

I-42

可変剛性型システムを用いたアクティブ制振における
ファジィ制御理論の適用について

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 井上 圭介
 北海道大学工学部 学 生 員 宮森 保紀
 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

橋梁構造物においては、走行荷重や風荷重等に起因する振動が、その使用性あるいは施工性、耐久性等に大きく影響を及ぼすことが知られている。近年においては、吊橋あるいは斜張橋の主塔を代表例として各種のデバイスをを用いた振動制御が行われ、次第に実用化の域に達しつつある¹⁾。

一般に、アクティブ振動制御においては、構造物に設置した重錘を駆動して制御力を得る、いわゆる制御力型が現在では主流である。しかしながら、制御力型では重錘のストロークを十分に確保する必要を有するため、通常の桁構造あるいはケーブル構造を有する橋梁等で面内の鉛直振動の低減を目的とする場合、桁高等を考慮すれば制振装置の設置スペースの確保が極めて困難であることは容易に理解できる。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を用いた制振が有効であると考えられる^{2,3)}。

一般に、アクティブ制御系の設計において、採用すべき制御理論の検討は非常に重要な問題の一つである。アクティブ制御理論は、制御工学の分野における精力的な研究の結果、多数の有効な理論が開発された。その主なものとして、 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ある⁴⁾。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、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、これには人工知能の応用、Fuzzy 制御等が知られている。可変剛性型システムにおいては、構造物の剛性を時間と共に能動的に変化させるため、この非線形性に対応可能な制御理論を用いる必要がある。

そこで本研究は、制御理論に上記の非線形性に対応が可能な Fuzzy 制御理論^{5,6)}ならびに瞬間最適制御理論^{2,7)}を採用し、吊床版橋等を想定したケーブル構造を有する構造物に対して振動制御シミュレーションを行なった。具体的には、制御対象の吊床版橋を5質点系にモデル化し、前述の2種の制御理論に基づき制御対象のケーブル張力を直接変化させ、ニューマーク β 法による直接数値積分法を用いて数値解析を実施した。解析結果から、両制御理論の比較検討を通じて、橋梁構造物における鉛直振動の制御に対する可変剛性型システムの適用性あるいは有効性等に関して考察を加えたものである。

2. 解 析 手 法

2-1. 構造物のモデル化

本研究では、制御対象として北海道石狩市のゴルフ場に建設された吊床版橋を参考とし、その断面諸元、支間長およびサグ比等のデータをそのまま用いて解析を行うこととした⁸⁾。

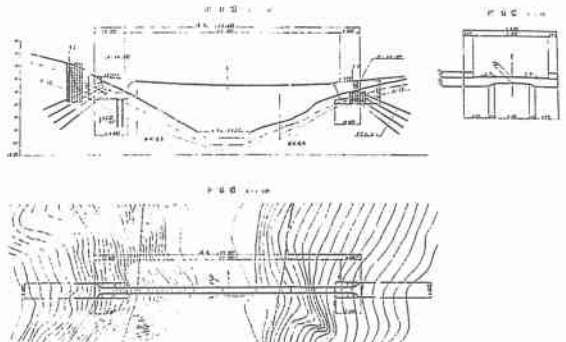


図-1 吊床版橋一般図

表－1 振動特性一覧表

モード次数	1	2	3	4	5
円振動数 (rad/sec)	5.265	8.143	11.20	13.15	18.68
振動数(Hz)	0.838	1.296	1.784	2.093	2.973
周期(sec)	1.193	0.772	0.561	0.478	0.336
有効質量率(%)	0.95	11.88	86.47	0.10	0.60

本橋の主な諸元は、支間長 76m、幅員 2.5m、サグ 2.1m、初期張力 450tf である。構造物のモデル化については、2 次元の 5 質点系モデルを採用し、事前に固有振動解析を行ってその振動特性を把握した。図－1 は対象とした吊床版橋の一般図であり、表－1 は振動特性の一覧である。また、図－2 に吊床版橋の解析モデルを、図－3 に主なモード形状を示す。

2-2. Fuzzy 制御理論

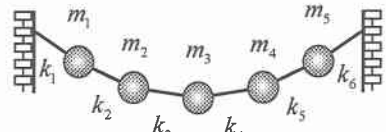
Fuzzy 制御を行うためには、IF-THEN 規則群とそれに対応したメンバーシップ関数が必要である⁵⁾。本研究では、注目する質点の応答速度、応答加速度ならびに制御張力をパラメータとした前件部 2 変数、後件部 1 変数からなる以下のような推論規則を 25 規則用いて解析を実施した。なお、本研究では鉛直下向きを正として推論規則の構築を行った。

推論規則例

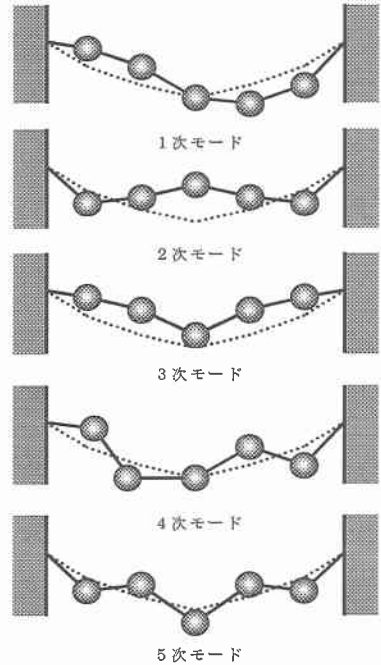
- もし加速度が負で速度が負ならば制御張力はゼロ
IF a is NB and v is NB THEN u is ZO
- もし加速度が負で速度が 0 ならば制御張力は負で小
IF a is NB and v is ZO THEN u is NS
- もし加速度が 0 で速度が負ならば制御張力は負で小
IF a is ZO and v is NB THEN u is NS
- もし加速度が 0 で速度が 0 ならば制御張力はゼロ
IF a is ZO and v is ZO THEN u is ZO
- もし加速度が正で速度が負ならば制御張力は負で小
IF a is PS and v is NB THEN u is NS
- もし加速度が正で速度が 0 ならば制御張力は正で小
IF a is PS and v is ZO THEN u is PS
- もし加速度が正で速度が正ならば制御張力は正で小
IF a is PS and v is PS THEN u is PS
- もし加速度が正で速度が正ならば制御張力は正で大
IF a is PS and v is PB THEN u is PB

図－4 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－2 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。

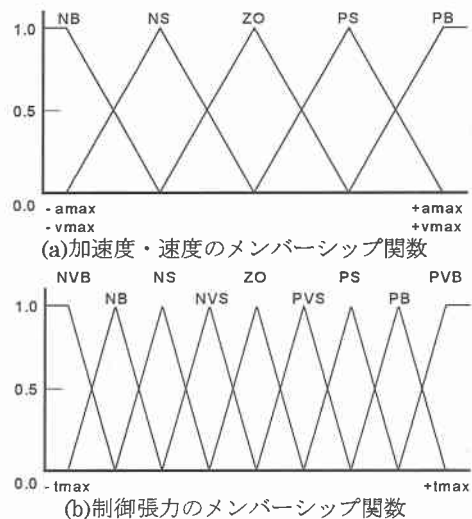
一般に、制御対象の構造物が複数の振動モードを有する場合、Fuzzy 制御においては同一の制御則で多次モードの同時制振は比較的困難であると考えられている。そこで本研究ではこの現象にある程度対応するため、全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中で最大のものをある時刻 t における制御張力とすることとした。その理由として、本研究の推論規則は質点の加速度および速度をパラメータとして用いており、応答の絶対値および方向性に応じて制御張力が決定される。したがって、各質点で計算された制御張力の大小関係は、それぞれの時刻 t における卓越モードの情報にある程度含んでいるものと考えられるためである。



図－2 解析モデル



図－3 主なモード形状



図－4 メンバーシップ関数

前述の通り、可変剛性型システムにおいては、制御に応じて剛性が変化するため非線形応答解析を行う必要がある。そこで本研究では、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することとした。ニューマークβ法における係数βは0.25、時間刻みは $\Delta t=0.01\text{sec}$ である。また、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。減衰定数については、他の研究における実験データ⁹⁾を参考にした上で、1次、2次の各減衰定数をともに0.5%とし、また、最大可変張力は初期張力(450tf)を考慮して $\pm 300\text{tf}$ として解析を行った³⁾。

表-2 規則表

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

2-3. 瞬間最適制御理論

瞬間最適制御理論とは、本来構造物が受ける外乱は予知不可能ではあるが、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²⁾。

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。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{L}^T \mathbf{V}(t) \mathbf{L}) \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、**M**、**C**、**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、**f**(*t*)は外力ベクトル、**V**(*t*)は可変剛性マトリックス、また、**L**は可変剛性配置マトリックスである。本研究では、式(1)における可変剛性マトリックス**V**(*t*)を瞬間最適制御理論によって求め、時刻歴応答解析を行うことにより、振動抑制効果の比較検討を試みる。

可変剛性値の算出に関しては、可変剛性装置の数を *m* として、式(2)で定義されるような可変剛性ベクトル **v**(*t*)を用いて、式(1)の左辺最終項の一部を式(3)によって置換する。

$$\mathbf{v}(t)^T = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_m(t)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\mathbf{K} + \mathbf{L}^T \mathbf{V}(t) \mathbf{L} \mathbf{x}(t) = \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t) \mathbf{v}(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、**v**(*t*)は可変剛性値そのものであり、**F**(*t*)は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である。式(3)を式(1)に代入すると、以下の式を得る。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) + \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t) \mathbf{v}(t) = \mathbf{f}(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

一般の制御においては、可変剛性値の算定に実際の制御時より1ステップ前の応答あるいは外乱の情報を用いるために、式(4)を次式のように近似的に表現する。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) + \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t-1) \mathbf{v}(t) = \mathbf{f}(t-1) \quad \dots\dots\dots (5)$$

以上より、式(5)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。

$$\mathbf{x}_s(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}_s(t-1) - \mathbf{B}(t-1) \mathbf{v}(t) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t-1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、**x_s**(*t*)は状態ベクトル、**A**はシステムマトリックスを表し、**B**および**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**Q**および**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(7)のような評価関数 *J*(*t*)を用いて⁷⁾、これが最小になるよう

な可変剛性ベクトルを式(8)を用いて求めることができる。

$$J(t) = \mathbf{x}_s^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{v}(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\mathbf{v}(t) = [\mathbf{R} + \mathbf{B}^T(t-1) \mathbf{Q} \mathbf{B}(t-1)]^{-1} [\mathbf{B}^T(t-1) \mathbf{Q} \{\mathbf{A} \mathbf{x}_s(t-1) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t-1)\}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお可変剛性システムにおいては、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。

表-3 解析ケース一覧

自由振動	強制振動
1次卓越	釧路沖地震 (千代田大橋)
2次卓越	
3次卓越	

3. 解析結果とその考察

以上のような手法により本研究では吊床版橋に対するアクティブ振動制御シミュレーションを行った。解析は、自由振動および強制振動について行い、自由振動に関しては、1次～3次モードの固有振動数をもつ正弦波を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。また、強制振動に関しては、釧路沖地震の際に千代田大橋において観測された橋

軸方向の応答加速度波形を最大加速度 100gal として使用することとし、解析には主要動部分のみを用いている。解析ケースの一覧を表-3に、入力地震波形を図-5に示す。また、“3次卓越”の際の支

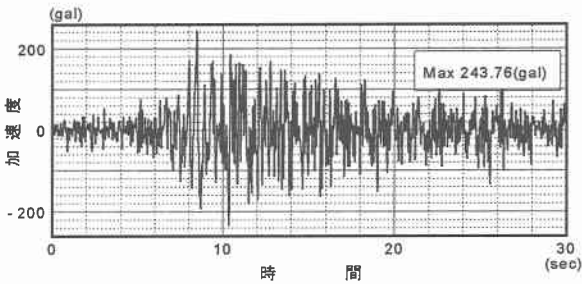


図-5 入力地震波

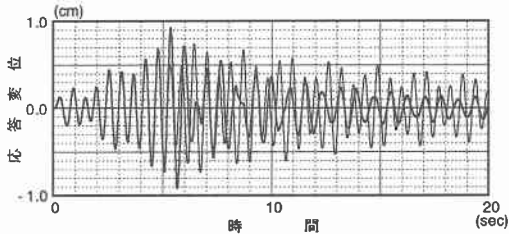


図-6 瞬間最適制御における応答変位

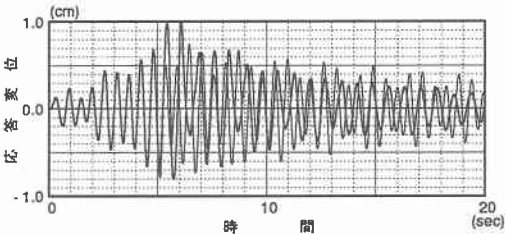


図-7 Fuzzy 制御における応答変位

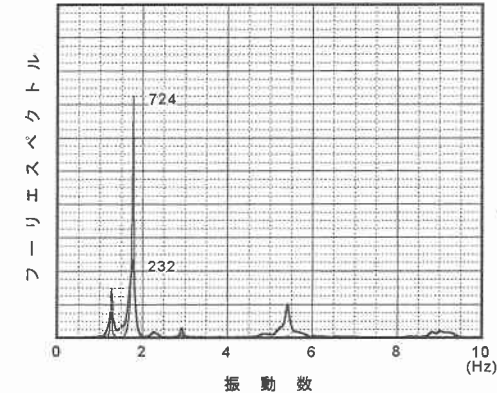


図-8 瞬間最適制御における FFT 解析結果

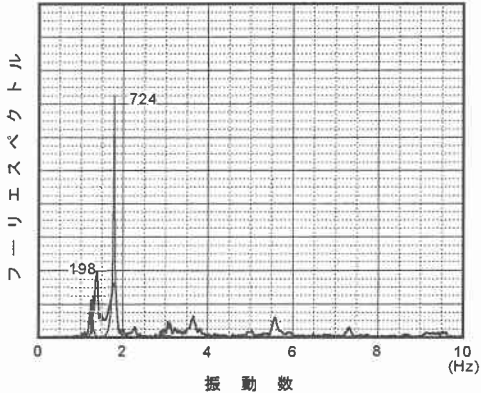


図-9 Fuzzy 制御における FFT 解析結果

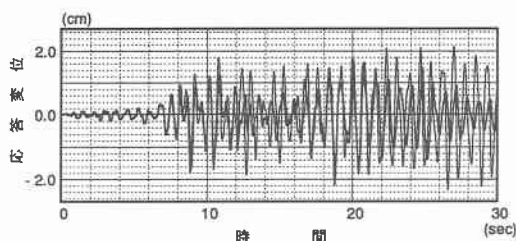


図-10 瞬間最適制御における応答変位

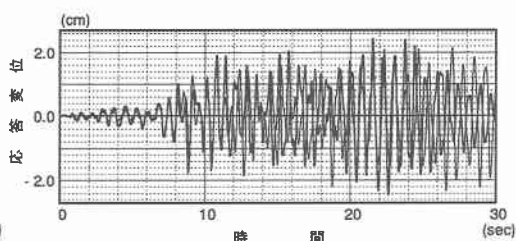


図-11 Fuzzy 制御における応答変位

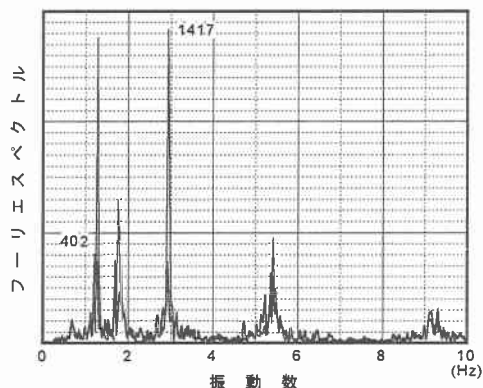


図-12 瞬間最適制御における FFT 解析結果

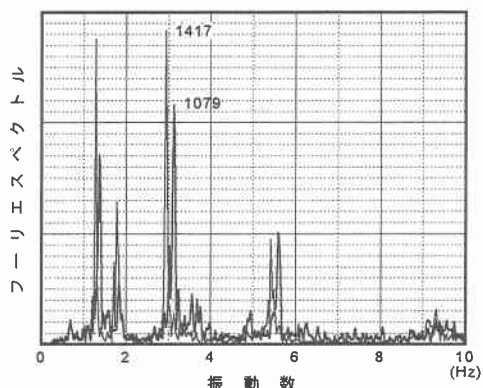


図-13 Fuzzy 制御における FFT 解析結果

間中央における瞬間最適制御を用いた場合の応答変位を図-6に、Fuzzy 制御における応答変位を図-7に、FFT 解析結果をそれぞれ図-8および図-9に示す。さらに図-10、11 および図-12、13 は、強制振動の際の両者の応答波形ならびに FFT 解析結果である。なお、図中の細線は非制御時の応答を、太線は制御時の応答を示している。

これらの図から、両者の制振特性に着目すると、まず“3次卓越”の場合においては応答波形、FFT 解析ともに Fuzzy 制御は瞬間最適制御に比して同等、もしくはそれ以上の振動抑制効果を発揮していることがわかる。特に図-8および図-9から、フーリエスペクトルのピーク値は Fuzzy 制御の場合が明らかに低減されており、制御張力が有効に作用しているものと思われる。

次に、“強制振動”に関しては、非制御時の応答と比較すると十分な制振効果は得られていない結果となっているが、FFT 解析の結果から、瞬間最適制御の方が有効な制振が行われていると判断できる。これは、Fuzzy 制御においては前述のようにモードに応じたメンバーシップ関数の切り替え等の操作を行っていないため、複数のモードが出現する強制加振時に対して、その振動抑制効果がやや低下したものであろう。“3次卓越”の場合においては、本研究における解析モデルでは3次モードにおいては全節点が同位相で振動し、かつ有効質量が他のモードと比して極めて大きいことから、他の振動モードがあまり発生しないため、“強制振動”の場合のような差違は生じなかったものと考えられる。しかしながら、Fuzzy 制御理論においてはメンバーシップ関数の最適化によってその制振効果が大きく向上することが知られており、例えば遺伝的アルゴリズム（以下GAと称する）等を用いてメンバーシップ関数の最適化を行い、さらには卓越モードに応じた制御則等の切り替えを行えば、その効果は大きく向上するものと考えられる。

可変剛性型システムの特徴の一つである“非共振化”に関しては、図-12 および図-13 から、瞬間最適制御と比して Fuzzy 制御の方が顕著に現れていることが確認できる。

また、本研究における制御対象においては、全体剛性に対するケーブル張力の寄与率が低いために、最大可変張力が出力されている場合でも、全体剛性の変化は比較的小さいものと推定され、強制振動

に対しては大幅な応答の低減を得ることができなかったものと思われる。しかしながら、可変剛性型システムの場合は、用いる制御理論に関わらずすべての節点においてある程度有効な振動抑制効果を期待することができ、全体剛性に対するケーブル張力の寄与率が高い構造物であれば、より大きな制振効果が得られるものと考えられる。

4. あ と が き

以上のように本研究は、Fuzzy 制御理論ならびに瞬間最適制御理論を用いて、吊床版橋等を想定したケーブル構造を有する構造物に対して可変剛性型システムを適用して振動制御シミュレーションを行なったものである。

解析結果からは、Fuzzy 制御は瞬間最適制御に比して同等、もしくはそれ以上の振動抑制効果を発揮し得ることが判明し、数学的モデルを構築しない論理型制御理論を用いた場合でも非線形性を有する制御対象に十分対応が可能であることが確認された。したがって、本研究のような制御対象に対するFuzzy 制御理論の制振効果は、GA等を用いてメンバーシップ関数の最適化を行い、さらには卓越する振動モードに応じた制御則の切り替え等を行なえば極めて有効になるものと推定できる。

また、吊床版橋等のケーブル構造物に対する可変剛性型システムの適用は、全体剛性に対するケーブル張力の寄与率がある程度高い構造物であれば、地震力等の比較的大きい動的外力に対しても有効な制振効果が得られるものと考えられる。

【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) 小堀鐸二：制振構造，鹿島出版会，1993.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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のアクティブ制御，構造工学論文集，Vol.42A, pp.731-738, 1996
- 8) 林川俊郎，角田史雄，今和也：吊床版橋の固有周期の算定について，土木学会北海道支部論文報告集，第47号，pp.31-36, 1991.
- 9) 角本 周，前田研一，梶川康男，黒野雅利：近接固有振動数を有する吊床版歩道橋の振動使用性に関する検討，橋梁交通振動コロキウム論文集，pp.207-214, 1995.