

GAを用いたファジィアクティブ制御の効率化に関する研究

STUDY ON EFFICIENCY OF FUZZY ACTIVE CONTROL BY USING OF GENETIC ALGORITHM

下田 和敏* 小幡 卓司** 林川 俊郎*** 佐藤 浩一**** 宅和大助*****
 Kazutoshi SIMODA, Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA, Koichi SATO and Daisuke TAKUWA

*	工修	新日本製鐵	設備技術センター	(〒293 宮津市新宮 20-1)
**		北海道大学助手	工学部土木工学科	(〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
***	工博	北海道大学助教授	工学部土木工学科	(〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
****	工博	北海道大学教授	工学部土木工学科	(〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
*****		北海道大学大学院	土木工学専攻	(〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In general the methods of vibration control for infra structures are divided into passive control and active control. The active control method has the ability to control a comparatively wide frequency range.

In this study, active vibration control analyses and experiments are performed on a three story building model by using both optimal control theory and fuzzy control theory. The fuzzy control theory is difficult to set up membership functions and to design control rules. Then, the identification of membership functions for each mode is made by using Genetic Algorithm (GA). It is concluded that the experimental results of the fuzzy control theory by identifying GA have almost similar effect in comparison with those of the optimal control theory.

Key Words: active vibration control, fuzzy control theory, optimal control theory, genetic algorithm

1. まえがき

土木構造物においても、風や交通荷重等の不規則な外力に起因する振動を、制御装置を付加することにより制御しようとする研究が盛んに行われ、近年では次第に実用化の域に達しつつある¹⁾。

一般に、この制振方法にはパッシブ方式とアクティブ方式に大別することができ²⁾、両者を比較すれば、アクティブ方式はパッシブ方式に比してある程度広範囲の振動数に対して有効な制振効果を期待することができると考えられる。しかしながらアクティブ制振の実用化には、アクチュエーターの性能、採用すべき制御理論あるいはサンプリング周波数等の様々な問題を有する場合がある。

アクティブ制御理論は従来より盛んに研究が行われ、多くの制御理論が知られているが、まず、 H^{∞} 制御理論、最適制御理論に代表されるような、制御対象とする構造物に対応する数学的モデルを構築し、そのモデルについて制御システムを設計する方法が知られている³⁾。これらに対し、主に人間の経験等の知識ベースを生かし、上記のような制御対象の数学的モデルを用いずに構造物の制御を行う論理型制御があり、これらには人工知能の応用、Fuzzy 制御等がある。

ここで Fuzzy 制御は、ロバスト性に優れた制御理論であると称されており^{4,5)}、非線形性を持つ制御対象の場合でも比較的有効な制御が可能であると考えられるが、その効果は適切なメン

バースhip関数、制御規則の構築に依存する。しかしながら、その汎用的な設計手法は確立されておらず、制御を行う際に有効と考えられるメンバースhip関数、制御規則の構築は人間の経験に委ねられている^{6,7)}。また、複数の振動モードを有する制御対象において、単一のメンバースhip関数あるいは規則を用いて多次モードの同時制振を行うことは、非常に困難である。一方、多次モードを有する構造物の Fuzzy 制御問題は、非連続関数からなる組み合わせ最適化問題と考えることもできる。

近年、このような最適化問題の解析法として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GAと称す) が注目されている⁸⁾。GAとは、ダーウィンの自然淘汰説を基本概念とし、繁殖、淘汰、交叉および突然変異のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え、それを最適化の手法として用いようとするものであり、従来の最適化手法のように解の微係数等を用いる必要はない。GAは最適解の探索過程において、問題の種類を問わずその処理手順に大きな差異がなく、解の評価が可能であれば有為な解を検索することが可能であるという特徴を有している。特に工学的問題においては、最適解は必ずしも明確ではないが解の評価が可能ながしばしばあるため、その応用実績は最近多数報告されている^{9,10)}。

そこで本研究では、制御規則に Fuzzy 制御理論を採用し、GAを用いてメンバースhip関数の最適化を行い、解析と実験を通じて、その制振効果、有効性等の比較検討を実施するものである。

具体的には、制御対象を複数の振動モードを有する3層の塔

状構造物とし、Fuzzy 制御において多次モードの同時制振に対応させるために、それぞれの固有振動モードに有効と思われるメンバーシップ関数をあらかじめGAならびに人間の経験によって用意し、構造物の卓越振動モードを半別してメンバーシップ関数を切り替えることにより制振を行うことを試みた。卓越振動モードの判定には、その処理速度を考慮して、構造物の応答変位をパラメータとして用い、その構造物の各時刻における変形状態を追跡することにより行った。

GA の適用方法に関しては、目的関数に制御力を含めた構造物のエネルギー状態を表現する関数を設定し、メンバーシップ関数の最大値を遺伝子列で表現することにより、1～3次のそれぞれの各固有振動モードに対し最適なメンバーシップ関数の設定を行った。加えて、人間の経験によるメンバーシップ関数の調整も合わせて実施し、GAの有効性、適用性等に対して比較検討を試みた。この際のメンバーシップ関数の調整は、解析結果から得られた応答波形を確認することによって制振効果の判定を行いつつ、メンバーシップ関数の最大値を各種の組み合わせで逐次変化させることにより実施した。

また、現在比較的良好に用いられている最適制御理論についても同様に解析ならびに実験を行い、制御理論の差異による振動抑制効果等についても検討を加えた。

さらに、数値解析結果を検証するため、実際に3層のラーメン構造を有する実験供試体を作成し、上記の各制御理論を用いて、3ケースの制振実験を実施した。なお、制御力の付加方式に関しては、塔上に設置した重錘をモーターで駆動することにより、構造物に制御力を与える方法を用いた。

したがって、本研究はこれらの解析結果および実験結果から、このような問題におけるGAの適用性ならびに各制御理論の振動抑制効果等に関して考察を加えたのでここに報告するのである。

2. 解析手法

2. 1 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

前述のように、本研究では制御対象を3層の塔状構造物とし、これを3質点系にモデル化することにより解析を行うこととした。解析に先立ち、構造物の固有振動特性を把握するために、実際に実験供試体を制作し、固有振動数、および減衰定数の測定を実施した。図-1に実験供試体一般図を、図-2に解析に用いた3質点系モデルを示す。また、表-1は実験で得られた振動特性の一覧であり、表-2は解析に用いた質量等の断面諸元である。

一般に多自由度系の運動方程式は、式(1)のように表すことができる。

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

$\mathbf{M}$: 質量マトリックス $\mathbf{C}$: 減衰マトリックス

$\mathbf{K}$: 剛性マトリックス $\mathbf{F}(t)$: 外力ベクトル

$\mathbf{U}(t)$: 制御力ベクトル

ここで、 $\mathbf{U}(t)$ は各制御理論によって求められたある時

刻tにおける制御力ベクトルである。また質量マトリックス $\mathbf{M}$ には集中質量法を、減衰マトリックス $\mathbf{C}$ にはレーレー減衰を用いている。

多自由度系の時刻歴応答解析法にはモード解析法と、直接数値積分法が知られているが、本研究ではニューマークの β 法を用いた直接数値積分法を採用した。時間刻みは0.01sec、係数 β は0.25として計算を実施した。

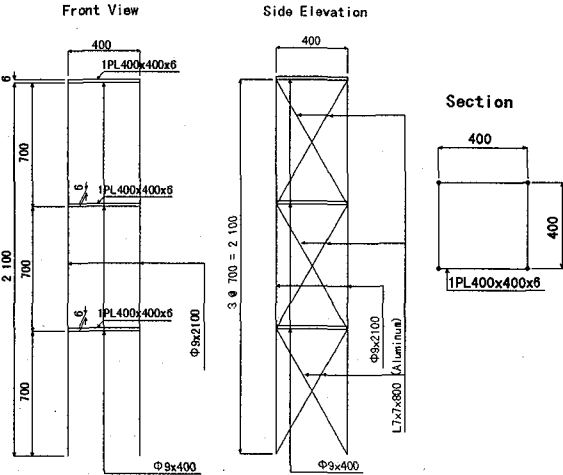


図-1 実験供試体一般図

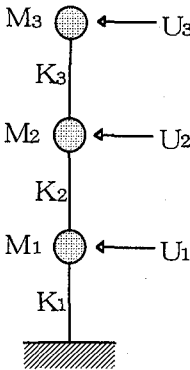


図-2 3質点モデル

表-1 振動特性値一覧表

	1次モード	2次モード	3次モード
ω (rad/s)	8.943	26.026	37.997
f (Hz)	1.423	4.242	6.047
T (sec)	0.703	0.241	0.165
h (%)	0.36	0.25	—

表-2 解析に用いるパラメータ

	質量 (kg)	剛性 (kg/cm ²)
上層	24.5	9248.0
中層	21.5	9248.0
下層	19.2	9248.0

2. 2 最適制御理論

一般に最適制御理論による制御システムは式(2)、および式(3)のように表すことができる^{11),12)}。

$$\frac{dX_s}{dt} = A X_s + B U_s \quad \cdots (2)$$

$$Y_s = D X_s \quad \cdots (3)$$

$$U_s = -F_s X_s \quad \cdots (4)$$

$$J_d = \sum_{t=0}^{\infty} (X_s^t Q_d X_s + U_s^t R_d U_s) \geq 0 \quad \cdots (5)$$

X_s : 状態ベクトル U_s : 制御ベクトル

A : システム行列 B : 制御行列

Y_s : 出力ベクトル D : 出力行列

F_s : フィードバックゲイン

ここで、ある時刻 t における状態ベクトルは各層の変位、速度を表し、制御ベクトルは制御力そのものを表す。制御力は状態ベクトルとフィードバックゲインの積で表され、式(4)によって求められる。一般に、最適レギュレータの設計法では、式(5)に示すような評価関数が最小になるように式(4)中のフィードバックゲインを求める^{13),14)}。

また、式(5)における Q_d, R_d は、それぞれ状態ベクトルと制御ベクトルの重み行列である。重み行列の決定には、 Q_d を対角行列にとり、各対角要素を対応する状態変数における許容誤差の2乗の逆数にする方法や、極配置により求める方法等が知られている。本研究では簡便に重み行列を決定するため、式(5)の右辺第1項を構造系のエネルギー状態を表現するものとみなし、 Q_d に構造物モデルにおける各質点の質量および剛性を用いることによりフィードバックゲインを決定した。なお、制御力の最大値は、実験で用いるアクチュエータの性能を考慮して6.0 Nに設定した。

2. 3 Fuzzy 制御理論

Fuzzy 制御を行うためには、IF-THEN 規則群とそれに対応したメンバーシップ関数が必要である¹⁵⁾。本研究では、制御力を作用させる層の応答速度、応答加速度ならびに制御力をパラメータとした前件部2変数、後件部1変数からなる次のような推論規則を25規則用いて解析を行った^{16),17)}。

推論規則例

1 : もし加速度が負で速度が負ならば制御力は正で大

IF a is NB and v is NB THEN u is PVB

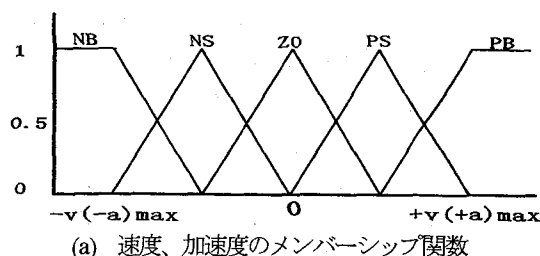
2 : もし加速度が負で速度が0ならば制御力は正で大

IF a is NB and v is ZO THEN u is PB

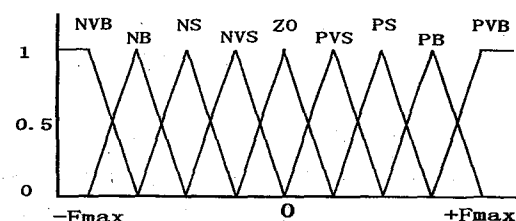
⋮

⋮

図-3に速度、加速度のメンバーシップ関数ならびに制御力のメンバーシップ関数の一例を示す。また、表-3は今回用いた25規則の場合の規則表である。なお、Fuzzy 関係の合成法にはmax-min合成を、確定値の計算には重心法を用いている。



(a) 速度、加速度のメンバーシップ関数



(b) 制御力のメンバーシップ関数

図-3 メンバーシップ関数

表-3 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PVB	PVB	PB	PVS	NVS
NS	PVB	PB	PS	ZO	NS
ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
PS	PS	ZO	NS	NB	NVB
PS	PVS	NVS	NB	NVB	NVB

PVB: Positive Very Big, PB: Positive Big, PS: Positive Small, PVS: Positive Very Small, ZO: Zero, NVS: Negative Very Small, NS: Negative Small, NB: Negative Big, NVB: Negative Very Big

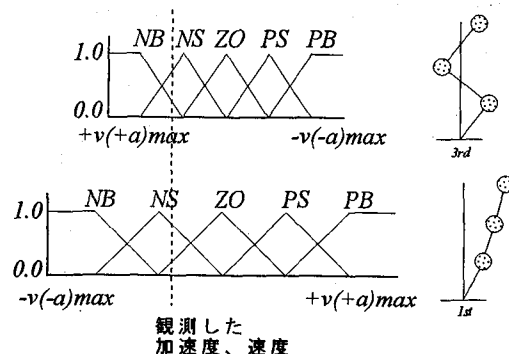


図-4 メンバーシップ関数調整の概念図

前述のとおり、制御対象の構造物が複数の振動モードを有する場合、Fuzzy 制御においては同一の制御則で多次モードの同時制振は極めて困難であると考えられる。その理由として、例えば上層に制御力を作用させた場合、モード形状より1次モードに関しては良い制振効果が得られるが、3次モードに対しては最上層の振幅が小さいために、1次モードと同一のメンバーシップ関数では十分な制振効果が期待できないことが容易に判断できる¹⁸⁾。

そこで本研究では、ある時刻 t における卓越振動モードを各層の変位から推定し、各モードに応じたメンバーシップ関数を用いて制御を行うものとした。具体的には、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行った。このメンバーシップ関数調整の概念図を図-4に示す。

以上のような手法を用いて、構造物が有するそれぞれの振動モードに対し、十分な制御効果を発揮するメンバーシップ関数のパラメータ $|v_{\max}|, |a_{\max}|$ を予め用意しておくことにより、制御則の組み替え等の煩雑な作業を実施せずとも、比較的簡便に広い振動数領域に対して有効な制振が行われると考えられる。

そこで本研究では、メンバーシップ関数の最適化に際し、GAを用いて汎用的なメンバーシップ関数の調整手法の検討を行った。また、制御力の最大値は最適制御と同様に図-3のメンバーシップ関数の最大値で $F_{\max}=6.0\text{ N}$ に設定した。

2. 4 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

GAは生物進化の原理(繁殖、選択、交叉及び突然変異)に着想を得た手法であり、解の評価が可能であれば最適解を検索できるという特徴を有している。前述のとおり、工学的問題には最適解が必ずしも明確ではないが、評価は可能であるという問題は多数存在するため、工学的分野におけるGAの応用は非常に有効であると考えられる^{8),19)}。

一般に、GAの適用に際しては、問題のコード化ならびに目的関数の設定がしばしば問題となる。そこで本研究では、Fuzzy制御を行う際の前提部のメンバーシップ関数の最大値 $(|v_{\max}|, |a_{\max}|)$ を、図-5のような解空間を設け、図中の10進数表現された X, Y を2進数にコード化することで遺伝子列を表現し、一様乱数を用いて各1個体についてそれぞれ2組の遺伝子列を持つ初期集団を発生させた²⁰⁾。

また、適応度を評価するための目的関数は「構造物-制御装置」系のエネルギー状態を表現することを考慮して、以下のような関数を用いることとした。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^{1000} X_i' \cdot K \cdot X_i + \sum_{i=1}^{1000} \dot{X}_i' \cdot M \cdot \dot{X}_i + \sum_{i=1}^{1000} |U_i \cdot X_i| \quad \dots (6)$$

K : 剛性マトリックス M : 質量マトリックス
 $X_i, \dot{X}_i$: 各層の応答変位、応答速度を表すベクトル
 U_i : 制御力ベクトル

ここで、式(6)の中の右辺第1項は構造物のひずみエネルギーを、第2項は構造物の運動エネルギーを、また第3項は制御力による仕事を表している。よって、制御開始後10秒間経過した際の式(6)における J_{GA} の値がより小さければ、有効な制振効果が得られたと評価することとした。

具体的な計算過程は、選択には適応度比例戦略を、交叉には2点交叉を用い、突然変異に関しては、1, 0で表現されているそれぞれの遺伝子列に対し、ある確率に基づき直接、遺伝子座を操作する方法を採用した。初期集団の大きさは15個体、交叉率は0.7、突然変異率は0.3である。

また、集団に存在する個体の適応度の評価を行うために、各個体に対して個別に時刻歴応答解析による制振シミュレーションを実施して、目的関数値を求めた。応答解析に際しては、非制御の状態で初期の4.0秒間、各モードと同一の固有振動数を有する最大100galのsin波をそれぞれ入力して構造物を加振

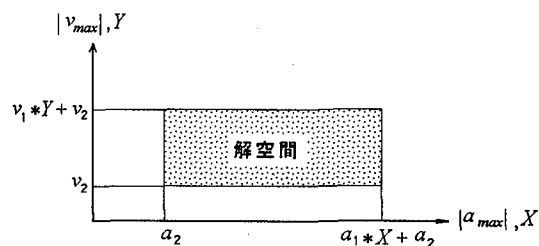


図-5 解空間

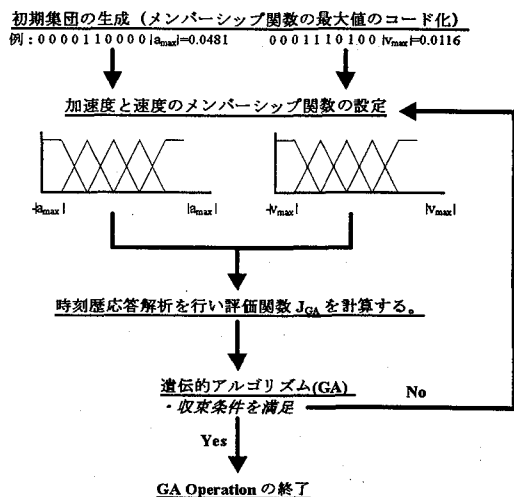


図-6 GAの適用方法

し、加振終了と同時に制振を開始して一定時間経過後の応答値から、目的関数の計算を行った。

収束判定の方法については、ある世代における集団の遺伝子列と目的関数値を監視し、単一の遺伝子列により集団が構成されているならば収束したものと判断した。

本研究における、GAの処理手順および遺伝子列と目的関数の関係を図-6に示す。

3. 各制御理論による応答解析とその考察

以上を踏まえて、本研究では最適制御理論とFuzzy制御理論を用いて振動制御シミュレーションを実施した。

解析ケースは、表-4に示すような構造物の振動状態の異なる12ケースである。表-4において「上層制御」「中層制御」「下層制御」とは、制御力の作用位置を表し、また「自由振動」における「1次卓越」等に関しては1次～3次モードが卓越するような初期変位を設定して、その際の応答を解析したものである。「強制振動」に用いた入力地震波については、1993年1月15日に発生した釧路沖地震の千代田大橋において観測された橋軸方向の加速度波形を最大加速度100.0galとして使用することとし、解析には主要動部分のみを使用した。図-7に解析に使用した入力地震波を示す。

また、制御理論等の差異に関しては、Fuzzy理論にGAを適用した場合を“Case1”、人間の経験に基づく場合を“Case2”¹⁸⁾、最適制御理論を用いた場合を“Case3”として上記の表-4と区別することとする。

なお、Fuzzy制御については、前述のとおり、予め前章にお

けるGAまたは人間の経験によって求めた各振動モードに対応するメンバーシップ関数をデータとして入力し、ある時刻における構造物の卓越振動モードを判別して、それに応じた制御を行うプログラムを用いている。表-5に Fuzzy 制御の場合の各振動モードに対する $|v_{\max}|, |a_{\max}|$ の値を示す。

表-5に着目すると $|a_{\max}|$ の値について Case 1 がすべての振動モードに対してかなり大きめの値になっている。このことはシミュレーション結果に関してはあまり大きな影響を与えないが、実験において有意な差が生じることが判明した。これについては4. で述べることにする。

以上より得られた時刻歴応答解析の一例として「上層制御」、「1次卓越」の場合の各 Case における上層の応答変位と制御力の履歴を図-8に、「上層制御」、「3次卓越」の場合の同様の結果を図-9に、「上層制御」、「強制振動」の場合の結果を図-10に示す。

図-8(a)に着目すると、1次卓越の場合の応答変位は、4.5秒程度でほぼ完全に振動が抑制されており、最適制御、Fuzzy 制御ともに制振が有効に行われているものと考えられる。それぞれの制振特性について考察を加えると、最適制御の場合、振幅の減衰過程が指数関数的に減衰しているのに対し、Fuzzy 制御の場合は Case 1、Case 2とも振幅の減衰が直線的に小さくなっていることがわかる。Fuzzy 制御においては、その状態量に応答速度および変位を用いた場合についても同様な傾向を有することを確認した。したがって、このことは状態量の違いによるものではなく、制御理論そのものの特性であると思われる。この応答特性の違いから、1次卓越の場合は最適制御の方がやや有利な制振効果を持つものと考えられる。この際の制御力の出力履歴に関しては、図-8(b)に示すように最適制御において最大制御力の出力時間が初期の約2.0秒であり、その後の制御力は急速に減少し、高周波成分を有するような出力が認められる。Fuzzy 制御の場合、両者とも最大制御力の出力時間は約4.0秒で、その後の制御力は比較的緩やかに減少する。この理由は、状態量の相違によるものであろう。すなわち、Fuzzy 制御においては、その状態量に応答加速度を用いているため、比較的大きな制振効果の出力特性になっているものと考えられる。このため、Case 1と比較して、加速度に対して敏感な設定になっている Case 2の出力特性は、応答変位がほぼ停止した後も比較的長時間にわたって制御力の出力が継続し、メンバーシップ関数の設定による影響が顕著に現れていることがわかる。

3次卓越の場合を比較すると、Case 1のFuzzy 制御にGAを適用した場合が最も良い制振効果を発揮していることが図-9(a)から理解できる。

表-4 時刻歴応答解析ケース

制御位置	自由振動	強制振動
上層制御	1次卓越	釧路沖地震 (千代田大橋)
中層制御	2次卓越	
下層制御	3次卓越	

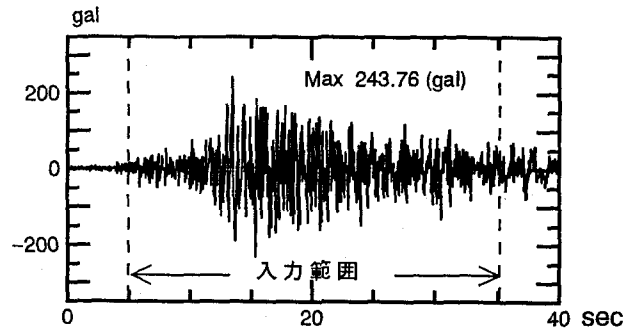
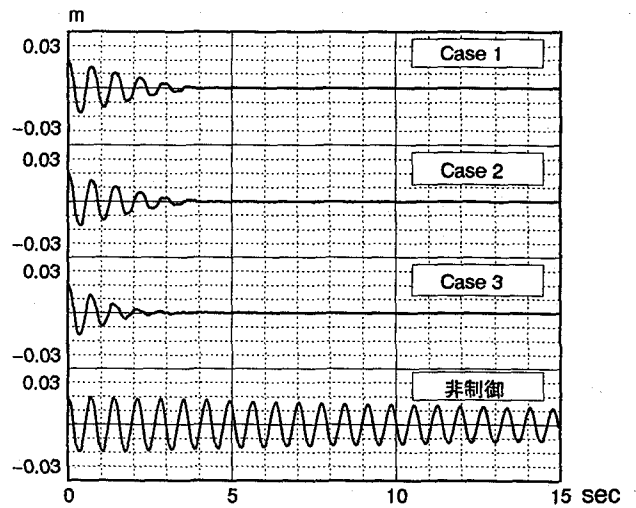


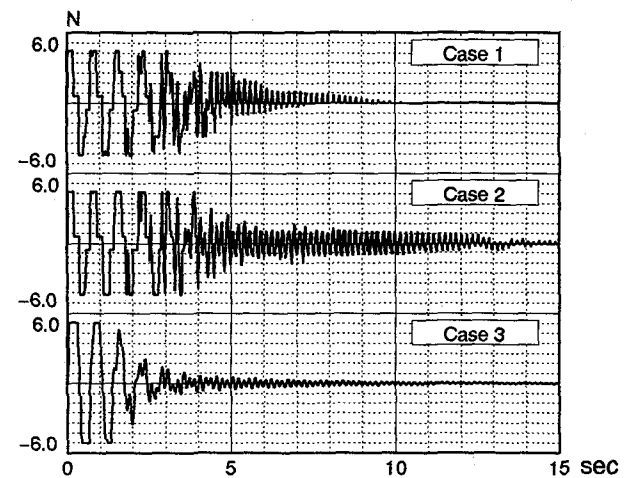
図-7 入力地震波

表-5 各モードによって設定した $|v_{\max}|, |a_{\max}|$ の値

	$V_{\max}$ (cm/sec)		$a_{\max}$ (cm/sec ²)	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
1次モード	0.64	0.91	217.1	13.6
2次モード	0.29	1.00	435.5	15.0
3次モード	0.38	0.65	140.5	14.3

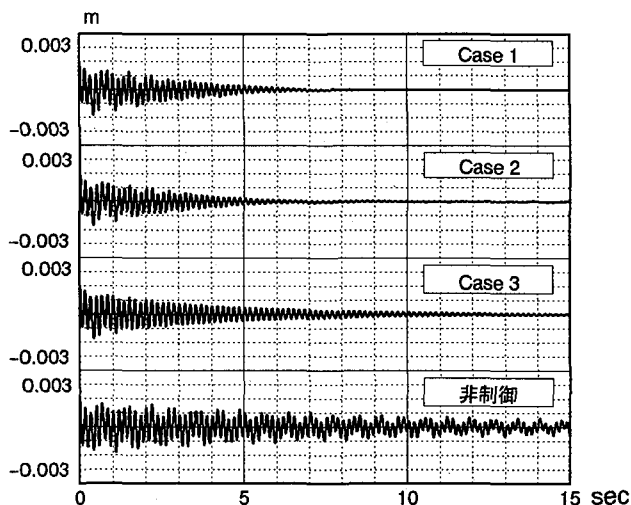


(a) 応答変位

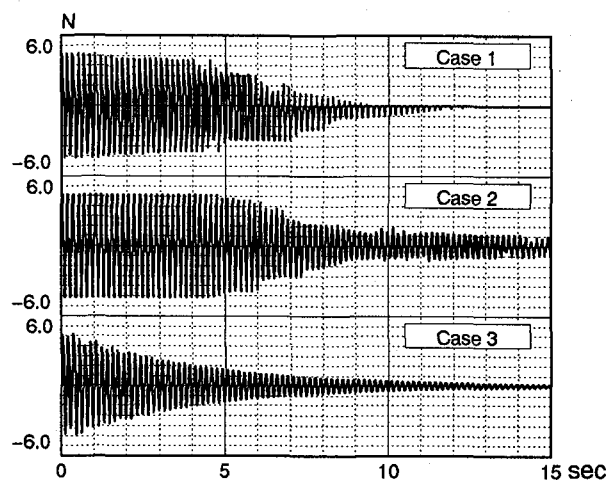


(b) 制御力

図-8 減衰自由振動に対する解析結果
(上層制御、1次卓越)

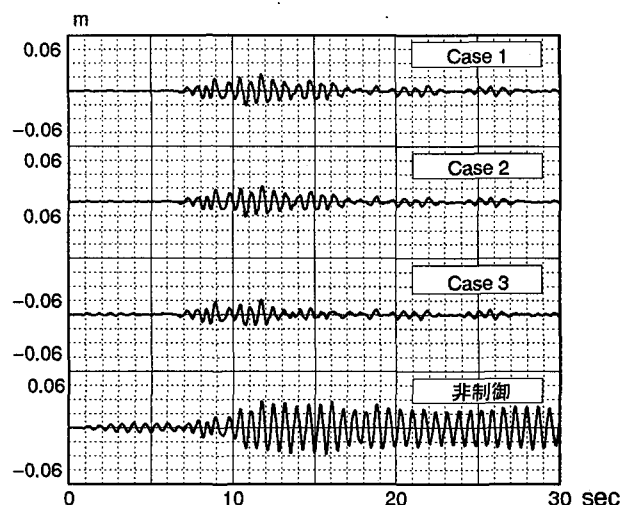


(a) 応答変位

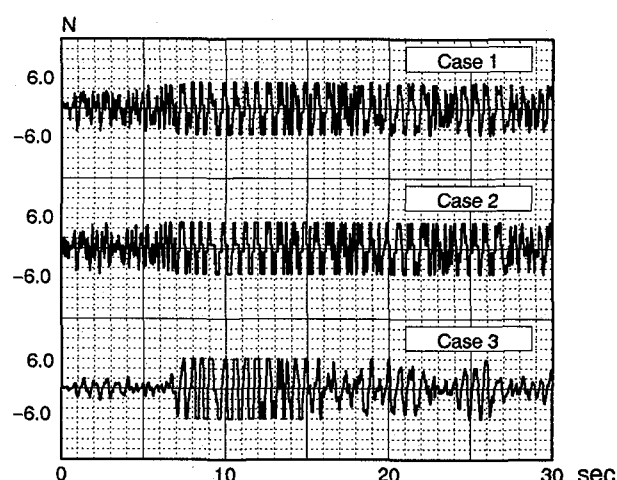


(b) 制御力

図-9 減衰自由振動に対する解析結果
(上層制御、3次卓越)



(a) 応答変位



(b) 制御力

図-10 強制振動に対する解析結果
(上層制御)

具体的には、Case 1 では約 8 秒程度で振動が抑制されているのに対し、Case 2 ではおよそ 10 秒、Case 3 では約 14 秒間経過後にほぼ振動が停止することが認められる。特に Fuzzy 制御による 2 つの Case を比較すると、上層の振幅の大きい 1 次卓越の場合は、ほぼ同程度の制振効果が得られたが、振動数が高く、振幅も比較的小さい 3 次卓越の場合は人間の経験によってメンバーシップ関数の調整を行った Case 2 に比して、GA を適用した Case 1 の制振効果はかなり改善されており、GA による最適化が良い効果を発揮していることが容易に推定できる。この場合の制御力の特性も、1 次卓越とほぼ同様な傾向を有しているものと思われる。

次に、強制振動について考察を試みる。図-10(a)の応答変位から、最適制御、Fuzzy 制御ともに有効な振動抑制効果が発揮されているものと思われる。具体的には非制御時の最大応答変位に対して、制御時には 60% 程度まで振幅が低減された。まず、Fuzzy 制御を行った、Case 1 と Case 2 では両者とも同程度の制振効果が認められる。また、制御理論の相違で比較すれば、制御開始後 10 秒程度までは Fuzzy 制御の方が効果的で、

10～20 秒程度の主要動の範囲では最適制御が勝り、それ以降はほぼ同程度の効果になっていると考えられる。この理由としては、制御力の最大値が挙げられる。Fuzzy 制御の場合、メンバーシップ関数の最大値で 6N と設定したため、重心法で確定値を求める際に最大値が 5.5N 程度となり、このため大きい制御力が必要な主要動部分において、有意な差が生じるものと思われる。また、卓越する振動モードが 1 次であることも原因の 1 つであろう。

この場合の制御力の出力結果について着目すると、図-10(b)に示すように、1 次卓越等と同様に、最適制御においてはフィードバックされる状態量が変位と速度であることから、初期の制御力の出力履歴は応答変位の履歴の影響を受け、応答変位特性に対応した制御力の出力特性を示すものと考えられる。Fuzzy 制御については、フィードバックされる状態量が加速度と速度であるために小さいレベルの応答変位でも、応答加速度の履歴に敏感に反応して変動の激しい制御力の出力特性になると推定される。なお、Fuzzy 制御の 2 つの Case では、初期の制御力において、Case 1 は制御力が最大値を出力することな

く、ある程度の余力を残しつつ制御力を出力しているのに対し、Case 2 は、最大の制御力を出力している。これは、1 次および 3 次の解析結果と同一の理由と考えられ、強制振動の場合も自由振動と同様に GA の適用は非常に有効であると考えられる。

4. 振動制御実験

4. 1 実験方法

実験は図-1 の実験供試体の上層部に外力 (147.0N) を作用させることにより初期変位 (上層部で 5.2cm) を与え、その後の自由振動に対し、最上層に設置したアクチュエーターによって制御力を発生させることにより実施した。

前述のとおり、本研究では Fuzzy 制御を行う際の状態量は制御力を作用させる層の加速度と速度を、最適制御を行う際にはそれぞれの層の速度と変位を用いて制御力を算出している。実際には、それぞれの層に設置してある加速度センサー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行い、時刻 t の応答速度、応答変位を逐次求めている。最適制御の場合は、得られた応答速度および応答変位に直接ゲイン F_s を乗じて制御力を計算し、また、Fuzzy 制御の場合、制御則は制御時間刻み Δt の高速化を考慮して 9 規則を採用することとした。サンプリング周波数はパソコン NEC PC-9821B (クロック周波数 60MHz) を用いた場合、両制御理論とも最大 500Hz 程度まで可能である。

アクチュエータに関しては、重錘を直流サーボモーターで駆動する形式を用いている。重錘の重量は構造物自重の約 1% である 0.7kg とし、この重錘に対し加速度で約 500gal 程度の制御力を発生させることができる。周波数特性等に関しては、まずゲインはおおよそ 50Hz までほぼ一定である。また、制御時間遅れについては、約 15Hz まではおおよそ 0.03sec、15~40Hz の範囲では約 0.01sec 程度であり、50Hz 以上において急激に増大する傾向を有している。

具体的な実験方法は、まず実験供試体の各層に取り付けた加速度計によって測定された応答値を動ひずみ計で増幅し、A/D 変換ボードを介して直接パソコンに入力する。パソコン内では、得られたデータより数値積分、状態量の Fuzzy 集合化、Fuzzy 推論、卓越モード判別、及び制御力の算出をソフトウェアで行い、アクチュエーターの作動命令はプリンタポートを利用して出力し、サーボコントローラーを介してアクチュエーターを作動させ、必要な制御力の発生を行なっている。図-11 に振動制御システム概略図を示す。

4. 2 実験結果

以上のような実験装置を用いて自由振動に対する制振実験を行った。なお、サンプリング周波数は 100Hz とした。図-12 に最上層で記録した応答加速度を示す。図-12 中の“Case 1”等は前章のそれと同様である。

実験結果より、非制御時と制御時の応答加速度波形を比較すると、Fuzzy 制御に GA を適用した Case 1 および最適制御理論による Case 3 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。しかし、人間の経験に

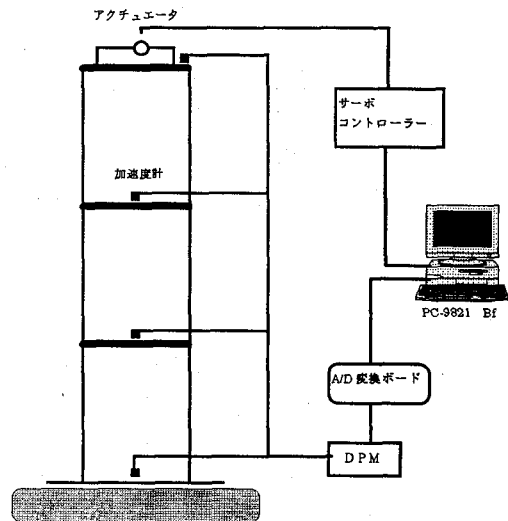


図-11 振動制御システム概略図

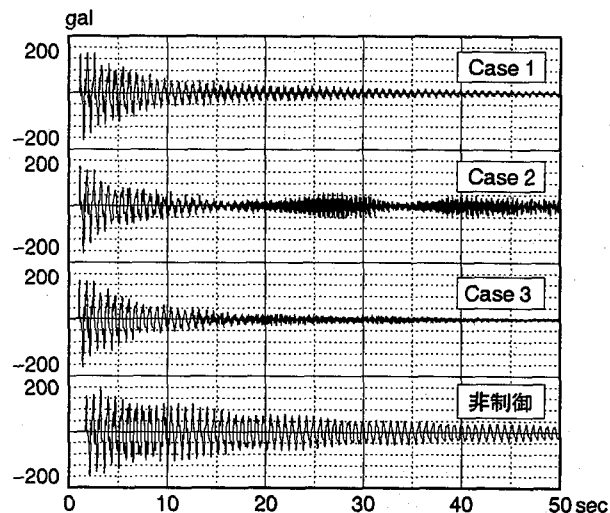


図-12 実験結果

よってメンバーシップ関数を調整した Fuzzy 制御である Case 2 に関しては、制御開始後おおよそ 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。

まず、Case 1 と Case 3 に関しては、前章の解析とほぼ同様な傾向が認められる。すなわち、解析において Case 1 は、3 次の振動成分に対して制振効果が高く、Case 3 は 1 次の振動成分に対して効果的である。実験結果から、制御開始後 15 秒以降に着目すると、Case 1 では 1 次の成分が残留し、Case 3 においては 3 次成分が残留していることがわかる。一般に、3 次等の高次モードは 1 次モードに比して有効質量は小さく、仮に高次モードが残留した場合、低次モードよりも比較的速やかに減衰することが知られている。したがって、Case 3 が、Case 1 よりもやや有利な実験結果となることは、解析からも十分に予想可能であり、よって本実験結果は解析結果を非常に良く反映していると思われる。

また Case 2 については、前述のとおり、制御開始後 15 秒程

度までは Case 3 と同様な振動抑制効果が得られたが、その後残留した高次の振動成分に対し制振が有効に行われず、非常に不安定な結果しか得られなかった。このことは人間の経験によるメンバーシップ関数の調整に限界があり、前出の表-5に示した $|a_{\max}|$ の値が過小なため、ある程度応答が抑制された後に、解析では考慮されていない応答加速度に含まれる白色ノイズ等に対し、制御力の発生が敏感に反応して構造物を加振したためと考えられる。

5. あとがき

以上のように本研究では、複数の振動モードを有する塔状構造物のアクティブ制振に対し、最適制御理論と Fuzzy 制御理論を適用し、解析と実験を実施してその制振効果について考察を行ったものである。また、Fuzzy 制御理論におけるメンバーシップ関数の最適化に GA を適用し、その妥当性について検討を加えた。

解析結果より、各振動モードの同時制振のために採用した、応答変位より振動モードを判別し、それに対応してメンバーシップ関数を切り替える手法は、有効な振動抑制効果をもたらすことが判明した。また、Fuzzy 制御におけるメンバーシップ関数の最適化に対する GA の適用性に関しては、人間の経験によるメンバーシップ関数の調整に比して、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、このような振動制御問題の効率化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。

さらに、本研究における Fuzzy 制御理論は、従来の最適制御理論とはほぼ同程度の制振効果が期待できると思われる。しかしながら、その制振効果については若干の差異が認められた。自由振動の応答に対して最適制御理論を用いた場合、その変位応答は指数関数的な減衰特性を示し、また Fuzzy 制御理論を適用した場合、その応答振幅は直線的に減衰する傾向を有することが判明した。さらに地震波を入力した場合の解析結果に関しても、両理論ともに加速度、速度および変位の応答値に対し顕著な振幅の低減効果が発揮されているものと考えられる。

実験結果においても、GA を適用した Fuzzy 制御および最適制御理論はほぼ同程度の制御効果を発揮し、それらの応答特性も解析結果と同様の傾向を有することが判明した。しかしながら、人間の経験によってメンバーシップ関数の調整を行った場合に関しては、不十分な結果しか得られなかった。このことは、人間の経験のみで Fuzzy 制御を行うことの限界を示すものであると考えられ、したがって、実験からも GA の適用が極めて有効な手法であることが確認できたと考えられる。

最後に、実験に際して尽力いただいた北海道大学工学部 及 川 昭夫技官ならびに三菱重工業 (株) 今井 敦史氏 (研究当時北海道大学工学部土木工学科 4 年生) に対しここに記して深い謝意を表すものである。

なお本研究の 1 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) 米田昌弘、岡林隆敏、川谷充郎：交通振動制御の可能性、第 2 回振動制御コロキウム PART A, pp.185-210, 1993.
- 2) 家村浩和、谷田宏次、野波健蔵、佐藤忠信、鎌形修一：構造物のアクティブコントロール、振動制御コロキウム PART A, pp.61-89, 1991.
- 3) 岡林隆敏：橋梁交通振動のパッシブ制御とアクティブ制御、橋梁交通振動コロキウム論文集 PART A, pp.121-131, 1995.
- 4) 藤元一栄、岡林隆敏、石松栄治、河角省治：構造物の Fuzzy 振動制御に関する実験的研究、土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.522-523, 1992.
- 5) 石松栄治、岡林隆敏、藤元一栄、河角省治：不規則外力を受ける構造物の Fuzzy 振動制御、土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.522-523, 1992.
- 6) 寺野寿朗監修：実用ファジィ制御技術、社団法人 電子情報通信学会、1991.
- 7) 寺野寿朗、浅居善代、菅野道夫：ファジィシステム入門、オーム社、1987.
- 8) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.
- 9) 杉本博之、鹿 麗、山本洋敬：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究、土木学会論文集 No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 10) 近田康夫、橋謙二、城戸隆良、小堀為雄：GA による既存橋梁の補修計画支援の試み、土木学会論文集 No.543/I-36, pp.281-283, 1996.
- 11) 白石昌武：入門現代制御理論、啓学出版、1987.
- 12) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.
- 13) インターフェース 9 月号、CQ 出版社：pp.75-179, 1993.
- 14) 小幡裕幸：Mathematica DSP と制御、TOPPAN, 1992.
- 15) 小幡卓司、林川俊郎、桑島正樹：歩道橋の振動使用性に関する一考察、構造工学論文集 Vol.39A, pp.793-799, 1993.
- 16) 斉藤慎吾、小幡卓司、及川昭夫、林川俊郎、佐藤浩一：Fuzzy 制御理論を用いた構造物のアクティブ制振に関する解析的研究、土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.1256-1257, 1994.
- 17) 小幡卓司、斉藤慎吾、及川昭夫、林川俊郎、佐藤浩一：Fuzzy 制御理論を用いた構造物のアクティブ制振に関する実験的研究、土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.1258-1259, 1994.
- 18) 小幡卓司、下田和敏、林川俊郎、佐藤浩一：塔状構造物のアクティブ振動制御理論に関する一考察、鋼構造年次論文報告集第 3 巻, pp.107-114, 1995.
- 19) L. デービス：遺伝的アルゴリズムブック、森北出版、1994.
- 20) 岡南博夫、古田均、金吉正勝、田中洋：ファジィ制御のチューニングに対する遺伝的アルゴリズムの応用、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集, pp.207-214, 1993.

(1996 年 9 月 6 日受付)