

ファジ理論を用いたアクティブ制御手法の一考察

Study on Active Control System Based on Fuzzy Logic

松島 学* 松井邦人** 梅原 健生***

By Manabu MATSUSHIMA, Kunihito MATSUI and Kenji UMEHARA

A structural control is presented based on fuzzy logic. Most structural control theory requires both input and output records in addition to an accurate description of structural model, since a dynamic analysis is conducted to determine a control force.

A method presented herein requires neither input record nor a mathematical description of structure. Control force is determined from structural responses (velocity and acceleration) and fuzzy control rule.

1. はじめに

強震時、構造物が設計震度相当以上の加速度応答を示すことが、数多く観測されている。しかし、適切な塑性変形性能を保有する構造物は、このような強震に対して、軽微な損傷を受けても十分に耐えることが過去の研究¹⁾²⁾で明らかになっている。塑性変形性能がほとんど無い構造物は、強震に対し十分に安全率を見込んだ耐力を設定するか、あるいは何らかの振動制御機構を設けることが必要である。近年、構造物を強震から積極的に保護する立場から、構造物の地震応答を制御するアクティブコントロールの研究が盛んに行われている³⁾⁴⁾⁵⁾。一般に、このような制御系では、制御力の決定を、その構造物の振動を規定する運動方程式を介して行っている。従って運動方程式の解は、実構造の運動を精度良く表せるものでなければならない。実構造の応答が、線形微分方程式で記述できるとしても、質量、減衰、剛性の各マトリックスはあらかじめ構造同定を行うか、十分に配慮して精度良く求める必要があるだろう。

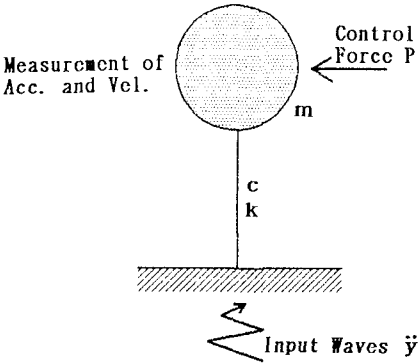
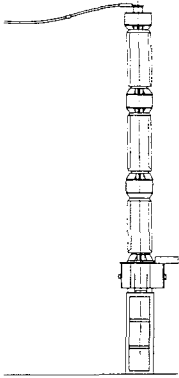
近年、ファジ理論に基づく制御が各工学分野で実用化してきている。しかし、構造物の振動制御への適応は、まだ十分に行われていない。本研究は、まず1質点系で表される簡単な構造物を対象として、強震時の構造物の応答を、ファジ理論⁶⁾⁷⁾に基づき制御するためのファジルール⁸⁾を設定し、その有効性を検討することである。さらに一質点系に適応したファジルールが多質点系でも有効であることを確認した。

* 正会員 工修 東電設計株式会社 技術開発本部耐震技術部課長 (〒101千代田区 内幸町1-3-1)

*** 正会員 Ph.D. 東京電機大学 教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

**** 学生員 東京電機大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (同上)

構造ファジィ制御の利点は制御力の決定に動的解析を必要としないため、効率的であるということ、また、概略の固有周期は必要とするが、固有周期のいかににかかわらず同じファジィルールを適用できるということである。このことは、構造物の固有周期が振動中に少し変化することがあっても制御が可能であることを示唆している。



2. 対象構造物とファジィ推論

図1 がいし機器の例

図2 対象モデル

対象構造物として、図1のような変電所などで見られるがいし機器を念頭に置いている。問題を簡単にするため図2のような一質点系モデルで表せるものとし、その固有周期を比較的短周期の $T=0.3\text{sec}$ と長周期の $T=1.0\text{sec}$ 、また減衰定数を $h=0.05$ とした。表1に解析モデルの構造特性の一覧を示す。対象構造物が、がいし機器というゼイ性的な特性を持つため、加速度応答を制御することが第一の目的である。また、他の構造物との関係で、応答変位も小さくなるように配慮した。本研究における制御手法は、一種のフィードバック制御で、応答加速度と応答速度の測定データに基づいており、地震入力データは用いていない。即ち質点における加速度と

表1 対象モデルの構造特性

	長周期($T=1.0\text{sec}$)	短周期($T=0.3\text{sec}$)
質量	1.0 (tf·s ² /cm)	1.0 (tf·s ² /cm)
剛性係数	39.5 (tf/cm)	438.6 (tf/cm)
減衰定数	0.05	0.05

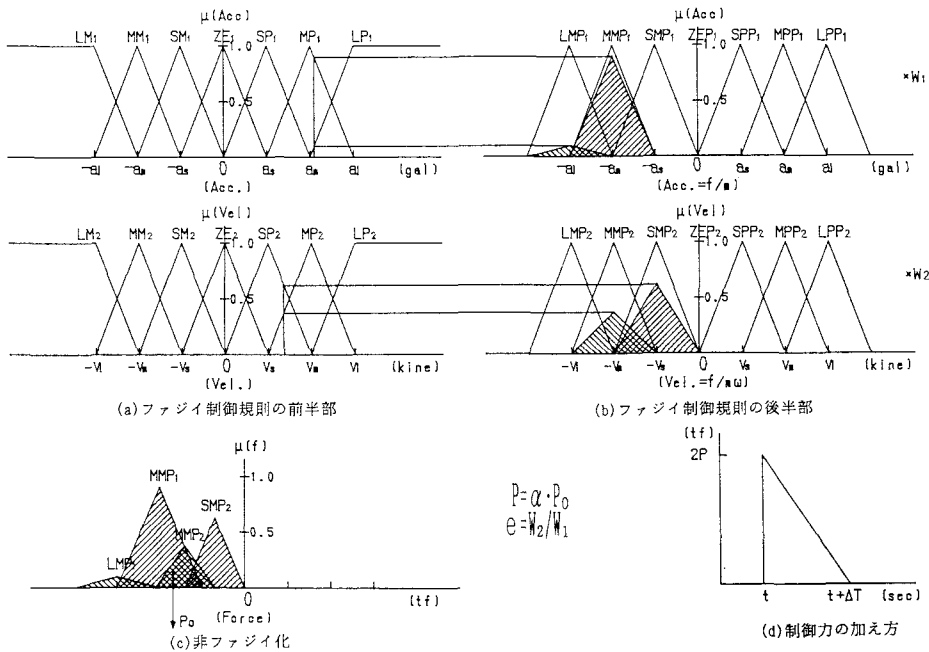


図3 ファジィ推論方法

速度の観測値にファジイルールを適用し制御力を決めている。ファジイ推論の一例を図3に示す。この演算は図4に示すようなIF～THENルールで行っている。ファジイ制御は、はじめに質点での観測時間 ΔT の応答加速度と応答速度の平均値をファジイ推論の入力値とする。この入力値を図4に示したファジイ制御規則の前半部(図3.a参照)に入力する。この制御ルールは応答加速度と応答速度からなり、その値を入力ファジイ変数(負で大きい(LM_i), 負で中くらい(MM_i), 負で小さい(SM_i), 零(ZE_i), (SP_i), (MP_i), (LP_i))に変換する。その結果から出力のファジイ変数(正で大きい(LPP_i), 正で中くらい(MPP_i), 正で小さい(SPP_i), 零(ZEP_i), 負で小さい(SPM_i), 負で中くらい(MMP_i), 負で大きい(LMP_i))に適合する制御速度および制御加速度の各メンバーシップ関数 $\mu_v(Vcc)$, $\mu_a(Acc)$ (図3.b参照)を求める。これらの制御速度および制御加速度の分布を式(1)を用いて、力の分布に変換する。ここで、 m は系の質量である。

$$f_v = m \cdot \omega \cdot Vcc \quad (1)$$

$$f_a = m \cdot Acc$$

この2つの分布 $\mu_v(f_v)$, $\mu_a(f_a)$ に重み w_i を考慮して重心(図3.c参照)、つまり期待値を求めることで非ファジイ化し、その値を出力値 P_0 とする。制御力 P は、式(2)に示すように出力値 P_0 に係数 α を乗じて求める。

$$P = \alpha \cdot P_0 \quad (2)$$

作用力は、制御力 P が ΔT 間作用した力積と等しい直角三角形の制御力(図3.d参照)が作用するものとした。また、図3のファジイ推論は入力値の大きさと共に、その全体の規則の範囲を書き換えるようにした。具体的には、前回の ΔT 間の観測された応答速度および応答加速度の平均値を今回の入力のルールの加速度の最大値 a_1 および速度の最大値 V_1 と設定し、入力加速度の大きさに追従できるようにした。

Rule 1(加速度)

IF Acc=LM₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot LPP_1$
 IF Acc=MM₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot MPP_1$
 IF Acc=SM₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot SPP_1$
 IF Acc=ZE₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot ZEP_1$
 IF Acc=SP₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot SMP_1$
 IF Acc=MP₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot MMP_1$
 IF Acc=LP₁ THEN $f_1 = w_1 \cdot LMP_1$

Rule 2(速度)

IF Vel=LM₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot LPP_2$
 IF Vel=MM₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot MPP_2$
 IF Vel=SM₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot SPP_2$
 IF Vel=ZE₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot ZEP_2$
 IF Vel=SP₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot SMP_2$
 IF Vel=MP₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot MMP_2$
 IF Vel=LP₂ THEN $f_2 = w_2 \cdot LMP_2$

図4 ファジイ制御規則

3. ファジイ推論の感度解析

2.で作成したファジイ推論規則の各パラメータを決定するために、各パラメータを変化させ感度を調べた。本研究でのファジイ推論方法のパラメータは、次の4つとした。

- (1)制御力の大きさの係数(α)
- (2)制御力および観測の継続時間(ΔT)
- (3)規則パラメータ(応答速度および加速度)のウェイト($e = w_v/w_a$)
- (4)制御力の形状

ΔT の持つ意味は、制御を決定するための平均的な入力値を決定する時間きざみであり、系の応答値の特性に影響される値である。このパラメータの感度解析を行うにあたり、各パラメータの基本的な値を次のように設定した。制御力の大きさの係数 α は、応答値と同じ値の作用力を出力すると過大になると考え、出力値 P_0 の半分($\alpha = 0.5$)を制御力とした。応答値が系の固有周期に支配されることから制御力および観測の継続時間 ΔT は、固有周期の関数になると仮定し、系の固有周期の10%を ΔT とした。その結果、 $T = 0.3\text{sec}$ の場合は $\Delta T = 0.03\text{sec}$ 、 $T = 1.0\text{sec}$ の場合は $\Delta T = 0.1\text{sec}$ となる。入力地震動はEl Centro 1940 NS Imperial Valley EarthquakeおよびHachinohe 1968 NS 十勝沖地震の2波を最大300galに調整して用いた。これらの2波を用いて上

記の4つのパラメータの適切な値を求めた。設定されたパラメータが、他の地震動でも有効性があるかどうかを検証するために、さらに4波の入力地震動を用いて制御効果を検討した。

El Centro波を用いて、この基本パラメータで計算された制御系と非制御系の時刻歴波形を図5.aに $T=0.3$ secの場合を、図5.bに $T=1.0$ secの場合を比較して示す。図にみられるように、 $T=0.3$ secの場合では、最大加速度で28%、最大変位で28%の制御効果があり、 $T=1.0$ secの場合はおおよそ55%および55%の制御効果がある。このように長周期の方が短周期よりも制御効果があることがわかる。時刻歴波形を見ると、初期の比較的大きな応答波には制御効果はあまり期待できないが、その後、加速度および変位共に制御されていることがわかる。

(1) 制御力および観測の継続時間 (ΔT)

継続時間の無次元量 $\Delta T/T$ が制御系に与える影響を見るために、制御系と非制御系の応答値の比と $\Delta T/T$ の関係を図6.a, bに示す。この図から、系の固有周期、両入力地震動の特性に関係なく $\Delta T/T$ で無次元化できる。制御効果は、 $\Delta T/T$ が大きくなると小さくなる傾向が見られ、 $\Delta T/T$ は0.2以下である必要がある。この結果から、はじめに基本パラメータとして、 $\Delta T/T=0.1$ を設定したことが妥当であることが明かである。

(2) 制御力の大きさの係数 (α)

制御力の大きさは、応答値と同じ値の作用力を出力すると過大になることが考えられる。ここでは、その出力値 P_0 に対する比率 α をパラメータに、その影響を調べた。その結果を図7.a, bに示す。El Centro波の場合、加速度に注目すると $T=0.3$ sec で $\alpha=0.4$ が、 $T=1.0$ sec で $\alpha=0.5$ が最適値となる。変位では、 $T=0.3$ sec で

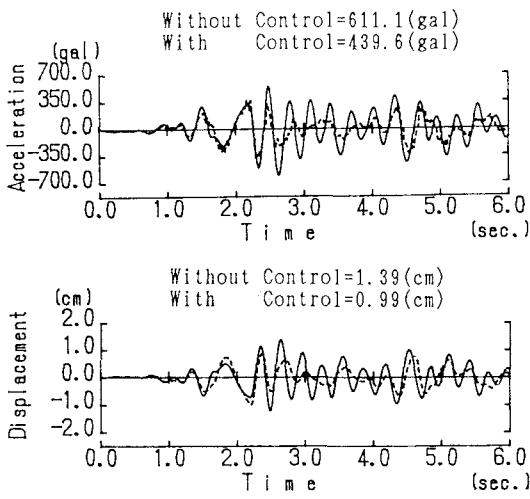


図5.a $T=0.3$ secの場合

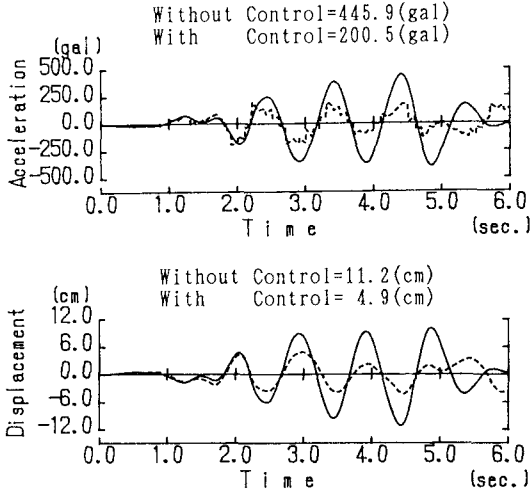


図5.b $T=1.0$ secの場合

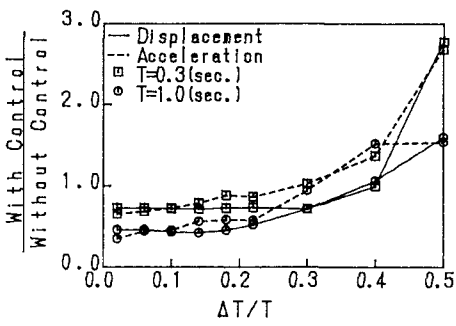


図6.a El Centro波の場合

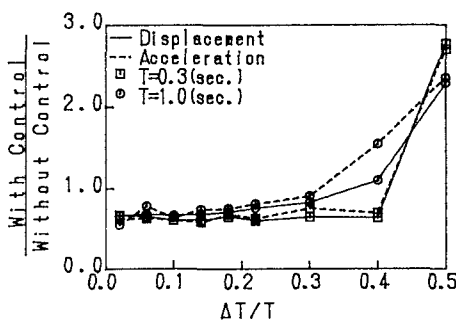


図6.b Hachinohe波の場合

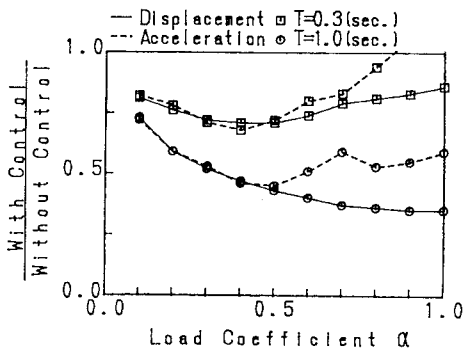


図7.a El Centro波の場合

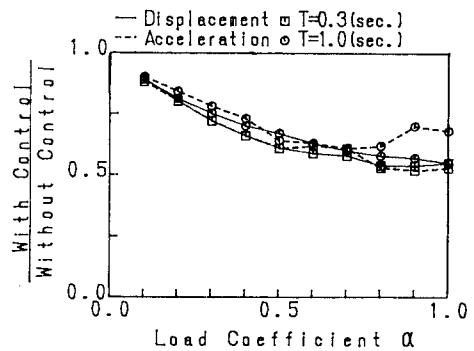


図7.b Hachinohe波の場合

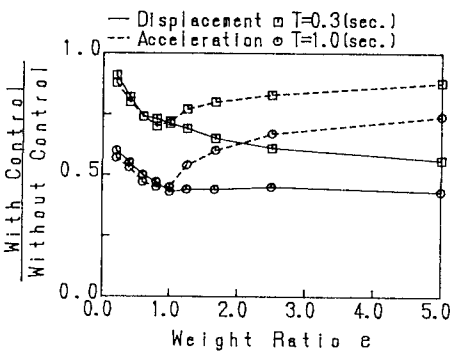


図8.a El Centro波の場合

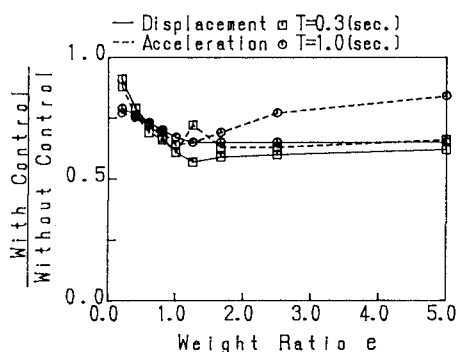


図8.b Hachinohe波の場合

$\alpha=0.4$ が、 $T=1.0\text{sec}$ では計算範囲内で最適値は見られなかった。八戸波の場合、加速度では $T=0.3\text{sec}$ で $\alpha=0.8$ が、 $T=1.0\text{sec}$ で $\alpha=0.7$ が最適値となる。変位では、 $T=0.3\text{sec}$ で $\alpha=0.8$ が、 $T=1.0\text{sec}$ で $\alpha=0.7$ が最適値となる。このように地震動の特性の影響を受けて、 α の最適値はばらつくことがわかる。

(3) 規則のパラメータのウェイト ($e=W_v/W_a$)

図2のファジィ推論の規則パラメータのウェイトの比率 e が制御結果に与える影響を調べた。その結果を図8.a, bに示す。このパラメータによる加速度の制御効果は、両地震動の特性の影響をあまり受けず、両固有周期共に $e=1.0$ 前後が最適値となる。変位も固有周期による制御効果の影響をあまり受けず、 e が大きくなると制御効果は大きくなり、 e が1.0以上になると制御効果はほぼ一定となる。これより、はじめに基本パラメータとして $e=1.0$ を設定したことが妥当であることが明かである。

(4) 制御力の形状

制御力の形状影響が、制御効果に対して与える影響を調べた。制御力は形状を直角三角形、矩形および二等辺三角形を選択し、その継続時間 ΔT と制御力 P の力積を等しくし、非制御系と制御系の応答値の比較を行った。入力地震動は、El Centro波とした。その結果を表2に示す。この表から、直角三角形および矩形ではほぼ同じ程度の制御効果がみられるが、二等辺三角形では、加速度で若干制御効果は小さくなるがわかる。

(5) 入力地震動

ここまでは、入力地震動としてEl Centro波および八戸波を用いてきた。入力地震動の特性が変化した場合でも、同様の制御効果が成り立つのかを検討する必要がある。ここでは、これらの2つの地震波にさらに4つの地震波を加え、6つの異なった特性を持つ入力地震動で制御効果の比較を行った。従って、入力地震動は

①El Centro 1940 NS Imperial Valley Earthquake, ②Hachinohe 1968 NS 十勝沖地震, ③Taft 1952 S69E

Arvin Tahachapi Earthquake, ④Tohoku Univ. 1978 EW 宮城県沖地震, ⑤Akita 1983 East 日本海中部地震および⑥Simizu-miho 1978 South 伊豆大島近海地震の全6波となる。その結果を表3に示す。表にみられるように、El Centro波で、その制御の適切な各係数値を設定したために一番制御効果が得られているが、他の入力地震動でも制御効果があることがわかる。変位が非常に小さい時刻制御効果がない場合もあるが、一般に以降のような制御効果がある。T=0.3secの場合、加速度で0%~45%、変位で0%~50%の制御効果があり、T=1.0secの場合、おのおの3%~55%および20%~73%の制御効果がある。(2)で説明したように係数 α は地震動の特性の影響を受けて制御効果がばらつくことが明かであり、この α の値の影響によるものと考えられる。従って、 α の値を適切に設定する必要があることを示唆している。

表2 制御力の形状の影響(El Centro波)

			長 周 期 (T=1.0 sec)			短 周 期 (T=0.3 sec)		
			Without Control	With Control	Ratio	Without Control	With Control	Ratio
直角三角形		Acc. (gal)	445.9	200.5	0.450	611.1	439.6	0.719
		Dis. (cm)	11.2	4.9	0.445	1.39	0.99	0.712
矩 形		Acc. (gal)	445.9	231.0	0.518	611.1	472.1	0.773
		Dis. (cm)	11.2	4.8	0.428	1.39	1.01	0.727
二等辺三角形		Acc. (gal)	445.9	275.1	0.617	611.1	526.8	0.802
		Dis. (cm)	11.2	4.7	0.419	1.39	1.01	0.727

表3 入力地震動の特性の影響

		長 周 期 (T=1.0 sec)			短 周 期 (T=0.3 sec)		
		Without Control	With Control	Ratio	Without Control	With Control	Ratio
El Centro 1940 NS	Acc. (gal)	445.9	200.5	0.450	611.1	439.6	0.719
	Dis. (cm)	11.2	4.9	0.445	1.39	0.99	0.712
Hachinohe 1968 NS	Acc. (gal)	429.1	275.1	0.641	892.4	541.4	0.607
	Dis. (cm)	10.8	7.2	0.667	2.02	1.23	0.609
Taft 1952 SE	Acc. (gal)	266.2	257.2	0.966	679.2	474.2	0.698
	Dis. (cm)	6.7	5.0	0.746	1.54	1.12	0.724
Tohoku Univ. 1978 EW	Acc. (gal)	570.1	366.0	0.642	1133.9	620.7	0.547
	Dis. (cm)	14.4	8.1	0.563	2.57	1.48	0.576
Akita 1983 E	Acc. (gal)	565.7	289.8	0.512	1065.9	621.6	0.583
	Dis. (cm)	14.3	5.3	0.373	2.42	1.24	0.512
Simizu-Miho 1978 S	Acc. (gal)	337.1	328.1	0.973	488.3	483.6	0.990
	Dis. (cm)	8.5	6.8	0.800	1.11	1.15	1.360

4. 多質点系の制御への応用

一般の土木構造物は、一質点系で表されるよりも多質点系で表されることが多い。ここでは、これらを考慮して図9に示す2質点系および3質点系の構造物に対し2.の手法を適用した。表4に対象構造物の性能を示す。表にみられるように、対象モデルの全ての質量、剛性および減衰定数を等しくした。制御は頭部の質点で応答加速度および応答速度を観測値とし、図3の制御規則で頭部の質点に制御力を作用させ、系の制御を行うものとした。入力地震動としてEl Centro波を最大300galに調整して用いた。ファジイ推論の各パラメータは、3.で検討した基本パラメータを採用した。2質点系の加速度および変位について制御系と非制御系の時刻歴波形を図10.a,bに、3質点系を図11.a,bに示す。図にみられるように、初期の大きな応答値には、制御が追従できない部分もあるが、時刻歴全体を見てみると制御されているのがわかる。加速度および変位の最大応答値について制御系と非制御系の比を表5に示す。この表に見られるように、T₁=0.3secで加速度が0%~40%の制御効果があり、頭部の質点よりも下部の質点の方が制御されている。変位では、0%~35%の制御効果があり、これも頭部の質点より下部の質点の方が制御されている。T₁=1.0secでは、加速度で25%~60%変位45%~70%の制御効果がある。これも、T₁=0.3secと同様に、頭部の質点より下部の質点の方が制御

されている。この結果より、長周期の構造物($T_1=1.0\text{sec}$)の方が短周期の構造物($T_1=0.3\text{sec}$)よりも制御しやすいことが明かである。わずかな計算ではあるが、このように多質点系でもファジイ制御が適応できることが明らかとなった。

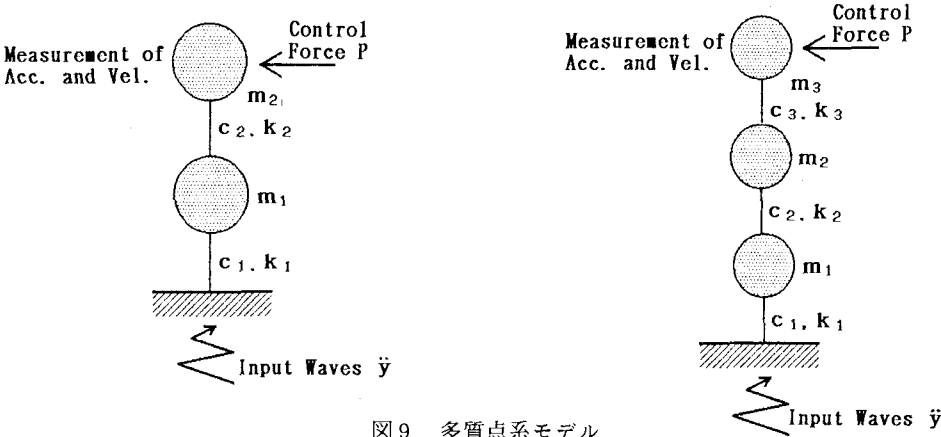
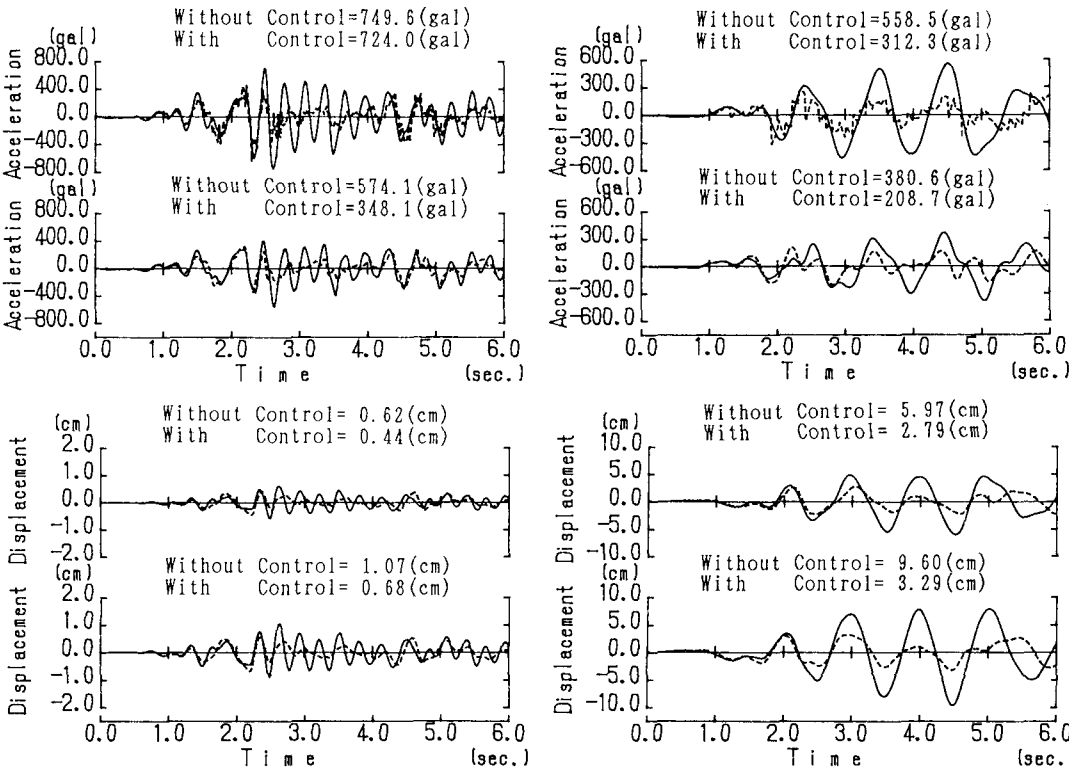


図9 多質点系モデル

表4 多質点系モデルの構造特性

	長周期構造物 ($T_1=1.0\text{sec}$)		短周期構造物 ($T_1=0.3\text{sec}$)	
	2 質点系モデル	3 質点系モデル	2 質点系モデル	3 質点系モデル
重量	1.0 (tf·s ² /cm)	1.0 (tf·s ² /cm)	1.0 (tf·s ² /cm)	1.0 (tf·s ² /cm)
剛性係数	93.4 (tf/cm)	195.0 (tf/cm)	1218.5 (tf/cm)	2336.0 (tf/cm)
減衰定数	0.05	0.05	0.05	0.05



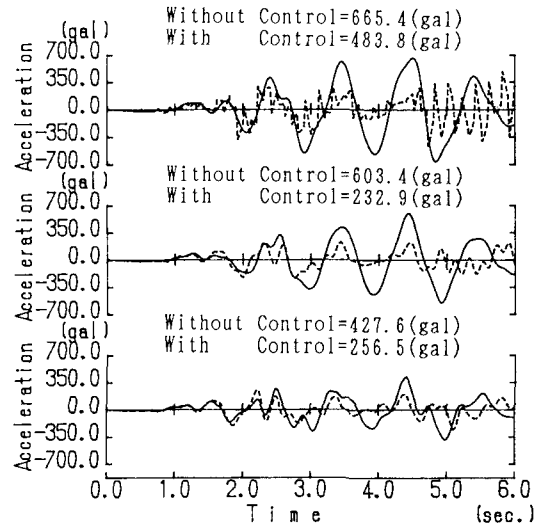
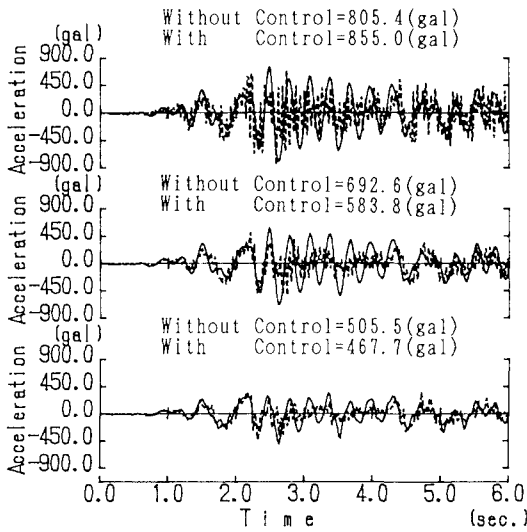


図11.1.a T=0.3 secの場合

図11.1.b T=1.0 secの場合

表5 多質点系モデルでの制御効果

			長 周 期 ($T_1=1.0$ sec)			短 周 期 ($T_1=0.3$ sec)		
			Without Control	With Control	Ratio	Without Control	With Control	Ratio
2 質点系モデル	質点 1	Acc. (gal)	380.6	208.7	0.548	574.1	348.1	0.606
		Dis. (cm)	9.60	3.29	0.324	1.07	0.68	0.636
	質点 2	Acc. (gal)	558.4	312.3	0.559	749.6	724.0	0.966
		Dis. (cm)	5.97	2.79	0.467	0.62	0.44	0.710
3 質点系モデル	質点 1	Acc. (gal)	427.6	256.5	0.600	505.5	467.7	0.925
		Dis. (cm)	8.16	2.45	0.300	0.85	0.55	0.647
	質点 2	Acc. (gal)	603.4	232.9	0.386	692.6	583.8	0.843
		Dis. (cm)	6.30	2.05	0.325	0.64	0.44	0.688
	質点 3	Acc. (gal)	665.4	483.8	0.724	805.4	855.0	1.062
		Dis. (cm)	3.40	1.89	0.529	0.34	0.37	1.088

5. まとめ

本研究では、せん断系バネ-マスモデルを対象に、アクティブコントロールにファジイ理論を応用し、その有効性を検証した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ファジイ理論をフィードバック制御手法に適用するためのファジイ推論を提案した。制御ルールは、入力値を観測時間 ΔT の応答加速度および応答速度の平均値としファジイ推論により制御力を出力する。
- (2) 短周期の構造物($T=0.3\text{sec}$)よりも長周期の構造物($T=1.0\text{sec}$)の方が制御しやすい。
- (3) 各パラメータは、制御力および観測の継続時間の無次元量 $\Delta T/T=0.1$, 規則パラメータのウェイト $e=1.0$, 制御力の大きさの係数 $\alpha=0.5$ のときに制御効果が高い。しかし、係数 α は入力地震動の特性の影響が大きく、最適値は $0.4\sim 0.8$ 前後の値にばらつく。制御力の形状の影響は小さい。
- (4) 一質点系での最適パラメータを用いたファジイ推論を多質点系に应用することができる。

(謝辞)

本研究を遂行するにあたり、奥村敏恵 東京大学名誉教授から常に適切な助言をいただいた。また、東京電機大学理工学部建設工学科卒論生の橋肇氏には、計算に協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す次第である。

(参考文献)

- 1) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和：1978年宮城沖地震による地震動記録とその特性，土木技術資料，Vol. 21, No. 4, pp. 47～52, 1978年4月。
- 2) 鈴木基行・武山 奏・菊池春海・尾坂芳夫：宮城沖地震によるRCラーメン高架橋被害の解析的研究，土木学会論文集，第384号／V-7, pp. 43～52, 1987年8月。
- 3) Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P. : New optimum control algorithms for structural control, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 9, pp1369～1386, September, 1987
- 4) 矢作 枢・吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文集，No. 356／I-3, pp435～444, 1985年4月。
- 5) 馬場俊介・二宮公紀・梶田健夫：鋼構造物のデジタル最適自動制御、土木学会論文集，No. 380／I-7, pp. 375～381, 1987年4月
- 6) 村上周太・前田幹夫：ファジイ制御の方法論，計測と制御，Vol. 28, No. 28, pp. 753～958 1989年11月。
- 7) 伊藤 修：ファジイコントローラ，数理科学，No. 284, pp. 55～62, 1987年2月。
- 8) 水本雅晴：Fuzzy理論とFuzzy推論，数理科学，No. 284, pp. 10～18, 1987年2月。

(1990年10月12日受付)