

断面性能可変型セミアクティブ制御の土木構造物への適用について

Study on Applicability of Semi-Active Variable Stiffness and Damping Control on Infrastructures

北海道大学大学院工学研究科	学生員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北海道大学大学院工学研究科	正員	小幡卓司 (Takashi Obata)
北海道大学工学部土木工学科	○学生員	安達一憲 (Kazunori Adachi)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. はじめに

兵庫県南部地震により多くの土木構造物が損傷を受けたことから、大規模地震時における安全性の向上が求められており、また近年では構造物の大規模化あるいは構造形式の多様化に伴って、振動使用性や耐風安定性の確保といった各種の性能が要求されている。これらに対して、従来は断面形状を変化させたり部材剛性を増大させることによって構造物の性能を確保することが一般的であったが、上記のような手法では設計における自由度を著しく阻害し、大規模地震動などを想定した場合には、設計そのものが不可能になることがしばしばある。このような場合、土木構造物に何らかの振動制御手法を用いることは構造物の安定性あるいは使用性を向上させる有効な手段であると考えられており、現在さまざまな研究が行われている¹⁻¹¹⁾。

一般に土木構造物における振動制御手法はアクティブ方式とパッシブ方式に大別できる³⁾。パッシブ方式は制御装置への外部からのエネルギー入力や構造物の状態観測が不要であり、簡便な制御系で、ある程度の制振効果を期待できるが、設計時に想定した振動モードのみに制振効果が限られてしまう欠点を有する。一方、アクティブ方式は比較的広い振動数領域に対応することが容易で複数の振動モードの同時制振が可能であるが⁴⁾、出力できる制御力に制約があり、常に状態量の観測が必要であることなど、制御系が複雑であることから、土木構造物への適用は困難を伴うことがあると考えられる。

これらの問題点を解消あるいは軽減するものとして、最近ではセミアクティブ方式と称される制御手法についての研究が行われている⁵⁻⁹⁾。セミアクティブ方式は、構造物の剛性⁵⁾あるいは減衰⁶⁻⁹⁾を変化させることにより振動の抑制を行おうとするものが一般的である。この方法は構造物自体には制御力を加えないため、制御対象を加振するおそれがない安定性の高い手法と考えられている^{9), 10)}。また、構造物の応答量の大小に応じて制御装置への出力を切り替えることでも有効な振動抑制効果が得られることが知られているため、比較的簡便な制御系を構築することが可能である¹¹⁾。

これらを踏まえ、本研究では吊橋および斜張橋などの鋼製タワーを想定した3層塔状構造物¹²⁾に対して、断面性能可変型セミアクティブ制御による振動制御シミュレーションを実施する。制御手法は、構造物の頂部における1次モードの応答加速度を観測し、これが一定の基準値を超過した場合には中層に設置した制御装置を作動させて、構造物に剛性および減衰を付加するようなON-OFF制御を行うものである。このような制御手法では制御装置の動作を決定する基準値の設定が制振効果に極めて大きな影響を及ぼすと考えられるため、これを組み合わせ

最適化問題として扱い、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を適用してパラメータの最適化を行い、制御則を設計する¹³⁾。また、構造物の頂部における1次モードの応答加速度を観測し制御を行うことから、着目する振動数成分を抽出する必要がある。その方法として、観測されたデータに対してローパスあるいはハイパスフィルタを適用することで、所定のモードにおける応答加速度の抽出を行った。具体的な数値解析手法に関しては、制御に伴い構造物の剛性および減衰が常に変化するため、修正荷重増分法を用いたニューマーク β 法によって非線形時刻歴応答解析を行うものとする。

以上より、本研究は断面性能可変型セミアクティブ制御の土木構造物への適用に関して、振動制御シミュレーションによって、その制御効果およびGAを用いた制御系設計の妥当性について検討を行うものである。

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、写真-1に示すような吊橋や斜張橋などの鋼製タワーを想定した3層ラーメン構造の実験供試体を製作した。この実験供試体は、高さ2.1m、自重409Nで、中層に角鋼とオイルダンパーで構成された制御装置を有し、実験供試体に剛性と減衰を付加できる構造になっている。解析を行うにあたり、この実験供試体の断面諸元を用いて図-1のような3次元骨組モデルを構築した。まず、構造物の固有振動特性を把握するために、振動制御シミュレーションに先立ち、制御装置を作動させない状

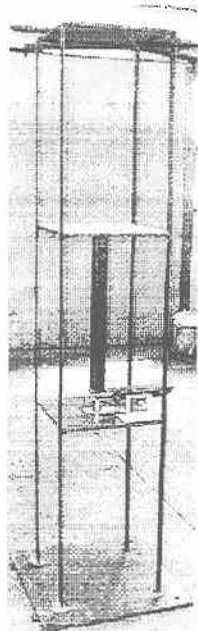
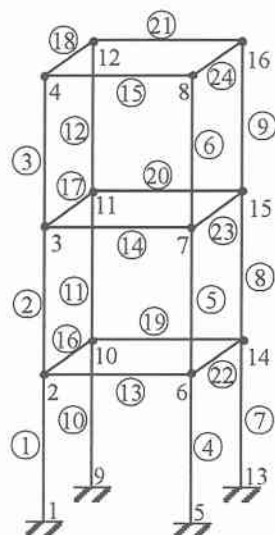


写真-1 実験供試体



1,2,...節点番号

①,②,...部材番号

図-1 解析モデル

態（以下、通常状態と称す）および作動させた状態（以下、作動状態と称す）において減衰自由振動実験および固有振動解析を行った。表-1 に実験および解析から得られた構造物の振動特性の一覧を示す。表-1 から通常状態、作動状態における実験値と解析値は、固有振動数および減衰定数ともにほぼ一致しており、実験供試体のモデル化は妥当であると思われる。また、作動状態の減衰定数が通常状態から 1%程度しか増加しておらず、制御装置の作動による減衰付加効果は比較的少ないものと思われる。

時刻歴応答解析については、一般に多自由度系の運動方程式を式(1)のように表現する。

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

ここで $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ および $\mathbf{f}(t)$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスおよび外力ベクトルであり、本研究では減衰マトリックスに質量比例型減衰を用いた。質量比例型減衰マトリックスにおける減衰定数は表-1 で示した実測値を用いている。時刻歴応答解析手法としては、修正荷重増分法を用いたニューマークβ法による直接数値積分法を採用し、時間刻みは $\Delta t=0.01\text{sec}$ 、係数βは 1/4 として解析を行った。解析は強制振動について行うものとし、入力加速度としては、1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震の際に、千代田大橋において観測された橋軸方向の加速度波形（最大 2.44m/sec^2 ）を用い、その最大加速度を 1.00m/sec^2 に変換して、解析モデルの各節点の水平方向に入力した。図-2 に入力加速度波形を示す。

2. 2 断面性能可変型セミアクティブ制御

断面性能可変型セミアクティブ制御は、構造物の減衰および剛性を変化させることにより振動制御を行おうとするものである。断面性能可変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、式(1)に制御装置の粘性減衰および剛性を用いた可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ と、可変剛性マトリクス $\mathbf{K}_v$ を導入して以下のように表すことができる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \{\mathbf{C} + \mathbf{C}_v\}\dot{\mathbf{x}}(t) + \{\mathbf{K} + \mathbf{K}_v\}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \cdots (2)$$

セミアクティブ制御は、式(2)における $\mathbf{C}_v$ ならびに $\mathbf{K}_v$ を構造物の応答に応じて逐次変化させることによって振動を抑制しようとするものである。本研究では、アクティブ制御で用いられるような複雑な制御理論を用いることなく制御を行うことを目的として、構造物の剛性と減衰を変化させることができる制御装置を設置し、構造物の応答に応じて通常状態と作動状態の 2 つの状態を切り替える ON-OFF 制御を行うこととした^{12), 13)}。このような制御系の設計は、構造物の固有振動特性に基づいて行うことが通常であり、比較的容易に設計が可能である。

制御系の設計に際しては、まず解析モデルの通常状態あるいは作動状態について予備的な時刻歴応答解析を行った。図-3 に解析モデル頂部における応答加速度のフーリエスペクトルを示す。図-3 から、通常状態と作動状態の 1 次モードの振動数に差が生じ、応答量も明らかに減少することから、通常状態と作動状態を切り替える基準値に関して、各状態の 1 次モードに着目することにした。さらにこれらの振動モードの応答加速度を抽出するために、ローパスあるいはハイパスフィルタによるフィルタリングを実施する。採用したフィルタは比較的低いフィルタ次数でもカットオフ特性が良好とされる IIR 型楕円フィルタであり、各フィルタのフィルタ係数に時刻

表-1 固有振動特性

(a) 通常状態				
	固有振動数 (Hz)		減衰定数 (%)	
	実験値	解析値	実験値	解析値
1st	1.95	1.95	0.88	0.88
2nd	6.64	6.63	0.31	0.35
3rd	10.06	11.04		

(b) 作動状態				
	固有振動数 (Hz)		減衰定数 (%)	
	実験値	解析値	実験値	解析値
1st	2.44	2.44	1.70	1.76
2nd	6.74	6.85	0.75	0.82
3rd	14.26	14.12		

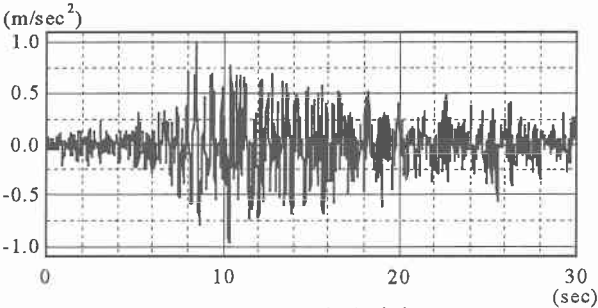


図-2 入力地震波

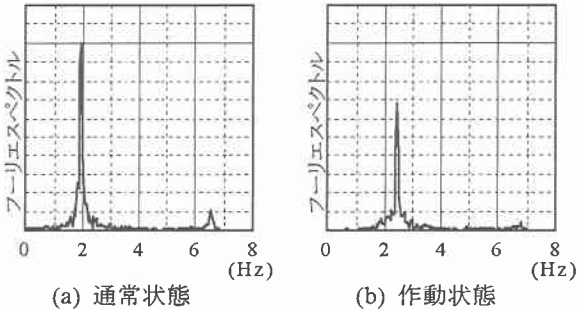


図-3 加速度応答スペクトル

歴応答解析におけるタイムステップ毎の応答加速度を乗じることによってフィルタリングを行う。制御装置の状態の切り替えはフィルタリングによって抽出した通常状態の応答加速度が基準値 a_1 を超過した場合に作動状態に切り替え、作動状態のフィルタリング後の応答加速度が基準値 a_2 を超過した際には通常状態に切り替えることとする。基準値 a_1 および a_2 の設定には、組み合わせ最適化問題に適用可能な最適化手法として知られる GA を用いることで、これらの値を効率的にかつ簡便に設定することを試みた。なお、本研究において具体的なフィルタの設計、GA による最適化および時刻歴応答解析などの数値解析は汎用数値解析プログラム MATLAB を用いている。

2. 3 GA による状態変更基準値の最適化

本研究で用いたような断面性能可変型制御システムにおいては、制御装置の状態変更を行う際の基準値の設定が制振効果に大きな影響を及ぼすと考えられる。これらの解の決定方法は確立しておらず、現状では経験的に求められる場合が多い。しかしながら、解に対する評価が可能な問題に対しては、GA の適用による最適解の検索

は非常に有効であることが知られている。GA は解くべき問題について、対象となる変数のコード化と評価関数の設定が可能であれば、問題の種類に関わらずそのアルゴリズムは汎用的に適用することができ、比較的簡便な方法で最適解の検索を行うことが可能である^{14), 15)}。以上から本研究においては、制御装置の状態変更基準値の決定に GA を適用することにより、制御系を効率的かつ簡便に設計することを試みた。

前述のように、GA の適用に際しては最適化を行う変数のコード化および評価関数の設定が重要な問題となる。コード化については、フィルタリング後の解析モデルの応答加速度に対する状態変更基準値 a_1, a_2 を、最適解の検索対象として 2 変数からなる解空間を設定した。これらの変数を 12 ビットの 2 進数にコード化することで、GA における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について 2 組の遺伝子列を有する初期集団を発生させた。

各個体の適応度を評価するための目的関数は、構造物のエネルギーに着目することとし、以下のような関数を設定した¹²⁾。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^{3000} (\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{x}^T \mathbf{K} \mathbf{x}) \cdots \cdots (3)$$

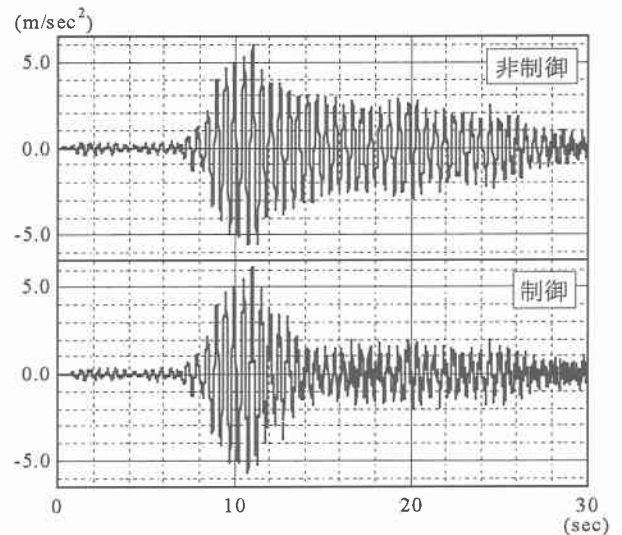
ここで、式(3)における右辺第 1 項は構造物の運動エネルギーを、第 2 項は減衰エネルギーを、第 3 項はひずみエネルギーを表しており、これらを制御開始から制御終了までの時間で積分することにより、制御によって構造物の各エネルギーの総和がどの程度低減されるかを算出することとした。したがって、式(3)における J_{GA} の値をより小さくする個体が、より有効な制振効果を有する変数の組み合わせであると評価することができる。

GA によ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各遺伝子列に対し、所定の突然変異率に基づいて各遺伝子座に対して操作を加える方法を採用した^{16), 17)}。なお、初期集団は 100 個体、交叉率は 0.5、突然変異率は 0.02 とし、全個体の遺伝子列が同一の値に収束するまで計算を繰り返すこととした。各個体の適応度を評価するためには、時刻歴応答解析による制振シミュレーションを個別に実施し、それぞれについて適応度を算出した。なお、本研究においては適応度が小さい個体がより有利な個体となることから、ルーレット戦略の適用にあたって -1 乗のべき乗スケールを行った。GA による解析で用いた入力加速度は、前述の釧路沖地震における加速度波形を用い、入力時間は 30 秒間として、解析開始から 30 秒間における目的関数の値を求め、適応度の評価を行った。

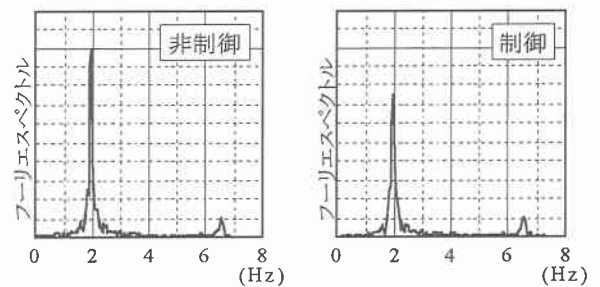
以上のような方法によって基準値の最適解を検索した結果、 $a_1=1.33\text{m/sec}^2$ 、 $a_2=0.62\text{m/sec}^2$ という値が得られ、これらを用いて制振シミュレーションを行う。

3. 制振シミュレーションおよび考察

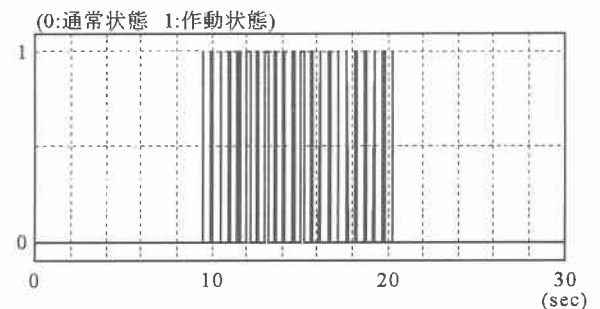
以上の解析手法によって、断面性能可変型セミアクティブ制御を用いた強制加振に対する振動制御シミュレーションを実施した。解析結果として図-4(a)に解析モデル頂部の応答加速度、(b)にはそのフーリエスペクトル、(c)には制御装置の ON-OFF の状態を把握するための状態変更履歴を示す。フーリエスペクトルについては比較のた



(a) 応答加速度



(b) フーリエスペクトル



(c) 状態変更履歴

図-4 解析結果

め非制御時の最大値で無次元化を行っている。また非制御時および制御時における、式(3)によって算出された全制御時間における解析モデルのひずみエネルギー、減衰エネルギーならびに運動エネルギーの総和（以下、応答エネルギーと称す）は、非制御時 266.6Nm、制御時 184.2Nm であった。

図-4(a)の応答加速度波形から制御時と非制御時の応答波形に関して比較すれば、主要動の入力外力によって、構造物の応答が増大する 10sec 付近においては、制御装置が作動する時間が極めて短く、十分な制振効果が得られていないが、12sec から 15sec においては応答値の急激な低減が確認でき、それ以降もある一定レベルに振動が抑制されている。このことから、制御装置の状態を ON-OFF に切り替えて構造物の減衰および剛性を部分的に変化させるといった簡便な方法でも、構造物全体の振動を抑制させることが可能であると思われる結果が得られた。応答加速度が最大となった時間帯においては、構

造物に対する減衰および剛性の付加が効果的に行われていないと思われることから、制御則を構築する際に、応答加速度に加えて応答速度や応答変位などの情報を用い、振動の方向性を考慮に入れることで、主要動に対する制振効果を向上させることが可能であると考えられる。また前述のように、本研究で用いた実験供試体は作動状態における減衰定数の増加が小さかったことから、ダンパーそのものによって構造物に付加される粘性減衰が不十分であったと思われる。したがって、制御装置に用いるダンパーや、制御装置の取り付け方法に改良を加えることで、さらに制振効果を向上させることが可能であると推定される。

図-4(b)に示したフーリエスペクトルにおいては、制御時の1次モードのピーク値が非制御時の7割程度に低減されていることが確認できるが、これは図-3(b)の制御装置を作動状態で固定した場合とほぼ同等である。また、応答エネルギーが制御により3割ほど低減されていることから、目的関数に応答エネルギーを用いたGAによる制御則の設計は、制御装置のパフォーマンスを十分に引き出しており、極めて有効であると考えられる。さらに、図-4(c)の状態変更の履歴では、制御装置が構造物に剛性および減衰を付加しているのは解析時間全体の一部であることから、観測された応答値に基づいて構造物の断面性能を一時的に変化させる断面性能可変型セミアクティブ制御は有効な振動制御手法となり得るものと思われる。

4. おわりに

本研究は、比較的簡便な制御系を有する断面性能可変型セミアクティブ制御の適用に関して、吊橋や斜張橋などの鋼製タワーを想定した塔状構造物を制御対象とし、時刻歴応答解析による制振シミュレーションを行った。それらの結果から、断面性能可変型セミアクティブ制御の制御効果、およびGAを用いた制御系設計の妥当性を検討し、土木構造物への適用性について考察を加えたものである。

解析結果から、断面性能可変型セミアクティブ制御を用いた構造物の振動制御は、応答値がある程度低減しており、構造物の部分的な断面性能を一時的に切り替えるといった簡便な方法でも、構造物全体の制振は可能であると考えられる結果が得られた。また、制御時における応答加速度のフーリエスペクトルのピーク値は非制御時に比べ3割程度の低減が確認され、作動状態に固定した場合と比べてもほぼ同等の制振が行われていると思われる。よって、GAを用いた制御系の設計は、比較的簡便で、制御装置の性能を十分に引き出すことが可能であるものと思われる。また、目的関数として応答エネルギーを算出したが、制御を行うことにより非制御時に比べ3割程度の低減が認められ、応答加速度やそのフーリエスペクトルとも整合性を有しており、構造物の振動抑制効果を把握するための指標として適切なものであると考えられる。制振効果のさらなる向上には、複数の応答量を観測データに用いることにより、構造物の振動の方向性を考慮した制御則を構築することが有効であるものと推定される。さらに、実験供試体に適用するデバイスや取り付け方法に関しても検討を行うことで、制振効果を向上させることが可能であると思われる。

以上を踏まえて、断面性能可変型セミアクティブ制御

の土木構造物への適用について検討を加えれば、断面性能可変型システムは、現在の技術水準で十分実現可能な制御方式であり、制御系の設計も比較的簡便で、適切な制御装置を用いることで高い制振効果を期待できるであろう。したがって、断面性能可変型セミアクティブ制御は比較的实现が容易であり、土木構造物に適用した際にも十分な制振効果を得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) 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講演論文集、PART B, pp.1-8, 1993.
- 2) 川島一彦、運上茂樹：バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御、土木学会論文集、第501号/I-29, pp.143-152, 1994.
- 3) 小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.
- 4) 山口宏樹：構造振動・制御、共立出版、1996.
- 5) 那須正、小堀鐸二、高橋元一：可変剛性(AVS)制震システムにおけるリアルタイム共振検知方法、第2回日本制震(振)シンポジウム論文集、pp.511-518, 2000.
- 6) 家村浩和、五十嵐晃、中田成智：連結構造物のバリアブルダンパーによる最適震動制御に関する研究、構造工学論文集、Vol. 46A, pp.575-582, 2000.
- 7) 佐藤忠信、土岐憲三、佐藤誠：可変減衰装置の開発と減衰力の制御システムの構築、土木学会論文集、No.570/I-40, pp.203-215, 1997.
- 8) 山崎智之、大島俊之、三上修一、当麻庄司、杵本正信、藤村浩：ER流体によるインテリジェント振動減衰装置の開発、土木学会北海道支部論文報告集、第55号(A), pp.202-205, 1999.
- 9) 日高尚志、森下信：ER流体を用いた可変減衰型動吸振器による適応的制振システム、日本機械学会論文集(C編)、65巻638号, pp.110-116, 1999.
- 10) T. T. Soong : Basic Concepts and Applications of Active Structural Vibration Control, Proceedings of International Conference on Advanced Problems in Vibration Theory and Applications, pp.1-9, 2000.
- 11) 伊津野和行、川村弘昌、森泰樹、小林紘士：簡易アクティブ制御連結システムによる線状に連続する構造物の地震応答低減の試み、土木学会論文集、No.647/I-51, pp.229-240, 2000.
- 12) 宮森保紀、小幡卓司、鈴木隆、林川俊郎、佐藤浩一：可変剛性型セミアクティブ制御の鋼製タワーにおける適用性、鋼構造年次論文報告集、第8巻, pp.97-101, 2000.
- 13) 宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：可変減衰型セミアクティブ制御の橋梁構造物への適用に関する一考察、構造工学論文集、Vol.47A, 2000. (印刷中)
- 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.
- 15) 杉本博之、鹿汴麗、山本洋敏：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.
- 16) 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.
- 17) L.デービス編、嘉数侑昇、三上貞芳、皆川雅章、川上敬、高取則彦、鈴木恵二共訳：遺伝アルゴリズムハンドブック、森北出版、1994.