

I-53

可変剛性型制振システムにおける Fuzzy 制御理論の適用に関する一考察

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司
 北海道大学大学院工学研究科○学 生 員 宮森 保紀
 北海道大学大学院工学研究科 学 生 員 井上 圭介
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐藤 浩一

1. まえがき

土木構造物において、交通荷重や風等の不規則外力による振動に対してその安定性の向上を図ることは、構造物の施工性、使用性、耐風安定性および耐久性を改善する上で、極めて重要であると考えられている。これらの問題についての改善手法は、従来では構造物の断面形状を変化させたり、剛性を付加するなどの手法によって対処する場合が大半であるが、構造物に何らかのデバイスを設置することによって振動制御を行うおうとする方法が次第に実用化されつつある。

橋梁構造物の振動制御はパッシブ方式とアクティブ方式に大別される¹⁾。アクティブ方式については、複数の振動モードにもある程度対応が可能であることから、吊橋や斜張橋の主塔等における、主に水平振動に対する制御の実施例は数多く報告されている²⁾。一方、一般の橋梁における交通振動等に起因する鉛直振動のアクティブ制振の研究例は比較的少ない^{3),4),5)}。これらの研究においては、構造物に設置した重錘をモーターで駆動してその反作用で制御力を得る、いわゆる AMD 方式による制御力型システムが採用されている。しかしながら、制御力型システムにおいては重錘のストロークを十分に確保する必要があるため、通常の桁構造あるいはケーブル構造を有する橋梁等においては、制振装置の設置スペースの確保が極めて困難であり、このような場合、部材の断面性能をその応答に応じて変化させ、構造物の振動を抑制する可変剛性型システムによる制御が有効であると考えられる⁶⁾。ここで、アクティブ振動制御において適用すべき制御理論の検討は非常に重要な一項目である。その主なものとしては瞬間最適制御理論^{4),7),8)}のように制御対象を数学的にモデル化し、その数学的モデルに対し制御システムを構築する方法がある⁹⁾。これらに対し、主に人間の経験などの知識ベースを生かし、厳密な制御対象のモデル化を行わずに構造物の制御を行う論理型制御理論が提唱されており、これは Fuzzy 制御理論^{10),11)}等がその代表例として知られている。この Fuzzy 制御理論は、上記のように数学的モデルを必要としないため非線形性を有するシステムにおいても比較的容易に対応が可能であり、高いロバスト安定性を有することが知られている。このため可変剛性型システムへの適用は非常に有効であると考えられるが、十分な制振効果を発揮するための適切な制御規則とそれに対応したメンバーシップ関数の設計手法は、未だに確立されていないのが現状である。

本研究では、キャットウォーク、吊床版橋等を想定したケーブル構造を有する橋梁構造物の鉛直振動を対象として、制御理論に Fuzzy 制御理論を採用した可変剛性型システムを導入して振動制御シミュレーションを行い、その適用性、制振特性等に関して考察を行うことを目的とする。Fuzzy 制御の設計手法としては、メンバーシップ関数の設定等を、非連続関数からなる組み合わせ最適化問題と考え、その最適化あるいは効率化に遺伝的アルゴリズム^{11),12)} (Genetic Algorithm, 以下 GA と称する) を用いることにより^{11),12),13),14)}、Fuzzy 理論による制御系設計における汎用性、適用性に関して検討を試みた。また、数学的モデルを用いる一般的な制御手法の一つである瞬間最適制御理論^{4),7),8)}においても同時に解析を行い、各々の制御理論による振動抑制効果の差違についても考察を加えるものである。

2. 解析手法

2.1 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

本研究では制御対象として写真-1に示すような、キャットウォークあるいは吊床版橋を想定したケーブル構造を有する実験供試体を製作し、その断面諸元、支間長等のデータを用いて解析を行った。供試体の主な諸元は、支間長 1995mm、幅員 200mm、サグ 60mm、



写真-1 実験供試体

Consideration on Applicability of Fuzzy Control Theory on Adjustable Stiffness System

by Takashi OBATA, Yasunori MIYAMORI, Keisuke INOUE, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

初期張力 137.2N である。構造物のモデル化については図-1 に示すような 2 次元の 5 質点系モデルを採用し、解析に先立ち固有振動解析を実施して振動特性を把握した。その結果を表-1 に示す。表-1 から、比較的近接した固有振動数を持つ振動モードが認められ、ケーブル構造物特有の振動特性を有していることがわかる。また、図-2 は固有振動解析から得られた各振動モードにおけるモード形状である。解析モデルの減衰マトリックスはレーレー減衰マトリックスを用い、その 1 次および 2 次の減衰定数は実測値を用いることとし、実験供試体の減衰自由振動実験から減衰定数を 1 次 0.1%、2 次 0.117% とした。また、可変剛性型システムにおける制御力の付加は、制御対象のケーブル張力を直接変化させることにより、構造物の全体剛性を逐次変化させている。これによる非線形性に対応するため、時刻歴応答解析は修正荷重増分法を用いたニューマーク β 法を採用した。この際ニューマーク β 法における係数 β は 0.25、時間刻みは $\Delta t = 0.01 \text{sec}$ を用いている。

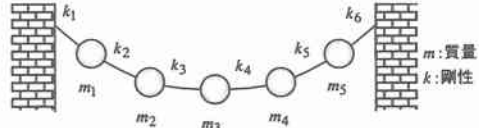


図-1 解析モデル

表-1 振動特性一覧表

振動モード	1st	2nd	3rd	4th	5th
固有円振動数 (rad/sec)	27.49	32.55	42.91	55.46	69.81
固有振動数 (Hz)	4.375	5.181	6.830	8.827	11.11
固有周期 (sec)	0.229	0.193	0.146	0.113	0.090
有効質量率 (%)	1.13	73.01	25.30	0.11	0.45

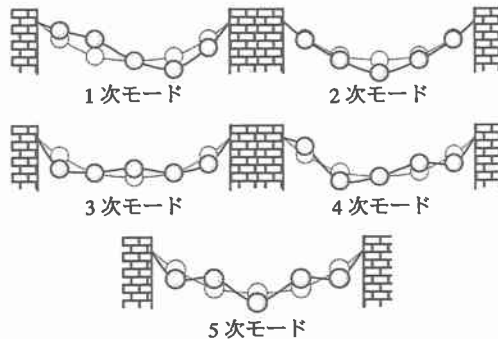


図-2 固有振動モード

2. 2 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。本研究では、注目する質点の応答速度、応答加速度ならびに制御張力をパラメータとした前件部 2 変数、後件部 1 変数からなる以下のような推論規則を 25 規則用いて解析を実施した¹³⁾。

推論規則例

1: もし加速度が負で速度が負ならば

制御張力は正で大

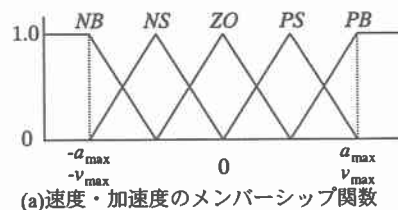
IF a is NB and v is NB THEN u is PVB

2: もし加速度が負で速度が零ならば制御張力は零

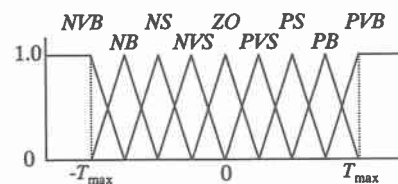
IF a is NB and v is ZO THEN u is ZO

図-3 に速度、加速度および制御張力のメンバーシップ関数を、表-2 に今回用いた 25 規則の場合の規則表を示す。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。

前述のように、Fuzzy 制御理論による制振効果はメンバーシップ関数の設定に大きく依存すると考えられ、特にメンバーシップ関数の最大値、 $|v_{\max}|, |a_{\max}|$ の設定は観測された状態量に対する制御力の発生感度に直接大きな影響を与えることが知られている。本研究においてはこの $|v_{\max}|, |a_{\max}|$ の設定に GA を適用して最適化を試みた^{13), 14)}。また、比較のため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た。



(a)速度・加速度のメンバーシップ関数



(b)制御張力のメンバーシップ関数

図-3 メンバーシップ関数

表-2 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NVB	NB	ZO	PB	PVB
NS	NB	NS	ZO	PS	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PS	ZO	NS	NB
PB	PVB	PB	ZO	NB	NVB

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

一般に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比較的困難であると考えられている。そこで本研究ではこの現象にある程度対応するため、全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中で最大のものをある時刻 t における制御張力とすることとした。その理由として、各質点で観測された状態量あるいは計算された制御張力の大小関係は、それぞれの時刻 t における卓越モードの情報にある程度含んでいるものと考えられるためである。

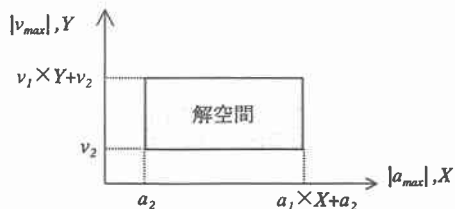


図-4 解空間

2. 3 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

GA の適用に際してしばしば問題となるのは、問題のコード化および目的関数の設定である。本研究では、Fuzzy 制御理論における前件部のメンバーシップ関数の最大値 $|v_{max}|, |a_{max}|$ に対して、図-4 のような解空間を設定し、図中の X, Y を 12 ビットの 2 進数にコード化することで、各々の遺伝子列を表現することとし、一様乱数を用いて各個体毎にそれぞれ 2 組の遺伝子列を持つ初期集団を発生させた¹¹⁾。また、適応度を評価するための目的関数は、制御効果を直接的かつ簡便に判断するために各質点の応答変位に着目して、以下のような関数を用い、この評価関数 J_{GA} の値がより小さくなる個体を適応度の高いものとした。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^{1000} \left(\sum_{n=1}^3 |x_{ni}| \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 x_{ni} は i ステップ目における第 n 質点の応答変位である。なお、評価関数は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、制御開始後 10 秒間の応答変位に基づいて算出されている。具体的な計算過程は、選択にはルーレット戦略を、交叉には 2 点交叉を用い、突然変異に関しては 2 進数で表現されている遺伝子列に対し、定められた確率に基づいて直接遺伝子座を操作して行った。また初期集団は 30 個体、交叉率は 0.5、突然変異率は 0.07 とし、収束判定は最良線列が全個体の 30% に達した時点で計算を終了することとした。

2. 4 瞬間最適制御理論

瞬間最適制御理論とは、本来予知が不可能である構造物に対する外乱のうち、観測可能な外乱情報を積極的に用いることを目的として、評価関数を各ステップごとに設定して最適化を行い、その都度状態量に対する制御ゲインを計算し、制御を行う手法である^{4), 7), 8)}。

一般に可変剛性型システムを導入した場合の多自由度系の運動方程式は、以下のようになる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{L}^T \mathbf{V}(t) \mathbf{L}) \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックスおよび剛性マトリックスであり、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトル、 $\mathbf{V}(t)$ は可変剛性マトリックス、また、 $\mathbf{L}$ は可変剛性配置マトリックスである。可変剛性値の算出に関しては、式(2)の左辺最終項の一部を可変剛性ベクトルすなわち可変剛性値 $\mathbf{v}(t)$ と、可変剛性装置を接続した質点の、自由度間における相対変位を対角要素に持つマトリックス $\mathbf{F}(t)$ を用いて置換する。さらに制御における可変剛性値の算定は、実際の制御時より 1 ステップ前の応答の情報を用いて近似的に表現する。これらによって以下の式を得る。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) + \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t-1) \mathbf{v}(t) = \mathbf{f}(t-1) \dots \dots \dots (3)$$

式(3)を変形することにより、次のような状態方程式を得ることができる。

$$\mathbf{x}_s(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_s(t-1) - \mathbf{B}(t-1) \mathbf{v}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}(t-1) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\mathbf{x}_s(t)$ は状態ベクトル、 $\mathbf{A}$ はシステムマトリックスを表し、 $\mathbf{B}$ および $\mathbf{D}$ に関しては、それぞれ制御力配分マトリックス、外力配分マトリックスである。

上記の状態方程式から、重みマトリックス $\mathbf{Q}$ および $\mathbf{R}$ を介した状態ベクトルと制御力ベクトルの 2 次形式の和で構成された、以下に示す式(4)のような評価関数 $J(t)$ を用いて、これが最小になるような可変剛性

ベクトルを式(6)を用いて求めることができる。

$$J(t) = \mathbf{x}_s^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{v}(t) \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$\mathbf{v}(t) = [\mathbf{R} + \mathbf{B}^T(t-1) \mathbf{Q} \mathbf{B}(t-1)]^{-1} [\mathbf{B}^T(t-1) \mathbf{Q} \{\mathbf{A} \mathbf{x}_s(t-1) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t-1)\}] \cdots \cdots \cdots (6)$$

なお本研究においては、状態ベクトル $\mathbf{x}_s(t)$ は構造物の応答変位、応答速度ならびに加速度を用いることとした。以上のようにして、可変剛性ベクトル $\mathbf{v}(t)$ を可変剛性マトリックス $\mathbf{V}(t)$ に代入し、Fuzzy 制御理論を用いた場合と同様に制振シミュレーションを実施した。

3. 各制御理論による時刻歴応答解析およびその考察

以上のようにして、本研究では瞬間最適制御理論および Fuzzy 制御理論を用いて振動制御シミュレーションを行った。解析は自由振動ならびに強制振動について行い、自由振動に関しては、構造物の低次の振動モードにおける有効質量率を考慮して1次～3次モードの固有振動数を持つ正弦波を5秒間入力し、入力終了直後に制御を開始することとした。入力波の最大値は、加振終了時の最大変位がおおよそ15mmとなるように調整を行った。また、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加速度波形を用いている。制御張力の最大値は実験供試体におけるアクチュエータのストロークを考慮して、最大±30.4Nとして解析を行った。解析ケースの一覧を表-3に示す。また、上記の入力波の固有振動数に応じて、それらに対応する解析結果を、例えば「2次卓越」、「3次卓越」等と称することとする。なお、Fuzzy 制御については、前節において GA および人間の経験によって求めたメンバーシップ関数をデータとして入力し、時刻歴応答解析を行なった。表-4 はそれぞれのメンバーシップ関数における $|v_{max}|, |a_{max}|$ の値である。

以上より得られた時刻歴応答解析の一例として、2次卓越の場合における各 Case の支間中央点の応答変位と制御張力の履歴および応答変位のフーリエスペクトルを図-5 に、3次卓越における支間 1/6 点の応答変位、制御張力と応答変位のフーリエスペクトルを図-6 に示す。

まず、2次卓越における場合に着目すると、図-5 から Fuzzy 制御理論に GA を適用した Case 1 の場合が最も制振効果が高いと判断できる。図-5(a)の応答変位からは、Case 1 では制御開始後おおよそ4sec 弱で十分に振動が抑制されているのに対し、Case 2 では約7sec、また Case 3 ではおおよそ5secを必要としていることがわかる。瞬間最適制御理論を用いた Case 3

表-3 解析ケース

	制御理論等
Case1	GA を用いた Fuzzy 制御理論
Case2	人間の経験による Fuzzy 制御理論
Case3	瞬間最適制御理論

表-4 $|v_{max}|, |a_{max}|$ の値

mode	$v_{max}(\text{kine})$		$a_{max}(\text{gal})$	
	Case1	Case2	Case1	Case2
1st	1.43	3.00	241.59	50.00
2nd	5.00	30.00	60.00	500.00
3rd	7.59	10.00	246.29	300.00

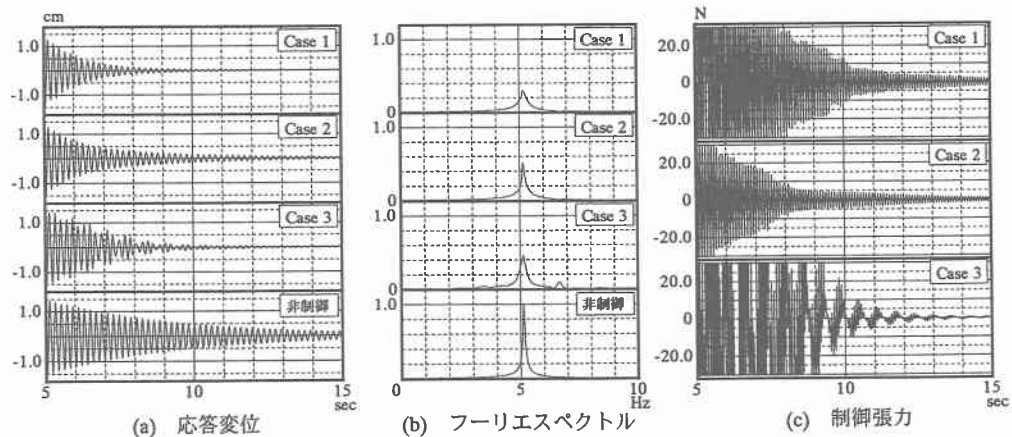


図-5 解析結果 (2次卓越)

では、制御を行うことにより3次モードが生じており、スビルオーバー等の問題点を考慮すると好ましくない結果が得られた。また、図-5(b)のフーリエスペクトルにおいても、応答変位と同様にそのピーク値から明らかに Case 1 の制振効果が優れていると考えられる。可変剛性型システムの特徴である非共振化に関しては、非制御時における固有振動数に比較して判然としないが、これは本解析では入力波が単一の固有振動数しか持たないため、これが制御張力の出力履歴に影響を与え、特に Case 1 および Case 2 において正負がほぼ釣り合ったものになっていることが主な原因と考えられる。この制御張力の出力履歴に着目すれば、まず Case 1 と Case 2 に関しては表-4 のメンバーシップ関数の最大値に依存しており、これが直接制振効果に影響を及ぼしているものと判断できる。また Case 3 については、制御開始後 4.5sec 程度まで常に最大の張力を出力し続けており、その制御効率は Fuzzy 制御に比してかなり低いものと思われる。

次に、図-6 に示される3次卓越の場合においても2次卓越の場合とほぼ同様の傾向を有することが確認できる。ここで、Case 3 については2次卓越のように他の振動モードが励起されるような現象は生じていない。このことは、瞬間最適制御理論を可変剛性型システムに適用した場合、その振動抑制効果が卓越する振動モードによってある程度大きな影響を受けるものと推定される。制御理論による制振特性の差違に関しては、Fuzzy 制御の場合は振幅の減衰過程が直線的であるのに対し、瞬間最適制御では指数関数的なものとなっており、これらの傾向は著者らの従来の研究¹³⁾と一致する結果となっている。

さらに強制振動に対する解析結果について考察を加えれば、図-7(a),(b)より Case 1 が最も高い制振効果を示していることがわかる。Case 1 および Case 2 においては、Case 3 のように3次モードを加振するような現象は生じていないため、本研究で採用した全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中の最大のものをある時刻 t における制御張力とする方法は、良好な効果を上げているものと思われ、ランダムな加振にも十分に対応が可能であるものと推定できる。

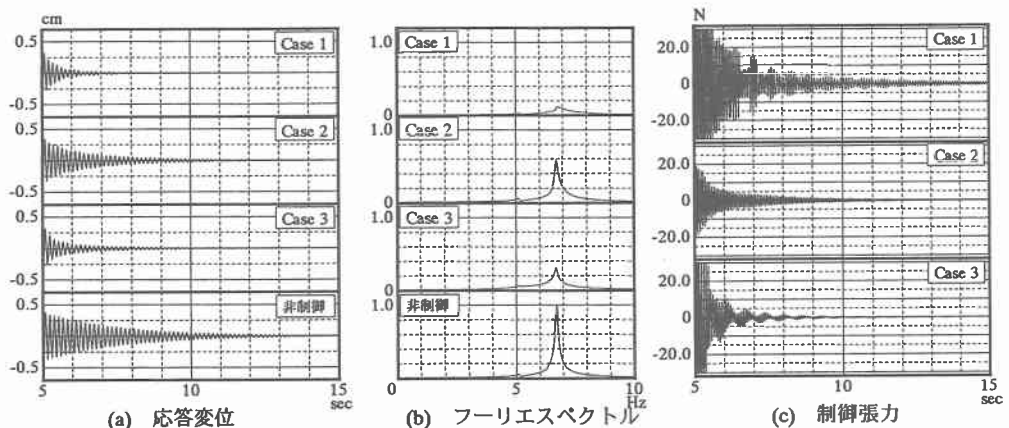


図-6 解析結果 (3次卓越)

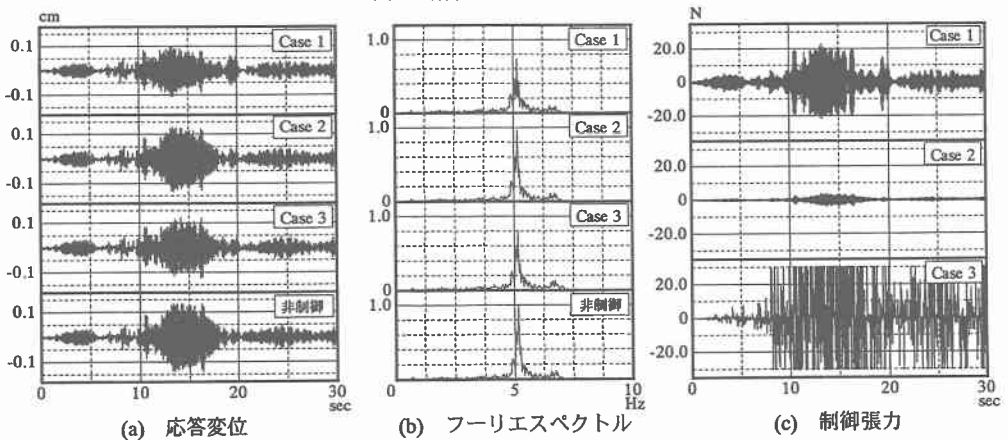


図-7 解析結果 (強制振動)

以上より、Fuzzy 制御理論は可変剛性型システムのような非線形制御系に対して十分に適用が可能であると思われる結果が得られた。また、GA によるメンバーシップ関数の最適化は、自由振動の場合の解析結果も含めて、十分な適用性を持つものと判断でき、Fuzzy 制御理論を用いた制御系設計における有効な一手法であると考えられる。

4. あとがき

以上のように本研究では、ケーブル構造を有する橋梁建造物の鉛直振動を対象として、制御理論に Fuzzy 制御理論を採用した可変剛性型システムを導入して振動制御シミュレーションを行うことにより、その制振効果等について考察を行った。Fuzzy 制御の設計手法としては、メンバーシップ関数の最適化あるいは効率化に GA を用いることにより、Fuzzy 理論による制御系設計における汎用性、適用性に関して検討を試みた。

解析結果からは、GA によって最適化された Fuzzy 制御理論を適用した場合が最も効果が高く、その制振特性は直線的な振幅の減衰過程が得られ、著者らの従来の研究と一致することが確認された。また、強制振動に対する解析結果から、本研究で用いた全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中で最大のものをある時刻 t における制御張力とする方法は、良好な効果を上げているものと考えられる。また、可変張力の出力履歴からは、瞬間最適制御理論と比較して Fuzzy 制御理論を採用した場合の解析結果が制御効率において、優れていることが確認された。

また、Fuzzy 制御理論の設計に際して、GA によるメンバーシップ関数の同定は、人間の経験によるメンバーシップ関数の調整に比して、より簡便に有効な制振効果を得られることが判明した。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有効な手法であると思われる。

以上の結果より、比較的近接した固有振動数を有するケーブル構造物の振動制御に対して、論理型制御である Fuzzy 制御理論を用いた可変剛性型システムを適用することにより、複数の振動モードの同時制振が可能であると考えられ、非共振化も期待できることから、このような構造物の制御に関して非常に有効な手法の一つであると考えられる。

【参考文献】

- 1) 家村和宏、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、振動コロキウム PART A, pp.61-89,1991.
- 2) 辰巳正明、秦健作、大倉幸三、大西悦郎：明石海峡大橋主塔の制振対策、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.1-8,1993.
- 3) 岡林隆敏、岡部雅彦、角本周、梶川康男：歩行者による吊床版橋振動のアクティブ振動制御、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.167-174,1993.
- 4) 岡林隆敏、尾口慎也、加賀俊明：各種フィードバック制御則による道路交通振動制御のアクティブ振動制御、構造工学論文集、Vol.42A,pp.731-738,1996.
- 5) 川谷充郎、山田靖則、下野正人、清水計成、森淳彦：桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験、構造工学論文集 Vol.41A,pp.683-690,1995.
- 6) 小幡卓司、宅和大助、林川俊郎、佐藤浩一、井上圭介：可変剛性型システムを用いた吊床版橋のアクティブ振動制御に関する一考察、鋼構造年次論文報告集第 5 巻、pp.321-328,1997.
- 7) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.
- 8) Chang,C.C. and Yang,H.T.Y.: Instantaneous Optimal Control of Building Frames, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.120, No.4, pp.1307-1326, 1994.
- 9) 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.
- 10) 石松栄治、岡林隆敏、藤本一栄、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.524-525,1992.
- 11) 下田和敏、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、宅和大助：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、構造工学論文集 Vol.43A, pp.685-692,1997.
- 12) 杉本博之、鹿井 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.
- 13) 近田康夫、橘謙二、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.
- 14) 岡南博夫、古田均、金吉正勝、田中洋：ファジィアクティブ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.