656 レーザー加振技術を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくヘルスマニタリング

Health Monitoring based on High Frequency Vibration Measurement with Laser

○学 宮本 大資 (北大)   正 梶原 逸朗 (北大)   正 細矢 直基 (芝浦工大)
 学 古川 崇人 (北大)   学 櫻井 泰貴 (北大)

Daisuke MIYAMOTO, Hokkaido University, N13, W8, Kita-ku, Sapporo 060-8628

Itsuro KAJIWARA, Hokkaido University

Naoki HOSOYA, Shibaura Institute of Technology

Takahito KOGAWA, Hokkaido University

Yasutaka SAKURAI, Hokkaido University

This paper proposes a vibration testing and health monitoring system based on an impulse response excited by a laser ablation. High power YAG pulse laser is used in this system for producing an ideal impulse force on structural surface. It is possible to measure high frequency vibration responses in this system. A health monitoring system is constructed by this vibration testing system and damage detecting algorithm. A microscopic damage of structures can be extracted by detecting fluctuations of high frequency vibration response with this health monitoring system. Loosening of bolt tightening torques is defined as the damage of the system. The damage is detected by statistical evaluations with Recognition-Taguchi method.

Key Words: Laser ablation, Impulse response, Impact testing, Health monitoring, MT method, RT method

A1. 結 論

本研究では、高出力パルスレーザーによる非接触加振法を用いたヘルスマニタリング技術の構築を目指し、その第一段階としてボルト緩みの検知手法を提案する。複数のボルトを締結したアルミニウム製ブロックの周波数特性を、ボルトの締結トルクの大きさを変えながら測定する。まず、トルクの微小な緩みに対し、高周波数帯域の周波数特性に変化が現れることを明らかにする。複数のボルトに対し、複数の緩み条件を設定し、それぞれの状態における周波数特性を複数のサンプルについて記録する。そして、各状態のデータを統計的に処理し、各状態の単位空間を作る。未知の測定データに対し、単位空間からの距離をRT法により計算、比較することでボルト緩みの検知、また緩み位置の特定を行う。

A2. レーザー加振を用いた振動実験システムの構築

図A1に高出力パルスレーザーを用いた振動実験システムの概略図を示す。光学定盤上に波長1064nm、出力650mJ、パルス幅5nsのYAGレーザー(Continuum Surelite II)を設置した。本実験では、自由支持の構造物に対して実験を可能とするために、構造物を糸で吊し、レーザー光を凸レンズによってスポット径 $2\mu\text{m}$ に集光しレーザーアブレーションを発生させ、インパルス加振によるパワースペクトルの計測を行う。

A3. 動特性変動評価に基づくボルト緩み検知

図A2にボルトの締結トルクを変化させながら測定した40kHzまでのパワースペクトルを示す。同図から、本計測レンジにおける25kHz以下の低周波数帯域側では共振ピーク付近の応答が一致しているが、25kHz以上での高周波数帯域側では共振ピーク付近の応答および周波数に変動が生じていることがわかる。そこで、それぞれの状態の周波数特性を複数のサンプルについて記録し、統計的処理に基づいてデー

タベース化することにより、RT法を用いて未知のデータに対して緩み検知を行った。本手法により、ボルト緩みの検知および緩み位置の特定が可能であることを検証した。

Fig. A1 Experimental system

Fig. A2 Power spectrum

1. 結 論

レーザーはその高指向性、高エネルギー密度から様々な応用技術に用いられている。本論文ではレーザーを用いた応用技術として、高感度のヘルスモニタリング技術を提案・開発する。ヘルスモニタリング技術とは、構造物の健全性を監視することである。その監視方法として、熟練された技術者による感覚を用いた古典的なものから光ファイバーモニタリングシステムのような最新技術を駆使したものまである。しかし、前者は技術者の養成に長期の時間を要し、後者は環境・設備の整備に莫大な費用がかかる。本研究ではパルスレーザーを用いてレーザーアブレーション⁽¹⁾によるインパルス加振力を作用させることにより構造物を振動させ、その振動特性を観測⁽²⁾⁽³⁾することで簡易かつ低コストで実現可能なヘルスモニタリングの手法・技術の開発を行う⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本研究において、高出力パルスレーザーによるインパルス加振法を用いる理由として、以下の2点が挙げられる。一つは、構造物のヘルスモニタリングをする際に、微小な損傷も検知できるよう動特性の計測に高い再現性が求められるという点である。もし、再現性が低ければ、動特性変動の要因の特定が困難になり、ヘルスモニタリングの精度の低下につながる。この点においてレーザー加振による振動計測は極めて高い再現性を保障できるので、ヘルスモニタリングのための振動計測法として最適といえる。もう一つの理由は、ヘルスモニタリングにおいて、構造物の振動特性における高周波数帯域成分を計測する重要性が増していることである。すなわち、構造の内部に損傷が発生した場合、高い周波数帯域におけるモードほど、固有振動数およびモード形の変動が大きくなることが報告されている⁽⁶⁾。従来の振動実験のインパルス加振法に用いられるインパルスハンマーでは、入力が理想的なインパルス波形にならないため、そのスペクトル成分がある帯域以上の高周波成分をほとんど含まず、高周波領域における構造物の振動特性を調べるのに適していない。それに対し、レーザーでは非常に高い周波数帯域まで振動特性を観測することができるので、この観点からもヘルスモニタリングに適した加振方法であると言える。本研究では、レーザーを用いたヘルスモニタリング技術開発の第一段階として、ボルト緩みの検知技術を開発する。複数のボルトを締結したアルミニウム製ブロックの周波数特性を、ボルトの締結トルクの大きさを変えながら測定する。まず、トルクの微小な緩みに対し、高周波数帯域の周波数特性に変化が現れることを明らかにする。複数のボルトに対し、複数の緩み条件を設定し、それぞれの状態における周波数特性を複数のサンプルについて記録する。そして、各状態のデータを統計的に処理し、各状態の単位空間を作る。未知の測定データに対し、単位空間からの距離をRT (Recognition-Taguchi)法⁽⁷⁾により計算、比較することでボルト緩みの検知、また緩み位置の特定を行う。

2. レーザー加振を用いた振動計測技術

ヘルスモニタリングの対象となる構造物に高出力レーザーをパルス照射し、インパルス応答を測定するための振動計測システムについて述べる⁽²⁾⁽³⁾。

2.1 レーザーアブレーション レーザーアブレーションにより加振力が発生する原理を説明する。図1(a)に示すようにレーザー光を金属表面に照射するとレーザー光は金属に吸収され、原子、分子、およびそれらのイオン等が放出さ

れる。これらがレーザー光を吸収することで高温のプラズマが発生して金属から大量の粒子群（プルーム）が放出される

（図1(a)右側）。金属から質量 Δm が速度 v で放出された場合の運動量は $\Delta m v$ で表すことができ、これが力積となる。構造物に対してより大きな加振力を発生させるためには、図1(b)に示すようにレーザーアブレーションの際、金属表面に水滴を付着させればよい。水滴はレーザーを透過するため、金属表面においては同様にレーザーアブレーションが発生する。金属表面からの粒子群の放出に加え、金属表面温度の急激な上昇により水滴が蒸発し水滴の質量 ΔM が速度 V で放出されることで運動量は $\Delta m v + \Delta M V$ となり、より大きな力積が得られる（図1(b)右側）。粒子群、および水蒸気は金属表面から放射状に放出されるため、力積の方向は金属表面に対して法線方向成分のみとなる。この力積が構造物に対して加振力となる。

レーザーアブレーションは、飛翔体の推進に利用した検討例が報告され、機械加工（穴あけ、切断等）や医療の分野においては実用化されている⁽¹⁾。

Fig. 1 Excitation force generated by laser ablation

2.2 パルスレーザー 図2に高出力パルスレーザーを用いた振動実験システムの概略図を示す。光学定盤上に波長1064nm、出力650mJ、パルス幅5nsのYAGレーザー(Continuum Surelite II)を設置した。本実験では自由支持の構造物に対して実験を可能とするために、構造物を糸で吊し、レーザー光を凸レンズによってスポット径2μmに集光しレーザーアブレーションを発生させた。

Fig. 2 Experimental system

2.3 出力の計測および解析 レーザー加振による応答の測定方法を説明する。応答は市販の加速度センサ (ONOSOKKI NP-3211, 0.5g, 1.004mV/(m/s²)) を構造物の測定点に接着剤で取り付けた。なお、本実験に使用した加速度センサの固有振動数は50kHz以上であることを注記しておく。

測定された出力は、スペクトルアナライザ (A/D; NI PXI1042Q, NI-4472B, Software; キャテック CAT-System) により解析されるパワースペクトルを記録する。条件の違いによる周波数特性の違いは高周波数帯域に表れると考えられるため、測定対象周波数は40kHzとした。

3. ボルトの緩みに対する周波数特性の変化

パルスレーザーを用いたインパルス加振に基づき、複数のボルトを締結した被対象物の周波数特性を、ボルトの締結トルクの大きさを変えながら測定する。いくつかのボルト緩み条件でのインパルス応答から得られるパワースペクトルを比較することにより、高周波数帯域の周波数特性に変化が現れることを示す。

3.1 対象構造物の選定 ボルトの緩みに対する周波数特性の変化を調べるため、構造物として 150mm×50mm×20mm のアルミニウム製の直方体ブロック (以下、ブロックと呼ぶ) に呼び径 M6 のネジ穴を開けワッシャと共に M6 のステンレス製キャップボルトを締めつけたものを供試体とする (図 3)。ただし、ネジ穴は図 3 のように 5 箇所あるが、ボルトは Bolt1, Bolt3, Bolt5 の 3 箇所のみに取り付ける。レーザーによる加振点は図 3 に示す位置であり、応答は加振点の裏に加速度センサを取り付け計測する。

Fig. 3 Test piece

3.2 ボルト締めつけトルクの大きさ 本実験で使用するボルトの標準締めつけトルクが2.6Nmと定められている。そこで、3つのボルトを締めつけトルク2.6Nmで締めつけた状態を正常とし、これに対しボルトを締めつけるトルクが2.6Nm未満の状態を異常とする。ここでは、表1のように正常な状態と6種類の異常な状態の計7種類の状態について、

周波数特性を調べる。

なお、ボルトの締めつけは東日製 SF6N 型トルクレンチを用いて手動で行った。

Table 1 Conditions and tightening torques

Condition	Tightening torque (Nm)		
	Bolt 1	Bolt 3	Bolt 5
Normal	2.6	2.6	2.6
Damage 1	2.0	2.6	2.6
Damage 2	2.6	2.0	2.6
Damage 3	2.6	2.6	2.0
Damage 4	1.4	2.6	2.6
Damage 5	2.6	1.4	2.6
Damage 6	2.6	2.6	1.4

3.3 計測 表1に示す7種類の状態について、3.1で示した入出力点でレーザー加振によるインパルス応答を加速度センサで計測し、FFTアナライザによるパワースペクトルの解析を行う。計測における周波数帯域は0~40kHz (データ点数: 12800点) とする。計測における平均化処理の平均化回数は5回とした。図4にそれぞれの状態で測定した結果を示す。図4上図は0~20kHz、下図は20~40kHzの帯域におけるパワースペクトルを示す。同図から、25kHz以下の低周波数帯域側では共振ピーク付近の応答が一致しているが、25kHz以上の高周波数帯域側では共振ピーク付近の応答および周波数に変動が生じていることがわかる。このような特性変動の検知を利用して、ボルトの緩み検知を行う。

Fig. 4 Power spectrum in each condition

4. RT法によるボルト緩み検知

異常状態の違いにより現れる周波数特性変動の差を利用して、ボルトの緩み検知を行う。ここで、ボルトの締結状態は、締結の度にわずかな誤差があり、また他の要因による誤差の混入も考えられるため、同じ状態に対して再設定を繰り返し、複数のサンプルについて計測を行い、それを統計的に処理して、異常を判別する必要がある。図5に、正常な状態で再設

定を繰り返し、複数回の実験を行った際のパワースペクトルを示すが、同じ状態でも高周波数帯域の特性にばらつきがあることがわかる。したがって、正常および異常の状態で複数の実験・計測を行い、それらの状態における統計量のデータベースを作成し、何らかの不具合のあるデータがどの異常状態に属するかを判定する方法を考える。そのための方法として、品質工学の考えに基づいたRT法⁷⁾を適用する。

RT法は、インドの数学者P.C.マハラノビスとタグチメソッドで有名な田口玄一の両氏から命名されたMT (Mahalanobis-Taguchi)法の一つである。この方法では、同じ状態のデータを複数測定し、ある状態の単位空間を作る。単位空間を構成する情報をメンバーと呼ぶ。単位空間に属するメンバーに対し、品質工学の考えに基づいた標準SN比 η と感度 β という量を定義する。これらを用いて単位空間に対する距離をRT法によって定義する。そして、未知のデータに対して単位空間に対する距離を計算し比較することで、どの単位空間に含まれるかを判断する。以下に計算過程の詳細を示す。メンバー中の計算に使う値を項目と呼び、メンバーの数を n 個、項目の数を k 個とすれば、表2に示すように項目を $X_1, X_2, \dots, X_k$ とし、この平均を $m_1, m_2, \dots, m_k$ とする。すなわち、

$$m_i = \frac{1}{n} (X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{in}) \quad (1)$$

単位空間のメンバーごとの標準SN比 η と感度 β は次のように求められる。単位空間の1番目のメンバーの標準SN比 η_1 と感度 β_1 は、線形式 L_1 を

$$L_1 = m_1 X_{11} + m_2 X_{21} + \dots + m_k X_{k1} \quad (2)$$

として、次のように求める。

$$\beta_1 = \frac{L_1}{r} \quad (3)$$

ここで、

$$r = m_1^2 + m_2^2 + \dots + m_k^2 \quad (4)$$

また、SN比 η_1 はまず全変動 S_{T1} と比例項の変動 $S_{\beta 1}$ を次のように求めて計算する。

Fig. 5 Power spectrum in normal condition

Table 2 Variables of each member in unit space

Event Member	X_1	X_2	$\dots$	X_k
1	X_{11}	X_{21}	$\dots$	X_{k1}
2	X_{12}	X_{22}	$\dots$	X_{k2}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$
n	X_{1n}	X_{2n}	$\dots$	X_{kn}
Average	m_1	m_2	$\dots$	m_k

Table 3 η and β of each member in unit space

Member	η	β
1	η_1	β_1
2	η_2	β_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	η_n	β_n

Table 4 Y of each member in unit space

Member	Y_1	Y_2
1	Y_{11}	Y_{21}
2	Y_{12}	Y_{22}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	Y_{1n}	Y_{2n}

$$S_{T1} = X_{11}^2 + X_{21}^2 + \dots + X_{k1}^2 \quad (5)$$

$$S_{\beta 1} = \frac{L_1^2}{r} \quad (6)$$

これから、誤差変動 S_{e1} と誤差分散 V_{e1} は

$$S_{e1} = S_{T1} - S_{\beta 1} \quad (7)$$

$$V_{e1} = \frac{S_{e1}}{k-1} \quad (8)$$

そして、標準SN比 η_1 は次式で与えられる。

$$\eta_1 = \frac{1}{V_{e1}} \quad (9)$$

同様に、2番目、3番目、 $\dots$ 、 n 番目のメンバーに対する β と η を求め、表3のようにまとめる。

β と η を用いて単位空間内の距離を求める。SN比 η はそのままではなく、次のようにおき、表4のようにまとめる。

$$Y_1 = \beta \quad (10)$$

$$Y_2 = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \quad (11)$$

単位空間の個々のメンバーの特徴量が2個の Y_1, Y_2 に集約された。ここで、 Y_1 は感度、 Y_2 は標準偏差を意味している。単位空間の n 個のメンバーのデータによりRT法を用いて、単位空間の距離 D を求める。それと比較して信号との距離

が十分大きいかどうかを調べて判断する。RT 法は Y_1 , Y_2 の分散, 共分散を求めて分散・共分散行列を求める。 Y_1 の分散を V_{11} , $Y_1 \cdot Y_2$ の共分散を V_{12} , Y_2 の分散を V_{22} で表す。 $V_{21}=V_{12}$ である。 Y_1 の平均を $\bar{Y}_1$, Y_2 の平均を $\bar{Y}_2$ として

$$V_{11} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{1i} - \bar{Y}_1)^2 \quad (12)$$

$$V_{12} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{1i} - \bar{Y}_1)(Y_{2i} - \bar{Y}_2) \quad (13)$$

$$V_{22} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{2i} - \bar{Y}_2)^2 \quad (14)$$

したがって, 分散・共分散行列 V は

$$V = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{12} & V_{22} \end{pmatrix} \quad (15)$$

分散・共分散行列 V の余因子行列 A は次のようになる。

$$A = \begin{pmatrix} V_{22} & -V_{12} \\ -V_{12} & V_{11} \end{pmatrix} \quad (16)$$

これを用いて各メンバー距離は, メンバーが単位空間の 1 番目の場合を示せば, 次のようになる。

$$D_1^2 = \frac{1}{2} [V_{22}(Y_{11} - \bar{Y}_1)^2 - V_{12}(Y_{11} - \bar{Y}_1)(Y_{21} - \bar{Y}_2) - V_{12}(Y_{11} - \bar{Y}_1)(Y_{21} - \bar{Y}_2) + V_{11}(Y_{21} - \bar{Y}_2)^2] \quad (17)$$

単位空間の残りのメンバーについても, 距離 D_2^2 , D_3^2 , ..., D_n^2 が得られる。 D_1^2 , D_2^2 , ..., D_n^2 の平均の平方根をこの単位空間のゼロ点からの距離 $\bar{D}$ とする。 すなわち,

$$\bar{D} = \frac{1}{n} (D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)^{1/2} \quad (18)$$

これらの情報をもとに未知のデータがある単位空間に含まれるかどうかを調べる。 そのためには, 含まれるか調べたい単位空間の平均を m_1 , m_2 , ..., m_k とすると未知のデータ X_1 , X_2 , ..., X_k の間に, 線形式

$$L = m_1 X_1 + m_2 X_2 + \dots + m_k X_k \quad (19)$$

を計算し, 感度 β と標準 SN 比 η を求める。

$$\beta = \frac{L}{r} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{1}{V_e} \quad (21)$$

ここで,

$$r = m_1^2 + m_2^2 + \dots + m_k^2 \quad (22)$$

$$S_T = X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_k^2 \quad (23)$$

$$S_\beta = \frac{L^2}{r} \quad (24)$$

$$S_e = S_T - S_\beta \quad (25)$$

$$V_e = \frac{S_e}{k-1} \quad (26)$$

である。 次に β と η から Y_1 と Y_2 を求める。

$$Y_1 = \beta \quad (27)$$

$$Y_2 = \frac{1}{\eta} \quad (28)$$

これから未知のデータに対する距離 D を次のように求める。

$$D^2 = \frac{1}{2} [V_{22}(Y_1 - \bar{Y}_1)^2 - V_{12}(Y_1 - \bar{Y}_1)(Y_2 - \bar{Y}_2) - V_{12}(Y_1 - \bar{Y}_1)(Y_2 - \bar{Y}_2) + V_{11}(Y_2 - \bar{Y}_2)^2] \quad (29)$$

この D に対し $\bar{D}$ の何倍以上になれば異常というように判断する。 すなわち, $D/\bar{D}$ の値を用いて異常を判別する。

5. RT 法による診断結果

5.1 診断プロセス 診断のための単位空間を構成するために, 同じ状態における応答のパワースペクトルを複数回測定する。 すなわち, 同一の状態でもわずかな条件の違いにより, 微小な応答の変化が現れる。 そのことを考慮に入れるため, 計測の際に一度測定を行った後, ボルトをすべて緩め, 再び同じ条件で締め直し, 同じ状態の応答を計測する。 以上の過程を繰り返し 10 個のパワースペクトルのデータを測定した。 測定したデータから, 図 6 に示すような診断のためのデータサンプル領域およびデータサンプル点に対し, 以下の処理を行う。

1. 診断に用いる周波数範囲を設定する。
2. 範囲を複数の小領域に分割する。
3. 分割した範囲の中で平均値を求める。
4. 平均値をデータに用いて, データ総数を減少させる。

処理を施したデータをメンバーとし, 単位空間を作成する。 これを 7 種の状態について行い, 7 種の単位空間を作成する。 これらの単位空間に対し, 未知のデータと比較を行い, 診断する。

5.2 診断結果 今回は診断の有用性を見るため, 未知のデータとして, それぞれの状態で単位空間を構成していないデータを用いる。 そして, 該当する状態に属すると判定されるかどうかを調べる。 ここで, 測定した応答のパワースペクトル値を各メンバーの項目とし, RT 法により診断する。 本検討では, 以下の 2 つの条件のもとで, 5.1 で示した処理を単位空間のメンバーと未知のデータに対し施し, 診断した。

1. 診断周波数範囲: 0~25kHz (データ点数: 8000 点)
平均を取る点数: 40 点
総データ点数: 200 点
2. 診断周波数範囲: 25~40kHz (データ点数: 4800 点)
平均を取る点数: 40 点
総データ点数: 120 点

Fig. 6 Data processing range

表5に条件1で、表6に条件2で診断を行った結果を示す。表の値は単位空間内のメンバーの距離の平均 $\bar{D}$ と未知の状態の単位空間に対する距離 D との比 $D/\bar{D}$ である。この値が小さいほど、その状態に属する可能性が高いことを示す。表5の結果から、低周波数帯域を診断範囲に定めると、状態が一致している場合と状態が異なる場合の値に差が小さく、異常の検知および特定が困難である。一方、表6の結果から、高周波数帯域を診断範囲に定めれば、状態が一致しているときに0.2~1程度の値を、異なる状態のときにほぼ2以上の値をとるため、異常の検知および特定が可能である。ただし、表6を見ると、一部の条件では、異なる状態においても同じ状態に近い値をとることがある。診断の信頼性を向上させるためには、より多くのメンバーを用いて単位空間を構成すること、評価における周波数領域を適切に設定すること、および計測精度をより向上させることが有効だと考えられる。

6. 結 論

本研究では、レーザー加振による高周波振動計測技術を用いた高感度ヘルスマニタリングシステムについて検討し、以下の結論を得た。

1. レーザー加振により計測されるパワースペクトルを評価することにより、構造物の微小な異常に対し、高周波数帯域で動特性の変化を識別できることを示した。
2. ボルト締結トルクに関する異常状態に対し、高周波数帯域の微小な動特性変化を、RT法を用いて解析することにより、異常の検知および特定を行う方法を提案し、その有効性を実験的に検証した。

謝 辞

本研究は、科学技術振興機構 研究成果最適展開支援事業 可能性発掘タイプ（シーズ顕在化）（課題番号：AS2111411B）、日本学術振興会・科学研究費補助金（基盤(A)、課題番号：22246027）の援助を受けて遂行した。ここに、深く感謝の意を表する。

Table 5 Results of damage detection by RT method
(Case 1; 0~25kHz)

Object Standard	Normal	Dmg. 1	Dmg. 2	Dmg. 3	Dmg. 4	Dmg. 5	Dmg. 6
Normal	0.50	0.41	0.17	0.21	1.69	0.94	1.07
Damage 1	2.49	2.30	1.25	5.05	3.51	2.85	1.74
Damage 2	1.00	0.71	1.08	1.30	1.24	1.44	1.06
Damage 3	1.11	0.90	1.94	2.73	2.52	3.02	2.15
Damage 4	0.89	1.11	2.18	1.99	0.74	1.54	0.63
Damage 5	1.51	0.80	0.79	1.33	1.79	0.73	0.60
Damage 6	2.96	2.59	1.20	5.16	3.40	3.01	0.85

Table 6 Results of damage detection by RT method
(Case 2; 25~40kHz)

Object Standard	Normal	Dmg. 1	Dmg. 2	Dmg. 3	Dmg. 4	Dmg. 5	Dmg. 6
Normal	0.23	1.31	4.56	2.04	3.24	6.64	4.51
Damage 1	1.21	0.43	6.76	2.86	2.29	6.11	4.04
Damage 2	0.84	3.15	1.11	3.19	3.79	4.14	4.69
Damage 3	1.68	2.81	9.57	1.30	4.07	5.50	3.59
Damage 4	1.90	0.87	7.79	4.27	1.04	6.34	3.63
Damage 5	1.79	3.10	6.65	3.90	3.55	0.43	3.22
Damage 6	2.89	4.28	11.99	3.87	4.51	4.90	0.50

文 献

- (1) The institute of Electrical Engineers of Japan ed., *Laser ablation and applications*, (1999), Corona Publishing Co., LTD.
- (2) Hosoya, N., Kajiwar, I. and H. Sorimachi, Vibration Testing Based on Impulse Response Excited by Laser Ablation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.75, No.760(2009), pp.3160~3167..
- (3) Hosoya, N. and Kajiwar, I., Vibration Testing by Using Laser Ablation, *JSME Proceedings on Dynamics and Design Conference 2008*, (2008), CD-ROM (No.455).
- (4) 梶原逸朗, 細矢直基, レーザー加振技術を用いた高周波振動計測に基づくヘルスマニタリング, 日本機械学会 第8回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, No.09-56, (2009), pp.90-95.
- (5) 露木健一郎, 片村立太, 三浦悟, 浅沼宏, レーザー超音波によるコンクリート内部欠陥の計測技術, 土木学会第61回年次学術講演会講演論文集, (2006), pp.281-282.
- (6) Shang D., Barkey, M. E., Wang, Y. and Lim T. C., Fatigue Damage and Dynamic Natural Frequency Response of Spot-Welded Joints, *Proceedings on 2003 SAE World Congress*, 2003-01-0695, (2003).
- (7) 田口玄一, 目的機能と基本機能 (11), 認識のためのT法, 品質工学, Vol.13, No.2, (2006).