

卒業論文

励振応答解析による

自動損傷評価スマートストラクチャの開発

1～37 ページ完

平成 17 年 2 月 4 日提出

指導教員 酒井信介教授

30229 安田健一

目次

第 1 章	序論	5
1.1	研究背景	5
1.2	構造ヘルスマニタリングの損傷診断に関する過去の研究	7
1.3	本研究の目的	8
1.4	本論文の構成	9
第 2 章	基礎理論	10
2.1	緒言	10
2.2	統計的無学習損傷検知法	11
2.2.1	緒言	11
2.2.2	統計的無学習損傷検知法の手順	11
2.3	統計に関する基礎理論	12
2.3.1	応答曲面法	12
2.3.2	最小二乗法	13
2.3.3	応答曲面の係数検定	13
2.3.4	F 検定による応答曲面同一性の判定	14
2.3.4a	F 検定	14
2.3.4b	仮説棄却領域	15
2.3.5	F 分布	15
2.3.5a	緒言	15
2.3.5b	χ^2 分布	16
2.3.5c	F 分布	16
2.3.5d	中心極限定理	16
第 3 章	励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステム	18
3.1	緒言	18

3.2	励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステム	19
第4章	励振応答解析実験	20
4.1	緒言	20
4.2	実験手順	21
4.2.1	実験装置	21
4.2.2	実験手順	22
4.2.3	応答曲面	22
4.3	実験結果	27
4.4	考察	28
4.4.1	F分布	28
4.4.2	閾値決定方法	29
4.4.2a	おもりなし(変化なし)のときの分布	29
4.4.2b	おもり 1g のときの分布	29
4.4.2c	閾値の決定	30
4.4.3	閾値の有効性の検証	31
第5章	結論	34
	参考文献	35

図目次

Fig2.1	統計的無学習損傷検知法	12
Fig3.1	自己励振スマートストラクチャ概念図	19
Fig4.1	実験装置	21
Fig4.2	試験片形状	21
Fig4.3	自己回帰モデル概念図	23
Fig4.4(a)	おもりなしの出力波形図	24
Fig4.4(b)	1g の出力波形図	24
Fig4.4(c)	2g の出力波形図	25
Fig4.4(d)	5g の出力波形図	25
Fig4.4(e)	10g の出力波形図	26
Fig4.5	F 検定結果	27
Fig4.6	F の実現値の度数分布と理論分布	28
Fig4.7	F 検定 1 回のときの確率分布	32
Fig4.8	平均 F_0 の確率分布(8 回平均)	32
Fig4.9	平均回数毎の診断精度	33

表目次

Table4.1	診断精度	33
----------	------	----

第1章

序論

1.1 研究背景

近年、機器・構造物に各種センサを取り付け、その機器・構造物全体の状態を常時診断する知的構造ヘルスマニタリング技術⁽¹⁾が様々な分野で注目されてきている。特に構造健全保証の分野においてはトンネル内のコンクリート剥離事故や、首都高速道路の老朽化に見られるように、高度経済成長期に建設された様々な大型構造物が次々設計寿命を迎えており、稼働中のインフラストラクチャの破壊を常時診断することが重大事故防止の観点からも必要不可欠であり、知的ヘルスマニタリング手法の構造への適用が重要となってきた。しかしながらこれらの大型構造物の損傷診断は目視点検などの現場点検に依存しており、多大なコストを要求する上に迅速な損傷報告は困難なのが現状である。そのためこれら構造物の損傷をリアルタイムで自動的に診断するための手法の開発が必要とされている。

一般的な損傷診断手法としては、構造機器をモデル化しシステムの特徴を表すパラメータの変化から損傷を診断するパラメトリック法、ニューラルネットワークなどを用いることで構造の出力から逆問題で損傷を診断するノンパラメトリック法がある。パラメトリック法は損傷に関する詳細な知見が得られる反面、あらかじめ構造・損傷の正確なモデルが必要であり、対象となる構造物に対する詳細な知見、材料・損傷に関する専門的知識が必須である。一方ノンパラメトリック法では、学習用に多数の損傷とセンサデータの測定結果が必要であるが、事前の詳細な検討は不要である。このため一般には損傷がセンサ出力に及ぼす影響が複雑な場合ではノンパラメトリック法が採用される。

しかしながら、ニューラルネットワーク等を用いたノンパラメトリック法で

は、適切な逆解析モデルの設定や過剰学習に至らない最適な試行錯誤が必要であり、これらの作業には多大なコストがかかる。そのため逆解析モデルの評価が簡便かつ繰り返し学習が不要な最適化手法が望まれている。

また、高速道路や橋梁等、既存の構造物の損傷診断を行う場合、構造物は各々が固有の特性を持っており、また複雑なシステムであることから数理モデル化が非常に困難である。さらに破壊的実験を行うことができないため、損傷時の情報を必要とする損傷診断法を適用するのはほとんど不可能である。そのため、既存構造に適用可能かつ簡便な損傷診断法が強く求められている。

1.2 構造ヘルスマニタリングの損傷診断に関する過去の研究

ヘルスマニタリングという言葉は医療分野で用いられており、患者の状態を常時診断することを表す言葉である。これから転じて、構造物に各種センサを取り付け、構造の損傷有無を診断し、その健全性を常時診断するということが構造ヘルスマニタリングと呼んでいる。

現在構造ヘルスマニタリングに関する研究は、主にデータ収集に関する研究と、データ処理による損傷診断手法の研究の二つに大別される。データ収集に関する研究としては、構造に取り付けられたセンサを用いて構造の現在の状態を取得する研究として、橋梁や、大型構造物モニタリングのシステム構築に関する研究^(2,3)、測定データのイーサネットによる転送に関する研究⁽⁴⁻⁸⁾など実機のヘルスマニタリングを行った数多くの研究が行われている。これらの研究は、構造に取り付けられたセンサからリアルタイムにデータを取得し、構造の損傷状態が変化することにより測定データが変化することを示している。また、センシングと同時に構造の制御を行う手法として、ピエゾ素子⁽⁹⁾を用いた構造ヘルスマニタリングに関する研究^(10,11)も行われている。また通常データ転送に用いられる光ファイバをセンサとすることで一本でデータ測定・転送を行うことが可能なレーザドップラセンサ(LDV)⁽¹²⁾、ブラグ格子センサ(FBG)⁽¹³⁾、BOTDR⁽¹⁴⁾を用いた構造ヘルスマニタリングの研究⁽¹⁵⁻²¹⁾が行われている。これらの研究により、損傷の発生による構造のひずみ・温度等の状態量変化を遠隔地から簡便に測定することが可能なことが明らかにされ、これらの手法を用いることで、遠隔地から構造状態を常時測定できることが示されている。

1.3 本研究の目的

1.1節で述べたように、構造ヘルスマモニタリングにおける損傷同定手法では、学習データとして損傷時の構造の出力が必須であるが、既存の建築構造物への構造ヘルスマモニタリング適用の際には、破壊的実験が不可能であることから、解析または非破壊的実験のみから損傷を診断するシステムが必要となる。現在このような研究は、構造を数理モデル化し解析的検討を行うことによりなされている。しかしながら、実際には構造はそれぞれ固有の形状・損傷状態を持っているため、各々の構造物ごとにモデル化が必要であり、また各々の構造物は様々な部材が複雑に組み合わされて構築されているため、モデル化は非常に困難である。そのため都市構造物の構造ヘルスマモニタリング実用化のためには、破壊的実験・個々の構造のモデル化を必要としない簡便な損傷診断法が必須となる。

そこで本研究では、構造物にセンサとアクチュエータを取り付け、PCからアクチュエータに信号を送り構造を励振させ、センサからの出力データをPCに取り込み、正常時の測定データと現在の測定データのみから統計データ解析手法を用いて損傷検知を行うシステムの構築を目的とする。励振応答解析を用いる利点としては、構造物に対してセンサとアクチュエータを取り付けるだけで、あとはコンピュータにより自動的に励振、計測、診断を行うことができることから、既存の構造物に対して後付けで適用可能であり、自動的な常時モニタリングが可能になる点である。今回システムの中核をなす損傷検知法(2.2で述べる)の有効性を検証するため、アルミ片持ち梁を対象としたシステムを作り、励振応答解析実験を行って自動損傷診断を試みた。

1.4 本論文の構成

本論文は構造物にセンサとアクチュエータを取り付け、PC からアクチュエータに信号を送り構造を励振させ、センサからの出力データを PC に取り込み、正常時の測定データと現在の測定データのみから統計データ解析手法を用いて損傷検知を行うシステムの構築を目的とし、システムの中核をなす損傷検知法の有効性を検証するため実験を行ったものであり、以下の五章からなる。

第 1 章「序論」では、研究の背景、構造ヘルスマモニタリングに関する過去の研究について述べ、従来手法における問題点を明らかにし、本研究における目的を示した。

第 2 章「基礎理論」では、本研究で用いる損傷検知手法に関する基礎理論について述べる。

第 3 章「励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステム」では、本研究で構築を目的とするシステムについて述べる。

第 4 章「励振応答解析実験」では、アルミ片持ち梁を対象とした励振応答解析実験から、システムの中核となる損傷検知手法の有効性を示す。

第 5 章「結論」では、本論文の研究結果の総括を述べる。

第2章

基礎理論

2.1 緒言

本章では、本研究で用いる統計的損傷検知手法に関する基礎理論について述べる。

2.2 統計的無学習損傷検知法

2.2.1 緒言

本研究では、損傷検知手法として図 2.1 に示す統計的無学習損傷検知法を用いる。次項でこの手法の概要について説明する。

2.2.2 統計的無学習損傷検知法の手順

まず構造物にセンサ、アクチュエータを設置して初期状態での自動励振(図 2.1 中)、計測(同)を振動パラメータを徐々に変えて繰り返し行い(同)、集めたデータから応答曲面法を用いて正常時の応答曲面(基準応答曲面)を作成する(同)。以上で正常時学習は終了である。

続いて診断時に同様の手順で応答曲面を作成して、基準応答曲面との比較を F 検定という同等性検定を用いて行う。検定の結果、同等であると判定したとき損傷・異常なしと診断し、同等でないとき損傷・異常が発生したと診断する。今回用いる手法では、応答曲面の変化から、何らかの構造の変化が起きたことを検知するので、異常 = 損傷という認識で損傷検知を行う。詳しい理論については次節で述べる。

この手法の利点は、構造の初期状態のデータと現在のデータのみから損傷診断を行うことができるため、既存の構造物に対して後付けで適用可能であるという点、また構造物にセンサとアクチュエータを取り付けるだけで、あとはコンピュータにより自動的に励振、計測、診断を行うことができ、自動的なモニタリングが可能であるという点である。

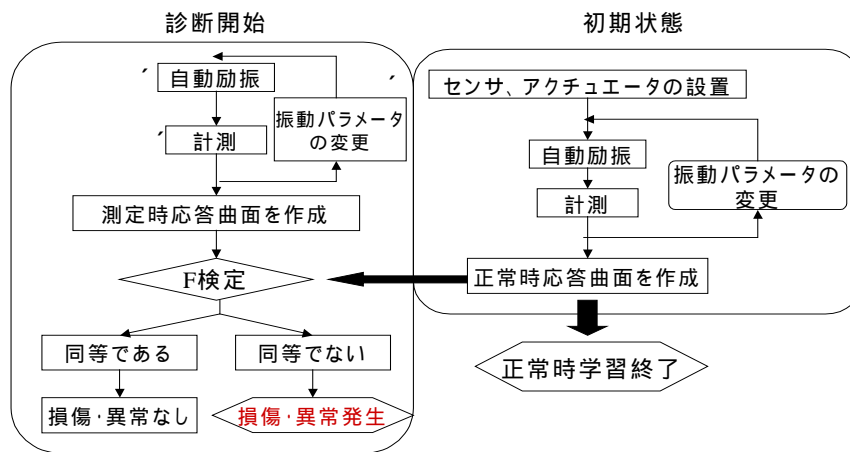


Fig2.1 統計的無学習損傷検知手法

2.3 統計に関する基礎理論

2.3.1 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

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (2-1)$$

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に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。

2.3.2 最小二乗法

簡略化のため、次式のように二次多項式近似する場合を考える。

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

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

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2-3)$$

上式の回帰係数 β の推定量 b は最小二乗法を用いて求める。ここで、式(2-3)の各変数はマトリクス表示すると以下のようなになる。

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, \beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{p-1} \end{Bmatrix}, \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad (2-4)$$

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

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

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2-6)$$

2.3.3 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行う。各回帰係数の有意性は t 検定を用いる。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。

$$\beta_i = 0 \quad (2-7)$$

一般に回帰誤差 ε が平均0、分散 σ^2 の正規分布に従うものと仮定して β 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。

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

t 検定においては式(2-7)の仮説は次式で棄却される。

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

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。

2.3.4 F 検定による応答曲面同一性の判定

2.3.4a F 検定

二つの標本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、二つの応答曲面を以下に定義する。

$$\begin{aligned} y_1 &= X_1 \beta_1 + \varepsilon_1 \\ y_2 &= X_2 \beta_2 + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (2-10)$$

帰無仮説に二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。

$$\beta_1 = \beta_2 \quad (2-11)$$

二つの標本において誤差項 ε は互いに独立であり、同じ分布を持つと仮定する。

F 検定に用いる F 検定値 F_0 は次式で定義される。

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

ここで SSE は残差平方和を示しており、次式で定義される。

$$SSE_i = y_i^T y_i - b_i^T X_i^T y_i \quad (2-13)$$

ここで添え字 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_0 を F の実現値と呼び、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。

2.3.4b 仮説棄却領域

二つの等しい回帰式の同等性検定による F の実現値 F_0 は一般に回帰式の自由度 p と 2 応答曲面のデータ総数 n に依存する F 分布 $F(p, n-2p)$ に従う。このため 2 回帰式の同等性は、有意水準を定め、式(2-11)に示される同等性仮説の棄却領域を設定することで、検定することが可能である。次式に有意水準を α とした場合の同等性仮説の棄却領域を示す。

$$F_0 > F^\alpha \quad (2-14)$$

したがって、二つの応答曲面の同等性検定を行う場合、2 応答曲面から式(2-12)に従い求めた F_0 が F^α を越えた場合に同等性が棄却されると考えられる。この場合、応答曲面同等性の棄却領域は有意水準、応答曲面モデルのみから決定可能である。

2.3.5 F 分布

2.3.5a 緒言

F の実現値 F_0 が従う F 分布⁽²²⁾ について述べるために、まず χ^2 分布について述べる。次に F 分布について述べ、さらに中心極限定理を説明して F 分布の平均を取っていくと分布は正規分布に近づいていくことを示す。

2.3.5b χ^2 分布

Z_1, Z_2, \dots, Z_n を互いに独立な標準正規確率変数とする。このとき、

$$X = Z_1^2 + Z_2^2 + \dots + Z_n^2 \quad (2-15)$$

によって定められる確率変数 X を自由度 n の χ^2 確率変数とよび、 $\chi^2(n)$ で表す。

$\chi^2(n)$ の確率分布を自由度 n の χ^2 分布とよぶ。 χ^2 分布は次の性質を持つ。

$$E[\chi^2(n)] = n \quad (2-16)$$

$$\sigma^2[\chi^2(n)] = 2n \quad (2-17)$$

2.3.5c F 分布

$\chi^2(n)$ 、 $\chi^2(m)$ をそれぞれ自由度 n および m の χ^2 確率変数とする。 $\chi^2(n)$ と $\chi^2(m)$ は独立であるとして、

$$F = \frac{\frac{\chi^2(n)}{n}}{\frac{\chi^2(m)}{m}} \quad (2-18)$$

によって定められる確率変数 F を自由度 $\phi_1 = n, \phi_2 = m$ の F 確率変数とよび、 $F(n, m)$ と表す。 $F(n, m)$ の確率分布を自由度 $\phi_1 = n, \phi_2 = m$ の F 分布とよぶ。

F 分布は次の性質を持つ。

$$E(F) = \frac{m}{m-2} \quad (m > 2) \quad (2-19)$$

$$\sigma^2(F) = \frac{2m^2(n+m-2)}{n(m-2)^2(m-4)} \quad (m > 4) \quad (2-20)$$

2.3.5d 中心極限定理⁽²³⁾

等しい確率分布を持ち、相互に独立である n 個の確率変数を X_1, X_2, \dots, X_n とする。これらの確率変数は、いずれも等しい期待値と分散を持つことから、

$$E(X_i) = \mu \quad (2-21)$$

$$\sigma^2(X_i) = \sigma^2 \quad (2-22)$$

とする。ただし、 $i=1,2,\dots,n$, $\sigma^2 \neq 0$ とする。いま、

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) \quad (2-23)$$

とすれば、

$$E(\bar{X}) = \mu \quad (2-29)$$

$$\sigma^2(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2-30)$$

であるから、 \bar{X} を標準化すると次式のようになる。

$$Z_n = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (2-31)$$

このとき、次の関係が成り立つ。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(Z_n \leq z) = \Phi(z) \quad (2-32)$$

ただし、

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (2-33)$$

(2-32)式は中心極限定理とよばれ、 X_1, X_2, \dots, X_n が共通な確率分布を持つ限り、どんな形の分布であっても成り立つ。 $\Phi(z)$ は標準正規分布関数である。したがって、どんな形の分布であってもその平均を取っていくと、もとの平均値 μ を中心とした左右対称の正規分布に近づくことがわかり、F分布についても成り立つ。

第3章

励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステム

3.1 緒言

スマートストラクチャとは、構造物にセンサとアクチュエータを取り付け、その健全性を自動的に診断するものを表す言葉である。今回構築する、励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステムについて次節で述べる。

3.2 励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステム

今回構築するシステムは、構造物にセンサとアクチュエータを取り付けて、PCからアクチュエータに信号を送り構造物を励振させ、センサの出力データをPCに取り込み、第二章で述べた統計的無学習損傷検知法を用いて損傷診断を行うスマートストラクチャシステムである。概略図を図3.1に示す。この励振応答解析手法を用いる利点としては、構造物に対してセンサとアクチュエータを取り付けるだけで、あとはコンピュータにより自動的に励振、計測、診断を行うことができることから、既存の構造物に対して後付けで適用可能であり、自動的な常時モニタリングが可能になる点である。また、損傷診断法にF検定を用いる利点としては、F検定値 F_0 が確率分布に従うことから、無損傷時とごく微小な構造の変化を与えたときの F_0 の確率分布から損傷無損傷の閾値を設定することができるという点である。具体的には次章で述べる。

今回この励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステムの構築に向け、システムの中核をなす損傷検知法(2.2 参照)の有効性を検証するため、次章に示すアルミ片持ち梁を対象としたシステムを作り、励振応答解析実験を行った。

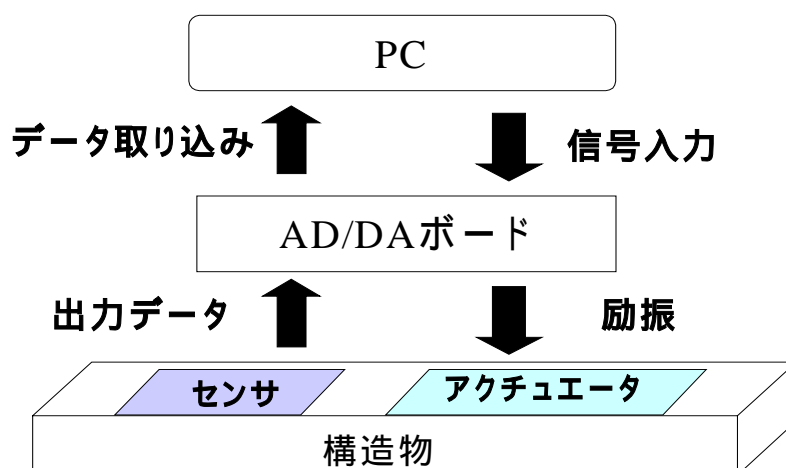


Fig3.1 自己励振スマートストラクチャ概念図

第 4 章

励振応答解析実験

4 . 1 緒言

本研究では、第三章で述べた励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステムの実現に向け、システムの中核をなす損傷検知法(2.2 参照)の有効性を検証するため、アルミ片持ち梁を対象としたシステムを作り、 piezoアクチュエータによる強制励振の応答計測から提案手法を用いて自動損傷診断を試みた。以下に実験手順、結果を示し、また結果の考察で検定値 F_0 の閾値設定を行い、損傷検知が可能であることを示す。

4.2 実験手順

4.2.1 実験装置

アルミ片持ち梁励振実験装置を図 4.1、試験片形状を図 4.2 に示す。センサとしてひずみゲージ、アクチュエータとして piezo アクチュエータを用いた。

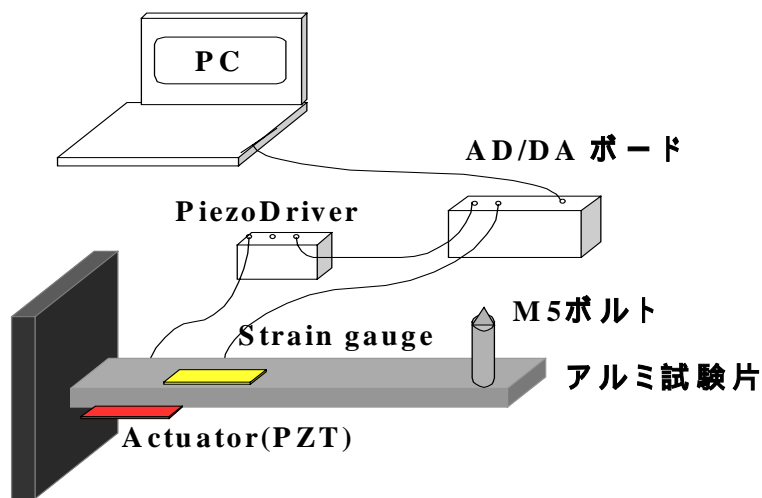


Fig 4.1 実験装置

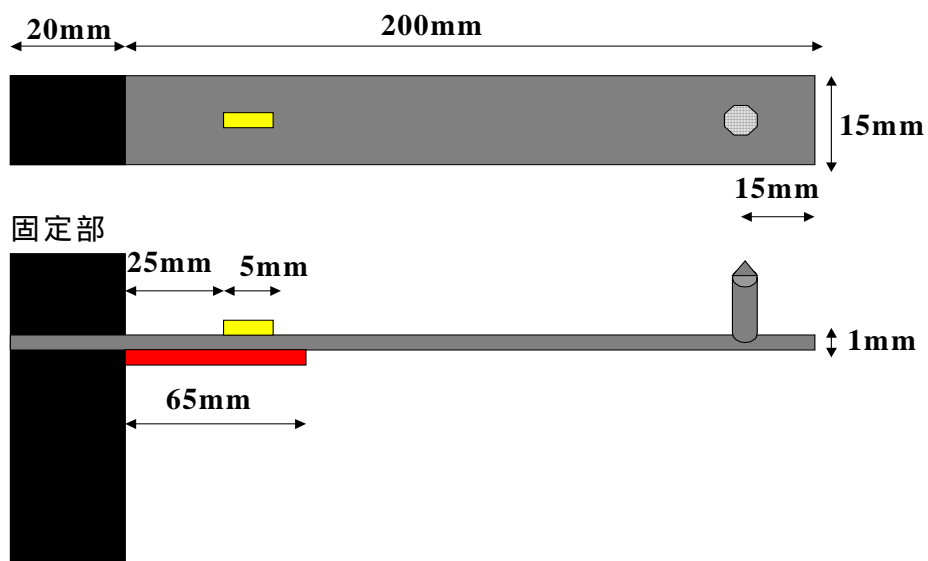


Fig 4.2 試験片形状

4.2.2 実験手順

実験では、50Hzの正弦波をAD/DAコンバータにより発生させ、ピエゾドライバーを介してピエゾアクチュエータに送り、梁を励振させる。そしてひずみゲージからの出力をひずみアンプ、AD/DAコンバータを介してPCに取り込み、そのデータから損傷検知を行った。AD/DAコンバータにはNATIONAL INSTRUMENTS NI6036E、ピエゾドライバーにはMESS-TEK M-2655、ピエゾアクチュエータには富士セラミックス C-82を用いた。また、計測はLabVIEW(NATIONAL INSTRUMENTS社ソフトウェア)にて行い、PC内の自動計測システムを同ソフトウェアで構築している。

梁に損傷・異常を与える方法として、梁先端付近に取り付けたM5ボルトにM5ナット(1g)を乗せていくことでおもり代わりとし、梁の状態に変化を与え、実験を行っている。

4.2.3 応答曲面

今回の実験では、被説明変数として励振開始後 t 秒時におけるひずみゲージ出力 $x(t)$ を、説明変数としてその直前の励振開始後 $t-0.009 \sim t-0.001$ 秒時のひずみゲージ出力 $x(t-0.009), x(t-0.008), \dots, x(t-0.001)$ を用いて応答曲面を作った(図4.3)。次式のように表される。

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-0.001) \\ \vdots \\ x(t-0.091) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t-0.001) & x(t-0.002) & \dots & x(t-0.009) \\ x(t-0.002) & & & x(t-0.01) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ x(t-0.092) & \dots & \dots & x(t-0.1) \end{bmatrix} \beta + \varepsilon \quad (4-1)$$

これは単一センサの時系列データを利用しており、自己回帰モデル(ARモデル)と呼ばれる。この自己回帰モデルを用いる利点は、単一センサのみで診断が行えるという点である。

この応答曲面をおもりなし、1g、2g、5g、10g乗せたときのデータ(図4.4)からそれぞれ作り、おもりなしのときの応答曲面を基準応答曲面としてF検定を行った。この操作を20回繰り返し、それぞれの状態について20個のFの実現値 F_0 を求めた。

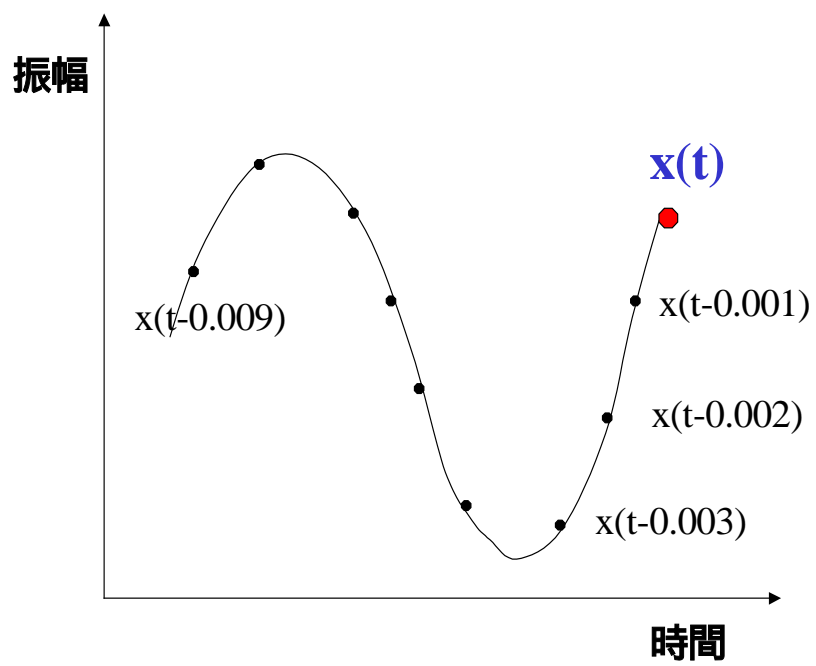


Fig 4.3 自己回帰モデル概念図

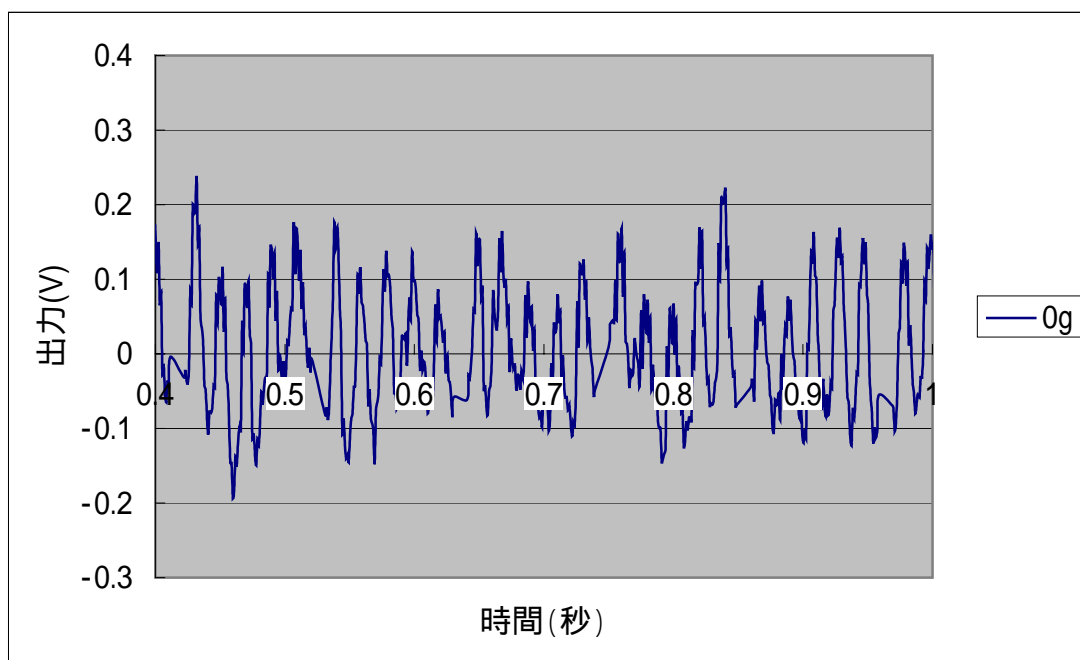


Fig 4.4(a) おもりなしの出力波形図

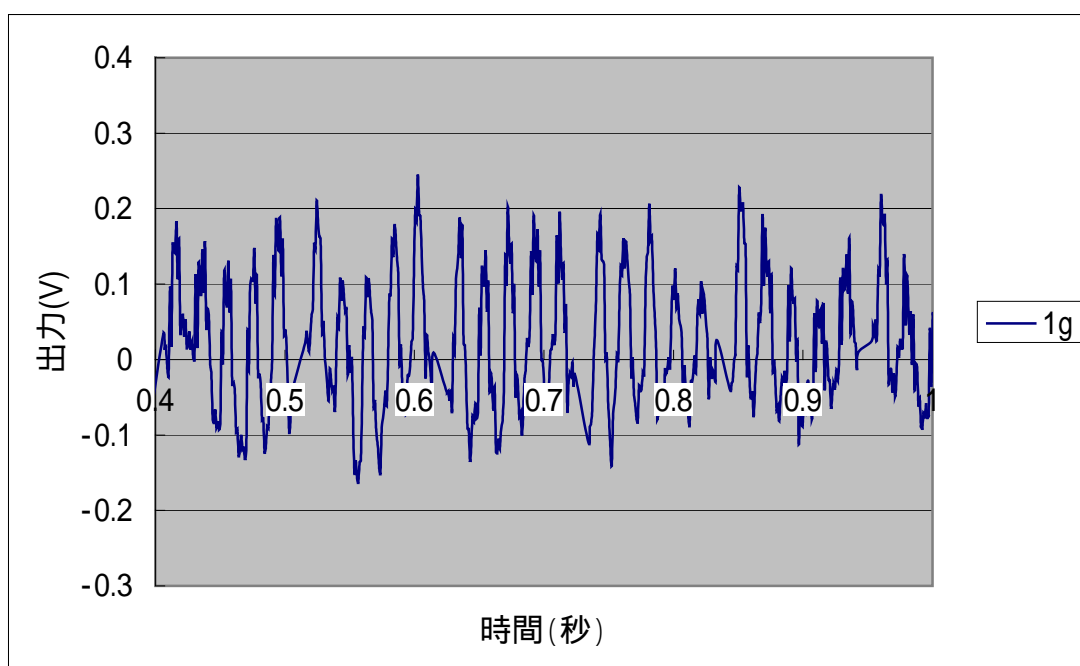


Fig4.4(b) 1g の出力波形図

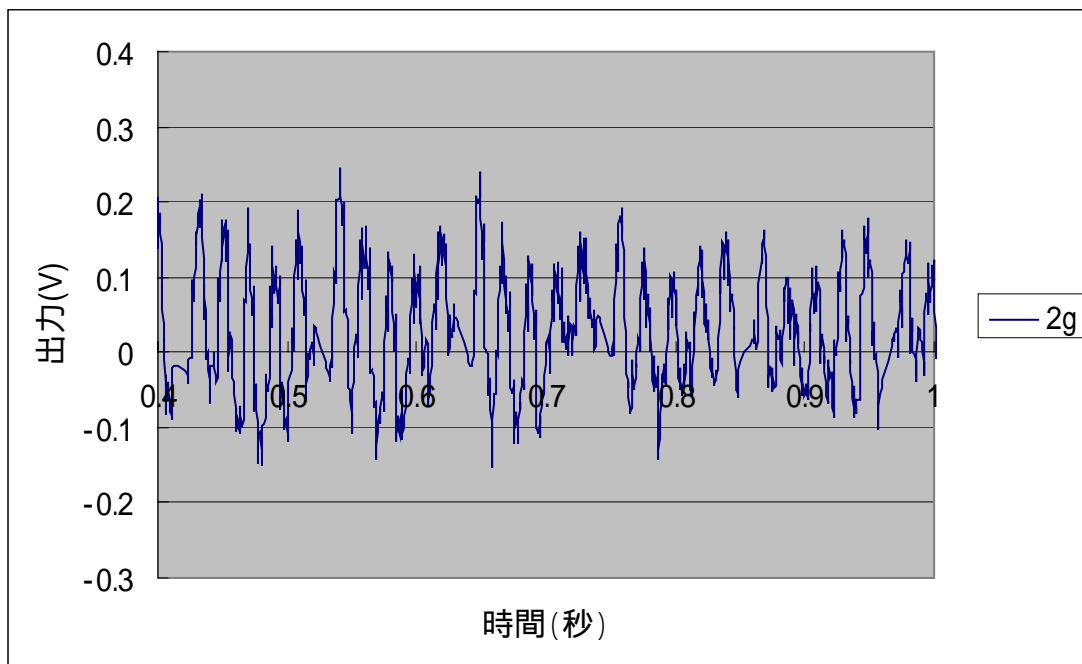


Fig4.4(c) 2g の出力波形図

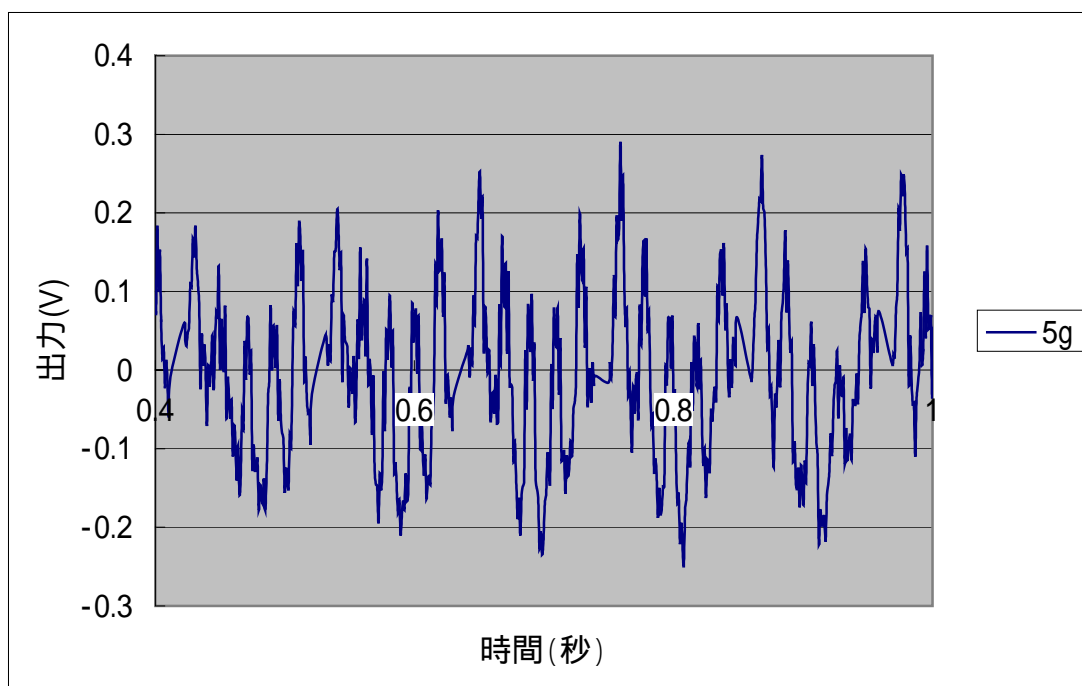


Fig4.4(d) 5g の出力波形図

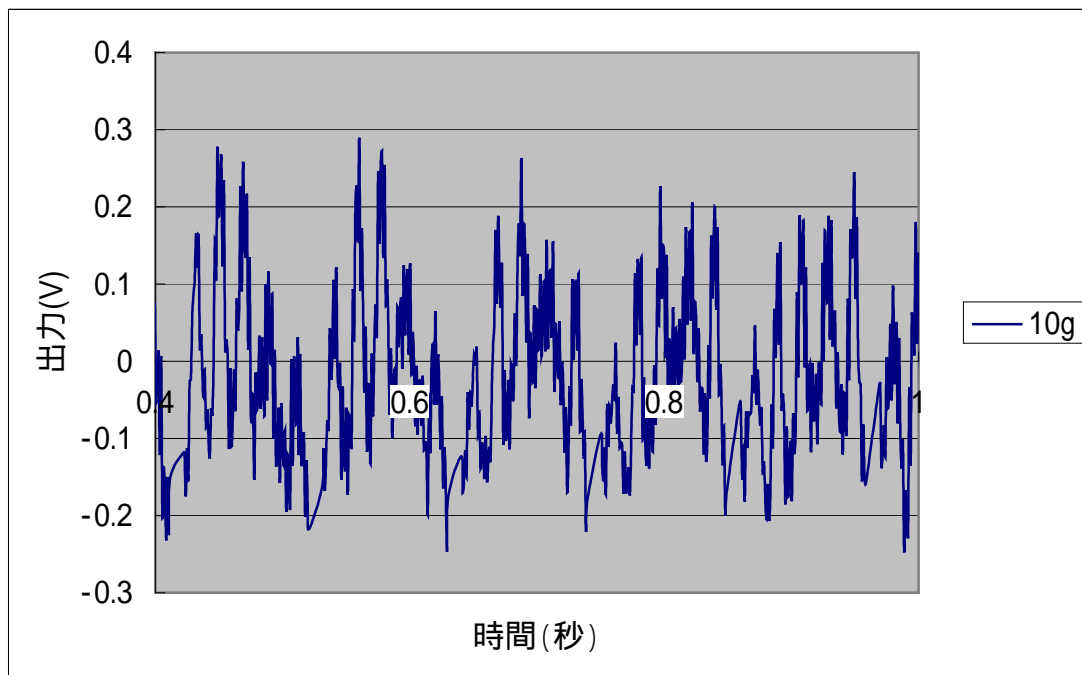


Fig4.4(e) 10g の出力波形図

4.3 実験結果

4.2.3「応答曲面」の最後に述べたように、おもりなしのときのデータから作った応答曲面を基準応答曲面として、おもり 0g、1g、2g、5g、10gのときのデータからそれぞれ作った応答曲面を測定応答曲面とし、両応答曲面のF検定による同等性検定を行った。それぞれの状態について20回ずつデータを取り、1つ1つのデータからそれぞれ応答曲面を作成してF検定を行い、20個のFの実現値 F_0 を求めた。その結果を図4.5に示す。横軸が乗せたおもりの重さ、縦軸がFの実現値 F_0 である。0gのデータと他のデータを比較すると、20回の平均は増加しているものの、それぞれのデータ点は分布が非常に広く、重なってしまっている部分がある。

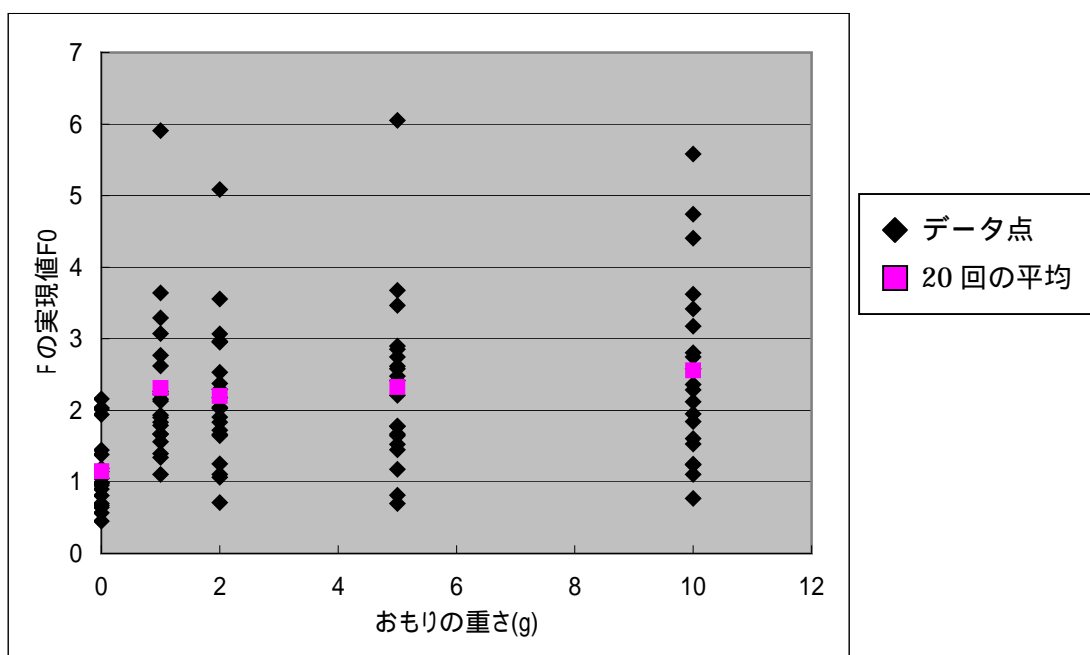


Fig4.5 F 検定結果

4.4 考察

4.4.1 F分布

一般に二つの回帰式の同等性検定における F の実現値は、両回帰式の自由度から決定される F 分布に従う検定統計量となることが知られている(2.3.4b 参照)。よって今回の F の実現値も F 分布に従っており、図 4.5 に見られる結果のばらつきはその影響によるものと考えられる。したがって1つ1つのデータを比較してもうまくいかない場合がある。例えば図 4.6 は正常時の F 実現値の度数分布と理論分布であるが、図に示すように理論分布に従いある範囲で分布する。しかしながら、20 回分の F 実現値の平均を比較すると、 $0g$ のときとその他のときとは明確な違いが見られる。よって F 検定を複数回行ってその平均を比較すれば、損傷有無を判定できると考えられる。以下にその具体的な手法を示す。

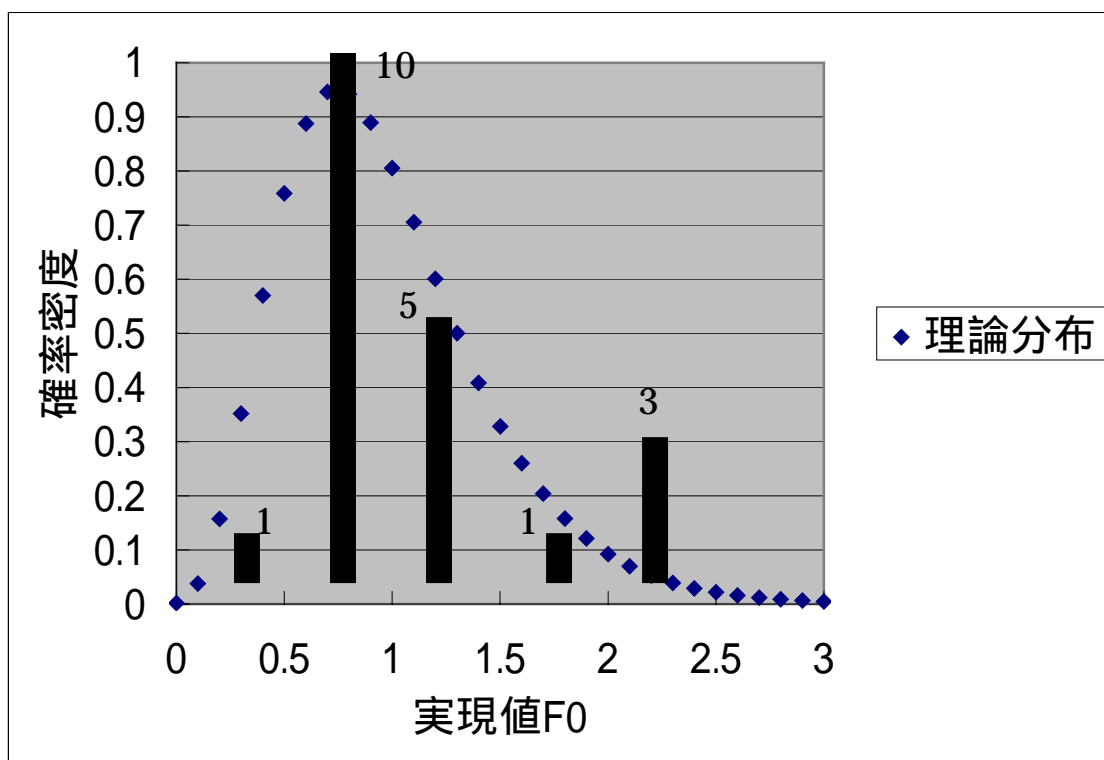


Fig4.6 Fの実現値 F_0 の度数分布と理論分布

4.4.2 閾値決定方法

4.4.2a おもりなし(変化なし)のときの分布

二つの応答曲面の回帰式が同等である場合、 F_0 の確率分布は回帰式の自由度 p とデータ点数 n に依存するF分布 $F(p, n-2p)$ に従う。今回の場合、回帰式の自由度は10、総データ点数は182であるから、ナット0個のときの F_0 値は $F(10, 162)$ に従っていると考えられる。これより、理論平均 $E(F)$ と分散 $\sigma^2(F)$ が式(2-19),(2-20)より求められる。

$$E(F) = \frac{162}{162-2} = 1.0125 \quad (4-2)$$

$$\sigma^2(F) = \frac{2 \times 162^2 \times (10 + 162 - 2)}{10 \times (162 - 2)^2 \times (162 - 4)} = 0.220603 \quad (4-3)$$

次に、 X 回平均を取ったときの分布を考える。 X 回平均を取ると、中心極限定理(2.3.5d)より、平均値は E 、分散は $\frac{\sigma^2}{X}$ となり、 X を大きくしていくと E を中心とした正規分布に近づいていく。正規分布の確率密度関数 $f(x)$ は次の式で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4-4)$$

これより、 X 回平均を取ったときの分布を正規分布と仮定して(4-4)式に(4-2),(4-3)の理論値を代入して分布 $N\left(E(F), \frac{\sigma^2(F)}{X}\right)$ を求めることができる。

4.4.2b おもり1gのときの分布

続いて状態が異なる場合の分布を求める。今回、状態変化がもっとも小さいおもり1gの状態を、検知すべき最小の損傷・異常の指標とした。おもり1gの実験データ20点から平均 E_A 、分散 σ^2 を求める。

$$E_1 = 2.313728 \quad (4-5)$$

$$\sigma_1^2 = 1.103809 \quad (4-6)$$

応答曲面の回帰式が異なる場合、どのような確率分布になっているのかわからないが、こちらでも X 回平均を取ったときの分布を正規分布と仮定して(4-4)式に

(4-5),(4-6)の値を代入して分布 $N\left(E_1, \frac{\sigma_1^2}{X}\right)$ を求めることができる。

4.4.2c 閾値の決定

上で求めた二つの分布 $N\left(E(F), \frac{\sigma^2(F)}{X}\right)$ と $N\left(E_1, \frac{\sigma_1^2}{X}\right)$ から、99%信頼区間が分割される回数 X を求める。99%信頼区間が分割されるためには、

$$N\left(E(F), \frac{\sigma^2(F)}{X}\right)_{0.99} < N\left(E_1, \frac{\sigma_1^2}{X}\right)_{0.01} \quad (4-7)$$

となればよい。

X を大きくしていくと、 $X=8$ のときに $N\left(E(F), \frac{\sigma^2(F)}{X}\right)_{0.99} = 1.3988$ 、

$N\left(E_1, \frac{\sigma_1^2}{X}\right)_{0.01} = 1.4496$ となり、(4-7)が満たされた。図 4.7、4.8 にF検定 1 回

だけの場合と、8 回やって平均を取った場合のF検定値の確率密度分布を示す。横軸がF検定値 F_0 、縦軸が確率密度で、図を比較すると 1 回の検定だけでは重なってしまっていた部分が、8 回平均を取った場合にはほとんどなくなっていることがわかる。

以上のことから、閾値を 1.3988 として 8 回平均を取れば 99%信頼区間の分割が行えると考えられ、次項でランダムにデータ点の抽出を行い平均を取って検証してみる。

4.4.3 閾値の有効性の検証

おもり 0g,1g,2g,5g,10g の状態について、それぞれランダムにデータ点の抽出を 20 回行い、その値が閾値 1.3988 を超えて同等性が棄却された回数を求めた。抽出点数を 1 点,2 点,4 点,8 点と増加させていき、2 点,4 点,8 点の場合はその平均が閾値を超え、同等性を棄却した回数を求めた。結果を表 4.1、図 4.9 に示す。

抽出点数を 1 点から 2 点、4 点、8 点と増加させていくにつれて、0g(損傷・異常なし)の場合、誤って同等性を棄却する回数が減少し、1g,2g,5g,10g(異常・損傷あり)の場合、同等性を棄却できていない回数が減っていることがわかる。8 回平均を取ったとき、1g,2g,5g,10g の場合には 100%検知が行えている。また 0g の場合には誤って 1 回同等性を棄却してしまっているが、これは実際の確率分布と理論分布のズレ、またはデータ点数の不足に起因するものと考えられる。

以上より、8 回平均を取ったとき、1g,2g,5g,10g の場合 100%、0g の場合にも 95%という高い水準で正しい判定が行えていることから、閾値の設定が有効であることを示せた。

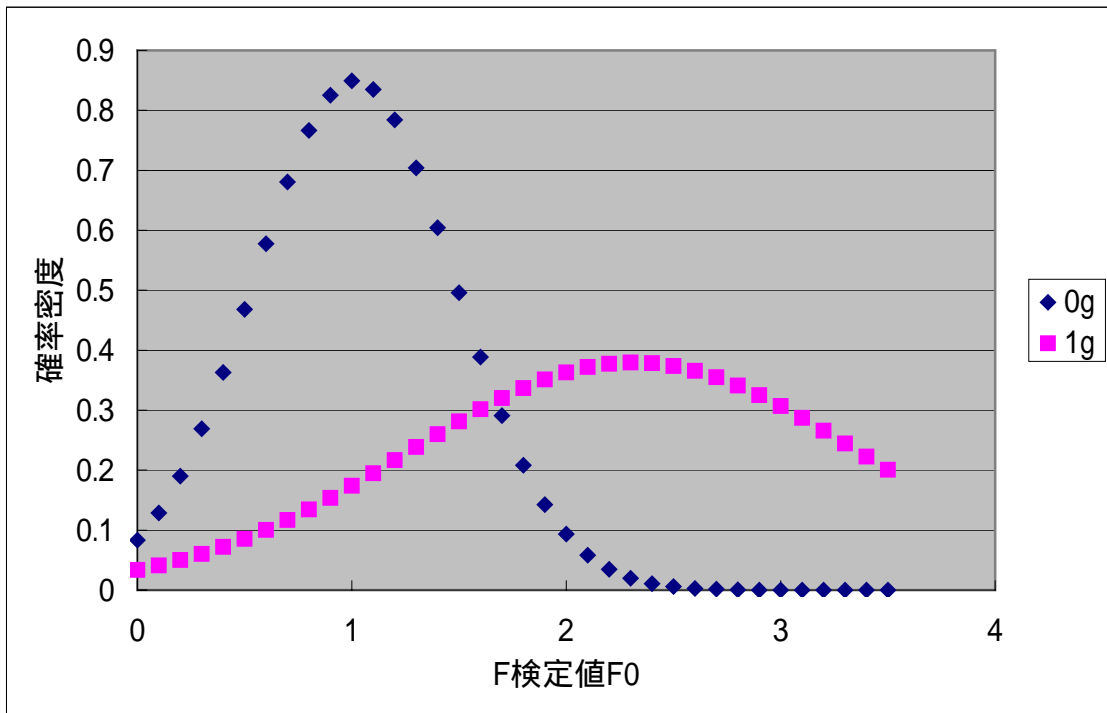


Fig4.7 F 検定 1 回のときの確率分布

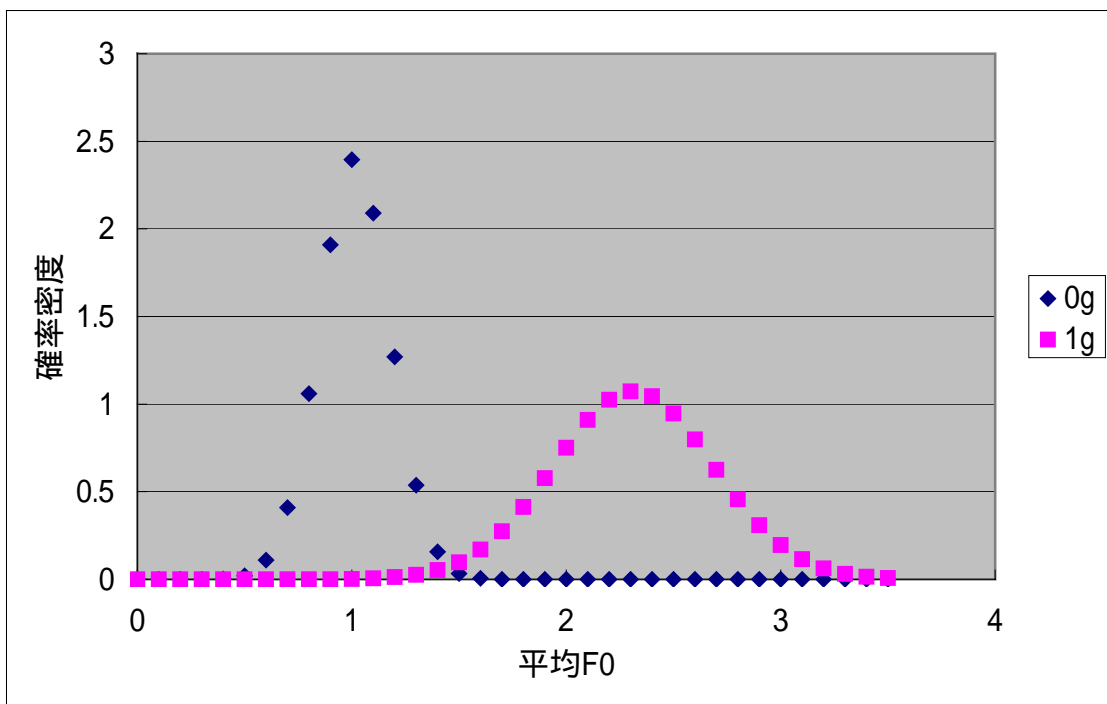


Fig4.8 平均F0の確率分布(8 回平均)

Table4.1 診断精度

(a)データ抽出点数 1 点

おもり(g)	0	1	2	5	10
同等性棄却回数	6	18	18	17	16

(b)データ抽出点数 2 点

おもり(g)	0	1	2	5	10
同等性棄却回数	5	18	19	19	19

(c)データ抽出点数 4 点

おもり(g)	0	1	2	5	10
同等性棄却回数	4	20	20	19	20

(d)データ抽出点数 8 点

おもり(g)	0	1	2	5	10
同等性棄却回数	1	20	20	20	20

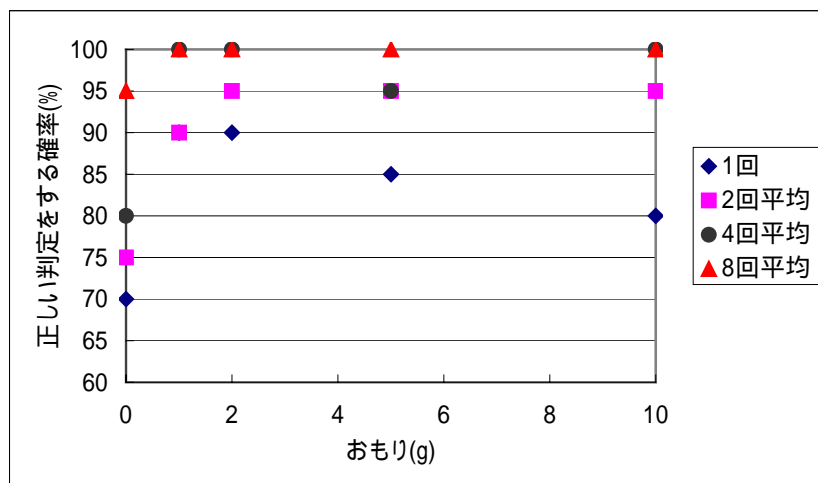


Fig4.9 平均回数毎の診断精度

第5章

結論

本研究では、既存の構造物に対して後付けで適用可能かつコンピュータによる自動的な診断が可能な、自己励振応答解析を用いたスマートストラクチャシステムの構築を試みた。近年、高度経済成長期に作られた構造物の老朽化が著しく進んでおり、この様な構造の健全性を自動的に診断するシステムが強く求められている。2章では、そのような自動診断を可能とする無学習損傷診断法、3章では自動診断法・自己励振機能を搭載したスマートストラクチャシステムの提案を行った。4章では、システムにとって非常に重要な部分である損傷検知手法の有効性を検証するため、アルミ片持ち梁を対象とした励振応答解析システムを作り、損傷検知実験を行った。本手法により、アルミ梁の先端におもり1gを乗せたときの構造状態の変化をほぼ100%検知することができることを確認した。結果、提案する損傷診断手法で構造に対する非常に小さな変化を検知できることを確認した。

参考文献

- (1) 山本鎮男、ヘルスマニタリング、(1999)、共立出版
- (2) A.E.Aktan,A.J.Heimicki and V.J.Hunt,Smart Materials and Structures,7(1998),674-692
- (3) J.P.Darryii,A.L.Philip,Smart Materials and Structures,7(1998),627-636
- (4) P.L.Fuhr,D.R.Huston,T.P.Ambrose,E.F.Mowat,SPIE vol.2719(1996),102-111
- (5) D.Take,T.Riddle,F.W.Williams,NELLetterReport6180/393A.1,July1(1993)
- (6) C.M.Ballard,S.S.Chen,Proc.SPIE Smart Structures and Materials, vol.2719(1996),102-111
- (7) R.A.Daniel,Instrumentation & Control Systems,10(1997),37-40
- (8) R.Winkler,Sensors EXPO 97,(1997),135-138
- (9) 内野研二、圧電/電歪アクチュエータ、森北出版(1986)
- (10) 西垣勉。小田原靖・遠藤満、日本機械学会論文集(C編)、63-615(1997),3728-3734
- (11)D.K.Shah,W.S.Chan and S.P.Joshi,Smart Materials and Structures, 3(1994),293-301
- (12)影山和郎・金原勲・鈴木敏夫・大澤勇・島村淳、日本造船学会論文集、178(1995),583-591
- (13)D.H.Simonset,R.Paetsch and J.R.Dunphy,Proceedings of SPIE International Society of Optical Engineering,1777(1992),73-79
- (14)堀口常雄・倉嶋利雄・立田光廣、電子情報通信学会論文集、J-74-C-II,5(1991),467-472
- (15)影山和郎・金原勲・鈴木敏夫・大澤勇・村山英晶・高橋淳、日本造船学会論文集、182(1997),579-587
- (16)R.L.Idriss,M.B.Kodindouma,A.D.Kersey and M.A.Davis,Smart Materials and Structures,7(1998),209-216
- (17)P.L.Fuhr,D.R.Huston,M.Nelson,O.Nelson,J.Hu and E.Mowat,J of

- Intelligent Materials Systems and Structures,10(1999),293-303
- (18)Rolf Bronnimann,P.M.Mellen and U.Sennhauser,Smart Materials and Structures,7(1998),229-236
- (19)座古勝・裏垣博・小館一浩、材料、44-499(1995),493-497
- (20)R.C.Tennyson,A.A.Mufti,S.Rizkalla,Gtadros and B.Benmonkrane,Smart Materials and Structures,10(2001),560-573
- (21)N.D.W.Glossop,S.Dubois,W.Tsaw,M.Lebanc,J.Lymer,R.M.Measers and R.C.Tennyson,Composites,21-1(1990),71-80
- (22)武藤眞介、統計解析ハンドブック、128-129
- (23)武藤眞介、統計解析ハンドブック、136-137

以上

1 ~ 37 ページ 完

卒業論文

平成 17 年 2 月 4 日提出

30229 安田健一