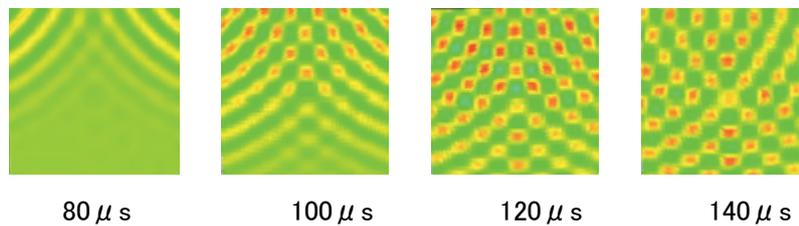
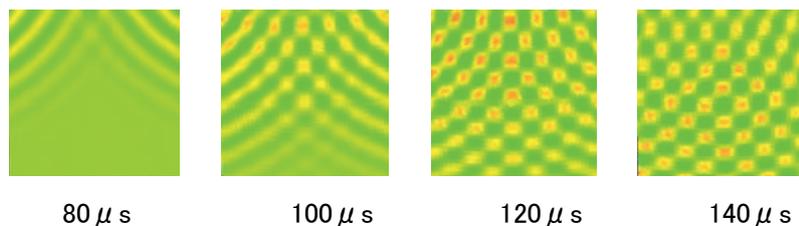


Fig.5.32 パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 H

(33) パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体I(デント II : 深さ2mm, ϕ 60mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.33 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

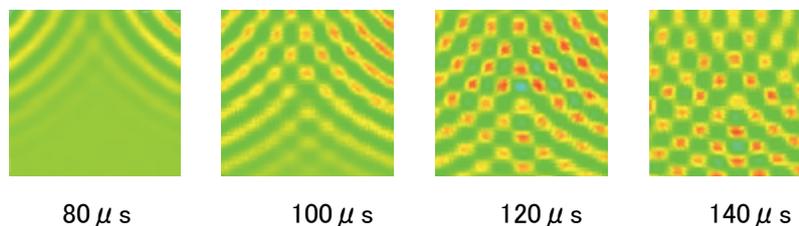
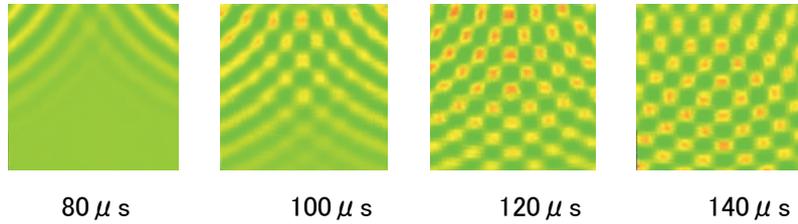


Fig.5.33 パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 I

(34) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.34 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

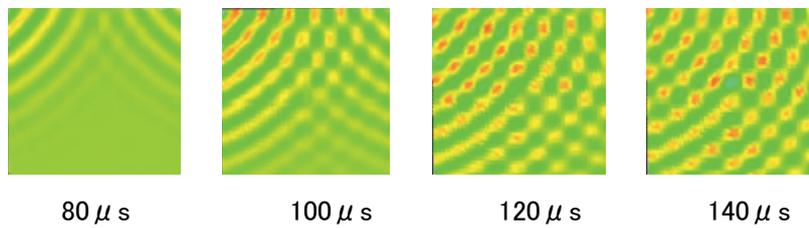
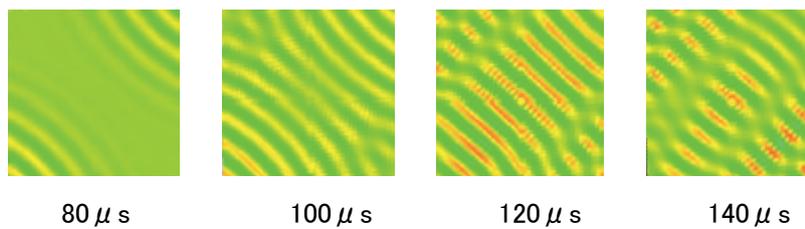


Fig.5.34 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 J

(35) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.35 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

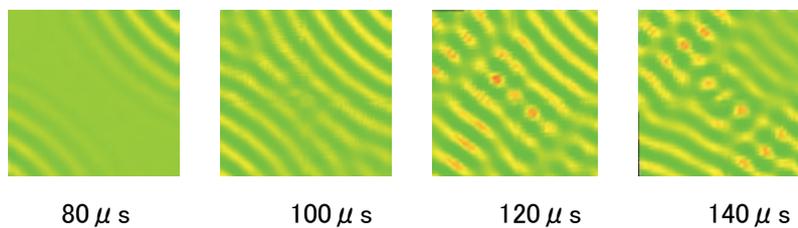
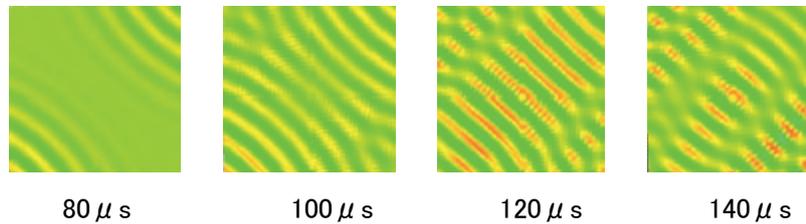


Fig.5.35 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 B

(36) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 C(亀裂 II :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.36 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

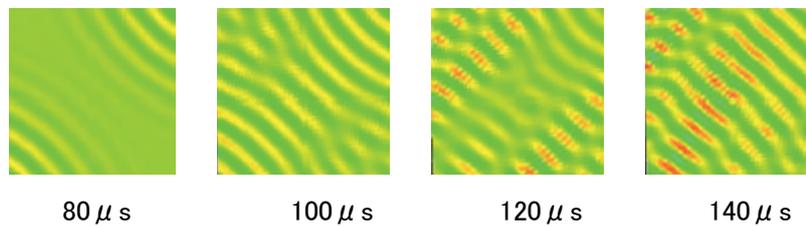
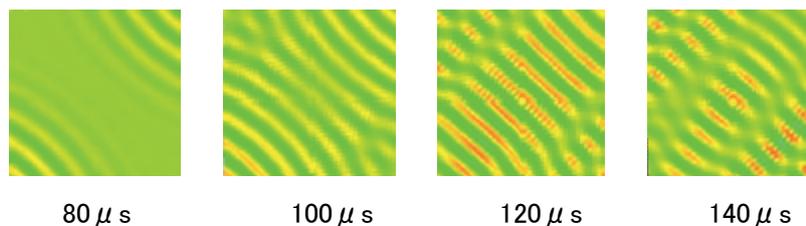


Fig.5.36 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 C

(37) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.37 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

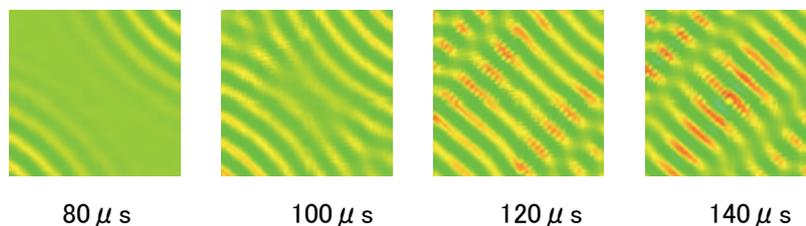
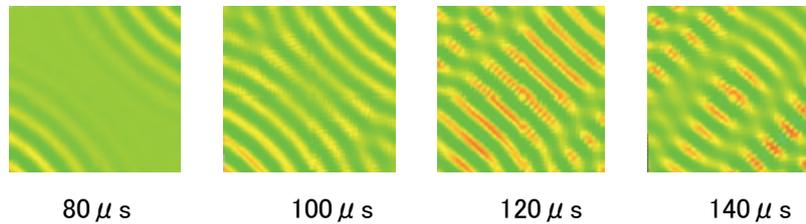


Fig.5.37 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 D

(38) パターン5(AEセンサー位置 ②+④), 供試体E(スクラッチⅡ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)のLamb波伝播画像をFig.5.38に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

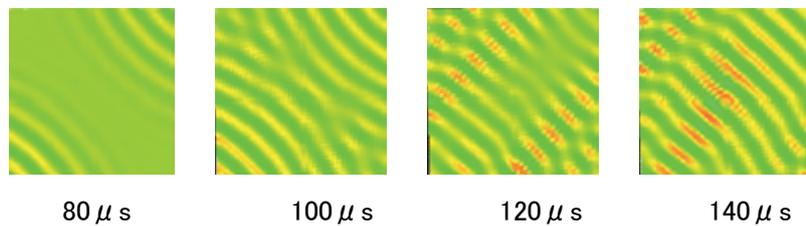
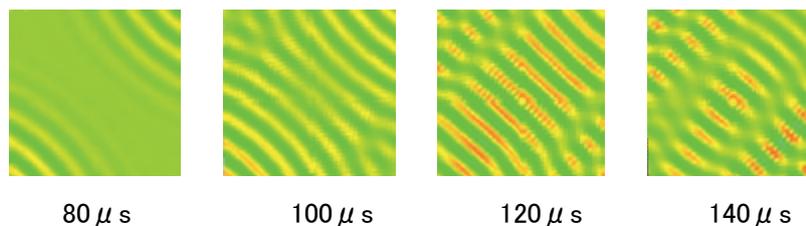


Fig.5.38 パターン5(AEセンサー位置 ②+④), 供試体E

(39) パターン5(AEセンサー位置 ②+④), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)のLamb波伝播画像をFig.5.39に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

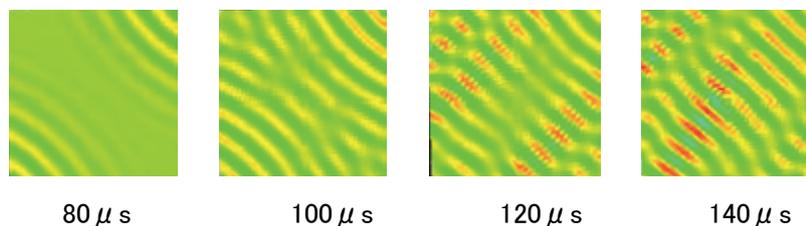
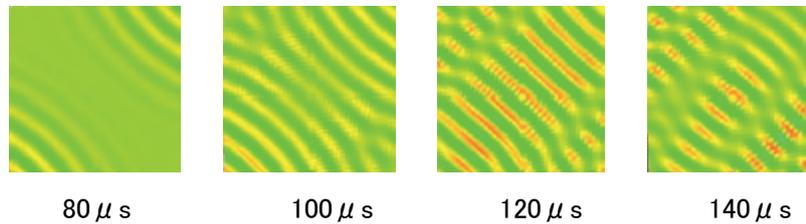


Fig.5.39 パターン5(AEセンサー位置 ②+④), 供試体F

(40) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.40 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

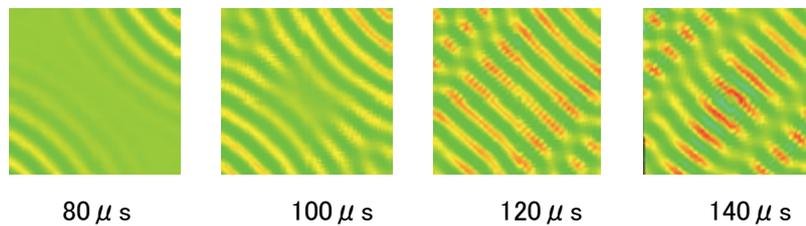
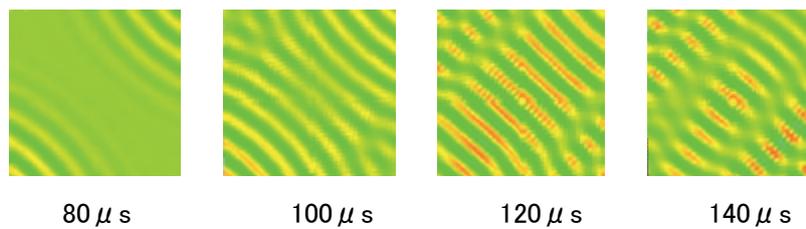


Fig.5.40 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 G

(41) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.41 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

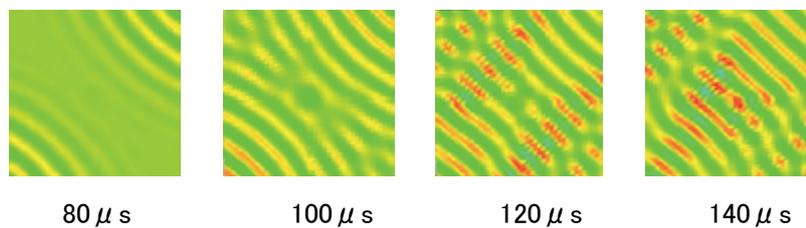
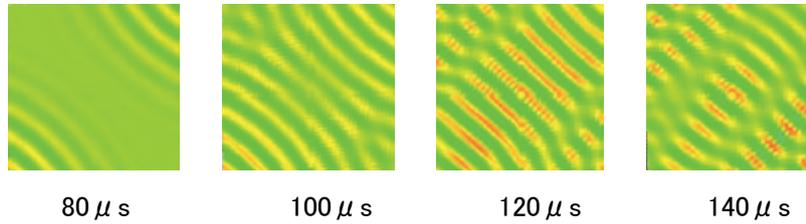


Fig.5.41 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 H

(42) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 I(デントⅡ:深さ 2mm, ϕ 60mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.42 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

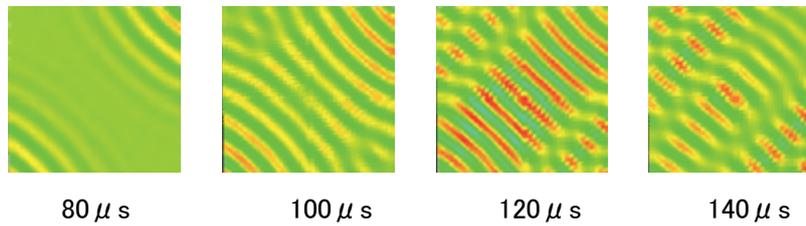
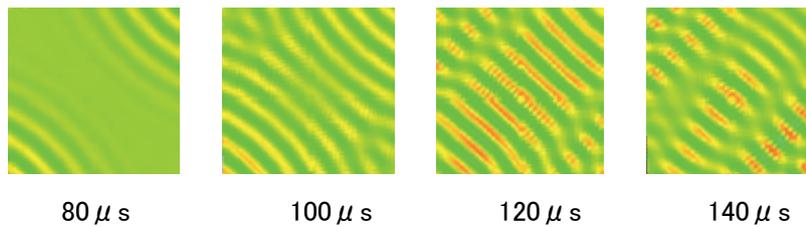


Fig.5.42 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 I

(43) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.43 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

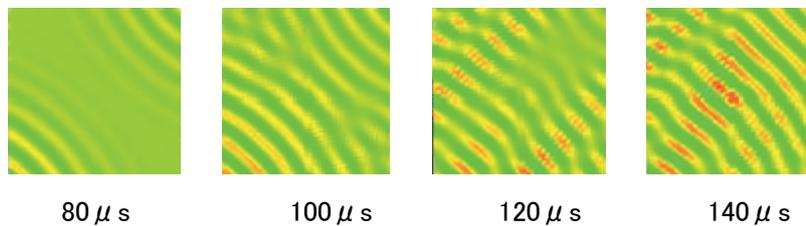
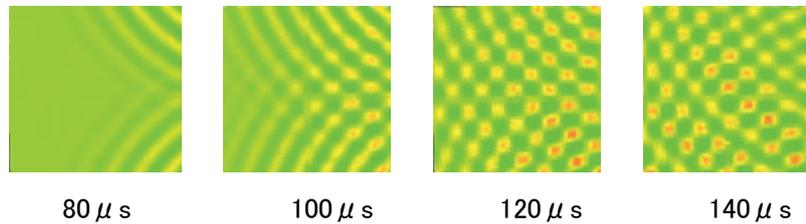


Fig.5.43 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 J

(44) パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.44 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

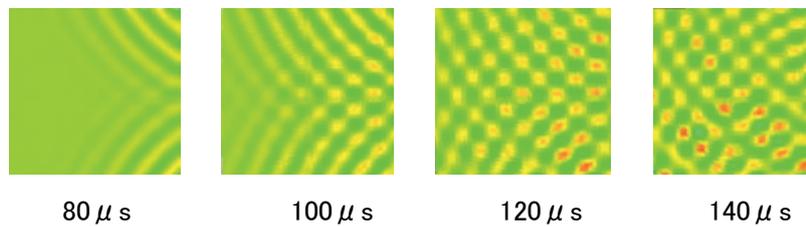
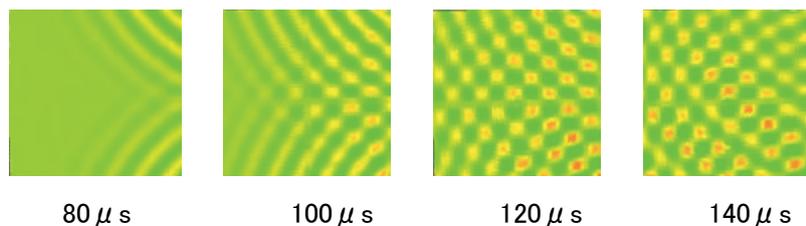


Fig.5.44 パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 B

(45) パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 C(亀裂 II :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.45 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

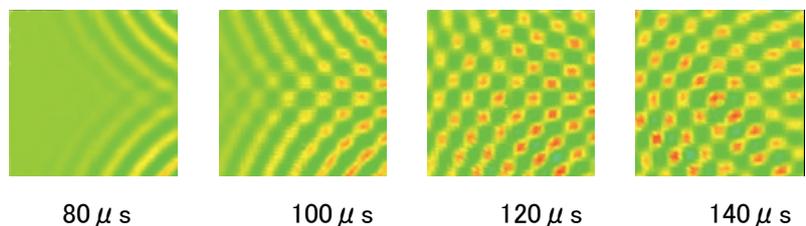
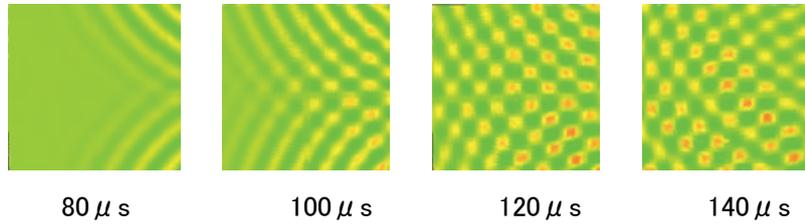


Fig.5.45 パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 C

(46) パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.46 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

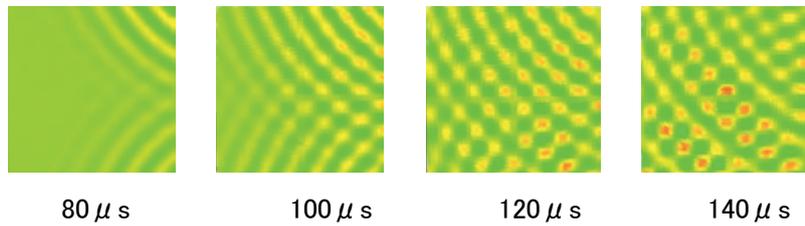
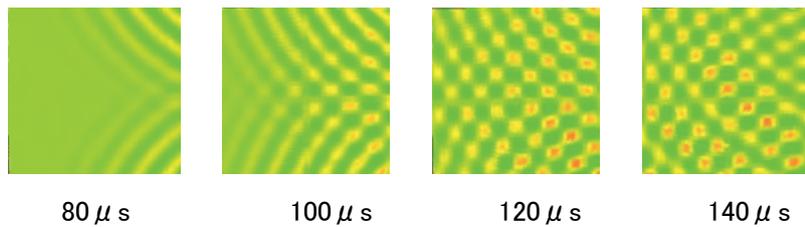


Fig.5.46 パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 D

(47) パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.47 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

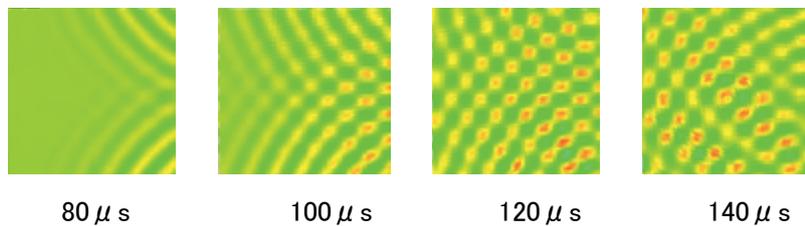
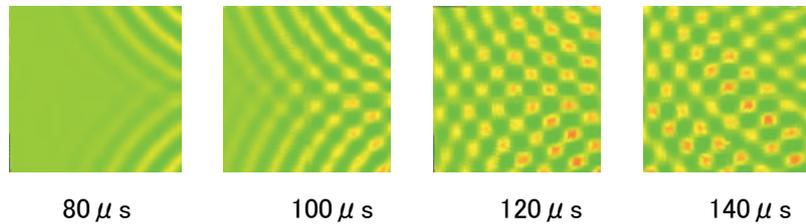


Fig.5.47 パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 E

(48) パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.48 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

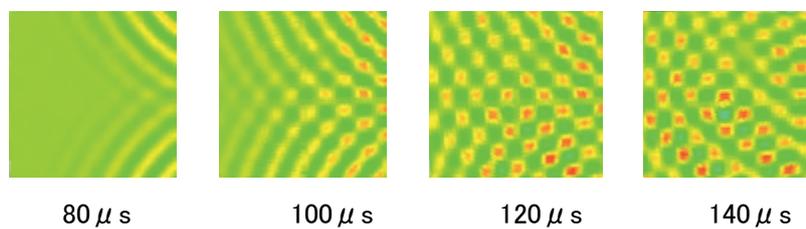
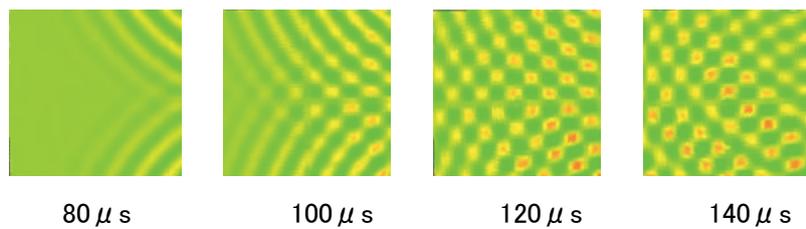


Fig.5.48 パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 F

(49) パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.49 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

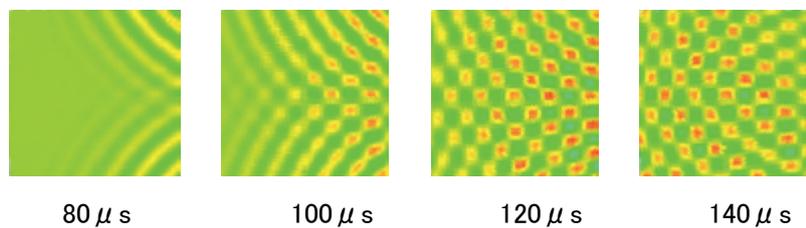
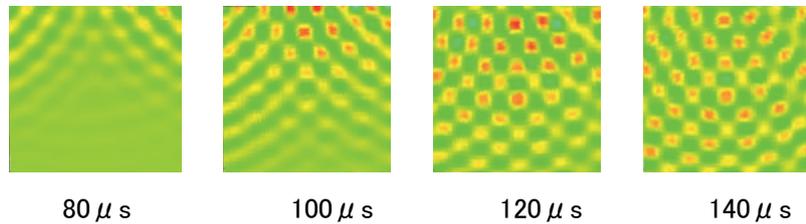


Fig.5.49 パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 G

(50) パターン6のデントについてはパターン4の結果である Fig.5.32~Fig.5.34 と同等の結果となるため未実施とした.

(51) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.50 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

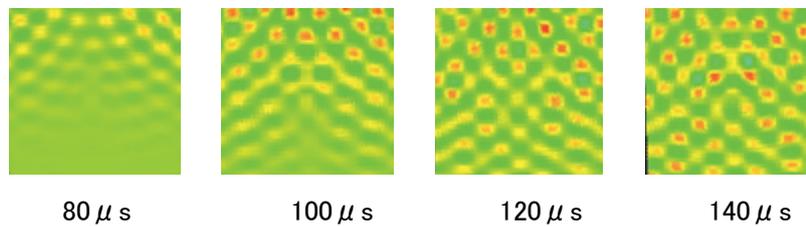
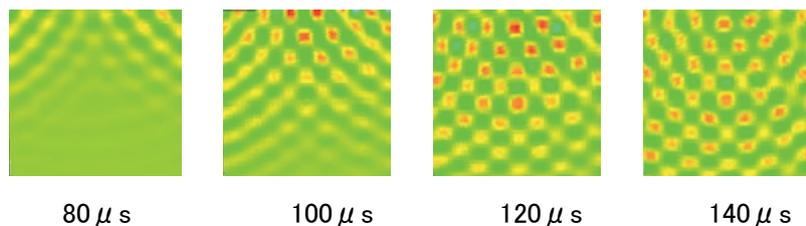


Fig.5.50 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 B

(52) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 C(亀裂 II :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.51 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

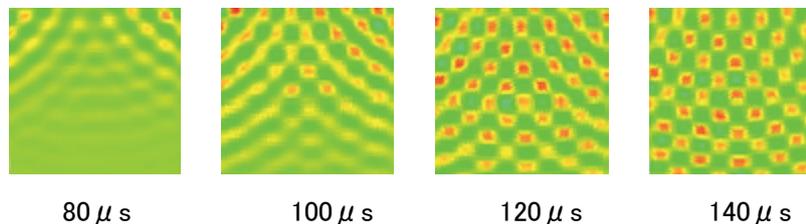
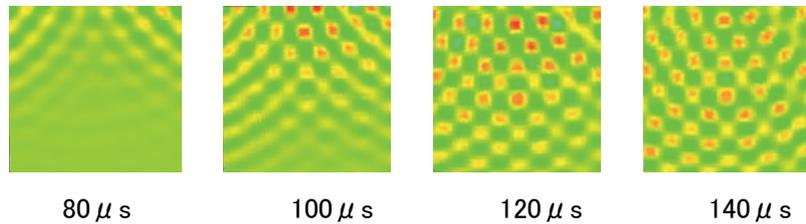


Fig.5.51 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 C

(53) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.52 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

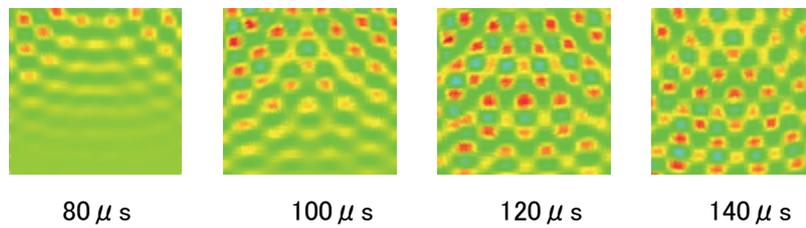
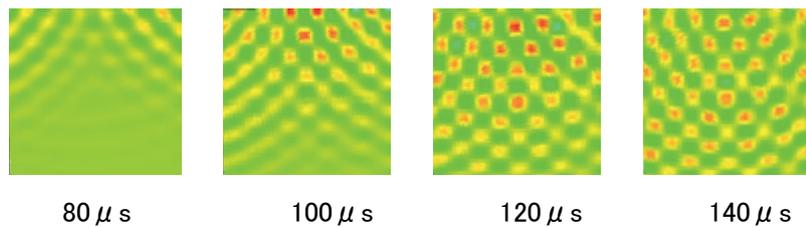


Fig.5.52 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 D

(54) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.53 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

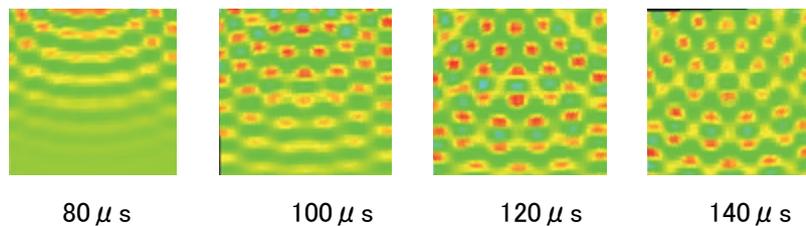
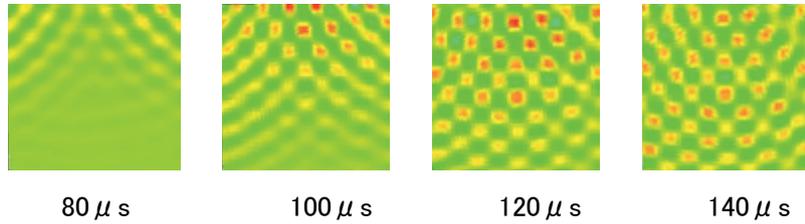


Fig.5.53 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 E

(55) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.54 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

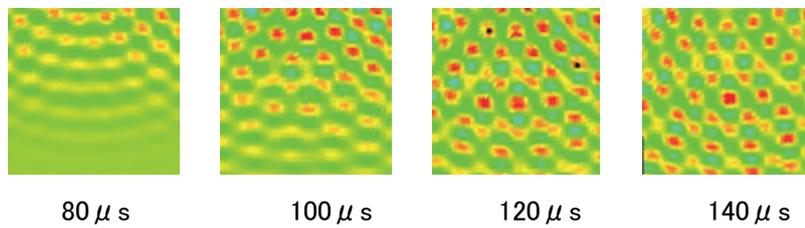
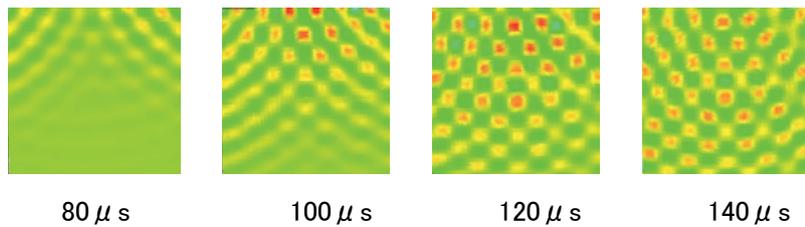


Fig.5.54 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 F

(56) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.55 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

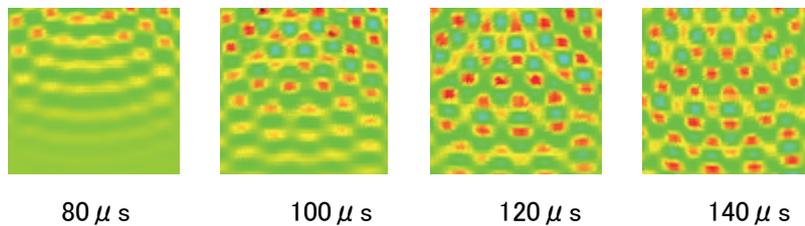
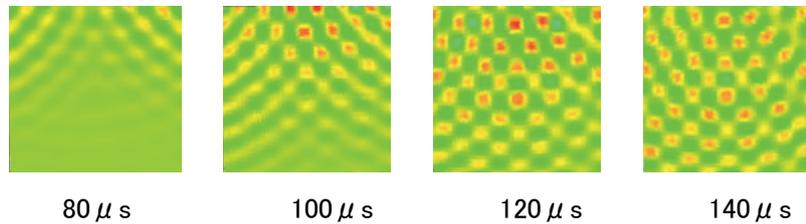


Fig.5.55 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 G

(57) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.56 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

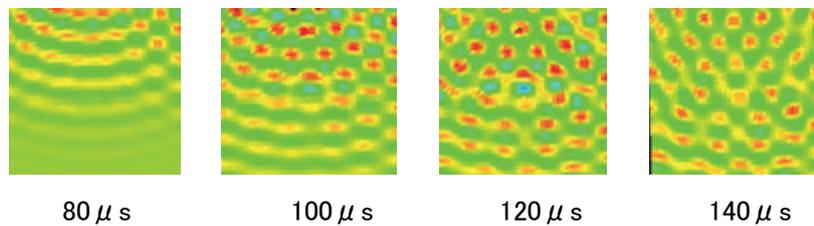
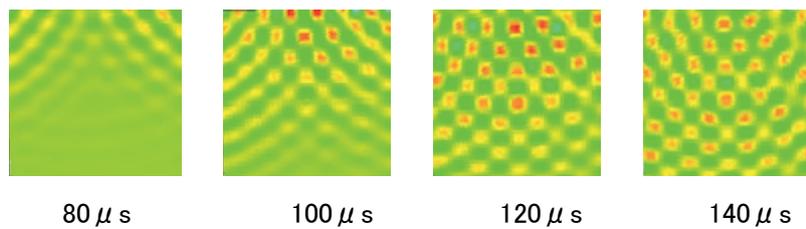


Fig.5.56 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 H

(58) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.57 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

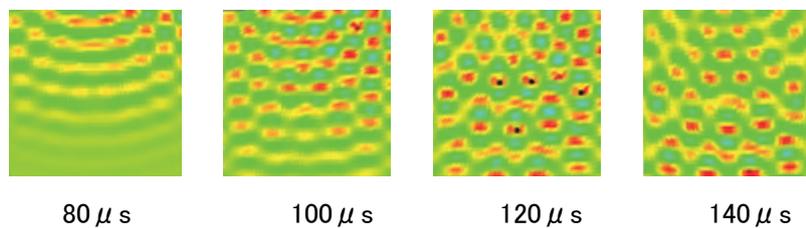
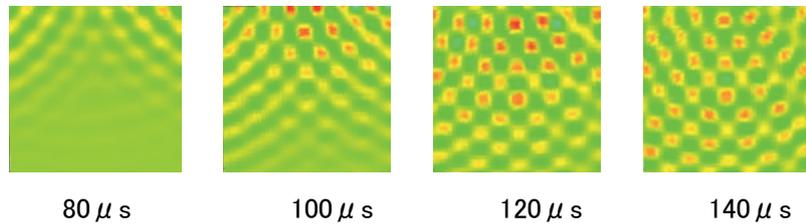


Fig.5.57 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 I

(59) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.58 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

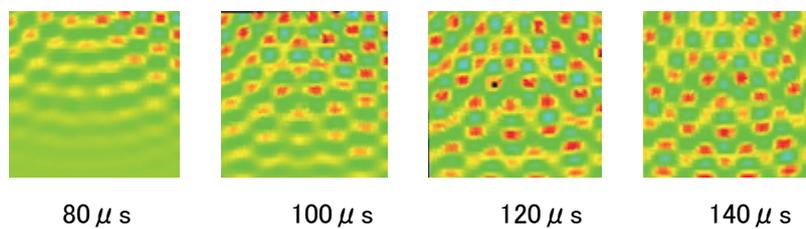
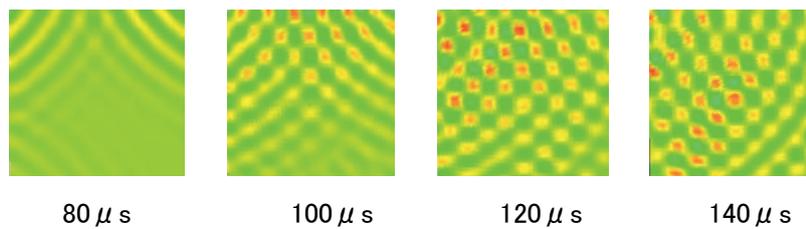


Fig.5.58 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 J

(60) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 B(亀裂Ⅰ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.59 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

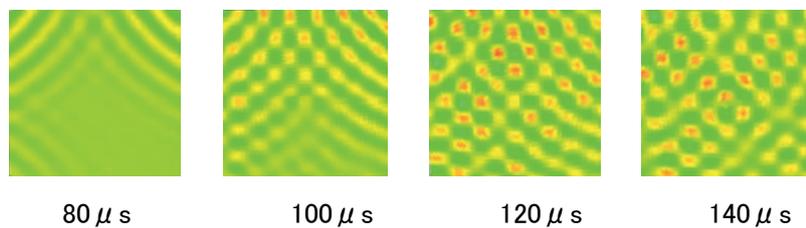
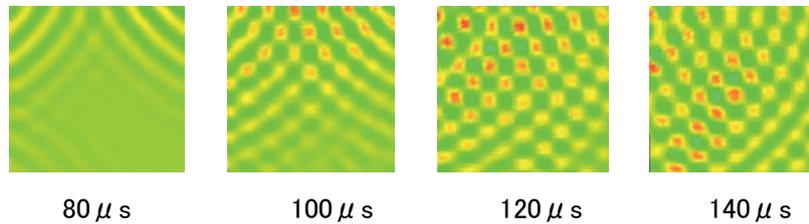


Fig.5.59 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 B

(61) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.60 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

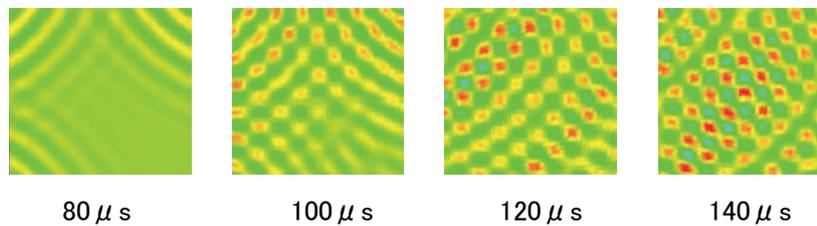
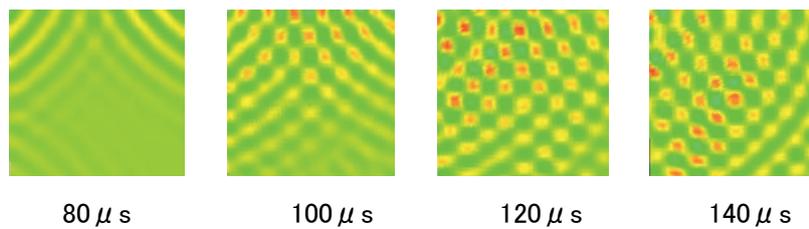


Fig.5.60 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 C

(62) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 D(スクラッチⅠ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.61 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

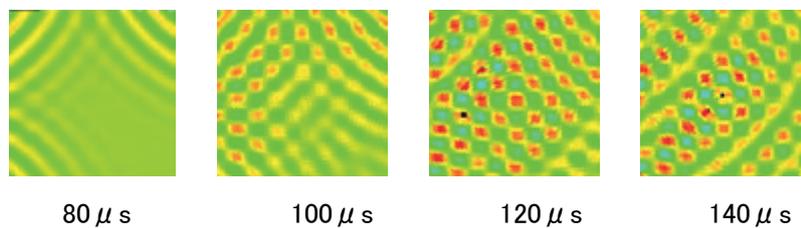
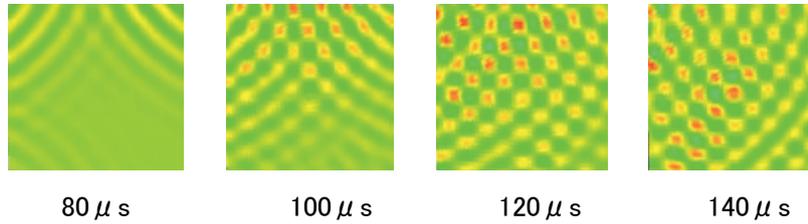


Fig.5.61 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 D

(63) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.62 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

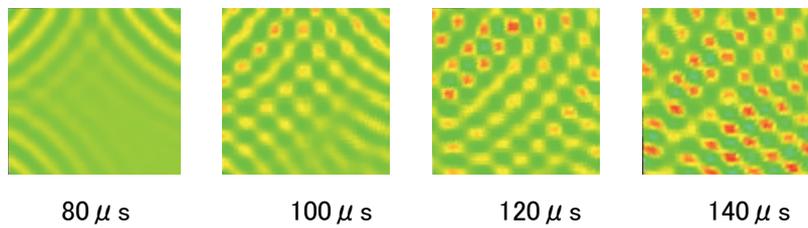
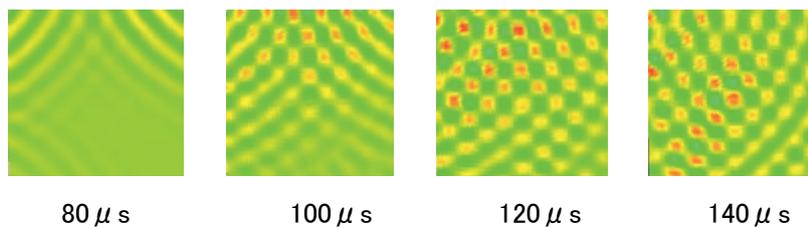


Fig.5.62 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 E

(64) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 F(スクラッチ III :幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.63 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

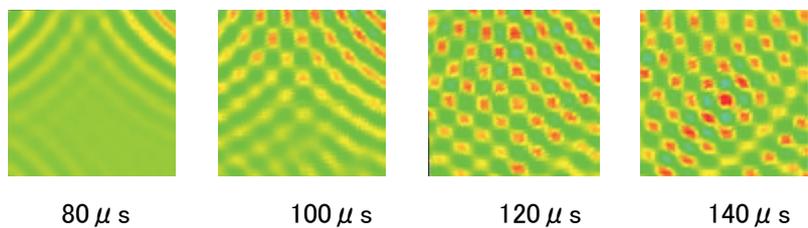
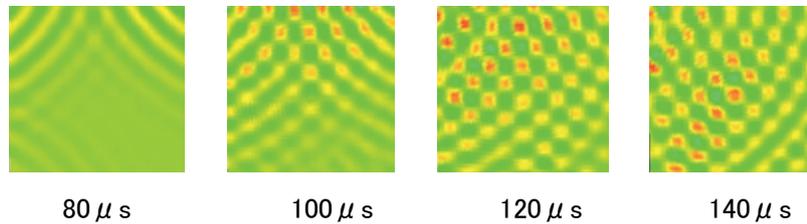


Fig.5.63 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 F

(65) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.64 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

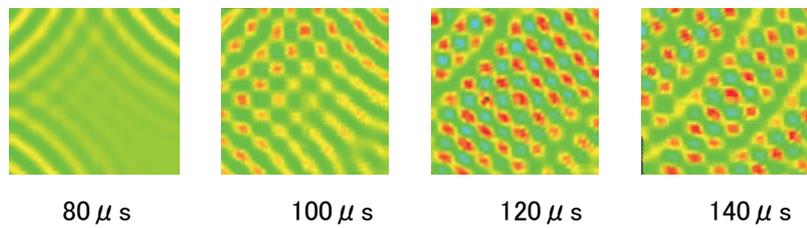
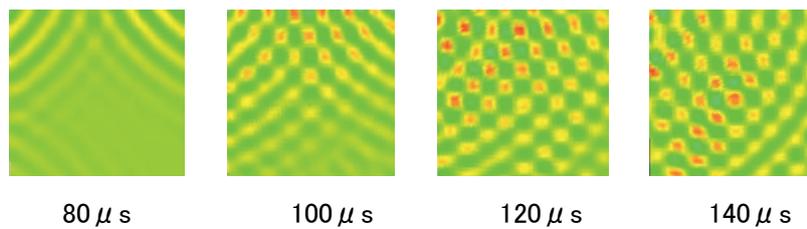


Fig.5.64 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 G

(66) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 H(デントⅠ:深さ 2mm, ϕ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.65 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

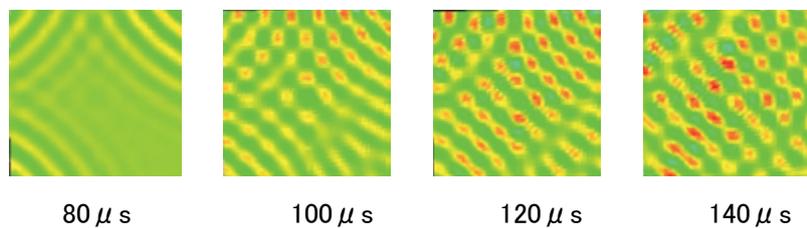
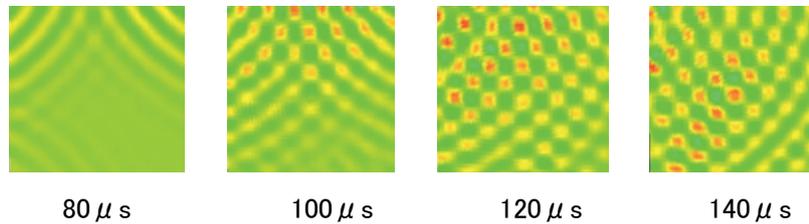


Fig.5.65 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 H

(67) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 I(デントⅡ:深さ 2mm, ϕ 60mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.66 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

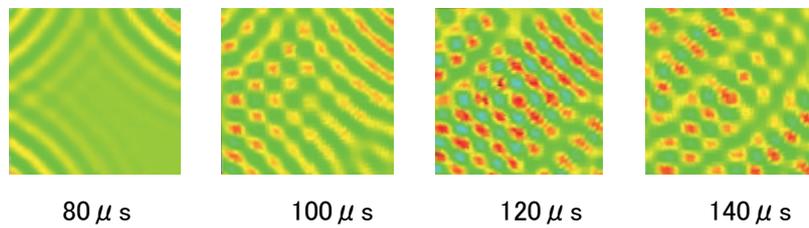
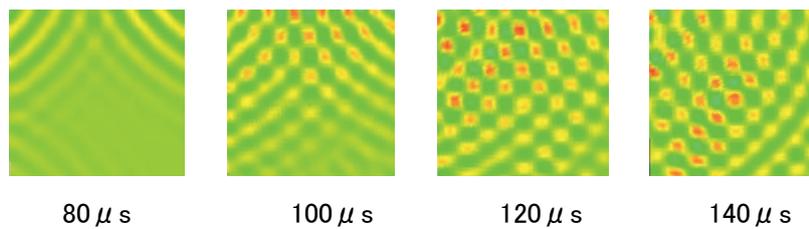


Fig.5.66 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 I

(68) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.67 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

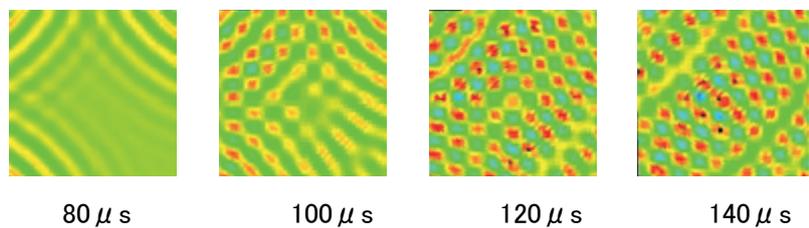
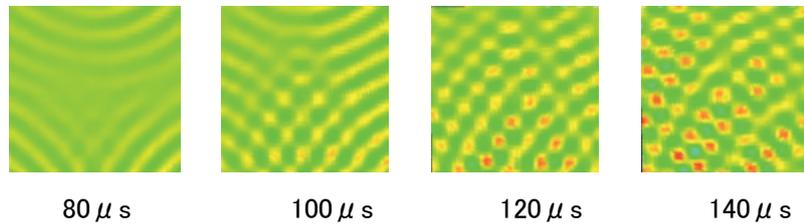


Fig.5.67 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 J

(69) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.68 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

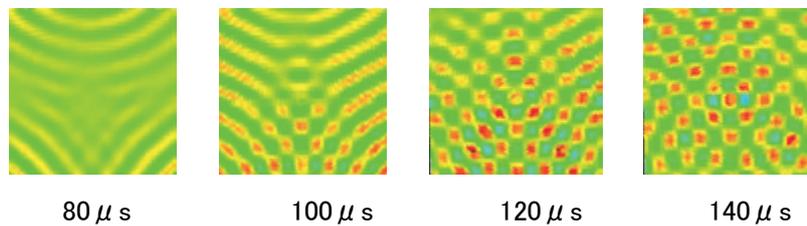
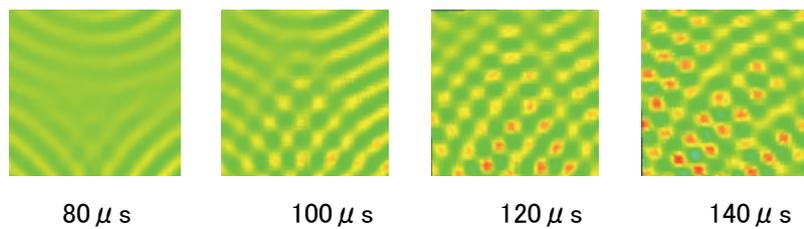


Fig.5.68 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 B

(70) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 C(亀裂 II :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.69 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

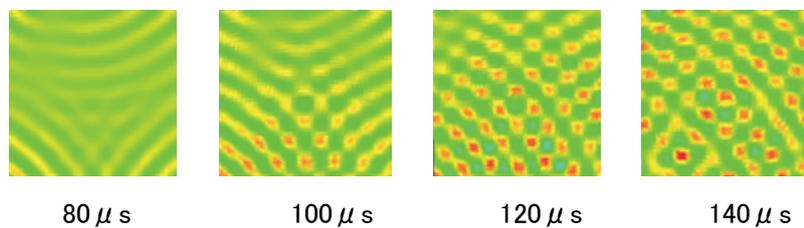
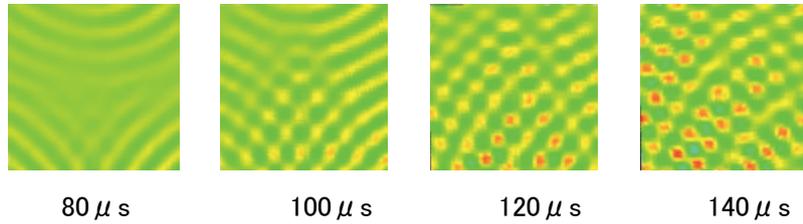


Fig.5.69 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 C

(71) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.70 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

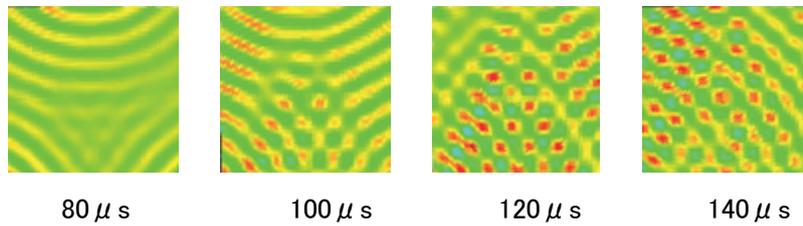
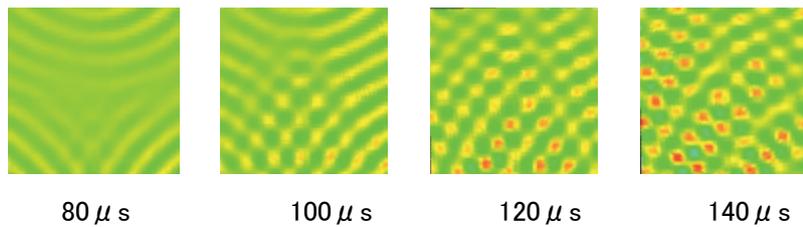


Fig.5.70 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 D

(72) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.71 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

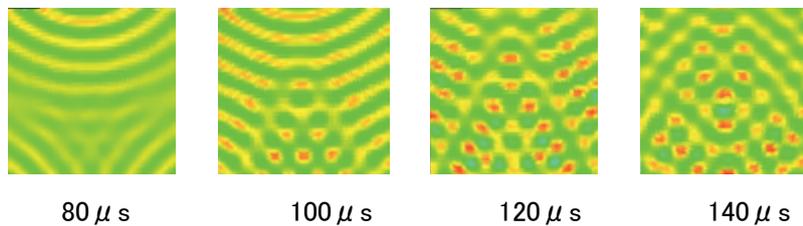
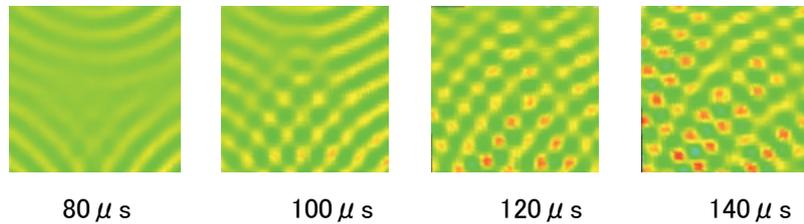


Fig.5.71 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 E

(73) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.72 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

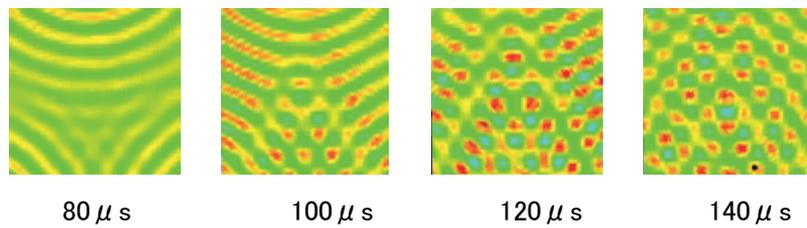
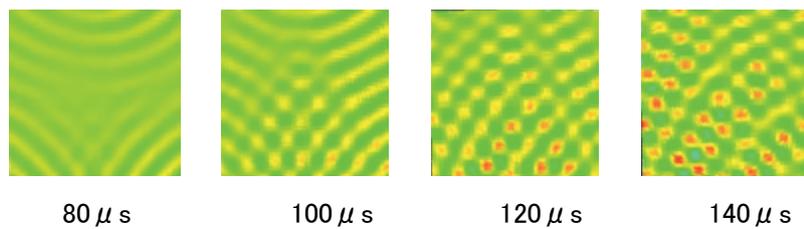


Fig.5.72 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 F

(74) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.73 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

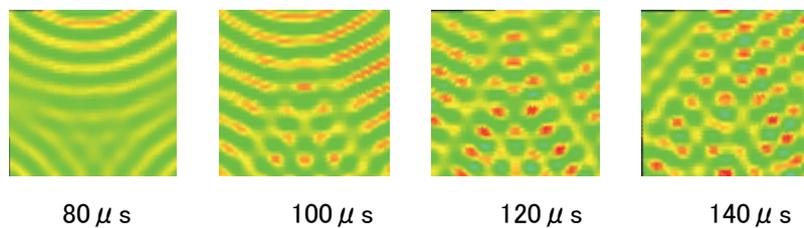
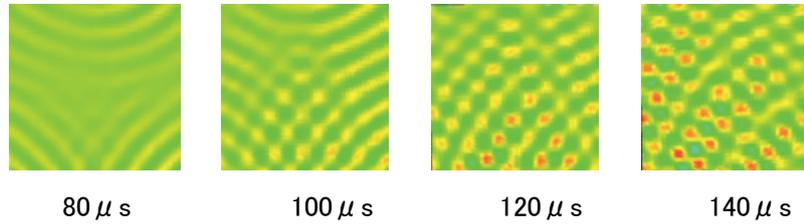


Fig.5.73 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 G

(75) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.74 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

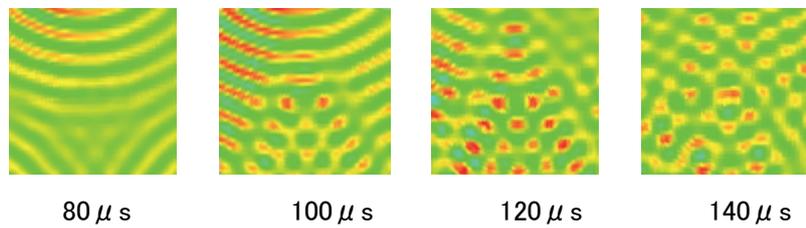
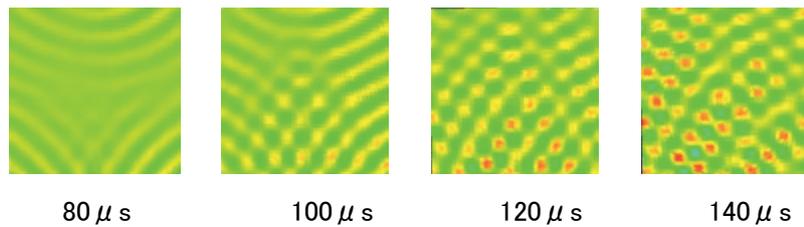


Fig.5.74 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 H

(76) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.75 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

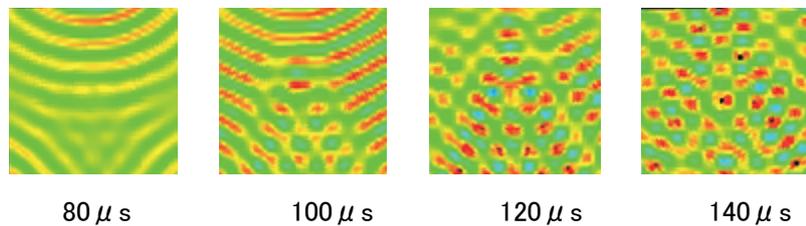
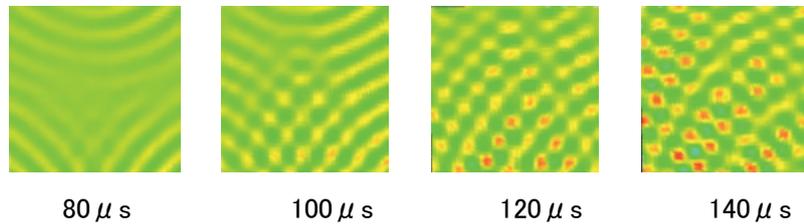


Fig.5.75 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 I

(77) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.76 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

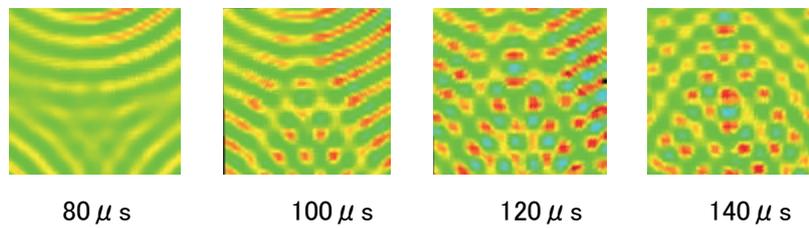
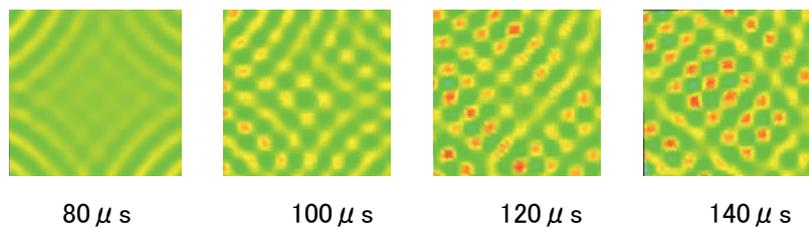


Fig.5.76 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 J

(78) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 B(亀裂Ⅰ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.77 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

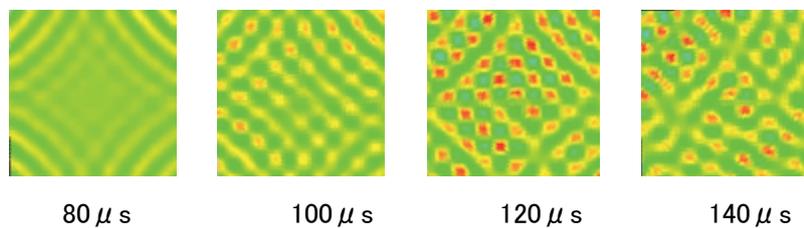
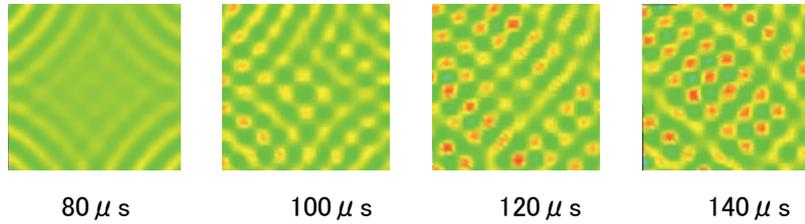


Fig.5.77 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 B

(79) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.78 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

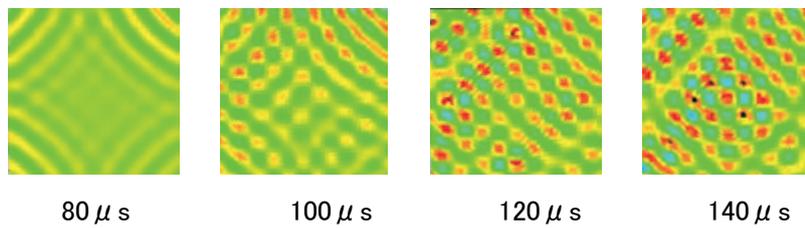
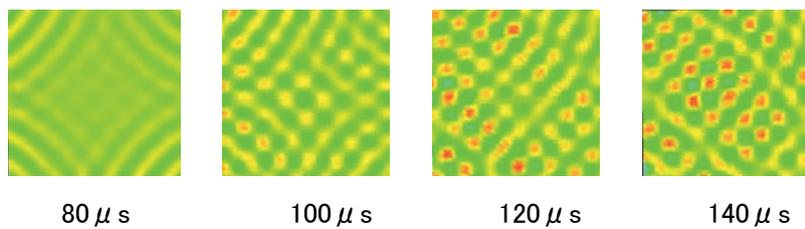


Fig.5.78 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 C

(80) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 D(スクラッチⅠ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の Lamb 波伝播画像を Fig.5.79 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

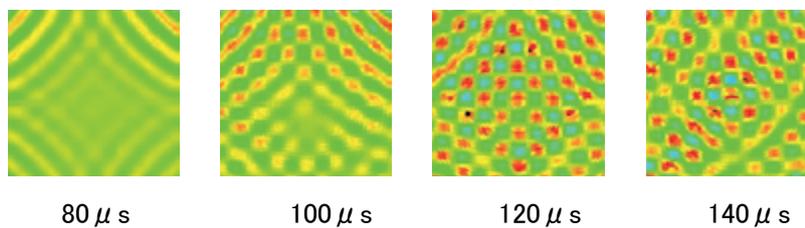
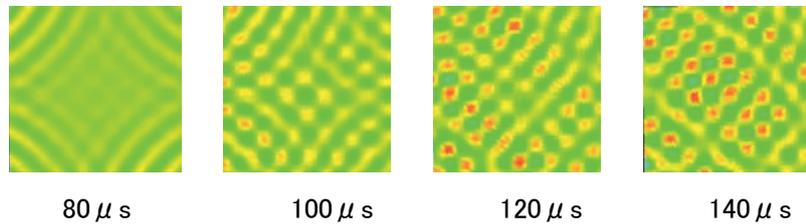


Fig.5.79 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 D

(81) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.80 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

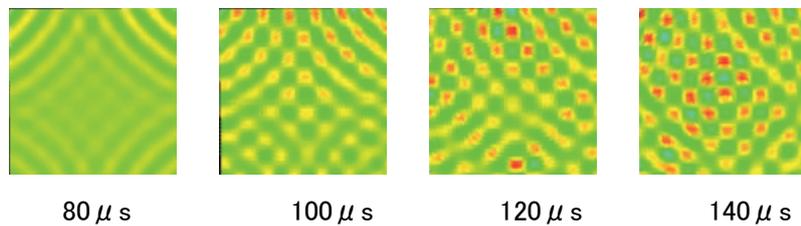
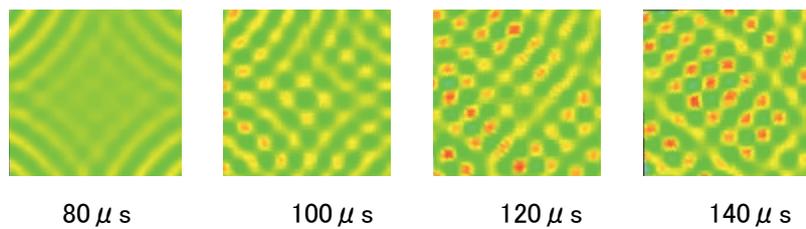


Fig.5.80 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 E

(82) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 F(スクラッチ III :幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.81 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

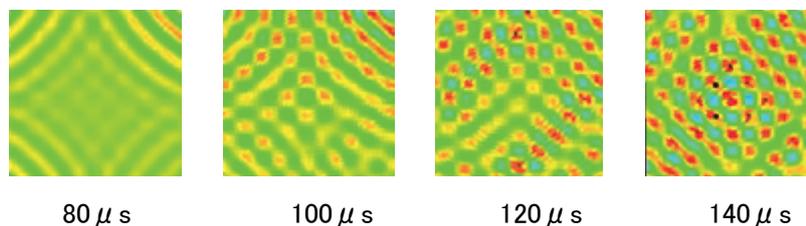
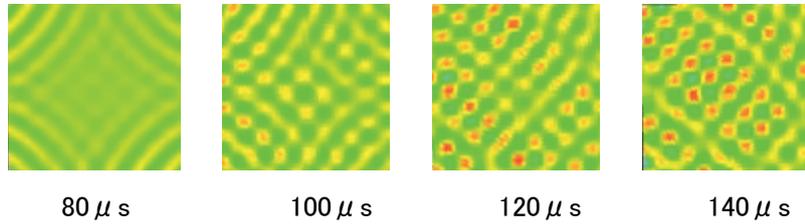


Fig.5.81 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 F

(83) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 G(スクラッチIV:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.82 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

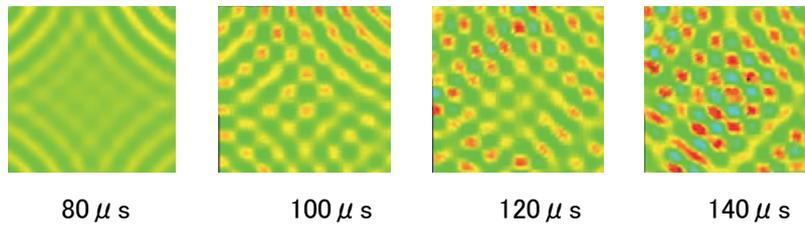
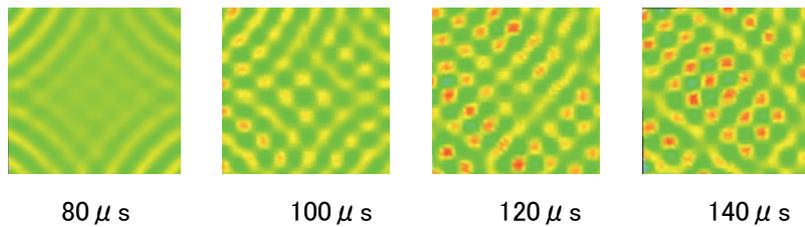


Fig.5.82 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 G

(84) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 H(デント I :深さ2mm, ϕ 20mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.83 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

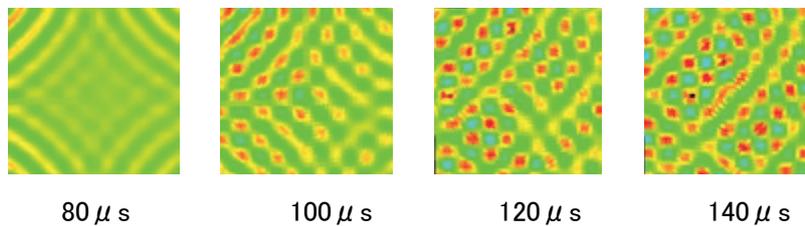
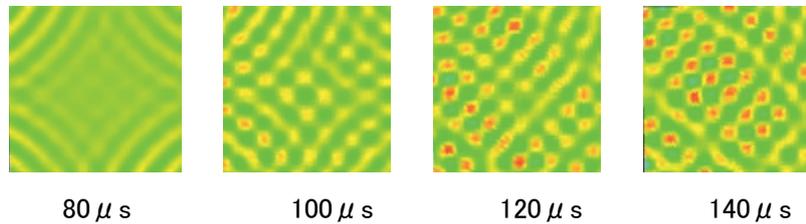


Fig.5.83 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 H

(85) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.84 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

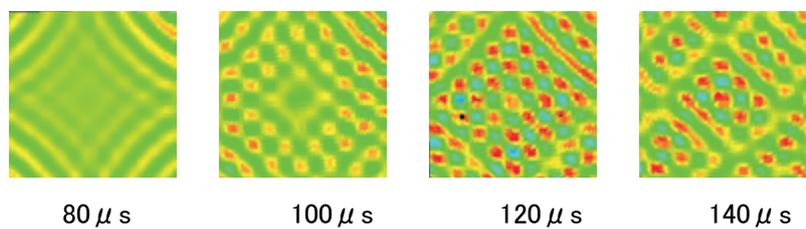
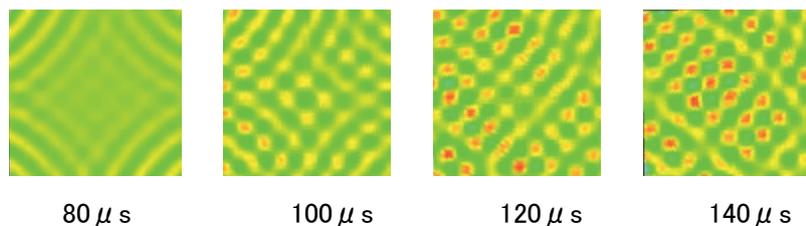


Fig.5.84 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 I

(86) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 J(デント III : 深さ 2mm, ϕ 100mm) の Lamb 波伝播画像を Fig.5.85 に示す.

(a) 損傷なし



(b) 損傷あり

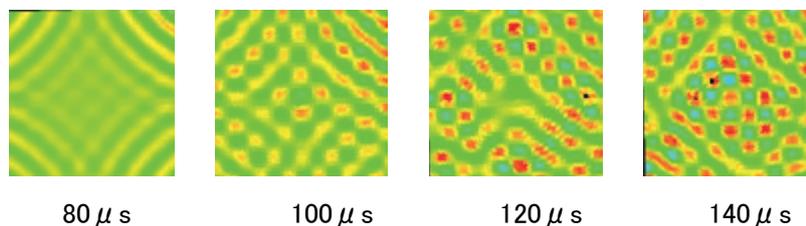


Fig.5.85 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 J

5.3 Lamb 波伝播特性の検討

本実験により各 Lamb 波の AE センサー位置パターンにより損傷部における Lamb 波の反射や

散乱など特色のある伝播特性が確認された。以下に Lamb 波の発振パターン毎の各供試体における特性について述べる。

(1) パターン 1(AE センサー位置 ①)

Fig.5.2～Fig.5.10 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像において、AE センサー(センサー①)から発振されたLamb 波が供試体上を直進して伝播している様子が鮮明に確認できた。亀裂に関しては Fig.5.2(b)に示すとおり供試体 B(亀裂 I)の損傷部周辺においてLamb 波の反射による伝播波形の位相のずれが鮮明に確認された。位相のずれは損傷部付近から扇状に広がっており、画像から損傷位置が判定できた。供試体 C(亀裂 II)では Fig.5.3(b)に示すとおり損傷長さの変化に伴い供試体 B に比べて反射波が小さいものとなっているが、供試体 B と同様に損傷部周辺において Lamb 波伝播波形の位相のずれが確認された。スクラッチに関しては Fig.5.4(b)および Fig.5.5(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチ I)、供試体 E(スクラッチ II)においては、供試体 B(亀裂 I)、供試体 C(亀裂 II)と比較して、損傷の深さの変化に伴い反射波が小さくなっている。最も浅い損傷である供試体 F(スクラッチ III)、供試体 G(スクラッチ IV)においては、Fig.5.6(b)および Fig.5.7(b)に示すとおり損傷部における Lamb 波の反射波を確認することはできなかった。デントに関しては Fig.5.8(b)～Fig.5.10(b)に示すとおり、供試体 H(デント I)、供試体 I(デント II)、供試体 J(デント III)において、前述の亀裂やスクラッチと異なり損傷部周辺における反射波が損傷部を中心として円周方向に散乱している様子が確認された。

(2) パターン 2(AE センサー位置 ②)

Fig.5.11～Fig.5.16 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像において、AE センサー(センサー②)から発振されたLamb 波が供試体上を直進して伝播している様子が鮮明に確認できた。亀裂に関しては Fig.5.11(b)に示すとおり供試体 B(亀裂 I)の損傷部周辺においてLamb 波の反射による伝播波形の位相のずれが鮮明に確認できた。位相のずれは損傷部付近から扇状に広がっており、画像から損傷位置が判定できた。供試体 C(亀裂 II)では Fig.5.12(b)に示すとおりLamb 波伝播波形の位相のずれは確認されなかった。スクラッチに関しては Fig.5.13(b)～Fig.5.16(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチ I)、供試体 E(スクラッチ II)、供試体 F(スクラッチ III)、供試体 G(スクラッチ IV)全てにおいて、Lamb 波伝播波形の位相のずれは確認されなかった。

(3) パターン 3(AE センサー位置 ①+②)

Fig.5.17～Fig.5.25 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては、AE センサー(センサー①および②)から発振されたLamb 波が供試体上を伝播し、途中で互いに干渉する様子が確認できた。亀裂に関しては Fig.5.17(b)に示すとおり供試体 B(亀裂 I)の損傷部周辺においてLamb 波の反射による伝播波形の位相のずれが鮮明に確認できた。しかし位相のずれは帯状に進んでおり、損傷位置は判定できなかった。供試体 C(亀裂 II)では、Fig.5.18(b)に示すとおり、損傷部周辺において伝播波形の位相のずれは確認されなかった。スクラッチに関しては Fig.5.19(b)～Fig.5.22(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチ I)、供試体 E(スクラッチ II)、供試体 F

(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ) 全てにおいて損傷部における Lamb 波の反射反応は確認できなかった。デントに関しては Fig.5.23(b)~Fig.5.25(b)に示すとおり供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ) 全てにおいて, 損傷部における Lamb 波伝播波形の位相に変化が表れていることが確認できた。しかし, 損傷位置は判定できなかった。

(4) パターン 4(AE センサー位置 ②+③)

Fig.5.26~Fig.5.34 の (a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサー(センサー②および③)から発振された Lamb 波が供試体上を伝播し, 途中で互いに干渉する様子が確認できた。亀裂に関しては Fig.5.26(b)に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において $120 \mu\text{s}$, $140 \mu\text{s}$ で損傷部周辺の Lamb 波伝播波形の位相に変化が表れていることが確認できた。しかし, 損傷位置は判定できなかった。供試体 C(亀裂Ⅱ)では Fig.5.27(b)に示すとおり Lamb 波の反射反応は確認されなかった。スクラッチに関しては Fig.5.28(b)~Fig.5.31(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ) 全てにおいて損傷部周辺における Lamb 波の反射反応は確認されなかった。デントに関しては Fig.5.32(b)~Fig.5.34(b)に示すとおり, 供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ) 全てにおいて, 損傷部周辺における Lamb 波の反射反応は確認されなかった。

(5) パターン 5(AE センサー位置 ②+④)

Fig.5.35~Fig.5.43 の (a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサー(センサー②および④)から発振された Lamb 波が供試体上を直進し, 途中で互いに干渉する様子が確認できた。亀裂に関しては Fig.5.35(b)に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)の損傷部周辺において Lamb 波の反射による伝播波形の位相のずれが鮮明に確認できた。しかし, 位相のずれは帯状に進展しており, 画像から損傷位置は判定できなかった。供試体 C(亀裂Ⅱ)では Fig.5.36(b)に示すとおり $120 \mu\text{s}$ の時点において損傷部における Lamb 波伝播波形に変化が表れていることが確認できた。しかし, 位相のずれは帯状に進展しており, 損傷位置は判定できなかった。スクラッチに関しては Fig.5.37(b)~Fig.5.39(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ)で $100 \mu\text{s}$, $120 \mu\text{s}$ の時点において損傷部周辺における Lamb 波伝播波形に変化が表れていることが確認できた。しかし, 位相のずれは帯状に進展しており, 損傷位置は判定できなかった。供試体 G(スクラッチⅣ)では Fig.5.40(b)に示すとおり Lamb 波の反射反応は確認できなかった。デントに関しては Fig.5.41(b)~Fig.5.43(b)に示すとおり, 供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ)においては, 損傷部周辺における伝播波形に変化が表れていることが確認できた。しかし, 位相のずれは帯状に進展しており, 画像から損傷位置は判定できなかった。

(6) パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤)

Fig.5.44~Fig.5.49 の (a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサー(センサー②および⑤)から発振された Lamb 波が供試体上を伝播し, 途中で互いに干渉する様子が確認できた。本パターンにおいては Fig.5.44(b)~Fig.5.49(b)に示すとおり亀裂の供試体 B(亀

裂Ⅰ), 供試体 C(亀裂Ⅱ), スクラッチの供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ)全てにおいて, Lamb 波の反射反応は確認されなかった。

(7) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③)

Fig.5.50～Fig.5.58 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサー(センサー①②および③)から発振された Lamb 波が供試体上を伝播し, 途中で互いに干渉する様子が確認できた。亀裂に関しては Fig.5.50(b)に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において損傷部周辺の Lamb 波伝播波形の位相に変化が表れていることが確認できた。しかし, 損傷位置は判定できなかった。供試体 C(亀裂Ⅱ)では Fig.5.51(b)に示すとおり Lamb 波の反射反応は確認されなかった。スクラッチに関しては Fig.5.52(b)～Fig.5.55(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ)全てにおいて, Lamb 波の反射反応は確認されなかった。デントに関しては Fig.5.56(b)～Fig.5.58(b)に示すとおり供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ)全てにおいて, 損傷部周辺の Lamb 波の反射反応は確認されなかった。

(8) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④)

Fig.5.59～Fig.5.67 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサー(センサー②③および④)から発振された Lamb 波が供試体上を伝播し, 途中で互いに干渉する様子が確認できた。本パターンにおいては Fig.5.59(b)～Fig.5.67(b)に示すとおり, 亀裂の供試体 B(亀裂Ⅰ), 供試体 C(亀裂Ⅱ), スクラッチの供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ), デントの供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ)全てにおいて, Lamb 波の反射反応は確認されなかった。

(9) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤)

Fig.5.68～Fig.5.76 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサー(センサー①④および⑤)から発振された Lamb 波が供試体上を直進し, 途中で互いに干渉する様子が確認できた。亀裂に関しては Fig.5.68(b)に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において損傷部周辺の Lamb 波伝播波形の位相に変化が表れていることが確認できた。しかし, 損傷位置は判定できなかった。供試体 C(亀裂Ⅱ)では Fig.5.69(b)に示すとおり Lamb 波の反射反応は確認されなかった。スクラッチに関しては Fig.5.70(b)～Fig.5.73(b)に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ)全てにおいて, Lamb 波の反射反応は確認されなかった。デントに関しては Fig.5.74(b)～Fig.5.76(b)に示すとおり供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ)全てにおいて, Lamb 波の反射反応は確認されなかった。

(10) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤)

Fig.5.77～Fig.5.85 の(a)に示す供試体 A(損傷なし)の Lamb 波伝播画像においては, AE センサ

一(センサー②③④および⑤)から発振されたLamb波が供試体上を伝播し、途中で互いに干渉する様子が確認できた。本パターンにおいては Fig.5.77(b)～Fig.5.85(b)に示すとおり亀裂の供試体 B (亀裂 I), 供試体 C(亀裂 II), スクラッチの供試体 D(スクラッチ I), 供試体 E(スクラッチ II), 供試体 F(スクラッチ III), 供試体 G(スクラッチ IV), デントの供試体 H(デント I), 供試体 I(デント II), 供試体 J(デント III)全てにおいて, Lamb 波の反射反応は確認されなかった。

6. 損傷同定技術の検討

6.1 差分処理法による検討

本章では MaVES による計測にて得られたデータを簡易処理することにより、微小な傷の損傷同定技術の可能性について検討を行った。微小な傷の損傷位置を明確にする手段として、損傷のない供試体と損傷のある供試体の振幅波形データの差分をとり画像化した(差分処理法)。AE センサーを用いたLamb波伝播は接触式の加振法であるため、2つの供試体の波形データを比べた場合、センサーの取り付け位置や供試体面との接触状態の違いにより波形の位置および振幅の大きさに誤差を生じる。本検討では損傷のある供試体の $100\mu\text{s}$ 、 $120\mu\text{s}$ 、 $140\mu\text{s}$ のデータを基準にし、その時間帯の前後の損傷のない供試体データを重ね合わせ、一番鮮明に損傷部が表示された画像を表示した。画像同士の比較を容易にするため、波動の振幅成分の Time Signal レンジを $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$ に固定し、5.2 節に示すオリジナルデータによる損傷供試体を伝播するLamb波の画像と差分処理法により得た伝播画像を比較した。両伝播画像の Color bar で示される Time Signal レンジを Fig.6.1 に示す。各供試体上のLamb波伝播画像を Fig.6.2 から Fig.6.85 に示す。上段(a)には波動の振幅成分の Time Signal レンジを固定したオリジナルデータに基づく損傷供試体の伝播画像を、中段(b)には同じくレンジを固定し、差分処理法でデータ処理後の損傷供試体の伝播画像を、下段(c)には(b)の画像の Time Signal レンジを最適化した伝播画像を並べて示す。

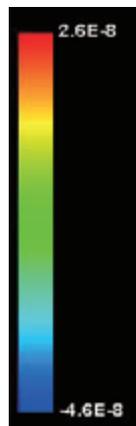
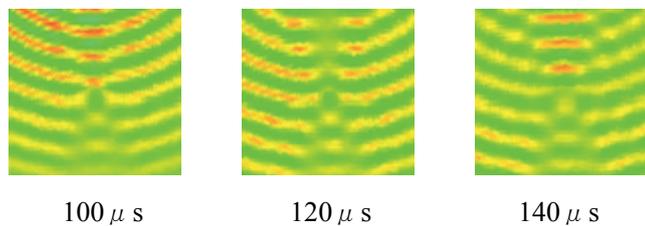


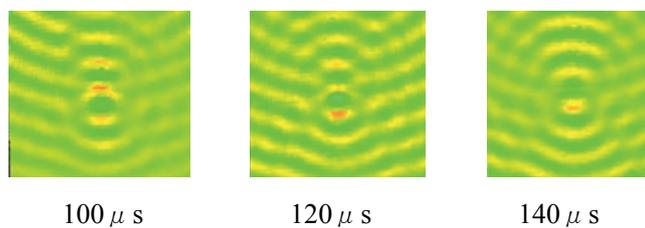
Fig.6.1 Time Signal レンジ

- (1) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 B (亀裂 I : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.2 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $1.32E-8(m) \sim -1.19E-8(m)$]

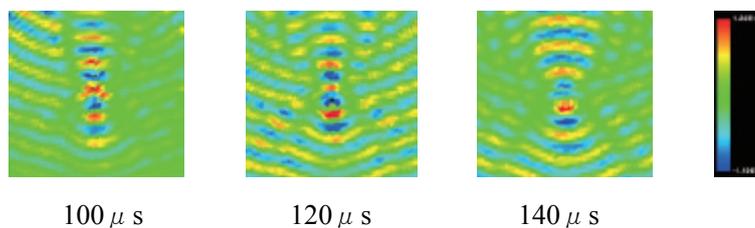
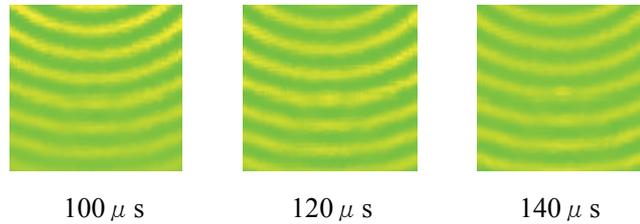


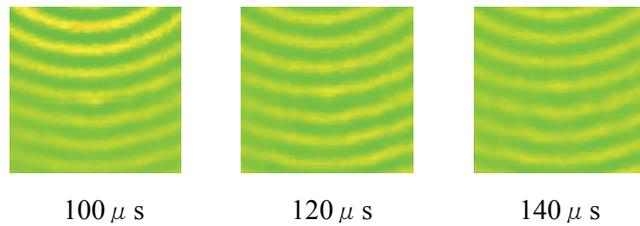
Fig.6.2 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 B

(2) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 C (亀裂 II : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.3 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $1.14E-8(m) \sim -1.26E-8(m)$]

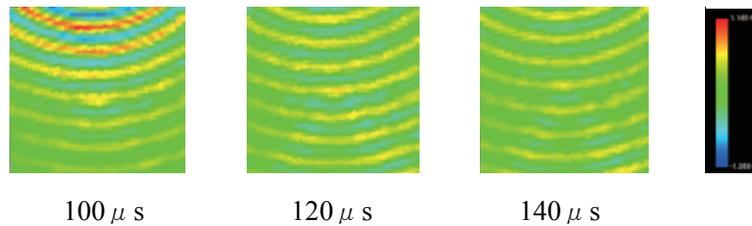
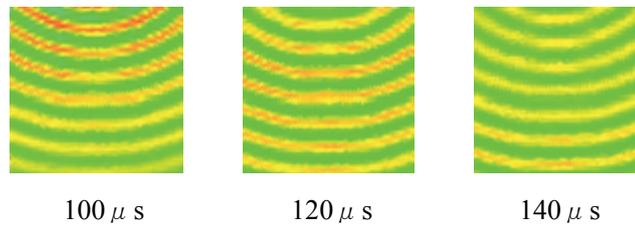


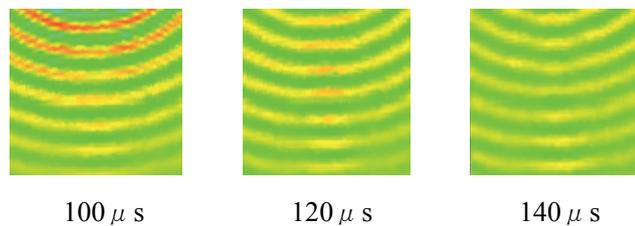
Fig.6.3 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 C

- (3) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 D(スクラッチ I : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.4 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.08E-8(m) \sim -2.51E-8(m)$]

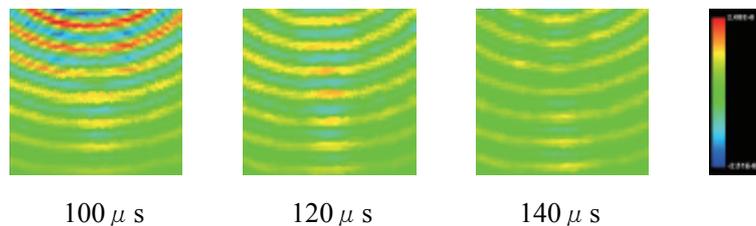
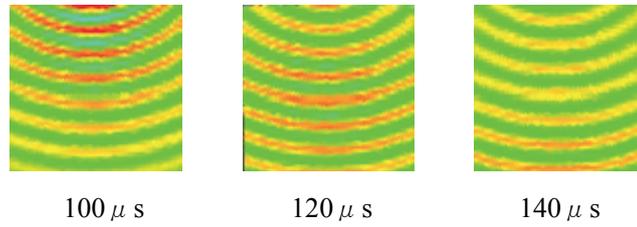


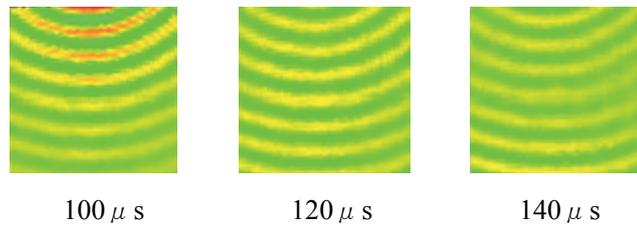
Fig.6.4 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 D

- (4) パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 E (スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.5 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $1.90E-8(m) \sim -2.60E-8(m)$]

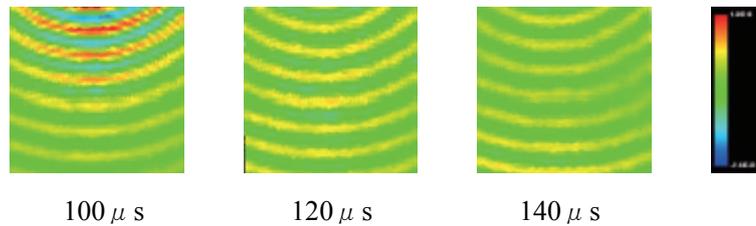
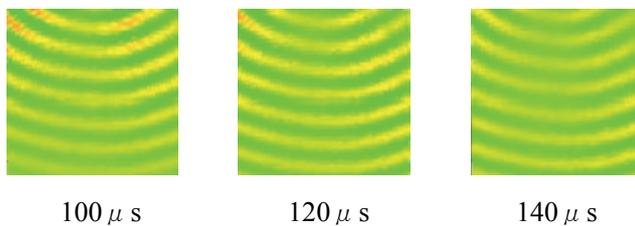


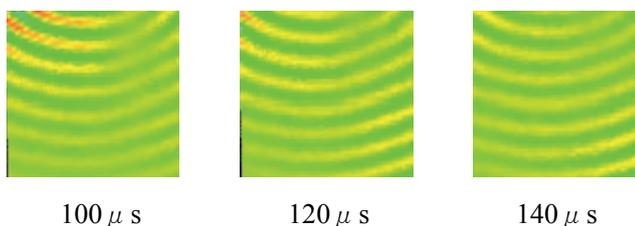
Fig.6.5 パターン 1 (AE センサー位置 ①), 供試体 E

- (5) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 F (スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.6 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.60E-8(m)~-2.50E-8(m)]

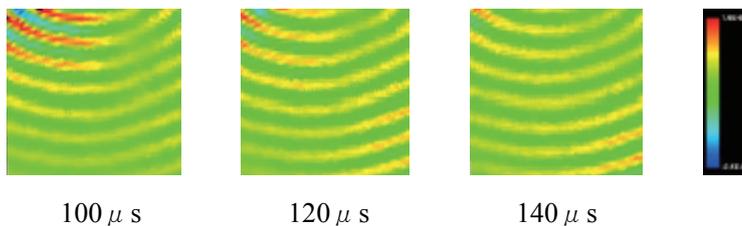
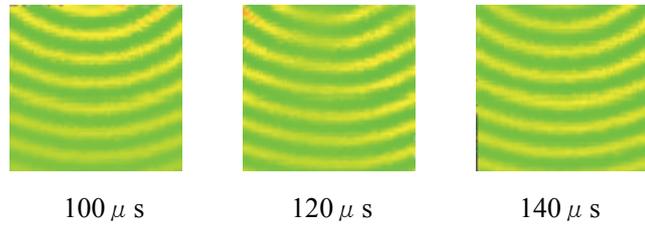


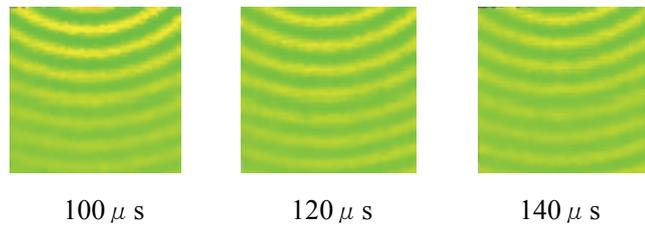
Fig.6.6 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 F

(6) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.7 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.18E-8(m)~-1.35E-8(m)]

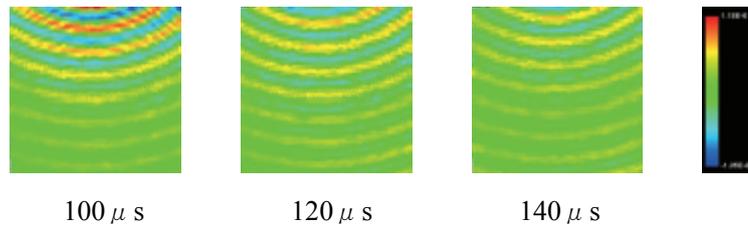
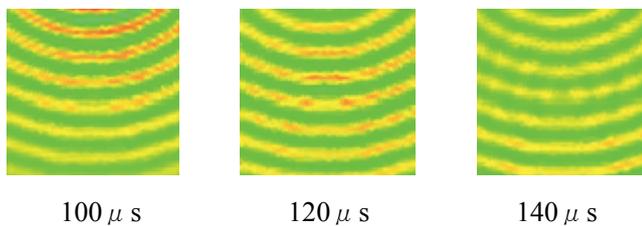


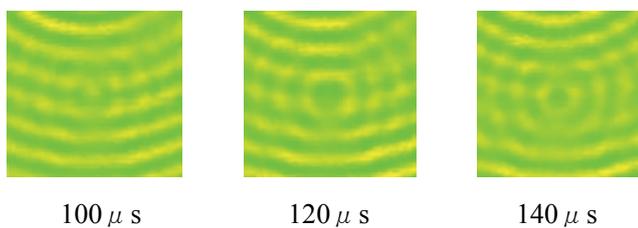
Fig.6.7 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 G

(7) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm) の画像を Fig.6.8 に示す.

(a) オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ[レンジ最適化: $9.20E-9(m) \sim -9.21E-9(m)$]

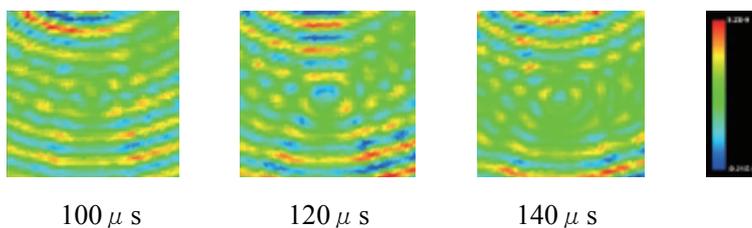
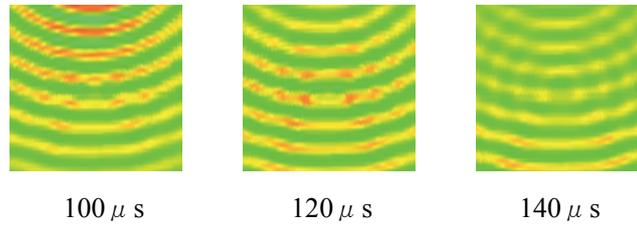


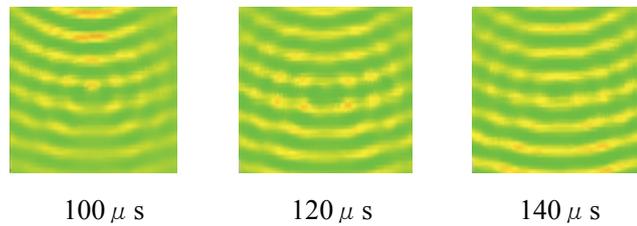
Fig.6.8 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 H

(8) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm)の画像を Fig.6.9 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $1.28E-8(m) \sim -1.27E-8(m)$]

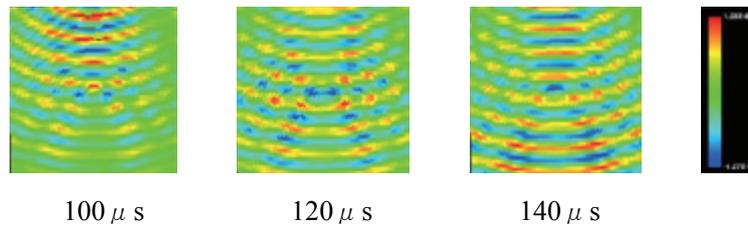
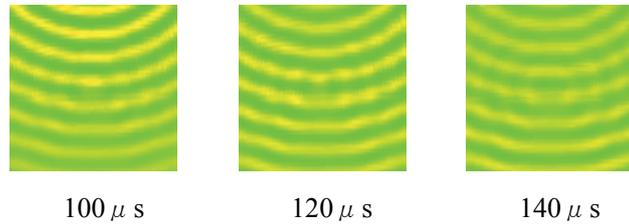


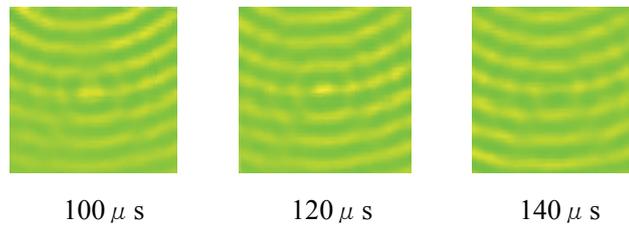
Fig.6.9 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 I

- (9) パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 J(デントⅢ: 深さ 2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.10 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $7.60\text{E}-9(\text{m}) \sim -7.60\text{E}-9(\text{m})$]

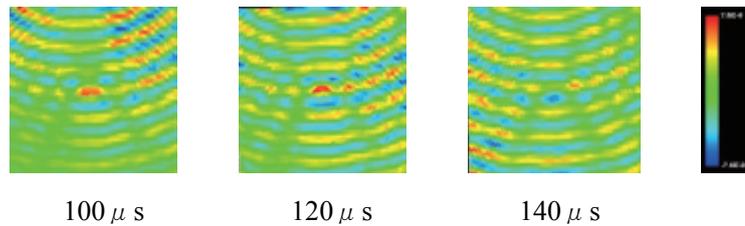
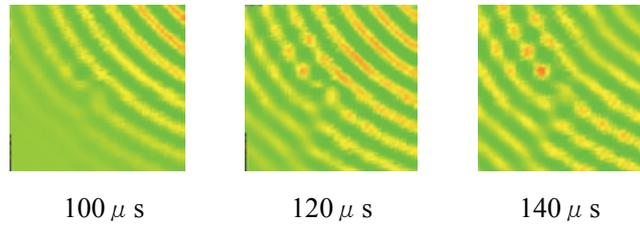


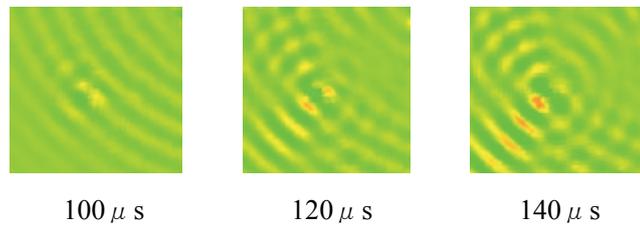
Fig.6.10 パターン 1(AE センサー位置 ①), 供試体 J

(10) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.11 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.35E-8(m)~-1.79E-8(m)]

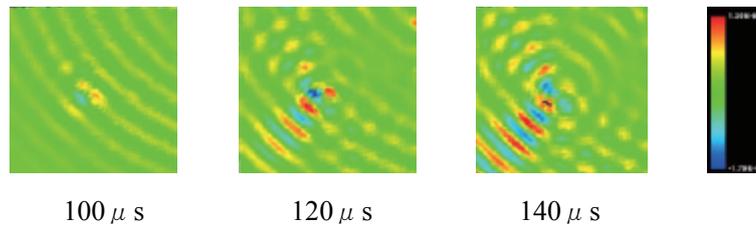
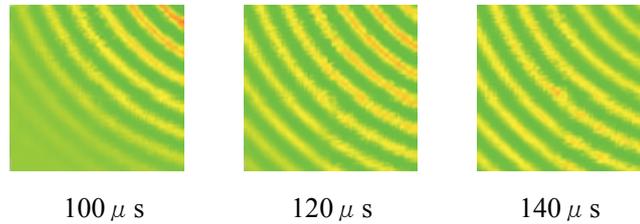


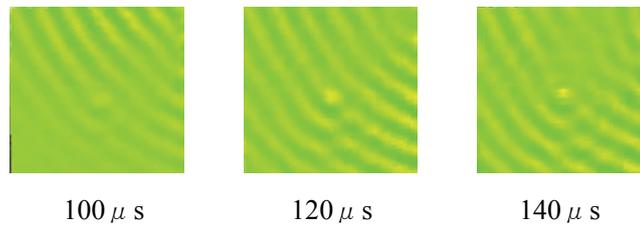
Fig.6.11 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 B

(11) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.12 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:7.39E-9(m)~-7.38E-9(m)]

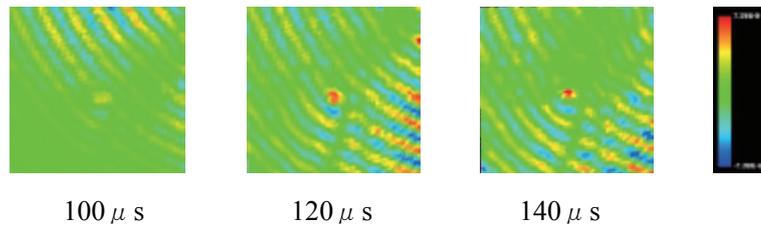
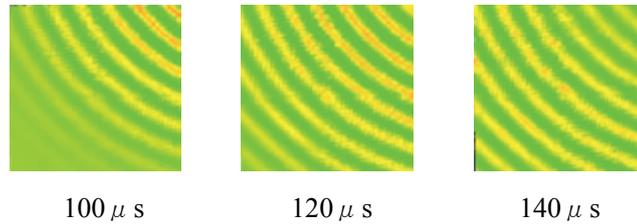


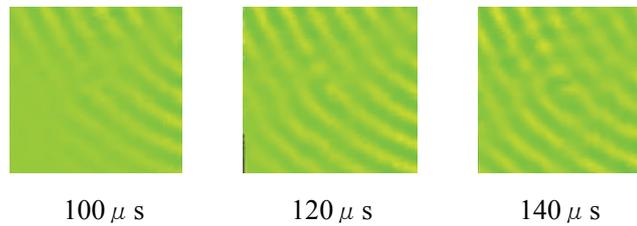
Fig.6.12 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 C

(12) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 D(スクラッチ I : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.13 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $6.29\text{E}-9(\text{m}) \sim -9.17\text{E}-9(\text{m})$]

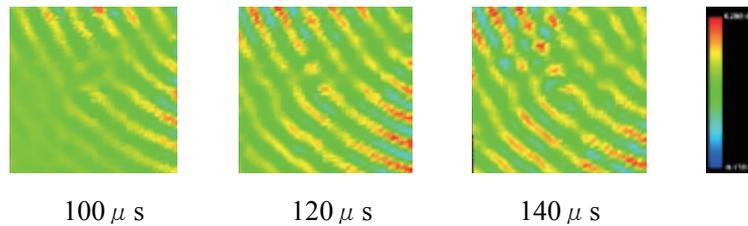
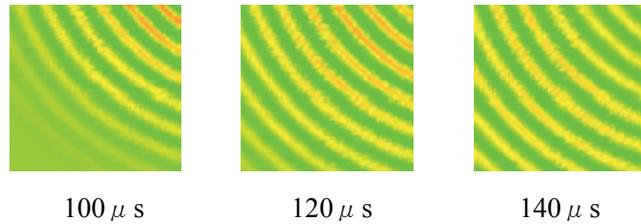


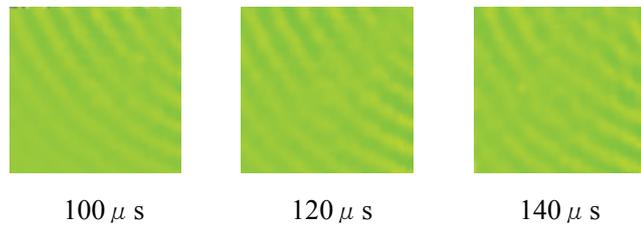
Fig.6.13 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 D

(13) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 E(スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.14 に示す.

(a) オリジナルデータ[レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(b) 差分処理後データ[レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(c) 差分処理後データ[レンジ最適化: $5.30\text{E}-9(\text{m}) \sim -8.00\text{E}-9(\text{m})$]

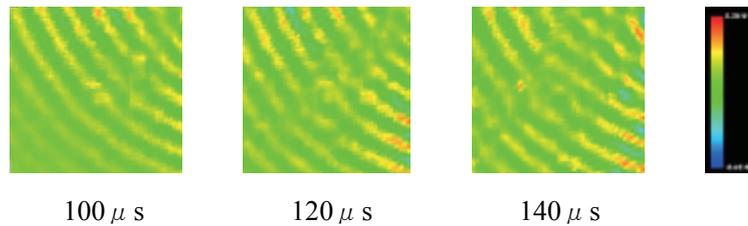
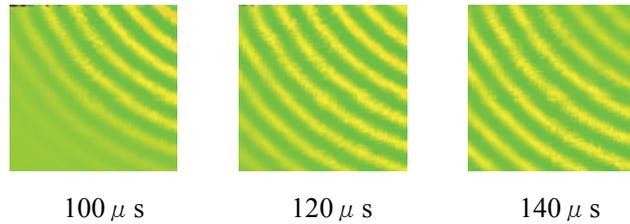


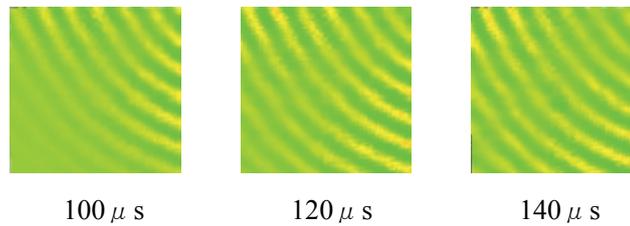
Fig.6.14 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 E

(14) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.15 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.70E-8(m)~-1.33E-8(m)]

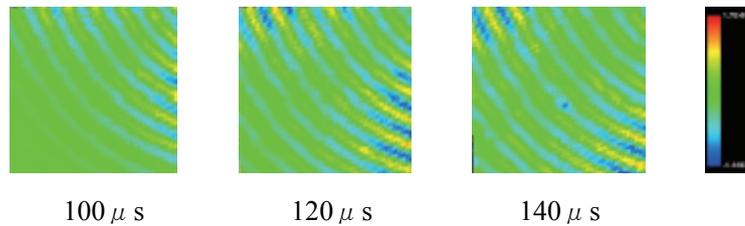
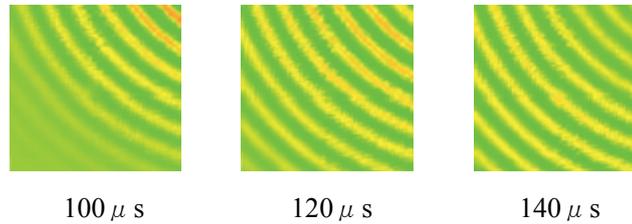


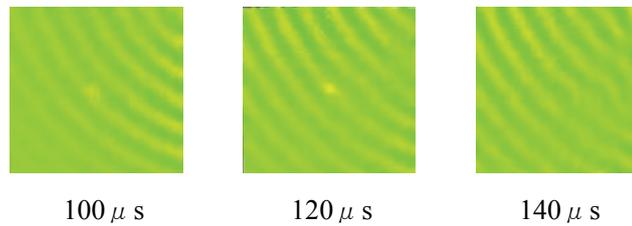
Fig.6.15 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 F

(15) パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.16 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:6.73E-9(m)~-7.47E-9(m)]

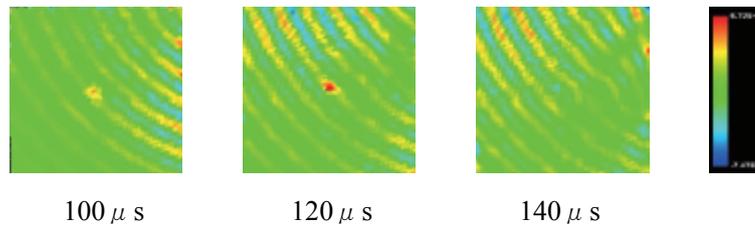
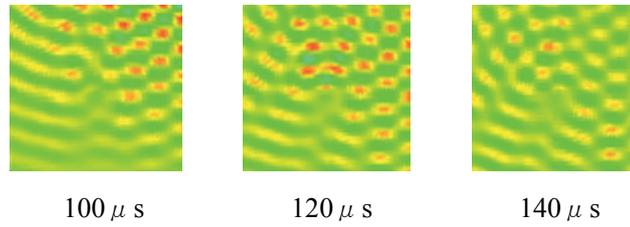


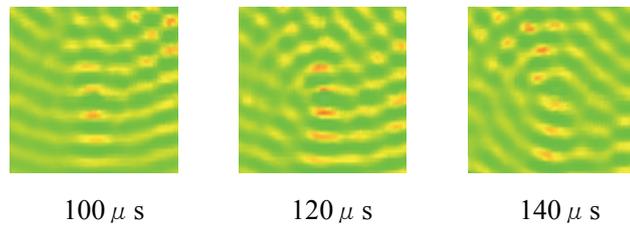
Fig.6.16 パターン 2(AE センサー位置 ②), 供試体 G

(16) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.17 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.72E-8(m)~-1.65E-8(m)]

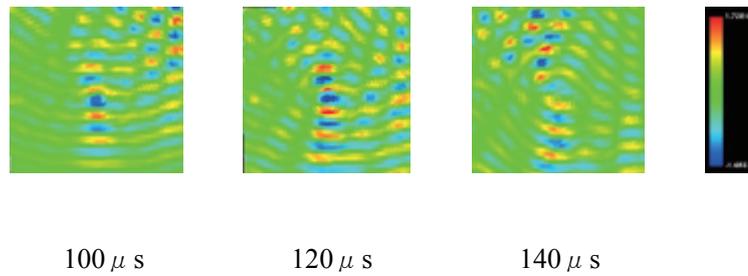
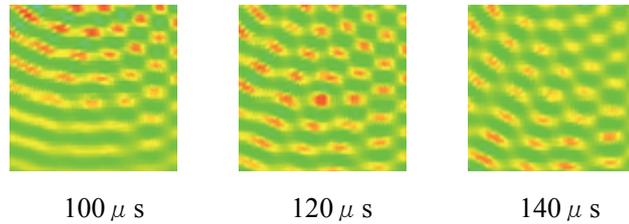


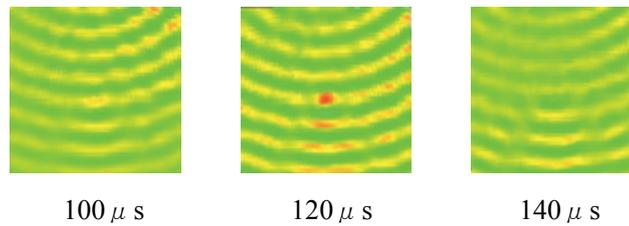
Fig.6.17 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 B

(17) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.18 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.03E-8(m)~-1.78E-8(m)]

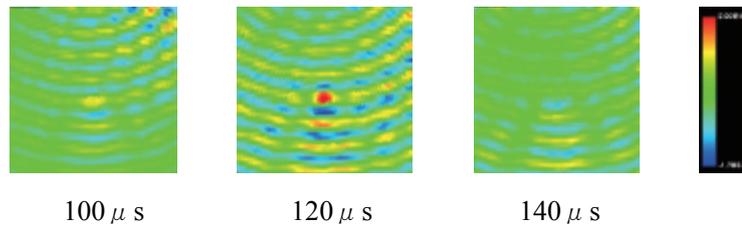
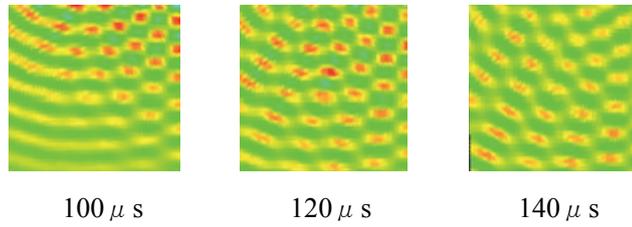


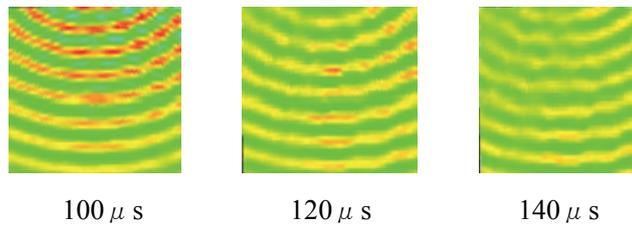
Fig.6.18 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 C

(18) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.19 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.40E-8(m)~-2.80E-8(m)]

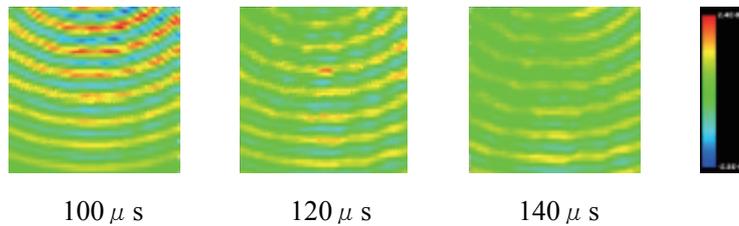
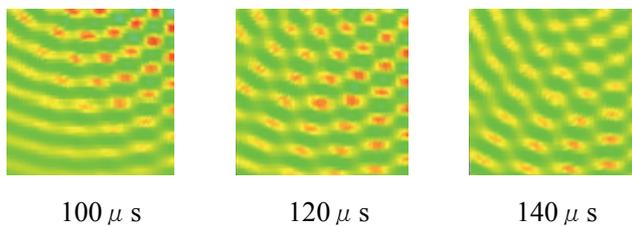


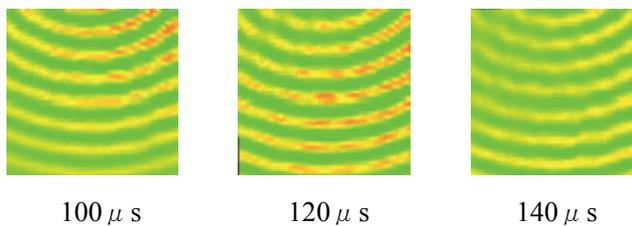
Fig.6.19 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 D

(19) パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体E(スクラッチⅡ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.20 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.45E-8(m)~-2.30E-8(m)]

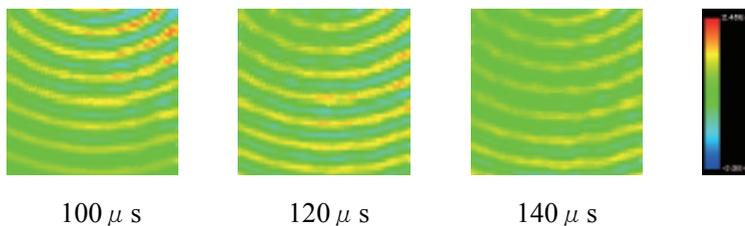
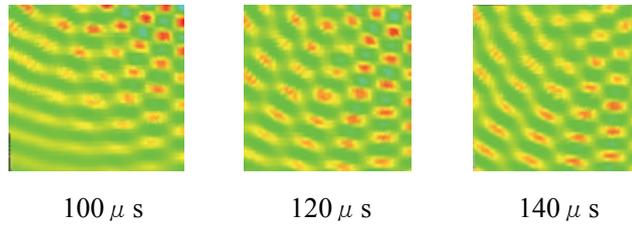


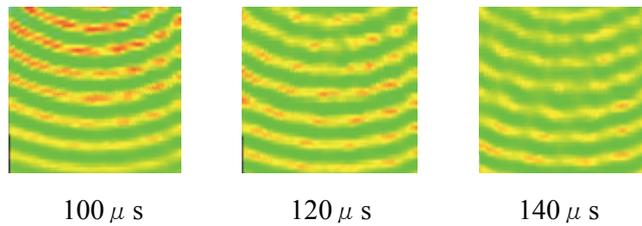
Fig.6.20 パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体E

(20) パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.21 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.70E-8(m)~-3.70E-8(m)]

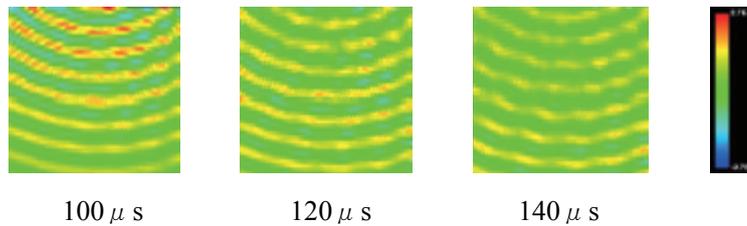
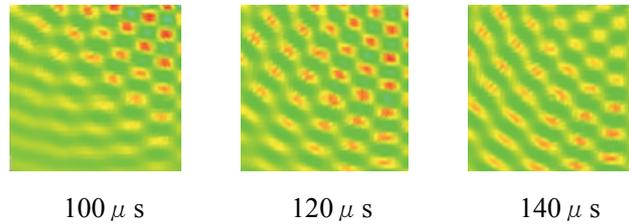


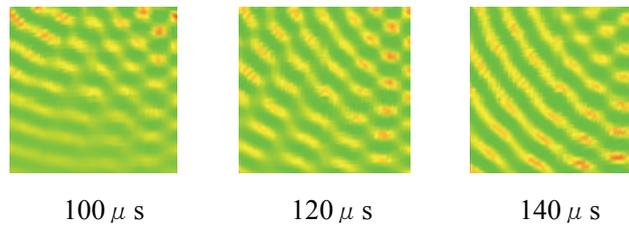
Fig.6.21 パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体F

(21) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.22 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.80E-8(m)~-2.50E-8(m)]

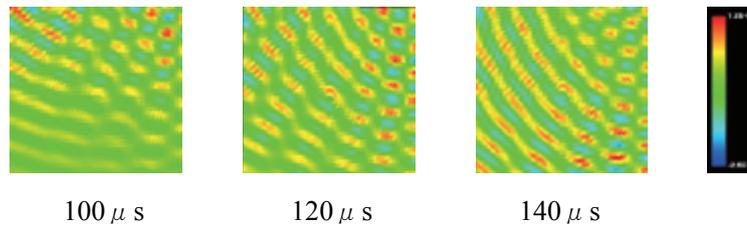
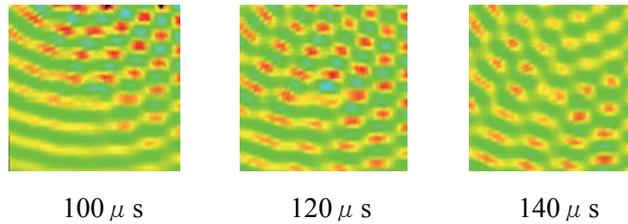


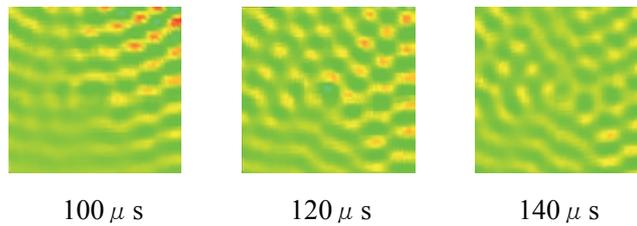
Fig.6.22 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 G

(22) パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.23 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.90E-8(m) \sim -2.30E-8(m)$]

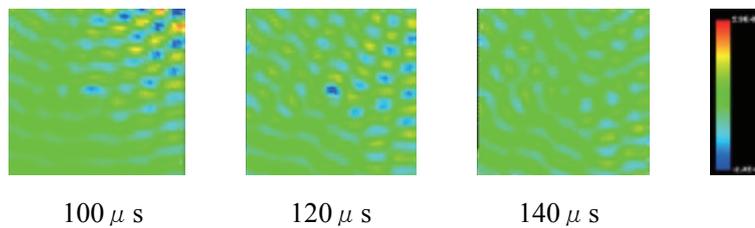
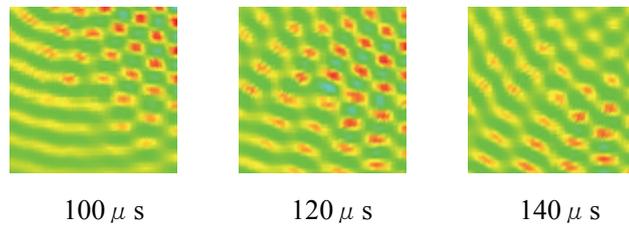


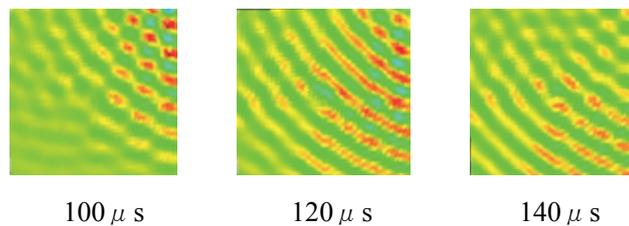
Fig.6.23 パターン 3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 H

(23) パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体I(デントII : 深さ2mm, ϕ 60mm)の画像を Fig.6.24 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.51E-8(m) \sim -2.70E-8(m)$]

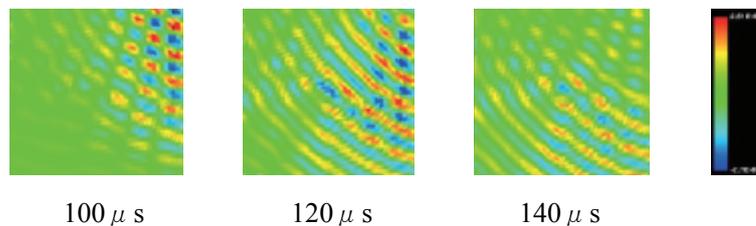
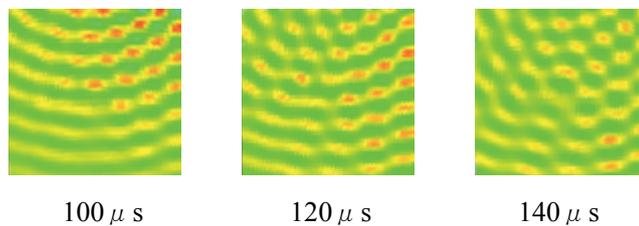


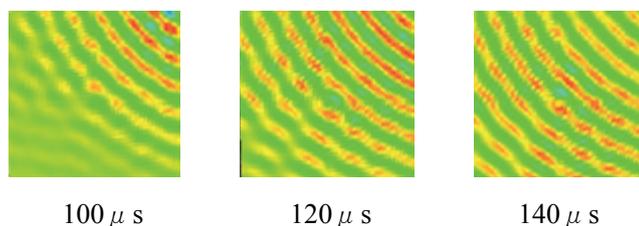
Fig.6.24 パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体I

(24) パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 J(デントⅢ: 深さ2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.25 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.23E-8(m) \sim -2.30E-8(m)$]

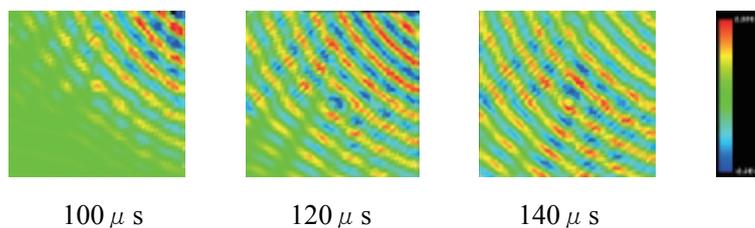
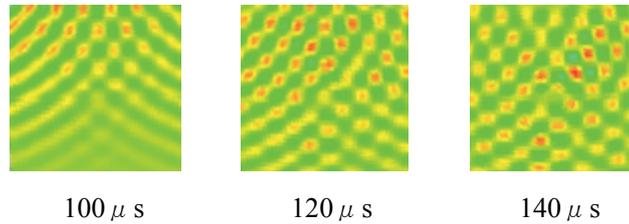


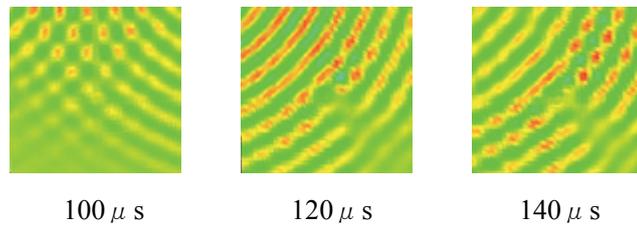
Fig.6.25 パターン3(AE センサー位置 ①+②), 供試体 J

(25) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.26 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.08E-8(m)~-2.39E-8(m)]

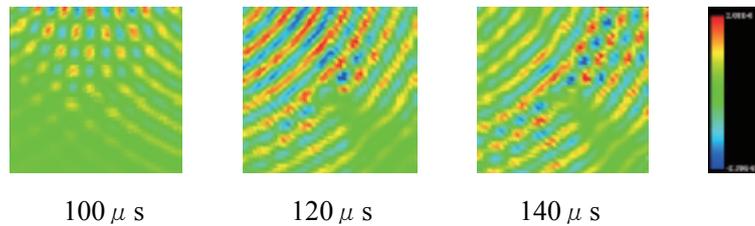
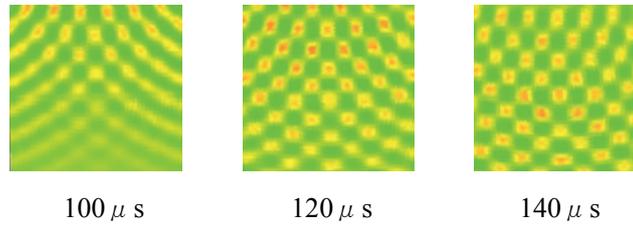


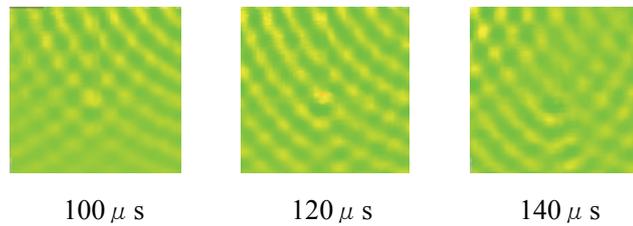
Fig.6.26 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 B

(26) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.27 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:9.95E-9(m)~-1.13E-8(m)]

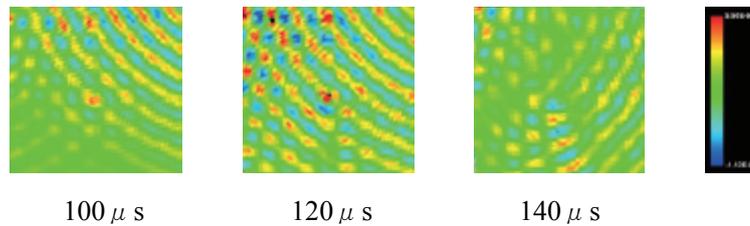
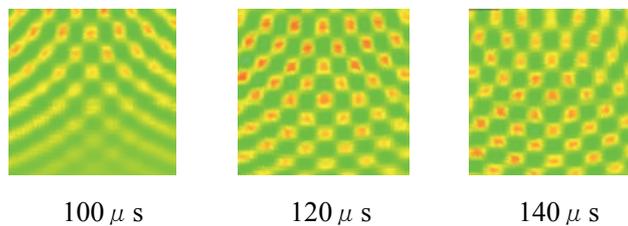


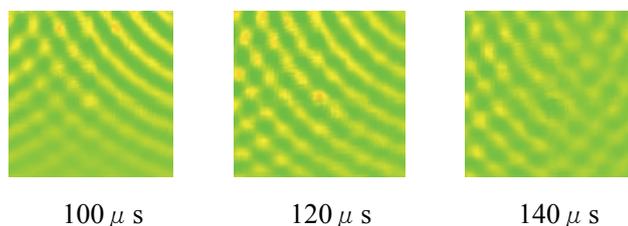
Fig.6.27 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 C

(27) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.28 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.78E-8(m)~-2.31E-8(m)]

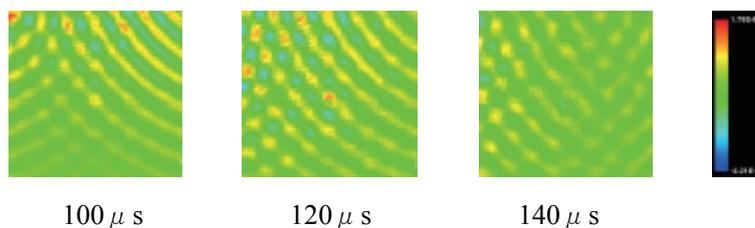
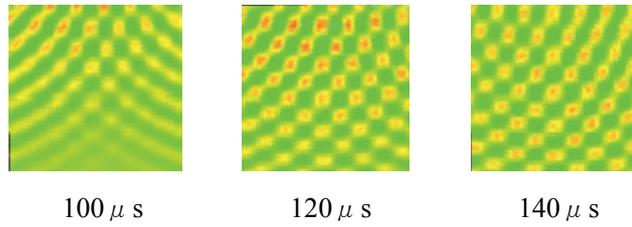


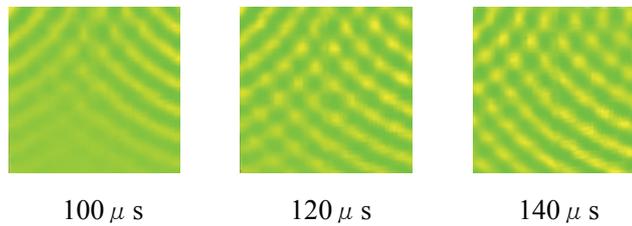
Fig.6.28 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 D

(28) パターン4(AEセンサー位置 ②+③), 供試体E(スクラッチⅡ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.29 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:8.64E-9(m)~-9.42E-9(m)]

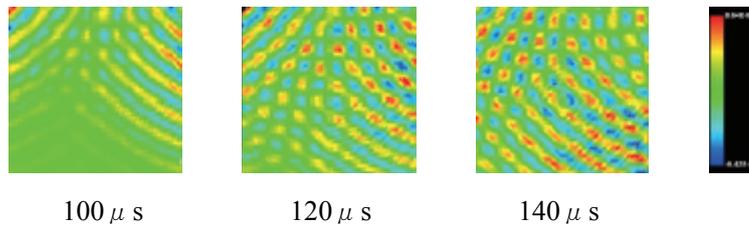
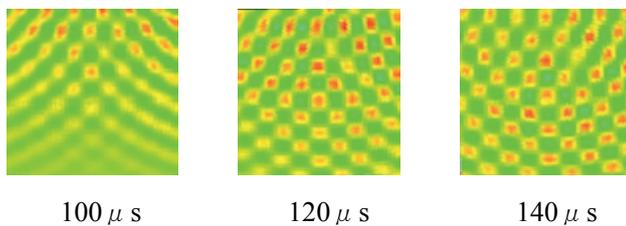


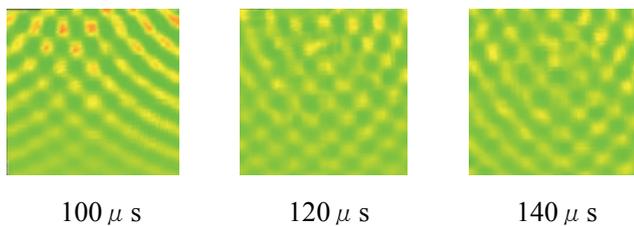
Fig.6.29 パターン4(AEセンサー位置 ②+③), 供試体E

(29) パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.30 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.25E-8(m)~-1.70E-8(m)]

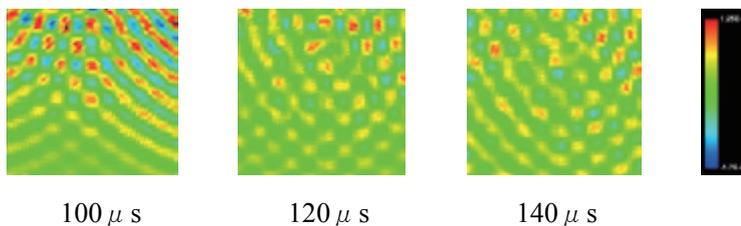
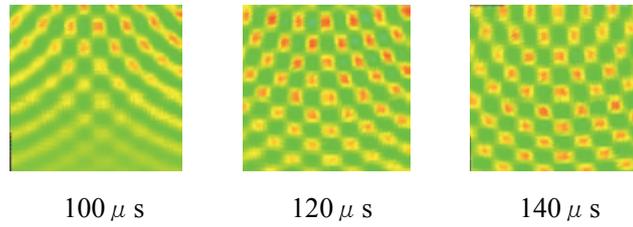


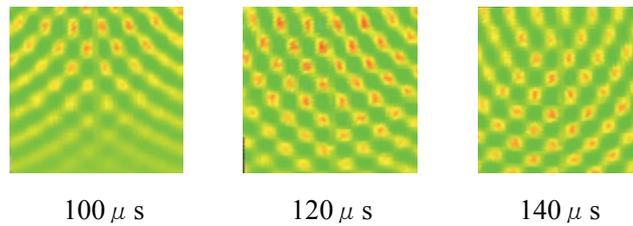
Fig.6.30 パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 F

(30) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.31 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.96E-8(m)~-1.91E-8(m)]

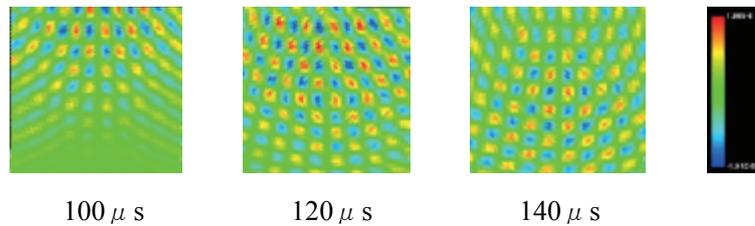
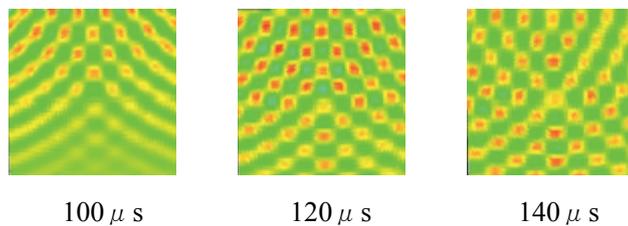


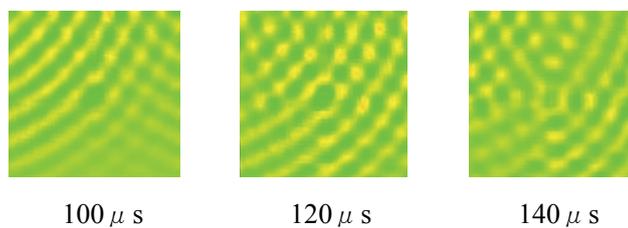
Fig.6.31 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 G

(31) パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.32 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $1.60E-8(m) \sim -1.80E-8(m)$]

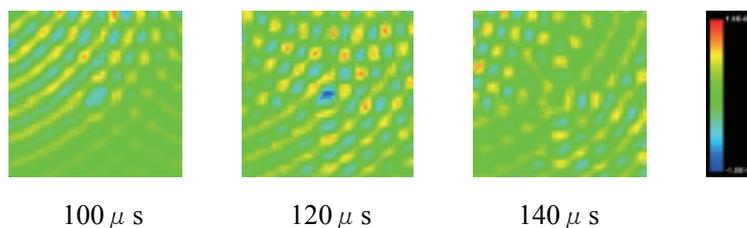
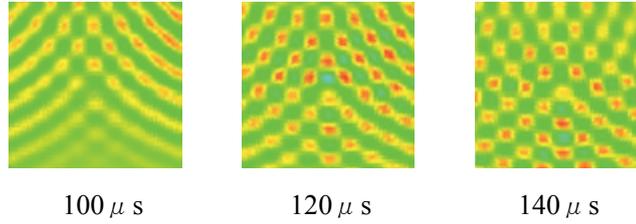


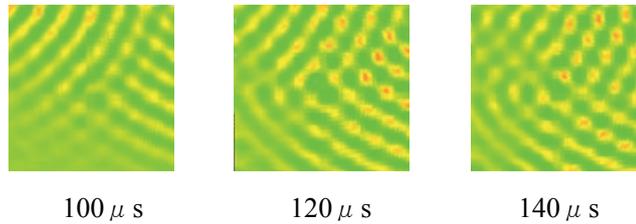
Fig.6.32 パターン 4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 H

(32) パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体I(デントII : 深さ2mm, ϕ 60mm)の画像を Fig.6.33 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.83E-8(m) \sim -2.54E-8(m)$]

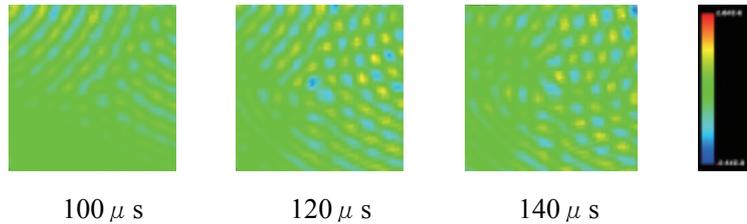
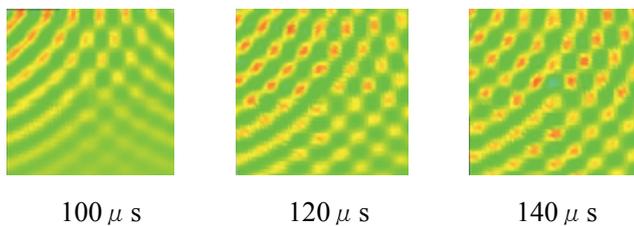


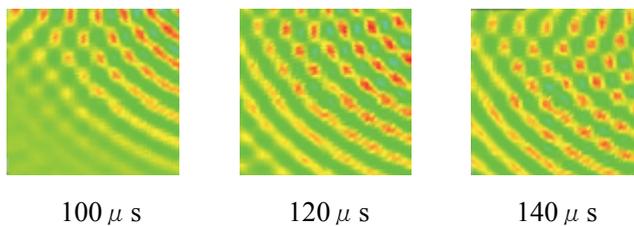
Fig.6.33 パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体I

(33) パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 J(デントⅢ: 深さ2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.34 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.93E-8(m) \sim -2.70E-8(m)$]

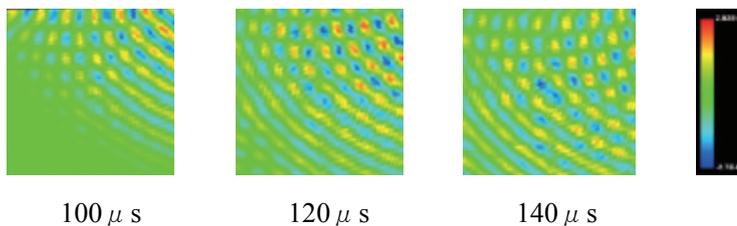
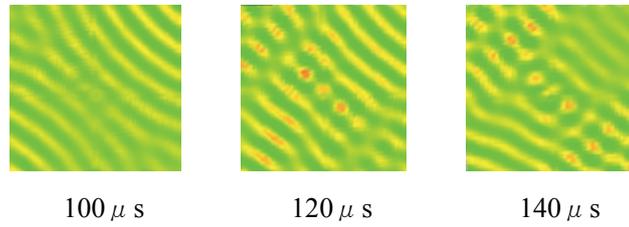


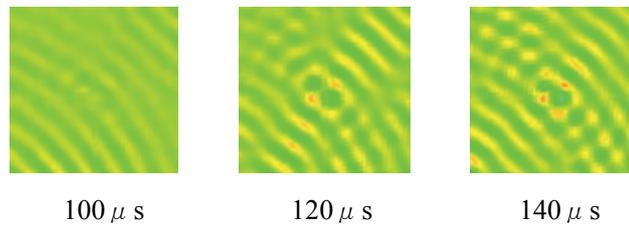
Fig.6.34 パターン4(AE センサー位置 ②+③), 供試体 J

(34) パターン 5 (AE センサー位置 ②+④), 供試体 B (亀裂 I : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.35 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $1.32E-8(m) \sim -1.37E-8(m)$]

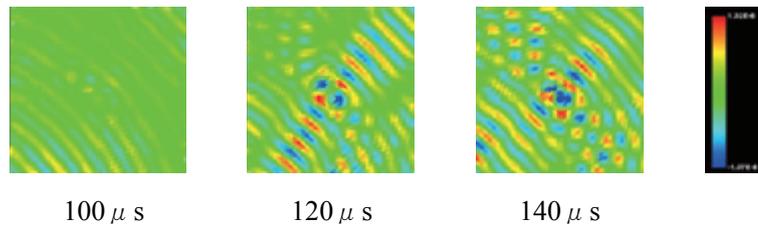
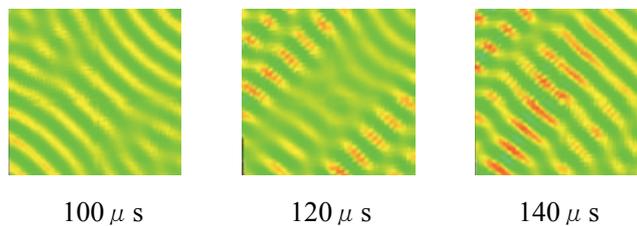


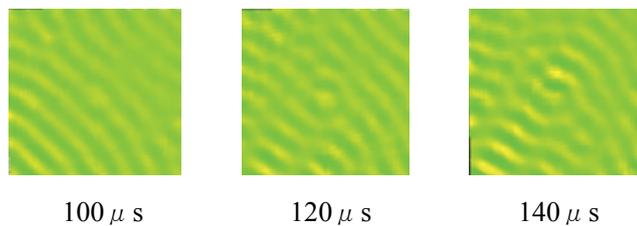
Fig.6.35 パターン 5 (AE センサー位置 ②+④), 供試体 B

(35) パターン 5 (AE センサー位置 ②+④), 供試体 C (亀裂 II : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.36 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $8.18E-9(m) \sim -9.23E-9(m)$]

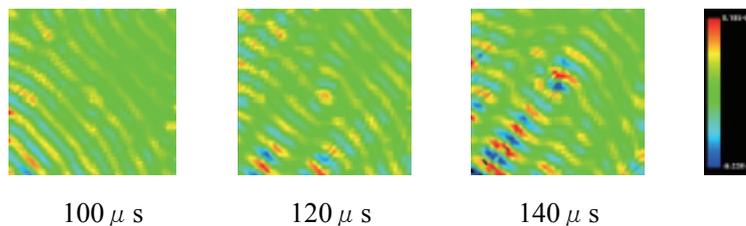
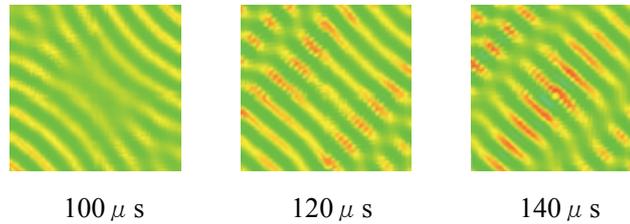


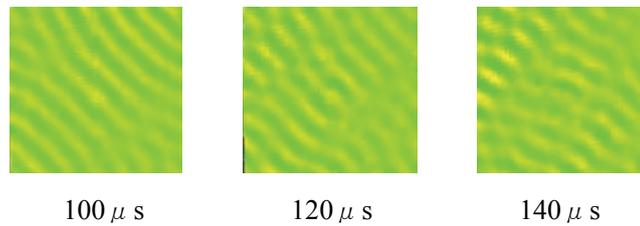
Fig.6.36 パターン 5 (AE センサー位置 ②+④), 供試体 C

(36) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.37 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.10E-8(m)~-1.10E-8(m)]

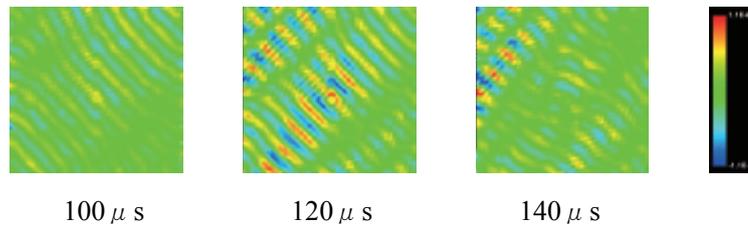
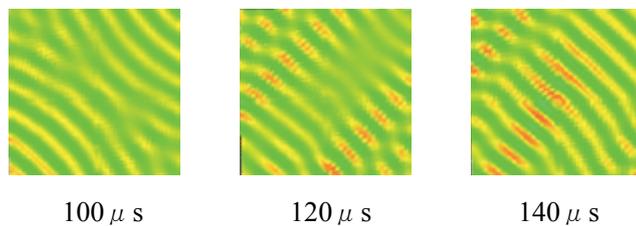


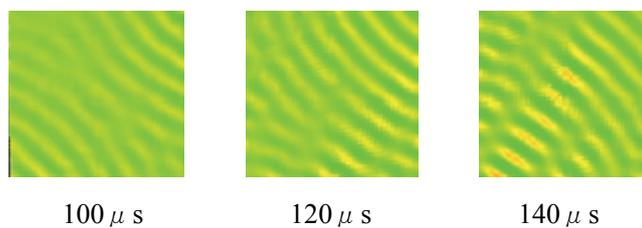
Fig.6.37 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 D

(37) パターン5(AE センサー位置 ②+④), 供試体E(スクラッチⅡ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.38 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.20E-8(m)~-1.90E-8(m)]

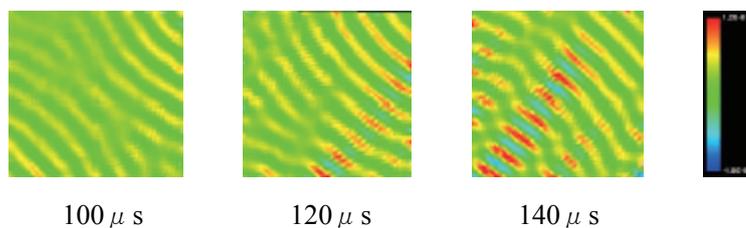
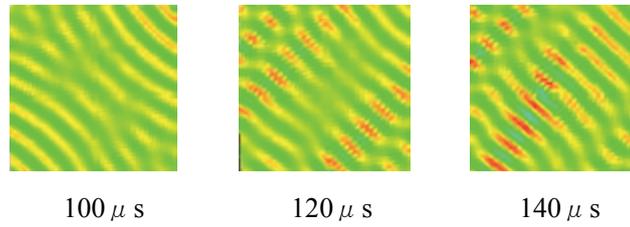


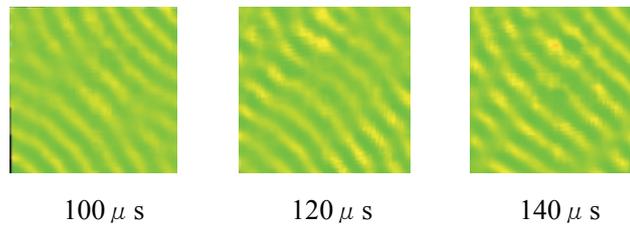
Fig.6.38 パターン5(AE センサー位置 ②+④), 供試体E

(38) パターン5(AEセンサー位置 ②+④), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.39 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.23E-8(m)~-1.72E-8(m)]

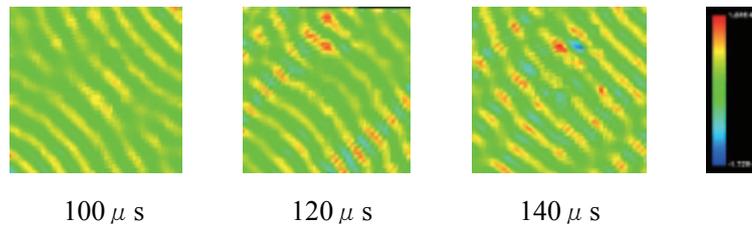
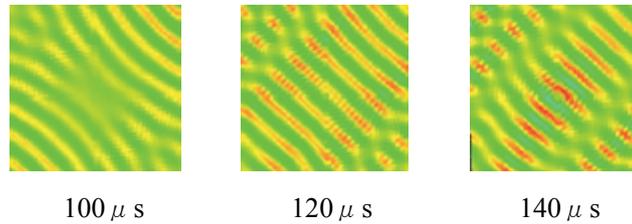


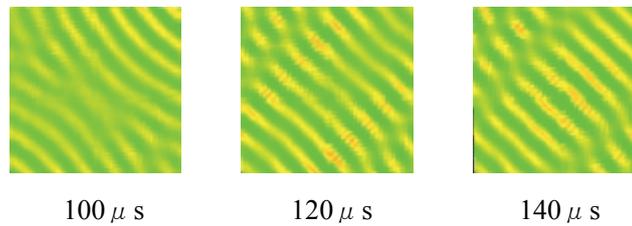
Fig.6.39 パターン5(AEセンサー位置 ②+④), 供試体F

(39) パターン 5 (AE センサー位置 ②+④), 供試体 G (スクラッチⅣ: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.40 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $1.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -2.10\text{E}-8(\text{m})$]

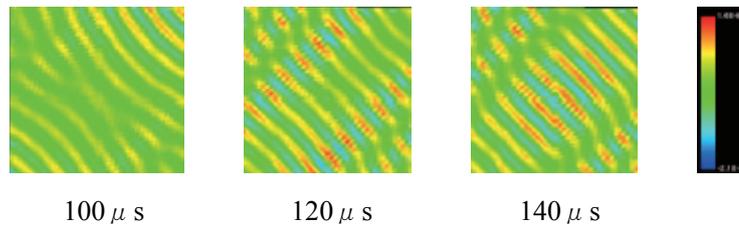
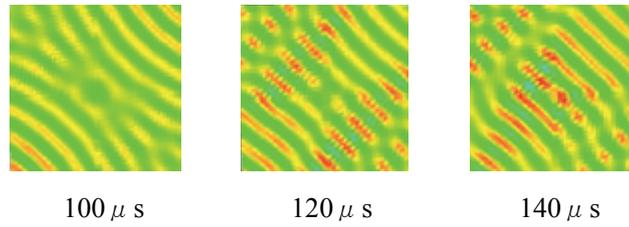


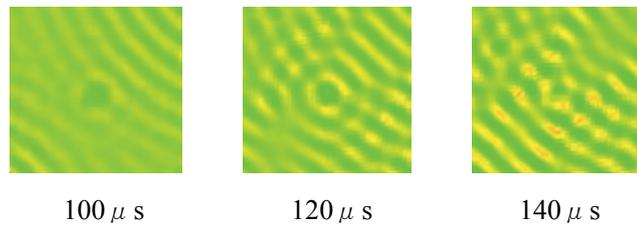
Fig.6.40 パターン 5 (AE センサー位置 ②+④), 供試体 G

(40) パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 H(デント I : 深さ 2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.41 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $1.60E-8(m) \sim -2.10E-8(m)$]

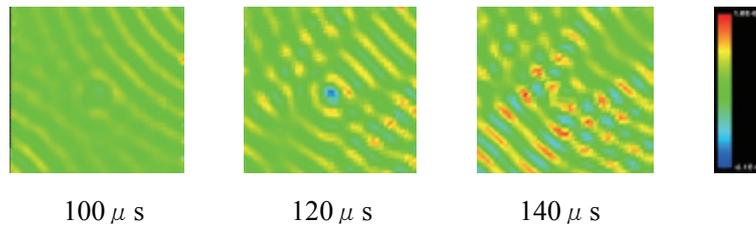
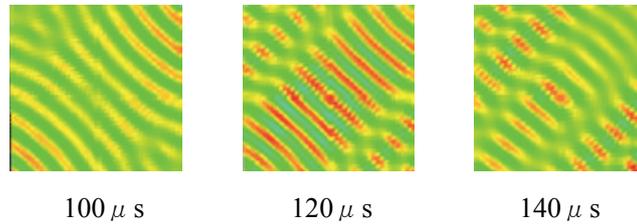


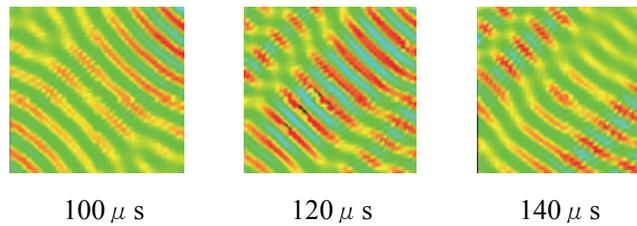
Fig.6.41 パターン 5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 H

(41) パターン5(AE センサー位置 ②+④), 供試体I(デントII : 深さ2mm, ϕ 60mm)の画像を Fig.6.42 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $3.92E-8(m) \sim -3.99E-8(m)$]

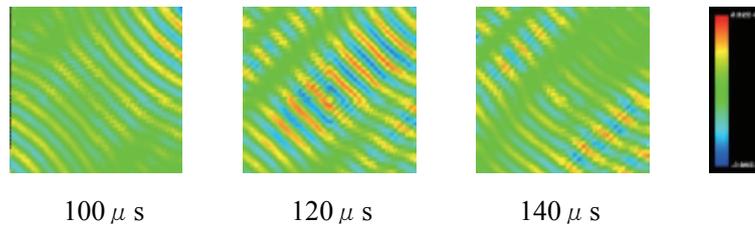
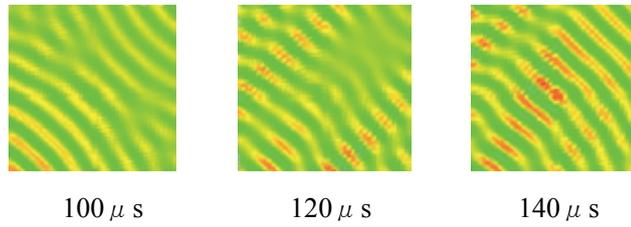


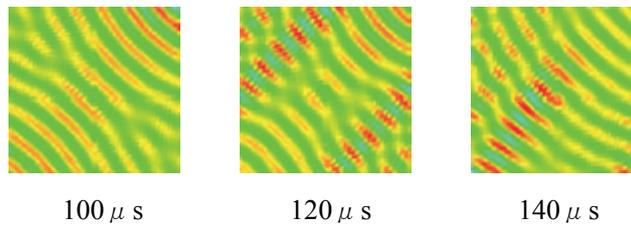
Fig.6.42 パターン5(AE センサー位置 ②+④), 供試体I

(42) パターン5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 J(デントⅢ: 深さ2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.43 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.95E-8(m) \sim -3.20E-8(m)$]

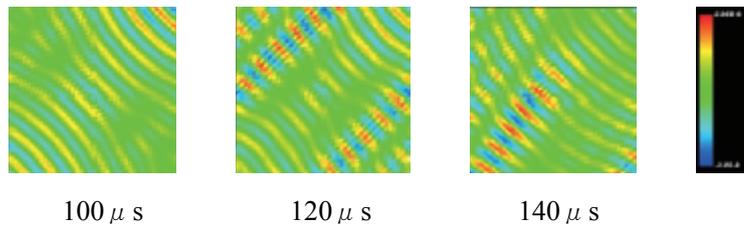
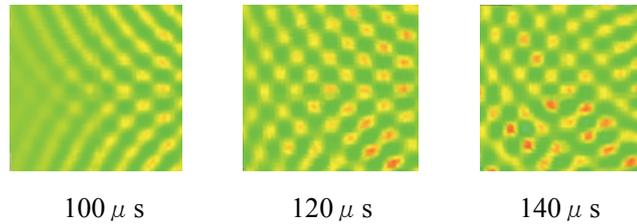


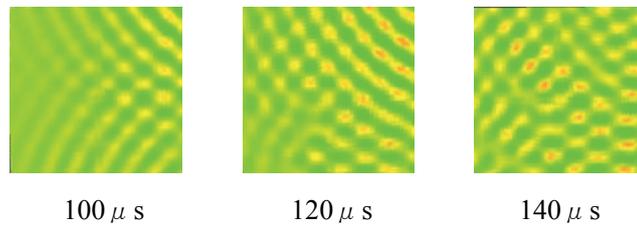
Fig.6.43 パターン5(AE センサー位置 ②+④), 供試体 J

(43) パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 B (亀裂 I : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.44 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.10E-8(m) \sim -2.00E-8(m)$]

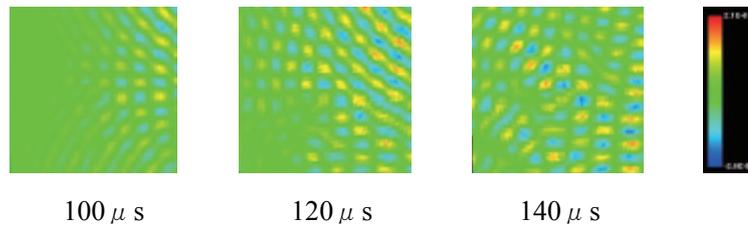
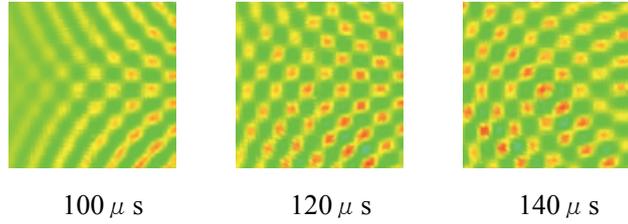


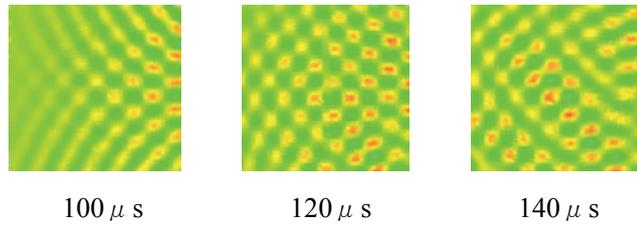
Fig.6.44 パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 B

(44) パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 C (亀裂 II : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.45 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $3.20E-8(m) \sim -4.50E-8(m)$]

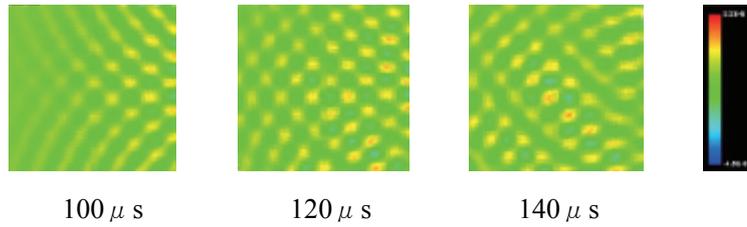
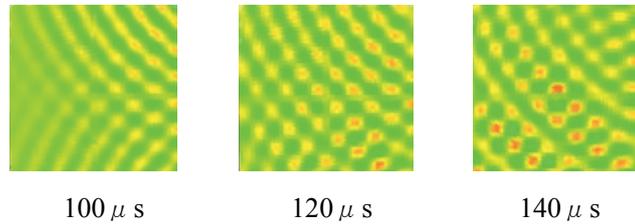


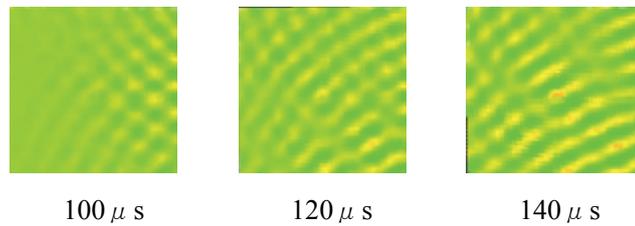
Fig.6.45 パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 C

(45) パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 D (スクラッチ I : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.46 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60\text{E}-8(\text{m}) \sim -4.60\text{E}-8(\text{m})$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $1.90\text{E}-8(\text{m}) \sim -2.90\text{E}-8(\text{m})$]

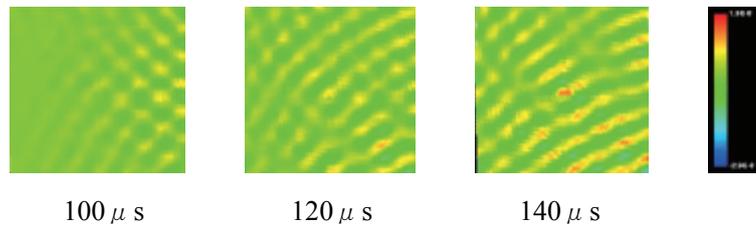
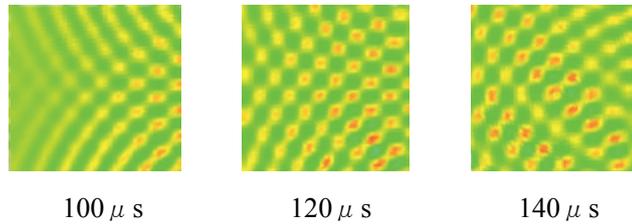


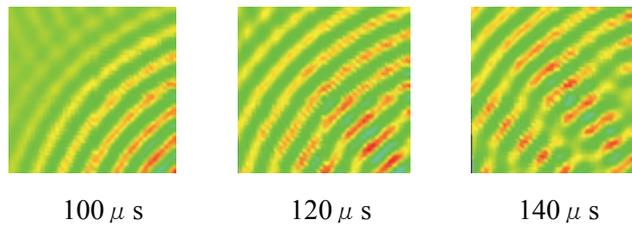
Fig.6.46 パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 D

(46) パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体E(スクラッチⅡ:幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.47 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.10E-8(m)~-3.60E-8(m)]

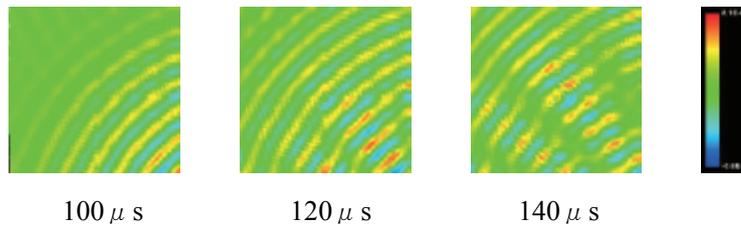
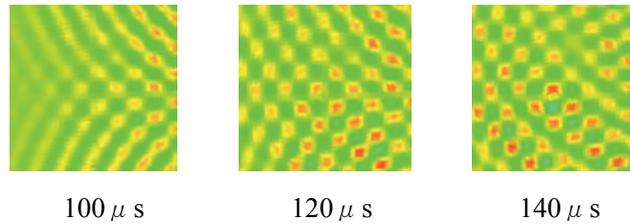


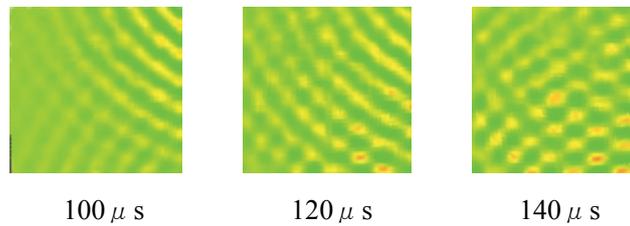
Fig.6.47 パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体E

(47) パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.48 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.00E-8(m)~-3.20E-8(m)]

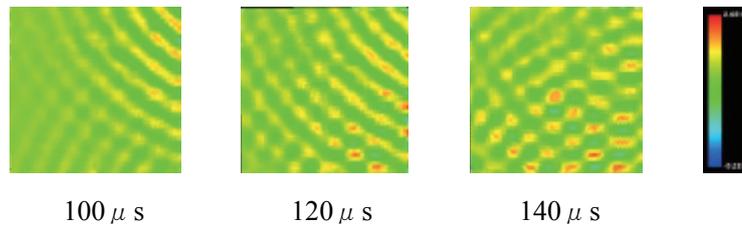
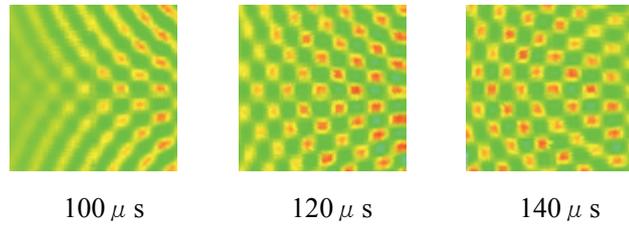


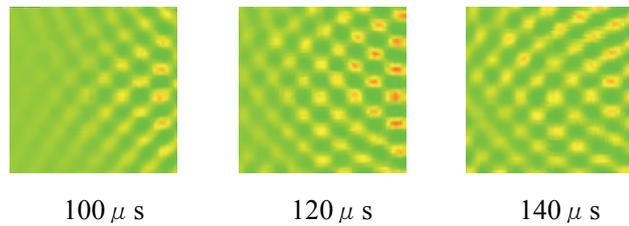
Fig.6.48 パターン6(AE センサー位置 ②+⑤), 供試体F

(48) パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 G (スクラッチⅣ: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.49 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.80E-8(m) \sim -4.20E-8(m)$]

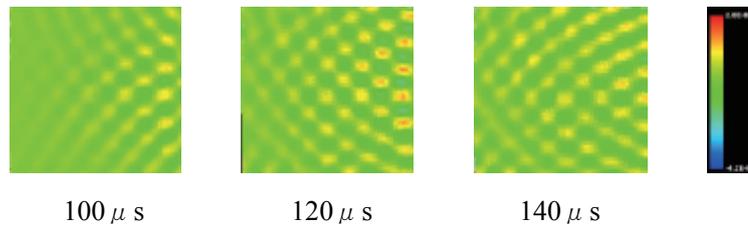
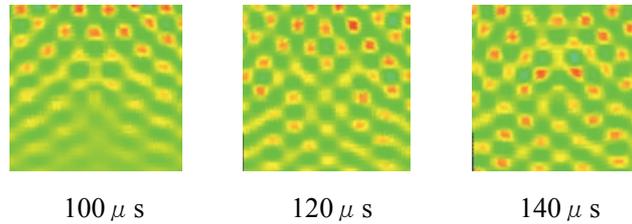


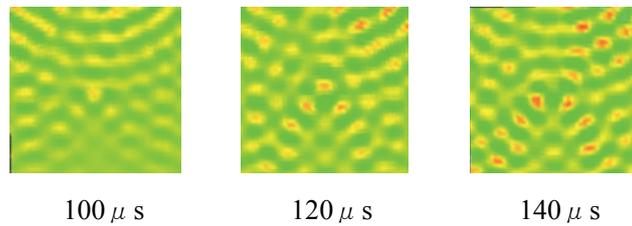
Fig.6.49 パターン 6 (AE センサー位置 ②+⑤), 供試体 G

(49) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 B(亀裂 I : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.50 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $1.90E-8(m) \sim -2.01E-8(m)$]

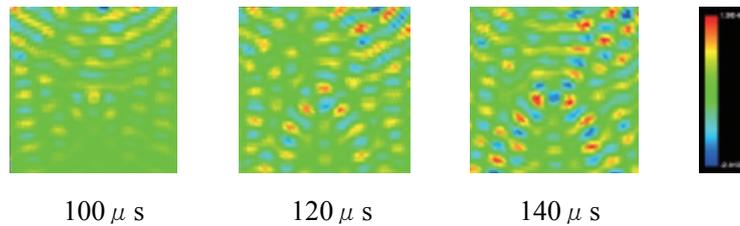
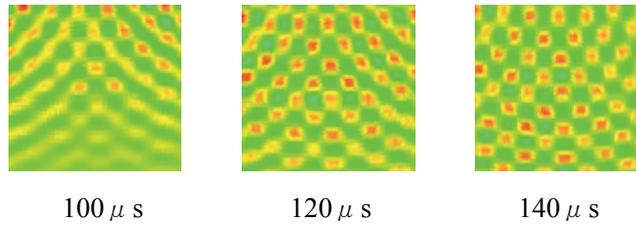


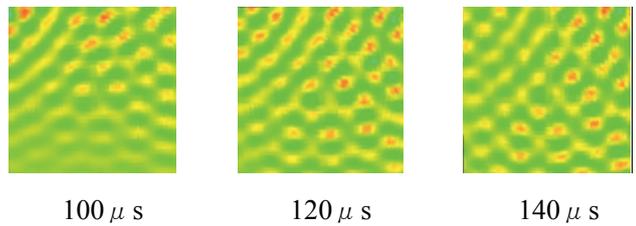
Fig.6.50 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 B

(50) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.51 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.20E-8(m)~-4.50E-8(m)]

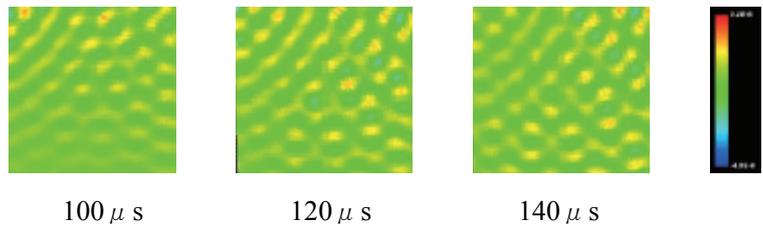
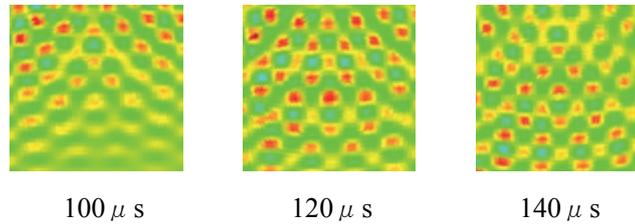


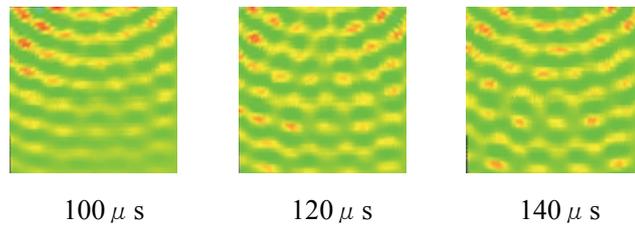
Fig.6.51 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 C

(51) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.52 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.20E-8(m)~-4.50E-8(m)]

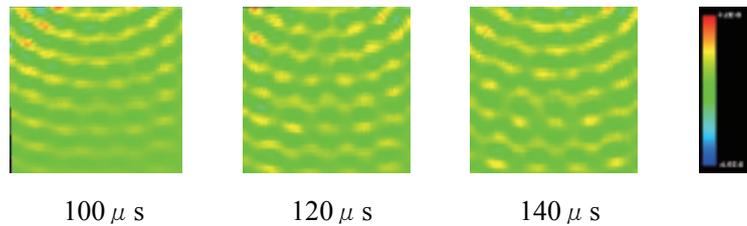
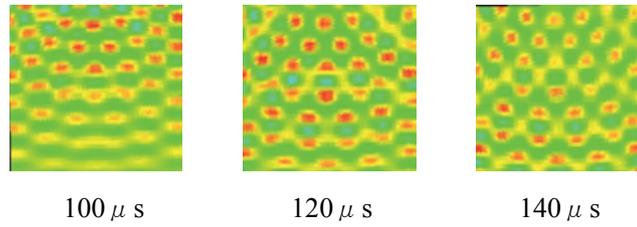


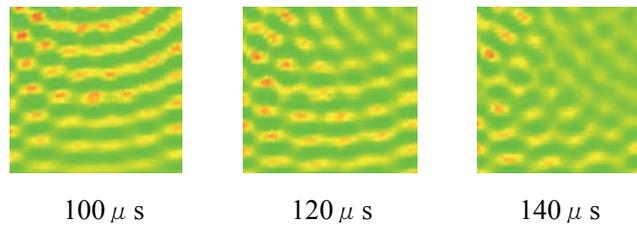
Fig.6.52 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 D

(52) パターン 7 (AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 E (スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.53 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $3.20E-8(m) \sim -4.50E-8(m)$]

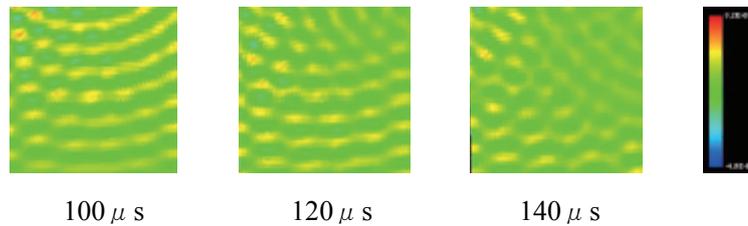
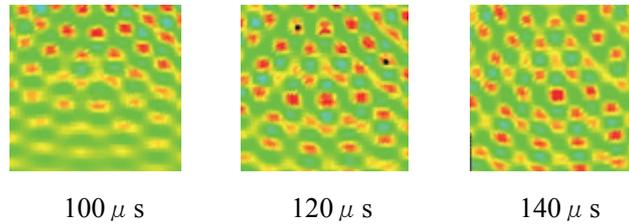


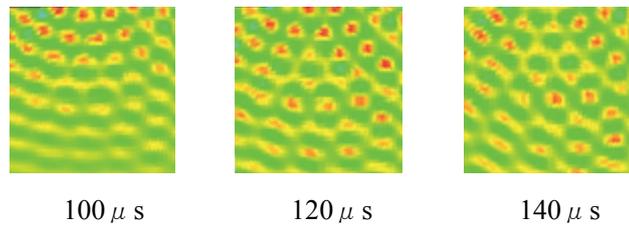
Fig.6.53 パターン 7 (AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 E

(53) パターン 7 (AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 F (スクラッチⅢ: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.54 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $3.20E-8(m) \sim -4.50E-8(m)$]

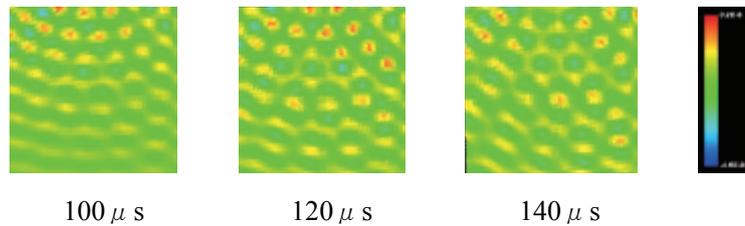
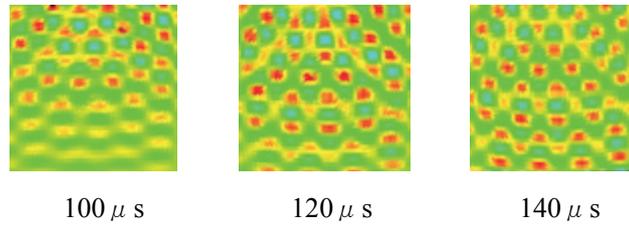


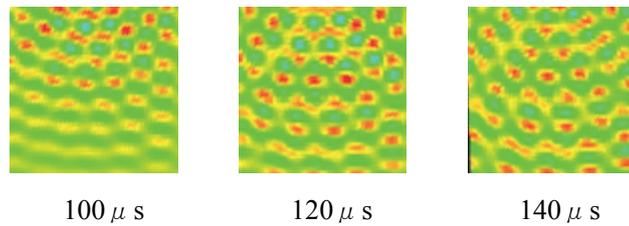
Fig.6.54 パターン 7 (AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 F

(54) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.55 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.40E-8(m)~-3.50E-8(m)]

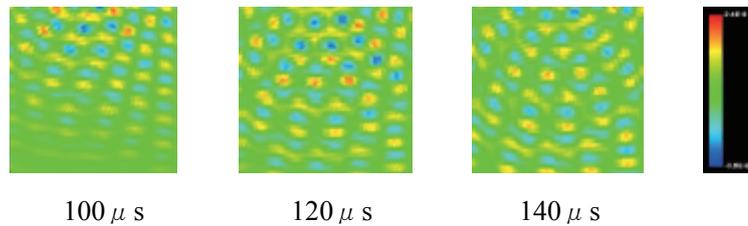
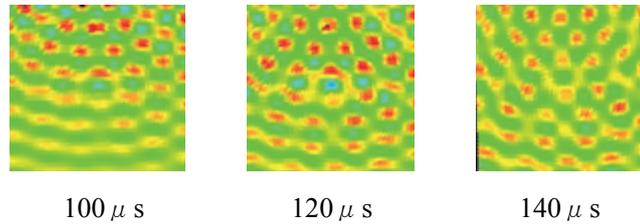


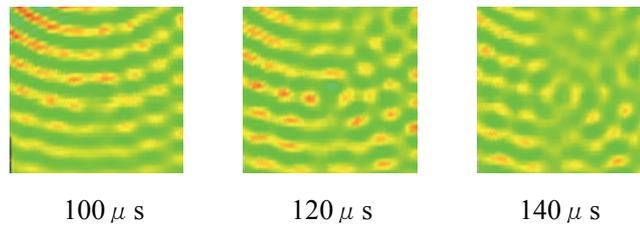
Fig.6.55 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 G

(55) パターン7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体H(デント I : 深さ2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.56 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.20E-8(m) \sim -2.51E-8(m)$]

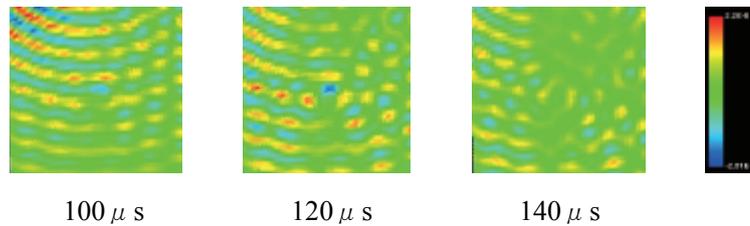
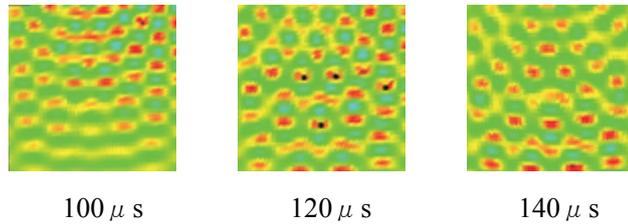


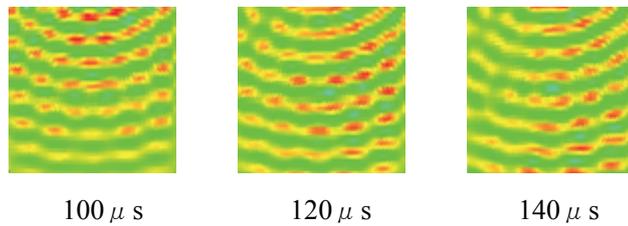
Fig.6.56 パターン7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体H

(56) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の画像を Fig.6.57 に示す.

(a) オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ[レンジ最適化: $3.40E-8(m) \sim -3.50E-8(m)$]

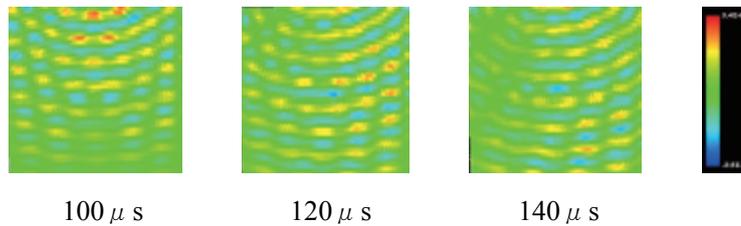
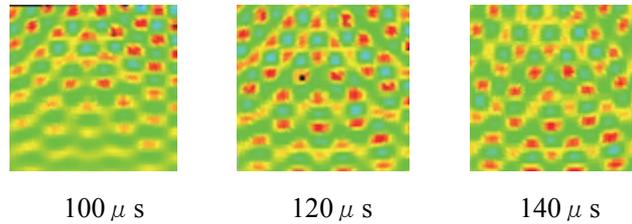


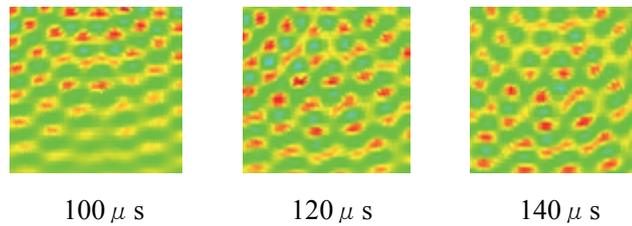
Fig.6.57 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 I

(57) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.58 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.40E-8(m)~-3.50E-8(m)]

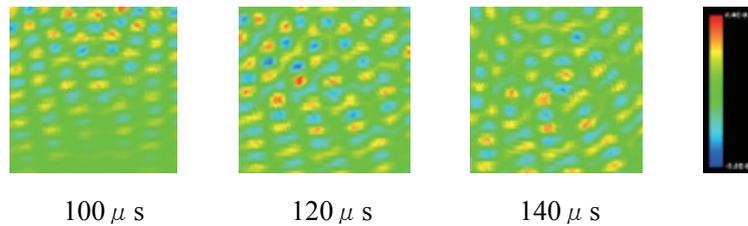
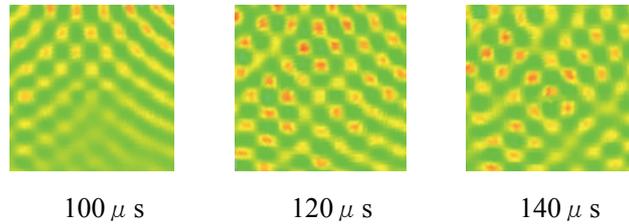


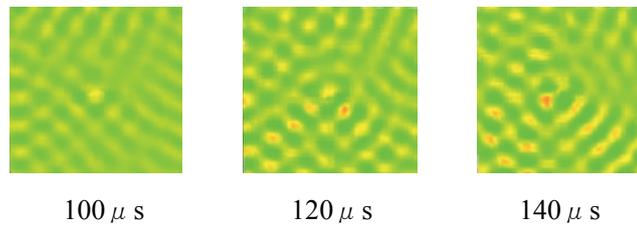
Fig.6.58 パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③), 供試体 J

(58) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.59 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.64E-8(m)~-1.90E-8(m)]

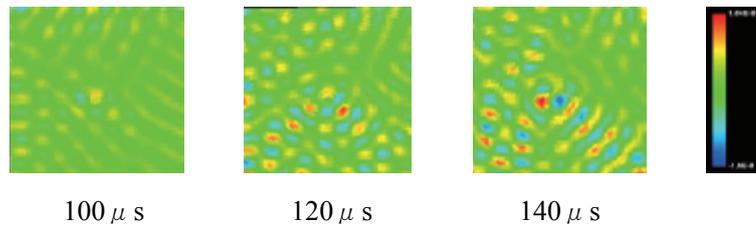
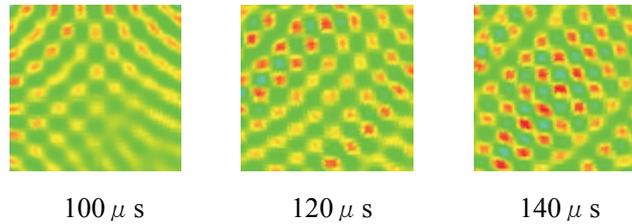


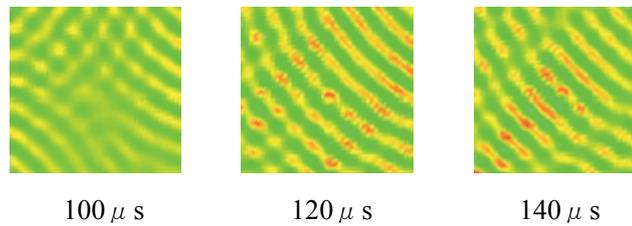
Fig.6.59 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 B

(59) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.60 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.20E-8(m)~-4.20E-8(m)]

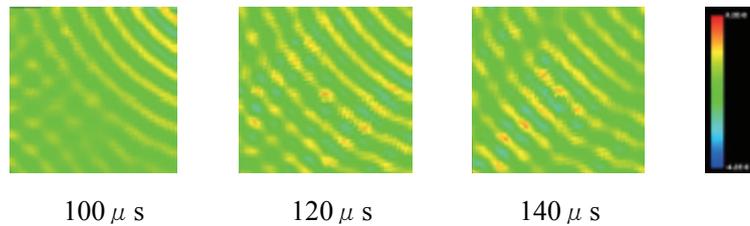
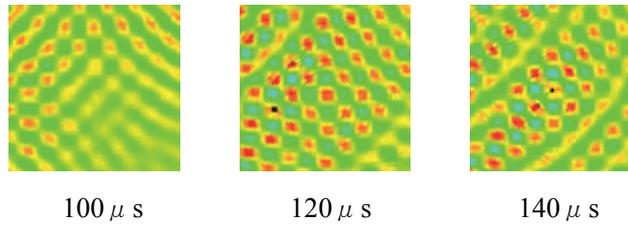


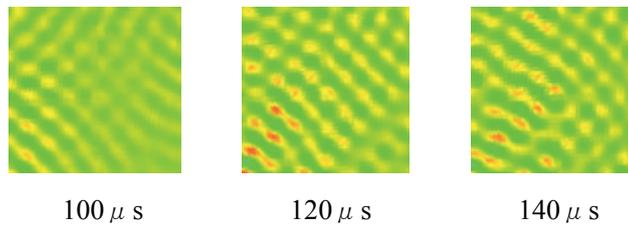
Fig.6.60 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 C

(60) パターン 8 (AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 D (スクラッチ I : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.61 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.40E-8(m) \sim -2.90E-8(m)$]

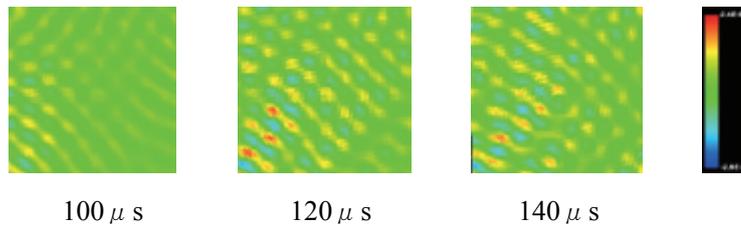
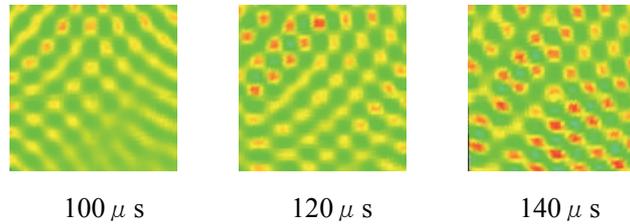


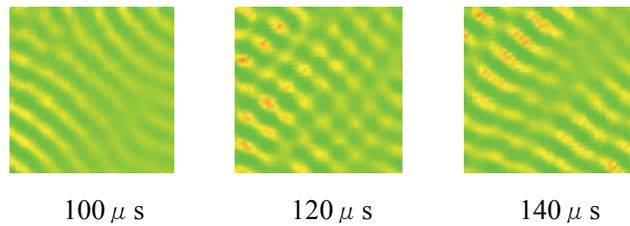
Fig.6.61 パターン 8 (AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 D

(61) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 E(スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.62 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.40E-8(m) \sim -2.90E-8(m)$]

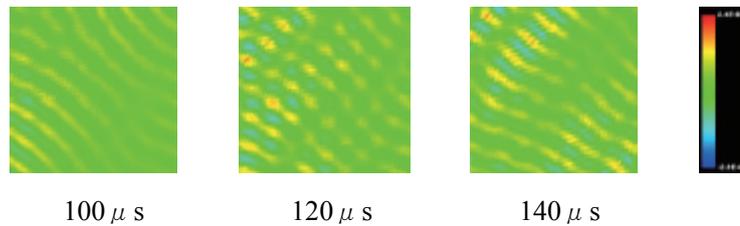
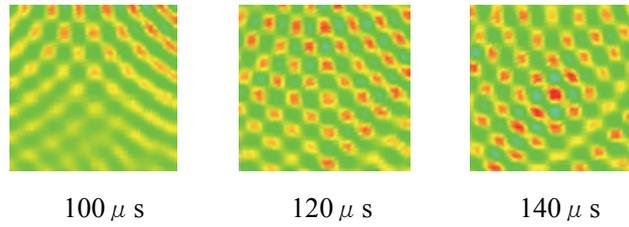


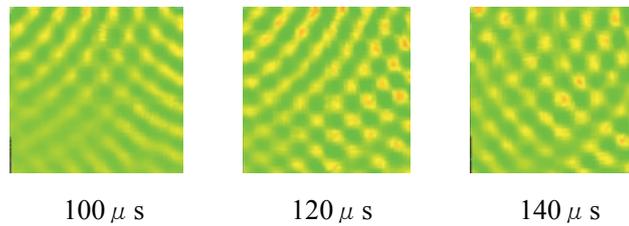
Fig.6.62 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 E

(62) パターン 8 (AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 F (スクラッチⅢ: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.63 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.00E-8(m) \sim -2.50E-8(m)$]

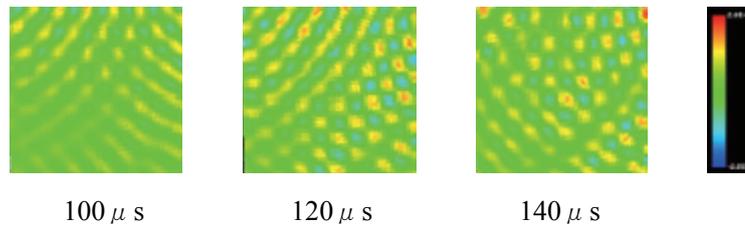
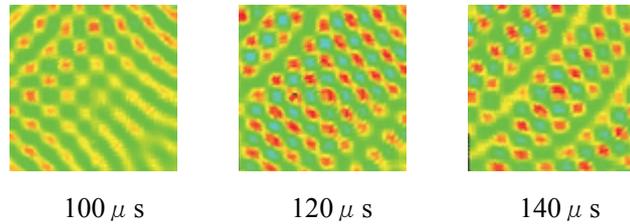


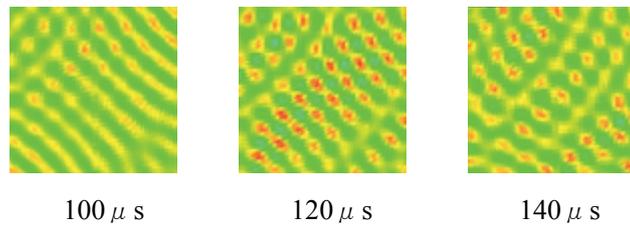
Fig.6.63 パターン 8 (AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 F

(63) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.64 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.60E-8(m)~-3.30E-8(m)]

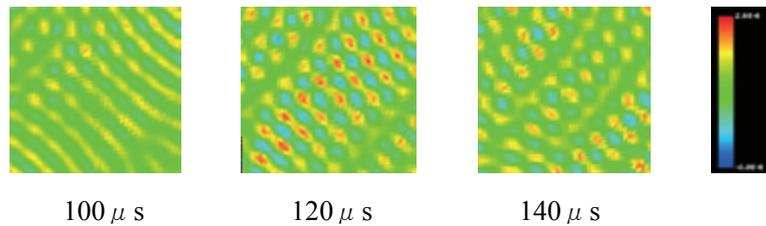
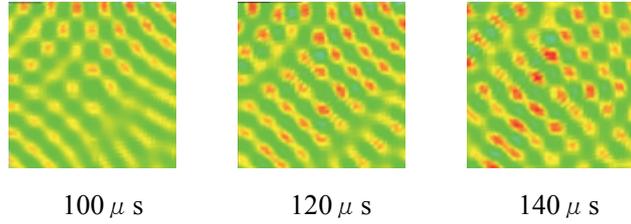


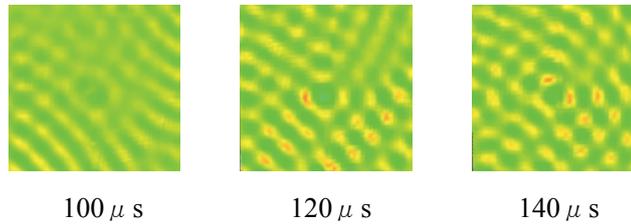
Fig.6.64 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 G

(64) パターン8(AEセンサー位置 ②+③+④), 供試体H(デントI:深さ2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.65 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.20E-8(m)~-2.70E-8(m)]

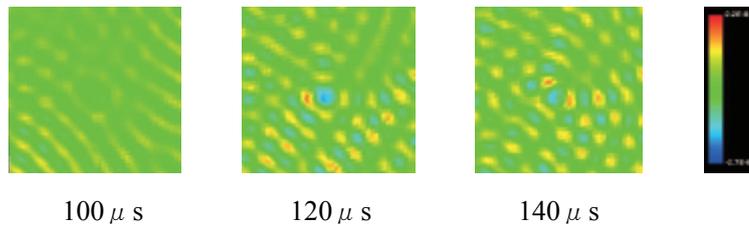
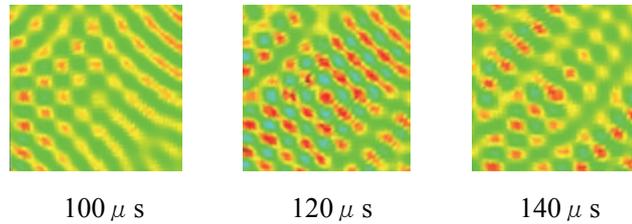


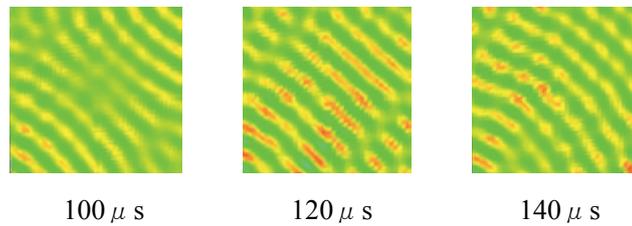
Fig.6.65 パターン8(AEセンサー位置 ②+③+④), 供試体H

(65) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の画像を Fig.6.66 に示す.

(a) オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ[レンジ最適化: $2.50E-8(m) \sim -2.70E-8(m)$]

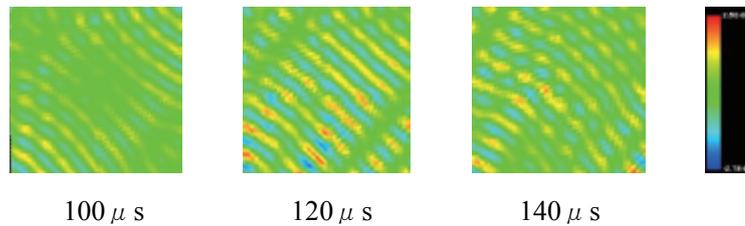
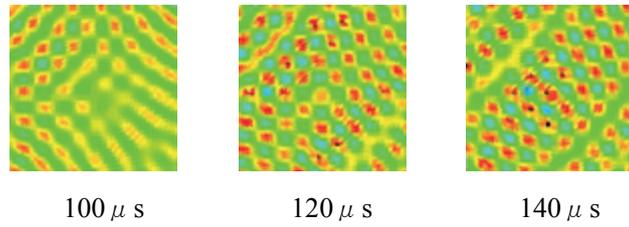


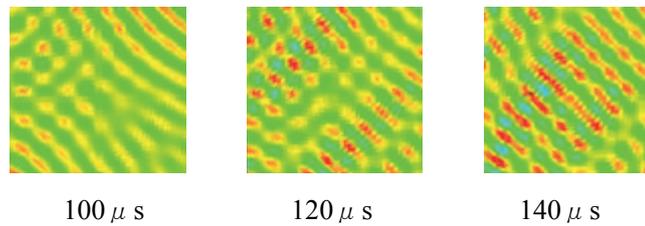
Fig.6.66 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 I

(66) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.67 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.50E-8(m)~-3.70E-8(m)]

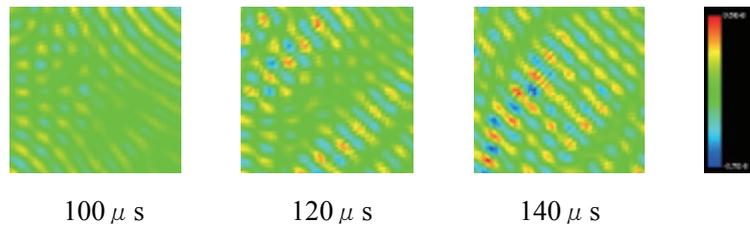
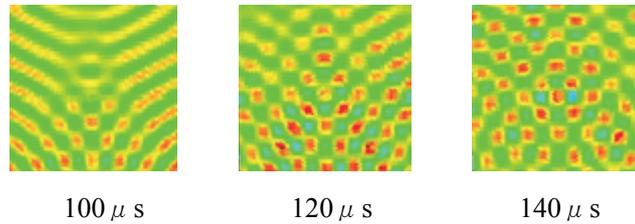


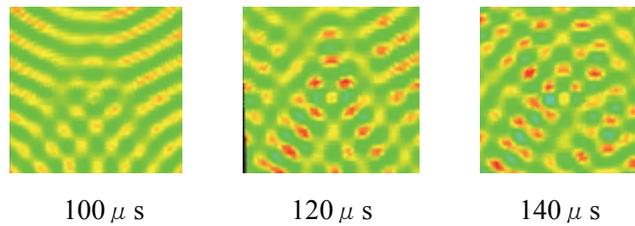
Fig.6.67 パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④), 供試体 J

(67) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 B(亀裂 I : 幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.68 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $3.00E-8(m) \sim -3.70E-8(m)$]

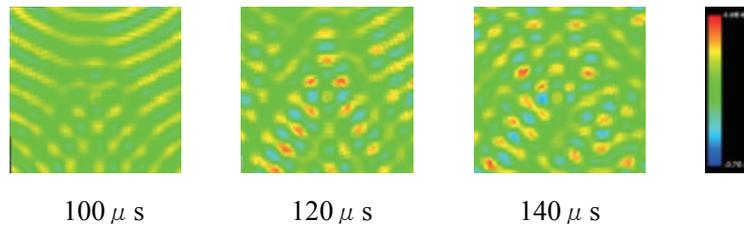
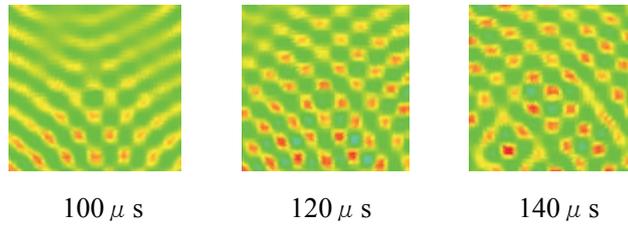


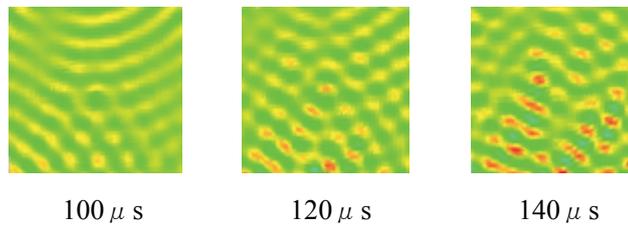
Fig.6.68 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 B

(68) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.69 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.80E-8(m)~-3.50E-8(m)]

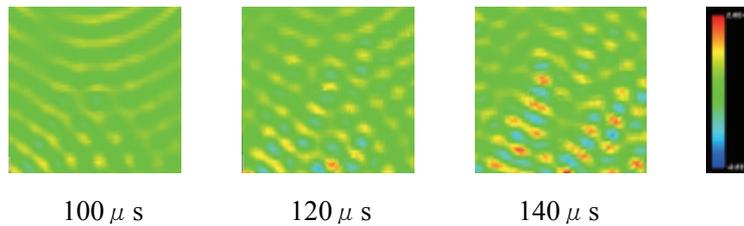
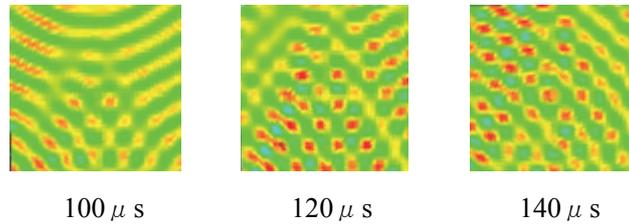


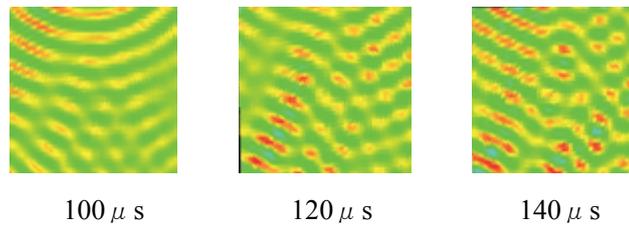
Fig.6.69 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 C

(69) パターン 9 (AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 D (スクラッチ I : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.70 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.80E-8(m) \sim -3.50E-8(m)$]

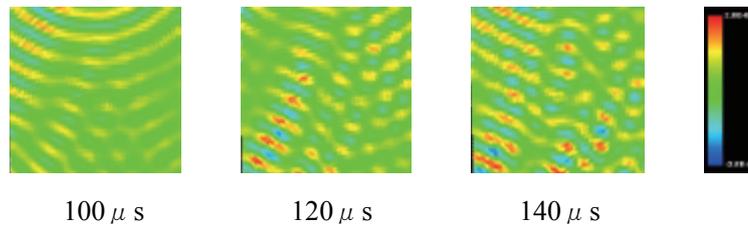
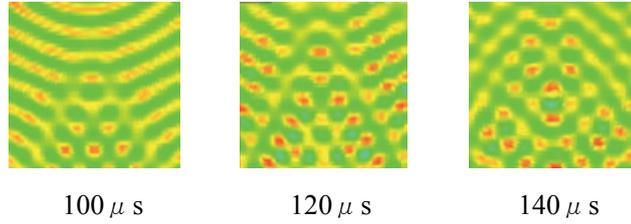


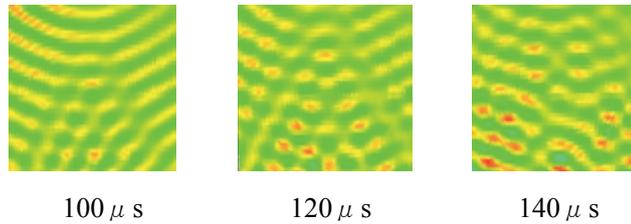
Fig.6.70 パターン 9 (AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 D

(70) パターン 9 (AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 E (スクラッチ II : 幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm) の画像を Fig.6.71 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.80E-8(m) \sim -3.50E-8(m)$]

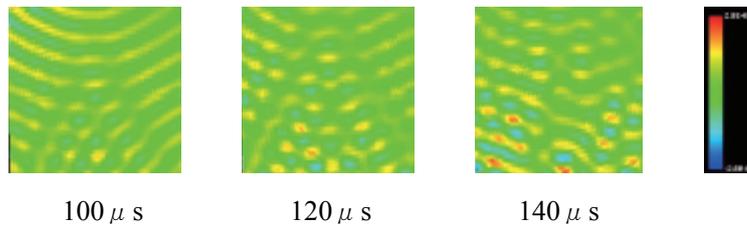
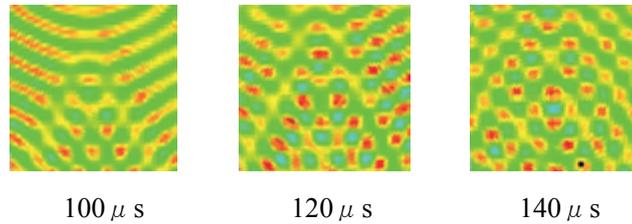


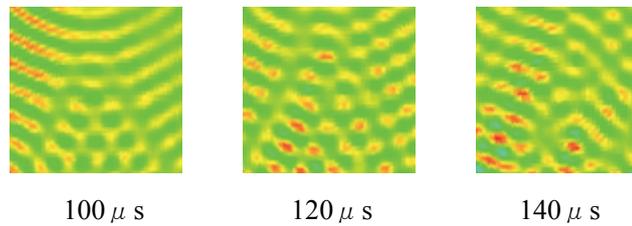
Fig.6.71 パターン 9 (AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 E

(71) パターン 9 (AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 F (スクラッチⅢ: 幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm) の画像を Fig.6.72 に示す.

(a) オリジナルデータ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ [レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ [レンジ最適化: $2.80E-8(m) \sim -3.50E-8(m)$]

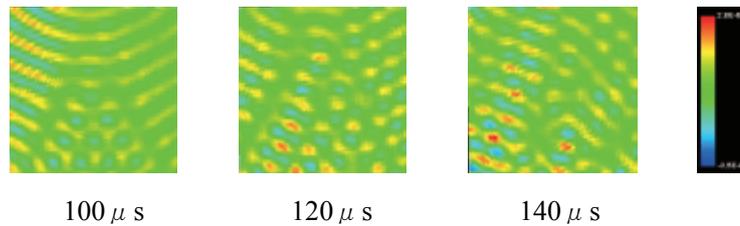
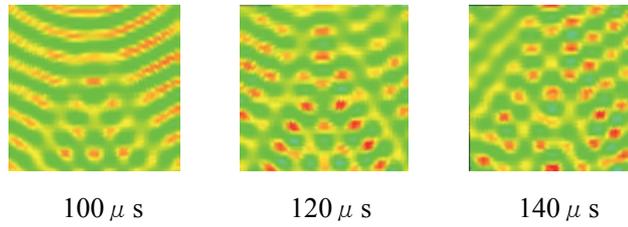


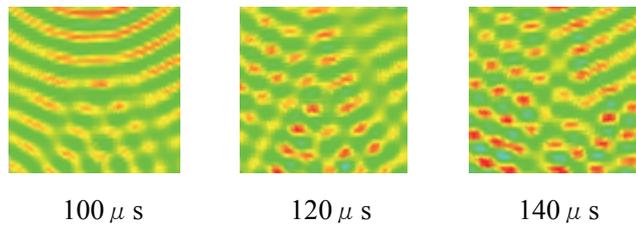
Fig.6.72 パターン 9 (AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 F

(72) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.73 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.80E-8(m)~-3.50E-8(m)]

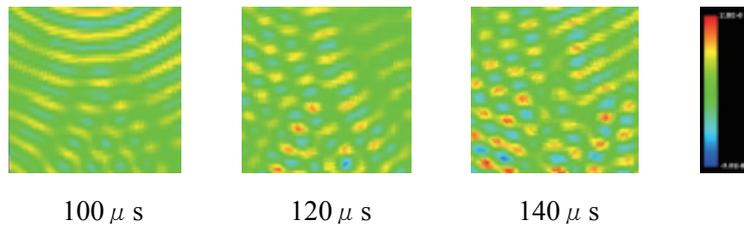
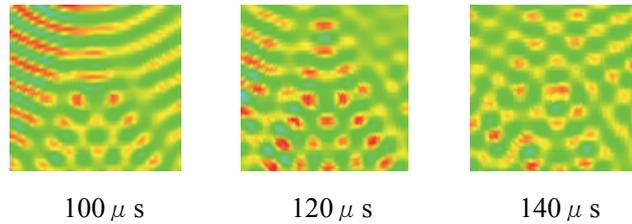


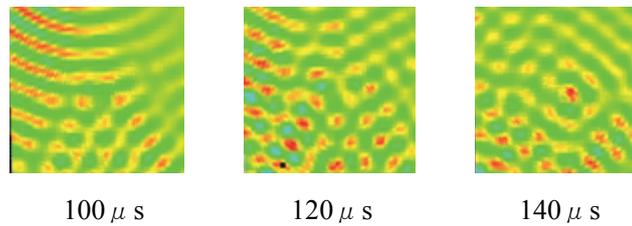
Fig.6.73 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 G

(73) パターン9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体H(デント I : 深さ2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.74 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $3.02E-8(m) \sim -3.55E-8(m)$]

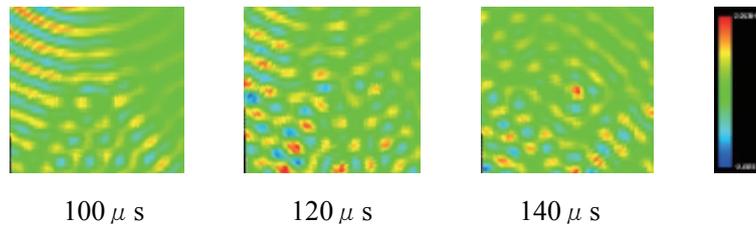
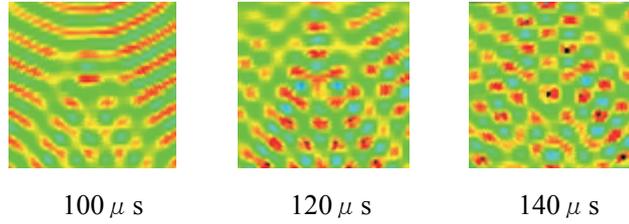


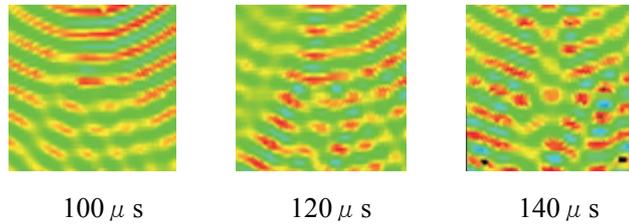
Fig.6.74 パターン9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体H

(74) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の画像を Fig.6.75 に示す.

(a) オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ[レンジ最適化: $4.60E-8(m) \sim -4.80E-8(m)$]

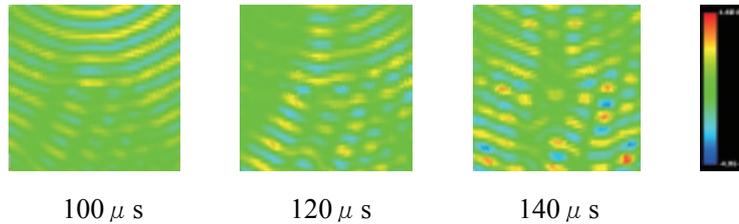
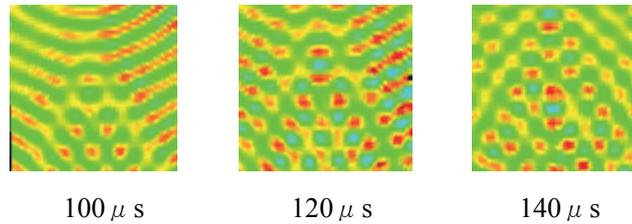


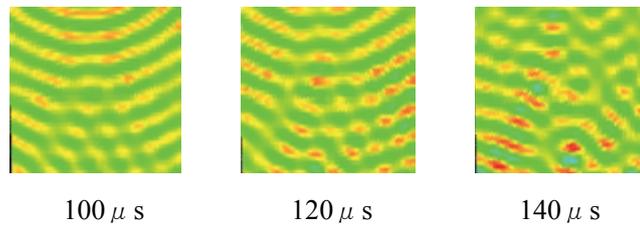
Fig.6.75 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 I

(75) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 J(デントⅢ:深さ 2mm, ϕ 100mm)の画像を Fig.6.76 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:3.00E-8(m)~-3.70E-8(m)]

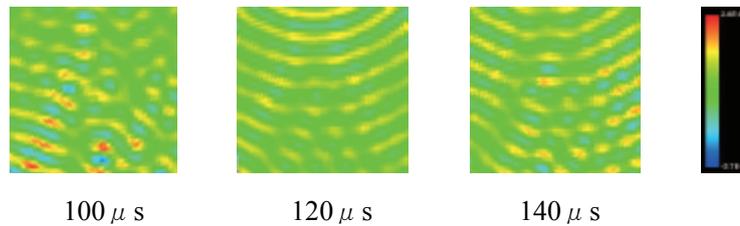
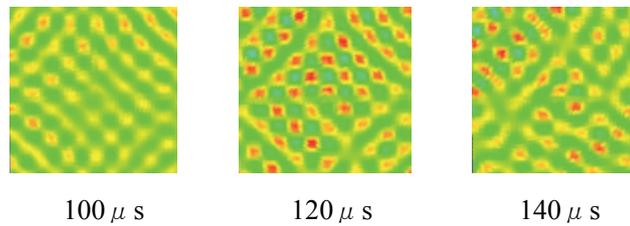


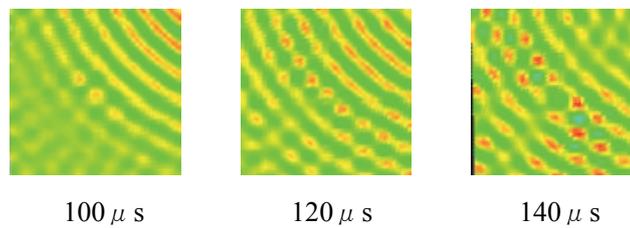
Fig.6.76 パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤), 供試体 J

(76) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 B(亀裂 I :幅 0.2mm, 深さ 2.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.77 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.30E-8(m)~-2.29E-8(m)]

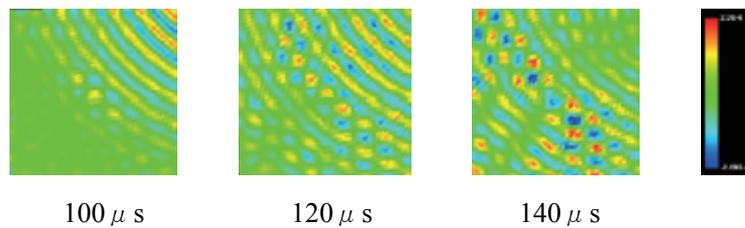
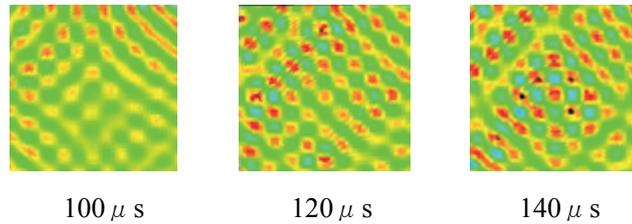


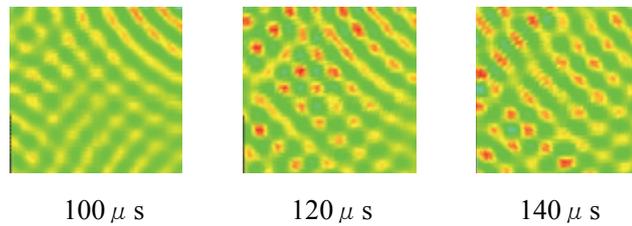
Fig.6.77 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 B

(77) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 C(亀裂Ⅱ:幅 0.2mm, 長さ 2.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.78 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.51E-8(m)~-2.64E-8(m)]

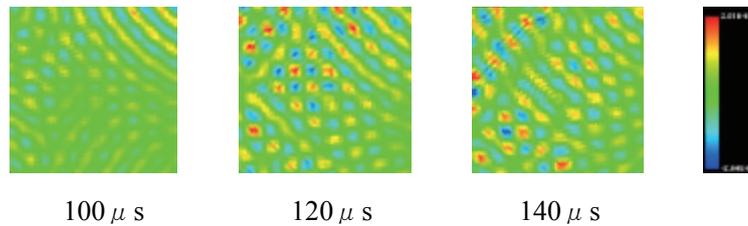
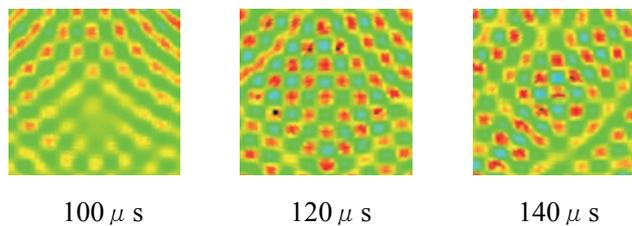


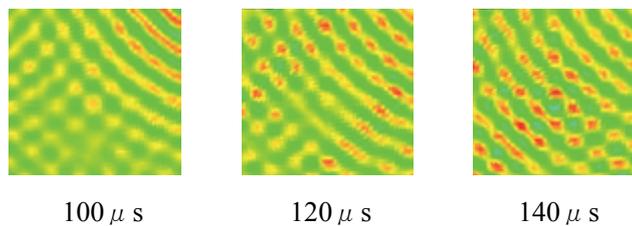
Fig.6.78 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 C

(78) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 D(スクラッチ I :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.79 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.95E-8(m)~-3.80E-8(m)]

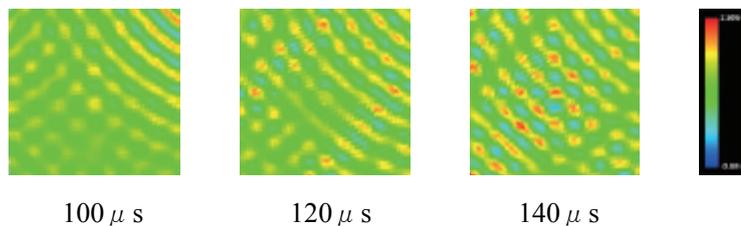
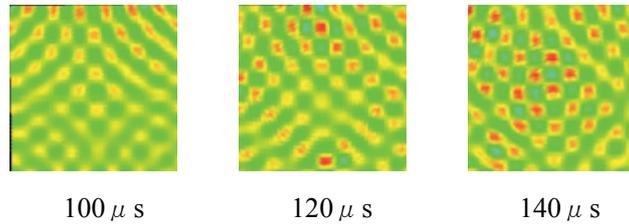


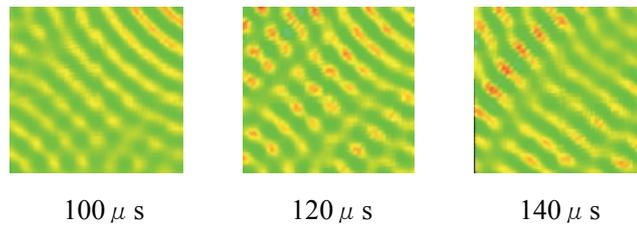
Fig.6.79 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 D

(79) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 E(スクラッチ II :幅 0.2mm, 深さ 1.0mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.80 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:1.94E-8(m)~-2.70E-8(m)]

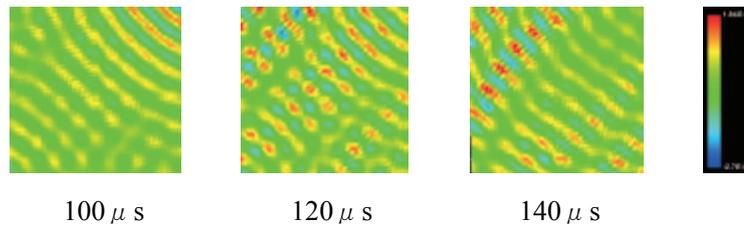
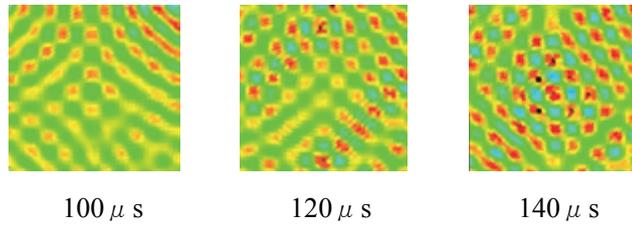


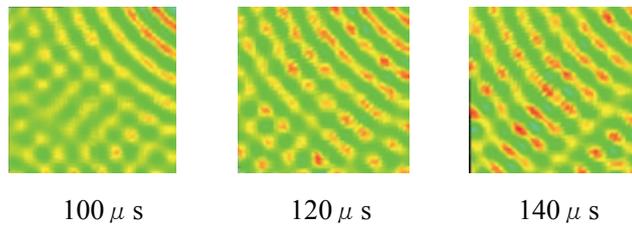
Fig.6.80 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 E

(80) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 F(スクラッチⅢ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 20mm)の画像を Fig.6.81 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.30E-8(m)~-2.24E-8(m)]

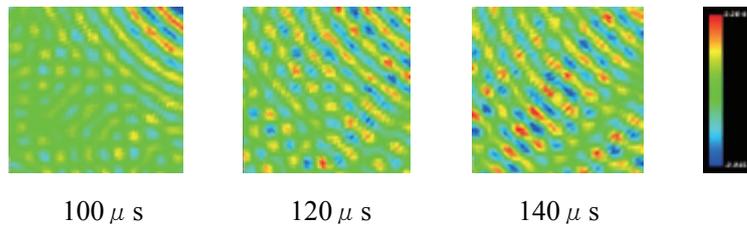
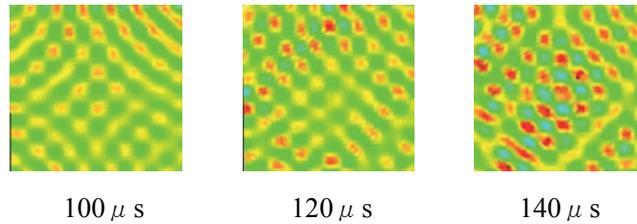


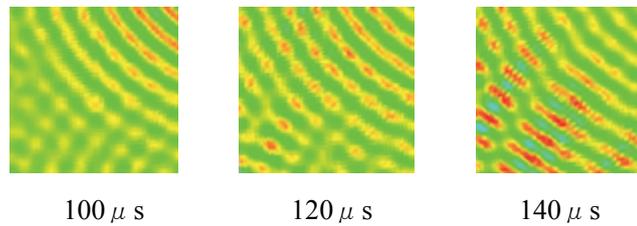
Fig.6.81 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 F

(81) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 G(スクラッチⅣ:幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 5mm)の画像を Fig.6.82 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(b)差分処理後データ[レンジ:2.60E-8(m)~-4.60E-8(m)]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化:2.60E-8(m)~-3.10E-8(m)]

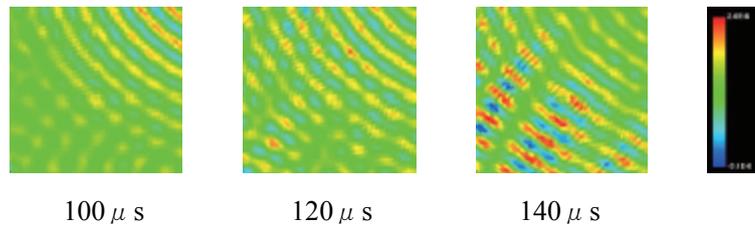
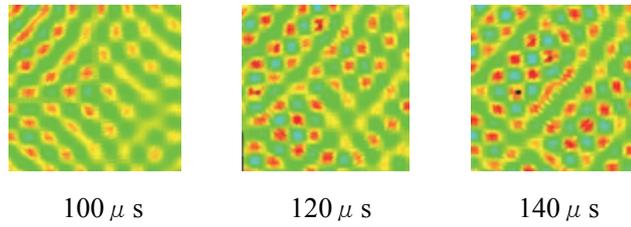


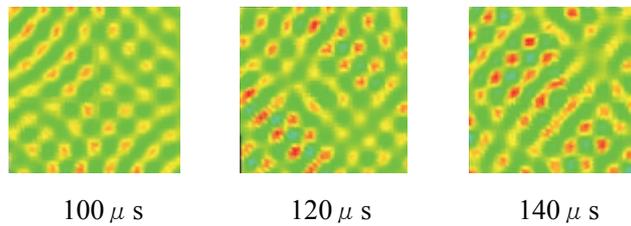
Fig.6.82 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 G

(82) パターン10(AEセンサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体H(デントI : 深さ2mm, ϕ 20mm)の画像を Fig.6.83 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.60E-8(m) \sim -3.00E-8(m)$]

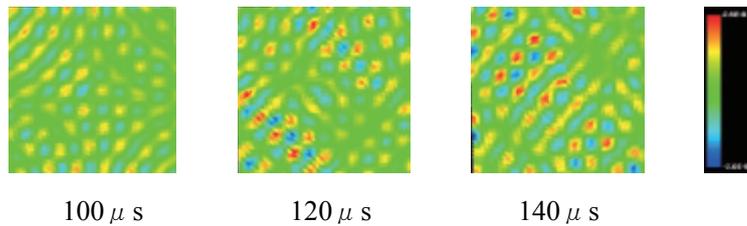
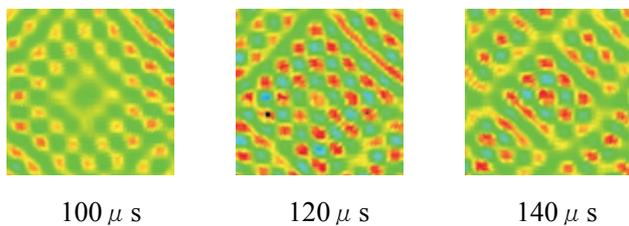


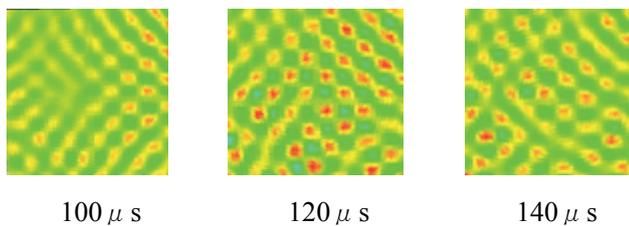
Fig.6.83 パターン10(AEセンサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体H

(83) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 I(デント II : 深さ 2mm, ϕ 60mm) の画像を Fig.6.84 に示す.

(a)オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b)差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c)差分処理後データ[レンジ最適化: $2.60E-8(m) \sim -3.00E-8(m)$]

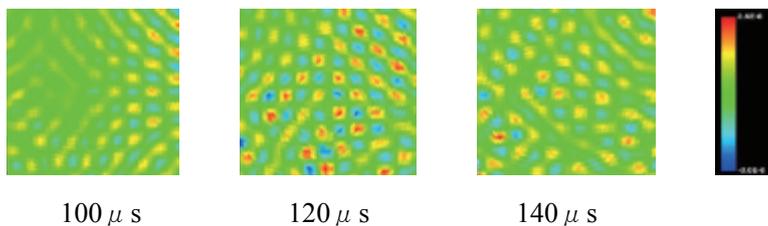
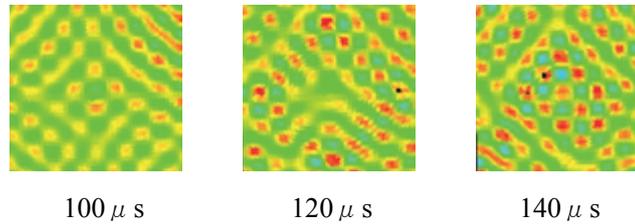


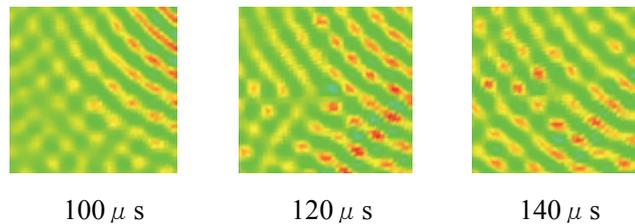
Fig.6.84 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 I

(84) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 J(デントⅢ: 深さ 2mm, ϕ 100mm) の画像を Fig.6.85 に示す.

(a) オリジナルデータ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(b) 差分処理後データ[レンジ: $2.60E-8(m) \sim -4.60E-8(m)$]



(c) 差分処理後データ[レンジ最適化: $2.31E-8(m) \sim -2.29E-8(m)$]

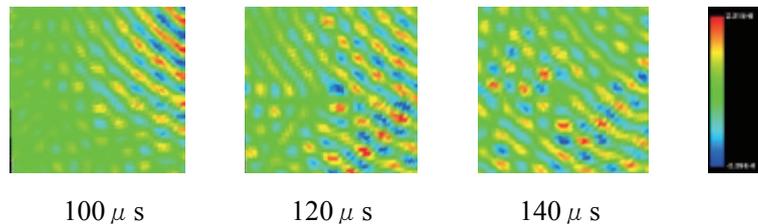


Fig.6.85 パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤), 供試体 J

6. 2 オリジナルデータと差分処理法実施後データの比較

6.1 節に示すように, MaVES を用いて取得した振幅波形データに対して, 差分処理法(損傷のない供試体と損傷のある供試体の振幅波形データの差分をとる方法)による処理を実施した. 当該処理と 5.2 節に示すオリジナルデータとを比較検討した結果を以下に述べる.

(1) パターン 1(AE センサー位置 ①)

亀裂に関しては Fig.6.2 および Fig.6.3 に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ), 供試体 C(亀裂Ⅱ)の場合, 差分処理法により損傷の有無による位相のずれが鮮明となった. また位相のずれが損傷部近傍を起点とした扇状に現れた. スクラッチに関しては Fig.6.4 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ)

において(a)のオリジナルデータと比較して差分処理法により、 $120\mu\text{s}$ の場合、位相のずれが損傷部近傍を起点とした扇状に現れた。供試体 E(スクラッチⅡ)、供試体 F(スクラッチⅢ)、供試体 G(スクラッチⅣ)においては、Fig.6.5～Fig.6.7に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。デントに関しては供試体 H(デントⅠ)、供試体 I(デントⅡ)、供試体 J(デントⅢ)全てにおいて、Fig.6.8～Fig.6.10 に示すとおり損傷部における反射波が損傷部を中心として円周方向に散乱している様子が確認された。

(2) パターン 2(AE センサー位置 ②)

亀裂に関しては供試体 B(亀裂Ⅰ)において Fig.6.11 に示すとおり差分処理法により位相のずれが鮮明となった。また位相のずれが損傷部近傍を起点とした扇状に現れた。供試体 C(亀裂Ⅱ)においては Fig.6.12 に示すとおり(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった位相のずれが差分処理法により鮮明となった。スクラッチに関しては Fig.6.13 および Fig.6.14 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ)、供試体 E(スクラッチⅡ)において(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった位相のずれが差分処理法により鮮明となった。供試体 F(スクラッチⅢ)および供試体 G(スクラッチⅣ)では Fig.6.15, Fig.6.16 に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを鮮明に捉えることができなかった。

(3) パターン 3(AE センサー位置 ①+②)

亀裂に関しては供試体 B(亀裂Ⅰ)及び供試体 C(亀裂Ⅱ)において Fig.6.17 及び Fig.6.18 に示すとおり差分処理法により位相のずれが鮮明となった。また、位相のずれが損傷部付近を起点として扇状に現れた。スクラッチに関しては供試体 D(スクラッチⅠ)、供試体 E(スクラッチⅡ)、供試体 F(スクラッチⅢ)、供試体 G(スクラッチⅣ)全てにおいて、Fig.6.19～Fig.6.22 に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。デントに関しては供試体 H(デントⅠ)、供試体 I(デントⅡ)、供試体 J(デントⅢ)全てにおいて、Fig.6.23～Fig.6.25 に示すとおり(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった位相のずれが鮮明になった。

(4) パターン 4(AE センサー位置 ②+③)

亀裂に関しては Fig.6.26 に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった位相のずれが鮮明となった。また、位相のずれが損傷部付近を起点として扇状に現れた。供試体 C(亀裂Ⅱ)では Fig.6.27 に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。スクラッチに関しては Fig.6.28～Fig.6.31 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ)、供試体 E(スクラッチⅡ)、供試体 F(スクラッチⅢ)、供試体 G(スクラッチⅣ)全てにおいて、損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。デントに関しては Fig.6.32～Fig.6.34 に示すとおり供試体 H(デントⅠ)、供試体 I(デントⅡ)、供試体 J(デントⅢ)全てにおいて、損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。

(5) パターン 5(AE センサー位置 ②+④)

亀裂に関しては Fig.6.35, Fig.6.36 に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)、供試体 C(亀裂Ⅱ)において差分処理法により位相のずれが鮮明となった。また、位相のずれは損傷部分を含む帯状であった。

スクラッチに関しては Fig.6.37～Fig.6.40 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ) 全てにおいて, 位相のずれが鮮明となった。また, 位相のずれは損傷部を含む帯状であった。デントに関しては Fig.6.41～Fig.6.43 に示すとおり供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ) 全てにおいて, 位相のずれが確認された。また, 位相のずれは損傷位置を含む帯状であった。

(6) パターン 6(AE センサー位置 ②+⑤)

亀裂に関しては, Fig.6.44 に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において(a)のオリジナルデータでは判別出来なかった損傷部周辺の位相のずれを確認できた。供試体 C(亀裂Ⅱ)は Fig.6.45 に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。スクラッチに関しては Fig.6.46～Fig.6.49 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ) 全てにおいて, 損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。

(7) パターン 7(AE センサー位置 ①+②+③)

亀裂に関しては Fig.6.50 に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった損傷部近傍の位相のずれが差分処理法により鮮明となった。また, 位相のずれは損傷部近傍を起点とした扇状であった。供試体 C(亀裂Ⅱ)においては Fig.6.51 に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。スクラッチに関しては Fig.6.52～Fig.6.55 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ), 供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ) 全てにおいて, 損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。デントに関しては Fig.6.56 に示すとおり供試体 H(デントⅠ)において(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった位相のずれが差分処理法により鮮明となった。供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ)においては, Fig.6.57 および Fig.6.58 に示すとおり損傷部近傍からの位相のずれを捉えることはできなかった。

(8) パターン 8(AE センサー位置 ②+③+④)

亀裂に関しては Fig.6.59 に示すとおり供試体 B(亀裂Ⅰ)において(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった損傷部近傍の位相のずれが差分処理法により鮮明となった。また, 位相のずれは損傷部近傍を起点とした扇状であった。供試体 C(亀裂Ⅱ)においては Fig.6.60 に示すとおり(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった損傷部近傍の位相のずれが差分処理法により鮮明となった。しかし, 供試体 B(亀裂Ⅰ)の場合と異なり, 供試体 C(亀裂Ⅱ)の場合, 位相のずれは損傷部近傍を含む帯状であった。スクラッチに関しては Fig.6.61, Fig.6.62 に示すとおり供試体 D(スクラッチⅠ), 供試体 E(スクラッチⅡ)において(a)のオリジナルデータでは鮮明でなかった損傷部近傍の位相のずれが差分処理法により鮮明となった。供試体 F(スクラッチⅢ), 供試体 G(スクラッチⅣ)では Fig.6.63, Fig.6.64 に示すとおり損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。デントに関しては Fig.6.65～Fig.6.67 に示すとおり供試体 H(デントⅠ), 供試体 I(デントⅡ), 供試体 J(デントⅢ) 全てにおいて, 損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった。

(9) パターン 9(AE センサー位置 ①+④+⑤)

亀裂に関しては Fig.6.68 および Fig.6.69 に示すとおり供試体 B(亀裂 I), 供試体 C(亀裂 II) において損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった. スクラッチに関しては, Fig.6.70 ~Fig.6.73 に示すとおり供試体 D(スクラッチ I), 供試体 E(スクラッチ II), 供試体 F(スクラッチ III), 供試体 G(スクラッチIV) 全てにおいて, 損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった. デントに関しては, Fig.6.74~Fig.6.76 に示すとおり供試体 H(デント I), 供試体 I(デント II), 供試体 J(デントIII) 全てにおいて, 損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった.

(10) パターン 10(AE センサー位置 ②+③+④+⑤)

亀裂に関しては Fig.6.77, Fig.6.78 に示すとおり供試体 B(亀裂 I), 供試体 C(亀裂 II) において損傷部からの位相のずれを捉えることはできなかった. スクラッチに関しては, Fig.6.79~Fig.6.82 に示すとおり供試体 D(スクラッチ I), 供試体 E(スクラッチ II), 供試体 F(スクラッチ III), 供試体 G(スクラッチIV) 全てにおいて, 損傷部からの位相のずれを捉えることはできなかった. デントに関しては Fig.6.83~Fig.6.85 に示すとおり供試体 H(デント I), 供試体 I(デント II), 供試体 J(デントIII) 全てにおいて, 損傷部近傍の位相のずれを捉えることはできなかった.

7. まとめ

多軸振動非接触自動計測システム MaVES を用いて将来有望な非破壊検査技術の1つである Lamb 波を用いた超音波非破壊検査技術に関して実験を行った。損傷を模擬したアルミ平板供試体に伝播する Lamb 波の計測を可視化することにより、さまざまな種類の損傷における Lamb 波の伝播特性を確認し、また取得した波形振幅データを処理することにより微小な傷の損傷同定技術構築の可能性について検討した。

本実験では供試体に模擬した損傷部の中心から 100mmx100mm の範囲において測定ポイント数 1840 ポイントを設定し、Table 3.1 に示す 10 種類の供試体に対して、Table 5.1 に示す 10 通りの AE センサー位置パターンから Lamb 波を発振し、供試体を伝播する波の面外成分(Z 軸方向)の振動速度を計測した。供試体パネル 1 枚の計測に約 10 分程度の時間を要した。

Lamb 波の伝播特性の把握については、ソフトウェアにて構築された損傷のない供試体と損傷のある供試体の画像の比較を行った。計測データから、亀裂及び一部のスクラッチに関しては損傷部で Lamb 波の反射が確認され、またデントでは損傷部を中心として円周方向に散乱する特有の現象が確認された。また複数の AE センサーから Lamb 波を伝播させた場合、多くの Lamb 波信号が供試体上で干渉する場合、比較的小さい損傷部位での反射反応が確認されないことが判明した。結果として損傷の程度が大きいもの、AE センサーからの発振信号数の少ないものほど視認性が高いことが示された。

損傷同定技術については、MaVES による計測にて得られたデータを簡易処理することにより微小な傷の損傷同定技術の可能性について検討を行った。手法として、損傷のない供試体と損傷のある供試体の振幅波形データの差分をとる方法(差分処理法)を用いた。

差分処理法によるデータ処理においては、オリジナルの画像データと比較して視認性が向上する場合のあることを確認した。ただし、AE センサーを用いた Lamb 波伝播は接触式の加振法であるため、損傷のない供試体と損傷のある供試体の 2 つの供試体の振幅波形データを比べた場合、両供試体におけるセンサー位置の誤差やセンサーと供試体の接触状態の違いにより、波形の形状や振幅の大きさに若干の誤差を生じる問題点がある。今後の課題として、シミュレーションをベースとした Lamb 波の理想波形を損傷の無いパネルにおける伝播基本モデルとして用いれば、AE センサーの接触状態に起因する伝播波形の誤差が修正され、視認性が更に改善できる可能性がある。

本実験を通して、航空機の外板に多く利用されているアルミニウム材に施した航空機に起こり得る損傷(亀裂、スクラッチ、デント)に対して Lamb 波を用いた超音波非破壊検査技術の検証を行い、その損傷検知、可視化技術において新たな非破壊検査技術として有望であることが証明できた。特に損傷としてスクラッチやデントを Lamb 波で鮮明に捕えた例はほとんどない。今後はより実際の航空機に近い構造供試体を用いた実験や更なる視認性の向上、検査時間の短縮に取り組み、航空機の非破壊検査技術に適用するための技術開発を行う必要がある。

参考文献

- 1) W. Staszewski, B. Lee and R. Traynor; Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry, *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp.727-739, 2007
- 2) P. Tua, S. Quek and Q. Wang; Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves, *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 4, pp. 643-660, 2004
- 3) Z. Tian, C. Leckey, M. Rogge and L. Yu; Crack Detection with Lamb Wave Wavenumber Analysis, *Proceedings of SPIE Smart Structure*, 2013
- 4) T. Hay, R. Royer, H. Gao, X. Zhao and J. Rose; A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 4, pp. 946-961, 2006
- 5) 神田淳, 佐俣喜芳; 多軸振動非接触自動計測システム(MaVES)の機能拡張と全システム概要, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-13-010, 2013
- 6) Z. Su and L. Ye; Identification of Damage Using Lamb Waves, from Fundamentals to Applications, Springer London, 2009
- 7) J. Rose; Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, 2004

