

# I-B 14

## アクティブ制振における制御則に関する実験的研究

北海道大学工学部 正員 小幡 卓司  
 新日本製鐵(株) 正員 下田 和敏  
 三菱重工業(株) 正員 今井 敦史  
 北海道大学工学部 正員 林川 俊郎  
 北海道大学工学部 正員 佐藤 浩一

### 1. ま え が き

近年、土木構造物においても、制振や免震が積極的に行われるようになり、TMD、オイルダンパー等の制振装置が多数開発されている。一般に、パッシブ方式の制振装置は複数のモードの同時制振は極めて困難であり、ある程度広範囲の振動数に対して制振を行う場合には、アクティブコントロールが適しているケースが多くあると考えられる。

本研究はFuzzy制御理論と最適制御理論による数値解析結果<sup>1)</sup>に基づき、搭状構造物の振動制御実験を実施することにより、その有効性の比較検討を行った。一般に、Fuzzy制御理論においては、制御規則の構築は容易に行えるが、メンバーシップ関数の調整や多次モードの同時制振等に関しては、比較的困難な場合が多い。

そこで本研究では、最近、最適化手法として着目されている遺伝的アルゴリズム<sup>2)</sup>（以下GAと称す）をメンバーシップ関数の調整に採用し、各モードに応じてメンバーシップ関数を切り替えることによって多次モードの同時制振を試みた。具体的には、各制御理論を用いて、地震波入力による強制加振および減衰自由振振動に対して制振実験を実施し、これらの実験結果に対して検討を加えることにより、このような問題におけるGAの適用性ならびにその振動抑制効果等について考察を加えたので、ここに報告するものである。

### 2. 制 御 理 論

一般に、多自由度系の運動方程式は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) + \mathbf{U}(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、**M**：質量マトリックス **C**：減衰マトリックス **K**：剛性マトリックス

**F**(t)：外力ベクトル **U**(t)：制御力ベクトル

本研究では、**U**(t)の計算に、最適制御理論とファジィ制御理論を採用した。最適制御理論においては、制御システムは状態方程式と出力方程式によって表現され、制御力の計算は構造物の状態量とフィードバックゲインの積で求めることができる<sup>3)</sup>。最適制御の状態量は、構造物の各層の応答変位ならびに応答速度を用いている。また、Fuzzy制御においては、応答速度と応答加速度を状態量とした前件部2変数、後件部1変数の9規則からなる直接法によるFuzzy推論を用いた。なお、ファジィ関係の合成法はmax-min合成を、確定値は重心法にて計算を実施した。図-1にメンバーシップ関数を、表-1に規則表を示す。

また、本研究ではメンバーシップ関数の調整にGAを用いた方法<sup>1)</sup>と、人間の経験に基づく方法の両者について実験を行った。調整方法は、各振動モードに応じたメンバーシップ関数の $V_{MAX}$ 、 $a_{MAX}$ を変化させることにより、観測された状態量に対する制御力の発生感度の最適化を試みた。表-2に、今回用いた $V_{MAX}$ 、 $a_{MAX}$ の値を示す。

### 3. 実験およびその結果

#### 3-1. 実験方法

実験は、図-2のような3層の骨組構造物を製作し、これを振動台上で加振して最上層に設置したアクチュエータによって制振力を発生させ、その際の各層の加速度を測定することにより行った。

前述のとおり、本研究ではFuzzy制御を行う際の観測量に制御力を作用させる層の加速度と速度を、最適制御には各層の速度と変位を用いている。実際には、各層に設置された加速度計により応答加速度を観測し、その情報を用いて数値積分を実施して時刻 $t_n$ の応答速度、応答変位を逐次求めている。サンプリング

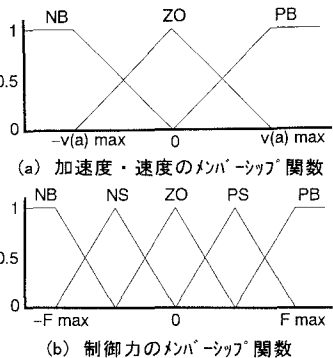


図-1 メンバーシップ関数

表-1 規則表

|    | NB | ZO | PB |
|----|----|----|----|
| NB | PB | PS | ZO |
| ZO | PS | ZO | NS |
| PB | ZO | NS | NB |

表-2 メンバーシップ関数の最大値

|          | $V_{MAX}$ (cm/sec)<br>'GA' | $V_{MAX}$ (cm/sec)<br>'経験' | $a_{MAX}$ (cm/sec <sup>2</sup> )<br>'GA' | $a_{MAX}$ (cm/sec <sup>2</sup> )<br>'経験' |
|----------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1st mode | 0.64                       | 0.91                       | 217.1                                    | 13.6                                     |
| 2nd mode | 0.29                       | 1.00                       | 435.5                                    | 15.0                                     |
| 3rd mode | 0.38                       | 0.95                       | 140.5                                    | 14.3                                     |

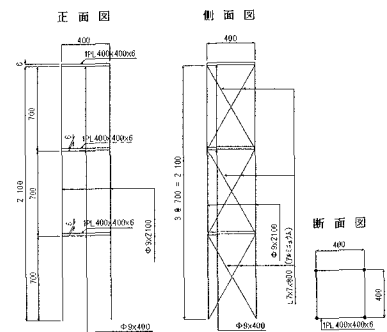


図-2 実験供試体一般図

周波数はパソコンNEC PC-9821Bf（クロック60MHz）を用いた場合、最大 500Hz程度まで可能である。また、アクチュエータについては、重錘をベルトを介して直流サーボモーターで駆動する形式を採用した。重錘重量は構造物重量の約1%である 0.7 Kgとし、この重錘に対して加速度で最大約500galまでの制振力を発生することができる。図-3に本研究で用いた振動制御システムの概略図を示す。加振方法に関しては、自由振動に対する制御では最上層に 5.2cmの初期変位を与え、地震波入力の場合にはパソコンから D/A変換ボードを介して直接振動台を駆動した。入力地震波は、1993年1月15日に発生した鉋路沖地震で、千代田大橋にて観測された橋軸方向の加速度応答波形の主要動部分を、最大200galに変換して用いている。

なお、実験供試体の振動特性を把握するために減衰自由振動実験を行い、固有振動数、減衰定数等を測定した。その結果を表-3に示す。

### 3-2. 実験結果

以上のような実験装置を用いて、塔状構造物に対する制振実験を実施した。サンプリング周波数は 100Hzを用いている。図-4に自由振動に対する実験結果を、図-5に地震波入力時の実験結果を示す。なお図中のCase1~3はそれぞれ、GAを用いたFuzzy制御、人間の経験によるFuzzy制御および最適制御を表している。

図-4に着目すると、Case1およびCase3は制御開始後約10秒間で振幅が 1/4程度に抑制され、ほぼ同等の制振効果が得られたが、Case2に関しては、制御開始後およそ 15秒以降において残留した高次の振動成分に対して有効な制振が行われず、かなり不安定な結果となっている。このことは表-2における $V_{MAX}$ 、 $a_{MAX}$ の設定が十分でなく、よって人間の経験のみでメンバーシップ関数の調整を行うことは、かなり困難であると思われる。

また、地震波入力の場合については、ノイズ等の影響によって、最大応答値のみの比較ではその振幅抑制効果は判然としなが、振動波形からその実効値を考慮すれば、3者ともある程度の制振効果が得られていることが推定できる。特に Case2においては最大応答値についても明らかな振幅の低減効果が発揮され、このような問題におけるGAの適用は有効であると判断できる。

### 4. あとがき

本研究では、最適制御理論と Fuzzy制御理論を用いたアクティブ制振実験を行い、以下のような結果を得た。

実験結果から、Fuzzy制御のメンバーシップ関数の最適化におけるGAの適用性に関しては、人間の経験による調整に比して比較的簡便に有効な制振効果をもたらすことが確認できた。したがって、このような問題に対する遺伝的アルゴリズムの適用は極めて妥当な手法であると思われる。

なお、本研究の一部に平成7年度文部省科学研究費奨励研究（A）、（研究代表者 小幡卓司、課題番号 07750550）の援助を受けたことを付記する。

<参考文献>

1) 下田和敏・小幡卓司・林川俊郎・佐藤浩一：アクティブ振動制御におけるFuzzy制御理論の適用に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集第52号（A），pp. 392～397，1996。 2) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993。 3) 白石昌武：入門現代制御理論，啓学出版，1987。

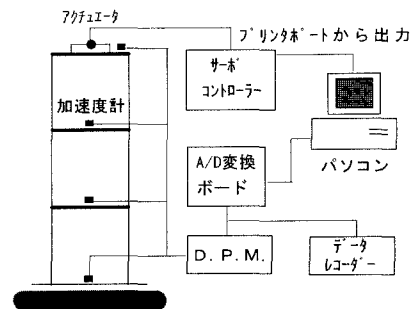


図-3 振動制御システム概略図

表-3 振動特性一覧表

|                  | 1st mode | 2nd mode | 3rd mode |
|------------------|----------|----------|----------|
| $\omega$ (rad/s) | 8.895    | 26.05    | 49.25    |
| f (Hz)           | 1.416    | 4.150    | 6.250    |
| T (sec)          | 0.706    | 0.241    | 0.160    |
| $\zeta$ (%)      | 0.36     | 0.25     | —        |

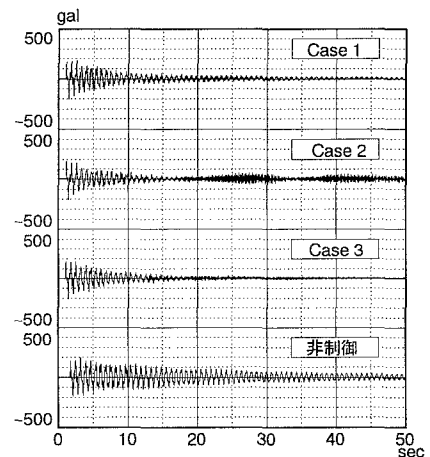


図-4 実験結果（自由振動）

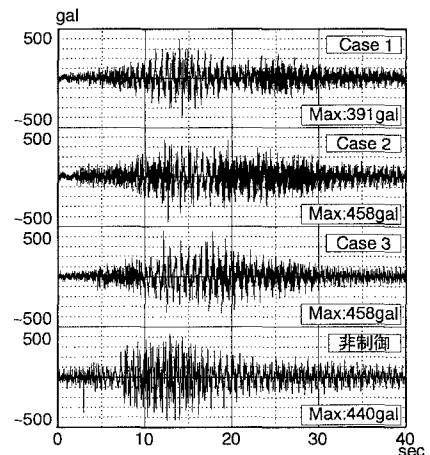


図-5 実験結果（地震波入力）