

(2) 最大化決定を用いたファジィ最適 耐震制御システム

FUZZY OPTIMAL ADAPTIVE CONTROL OF SEISMIC STRUCTURES

BY MAXIMIZING DECISION

河村 廣* 谷 明勲** 亘理良昭*** 山田 稔****

Hiroshi KAWAMURA, Akinori TANI, Yoshiaki WATARI, Minoru YAMADA

This paper describes a fuzzy optimal and adaptive control system and its digital simulations for a S.D.O.F. system subjected to earthquake loading. Optimization is performed by means of maximizing decision, and structural identification is based on the selection principle of pseudo-resonance. In the maximizing decision, membership functions of target responses(displacements) and target control variables(damping ratio) are assumed, and calculations are performed by means of α -level set method. In the real time structural identification a simple linear relationship between maximal absolute earthquake inputs and structural responses in a certain interval of time is derived from transitional pseudo-resonance. Digital simulations show the effectiveness of the proposed system for seismic structural control comparing normalized probability mass functions with assumed membership functions.

Key Words:Fuzzy Structural Control, Seismic Control, Optimum Control, Adaptive Control, Maximizing Decision, Structural Identification.

1. 序

土木、建築構造物の動的制御を考える場合、対象構造物の持つ複雑さ、不確かさ、スケールの大きさ等の特徴を考慮する必要がある¹⁾。文献[2]には、構造物の動的制御に関する最近の研究がまとめられている。一方、近年、Zadeh 博士により提唱されたファジィ理論³⁾の工学的制御システムへの適用が試みられている⁴⁾。動的な構造物制御システムを構築する場合の最も重要な課題は、どのようにして知的システム、即ち、最適、適応、予測制御システムを構築するかという点にある⁵⁾。Yao 博士と筆者の一人は、ファジィ理論を適用した、地震入力を受ける構造物の知的制御システムを提案している⁶⁾。さらに、この考え方に基づいて、筆者らは条件付ファジィ集合⁷⁾を用いた地震動入力のリアルタイム予測に関するディジタルシミュレーションを行った⁸⁾。

本報は、既に提案している最大化決定⁷⁾による知的制御法⁶⁾を基に、ファジィ理論を用いた最適適応制御システムの構築を行い、さらに、これを用いたディジタルシミュレーション結果を示そうとするものである⁹⁾。

* 工博 神戸大学助教授 工学部建築系教室

** 工修 神戸大学助手 工学部建築系教室

*** 神戸大学大学院生 工学部建築系教室

**** 工博 神戸大学教授 工学部建築系教室

2. 基本システム

2.1 フローチャート

Fig.1に、文献[6]の考え方に基いたファジィ最適制御システムのフローチャートを示す。このシステムは、以下に示すような特徴を持っている。

- (1) 目標応答と制御変数は、帰属度関数で表される。
- (2) リアルタイム構造同定を行う。
- (3) 最適制御変数を最大化決定により求める。

ただし、Fig.1 中破線で囲まれた地震入力予測に関しては文献[8]で別途検討しており、ここではその部分を省略した。

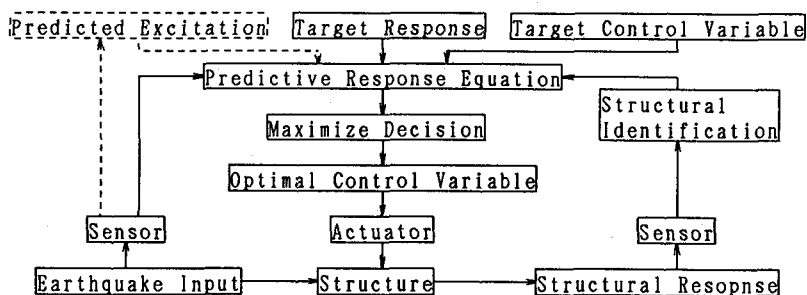


Fig.1 ファジィ最適制御システムのフロー

2.2 基本仮定

構造物は、Fig.2(a)に示すように一質点振動子と仮定する。ここで x は地震入力、 y は応答出力、 t は時間を表す。また、質量 m とバネ剛性 k は一定と仮定し、粘性減衰定数 h を制御変数として設定する。さらに、本制御方法では、ある時間間隔 Δt を制御時間として設定し、 Δt 間は制御変数 h を一定とする。ここで、 X_i 、 Y_i は、Figs.2(b), (c)に示すように、 i 番目の制御時間における入力 x 、出力 y の絶対値の最大値を表す⁸⁾。

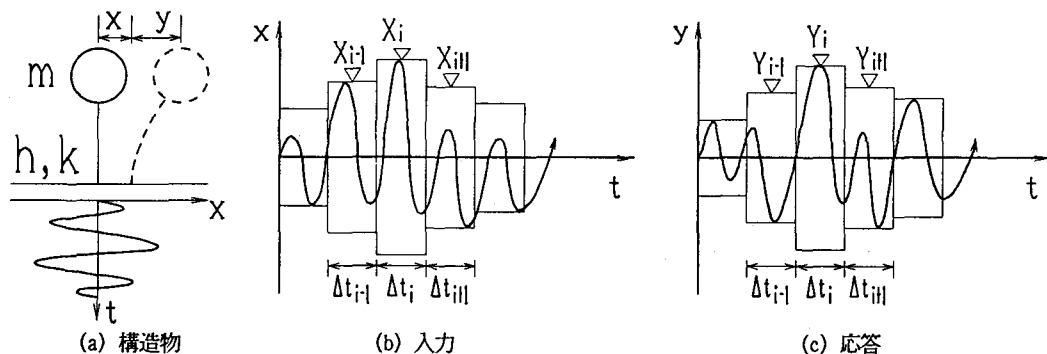


Fig.2 構造物，入力，応答

2.3 構造同定

構造同定を行うために、ここでは以下の仮定を設ける。

$$Y_i = \kappa_i \cdot X_i, \quad (1)$$

$$\kappa_i = r_i \cdot \frac{1}{2h_i} (1 - e^{-2\pi h_i (T_e / \Delta t_i)}) \cdot f(T_e), \quad (2)$$

$$\kappa_{i+1} = r_{i+1} \cdot \frac{1}{2h_{i+1}} (1 - e^{-2\pi h_{i+1} (T_e / \Delta t_{i+1})}) \cdot f(T_e), \quad (3)$$

$$r_{i+1} = (r_{i-1} + r_i) / 2, \quad (4)$$

ここで、 κ_i : 応答倍率, r_i : 低減係数, T_e : 固有周期(ここでは一定),

$f_e(T_e)$: Y_i と X_i の物理的意味を適合させるための修正関数(ここでは一定),

κ_{i+1} , r_{i+1} , h_{i+1} : 次の制御時間 Δt_{i+1} における κ , r , h の予測値。

式(1)は、最も単純な応答 Y と入力 X の線形関係を仮定している⁸⁾。また、式(2)(3)は、選択過渡共振原理より導かれる。式(4)は、 r_{i+1} と r_{i-1} , r_i との差が大きくないことを仮定している。式(1)~(4)、及び、

$$Y'_{i+1} = r'_{i+1} \cdot X_{i+1}, \quad (5)$$

より、第 $i+1$ 回目の制御時間 Δt_{i+1} における構造物応答予測値 Y'_{i+1} をリアルタイムに求めることができる。(実際に制御を行う場合では、入力値 X_{i+1} にも予測された値を用いることができる⁶⁾⁸⁾。) また、言い替えば、これらの関数は、Fig. 1 に示す応答予測関数として Y'_{i+1} と h'_{i+1} の関係を表すことになる。

2. 4 最大化決定

ここで提案する制御システムでは、最大化決定手法⁷⁾により理論的に最適化が行われる。最適化は、Fig. 3 に示すファジィ制約としての目標応答とファジィゴールとしての目標制御変数を用いて行われる。Fig. 3 における $g^{-1}(\cdot)$ は式(1)~(5)より得られる Y'_{i+1} と h'_{i+1} の関係の逆関数を表す。従って、 $g^{-1}(Y'_{i+1})$ により、 Y'_{i+1} に対応する h'_{i+1} が求まる。最大化決定により、最適制御変数として粘性減衰定数 h^*_{i+1} 、および、満足度の最大値が Fig. 3 に示すように求められる。

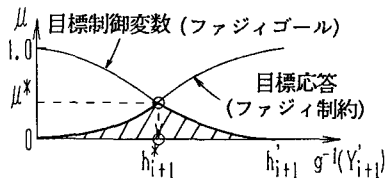


Fig. 3 h_{i+1} に関する最大化決定

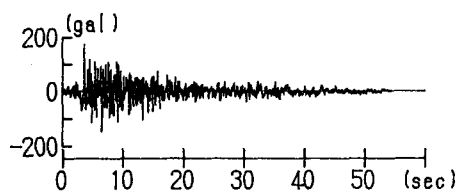
3. デジタルシミュレーション

3. 1 入力地震波, および構造物の動的特性

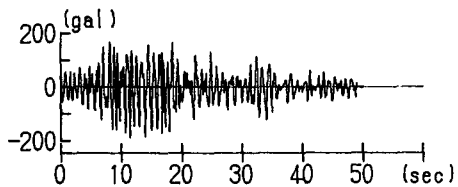
Table 1, Fig. 4 に、ここで用いる入力地震動を示す¹⁰⁾¹¹⁾。観測された加速度波形¹¹⁾は、文献[12]により修正されたものを用いる。また、参考のために、Fig. 5 に速度応答スペクトルを示す。一方、構造物の動的特性は、固有周期 $T_e = 0.5$ sec, 粘性減衰定数の最小値 $h_{\min} = 0.05$ を仮定する。即ち、 $h_{\min}$ は、非制御時の粘性減衰定数を表す。

3. 2 目標応答, および制御変数に対する帰属度関数

最大化決定を行うために、目標応答と目標制御変数にそれぞれ帰属度関数を設定する。ここでは、目標応答として応答変位を、目標制御変数として粘性減衰定数を設定する。仮定した帰属度関数を Figs. 6, 7 に示す。



(a) Taft EW 1952[10]

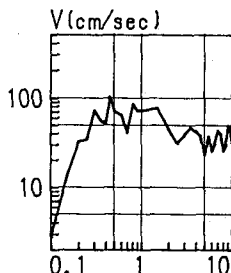


(b) 新石狩橋 TR 1968[11][12]

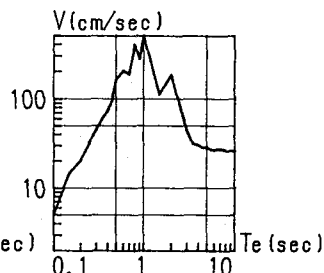
Fig. 4 入力地震動

Table 1 実測地震波 9)10)

No	観測点	方向	発生日時	M	Δ (km)	継続 時間 (sec)	最大 加速度 (cm/sec^2)
1	新石狩大橋	TR	1968. 5. 16	7.9	330	50.00	186.9
2	TAFT	EW	1952. 6. 21	7.7	41.5	54.38	175.9



(a) Taft EW 1952



(b) 新石狩橋 TR 1968

Fig. 5 速度応答スペクトル

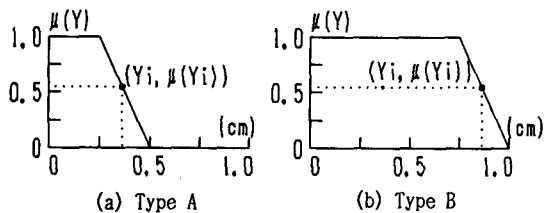


Fig. 6 応答変位に対する帰属度関数の設定

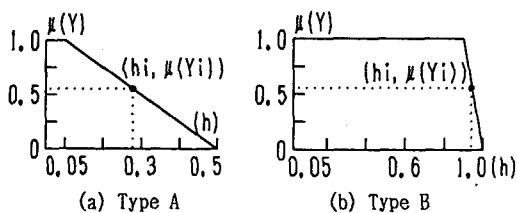


Fig. 7 粘性減衰定数に対する帰属度関数の設定

ここでは、目標応答、目標制御変数ともそれぞれ Type A, Type B の 2 種類を仮定する。

3. 3 計算方法

ここで示すケーススタディでは、構造物の応答は、新石狩橋では時間間隔 0.01sec, Taft では 0.02sec で 4 次精度のルンゲークッタ法を用いて計算する。最大化決定は α -レベル集合¹³⁾¹⁴⁾ の考え方を用いて行う。さらに、構造制御では、制御時間 Δt を $\Delta t = 1.2 \text{ sec}$ と仮定した。

3. 4 計算結果

計算は、以下の 10 ケースについて行った。

- | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (1) TA : RA : CA, | (2) SI : RA : CA, | (3) TA : RA : CB, | (4) SI : RA : CB, |
| (5) TA : RB : CA, | (6) SI : RB : CA, | (7) TA : RB : CB, | (8) SI : RB : CB, |
| (9) TA : NC, | (10) SI : NC, | | |

ここで、

TA : Taft EW 1952, SI : 新石狩橋 TR 1968,

RA および RB : 変位応答に対する帰属度関数 Type A, Type B,

CA および CB : 粘性減衰定数に対する帰属度関数 Type A, Type B,

NC : 非制御。

Fig. 8 に、制御時と非制御時の時刻歴変位応答結果の比較を示す。制御効果を明らかにするために、応答 Y に関する規準化された確率密度関数 f と、目標応答に対して設定された帰属度関数 μ との比較を、上に示す 10 ケースについて Fig. 9 に示す。図中、MF は帰属度関数を表す。ここで、「規準化された」とは、「確率密度関数を最大値により除算する」ことを表す。また、Fig. 10 に、制御粘性減衰定数の頻度 f と、粘性減衰定数 h に対して設定された帰属度関数 μ の比較を、同じく規準化された確率密度関数を用いて示す。なお、非制御の場合は、粘性減衰定数は $h_{\min}=0.05$ で一定としているため、ここでは考慮しない。

次の制御時間 Δt_{i+1} における最適粘性減衰定数 h_{i+1}^* は、 h に関する帰属度関数より決定されアクチュエータに制御信号が送られる。しかし、応答予測関数に内在する誤差により、実際の変位応答 Y は帰属度関数上に表れるとは限らない。Fig. 11 は、制御後の実際の応答に対する帰属度関数の分布を表す。Fig. 11 より、決定された帰属度関数の値と実際の応答に対する帰属度関数の値の差を評価することができる。決定された帰属度関数の値と実際の応答に対する帰属度関数の値に対して、規準化された確率密度関数の分布を Fig. 12 にそれぞれ実線、破線で示す。

4. 考察

Figs. 8, 9 より、応答変位は、提案したシステムにより十分に低減し制御されていることがわかる。さらに、

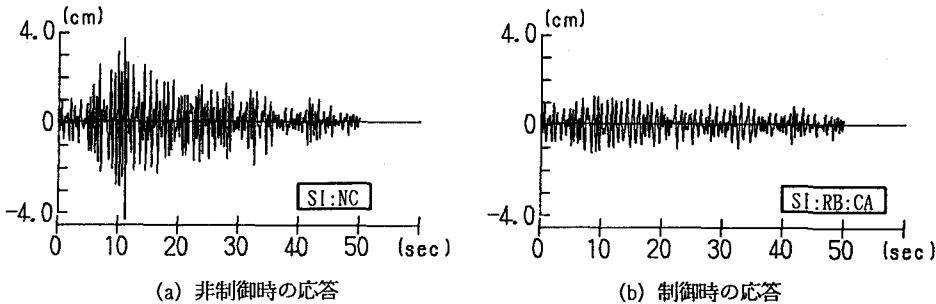


Fig. 8 制御時、非制御時の時刻歴応答変位の比較

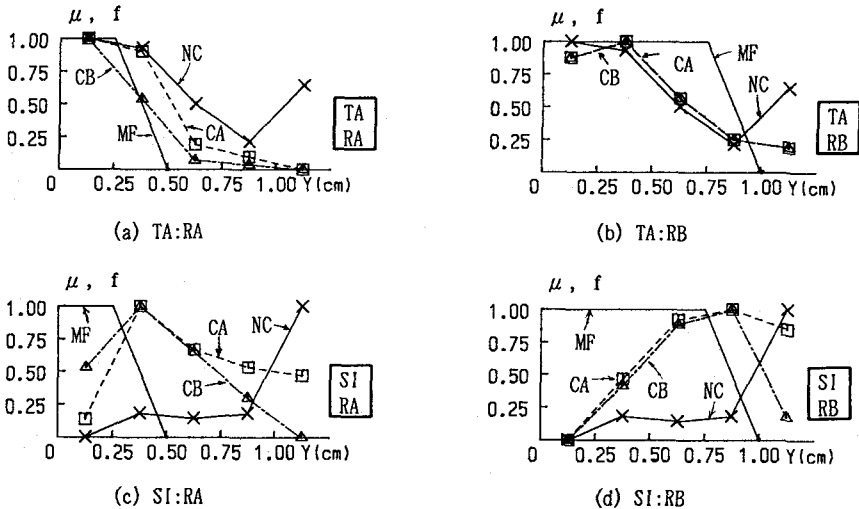


Fig. 9 応答変位 Y に対する規準化された確率密度関数

応答変位と粘性減衰定数に対して設定した帰属度関数は、Figs. 9, 10 に示すように効果的に作用していることがわかる。しかし、Fig. 9(c)では、制御された応答変位が仮定した帰属度関数を大きく超過している。これは、Type A, Type B で設定した粘性減衰定数に対する帰属度関数が、大きな入力地震動（新石狩橋：Table1, Fig. 5）と、小さなレベルに設定された応答の帰属度関数に対しては十分な効果を発揮し得ないことによると考えられる。粘性減衰定数の不足は、Figs. 10(c), (d) におけるRA の場合にも見られる。また、Fig. 9(b), Figs. 10(a), (b)では、上に述べた現象と逆の場合がみられる。

Fig. 11は、構造同定の正確さが重要であることを表している。しかし、実際の応答と予測値との偏差が対称的かつ大きくなければ、Fig. 12に示すように、工学的観点からはほとんど問題がない。言い替えば、応答変位に対する決定された帰属度関数の値と実際の値との差は小さいことがわかる。

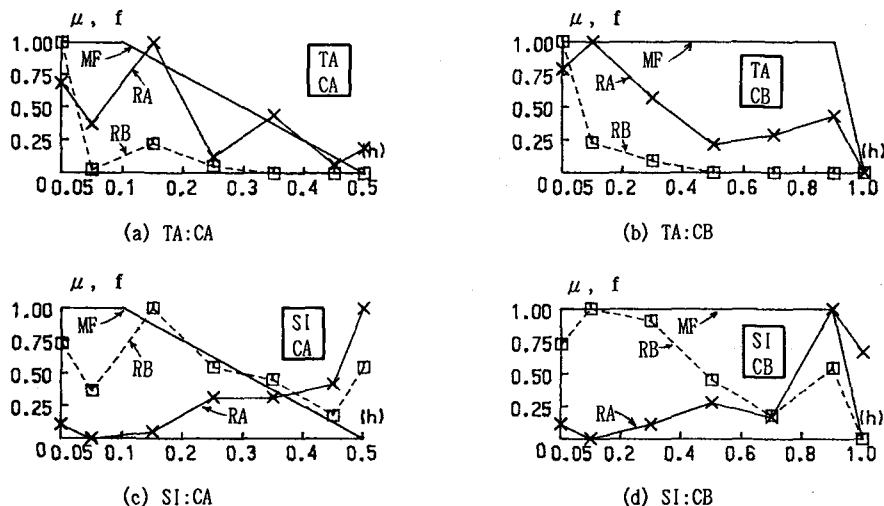


Fig. 10 粘性減衰定数hに対する規準化された確率密度関数

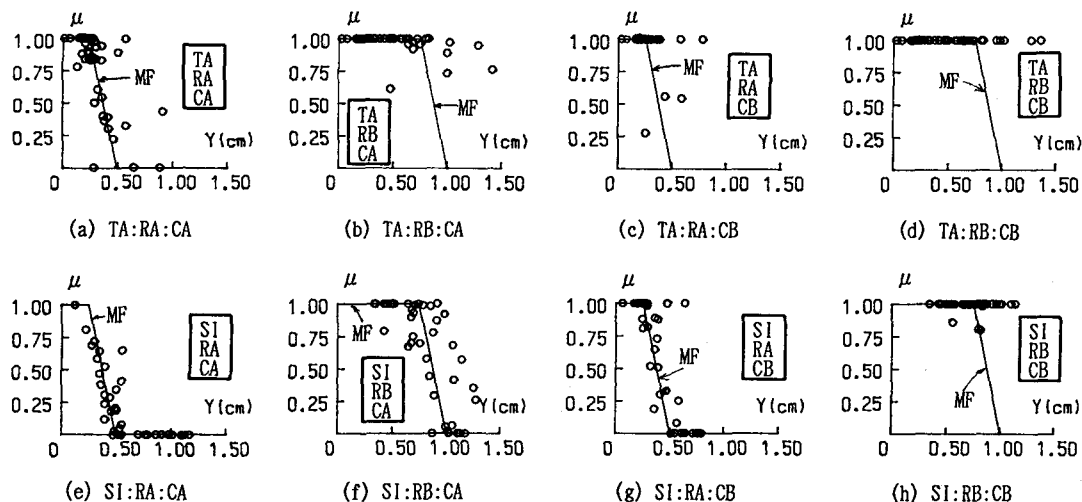


Fig. 11 制御後の実際の応答に対する帰属度関数の分布

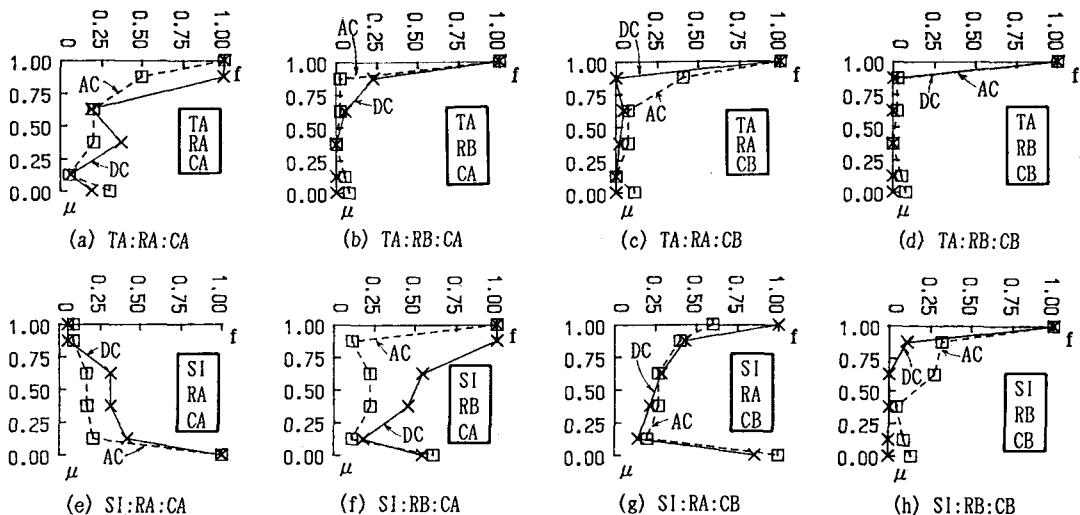


Fig. 12 最大化決定された帰属度関数の値と実際の応答に対する帰属度関数の値の規準化確率密度関数分布の比較

5. 結

本報では、地震入力をうける構造物のファジィ最適適応制御システムを提案した。このシステムでは、最適化は、ファジィ制約としての目標応答とファジィゴールとしての目標制御変数を用いて最大化決定⁷⁾を行う。また、最大化決定を行う前に、構造同定が選択過渡共振原理を用いて実行される。さらに、提案したシステムを用いたデジタルシミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- (1) 最大化決定は、耐震最適適応制御に有効である。
- (2) 目標応答と制御変数に対して仮定された帰属度関数と規準化された確率密度関数を比較することにより、最大化決定の有効性が検証された(cf. Figs. 9, 10)。
- (3) 目標応答に対して決定された帰属度関数の値と、実際の応答結果に対する帰属度関数の分布を比較することにより、構造制御における構造同定の有効性が検証された(cf. Fig. 12)。

ここで提案したシステムに、次のステップの制御時間における地震動入力を予測するシステム⁸⁾を付加することにより、Yao 博士と筆者の一人によって提案された、ファジィ理論を用いた最適適応予測制御システムを構築することができる。

謝辞

本研究を行うに際し、御助言を頂いたTexas A&M大学のJ. T. P. Yao教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Yao, J.T.P.: Concept of Structural Control, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 98, No. ST7, pp. 1567-1574, July, 1972.
- [2] Yang, J.N. and Soong, T.T.: Recent Advances in Active Control of Civil Engineering, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 3, No. 4, pp. 179-188, 1988.
- [3] Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, pp. 338-353, 1965.
- [4] Tong, R.M.: A Control Engineering Review of Fuzzy Systems, Automatica, 13(6), pp. 559-569, 1977.

- [5] Chong, K. P., Lui, S. C., and Li, J. C., Eds.: Intelligent Structures, Elsevier Applied Science, New York, 1990.
- [6] Kawamura, H., and Yao, J. T. P.: Application of Fuzzy Logic to Structural Control Motion of Civil Engineering Structures, Proceedings of NAFIPS'90, Quarter Century of Fuzzyness, Vol. I, pp. 67-70, June, 1990.
- [7] Kawamura, H., Tani, A., Yamada, M., and Tsunoda, K.: Real Time Prediction of Earthquake Ground Motions and Structural Responses by Statistic and Fuzzy Logic, Proc. of 1st International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, pp. 534-538, Dec., 1990.
- [8] Bellman, R. E., and Zadeh, L. A.: Decision-Making in a Fuzzy Environment, Management Science, Vol. 17, No. 4, pp. B-141-164, Dec., 1970.
- [9] Kawamura, H., Tani, A., Watari, Y., and Yamada, M.: Fuzzy Optimal Adaptive Control of Seismic Structures by Maximizing Decision, "Proc. of International Fuzzy Engineering Symposium '91, Nov., 1991, (to be published).
- [10] Earthquake Engineering Research Laboratory: Strong Motion Earthquake Accelerograms, Report No. EERL 76-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, 1976.
- [11] 建設省土木研究所: 地震動記録のデジタル数値改訂版(その1~その3), 土木研究所資料, 第876号, 1973年12月.
- [12] 川島一彦, 高木義和, 相沢興: 数値化精度を考慮したSMAC-B2型強震計記録の計器補正および変位計算法, 土木学会論文集, 第325号, pp. 35~44, 1982年9月.
- [13] Zadeh, L. A.: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Part I, Information Sciences, 8, pp. 199-249, 1975.
- [14] 田中英夫, 奥田徹示, 浅居喜代治: Fuzzy数値計画法, 計測自動制御学会論文集, 第9巻, 第5号, pp. 607-613, 1973年10月.