

I-82 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

北海道大学工学部 学生員 下田 和敏  
 北海道大学工学部 正員 小幡 卓司  
 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ている。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る。アクティブ方式の場合、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が、アクティブ制振の実用化にはアクチュエーターの性能、制御理論など様々な問題を有する場合がある。

従来より、アクティブ制御理論は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、 $H^\infty$  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理論がある。

これらに対し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を使わずに構造物の制御を行う論理型制御があり、これには人工知能の応用、Fuzzy 制御などがある。一般に 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、非線形性を持つ制御対象の場合でも比較的有效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シップ関数、制御規則の構築に依存する。しかし、その汎用的な設計手法は確立してしておらず、制御を行う際に有効と考えられるメンバーシップ関数、制御規則の構築は人間の経験に委ねられている<sup>1),2)</sup>。

最近、学習、最適化の手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。GAは生物進化(選択淘汰、突然変異)の原理に着想を得た手法であり、得られた解の評価が可能であれば最適解を求めることができる。したがって、従来からある最適化の手法のように解の微係数を用いる必要はない。

本研究では Fuzzy 制御によりアクティブ制振におけるメンバーシップ関数の汎用的な設計手法を確立するために、GAを用いてメンバーシップ関数の最適化を試みた。具体的には、制御対象に複数の振動モードを有する塔状構造物とし、Fuzzy 制御理論と最適制御理論を用いて実験と解析を行った。これらの結果から制振効果の比較を行い、さらに Fuzzy 制御理論におけるメンバーシップ関数の最適化に関する適用性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. 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、図-1のような3層の塔状構造物を3質点系にモデル化し、解析を行うこととした。図-2に3質点系モデルを示す。構造物の振動特性を把握するために図-1のような実験供試体を制作し、

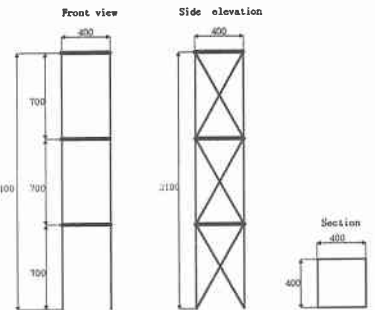


図-1 解析に用いた構造物

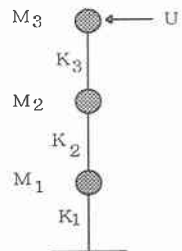


図-2 3質点モデル

Application of Fuzzy Control Theory on Active Control of Tall Building.

by Kazutoshi SHIMODA, Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

固有振動数、および減衰定数の測定を実施した。表-1に解析に用いるパラメータを、表-2に振動特性一覧表、また図-3に固有振動モードを示す。

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。

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} + \{U(t)\} \quad \dots \dots (1)$$

**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

ここで、**U(t)**は各制御理論によって求められた時刻  $t$  における制御力ベクトルである。多自由度系の時刻歴応答解析にはニューマークの  $\beta$ 法を採用した。時間刻みは 0.01(sec)、係数  $\beta$ は 0.25 とし、減衰マトリックス **C**にはレーレー減衰マトリックスを用いている。

### 2.2 最適制御理論 (最適レギュレータの設計)

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<sup>3)</sup>。

$$\dot{X}_s = [A]\{X_s\} + [B]\{U_s\} \quad \dots \dots (2)$$

$$\{Y_s\} = [D]\{X_s\} \quad \dots \dots (3)$$

$$\{U_s\} = -[F_s] \cdot \{X_s\} \quad \dots \dots (4)$$

$$J_d = \int_{t=0}^{\infty} (X_s^T Q_d X_s + U_s^T R_d U_s) dt \geq 0 \quad \dots \dots (5)$$

$\{X_s\}$  : 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<sub>s</sub>]** : 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を表す。制御力  $\{U_s\}$  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)のような評価関数が最小になるように式(4)に示すようなフィードバックゲイン  $[F_s]$  を求める<sup>4),5)</sup>。

ここで、 $Q_d, R_d$  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。本研究では式(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、 $Q_d$  を表-1に示すような質量、および剛性を用いて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 6.0 N と設定した。

### 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<sup>6)</sup>。制御規則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変数からなる直接法による Fuzzy 推論を採用した<sup>7),8)</sup>。本研究では図-6のような推論規則例を25組設定し、解析を行った。図-4に速度および加速度のメンバーシップ関数を、図-5に制御力のメン

表-1 解析に用いるパラメータ

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

表-2 振動特性値一覧表

	1次モード	2次モード	3次モード
$\omega$ (rad/s)	8.943	26.026	37.997
f (Hz)	1.423	4.242	6.047
T (s)	0.703	0.241	0.165
$\zeta$ (%)	0.36	0.25	—

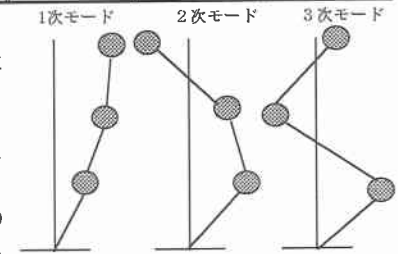


図-3 固有振動モード

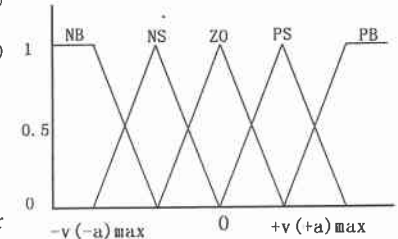


図-4 速度、加速度のメンバーシップ関数

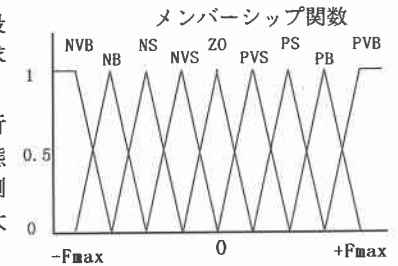


図-5 制御力のメンバーシップ関数

**規則例 :**

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 A and v is V THEN u is U

A : 加速度の Fuzzy 集合 V : 速度の Fuzzy 集合

U : 制御力の Fuzzy 集合

図-6 推論規則例

メンバーシップ関数を示す。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。

ここで、上層に制御力を作用させた場合、振動モードより、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予測される<sup>9)</sup>。

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振を行うものとした。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-5のメンバーシップ関数で  $F_{max}=6.0\text{ N}$  に設定した。

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

## 2. 4 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る。このGAは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する。

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、このような問題に応用するには非常に適した手法とすることができる<sup>10),11)</sup>。

GAの適用に際しては問題のコード化ならびに評価関数の設定がしばしば問題となる。本研究ではメンバーシップ関数の  $|v_{MAX}|$ 、 $|a_{MAX}|$  を遺伝子列で表現し、GAにより最適化を行い、それらのメンバーシップ関数を用いて時刻歴応答解析を行った。図-7にGAの適用方法を示す。

なお、選択(Selection)には適応度比例戦略を、交叉(Crossover)には2点交叉を採用した。

評価関数は構造物と制御力のエネルギー状態を表現するものとし、 $J_{GA}$  の値が小さければより有効な制振効果が得

$$J_{GA} = \sum \mathbf{X}' \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{X} + \sum \dot{\mathbf{X}}' \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{X}} + \sum |\mathbf{U} \cdot \mathbf{X}| \cdots (6)$$

**K** : 剛性マトリックス

**M** : 質量マトリックス

**X,  $\dot{\mathbf{X}}$**  : 各層の応答変位、応答速度を表すベクトル

**U** : 制御力ベクトル

られたと考え、式(6)のような評価関数を設定した。

## 2. 5 解析結果

表-4に示すような4ケースについて前述の最適制御理論とFuzzy制御理論を用いて時刻歴応答解析を行った。表-4において“上層制御”とは、制御力の作用位置を表している。また“自由振動”における“1

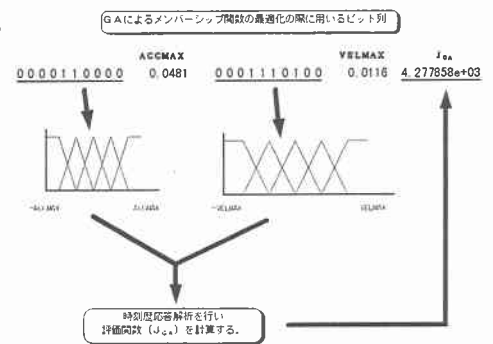
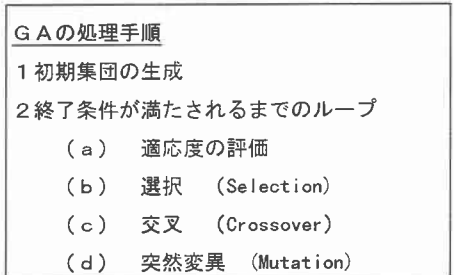


図-7 GAの適用方法

表-4 時刻歴応答解析解析ケース

	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)
	2次卓越	
	3次卓越	

次卓越”等においては1次～3次モードが卓越するような初期変位を設定し、その際の応答を解析した。

“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橋軸方向の加速度応答波形を最大加速度

100.0(gal)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。なお、Fuzzy制御についてはメンバーシップ関数における $|v_{MAX}|$ 、 $|a_{MAX}|$ の決定に関して2つの異なる手法を用いている。まず“Case 1”として前章において述べたGAを適用することにより得られた値と、次に“Case 2”として解析結果より人間の経験に基づき得られた結果を時刻歴応答解析に使用することとした。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。このことは解析結果に関してはあまり大きな影響を与えないが、実験において優位な差が生じることがわかった。これについては後章で触れることとする。

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”の場合の結果を図-8(a)、(b)に示す。なお、図-8中の“Case 3”は最適制御による解析結果である。

応答変位について比較すると(図-8(a)参照)、最適制御、Fuzzy制御ともに制振が有効に行われ4.5秒程度でほぼ停止していると考えられる。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分かる。またFuzzy制御を行った2つのケースを比較すると、自由振動について解析を行った場合、ほぼ同程度の制振効果が得られた。

制御力の出力履歴について着目すると(図-8(b)参照)最適制御の場合、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。しかし、Case 1とCase 2の出力特性は、若干の差異が現れている。GAを適用したCase 1は、10秒程度で制

表-5 各モードに対して設定した $|v_{MAX}|$ 、 $|a_{MAX}|$ の値

	$ v_{MAX} $ (cm/sec)		$ a_{MAX} $ (gal)	
	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	0.95	140.5	14.3

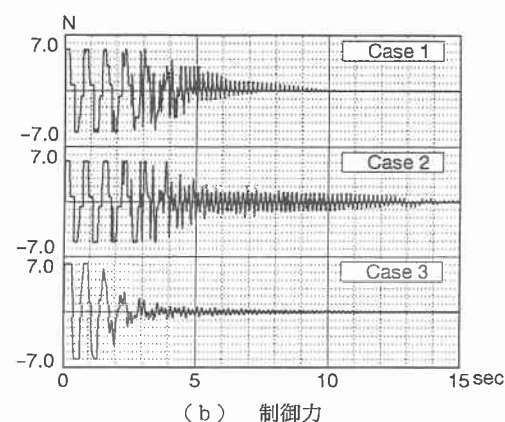
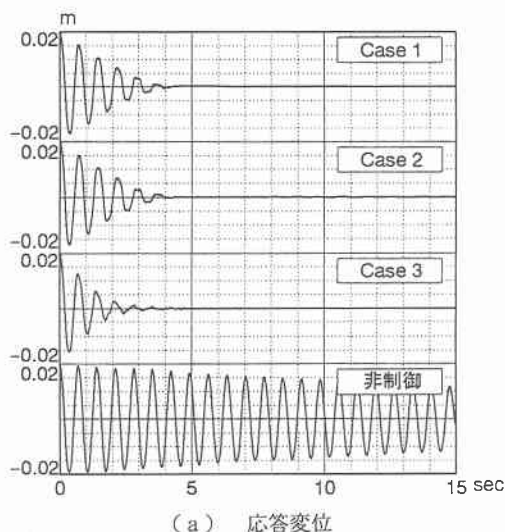


図-8 自由振動についての解析結果

御力が出力されなくなるのに対し、Case 2 で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する。よって、制御力によるエネルギーは Case 1 の方が小さく、したがってこのような問題に対する G A の適用は有効であると思われる。

また、“強制振動”についてもかなりの振幅抑制効果が認められた。具体的には非制御時の最大応答変位に対して、60%程度にまで振幅が低減された。

### 3. 制振実験ならびにその結果

#### 3. 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 制御を行う際の観測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  $t_n$  の応答速度、応答変位を逐次求めている。また、Fuzzy 制御の場合、制御則は制御時間刻み  $\Delta t$  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-9821Bf (クロック周波数 60Mhz) を用いた場合、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可能である。

具体的な実験方法は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、観測量の 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ー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に制御力を発生させる。図-9 に振動制御システム概略図を示す。

#### 3. 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-10 に最上層で記録した応答加速度を示す。図-10 中の“Case 1”等は図-8 (a) のそれと同様である。

実験結果より (図-10 参照)、非制御時と制御時の結果を比較すると、Case 3 (最適制御) が最も良い制振効果を認められた、その制振過程はおよそ 10.0 秒

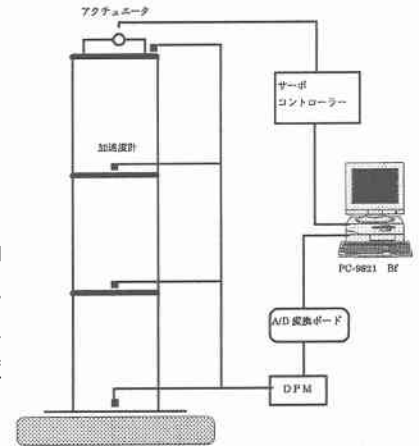


図-9 振動制御システム概略図

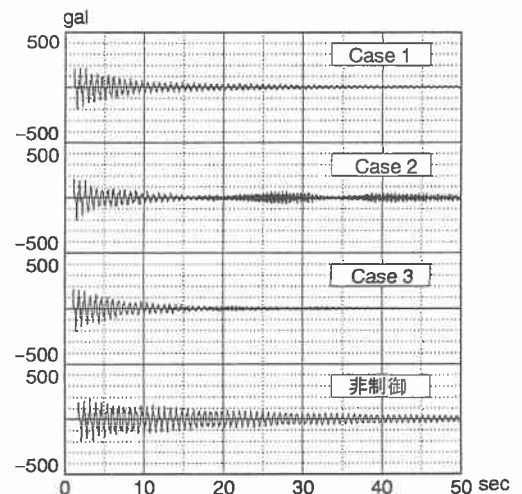


図-10 実験結果

間で振幅が1/4程度に抑えられ、制御開始約15.0秒間で1次の振動成分は消滅し、その後、残留した高次の振動成分に対して制御力が有効に作用するものと思われる。次に、Case 1の場合に関しては、時刻10秒程度まではCase 3と同様に振幅が1/4程度まで低減するが、その後、応答加速度は高次の振動成分に移行せず、そのまま1次の振動成分が残留するような制振特性が得られた。また、Case 2については制御開始後15秒程度までは、Case 3と同様な振動抑制効果を得られたが、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不安定な結果が得られた。このことは表-5に示す $|a_{MAX}|$ の値が小さく、応答加速度に対し制御力の発生が敏感に反応し、構造物を加振した為と考えられる。

#### 4. 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、解析と実験を行っ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、最適制御理論、Fuzzy制御理論と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、その減衰課程は指数関数的な特性を示し、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が認められた。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。

実験結果については、両理論とも制振を開始した初期の段階において、ある程度類似する制振効果が認められる。しかし応答加速度の振幅がある程度減少した後からは最適制御の方が優れた制振効果を発揮した。したがってFuzzy制御についてはメンバーシップ関数あるいは制御規則に何らかの改良の必要性があるものと考えられる。

また、Fuzzy制御における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。

最後に、実験に際し尽力いただいた北海道大学工学部 及川昭夫 技官ならびに同学部4年生 今井敦史氏に対しここに記して深い謝意を表すものである。

#### 【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 白石昌武：入門現代制御理論、啓学出版、1987.
- 4) インターフェース 9月号、CQ出版社：pp75-179,1993
- 5) 小野裕幸：Mathematica D S Pと制御、TOPPAN, 1992.
- 6) 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.
- 7) 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回年次学術講演会概要集第1部、pp.1256-1257,1994
- 8) 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実験的研究、土木学会第49回年次学術講演会概要集第1部、pp.1258-1259,1994
- 9) 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
- 10) L. デービス：遺伝的アルゴリズムハンドブック、森北出版、1994.
- 11) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.