

自己学習型損傷検出知的構造のための統計的診断手法

岩崎 篤^{*1}, 轟 章^{*2}
島村佳伸^{*2}, 小林英男^{*2}

Statistical Diagnosis for Damage Detection of Self-Learning Smart Structure

Atsushi IWASAKI, Akira TODOROKI,
Yoshinobu SHIMAMURA and Hideo KOBAYASHI

Structural health monitoring is a noticeable technology for aged civil structures. The present paper proposes a new diagnostic tool for the structural health monitoring that employs a statistical diagnosis of self-learning method. Most of the structural health monitoring systems adopt parametric method based on modeling or non-parametric method such as artificial neural networks. The new statistic diagnosis method does not require the complicated modeling and a large number of data for the training of the artificial neural networks.

In the present study, the proposed method is applied to detect pipe deflections due to plastic bending, which simulates disaster damage of gas pipes. Response surfaces among the measured natural frequencies of the pipes are produced at the initial stage and monitoring stages, and the difference of the response surfaces of the monitoring stages from the initial stage is statistically tested using F-test. As a result, the new method successfully diagnoses the damage without using modeling and a large number of data for training.

Key words: Statistical Diagnosis, Damage Development, Health Monitoring,
Response Surface, F-Statistics, Self-Learning

1. 緒言

構造物, 機器に各種センサーを取り付けてその構造機器の健全性を常時検査する構造ヘルスマニタリングシステム⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾は, 近年の建築土木構造物, 化学・原子力プラント機器構造の損傷検知の観点から重要である。また現代の都市システムでは, 地震災害時, 橋梁や配管などのインフラストラクチャーの破壊を瞬時に診断することは災害による被害拡大防止に必要不可欠である。

損傷検出に関する研究としては構造機器をモデル化して解くパラメトリック法, 構造のモデル化が不要なノンパラメトリック法がある。

パラメトリック法としては, 導電コイルのインピーダンス変化電気抵抗変化⁽⁴⁾や局所フレキシビリティ法を用いた複合材料の損傷検知⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 電気ポテンシャル法⁽⁷⁾などがある。パラメトリック法では, パラメータの

変化が直接把握でき, 損傷の物理的な意味を把握し得る利点がある。しかしながら逆問題解析を用いて実構造のモデルを構築し, 実際のセンサ情報を用いて損傷の位置や大きさを推定する必要がある。このためシステム特性と同定すべきパラメータとの関係を熟知した上で構造のモデル化を実施する必要や逆解析の計算コストなどが重要な問題となる。

これらの構造のモデル化が不要なノンパラメトリック法としては, ニューラルネットワークを用いる方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や, 応答曲面法⁽¹¹⁾を用いる方法⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾が提案されている。ノンパラメトリック法の場合, モデル構築やその損傷メカニズムを検討することなしに損傷判定を実施可能である。しかしながらノンパラメトリック法での損傷判定には, 対象構造に対する学習用の多数のセンサー情報と, 損傷のデータ組が必要となる。このセンサー情報と損傷の関係は, 実験的に取得するか, または順解析で実施する必要がある。しかし, 多くのインフラストラクチャーにおいては, 実験は不可能であり, また解析も都市全体に及ぶガス管構造などの場合には実質的にきわめて困難である。このような大型構造物では, 正確な損傷発生位置, 大きさの同定よ

* 原稿受付 2000年5月20日

*1 准員, 東京工業大学大学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

e-mail: aiwasaki@ginza.mes.titech.ac.jp

*2 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科

りもむしろ測定データの差異から観測者が異常を感知して点検するような簡便な構造ヘルスマonitoringの方が適している。しかしそのような人間の直感に類似する自動診断システムは提案されていない。

そこで本論文では、健全状態と現在の構造状態の差異を統計的診断手法を用いて判定することで損傷判定を行う手法の提案を行う。提案する統計的診断法では品質工学で利用されている応答曲面法を用いる。具体的には構造の状態をセンサー情報（ひずみや、固有振動数など）から求め、これらの情報間の応答曲面を作成する。次に損傷有無の検出を、この応答曲面と基準となる応答曲面とをF検定で検定することにより行う。

このようなシステムでは、損傷時のセンサデータや構造のモデル化が不要であるため、構造が無損傷時のデータを自己学習することで損傷の検知が可能であり、このような損傷検出を行う知的構造を本研究では自己学習型損傷検出知的構造と定義する。

本手法の利点としては損傷時のデータが不要であり、また初期状態からの差異判定を実施するため既存構造に対しセンサーを後付することで適用可能であること、人間の直感を模擬した判断を自動的に実行可能なことがあげられる。

本研究では、統計的診断法の実施例として配管の曲げ損傷の検出を行いその有効性を検証する。

2. 統計的診断手法

2.1 応答曲面法 応答曲面法とは品質工学分野におけるプロセス最適化に適用されている手法であり、実験計画 近似関数への回帰、プロセス最適化を含む。応答曲面とは説明変数 x_i と被説明変数 y との関係を表す近似関数である。一般的にその関係は次式で表される。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 ε は誤差である。応答曲面の関数系としては多項式近似する 경우가多く、様々な変数変換を行うことで複雑な関数に近似可能となる。応答曲面法の利点は、最小二乗法を用いているため近似関数の各係数の推定精度を統計的手法により評価できる点と、実験計画の実施により近似精度の高い応答曲面を効率よく作成できる点にある。

2.2 最小二乗法 簡略化のため、次式のように2次多項式近似する場合を考える。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

ここで $x_k x_j = x_{kj}$ と置き換えることで、式(2)は次の線形回帰モデルに変形可能である。

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

上式の回帰係数の推定量 b は最小二乗法を用いて求める。ここで、式(3)の各変数はマトリクス表示すると以下ようになる。

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, \beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix}, \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで n は実験点数 $p=k+1$ は未知係数の個数である。最小二乗法からの推定値 b は次式となる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (6)$$

2.3 応答曲面の係数検定 応答曲面作成の際には、最小二乗法から求められた各回帰係数の有意性検定をおこなう。各回帰係数の有意性はt検定を用いることで判断できる。有意性判定はi番目の回帰係数に対し、その係数が回帰に無効であるという帰無仮説を設定し、仮説検定することにより行われる。仮説はi番目の係数に対し次式で設定される。

$$\beta_i = 0 \quad (7)$$

一般に回帰誤差が平均0、分散 σ^2 の正規分布に従うとの仮定の下での推定値 b を求めると各回帰係数に関するt値はt分布に従うことが知られている。t値は次の式で与えられる。

$$t_i = \frac{b_i}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 / (n-p)}{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}}} \quad (8)$$

t検定においては式(7)の仮説は次式で棄却される。

$$t_i > t_{\alpha/2, n-k-1} \quad (9)$$

この検定を元に、帰無仮説が受け入れられた回帰係数のうちt値が一番小さいものを項自体が不要であると見なして変数を削除する。この操作を不要な係数が存在しなくなるまで繰り返すことにより近似精度の高い応答曲面を導出する。

2.4 F検定による応答曲面同一性の判定 2つの標本のデータ点数をそれぞれ n_1, n_2 とする。応答曲面の自由度を p とし、2つの応答曲面を以下に定義する。

$$\begin{aligned} y_1 &= X_1 \beta_1 + \varepsilon_1 \\ y_2 &= X_2 \beta_2 + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (10)$$

帰無仮説に2つの応答曲面の回帰係数行列が等しいとの仮説を設定する．仮説の定義式を以下に示す．

$$\beta_1 = \beta_2 \quad (11)$$

2つの標本において誤差項は互いに独立であり，同じ分散を持つと仮定する．F検定に用いるF検定値 F_0 は次式で定義される⁽¹⁵⁾．

$$F_0 = \frac{SSE_0 - SSE_{12}}{SSE_{12}} \cdot \frac{n-2p}{p} \quad (12)$$

ここで SSE は残差平方和を示しており，次式で定義される．

$$SSE_i = y_i^T y_i - b_i^T X_i^T y_i \quad (13)$$

ここで添え字の0は全点，12は標本1,2の総和をそれぞれ示している．このF検定値 F_0 は帰無仮説のもとで自由度 $(p, n-2p)$ のF分布に従う．この F_0 は両応答曲面が類似するほど小さい値をとり，異なる度合いが大きいほど大きな値をとる．

本論文ではこの F_0 を有意水準に の場合のF臨界値 $F_{p, n-2p}^\alpha$ で除して標準化したものを W と定義し， W 値の大小で判定を実施する．

$$W = \frac{F_0}{F_{p, n-2p}^\alpha} \quad (14)$$

$W = 1$ の場合，両応答曲面は同等であるとした帰無仮説が棄却される．

2.5 統計的診断システム 本研究では固有振動数から統計的判定を用いて損傷発生を検出するシステムを提案する．センサとしてひずみセンサを構造物に設置し，衝撃荷重を与えて振動ひずみを測定し，測定した振動ひずみから固有振動数を求める．求めたモード1,2,3の固有振動数を $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ とする．

第1ステップの学習モードでは損傷のない値の学習を実施する．この場合の流れを図1に示す．学習モードでは測定のばらつきを考慮して十分な回数の測定を実施する．それぞれの測定において振動ひずみデータから誤差を含む $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ が得られる．

得られた $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ の複数の組み合わせから次式で表されるモード間の応答曲面を作成する．

$$\omega_1 = f(\omega_2, \omega_3) \quad (15)$$

これを基準応答曲面(Standard Response Surface, SRS)と呼ぶ．以上で学習モードを完了する．

次にモニタリングモードを開始する．この場合の流れを図2に示す．モニタリングモードは，設定された間隔ごとの複数回振動ひずみを測定し，複数の固有振動数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ の組を求める．この結果から次式の応答曲面を作成する．

$$\omega_1 = f'(\omega_2, \omega_3) \quad (16)$$

これを測定応答曲面(Monitored Response Surface, MRS)

と呼ぶ．

損傷の判定は次に次式の仮説検定を実施する事により行う．

$$f = f' \quad (17)$$

この仮説が棄却されると，固有振動数間の関係式の同等性が成立しなくなったことを意味し，損傷発生が推察される．実際には複数回の測定により，損傷発生が再確認される．

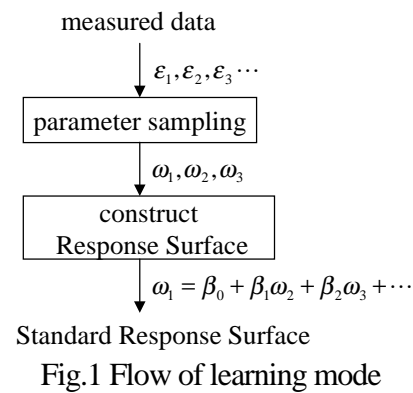


Fig.1 Flow of learning mode

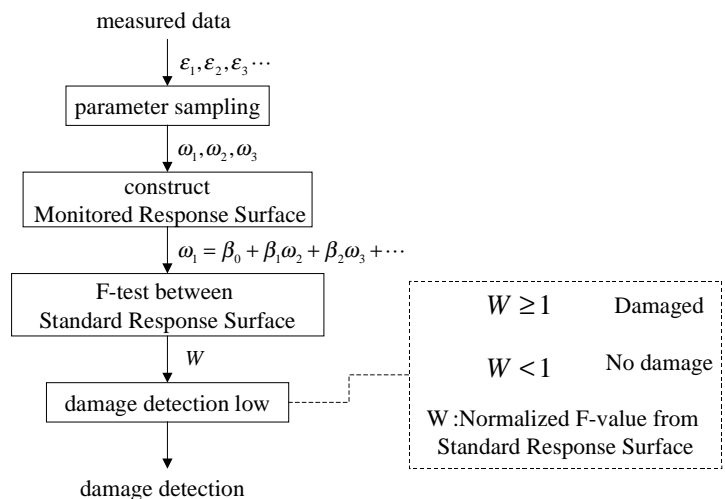


Fig.2 Flow of monitoring mode

3. パイプ曲げ損傷検出システムへの適用

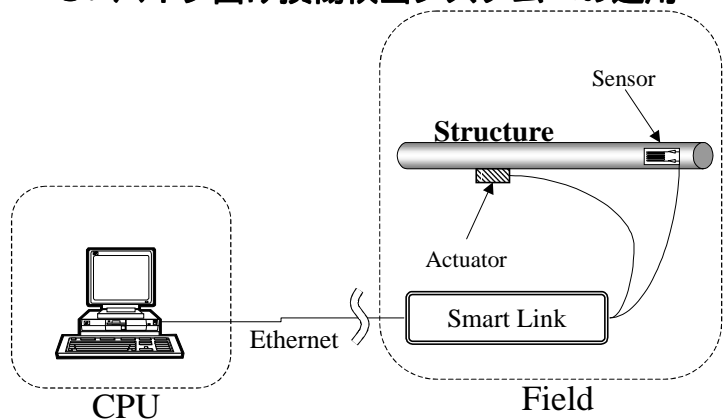


Fig.3 System configuration

3.1 構成システム 本研究で提案する自己学習型損傷検出システムをパイプに適用した知的構造システム構成例を図3に示す．固有振動数測定用センサとしては，パイプにひずみゲージを取り付ける．ひずみゲージからのデータ取得にはひずみアンプとA/D変

換と CPU, メモリ, Ethernet 送受信装置を具備してペンケースサイズに小型化した東陽テクニカ製 SmartLink KNM-BRG11 を用いる。SmartLink は 10BaseT を介して PC に接続され, PC 側では Ethernet を通じて転送された振動ひずみデータを受信し, FFT 処理および学習と統計的診断を行う。

また, SmartLink はデータ転送にデジタルデータ転送プロトコルである Ethernet と UDP/IP を利用した小型装置である。そのため, 従来型センサーをインターネット用の市販ケーブルを用いて容易に分布型センサーとして利用可能となる。

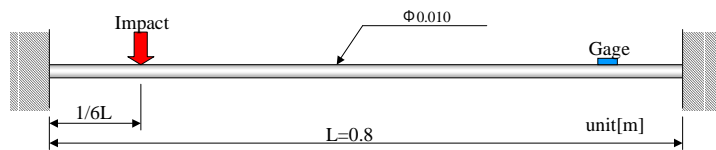


Fig.4 Specimen configuration

3.2 実験装置 本研究の自己学習型損傷検出知的構造の検証を目的として, 簡単な両端固定パイプの塑性曲げ変形を損傷として固有振動数変化で検出する。試験片形状を図 4 に示す。市販の外径 10mm, 内径 8 mm, 長さ 800mm のアルミニウム合金製パイプの両端をバイスで固定し, 固定端部から 20mm の位置にゲージ長 2 mm のひずみゲージを貼り付けた。パイプの加振は, ひずみゲージ貼り付け端部と逆側端部から 130mm の位置にハンマーで衝撃横荷重を与えた。ひずみデータ取得には前述の SmartLink を用いた。振動ひずみ測定データ間隔は 1 ms でデータ数は 8192 点とした。本来は SmartLink のデジタル I/O を利用した遠隔操作での加振機駆動が利用可能であるが, 本研究では簡便のため, 手でハンマーを利用してパイプに衝撃荷重を負荷した。

塑性曲げ損傷は, 両端固定をはずした後に 3 点曲げ試験で実施した。曲げ試験後の残留変形を地震後のパイプ塑性曲げ損傷を模擬しているとして, 残留変形角度を測定した。角度の定義は図 5 に示すとおりである。曲げ試験は損傷位置が, $d/L=0.5$, $d/L=0.375$ の 2 パターンで実施した。損傷角は, $d/L=0.5$ の場合 $=1.5, 3.3, 3.9, 5.4$ [deg] の 4 通りで, $d/L=0.375$ の場合 $=0.72, 1.2, 2.6, 4.5, 4.9, 6.2$ [deg] の 6 通りで実施した。

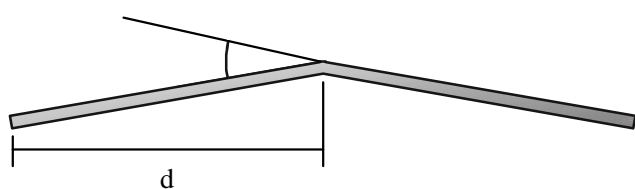


Fig.5 Definition of damage location

3.3 学習モード 本研究では, パイプの曲げ振動の 1 次, 2 次, 3 次モードを利用する。固有振動数間の応答曲面作成のため, 学習モードでは衝撃荷重負荷時のひずみ測定を 28 回実施した。

基準応答曲面の被説明変数 (応答) は 1 次モードの曲げ固有振動数 ω_1 であり, 説明変数は 2 次モードと 3 次モードの曲げ固有振動数 ω_2, ω_3 である。応答曲面は簡単のため, 次の 2 次多項式を用いた。

$$\omega_1 = \beta_0 + \beta_1\omega_2 + \beta_2\omega_3 + \beta_3\omega_2^2 + \beta_4\omega_2\omega_3 + \beta_5\omega_3^3 \quad (18)$$

3.4 損傷モニタリングモード 損傷モニタリングモードでは, 本来は設定された間隔ごとに加振機を遠隔駆動して固有振動数を測定する。本研究では簡単のため手でハンマーを使用して衝撃荷重を負荷する。28 回の衝撃荷重を負荷して 28 組の固有振動数の組を取得し, 式 (18) に示すように ω_1 を被説明変数, ω_2 と ω_3 を説明変数とする応答曲面を作成する。この新たに作成された測定応答曲面と先に学習モードで作成した基準応答曲面の同等性を前述の F 検定で判定することによって固有振動数の変化の有無を判定する。

4. 実験結果と考察

4.1 学習モード 学習モードでは, 差異検出の基準となる基準応答曲面を作成する。損傷前の衝撃応答から得られた周波数分布スペクトルの一例を図 6 に示す。応答曲面は 28 回の測定から求めた 28 組の ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$) を用いて回帰される。

一例を以下に示す。

$$\omega_1 = -1.03 \times 10^4 + 1.01 \times 10^2 \omega_2 - 6.67 \omega_3 - 0.482 \omega_2^2 + 0.275 \omega_2 \omega_3 + 0.0629 \omega_3^2 \quad (19)$$

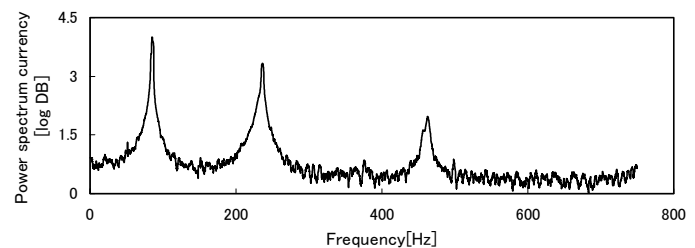


Fig.6 Power spectrum of no damaged pipe

4.2 無損傷時のモニタリングモード 無損傷時の基準応答曲面の同等性を確認する目的で, 別の 28 回の測定を実施し, 測定応答曲面を求めた。これを以下に示す。

$$\omega_1 = -4.98 \times 10^3 + 2.53 \times 10^2 \omega_2 - 1.07 \omega_3 - 0.545 \omega_2 \omega_3 + 0.255 \omega_3^2 \quad (20)$$

また, 各応答曲面の係数の t 検定値, 自由度調整済み

決定係数 R_{ad}^2 を表 1 に示す。

Table 1 t-test value of coefficient of response surface

	R2adjust	t-test Value				
		ω_2	ω_3	ω_2^2	$\omega_2\omega_3$	ω_3^2
SRS	0.916	3	-1.21	-3.81	2.26	-1.15
MRS	0.838	3.72	-2.48	-	-3.71	3.19

この例のように両者ともに損傷なしの場合でも、基準応答曲面自体は必ずしも同一ではない。無損傷時、式(19)と測定応答曲面の検定値 $W=0.199 < 1$ であり、同等性は成立し、損傷は否定される。

4.3 損傷時モニタリングモード 損傷後の測定例としてパイプ中心部に 1.5 の残留曲げ変形の損傷を与えた場合の結果を以下に示す。

損傷前と後の 28 回の実測時の固有振動数分布を図 7,8 に示す。図 7 において横軸は ω_1 、縦軸は ω_2 、図 8 において横軸は ω_1 、縦軸は ω_3 である。測定応答曲面を次式に示す。また測定応答曲面の係数の t 検定値、自由度調整済み決定係数を表 2 に示す。

$$\omega_1 = -4.19 \times 10^4 + 1.06 \times 10^2 \omega_2 + 1.27 \omega_3 - 0.229 \omega_2 \omega_3 - 0.0775 \omega_3^2 \quad (21)$$

Table 2 t-test value of coefficient of Monitored Response Surface

	R2adjust	t-test Value				
		ω_2	ω_3	ω_2^2	$\omega_2\omega_3$	ω_3^2
Damaged	0.750	-2.62	1.32	-	-1.32	-1.02

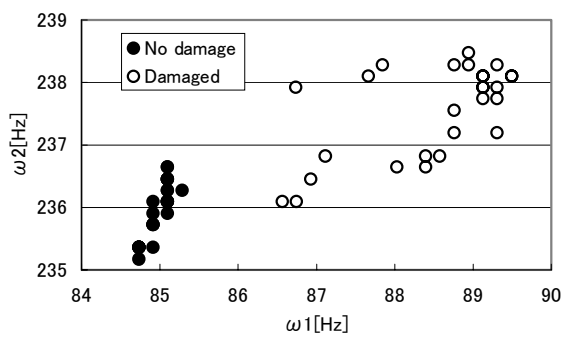


Fig.7 Mode1,2 frequency of damaged, no damaged pipe

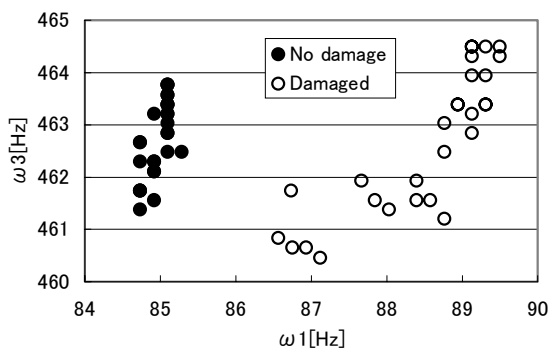


Fig.8 Mode1,3 frequency of damaged and no damaged pipe

この場合の検定値 W は $W=6.78$ となり、 $W > 1$ が成立し、測定応答曲面が基準応答曲面と異なることが判定され、すなわち損傷発生が判定される。

以上のように、無損傷状態から作成された測定応答曲面を比較した場合には同等性が成立し、異なる損傷状態から作成された測定応答曲面を比較した場合には同等性が棄却され、損傷の発生が検出可能であることが確認される。

4.4 損傷診断結果 様々な損傷状態で損傷診断を実施した。損傷診断結果を図 9 に示す。損傷位置、損傷角は、3.2 と同様である。

図 9 は横軸は検定値 W を 6 つの範囲に水準化した値であり、縦軸はおのこの W 値水準を有する測定応答曲面の分布比を示している。ただし、白棒は無損傷時の 14 回の測定応答曲面の W 値分布であり、黒棒は損傷時の 93 点の測定応答曲面の W 値分布を示している。図に示すように、無損傷の場合に検定値 W は必ず 1 以下である。また、損傷があるにもかかわらず、 W が 1 より小さい場合はわずか 4.3% である。以上から本論文の損傷診断手法が、損傷検出に対し有効であることが確認された。

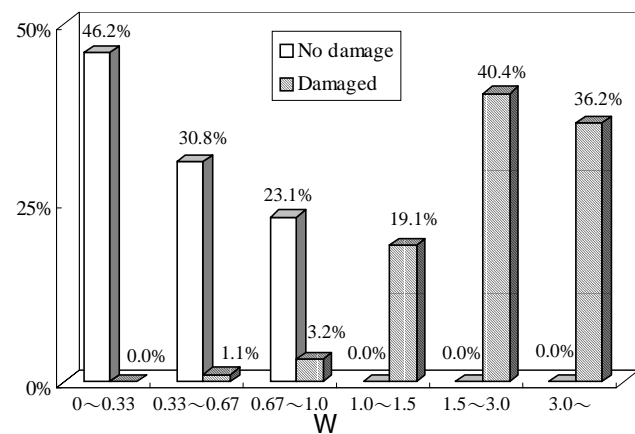


Fig.9 Damage detection result of damaged, no damaged pipe

4.5 判定精度の向上 判定精度向上を目的として、先の 4.3% の誤判定部に関して考察する。一例として先に損傷後に無損傷と誤判定された $d/L=0.5$, $=3.3, 3.9$ [deg] の場合について固有振動数分布の一例を図 10,11 に示す。図 10,11 から、固有振動数に明確な差はない。このように損傷自体が小さく、固有振動数自体の変化量が小さい場合、統計的差異判定が困難になる。そこでこの損傷状態のパイプに対し複数回損傷診断を試みた。得られた W 値を表 3 に示す。試行は 2 回行い、おのこのから得られたデータ群をおのこの DataA, DataB としている。一方では損傷を正しく検出できているが、一方では検出に失敗した。そこで、両

者のデータをあわせ 56 点のデータから応答曲面を作成し、診断を試みた。この場合の W 値も併せて表 3 に示す。表中の \bigcirc は損傷が判定された場合、 \bullet は損傷が判定されなかった場合を示す。表 3 から 56 点の測定データで W 値が 1 を越えており、正しく損傷が判定されていることがわかる。このように、取得するデータ点数を増やすことにより、判定精度の向上を図ることが可能である。

Table 3 W-values of damage detection

	Data A	Data B
MRS from 28Data	\bigcirc 1.16	\bullet 0.55
MRS from 56Data	\bigcirc 1.46	

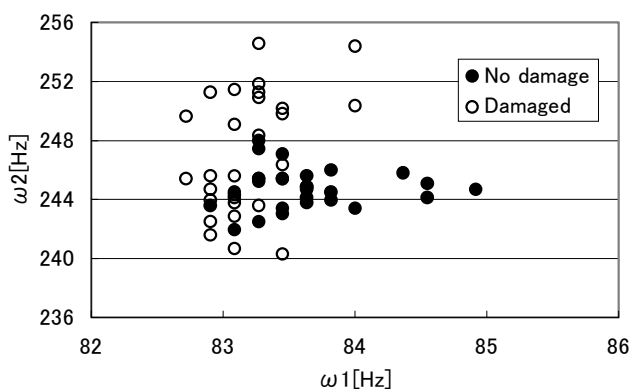


Fig.10 Mode1,2 frequency

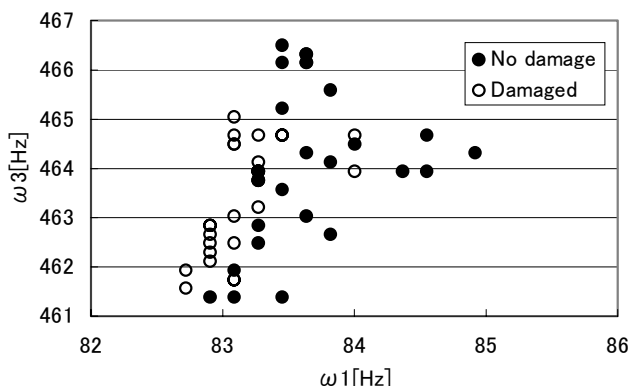


Fig.11 Mode1,3 frequency

5. 結言

F 検定を利用した応答曲面の差異判定を実施することで損傷時のデータなしでノンパラメトリックに損傷診断を行う手法の提案を行った。また、固有振動数をパラメータとした配管の曲げ損傷検出を検証することで、その有効性を実験的に実証した。その結果、得られた結論は以下になる。

- (1) 応答曲面と F 分布を用いて統計的診断手法による差異判定を行うことにより、損傷時のデータ無しで構造の損傷判定が行えることを示した。
- (2) 固有振動数に対し微小な変化しか引き起こさない損傷に対しても、測定データ数を増加させて損傷診断をすることにより高い精度の損傷判定が可能

であることを示した。

参考文献

- (1) A.E.Aktan, 他 2 名, Smart Mater. Structure, 7(1998), 674-692
- (2) J.P.Darryii, A.L.Philip, Smart Mater. Structure, 7(1998), 627-636
- (3) R.L.Idriss, 他 3 名, Smart Mater. Structure, 7(1998), 209-216
- (4) 小島, 岡本, 大野, 機論, C-63, 612(1997)
- (5) 邊, 山口, 福田, 青木, K.C.Park, 機論, A-66,644(2000-4)
- (6) K.C.Park and C.A.Felippa, J of Applied Mechanics, 65-1(1998), pp242-249.
- (7) 大路, 久保, 阪上, 機論, A-51, 467(1985)
- (8) 邊, 西, 黄, 藤川, 機論, A-62, 602(1996-10)
- (9) 朝倉, 他 2 名, 機論, C-62, 596(1996)
- (10) A.C.Okafor, K.Chandrashekhara, Y.P.Jiang, Smart Mater. Structure, 5(1996),338-347
- (11) R.H.Myers, D.C.Montgomery "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons. Inc., (1995)
- (12) 稲田, 島村, 轟, 小林, 中村, 機論, A-65, 632(1999)
- (13) 田中, 轟, 島村, 機論, A-65, 640(1999)
- (14) C.H.Keilers Jr, FUKUO CHANG, J of intelligent materials systems and structures, vol.6, (1995), 664-672
- (15) 佐和隆光, "回帰分析", (1979)朝倉出版