

Fuzzy理論を用いた单相多次元熱流動解析コードの
適応制御システムの開発 (第1報)
基本性能の確認

1987年8月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

Fuzzy理論を用いた单相多次元熱流動解析コードの 適応制御システムの開発 (第1報) 基本性能の確認

村松 寿晴*, 前川 勇**

要 旨

单相多次元熱流動解析コード" AQUA " に Fuzzy 理論を用いた適応制御システムを導入した。この適応制御システムは、与えられた計算体系および境界条件の下で計算安定性、計算精度および計算時間の最適化を計るものである。操作対象は、時間刻み幅 Δt と SOR 法を使用する上での加速係数 ω である。

時間刻み幅 Δt の最適化については、外部より設定固定して計算を美行した場合に比べ計算時
時および計算精度につきこれを上回る良好な結果が得られた。例えば、完全陰解法を用いた定常
計算については、計算精度を保障しつつ計算時間が約 $2/3$ に短縮された。

加速係数 ω の最適化についても、外部より設定固定した場合あるいは固有値計算より求められ
た理論値に基づいて設定固定した場合と比較して、計算時間および収束性等につきこれらと同等
あるいはこれらを上回る良好な結果が得られた。

以上得られた如見から单相多次元熱流動解析コードの最適化に対し Fuzzy 理論を用いた適応
制御系が有効であることが確認された。

* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室 (兼、技開部フロンティア研究 Gr)

** 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

August, 1987

Development of adaptive control system using the Fuzzy theory for Multi-dimensional thermal-hydraulic analysis code

Survey of fundamental functions

Toshiharu Muramatsu and Isamu Maekawa**

Abstract

The adaptive control system using the Fuzzy theory has been developed and implemented to the single-phase three-dimensional thermal-hydraulic analysis code AQUA. The system controls automatically the user specified values, like a time step size Δt and relaxation factor for matrix calculation using iterative solution into best ones in term of stability, accuracy and cost during an execution of the code.

In control of a time step size Δt , the Fuzzy controller can give better results in accuracy and cost compared with the case of user specified value. For example, Total CPU time needed for a steady-state calculation has been reduced by 2/3 times under the fully implicit scheme.

In control of relaxation factor ω , the Fuzzy controller can give better results in convergence and cost Compared with cases of user specified value and theoretical value using eigenvalue of coefficient matrix of a pressure equation.

From above results, It has confiremed that the adaptive control system using the Fuzzy theory is efficient measure for best tuning calculation using a multi-dimensional thermal-hydraulic analysis code.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC,
(Concurrently, Frontier Research Gr, Engineering Development Division)

** Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 Fuzzy制御理論の適用法	3
第3章 単相多次元コードAQUAの無条件安定制御	9
3.1 半陰解法の無条件安定制御	9
3.1.1 質量残差に関するFuzzy変数と制御ルール	9
3.1.2 物理量変動に関するFuzzy変数と制御ルール	11
3.1.3 数値実験による検証	13
(i) 定常計算問題への適用	13
(ii) 過渡計算問題への適用	15
3.2 完全陰解法の無条件安定制御	16
3.2.1 質量残差に関するFuzzy変数と制御ルール	16
3.2.2 物理量変動に関するFuzzy変数と制御ルール	17
3.2.3 数値実験による検証	19
(i) 定常計算問題への適用	19
(ii) 過渡計算問題への適用	20
3.3 ま と め	22
第4章 点SOR法における加速係数の最適選定制御	24
4.1 半陰解法における最適制御	24
4.1.1 質量残差に関するFuzzy変数と制御ルール	24
4.1.2 質量残差勾配に関するFuzzy変数と制御ルール	25
4.1.3 数値実験による検証	26
(i) 強制対流過渡計算問題	26
(ii) 強制対流定常計算問題	28
(iii) 自然対流細メッシュ体系問題	29
(iv) 自然対流粗メッシュ体系問題	30
4.2 完全陰解法における最適制御	31
4.2.1 質量残差に関するFuzzy変数と制御ルール	31
4.2.2 質量残差勾配に関するFuzzy変数と制御ルール	31
4.2.3 数値実験による検証	32
(i) 強制対流問題	32

(ii) 自然対流問題	33
4.3 ま と め	34
第5章 結 言	35
参考文献	36
付録A 固有値計算による加速係数の推定	37

List of Figures

- Fig. 2.1 General Flow Chart for SIMPLEST version in AQUA
- Fig. 3.1 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (1) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Small)
- Fig. 3.2 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (2) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Small Midium)
- Fig. 3.3 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (3) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Midium)
- Fig. 3.4 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Steppint (4) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Midium Large)
- Fig. 3.5 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (5) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Large)
- Fig. 3.6 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (1) (RDTIME is Small)
- Fig. 3.7 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (2) (RDTIME is Small Midium)
- Fig. 3.8 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (3) (RDTIME is Midium)
- Fig. 3.9 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (4) (RDTIME is Midium Large)
- Fig. 3.10 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (5) (RDTIME is Large)
- Fig. 3.11 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k& ϵ (1) (grad $\Delta\phi$ is Very Good)
- Fig. 3.12 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k& ϵ (2) (grad $\Delta\phi$ is Good)
- Fig. 3.13 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k& ϵ (3) (grad $\Delta\phi$ is Normal)
- Fig. 3.14 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k& ϵ (4) (grad $\Delta\phi$ is Small Divergence)
- Fig. 3.15 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k& ϵ (5) (grad $\Delta\phi$ is Divergence)
- Fig. 3.16 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Steady-State Problem with MICE Scheme
- Fig. 3.17 Input Data for Steady-State Problem with MICE Scheme
- Fig. 3.18 Comparison of Concergency of ($\Delta U/U$) under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme

- Fig. 3.19 Comparison of Concergency of $(\Delta W/W)$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme
- Fig. 3.20 Comparison of Concergency of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme
- Fig. 3.21 Comparison of Concergency of $(\Delta \epsilon/\epsilon)$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme
- Fig. 3.22 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme
- Fig. 3.23 Comparison of concergency of $(\Delta U/U)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme
- Fig. 3.24 Comparison of Concergency of $(\Delta W/W)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme
- Fig. 3.25 Comparison of Concergency of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme
- Fig. 3.26 Comparison of concergency of $(\Delta \epsilon/\epsilon)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme
- Fig. 3.27 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme
- Fig. 3.28 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 3.29 Velocity and Temperature Transients at Inlet of The Test Section
- Fig. 3.30 Input Data for Steady-State Run with MICE Scheme
- Fig. 3.31 Input Data for Transient Run with MICE Scheme
- Fig. 3.32 Transition of Convergency of Mass Balance under Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 3.33 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 3.34 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPI.EST Scheme (1) (RDTIME is Small)
- Fig. 3.35 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (2) (RDTIME is Small Midium)
- Fig. 3.36 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (3) (RDTIME is Midium)
- Fig. 3.37 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (4) (RDTIME is Midium Large)
- Fig. 3.38 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (5) (RDTIME is Large)

- Fig. 3.39 Member Ship Function for Gradient of Transient Boundary values under SIMPLEST Scheme (1) (grad ϕ is Gentle)
- Fig. 3.40 Member Ship Function for Gradient of Transient Boundary values under SIMPLEST Scheme (2) (grad ϕ is Midium)
- Fig. 3.41 Member Ship Function for Gradient of Transient boundary values under SIMPLEST Scheme (3) (grad ϕ is Rapidly)
- Fig. 3.42 Member Ship Function for RDTIME Setting under Transient Run with SIMPLEST Scheme (1) (RDTIME is Small)
- Fig. 3.43 Member Ship Function for RDTIME Setting under Transient Run with SIMPLEST Scheme (2) (RDTIME is Midium)
- Fig. 3.44 Member Ship Function for RDTIME Setting under Transient Run with SIMPLEST Scheme (3) (RDTIME is Large)
- Fig. 3.45 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.46 Input Data for Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.47 Comparison of concergency of $(\Delta U/U)$ under Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.48 comparison of concergency of $(\Delta W/W)$ under Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.49 Comparison of Concergency of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.50 comparison of Concergency of $(\Delta \epsilon/\epsilon)$ under Steady-state Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.51 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.52 Mesh Arrangement or Evaluation of The Fuzzy controller on Transient Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.53 Velocity Transient at Inlet Boundary
- Fig. 3.54 Input Data for Steady-State Run with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.55 Input Data for Transient Run with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.56 Comparison of Velocity Component U at Outlet
- Fig. 3.57 Comparison of Velocity component W at Outlet
- Fig. 3.58 Comparison of CPU Time under Various Time Step Size on Transient Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 3.59 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Transient Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.1 Member Ship Function of Mass Balance criteria for Relaxation Factor (1) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Small)

- Fig. 4.2 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Relaxation Factor (2) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Midium Large)
- Fig. 4.3 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Relaxation Factor (3) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Large)
- Fig. 4.4 Member Ship Function for Relaxation Factor Setting (1) (OMEGA is Small)
- Fig. 4.5 Member Ship function for Relaxation Factor Setting (2) (OMEGA is Midium)
- Fig. 4.6 Member Ship Function for Relaxation Factor Setting (3) (OMEGA is Large)
- Fig. 4.7 Member Ship Function of Gradient of Mass Residual for Relaxation Factor (1) (grad δ_{\max} is Good)
- Fig. 4.8 Member Ship Function of Gradient of Mass Residual for Relaxation Factor (2) (grad δ_{\max} is Bad)
- Fig. 4.9 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy controller on Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.10 Input Data for Steady-State Run with MICE Scheme
- fig. 4.11 Input Data for Transient Run with MICE Scheme
- Fig. 4.12 Velocity Transient at Inlet boundary
- Fig. 4.13 Input Data for Steady-State Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.14 Transition of Relaxation Factor ω under Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.15 Transition of Pressure Iteration Number under Transient Problem with MICE Shceme
- fig. 4.16 Transition of convergency of Mass Balance under Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.17 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process (#1) under Transient Problem with MICE Shceme
- Fig. 4.18 comparison of convergency of Mass Residual on One Time Step Process (#1) under Transient Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.19 Transition of Relaxation Factor ω under Steady-state Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.20 Transition of Convergency of Mass Balance under Steady-State Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.21 Comparison of concergency of ($\Delta U/U$) under Steady-State Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.22 Comparison of Concergency of ($\Delta W/W$) under Steady-State Problem with MICE Scheme

- Fig. 4.23 comparison of concergency of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.24 Comparison of concergency of $(\Delta \epsilon/\epsilon)$ under Steady-state Problem with MICE Scheme
- Fig. 4.25 Mesh arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.26 Input Data for Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.27 Transition of Relaxation Factor ω under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.28 Transition of Pressure Iteration Number under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.29 Transition of convergency of Mass Balance under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.30 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process (#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.31 Comparison of convergency of Mass Residual on One Time Step Process (#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)
- Fig. 4.32 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)
- Fig. 4.33 Input Data for Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)
- Fig. 4.34 Transition of Relaxation Factor ω under Natural Circulation Problem with MICE Shceme (Coarse)
- Fig. 4.35 Transition of Pressure Iteration Number under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)
- Fig. 4.36 Transition of Convergency of Mass Balance under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)
- Fig. 4.37 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process (#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)
- Fig. 4.38 Comparison of convergency of Mass Residual on One Time Step Process (#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)
- Fig. 4.39 Input Data for forced-Convection Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.40 Transition of Relaxation Factor ω under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme

- Fig. 4.41 Comparison of Concergency of $(\Delta U/U)$ under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.42 Comparison of Concergency of $(\Delta W/W)$ under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.43 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process (#1) under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.44 Input Data for Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.45 Transition of Relaxation Factor ω under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.46 Comparison of Concergency of $(\Delta U/U)$ under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.47 Comparison of concergency of $(\Delta W/W)$ under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme
- Fig. 4.48 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process (#1) under Natural circulation Problem with SIMPLEST Scheme

第 1 章 緒 言

原子炉プラント機器内の单相多次元熱流動解析コードとして、AQUA (Advanced simulation using Quadratic Upstream Algorithm) が開発されている^{1,2,3)}。本コードでは、1次風上差分法を使用した場合に問題となる数値拡散の影響を極力排除するために、空間に関し2次の正確度を持つ高次差分法が組み込まれており⁴⁾、QUICK法またはQUICK-FRAM法が選択可能である。しかし、現段階ではこれら高次差分法と組み合わせて用いることの出来る時間積分法は、半陰解法であるMICE (Modified Implicit Continuous-fluid Eulerian) 法のみである。このため、高次差分法を選択した場合には、時間刻み幅 Δt に関し Courant 条件による安定制限を受けることになる。そこで AQUA では、安定制限条件から決まる Δt_{tc} に対し緩和係数 α (0.0 ~ 1.0) を用意し、実際に使用する時間刻み幅 Δt を $\alpha * \Delta t_{tc}$ により決定している。しかし、この緩和係数 α の最適値は、問題毎に異なると共に、同一の問題でも計算過程での収束状態によって変化する。このため、Trial & Error により、系が発散しない α をコード運用者が勘と経験とから選び出し、計算を実行している。

一方、1次風上差分法については、時間積分法として完全陰解法が使用されているため時間刻み幅 Δt に関して安定制限は受けないが、目的とする精度を有する解を得るための最適な時間刻み幅 Δt が存在する。この Δt の選定も同様に Trial & Error でしか行なうことができない。

また、AQUA では、計算時間の高速化を計るため、連立 1 次方程式の解法として、従来から一般的に使用されてきている SOR (Successive Over-Relaxation) 法に替えて ICCG (Incomplete Choleski Conjugate Gradient) 法を採用している^{5,6,7)}。しかし、プログラム構成の簡便さおよび記憶領域の節約度から SOR 法は捨てがたい利点があり、加速係数 ω の選定次第では ICCG 法に匹敵する高速化を実現出来る可能性もある。この SOR 法における最適な加速係数 ω の選定に関しては、絶対値最大の固有値を用いた理論的アプローチ^{*}が試みられてはいるが、固有値そのものの計算に手間がかかり、問題毎に異なった値を取るため、SOR 法計算過程でオンラインで最適値を常時設定するといった一般的手法にまでは至っていない。このため、過去の経験をもとにコード運用者がそれぞれ適切であると考える値を設定して計算を実行している。

このようなコード運用上のノウハウの存在は、一般利用者に対し多大なる負荷を与えるとともに CPU 時間の浪費を招くことになる。特に、精度上有利であるはずの高次差分法を使いにくいものにしていく。

以上の問題が何らかの手法により解決されれば、いかなる解析問題に対しいかなる時間積分法

* 付録 A 参照のこと。

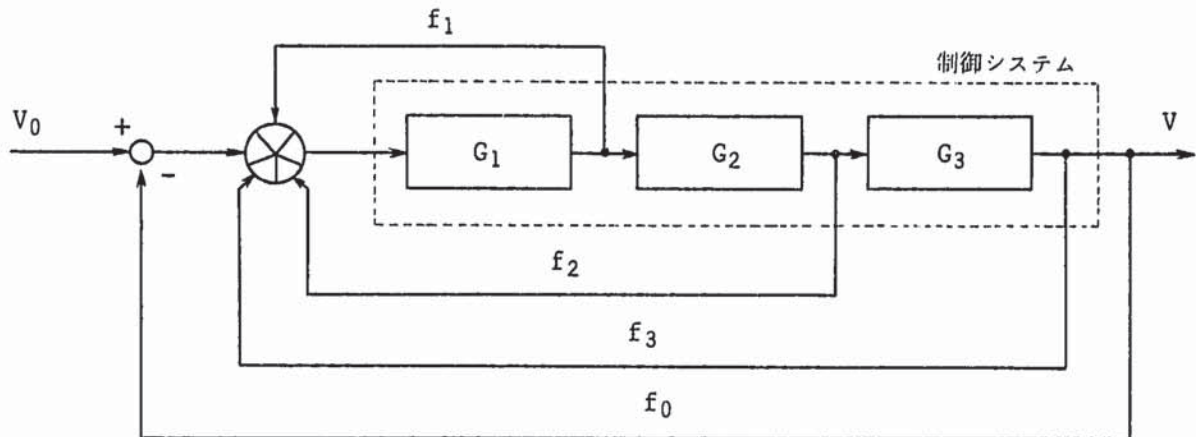
を用いようとも数値計算上安定であり、かつ高効率な解析が実現される。

以上に示した緩和係数 α および加速係数 ω の選定は、コード運用に関する専門家の勘と経験に基づいて行なわれている。この様な勘と経験による決定過程では、「質量残差が若干大きいから、緩和係数 α を少し小さくする」といったあいまい性を含んだ制御ルール(Linguistic Rules, LC-Rules)に則って決定がなされている。この様なあいまい性記述が含まれた規則に基づく意志決定手法を取り扱うものとして、Zadehにより導入されたFuzzy理論⁸⁾がある。このFuzzy理論を制御に応用する事により、非線形性が強く、または特性の複雑な系の制御が容易に行い得ることが示されている⁹⁾。

本研究は、以上に示した緩和係数 α および加速係数 ω の選定を、専門家の知識に基づいたFuzzy理論による制御法を応用して最適化する事を試みるものである。

第2章 Fuzzy制御理論の適用法

多次元熱流動解析コードを計算機能毎にブロック化した場合、そのシステム構成は下図に示すようなものとなり、入力 V_0 に対し出力 V を得るためのフィードバック制御系と考える事が出来る。



すなわち、 G_1 、 G_2 、 G_3 はそれぞれ運動量計算ブロック、乱流量計算ブロック、エネルギー計算ブロックに対応し、 V_0 および V がそれぞれ第 n ステップでの解、第 $n+1$ ステップでの解である。時間刻み幅 Δt による安定化制御を考えた場合には、 f_0 のフィードバックはCourant条件によるフィードバックに相当する。この f_0 に相当するフィードバックループは、半陰解法による時間積分法を用いている解析コードであれば通常組み込まれているのが実状である。しかし、この様な制御方法のみでは、系全体のマクロな制御は実現可能であるが、ブロック毎のミクロな制御を通しての最適化は実現不可能である。何故なら f_0 をフィードバックするための観測変数は、通常Courant条件の単一変数のみであり、系全体の挙動を取り扱えないことによる。前図に示した f_1 、 f_2 、 f_3 等の各ブロックからのミクロな出力情報を制御に用いることを考える。この様なミクロ情報を用いた制御法として状態空間法等のベクトル型制御法が提案され成功を収めている例はあるが、何れも線形問題への適用例で多次元熱流動解析コードの数値計算等のような非線形問題への適応性等では不確かな面が数多く残るのが実状である。しかし、コードを使用する専門家はこの非線形問題をさしたる困難もなく克服し、有効な解を得ている。したがって専門家の知識を積極的に利用するFuzzy制御理論を適用すれば容易に安定化制御が行えるものと考えられる。この制御法は、数式処理に基づいた理論的アプローチではなく、専門家の勘と経験に基づく知識処理を用いたものである。具体的には、専門家の持つ各ブロックの状態に関する知識を用いて各ブロックの状態が最良となるように制御動作を決定するものである。

ここで専門家はどのような制御動作を行っているかを簡単に考察してみると、先ず各システム

要素の状態把握を行うのが通例である。例えば、システム要素 G_i に関して

- i) G_i の出力は、安定である。
- ii) G_i の出力は、若干不安定である。 (2.1)
- iii) G_i の出力は、かなり不安定である。

のような状態に関する把握を行う。

以上の状態表現には、「若干」あるいは「かなり」といった定量化不可能な情報が含まれているのが特徴である。そして、このような状態把握知識を基に、

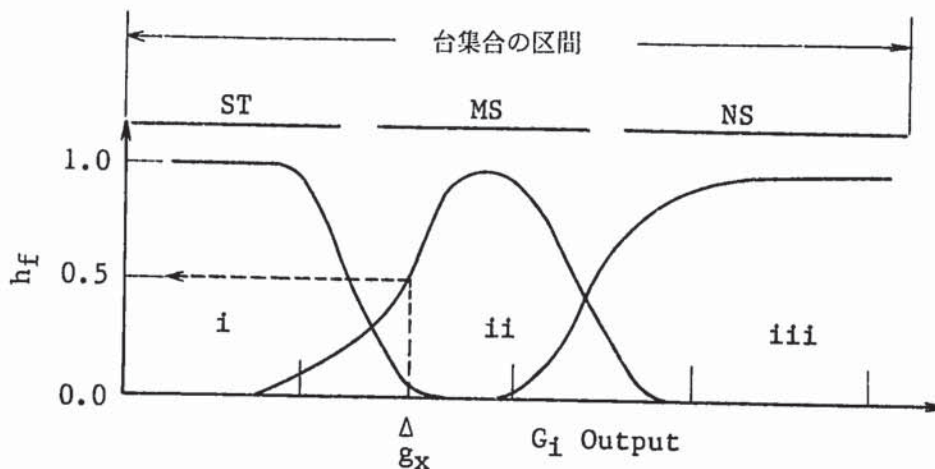
- iv) もし i) の状況であれば、フィードバック出力は現在のままとする。
- v) もし ii) の状況であれば、フィードバック出力を若干小さくする。 (2.2)
- vi) もし iii) の状況であれば、フィードバック出力をかなり小さくする。

のような「If ……, then ……」形の推論を行って修復動作を決定している。

以上のシステム修復動作表現中にも若干あるいはかなりといったあいまい情報が含まれている。

以上述べてきた専門家の行動を Fuzzy 制御理論の言葉で翻訳すれば、各サンプル時刻毎の観測変数について (2.1) に示すような状態把握を行い、これに対して (2.2) に示す Fuzzy 推論により、修復量に変換して出力していると言う事が出来る。しかも状態把握にも修復動作にも「かなり」あるいは「若干」という定量化不可能な情報が含まれている。したがって、各ブロックからのミクロな出力情報を Fuzzy 制御理論により制御し、時間刻み幅 Δt による安定化制御を行うためには、制御ルールの中で用いる Fuzzy 変数を定める事が第 1 に必要となる。先ず状態把握に関する Fuzzy 変数は G_i の出力値の最大変動域を台集合とし、これをいくつか分割して規定する。そして任意のサンプル時刻における G_i の出力の観測値が何れの Fuzzy 変数に該当し、その確信度がどの位であるかは各 Fuzzy 変数に対応したメンバーシップ関数で与えられる事となる。

(2.1) の例について状態表現 3 種の Fuzzy 変数とメンバーシップ関数の例を下に示す。

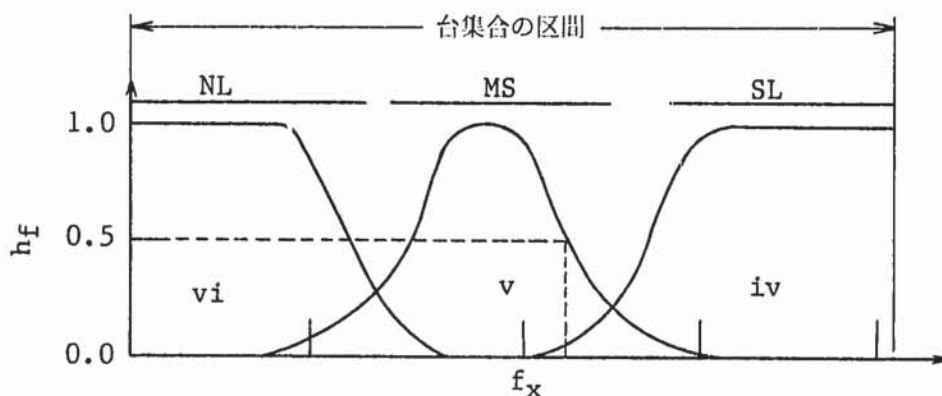


ここで、ST, MS, NS は Fuzzy 変数の名称であり、ST=Stable, MS=Midium Stable, NS=Not Stable である。これらの名称は i の安定領域、ii の若干不安定である領域、iii のかなり不

安定である領域に対応している。

得られた G_i 出力値からどの状態表現を用いるかは、上図の ST, MS, NS の領域により振り分けられる。例えば、システム要素 G の出力値として図中の g_x が得られたとすると、この値は MS の領域に含まれるため、ii) の若干不安定であるという評価がなされる。また、メンバーシップ関数 μ を用いて若干不安定であるという確信度 h_f として、0.5 が得られる。このような Fuzzy 変数とメンバーシップ関数の規定を全ての G_i について行う。

同様にフィードバック出力についても、台集合と Fuzzy 変数とメンバーシップ関数を下に例示する如く定める。

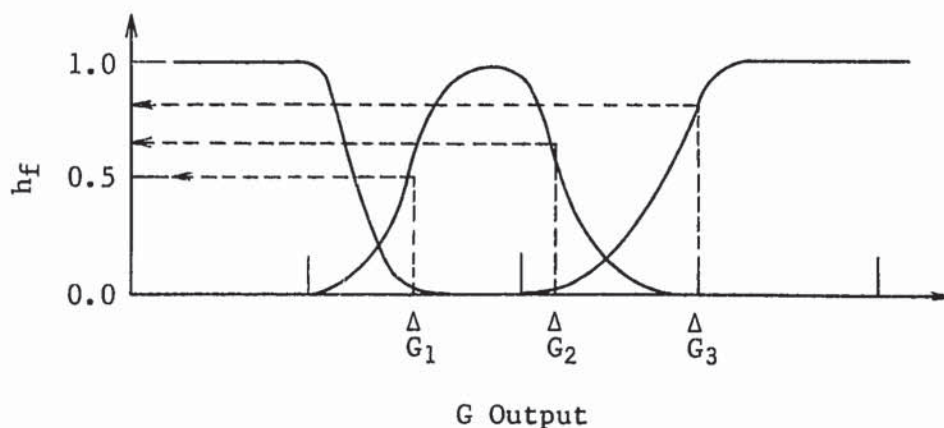


NL = Normal, MS = Midium Small, SL = Small

以上の Fuzzy 変数とメンバーシップ変数が規定され Fuzzy 推論に用いる制御ルールが (2.2) の如く与えられると、次に述べるような操作により制御動作が導かれる。例としてシステムの各状態が以下の様であったとする。

- a) G_1 の出力は、若干不安定である。
- b) G_2 の出力は、若干不安定である。
- c) G_3 の出力は、かなり不安定である。

すなわち、



であり、それぞれの確信度 h_f は、

$$h_{f1} = 0.5$$

$$h_{f2} = 0.7$$

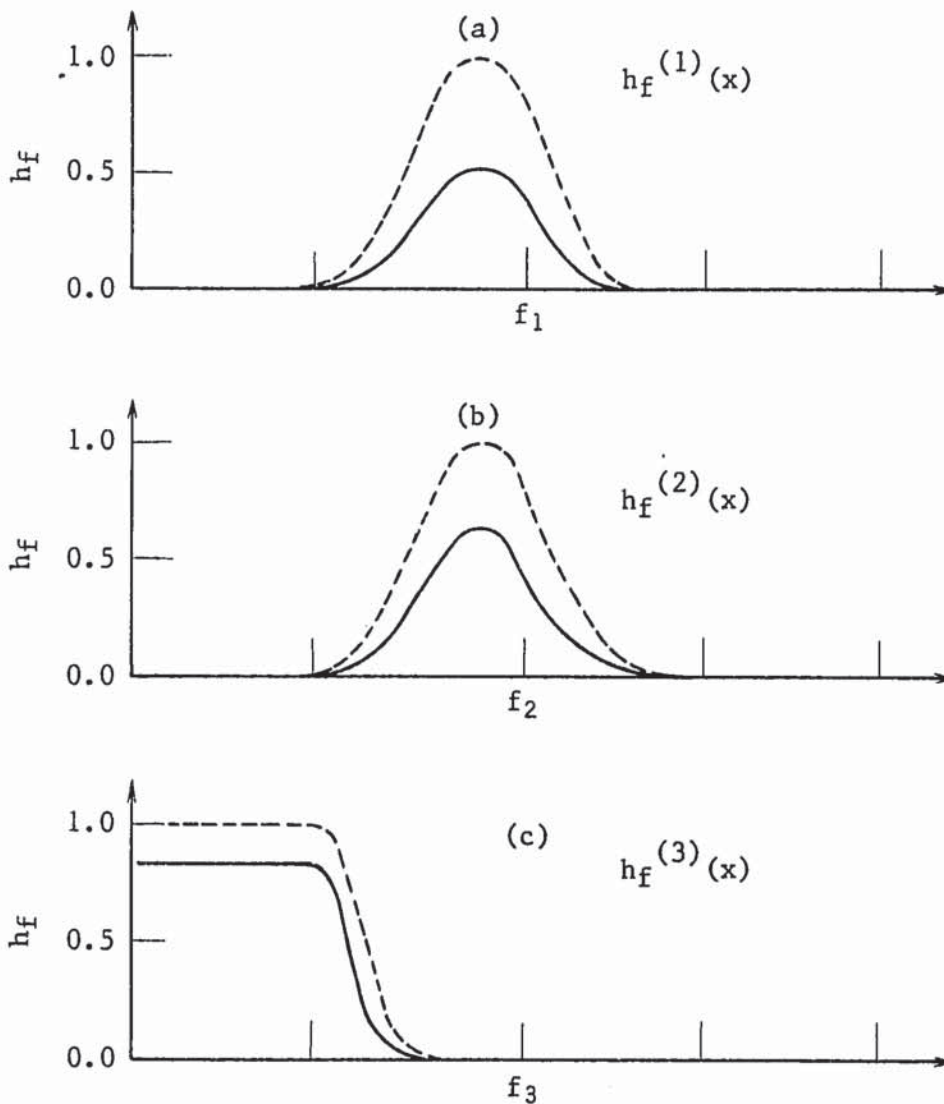
$$h_{f3} = 0.8$$

であったとする。

一方、これら状態観測結果に対する修復動作として、

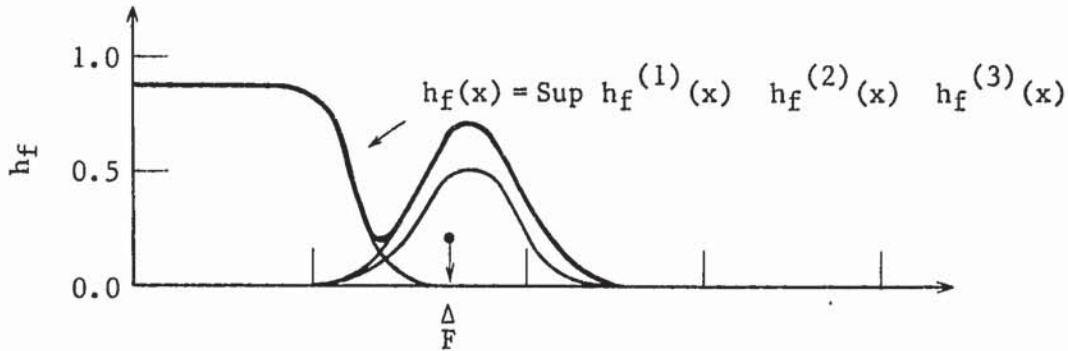
- a) フィードバック出力 f_1 を若干小さくする。
- b) フィードバック出力 f_2 を若干小さくする。
- c) フィードバック出力 f_3 をかなり小さくする。

が導かれる。これら修復動作それぞれを個々に図示すると以下の様になる。



図中の点線が修復動作出力に関するメンバーシップ関数であり、実線が修復動作出力に関するメンバーシップ関数に先に示した確信度 h_f を掛けたものである。この実線の形状が修復動作実行に関する確信度を表わす。

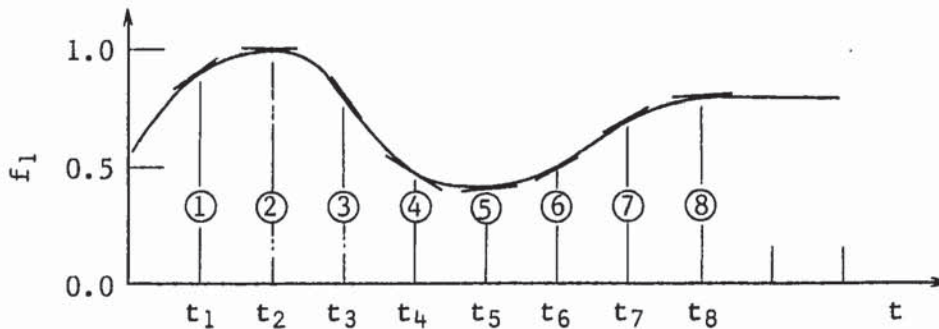
ここで、単一の修復動作確定値に変換するために、推論の合成則を用いる。すなわち、得られたそれぞれの推論結果に対し、これらを重ね合わせた体系での重心を求める。



すなわち、この重ね合わせ結果に対し、重心を求めて修復量の台集合へ投影すれば修復量の確定値(F)が得られる。

以上が複数のあいまい推論結果からの確定値の求め方である。

以下では、Fuzzy制御系の実際の動作を時系列で追跡する。ここでは、簡単のため、観測変数を1つに限るものとする。例えば、システム要素G₁の出力が以下の様な時系列挙動であったとする。



また、Fuzzy制御系は、出力値の変化率を観測し変動を押さえる様な制御を行うものとし、制御頻度は図中のt₁~t₈の等間隔で行うものとする。

システム要素G₁の出力挙動は、各制御フェーズで以下の特性を持つ。

- ① 変化率は（正）で、かなり大きい。
- ② 変化率は（正）で、かなり小さい。
- ③ 変化率は（負）で、かなり大きい。
- ④ 変化率は（負）で、若干大きい。
- ⑤ 変化率は（正）で、若干大きい。
- ⑥ 変化率は（正）で、かなり大きい。
- ⑦ 変化率は（正）で、若干大きい。
- ⑧ 変化率は（正）で、かなり小さい。

これに対する修復動作は、①~⑧に対応して、

- (1) 修復動作出力は、かなり小さくする。
- (2) 修復動作出力は、かなり大きくできる。
- (3) 修復動作出力は、かなり小さくする。
- (4) 修復動作出力は、若干小さくする。
- (5) 修復動作出力は、若干小さくする。
- (6) 修復動作出力は、かなり小さくする。
- (7) 修復動作出力は、若干小さくする。
- (8) 修復動作出力は、かなり大きくできる。

が得られる。Fuzzy制御系は、以上の動作を繰り返し安定化を計ることになる。

さて、上述の手順から分かるように Fuzzy 制御系を特徴づける Fuzzy 関係に影響を与えるのは、

- (1) Fuzzy 変数の台集合
- (2) メンバシップ関数の形
- (3) 制御ルール

の3つであるがこのうちメンバシップ関数の形は何ら本質的な問題ではないとされている。これまでいくつかの応用例を見てもメンバシップ関数の形が問題であると報告しているものは1つもない。これよりはるかに重要なのは、台集合の取り方であるといわれている。これは、いわば制御系のゲインに相当する。そして制御ルールはFuzzy制御系の構造と動作に大きく作用する。制御ルールの違いというのは、例えば、Fuzzy変数のStableをnot Stableに置き換えてみれば簡単に分かる。しかしFuzzy制御系の特徴の1つはrobustnessが期待される場所にあり、それはFuzzy変数とFuzzy関係 $A \rightarrow B$ からなる制御ルールにより支えられている。制御ルールの中には、重複するもの、欠けているもの、矛盾するものもあるかもしれないが、全体としての協調が取れ良好な動作が実現できるのがFuzzy制御のねらいである。

今回追加したFuzzy制御系の組み込み位置をFig. 2.1に示す。時間刻み幅 Δt の制御は、毎時間ステップ毎に実行され値の更新を行う。加速係数 ω の制御に関しては、単一時間ステップ内のSOR法ループにおいて繰り返し毎に実行される。

第3章 単相多次元コードAQUAの無条件安定制御

3.1 半陰解法の無条件安定制御

高次差分スキームと組み合わせて使用可能な時間積分法は現在のところ半陰解法のMICE法のみである。この場合の時間刻み幅 Δt は、緩和係数として α (0.0~1.0) を用いて $\Delta t = \alpha * \Delta t_0$ から決定している。この α の最適値決定過程に Fuzzy 理論を応用する方法について述べる。

AQUA コードにおける収束判定は、質量残差と物理量の変動とで行なっている。すなわち、流体を非圧縮性と仮定すると、ある計算セルに入った流体は、同時刻にその計算セルから同量の流出がなければならない。仮に計算セルに流入した質量流量以上の流体が流出したとすると、流体の湧き出し的効果を誘発し、圧力解に影響を及ぼす。逆の吸い込み的効果の場合も同様である。この様な効果は、最終的には運動量式への影響に帰着し、発散的傾向を招く恐れがある。そこで、AQUA では、計算ステップ毎に計算体形内各セルの質量バランスのチェックを実施している。この質量残差のチェックは、流動解析を正常に実施してゆく上での基本的必須事項である。計算上は、解析体形内計算セルのうち、最大の質量残差値 (δ_{\max}) を収束判定条件 (δ_{conv}) で割り、この値が1以下であれば収束判定条件を満足しているという判定を行なっている。

以上述べてきた質量バランスのチェックとともに、各物理量の時間ステップ間での相対変動量のチェックを合わせて行なっている。このチェックの対象となる物理量としては、x方向流速成分 u , y方向流速成分 v , z方向流速成分 w , エンタルピ h , 乱流運動エネルギー k および k の散逸率 ϵ の計6個である。ここでいう時間ステップ間での相対変動量とは、

$$\Delta \phi^n = \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\phi^n} \Bigg|_{\max} \quad (3.1)$$

で定義される変動に対する指標である。ここで、 ϕ は任意の物理量、 n は時間レベル、 \max は体形内最大値である。計算過程においては、この相対変動量を各物理量に対する判定条件と照らし合わせながら、収束状態の判定を実施している。

これら判定結果を基に、例えば「質量残差がかなり大きい場合には、緩和係数 α をかなり小さくする必要がある」といった If ~, Then ~ 形式論理により α の選定が行なわれる訳であり、ここに Fuzzy 論理に基づく制御方式を適用するものである。

3.1.1 質量残差に関する Fuzzy 変数と制御ルール

Fuzzy 制御を行なうためにはまず制御ルールに用いる Fuzzy 変数を規定する必要がある。そこで体形内最大の質量残差を収束判定条件で割った量について、区間 $[10^{-2}, 10^2]$ を台集

合として次の様な 5 個の Fuzzy 変数を定める。

SA : Small

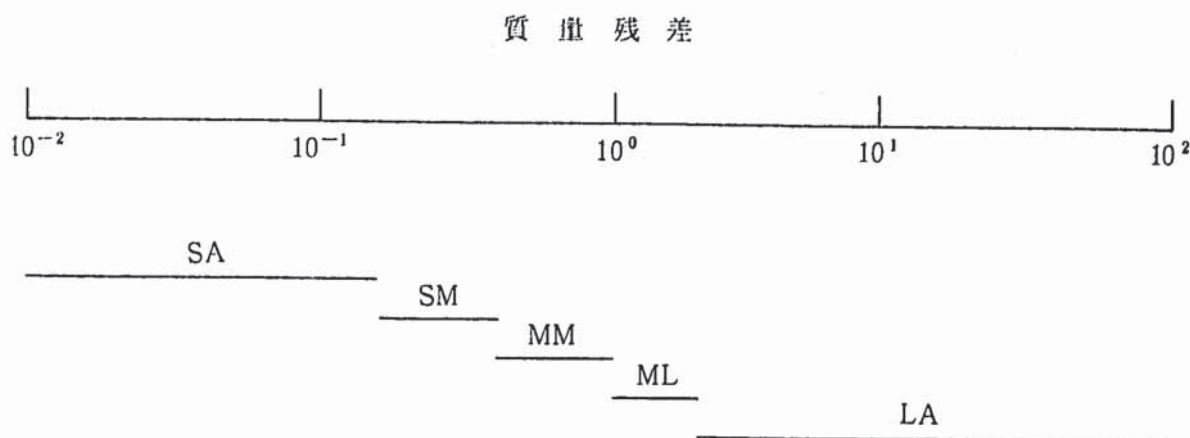
SM : Small Midium

MM : Midium

ML : Midium Large

LA : Large

これらの Fuzzy 変数は、台集合として以下の領域に分割するものとした。



この分割については、これまでの解析経験より、

- I. 定常解到達時には、質量残差はほぼ 0.5~0.9 付近の値を示す。
- II. 計算開始直後の流動過渡期においては、質量残差は 1.0 を越えることが多い。
- III. シミュレーション時間の進行とともに、質量残差は減少する。
- IV. 質量残差が 0.5 以下に減少した場合には、時間刻み幅 Δt を若干大きくしても、計算状況に大きな不安定外乱は与えない。

が得られていることから、Fuzzy制御系による制御動作は、質量残差が 0.5~0.9 の間に整定する動きとなる様に 10^0 近傍に限って若干の細分化を行なっている。これら Fuzzy 変数の正確な規定（メンバーシップ関数）を、Fig. 3.1 ~ Fig. 3.5 に示す。図に示したメンバーシップ関数は、先に示した 5 個の Fuzzy 変数、つまり質量残差がかなり小さい場合 (SA)、質量残差が若干小さい場合 (SM)、質量残差が適当な場合 (MM)、質量残差が若干大きい場合 (ML)、質量残差がかなり大きい場合 (LA) のそれぞれについての確信度として示してある。これら関数の分布形は、現在までに得られている知見を基に決定し、指数関数を用いた連続関数として組み込んだ。なお、領域境界では 2 つのメンバーシップ関数の値（確信度）は等しくなる様に規定した。

次に、質量残差に対する緩和係数 α の修正に関する制御ルールとして以下のものを採用した。

- (1) If 質量残差がかなり小さく、質量判定条件を満足しているならば、
Then 緩和係数 α は、かなり大きく設定できる。
- (2) If 質量残差が若干小さく、質量判定条件を満足しているならば、
Then 緩和係数 α は、多少大きく設定できる。
- (3) If 質量残差が適当であり、質量判定条件を満足しているならば、
Then 緩和係数 α は、現在のままとする。
- (4) If 質量残差が若干大きく、質量判定を満足していないならば、
Then 緩和係数 α は、多少小さく設定する。
- (5) If 質量残差がかなり大きく、質量判定条件を満足していないならば、
Then 緩和係数 α は、かなり小さく設定する。

一方、上記制御ルール的前提部に対する緩和係数 α の修正に関する5個の Fuzzy 変数を圧間 $[0, 1]$ を台集合として設定した。この5個の Fuzzy 変数とは、制御ルール前提部の5個に対応して、

LA : Large
ML : Midium Large
MM : Midium
SM : Small Midium
SM : Small

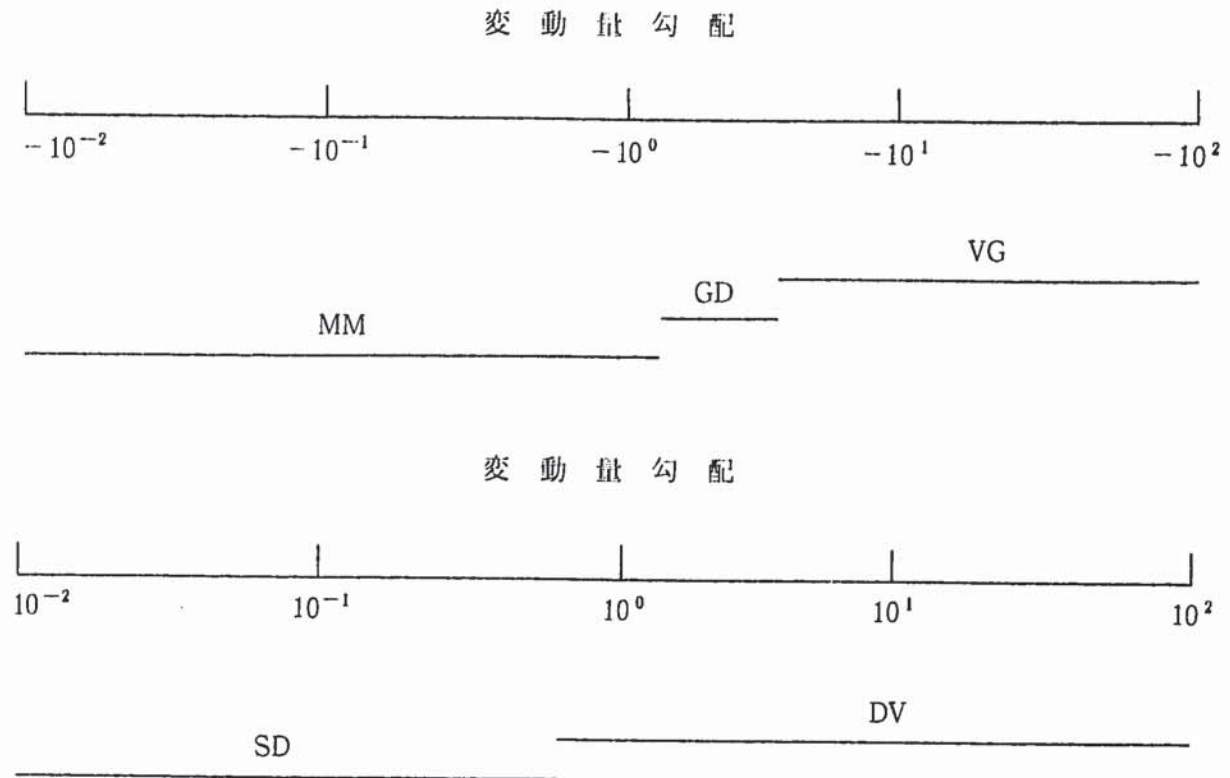
である。これらのメンバーシップ関数を Fig. 3.6 ~ Fig. 3.10 に示す。これらのメンバーシップ関数も指数関数を用いた連続関数として表現した。

3.1.2 物理量変動に関する Fuzzy 変数と制御ルール

(3.1) 式で定義された $\Delta\phi^n$ と収束状態との関係は、計算途上において相対変動量 $\Delta\phi^n$ が正の値を示したとすれば発散的傾向を示唆し、逆に負の値を示したとすれば収束的傾向を示唆していると言える。そこで、相対変動量 $\Delta\phi^n$ の時間的ふるまいを発散傾向の有無の指標とした。この $\Delta\phi^n$ の時間に対する変動量勾配の Fuzzy 変数として区間 $[-10^{-2}, 10^2]$ を台集合として、

VG : Very Good
GD : Good
NM : Novmal
SD : Small Divergence
DV : Divergence

の5個を規定した。これら5個の変数は、台集合を以下に示す領域で分割するものである。



一方、この相対変動率勾配に関する Fuzzy 分割については各物理量が発散的傾向を示さず、かつ 4 時間ステップ間での勾配^{*}が -1.5 以下になる様な制御動作に規定し、時間刻み幅 Δt の設定が、 $10^{-2} \sim 1.0$ の緩和係数 α で行なわれる様に設定した。

Fuzzy 変数の詳細な規定は、Fig. 3.11～Fig. 3.15 に示すメンバーシップ関数で行なわれるものである。これら関数の分布形は、第 3.1.1 項で示したと同様に指数関数を用いた連続関数として組み込んである。なお、メンバーシップ関数は流速成分、エンタルピ、乱流運動エネルギー k および k の散逸率との全てについて同一のものを使用した。また、質量残差の場合と同様に領域の境界で 2 つのメンバーシップ関数の値が等しくなる様に規定した。

相対変動量勾配に対する緩和係数 α の修正についての制御ルールは、以下のものを使用した。

- (1) If 変動量勾配は、マイナスでかなり大きく、収束性がかなり良いならば、
Then 緩和係数 α は、かなり大きく設定できる。
- (2) If 変動量勾配は、マイナスであり、収束性が良いならば、
Then 緩和係数 α は、多少大きく設定できる。

* 計算途上で決まる $\Delta\phi^n$ は、各物理量間でのバランスの程度、あるいは計算精度上の原因等から時間に対して不規則な変動を示すことが多く、単一の離散値情報のみからでは、系の発散傾向の有無を即座に判定することは不可能である。そこで $\Delta\phi^n$ 、 $\Delta\phi^{n-1}$ 、 $\Delta\phi^{n-2}$ 、 $\Delta\phi^{n-3}$ の 4 個の相対変動量を用いて最小二乗法により 1 次の勾配を求め、ここで得られた勾配を基に発散傾向の有無を判定する。

- (3) If 変動量勾配は、マイナスであり、収束性が正常ならば、
Then 緩和係数 α は、現在のままとする。
- (4) If 変動量勾配は、プラスであり、多少発散気味であるならば、
Then 緩和係数 α は、多少小さく設定する。
- (5) If 変動量勾配は、プラスでかなり大きく、発散傾向がかなり強いならば、
Then 緩和係数 α は、かなり小さく設定する。
- 一方、上記制御ルールに対する修正動作は、第 3.1.1 項で示したものと同じにした。

3.1.3 数値実験による検証

これまで半陰解法における時間刻み幅 Δt を Fuzzy 制御系により無条件安定制御する方法について述べてきた。この方法の特性と有効性の実証を行なうため、定常計算問題と過渡計算問題に適用してみる。

“AQUA”での定常計算の実行は、通常解析体系内各セルの各流速成分を零とし、静止流体状態から開始する事が多い。このため、第1ステップの計算では、規定流入流速が静止流体中に印加され、きわめて過渡的性質の強い状況を示している。このような過渡的性質の強い流れ場では、質量残差、物理量変動等のバランスを取ることは難しく、過去の経験から発散状態につながる事が多い。この為、第1の検証問題として、 $x-z$ 2次元矩形体形内の静止流体中*に一定の流速が印加された場合を選定して Fuzzy 制御系の特性の把握を行なう。

次に過渡計算検証問題として、電力中央研究所 (CRIEPI) が実施した水実験¹⁰⁾を選定した。一般的に、過渡的性質の強い流れ場では質量残差を厳密にとる事は難しい。さらに、過渡計算という解析の性質上、過渡計算過程での解をいかに精度良く求めるかが、解析を全体的に見た場合に特に重要となる。このように過渡計算では、定常計算問題の場合のように、条件を満足しないまま時間を進め、最終的に厳密解を求めるといった手法が成立しない。このため、圧力に関するポアソン方程式の解法が固定である条件では、各ステップで厳密解が得られる緩和係数 α をいかに選定するかが問題となる。

(i) 定常計算問題への適用

〔1〕 数値実験体系

数値実験体系として、Fig. 3.16 に示す 2 種類を設定した。この 2 種類の体系はスケールは同一であるが、メッシュ分割の違いから計算セルのアスペクト比が異なっている。ただし、計算総セル数は同一である。

以下に各計算の実行条件を示す。また、Fig. 3.17 に入力データを示す。

* 単相流解析では、一般に初期体系状態として、静止流体を仮定する 경우가多く、この状態に規定入力流速を印加して解析を行なう。

時間積分法	: MICE 法
高次差分法	: 運動量式……QUICK 法 乱流量式……QUICK-FRAM法
解析体系	: X-Z 2次元
計算セル総数	: 200
入口流速	: 0.5 m/s
体系温度	: 20℃ 一定

〔2〕 結果および考察

(a) アスペクト比 1 : 1 のケース

Fig. 3.18～Fig. 3.21に定常状態到達までの各物理量の相対変動量の推移を示す。各図中には、それぞれ5 ケースの解析結果のプロットを載せている。その1つは今回のFuzzy制御系によるもの、他の4つはFuzzy制御系を用いず、緩和係数 α (AQUA内でのFORTRAN 変数名はRDTIME)を固定(0.8, 0.5, 0.3, 0.1)したケースである。

まず、Fig. 3.18の流速 u 成分(x方向成分)の相対変動量の推移について考察する。緩和係数 α を0.8に固定して定常計算を実施した場合(「▽」印)には、定常状態判定条件である 5×10^{-5} に向かう傾向は全く示さず 2×10^{-1} 近傍での変動を繰り返しているのみである。一方、緩和係数 α を0.5に固定して実行した場合(「△」印)には、0.8に固定した場合に比べ相対変動量は約2桁減少しゆるやかに収束方向に向かっている。しかし、その収束勾配は満足できるものではない。緩和係数 α を0.3に固定して実行した場合(「◇」印)には、かなりの急勾配で収束方向に向かっているのがわかる。このケースでの定常状態到達までのCPU時間は約12秒である。さらに、緩和係数 α を小さくし、0.1に固定した場合(「□」印)には、0.3に固定した場合よりもむしろ定常状態到達までのCPU時間が伸びていることがわかる。以上のことは、任意の解析問題の収束性が緩和係数 α の最適値を持っていることを示唆している。

図中の「○」印が今回のFuzzy制御系を適用した場合の収束曲線である。この収束曲線は、緩和係数 α を0.3に固定した場合のそれと酷似し、ほぼ最適な収束状態到達までの軌跡を描いている。因みに、定常状態到達までのCPU時間は約13秒である。

Fig. 3.19に示した流速 w 成分(z成分)の相対変動量推移も流速 u 成分のそれとほぼ同じ傾向を示す。すなわち、緩和係数 α を0.8に固定した場合には、全く収束方向へは向かわず、0.5に固定した場合には、かなりゆるやかな収束勾配を示すにとどまっている。ここでも、緩和係数 α を0.3に固定した場合に最も短時間で定常状態に到達し、0.1に固定した場合は、むしろ長くなっている。Fuzzy制御系を用いた場合には、緩和係数 α を0.3に固定した場合の結果と酷似し、ほぼ最短経路を辿って定常状態に到達する。

Fig. 3.20およびFig. 3.21に示した乱流情報(k および ϵ)についての収束傾向についても

同様である。ただし、緩和係数 α を0.8に固定して計算を行なった場合には、CPU時間20秒以降で相対変動振幅が増幅し始めている傾向が伺える。

Fig. 3.22に Fuzzy 制御系を用いた場合の緩和係数 α の推移を示す。

この図から、計算開始から短時間で緩和係数 α の値が最適値近傍におちついているのが分かる。

(b) アスペクト比4 : 1のケース

Fig. 3.23～Fig. 3.26に定常状態到達までの各物理量の相対変動量の推移を示す。各図中には、アスペクト比1 : 1のケースと同様の解析結果のプロットを載せている。この5 ケースの意味も同様である。

まず、Fig. 3.23の流速 u 成分（ x 方向成分）の相対変動量の推移について考察する。緩和係数 α を0.8に固定して計算を実行した場合には、アスペクト比1 : 1のケースと同様に収束に向かう傾向は全く見られず、やはり 2×10^{-1} 近傍で振動しているのみである。一方、緩和係数 α を0.5に固定して計算を実行した場合には、0.8の結果から一転して良い収束勾配を示すようになる。この傾向は、アスペクト比1 : 1の場合と異なり、解析問題に依存して緩和係数 α の特性が変化することを示している。さらに緩和係数 α を小さくし、0.3に固定した場合には、0.5のケースよりもさらに急激な収束勾配を示すようになる。定常状態到達までのCPU時間により0.3の場合と0.5の場合の比較を行なうと、約2倍の時間の差が出ていることになる。緩和係数 α をさらに小さくし、0.1に固定すると、収束勾配は0.3の場合に比べて鈍るようになる。このような傾向は、アスペクト比1 : 1の場合の傾向と同様で、やはり緩和係数 α は最適値を持った特性であることがわかる。

Fuzzy制御系を適用した場合には、緩和係数 α を0.3に固定した場合の収束曲線に近い応答を示し、最短経路を辿って定常状態に到達する。このような最短経路を辿る特性もアスペクト比1 : 1の場合と同様である。

Fig. 3.24に示した流速 w 成分（ z 方向成分）での特性も流速 u 成分での特性とほぼ等しい傾向を示す。また、乱流情報についても同様である（Fig. 3.25およびFig. 3.26）。

Fig. 3.27に Fuzzy 制御系を用いた場合の緩和係数 α の推移を示す。

この α の推移も(a)の場合と同様な傾向を示す。

(ii) 過渡計算問題への適用

〔1〕 数値実験体系

数値実験体系としては、先に述べた通り、電力中央研究所の水実験¹⁰⁾を選定した。この実験の目的は、大型タンク型LMFBRの炉上部機構および中間熱交換器の上下位置が炉上部プール内での流動状況、自由液面変動および温度成層化現象に及ぼす影響を明かにすることにある。

対象とした試験条件は、Fig. 3.28に示す体系の圧端下方から流入する水の流量と温度を、

流量 (16 l/s → 3.84 l/s) / 10 sec

温度 (62 °C → 9.6 °C) / 30 sec

で変化させるものである。Fig. 3.29 に流量および温度の過渡条件を示す。数値実験に用いた入力データを Fig. 3.30～Fig. 3.31 に示す。

〔2〕 結果および考察

Fig. 3.32 に解析模擬時間 5 秒までの、質量残差の推移を示す。図中には、5 ケースの解析結果を載せた。その 1 つは、Fuzzy 制御を用いたケース、他の 4 ケースは、Fuzzy 制御を用いず、緩和係数 α を固定 (0.8, 0.5, 0.3, 0.1) したケースである。まず、緩和係数 α を 0.8 に固定したケースでは、計算開始から 1.5 秒間は質量残差が 1.5×10^{-1} 近傍を変動し、その後の時間では質量残差が 2.0×10^{-2} に減少している。また、緩和係数 α を 0.5 に固定したケースでは、全計算時間を通して質量残差が 6.0×10^{-2} 近傍からゆるやかな増加を見せている。一方、緩和係数 α を 0.3 および 0.1 に固定したケースでは、全計算時間につき質量残差が 2.0×10^{-2} 近傍を変動している。

以上、緩和係数 α を固定したケースでは、いずれも質量判定条件を満足しているが、図に示した質量残差値が小さいほど解の厳密性が高いと言える。

Fuzzy 制御系を使用した場合には、緩和係数 α を固定した場合の結果と大幅な違いは見られないが、ほぼ各時間ステップについて最小の質量残差を示しながら時間を進行している。

以上より、Fuzzy 制御系を使用した場合には、質量残差を最小にする緩和係数 α を選定しながら解析を進めている様子がわかる。

Fig. 3.33 に Fuzzy 制御を用いた場合の緩和係数 α の推移を示す。

この図より、極めて短時間に緩和係数 α の値が最適値に落ち付いている様子が分かる。

3.2 完全陰解法の無条件安定制御

差分スキームとして 1 次風上差分法を使用する場合は、完全陰解法が使用される。この場合は、前に述べた通り時間刻み幅 Δt についての安定制限は受けないが、目的とする精度を有する解を得るための最適な時間刻み幅 Δt が存在する。この選定を Fuzzy 制御によって決定する方法について述べる。

ここでの制御も、第 3.1 節で述べたと同様に、原則として収束判定条件は質量残差と物理量変動とで行なうものとする。

3.2.1 質量残差に関する Fuzzy 変数と制御ルール

ここで用いる質量残差に関する Fuzzy 集合は、基本的には第 3.1.1 項で用いたものと同等である。ただし、If ～ Then ～ 形式のルールのうち、結論部での緩和係数 α の設定については異なっている。すなわち、半陰解法を用いた場合のように緩和係数 α の取りうる値が 0 ～ 1 の

区間に限定されず、任意の値を取ることが許される。Fig. 3.34～Fig. 3.38に緩和係数 α の設定に関するメンバーシップ関数を示す。緩和係数 α の設定に関するルールは5種類用意し、指数関数を用いた連続関数として表現している。

すなわち、緩和係数 α に関する Fuzzy 変数は区間 $[10^{-2}, 10^2]$ を台集合として、

- SA : Small
- SM : Small Midium
- MM : Midium
- ML : Midium Large
- LA : Large

の5個を規定した。

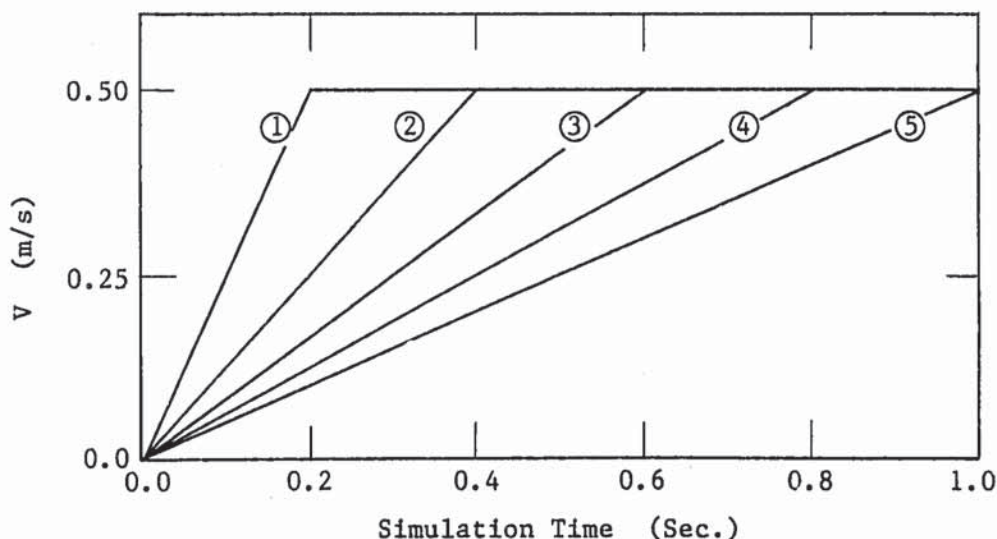
3.2.2 物理量変動に関する Fuzzy 変数と制御ルール

定常問題に対しての Fuzzy 変数、制御ルール、メンバーシップ関数は第 3.1.2 項で述べたものと同一とした。また、緩和係数 α に関する Fuzzy 変数及びメンバーシップ関数も第 3.2.1 項のものと同一とした。

一方、過渡計算時には、ある現象を忠実に模擬するという命題（すなわち、時間刻み幅 Δt を小さく）と短時間に模擬するという命題（すなわち、時間刻み幅 Δt を大きく）とが競合し、相反する命題を形作る事になる。しかし、いかに短時間に現象を模擬したとしても実際の現象の模擬精度が低い様では意味が無くなる。そこで過渡計算時に用いられる過渡関数（流速、温度等）を変化させ、模擬精度と時間刻み幅 Δt の関係を整理してメンバーシップ関数としてまとめた。

この決定過程は、次の通りである。

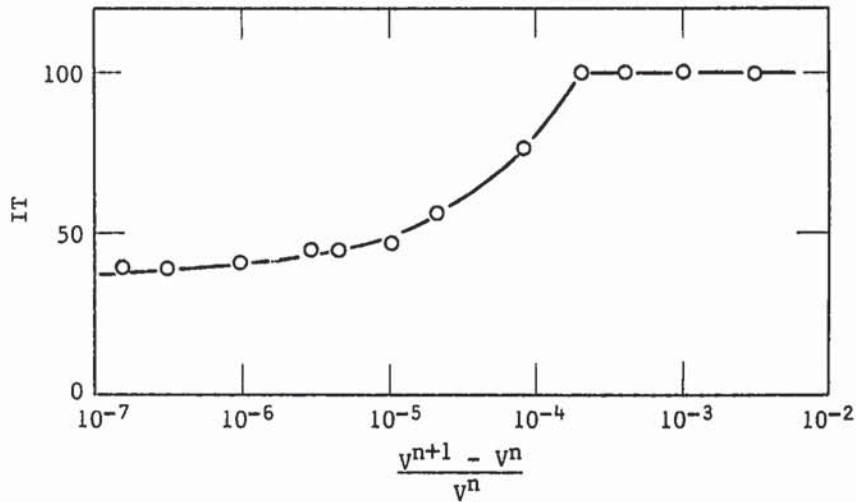
Fig. 3.16(a)の計算体系において入口流速に5種類の過渡関数を与え、時間刻み幅 Δt を変化させてその関係を観察する。以下に、入口流速の過渡関数を示す。



また、使用する時間刻み幅 Δt は、以下の4種である。

1. $\Delta t = 0.001 \text{ sec.}$
2. $\Delta t = 0.010 \text{ sec.}$
3. $\Delta t = 0.100 \text{ sec.}$
4. $\Delta t = 0.500 \text{ sec.}$

以上の計算条件の組み合わせを全て実行し、質量残差を満足させるために繰り返した反復回数 (Outer Iteration) を以下に示す。



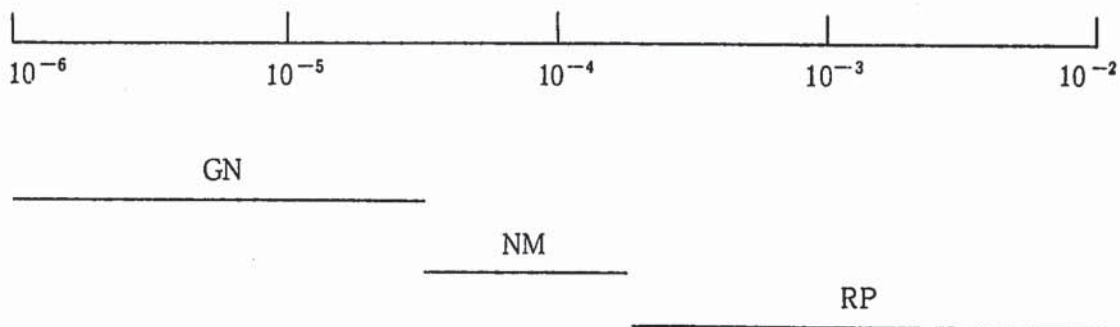
以上の結果から分かる通り、 $(V^{n+1} - V^n) / V^n$ で定義される過渡関数勾配が 2.0×10^{-4} を越えたあたりから 100 回の反復回数以内で指定質量バランスを満足しなくなる。ここで、 n は時間ステップレベルを示す。

以上の知見から、メンバーシップ関数を規定した。この勾配に関する台集合は、区間 $[10^{-6}, 10^{-2}]$ を以下の3つに分割して規定した。

- GN : Gentle
- MD : Midium
- RP : Rapidly

これらの領域は、

過 渡 関 数 勾 配



の通りである。各 Fuzzy 変数のメンバーシップ関数を Fig.3.39～Fig.3.41に示す。

制御ルールについては、以下のものを使用した。

- (1) If 変化量絶対値が小さければ,
Then 緩和係数 α は大きく設定できる。
- (2) If 変化量絶対値が普通であれば,
Then 緩和係数 α は現在の値近傍が適切である。
- (3) If 変化量絶対値が大きければ,
Then 緩和係数 α は小さく設定しなければならない。

緩和係数 α の台集合は、3 条件に対応して圧間 $[10^{-4}, 10^0]$ を 3 分割した。

SM : Small

MD : Midium

LA : Large

このメンバーシップ関数を Fig.3.42～Fig.3.44に示す。

3.2.3 数値実験による検証

前節までに完全陰解法における時間刻み幅 Δt の選定を Fuzzy 制御により最適化する方法について述べてきた。この方法の有効性の実証を行なうため、Fuzzy 制御系を定常計算問題と過渡計算問題に適用する。

(i) 定常計算問題への適用

〔1〕 数値実験体系

数値実験体系として、Fig. 3.45に示すものを選定した。この体系は、Z 方向流入流速が体系出口で X 方向流速に変換されるという単純問題である。

以下に、計算の実行条件を示す。また、Fig. 3.46に入力データを示す。

時間積分法 : SIMPEST 法
 差分法 : 1 次風上差分法
 解析体系 : X-Z 2次元
 計算セル総数 : 300
 入口流速 : 0.5 m/s
 体系温度 : 20℃ 一定

〔2〕 結果と考察

Fig. 3.47～Fig. 3.50 に定常状態到達までの各物理量の相対変動量の推移を示す。まず、Fig. 3.47の流速 u 成分 (x 方向成分) の相対変動量の推移について考察する。時間刻み幅 Δt を 1.0 秒 (通常最もよく用いられる値) に固定して計算を実行した場合には、相対変動量が 1.0×10^{-2} 付近で若干の振動は見られるものの、定常状態に向かうカーブを描いているこ

とがわかる。一方、時間刻み幅 Δt を 10.0 秒に固定して計算を実行した場合には、時間刻み幅 Δt を 1.0 秒に固定した場合に比べより良好な収束カーブを描いて定常状態に到達していることがわかる。この両者の定常状態到達までの CPU 時間の差は、約 20 秒である。さらに、時間刻み幅 Δt を増加させ 100 秒とした場合には、振動振幅が増大し全く定常状態に向かう傾向を見せなくなる。以上のことから、任意の問題に対し定常状態到達までの CPU 時間に時間刻み幅 Δt の依存性があることが理解できる。

Fuzzy 制御系を適用した場合には、時間刻み幅 Δt を 10.0 秒に固定した場合の収束曲線に近い応答を示し、ほぼ最短経路を辿って定常状態に到達する。

Fig. 3.48 に示した流速 w 成分 (z 方向成分) についても流速 u 成分と同様の傾向が伺え、Fuzzy 制御系を適用した場合には、時間刻み幅 Δt を 10.0 秒に固定した場合の収束曲線に近い応答を示し、ほぼ最短経路を辿って定常状態に到達することがわかる。

Fig. 3.49～Fig. 3.50 に示した乱流情報 (k および ϵ) についての収束傾向についても同様の傾向である。ただし、時間刻み幅 Δt を 100.0 秒に固定した場合には、振動振幅が流速成分のそれに比べかなり大きく時間刻み幅 Δt にかかなり敏感であることが理解できる。

Fig. 3.51 に Fuzzy 制御系を用いた場合の時間刻み幅 Δt の推移を示す。

(ii) 過渡計算問題への適用

〔1〕 数値実験体系

検証として用いる数値実験体系は、第 3.3.3 項の定常計算問題を流用した。過渡計算は、先の定常計算問題の定常解を初期値として、入口境界に流束過渡条件を与える。Fig. 3.52 に解析体系図を、また流速過渡関数を Fig. 3.53 に示す。印加する流速過渡関数は、2 秒を 1 周期とするサイン波であり、その振幅は 1.0 m/s を中心に $0.5 \text{ m/s} \sim 1.5 \text{ m/s}$ とする。

Fig. 3.54～Fig. 3.55 に入力データを示す。解析ケースは、時間刻み幅 Δt を固定したケース 4 種と Fuzzy 制御系を適用したケース 1 種の合計 5 ケースを実施する。以下に、時間刻み幅 Δt を固定した 4 ケースの設定内容を示す。

- (1) $\Delta t = 0.250 \text{ sec.}$
- (2) $\Delta t = 0.100 \text{ sec.}$
- (3) $\Delta t = 0.010 \text{ sec.}$
- (4) $\Delta t = 0.001 \text{ sec.}$

〔2〕 結果と考察

解析精度*と時間刻み幅 Δt との関連を考察するため、時間刻み幅 Δt が 0.001 秒のケースを基準として解析体系出口における流速成分 2 種 (U および W) の比較を行なった。

Fig. 3.56 に流速 U 成分についての比較を示す。縦軸は Z 方向セル番号であり、横軸は基準

* 解析精度 (収束判定条件) は、AQUA の Default 値を用いた。

解からの誤差を以下の式から求めたものである。

$$\text{Error} = \frac{U - U_{0.001}}{U_{0.001}} * 100 \text{ (\%)}$$

ここで、Uは各時間刻み幅 Δt で計算した流速 U成分、 $U_{0.001}$ は時間刻み幅 Δt を 0.001秒に固定して計算した場合の流速 U成分（基準解）である。

結果からわかる通り、時間刻み幅 Δt を小さくしてゆくに従い、各結果は基準流速値 $U_{0.001}$ に近づいてゆく。時間刻み幅 Δt を 0.01 秒とした場合にはほぼ基準解と一致し、軸方向全体に渡り約 1% 差まで近づいている。一方、時間刻み幅 Δt を 0.10 秒とした場合には、最大で約 12% の誤差が発生している。このことから、時間刻み幅 Δt を 0.01 秒に固定した場合に発生する誤差約 1% を許容できるとすれば、時間刻み幅 Δt は 10 倍かせぐことができ、かつ基準解にほぼ近い解を得ることができるわけである。このような問題に対する許容指標は、解析問題固有の性質と解析者の判断に左右される。

Fuzzy 制御系を適用した場合には、時間刻み幅 Δt を 0.01 秒に固定した場合よりも、さらに基準解に近づいていることがわかる。このケースの場合の時間刻み幅 Δt の推移については、後で触れる。

同様の考察を流速 W成分について実施した結果が Fig. 3.57 である。この場合には、流速 U成分の場合の傾向と若干違い、時間刻み幅 Δt を 0.01 秒に固定した場合にも残差誤差はかなり大きく、約 2% 全体的に大きいことが理解できる。Fuzzy 制御系を使用した場合には、この残留誤差が約 1% まで減少し、時間刻み幅 Δt を固定したいずれのケースよりも良好な傾向を示す。

Fig. 3.58 に 1 秒間をシミュレーションするのに費やした CPU 時間を各解析ケースについて示す。まず、時間刻み幅 Δt を固定して計算を実行した場合には、いずれのケースについてもほぼ直線的に CPU 時間が増加している。この増加率は、時間刻み幅 Δt が小さくなるに従い大きくなる。したがって、時間刻み幅 Δt を可能な限り大きく取ることができるば、短時間に現象をシミュレーションできるわけである。しかし、この問題は、シミュレーションの要求精度との兼ね合いにより決定されるべきものであり、いくら短時間にシミュレーションが完了したとしても要求した精度を満足しないようでは全く意味をなさない。

以下に、1 秒間のシミュレーションで費やした CPU 時間を列記する。

Δt	T_{CPU}
0.250 sec.	31.43 sec.
0.100 sec.	49.21 sec.
0.010 sec.	119.46 sec.
0.001 sec.	547.76 sec.

一方、Fuzzy 制御系を使用した場合には、1 秒のシミュレーションで 170.38 秒の CPU 時間

を費やしている。この数値は決して小さな値ではない ($\Delta t = 0.25$ 秒の場合と比較して) が、仮に基準解との差 1% を容認できる問題であるとするならば、約 3.2 倍 ($547.76/170.38$) の高速化が要求精度を満足しつつ実現されていることになる。図中の CPU 時間の推移は、時間刻み幅 Δt を固定した場合の直線傾向とは違い、大きな変動を示していることがわかる。これは、各時間ステップにおいて、時間刻み幅 Δt が変化したことによるものである。Fig. 3.59 に 1 秒間のシミュレーション中における時間刻み幅 Δt の推移を示す。この推移の特徴は、シミュレーション時間 0.5 秒付近にピークを持つ山なりのカーブを描いていることである。これは、印加過渡関数の形がサイン波 (Fig. 3.53 参照) であり、0.5 秒の時点が $\pi/2$ の近傍に当たる。ここでは、過渡関数が増加から減少に転じ、印加流速の変化率が減少して時間刻み幅 Δt が大きく設定 (約 17 msec.) できる領域であるためである。しかし、この $\pi/2$ の近傍を通過した後は時間刻み幅 Δt は次第に減少し、約 2.5 msec. にまで到達している。

以上の結果より、印加流速の変化率が小さい場面では、時間刻み幅 Δt を大きく設定しても解への誤差混入は微小であるといえる。一方、変化率が大きい場面には、時間刻み幅 Δt をそれ相応に小さくしなければ誤差混入は無視し得ないことを示唆している。

3.3 まとめ

第 3 章において、半陰解法 (MICE) を用いた場合の緩和係数 α ($\Delta t = \alpha * \Delta t_0$) の選定および完全陰解法 (SIMPLEST) を用いた場合の時間刻み幅 Δt の選定の最適化を Fuzzy 制御理論を用いることによって試みた。各種数値実験体系を用いた検証により緩和係数 α および時間刻み幅 Δt を外部より設定固定して計算を実行した場合と比べ、計算時間および計算精度につきこれを上回る良好な結果が得られた。以下に、数値実験により得られた知見を列記する。

[半陰解法を用いた場合の定常計算問題]

定常解到達までの各計算過程につき、各種変動量を急激に減少させるための最適な緩和係数 α が存在することが確かめられた。今回の Fuzzy 制御系によってこの最適値を探索しながらの計算が可能となり、計算時間および計算安定性を良好な状態に保持しつつ目的とする処理 (定常解獲得) が可能となった。

[半陰解法を用いた場合の過渡計算問題]

過渡計算を実施してゆく各過程においては、与えられた収束判定条件下で可能な限り精度を高めることが目的関数となる。過渡計算各過程においても目的関数を達成させるための最適な緩和係数 α が存在することが確かめられた。Fuzzy 制御系を用いることによって、この値が計算実行中に探索可能となった。

[完全陰解法を用いた場合の定常計算問題]

半陰解法を用いた場合と同様に、各計算過程につき最適な時間刻み幅 Δt が存在することが確かめられた。この解析ケースの場合も、Fuzzy 制御系を用いることによって、計算時間

の最適化が実現可能となった。

〔完全陰解法を用いた場合の過渡計算問題〕

この問題については、与えられた過渡条件でどの程度の現象模擬精度を要求するかによって時間刻み幅 Δt の設定思想が変化する。ある現象模擬精度要求が与えられた場合に、時間刻み幅 Δt を細かくしてゆくことによって要求精度解に指数関数的に近づいてゆくが、これに対応して CPU 時間も増加する。Fuzzy 制御系を用いることによって、与えられた精度要求条件下での CPU 時間の最適化（最短化）が実現可能となった。

第4章 点SOR法における加速係数の最適選定制御

単相多次元熱流動解析コード“AQUA”では、圧力に関するポアソン方程式の高速化を計るため、従来から一般的に使用されているPSOR (Point Successive Over-Relaxation) 法に替えてICCG (Incomplete Choleski Conjugate Gradient) 法を採用している。PSOR法において、高速化が実現不可能である1つの要因は、繰り返し法であるがゆえ近似値を求める上での最適な加速係数 ω の選定が困難である点にある。従来の経験では、積極的に加速係数 ω の最適化を行なわない場合には収束性が極端に悪化し、いくら繰り返しを行なっても収束判定条件に到達しないといった状況を招く。

この繰り返し回数の増加がPSOR法の高速化の障害となっていた。したがって、加速係数の最適選定方法が存在すれば高速化は実現可能である。しかし、現状では、解析体系が決定した後の静特性 (計算実行前) としては理論的あるいは近似的に求まっているが、計算に入った後の動的な決定手法は未だ皆無の状態である。そこで各計算時間ステップにおける加速係数 ω をFuzzy制御し、収束状態に応じて適時修正していくようなフィードバックループを構成して加速係数 ω の最適化を半陰解法および完全陰解法使用時のそれぞれにつき試みる。

4.1 半陰解法における最適制御

“AQUA”では、計算ステップ毎に圧力に関するポアソン方程式を解く。この繰り返し過程においては、繰り返しが終了する毎に残差を計算し、収束判定条件との比較を行なう。この残差が判定条件を越えている場合には、さらに良い近似値を求めるため繰り返しを実行する。この様に繰り返し過程においては、収束性の良否を判定する情報として質量残差レベルおよび質量残差変動勾配が使用できるのみである。

繰り返し1回の実施で、どの程度収束に近づいたかを判定する上で勾配が目安となる。この考え方は、3.1.2項で述べたものと同様である。例えば、選定した加速係数 ω で繰り返しを行ない、勾配が急になっているならば、加速係数 ω は最適値に近づいている証拠であり、逆に勾配が鈍っている状況であれば加速係数 ω を再設定する必要があることを示唆している。

4.1.1 質量残差に関するFuzzy変数と制御ルール

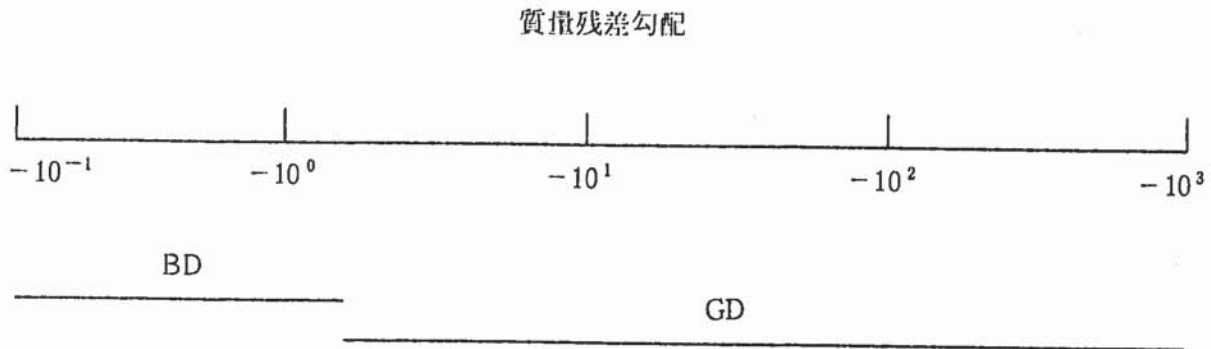
質量残差レベルにつき、区間 $[10^{-1}, 10^3]$ の台集合に対し、

SA : Small

ML : Midium Large

LA : Large

の2種の Fuzzy 変数を規定した。この領域は、



である。

質量残差勾配を用いた制御ルールは、以下の2種類である。

- (1) If 質量残差勾配がマイナスで急勾配であれば,
Then 加速係数 ω は現在のままとする。
- (2) If 質量残差勾配がマイナスで鈍化傾向であれば,
Then 加速係数 ω をかなり修正する。

Fig. 4.7 ~ Fig. 4.8 に質量残差勾配に関するメンバーシップ関数を示す。

一方、上記前提に対する修正動作としては、第 4.1.1 項のものを修正して流用した。すなわち、勾配の状態に応じて、Fig. 4.4 の関数 (ω : Small) と Fig. 4.6 の関数 (ω : Large) を使い分けることとした。

4.1.3 数値実験による検証

Fuzzy 制御理論による最適化の有効性を確認するため、強制対流問題と自然対流問題に適用した。

強制対流問題での検証の1つは、周期的に入口流速が変動する過渡計算問題であり、もう1つは同様の体系において入口流速を一定とした定常計算問題である。

自然対流問題での検証は、体系内部に発熱源を有する体系を用いた。一般に、メッシュ分割が粗くなると収束性が悪化し、加速係数の最適値も大きく変化する。そこで、細メッシュと粗メッシュの2種で数値実験を行ない、両者の Fuzzy 制御系の適用性を検討する。

(i) 強制対流過渡計算問題

[1] 数値実験体系

解析体系を Fig. 4.9 に示す。問題は、単純な矩形ダクトの左端から流体を流入させ、右端から流出させるものである。以下に計算条件を示す。また、入力データを Fig. 4.10 ~ Fig. 4.11 に示す。

時間積分法 : MICE
 高次差分法 : 運動量式……QUICK
 乱流量式……QUICK-FRAM法
 解析体系 : X-Z 2次元
 計算セル総数 : 200
 入口流速 : Fig. 4.12に示す周期的流入
 体系温度 : 20℃ 一定
 緩和係数 α : 0.5 一定
 (RDTIME)

〔2〕 結果と考察

Fuzzy 制御系を適用した場合の 50 時間ステップ間の加速係数 ω の推移を Fig. 4.14に示す。図中の「○」印が Fuzzy 制御系を適用した場合の推移であり、「△」印が固有値計算より求められた理論値を用いた場合の結果である。Fuzzy 制御系を用いた場合には、時間ステップが進行するに従って 1.92* 付近の値に近づき、その後はほぼ定常値を辿る。一方、固有値計算により求められた理論値は 1.82 であり、Fuzzy 制御系を用いた場合の方が大きい。

Fig. 4.15に 50時間ステップ間において圧力に関するポアソン方程式を解くために繰り返した反復回数を示す。図中には、Fuzzy 制御系を適用したケース（「○」印）、固有値計算より求められた理論値を適用したケース（「△」印）およびデフォルト値の 1.5 に固定したケース（「□」印）の 3 ケースを合わせて載せた。この結果よりわかる通り、加速係数 ω を 1.5 に固定した場合には、50時間ステップ間において反復制限回数である 99回に到達している場合があり、指定収束判定条件（質量残差）を満足しないで時間が進行していることを示唆している。一方、Fuzzy 制御系を適用した場合には、50時間ステップ中で全て反復制限回数である 99回以下で時間が進行している。また、固有値計算により求められた理論値を用いた場合も反復制限回数である 99回以下で時間が進行している。Fuzzy 制御系を用いた場合の推移と固有値計算により求められた理論値を用いた場合の推移との間に大きな差はないが、固有値計算により求められた理論値を用いた場合の方が全体的に反復回数は少ない（Fuzzy 制御系による値が最適値を的確にとらえていない為）。

Fig. 4.16に 50時間ステップ間における質量残差の変動を示す。ここでも図中に、Fuzzy 制御系によるもの、固有値計算により求められた理論値によるものおよび加速係数 ω を 1.5 に固定した場合のものを合わせて示した。加速係数 ω を 1.5 に固定した場合には、先にも触れた通り $\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ が 1.0 を越えて、指数収束判定条件を満足していない区間が存在している。

* 1時間ステップ内において加速係数 ω の値が変動するため、この値は 1時間ステップ内の最終の値である。

一方、Fuzzy 制御系を適用した場合には、50 時間ステップ間全てに渡り指定収束判定条件を満足しながら時間が進行していることがわかる。固有値計算により求められた理論値を用いた場合も同様である。

Fig. 4.17に、時間ステップ # 1 における反復回数と加速係数 ω の関係を示す。Fuzzy 制御系を用いた場合の加速係数 ω の推移は、約 1.97 より次第に減少する傾向を示し、収束状態到達時点である 75 回反復後には約 1.77 にまで減少している。

Fig. 4.18 は、時間ステップ # 1 における反復回数と質量残差減少の関係を示したものである。Fuzzy 制御を適用した場合には、76 回の反復により指定収束判定条件である 5.0×10^{-1} に到達しているのに対し、加速係数 ω を 1.5 に固定した場合には 99 回の反復によっても質量残差は 10^1 のオーダーにまでしか減少していないことがわかる。一方、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、Fuzzy 制御系を適用した場合よりも少ない反復回数で指定収束判定条件に到達していることがわかる。

以上より、Fuzzy 制御系を適用した場合には、固有値計算により求められた理論値を用いた場合とほぼ同等の結果を示すことが確認された。

(ii) 強制対流定常計算問題

(1) 数値実験体系

解析体系は、過渡計算問題と同じく、Fig. 4.9 に示す通りである。

以下に計算条件を示す。また、入力データを Fig. 4.13 に示す。

時間積分法	: MICE
高次差分法	: 運動量式……QUICK 法 乱流量式……QUICK-FRAM法
解析体系	: X-Z 2次元
計算セル総数	: 200
入口流速	: 0.5 m/s
体系温度	: 20 °C 一定
緩和係数 α	: Fuzzy 制御

(2) 結果と考察

Fuzzy 制御を適用した場合の 50 時間ステップ間の加速係数 ω の推移を Fig. 4.19 に示す。また、Fig. 4.20 に 50 時間ステップ間の質量残差の変動を示す。図中には、Fuzzy 制御によるもの、固有値計算により求められた理論値によるものおよび加速係数 ω をデフォルト値の 1.5 に固定した場合のものを合わせて示した。まず、デフォルト値の 1.5 に固定した場合には、 $\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ の値が 1.0 を越えて、指定収束判定条件を満足していない区間が存在している。一方、Fuzzy 制御系を適用した場合には、若干の変動は存在するものの指定収束判定条件を満足しながら時間が進行し、CPU 時間で約 12.4 秒で定常解に到達したため計算が終了してい

る。また、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、変動はかなり押さえられ指定収束判定条件内で時間が進行している。この解析ケースでの定常解到達までのCPU時間は、約14.6秒である。

Fig. 4.21～Fig. 4.24に定常状態到達までの各物理量の相対変動量の推移を示す。まず、Fig. 4.21の流速u成分（x方向成分）の相対変動量の推移について考察する。加速係数 ω をデフォルト値1.5に固定した場合には、計算開始と同時に約 10^{-3} から 10^{-1} 以上に変動が上昇し、全く収束傾向を示さない。固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、CPU時間で約6秒辺りまでは 4×10^{-4} の値の平行線を辿り、その後急激に減少傾向を示す。一方、Fuzzy制御系を使用した場合にも、固有値計算により求められた理論値を用いた場合とほぼ同様の傾向を示す。ただし、減少傾向を示している区間で若干の変動が現われている。

Fig. 4.22に示した流速w成分（z方向成分）の相対変動量推移も流速u成分のそれとほぼ同じ傾向を示す。すなわち、加速係数 ω をデフォルト値の1.5に固定した場合には収束傾向は示さず、固有値計算により求められた理論値を用いた場合とFuzzy制御系を使用した場合に収束傾向を示す。

Fig. 4.23およびFig. 4.24に示した乱流情報（kおよび ϵ ）についても同様である。

(iii) 自然対流細メッシュ体系問題

〔1〕 数値実験体系

解析体系をFig. 4.25に示す。問題は、矩形密閉容器内の左下に 100 W/m^3 の発熱体を模擬し、右上壁で 100 W/m^2 の除熱を行なって体系内に自然対流を発生させるものである。Fig. 4.26に入力データを示す。また、以下に計算条件を列記する。

時間積分法	: MICE
高次差分法	: 運動量式……QUICK法 エネルギー式……QUICK-FRAM法
解析体系	: X-Z 2次元
計算総セル数	: 625
体系初期温度	: $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 一定
内部発熱容量	: 100 W/m^3
除熱容量	: 100 W/m^2
時間刻み幅	: 0.1秒一定

〔2〕 結果と考察

Fuzzy制御系を適用した場合の50時間ステップ間の加速係数 ω の推移をFig.4.27に示す。図中の「○」印がFuzzy制御系を適用した場合の推移であり、「△」印が固有値計算より求められた理論値を用いた場合の結果である。Fuzzy制御系を用いた場合には、約1.87付近の値を定常的に示す。一方、固有値計算により求められた理論値は1.82であり、Fuzzy制御系を

用いた場合の方が若干大きい。

Fig. 4.28 に 50 時間ステップ間において圧力に関するポアソン方程式を解くために繰り返した反復回数を示す。図中には、Fuzzy 制御系を適用したケース（「○」印）、固有値計算より求められた理論値を適用したケース（「△」印）およびデフォルト値の 1.5 に固定したケース（「□」印）の 3 ケースを合わせて載せた。この結果よりわかる通り、加速係数 ω を 1.5 に固定した場合には、50 時間ステップ間において反復制限回数である 500 回に到達している場合があり、指定収束判定条件（質量残差）を満足しないで時間が進行していることを示唆している。一方、Fuzzy 制御系を適用した場合には、50 時間ステップ中で全て反復制限回数である 500 回以下で時間が進行している。また、固有値計算により求められた理論値を用いた場合も反復制限回数である 500 回以下で時間が進行している。Fuzzy 制御系を用いた場合の推移と固有値計算により求められた理論値を用いた場合の推移との間に大きな差はないが、Fuzzy 制御系を用いた場合の方が全体的に反復回数は少なく、特に 12 ステップまでは反復回数の差が顕著である。

Fig. 4.29 に 50 時間ステップ間における質量残差の変動を示す。ここでも図中に、Fuzzy 制御系によるもの、固有値計算により求められた理論値によるもの、および加速係数 ω を 1.5 に固定した場合のものを合わせて示した。加速係数 ω を 1.5 に固定した場合には、先にも触れた通り $\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ が 1.0 を越えて、指定収束判定条件を満足していない区間が存在している。一方、Fuzzy 制御を適用した場合には、50 時間ステップ間全てに渡り指定収束判定条件を満足しながら時間が進行していることがわかる。固有値計算により求められた理論値を用いた場合も同様である。

Fig. 4.30 に、時間ステップ # 1 における反復回数と加速係数 α の関係を示す。Fuzzy 制御系を用いた場合の加速係数 ω の推移は、約 1.93 より次第に減少する傾向を示し、収束状態到達時点である 170 回反復後には約 1.77 にまで減少している。

Fig. 4.31 は、時間ステップ # 1 における反復回数と質量残差減少の関係を示したものである。Fuzzy 制御系を適用した場合には、170 回の反復により指定収束判定条件である 1.0×10^{-6} に到達しているのに対し、加速係数 ω を 1.5 に固定した場合には 440 回の反復によって質量残差が 10^{-6} のオーダーに減少していることがわかる。一方、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、Fuzzy 制御系を適用した場合よりも若干多い反復回数で指定収束判定条件に到達していることがわかる。

以上より、Fuzzy 制御系を適用した場合には、固有値計算により求められた理論値を用いた場合とほぼ同等あるいはそれ以上の結果を示すことが確認された。

(iv) 自然対流粗メッシュ体系問題

〔1〕 数値実験体系

解析体系を Fig. 4.32 に、また入力データを Fig. 4.33 に示す。Fig. 4.32 から分かる通り、

細メッシュ分割問題に比べメッシュ数が約 $1/6$ になっている。

〔2〕 結果と考察

Fuzzy 制御系を適用した場合の 50 時間ステップ間の加速係数 ω の推移を Fig. 4.34 に示す。ここでの傾向は、(iii) に示したものと大きく異なり、加速係数 ω の値は約 1.3 とかなり小さい。一方、固有値計算により求められた理論値による値は 1.26 である。

Fig. 4.35 に 50 時間ステップ間において圧力に関するポアソン方程式を解くために繰り返した反復回数を示す。図中には、Fuzzy 制御系を適用したケース（「○」印）、固有値計算より求められた理論値を適用したケース（「△」印）およびデフォルト値の 1.5 に固定したケース（「□」印）の 3 ケースを合わせて載せた。この結果より分る通り、何れの条件設定を行なった場合も、50 時間ステップ間において反復制限回数である 500 回以内に指定収束判定条件（質量残差）を満足して時間が進行していることがわかる。

Fig. 4.36 に 50 時間ステップ間における質量残差の変動を示す。ここでも図中に、Fuzzy 制御系によるもの、固有値計算により求められた理論値によるものおよび加速係数 ω を 1.5 に固定した場合のものを合わせて示した。この質量残差の変動についても、全てのケースにつき収束定条を満足しながら時間が進行している。

Fig. 4.37 に、時間ステップ # 1 における反復回数と加速係数 ω の関係を示す。Fuzzy 制御系を用いた場合の加速係数 ω の推移は、約 1.60 付近より次第に減少する傾向を示し、収束状態到達時点である 40 回反復後には約 1.35 にまで減少している。このような大きな変動は、(iii) の細メッシュ体系では見られなかった挙動であり粗メッシュ問題に特有なものである。

Fig. 4.38 は、時間ステップ # 1 における反復回数と質量残差減少の関係を示したものである。何れのケースについても、質量残差減少勾配はかなり大きく、ケース間で大きな差はない。

以上より、粗メッシュ体系問題についても Fuzzy 制御系は良好な結果を示し、固有値計算により求められた理論値を用いた場合の結果と遜色のない結果を示すことが確認された。

4.2 完全陰解法における最適制御

4.2.1 質量残差に関する Fuzzy 変数と制御ルール

ここで用いる Fuzzy 変数、メンバーシップ関数および制御ルールは、第 4.1.1 項で示したものと同一である。

4.2.2 質量残差勾配に関する Fuzzy 変数と制御ルール

ここで用いる Fuzzy 変数、メンバーシップ関数および制御ルールは、第 4.1.2 項のものと同一である。

4.2.3 数値実験による検証

(i) 強制対流問題

〔1〕 数値実験体系

検証問題として、第 4.1.3 項(ii)で用いたと同様の解析体系（定常計算問題）を選定した。入力データを Fig. 4.39 に示す。また、以下に計算条件を列記する。

時間積分法	: SIMPTEST
解析体系	: X-Z 2次元
計算総セル数	: 200
入口流速	: 0.5 m/s
体系温度	: 20 °C 一定
時間刻み幅	: 1.0 秒 一定

〔2〕 結果と考察

Fuzzy 制御系を適用した場合の 50 時間ステップ間の加速係数 ω の推移を Fig. 4.40 に示す。図中の「○」印が Fuzzy 制御系を適用した場合の推移であり、「△」印が固有値計算より求められた理論値を用いた結果である。Fuzzy 制御系を用いた場合には、1.84 ~ 1.85 のほぼ定常値を辿り、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、1.79 ~ 1.80 の値を辿る。このように Fuzzy 制御系を用いた場合にも、固有値計算により求められた理論値とほぼ同一の値を示すことがわかる。

Fig. 4.41 ~ Fig. 4.42 に定常解到達までの収束曲線を流速成分 u , w についてそれぞれ示す。まず、Fig. 4.41 の流速成分 u については、Fuzzy 制御系を用いた場合が最も短時間で定常解に到達することがわかる。一方、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、定常状態到達までの CPU 時間は Fuzzy 制御系を用いた場合のそれよりも長い収束曲線はかなり滑らかである。加速係数 ω をデフォルト値の 1.5 に固定した場合は、Fuzzy 制御系を用いた場合の結果に近い応答を示すが、相対変動量が 10^{-4} 以下に減少した後の傾向に差が現われている。

Fig. 4.42 に示した流速成分 w についてもほぼ同様の傾向を示すことがわかる。以上に示した相対変動量の減少勾配は、Fuzzy 制御系を用いた場合の方が固有値計算により求められた理論値を用いた場合よりも大きく、これは Fuzzy 制御の目的関数として、相対変動量の減少勾配を可能な限り最大にするという制御目的が達成されていることの現れである。

Fig. 4.43 に、時間ステップ # 1 における反復回数と加速係数 ω の関係を示す。Fuzzy 制御系を用いた場合の加速係数 ω の推移は、約 1.92 より次第に減少する傾向を示し、収束状態到達時点である 83 回反復後には約 1.79 にまで減少している。一方、固有値計算により求められた理論値は約 1.83 の値を示し、62 回の反復で収束状態に到達している。このように単一時間ステップ内の収束性能については、固有値計算により求められた理論値を用いた方が良好である。

(ii) 自然対流問題

〔1〕 数値実験体系

自然対流場での検証問題として、第 4.1.3 項(iii)で用いたものを流用した。入力データを Fig. 4.44 に示す。また、計算条件を以下に示す。

時間積分法	: SIMPLEST
解析体系	: X-Z 2次元
計算総セル数	: 625
体系初期温度	: 20 °C 一定
内部発熱容量	: 100 W/m ³
除熱容量	: 100 W/m ²
時間刻み幅	: 1.0 秒一定

〔2〕 結果と考察

Fuzzy 制御系を適用した場合の 400 時間ステップ間の加速係数 ω の推移を Fig. 4.45 に示す。図中の「○」印が Fuzzy 制御系を適用した場合の推移であり、「△」印が固有値計算より求められた理論値を用いた場合の結果である。Fuzzy 制御系を用いた場合には、1.81～1.82 のほぼ定常値を辿り、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、1.85～1.86 の値を辿る。このように Fuzzy 制御系を用いた場合にも、固有値計算により求められた理論値とほぼ同一の値を示すことがわかる。

Fig. 4.46～Fig. 4.47 に定常解到達までの収束曲線を流速成分 u , w についてそれぞれ示す。まず、Fig. 4.46 の流速成分 u については、Fuzzy 制御系を用いた場合が最も短時間で定常解に到達することがわかる。一方、固有値計算により求められた理論値を用いた場合には、定常状態到達までの CPU 時間は Fuzzy 制御系を用いた場合のそれよりも長い収束曲線はかなり滑らかである。加速係数 ω をデフォルト値の 1.5 に固定した場合は、固有値計算により求められた理論値を用いた場合の結果に近い応答を示すが、相対変動量が 10^{-3} 以下に減少した後の傾向に差が現われている。これらの傾向は、4.1.3 項での結果と一致する。

Fig. 4.47 に示した流速成分 w についても流速 u 成分のそれとほぼ同様の傾向を示すことがわかる。

Fig. 4.48 に、時間ステップ # 1 における反復回数と加速係数 α の関係を示す。Fuzzy 制御系を用いた場合の加速係数 ω の推移は、約 1.87 をピークに次第に減少する傾向を示し、収束状態到達時点である 75 回反復後には約 1.68 にまで減少している。一方、固有値計算により求められた理論値は約 1.86 の値を示し、65 回の反復で収束状態に到達している。このように単一時間ステップ内の収束性能については、固有値計算により求められた理論値を用いた方が良好である。しかし、SIMPLEST 法の場合には各時間ステップ毎に圧力に関するポアソン方程式の係数行列が変化するため、各時間ステップ毎に最適な加速係数 ω の値も変化する。こ

のため、毎時間ステップに固有値計算を実施する場合には計算時間がかかり、解析全体のCPU時間を比べた場合にはFuzzy制御系を用いた場合に比べて不利となる。このような傾向は、4.1.3項の結果についても同様である。

4.3 まとめ

第4章において、半陰解法(MICE)を用いた場合の加速係数 ω の選定および完全陰解法(SIMPLEST)を用いた場合の加速係数 ω の選定の最適化をFuzzy理論を用いる事によって試みた。各種数値実験体系を用いた検証により、加速係数 ω を外部より設定固定あるいは固有値計算により求められた理論値を用いた場合と比較して、計算時間および収束性等につきこれらと同等あるいはこれを上回る良好な結果がえられた。以下に、数値実験により得られた知見を列記する。

- (1) 各問題につき、1時間ステップ内の収束性能は固有値計算により求められた理論値を用いた場合が最も良好である。すなわち、最も少ない反復回数で収束解を得ることができる。
- (2) 定常計算問題につき、定常状態到達までのCPU時間はFuzzy制御系を用いた場合が最も短い。この知見は、(1)の結果と矛盾するが、これは固有値計算に費やす割合が大きいためである。このことから固有値計算結果を制御則として用いることは、CPU時間の面から現在では無理である。
- (3) Fuzzy制御系は、時間積分法の違いによらず最適な加速係数 ω の値を選定し、計算を実行することが確認された。
- (4) メッシュ粗さを変化させた場合に变化する最適な加速係数 ω の値をFuzzy制御系は探索し、計算を実行することが確認された。

第 5 章 結 言

单相多次元熱流動解析コード "AQUA" に Fuzzy 理論を用いた適応制御システムを導入した。この適応制御システムは、与えられた計算体系および境界条件のもとで計算安定性、計算精度および計算時間の最適化を計るものである。操作対象は、時間刻み幅 Δt を計算する上で用いられる緩和係数 α ($\Delta t = \alpha * \Delta t_c$) と SOR 法を使用する上で用いられる加速係数 ω である。

緩和係数 α の最適化については、各種の数値実験体系を用いた検証によって外部より設定固定して計算を実行した場合に比べ計算時間および計算精度につきこれを上回る良好な結果が得られた。ただし、時間刻み幅 Δt が Courant 条件から決まる Δt_c の制限をうけず自由に設定可能な完全陰解法を用いた場合の過渡計算問題については、現象模擬に対する要求精度との決定における干渉が発生する。このため、模擬現象に対するより深い知識を用いた制御が必要である。すなわち、「これから模擬しようとする現象は、いかなる精度を持たなければ意味を成さない」といった知識の活用である。

加速係数 ω の最適化についても、外部より設定固定した場合あるいは固有値計算より求められた理論値を用いた場合と比較して、計算時間および収束性等につきこれらと同等あるいはこれを上回る良好な結果が得られた。

以上示した知見から、单相多次元熱流動解析コードの最適化に対し Fuzzy 理論を用いた適応制御系が有効であることが確認された。

参 考 文 献

- (1) 前川 他, " 单相多次元熱流動解析コード AQUA 数値計算法説明書 ",
PNC Report PNC N 9520 87-012, 1987年5月
- (2) 村松 他, " 单相多次元熱流動解析コード AQUA プログラム解説書 ",
PNC Report PNC N 9520 87-013, 1987年5月
- (3) 村松 他, " 单相多次元熱流動解析コード AQUA 入力マニュアル ",
PNC Report PNC N 9520 87-011, 1987年5月
- (4) 前川 他, " 多次元熱流動解析コードの整備改良(Ⅱ)
タスク2: 数値拡散防止差分法の検討 ",
PNC Report PNC N 9410 86-002, 1986年2月
- (5) 村松 他, " 多次元熱流動解析コードの整備改良(Ⅱ)
タスク3: PCG法の検討 ",
PNC Report PNC SN 941 85-90, 1985年5月
- (6) 村松 他, " 多次元熱流動解析コードの整備改良(Ⅱ)
タスク3: 圧力に関するポアソン方程式の高速解法の検討 ",
PNC Report PNC N 9410 86-008, 1986年1月
- (7) 村松 他, " 单相流解析におけるポアソン型圧力方程式の高速解法の改良 ",
PNC Report PNC N 9410 87-040, 1987年3月
- (8) L. A. Zadeh, " Theory of Fuzzy Sets ", Univ. of California, Electronic
Reseach Lab. No ERL-M 502, 1975
- (9) 菅野, " あいまい集合と論理の制御への応用 ",
計測と制御 Vol. 18, No. 2, 1979
- (10) N. Tanaka, et al., " Thermal Hydraulics in Reactor Vessel of Pool-type FBR
-Hydraulic Tests and Analyses on Flow and Thermal Stratification
in a Cylindrical Plenum - ", Civil Enginnering Lab. Rep.
No. 382004, CRIEPI, 1982
- (11) 戸川, " マトリクスの数値計算 ",
オーム社, 1979

付録A 固有値計算による加速係数の推定¹¹⁾

$$\begin{aligned}
 a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \cdots + a_{1n} x_n &= b_1 \\
 a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \cdots + a_{2n} x_n &= b_2 \\
 &\vdots \\
 a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + \cdots + a_{nn} x_n &= b_n
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

とする。ヤコビ法を用いて第 $k+1$ 近似解を求める反復公式は、

$$\begin{aligned}
 x_1^{k+1} &= a_{11}^{-1} \{ b_1 - (a_{12} x_2^k + a_{13} x_3^k \cdots + a_{1n} x_n^k) \} \\
 x_2^{k+1} &= a_{22}^{-1} \{ b_2 - (a_{21} x_1^k + a_{23} x_3^k \cdots + a_{2n} x_n^k) \} \\
 &\vdots \\
 x_n^{k+1} &= a_{nn}^{-1} \{ b_n - (a_{n1} x_1^k + a_{n2} x_2^k \cdots + a_{n,n-1} x_{n-1}^k) \}
 \end{aligned}
 \tag{A.2}$$

となる。この反復公式を行列の形で表わすと、

$$X^{k+1} = D^{-1} \{ B - (A - D) X^k \}
 \tag{A.3}$$

の様な形に書くことができる。ここで、 D は $a_{11}, a_{22}, \cdots, a_{nn}$ を要素に持つ対角行列である。

(A.3) 式は、以下の様に変形して整理できる。

$$\begin{aligned}
 X^{k+1} &= D^{-1} \{ B - (A - D) X^k \} \\
 &= D^{-1} \{ B + (E + F) X^k \} \\
 &= D^{-1} (E + F) X^k + D^{-1} B
 \end{aligned}
 \tag{A.4}$$

ここで、 E, F はそれぞれ下三角行列および上三角行列である。

この (A.4) 式の右辺第 1 項の係数を M_j 、右辺第 2 項を g_j とすると、

$$\begin{aligned}
 M_j &= D^{-1} (E + F) \\
 g_j &= D^{-1} B_j \\
 X^{k+1} &= M_j X^k + g_j
 \end{aligned}
 \tag{A.5}$$

となる。この様な反復式は、 $\|M\| < 1$ ならば収束する。

すなわち、

$$\begin{aligned}
 X^{k+1} &= M_j X^k + g_j \\
 &= M_j (M_j X^{k-1} + g_j) + g_j \\
 &= M_j^2 X^{k-1} + (M_j + I) g_j \\
 &= M_j^2 (M_j X^{k-2} + g_j) + (M_j + I) g_j \\
 &= M_j^3 X^{k-2} + (M_j^2 + M_j + I) g_j \\
 &\vdots \\
 &= M_j^k X^1 + (M_j^{k-1} + \cdots + M_j^2 + M_j + I) g_j
 \end{aligned}
 \tag{A.6}$$

の様な反復順序を考え、 $k \rightarrow \infty$ とする時、 $\|M\| < 1$ ならば右辺第1項は0、右辺第2項は $(I - M_j)^{-1} g_j$ によって (X^k) は収束する。

一方、SOR法における最適な加速係数 ω の決定に関する計算式として、

$$\omega_{opt} = \frac{2}{\sqrt{(1 + 1 - \lambda_{max}^2)}} = 1 + \left(\frac{\lambda_{max}}{1 + \sqrt{(1 - \lambda_{max}^2)}} \right)^2 \quad (A.7)$$

が提案されており、ここで λ_{max} は M_j の特性方程式

$$\det |M_j - \lambda I| = 0 \quad (A.8)$$

から決定される絶対値最大の固有値である。

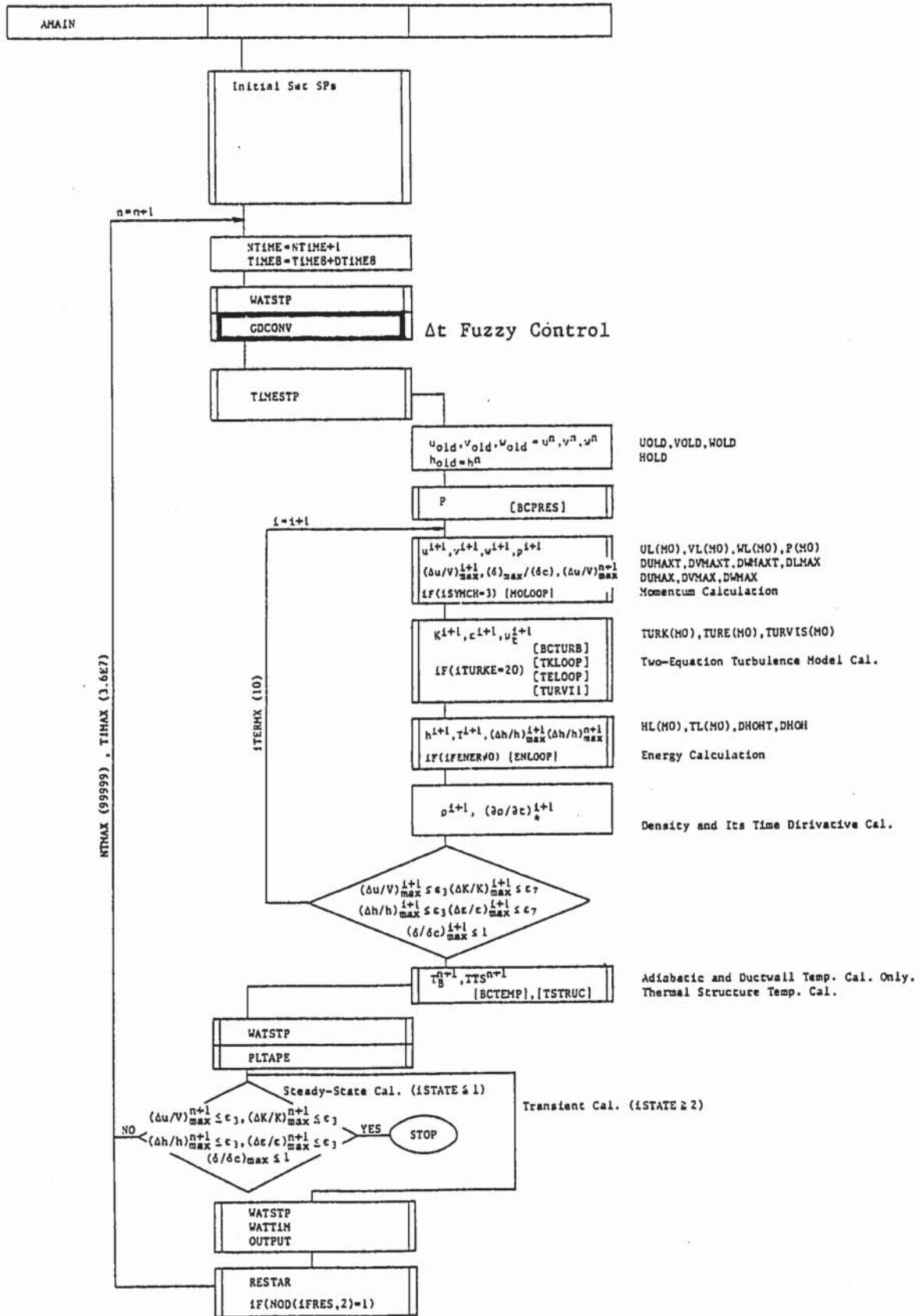


Fig. 2.1 General Flow Chart for SIMPLEST version in AQUA (1/2)

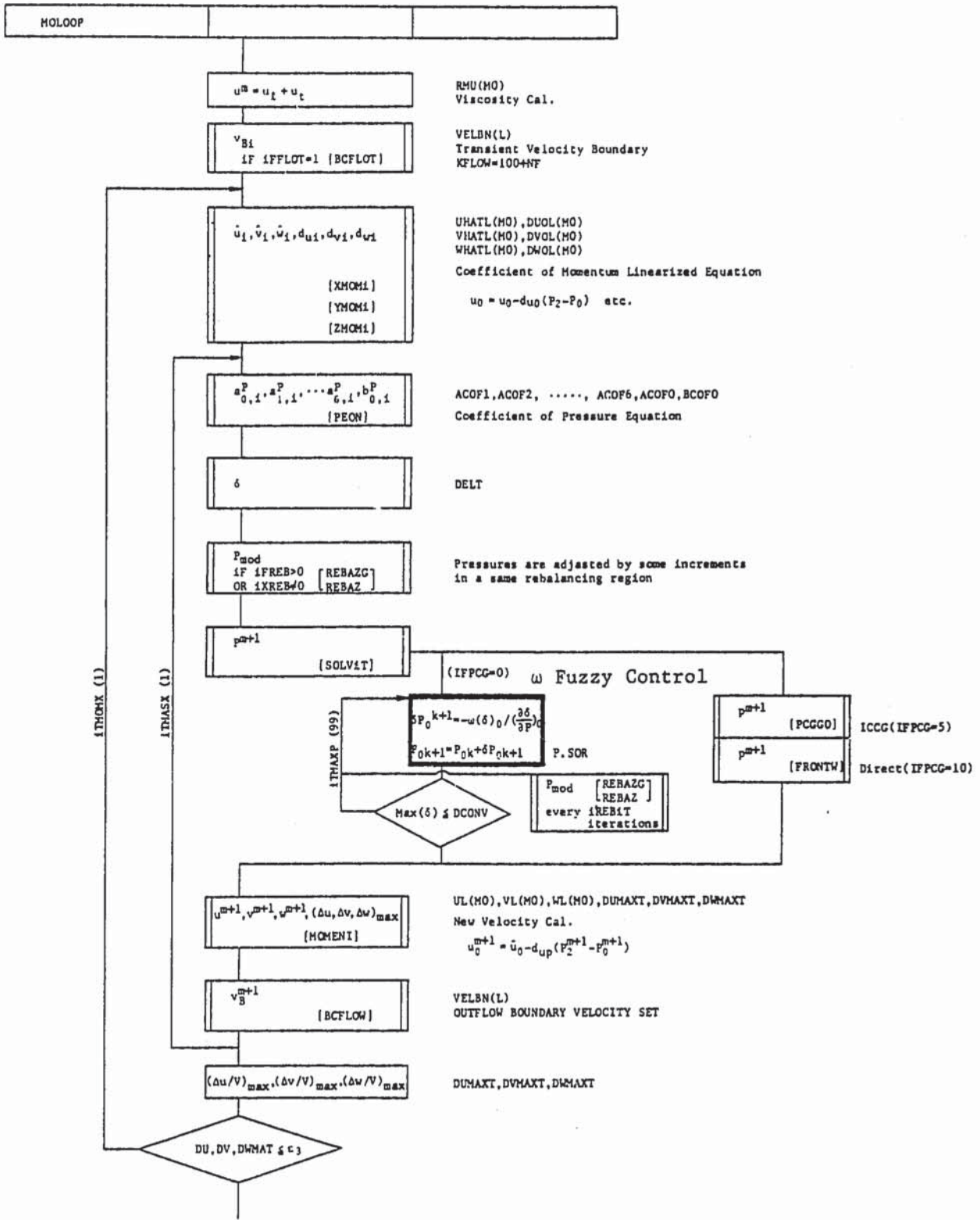


Fig. 2.1 Continued (2/2)

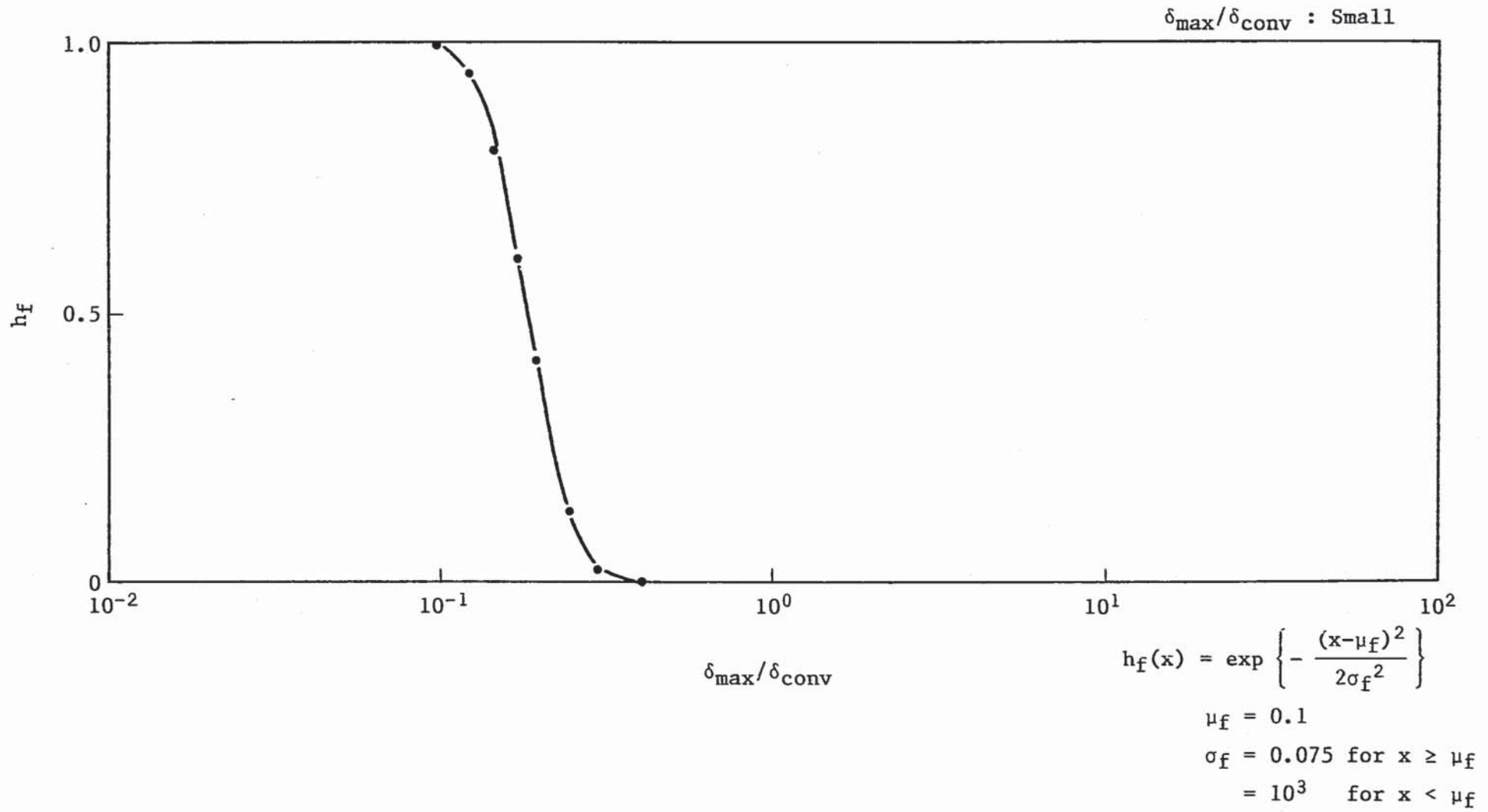
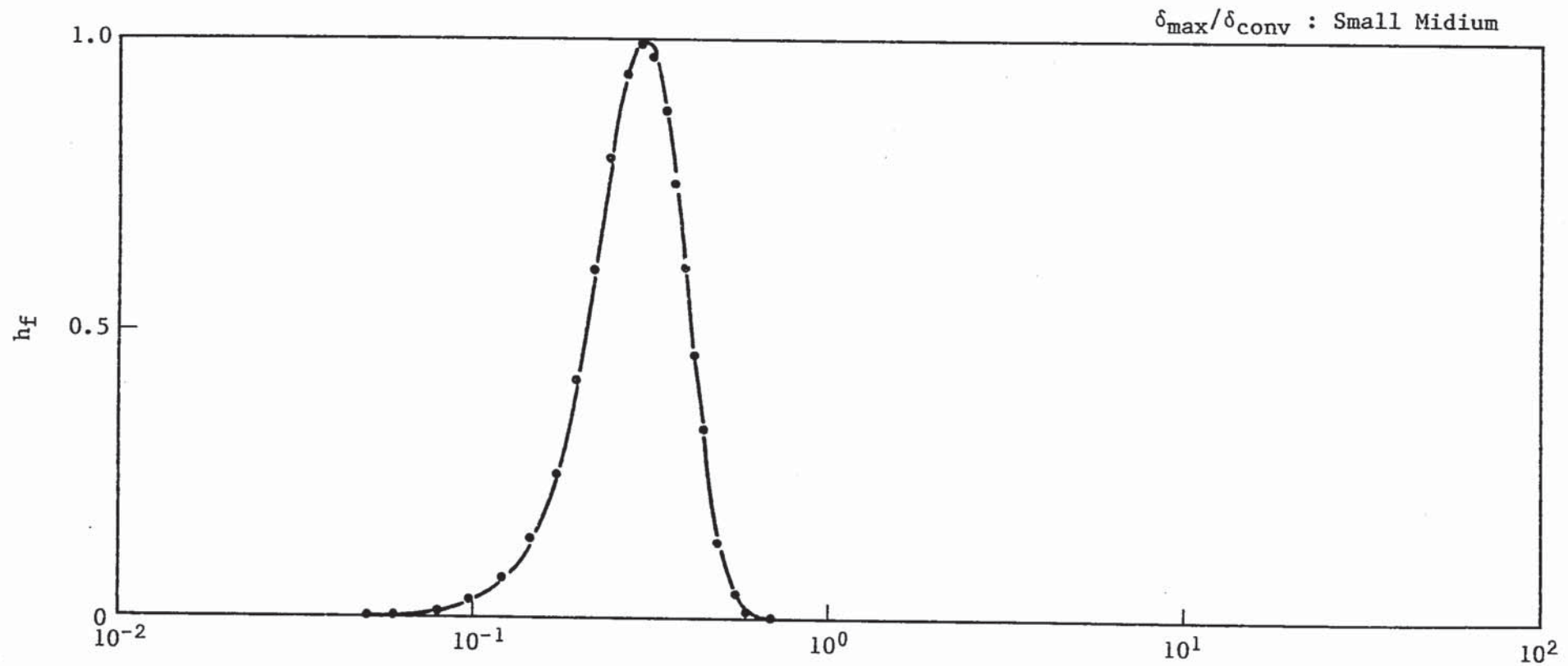


Fig. 3.1 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (1)
 ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Small)



$$h_f(x) = \exp \left\{ - \frac{(x - \mu_f)^2}{2\sigma_f^2} \right\}$$

$$\mu_f = 0.3$$

$$\sigma_f = 0.1 \quad \text{for } x > \mu_f$$

$$= 0.075 \quad \text{for } x \leq \mu_f$$

Fig. 3.2 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (2)
 ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Small Midium)

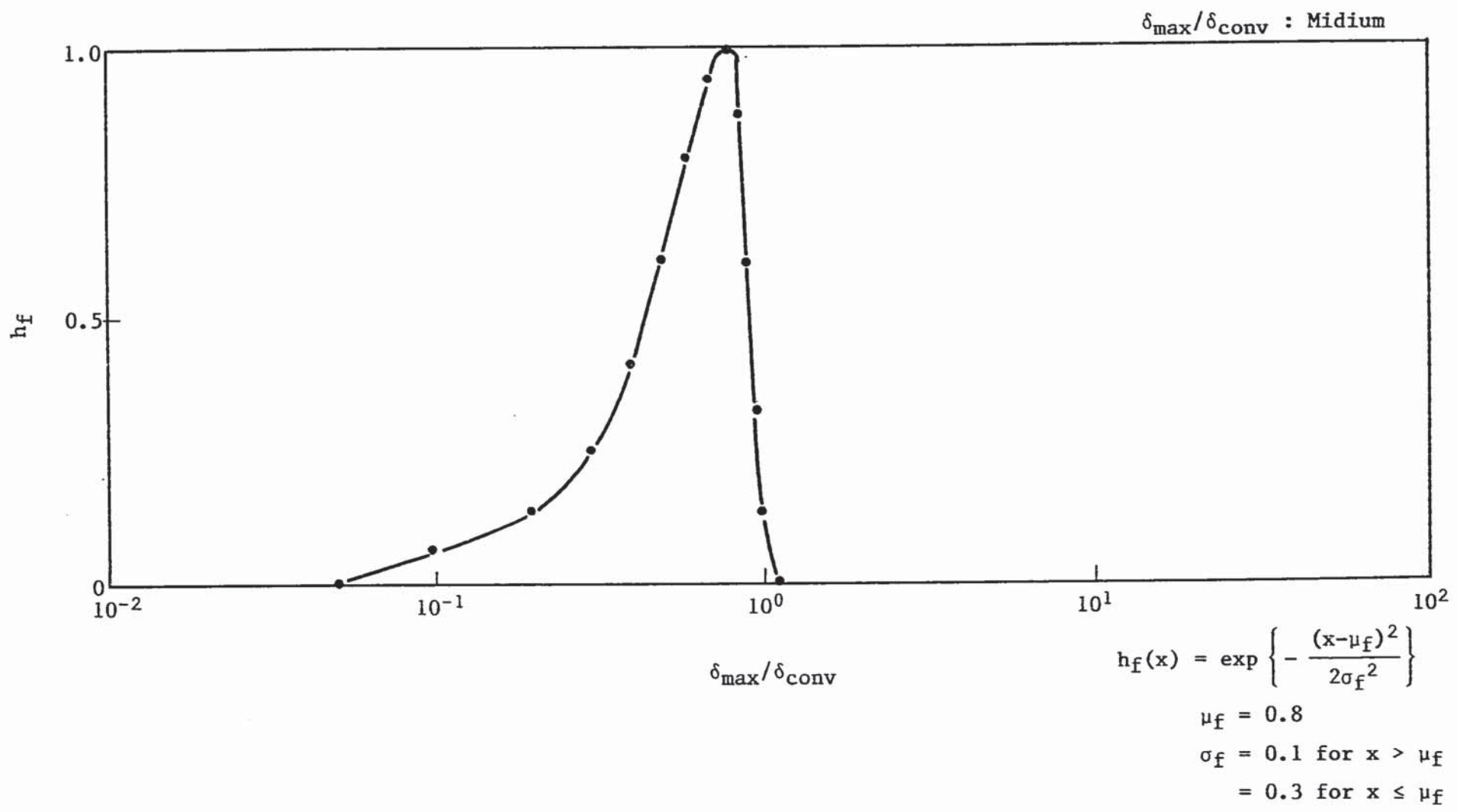


Fig. 3.3 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (3)
 ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Midium)

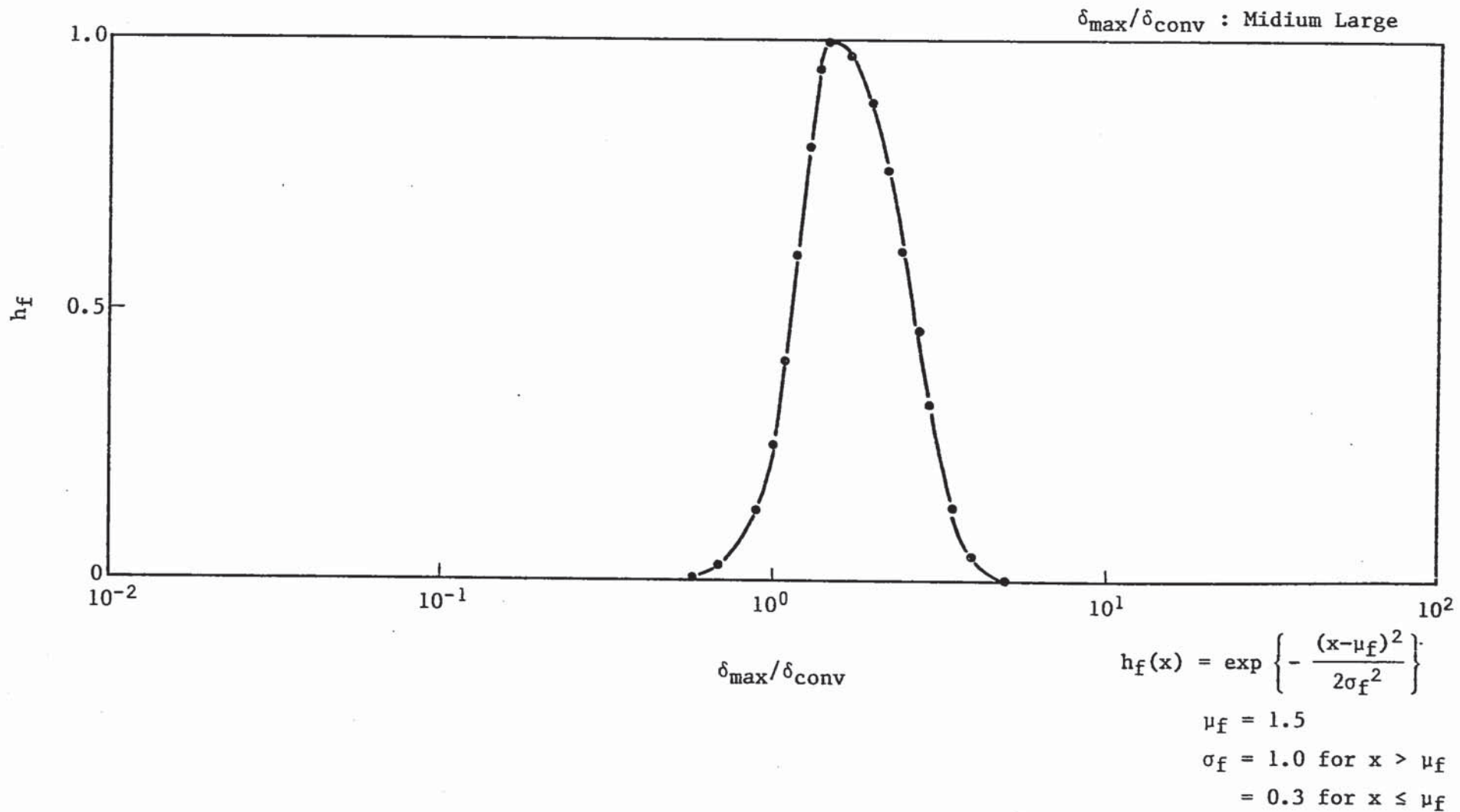


Fig. 3.4 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Steppint (4)
($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Midium Large)

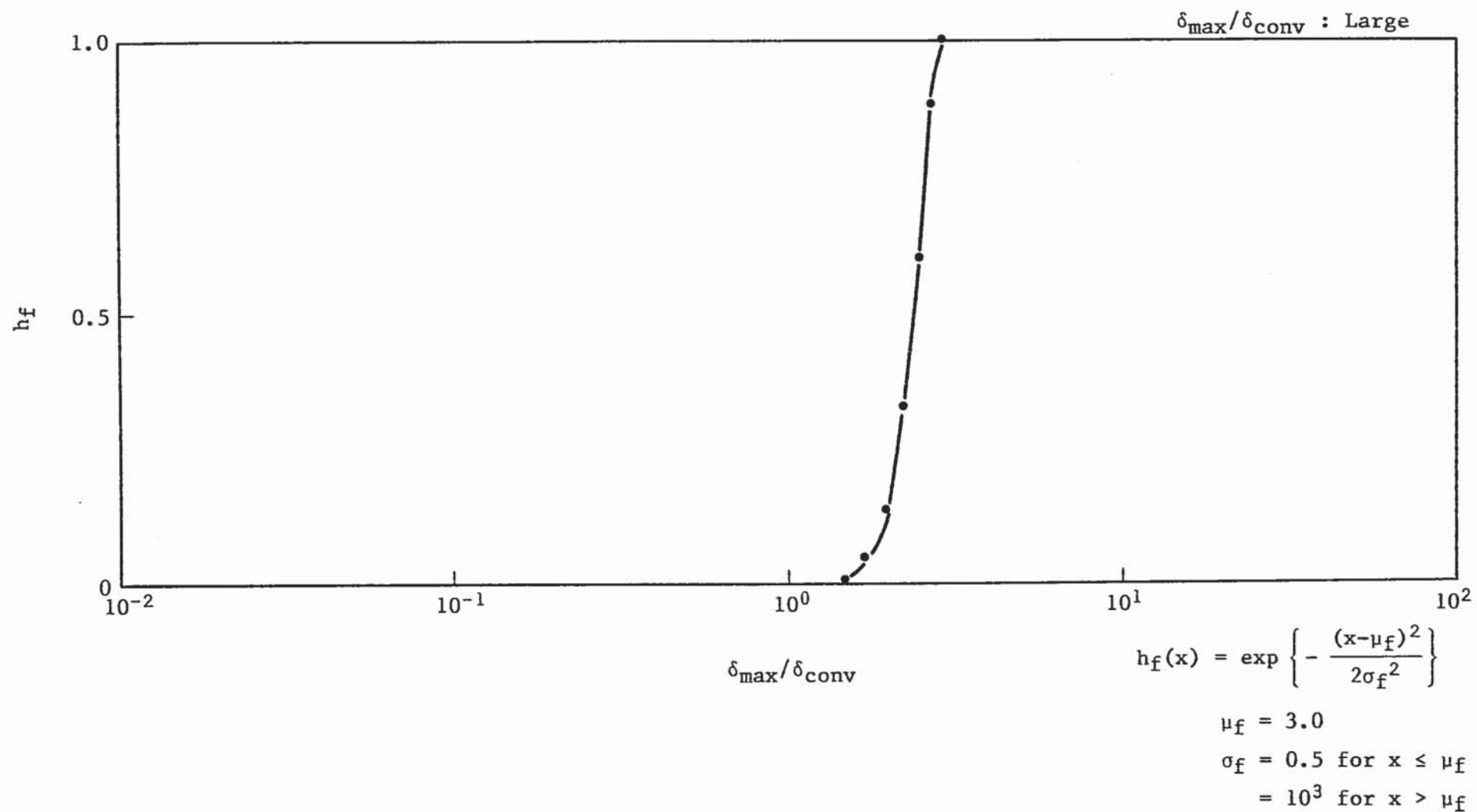


Fig. 3.5 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Time Stepping (5)
 ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Large)

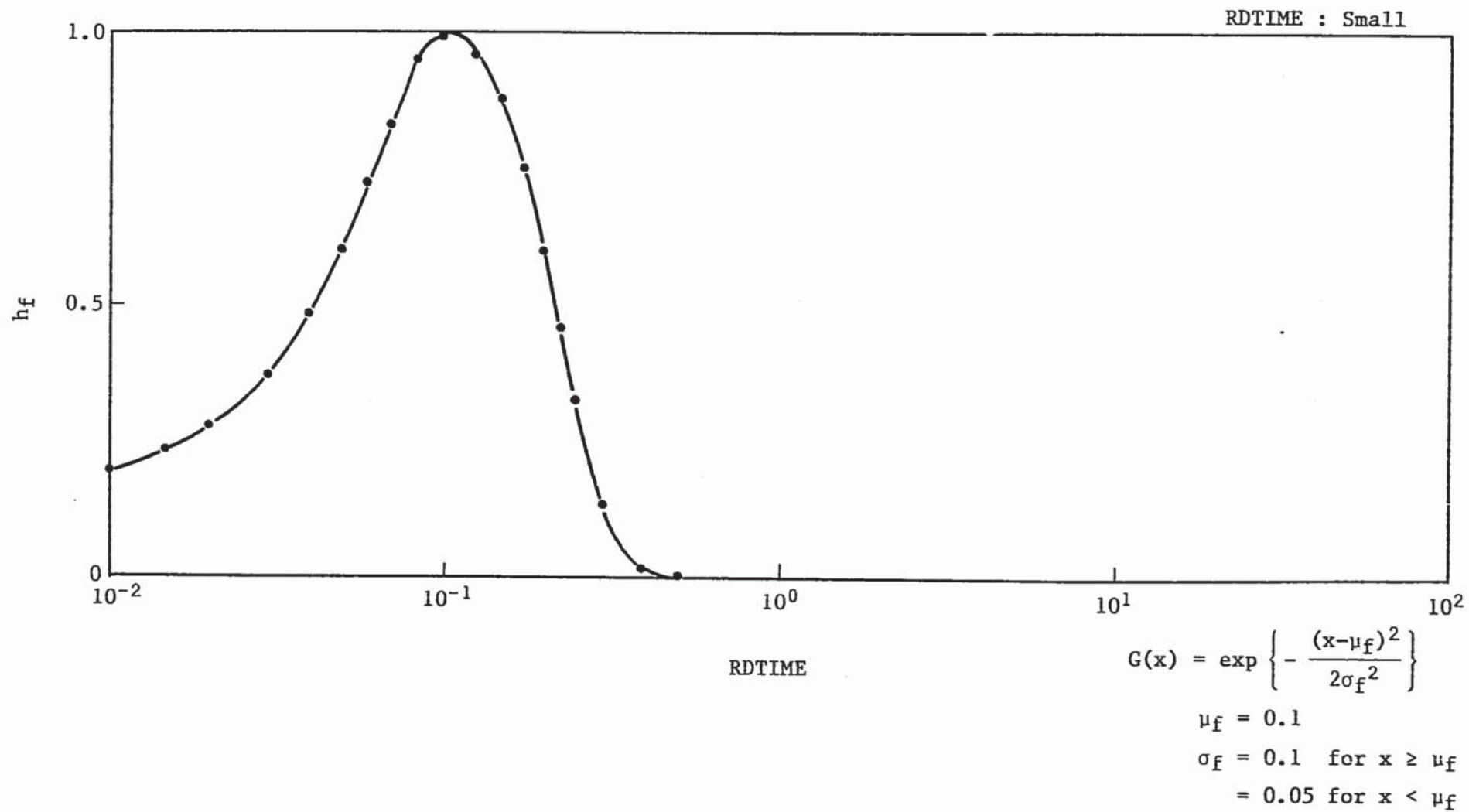


Fig. 3.6 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (1)
(RDTIME is Small)

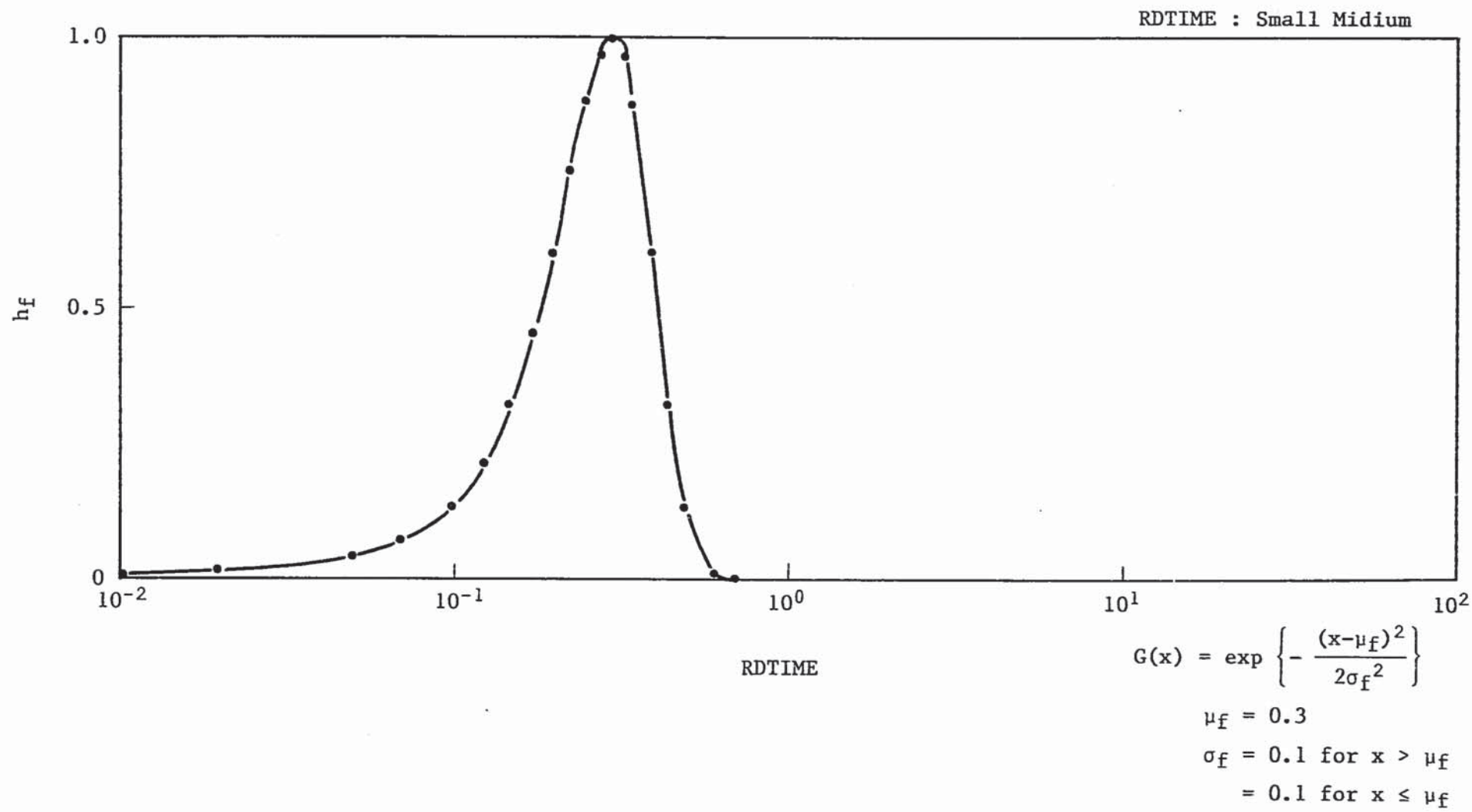


Fig. 3.7 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (2)
(RDTIME is Small Midium)

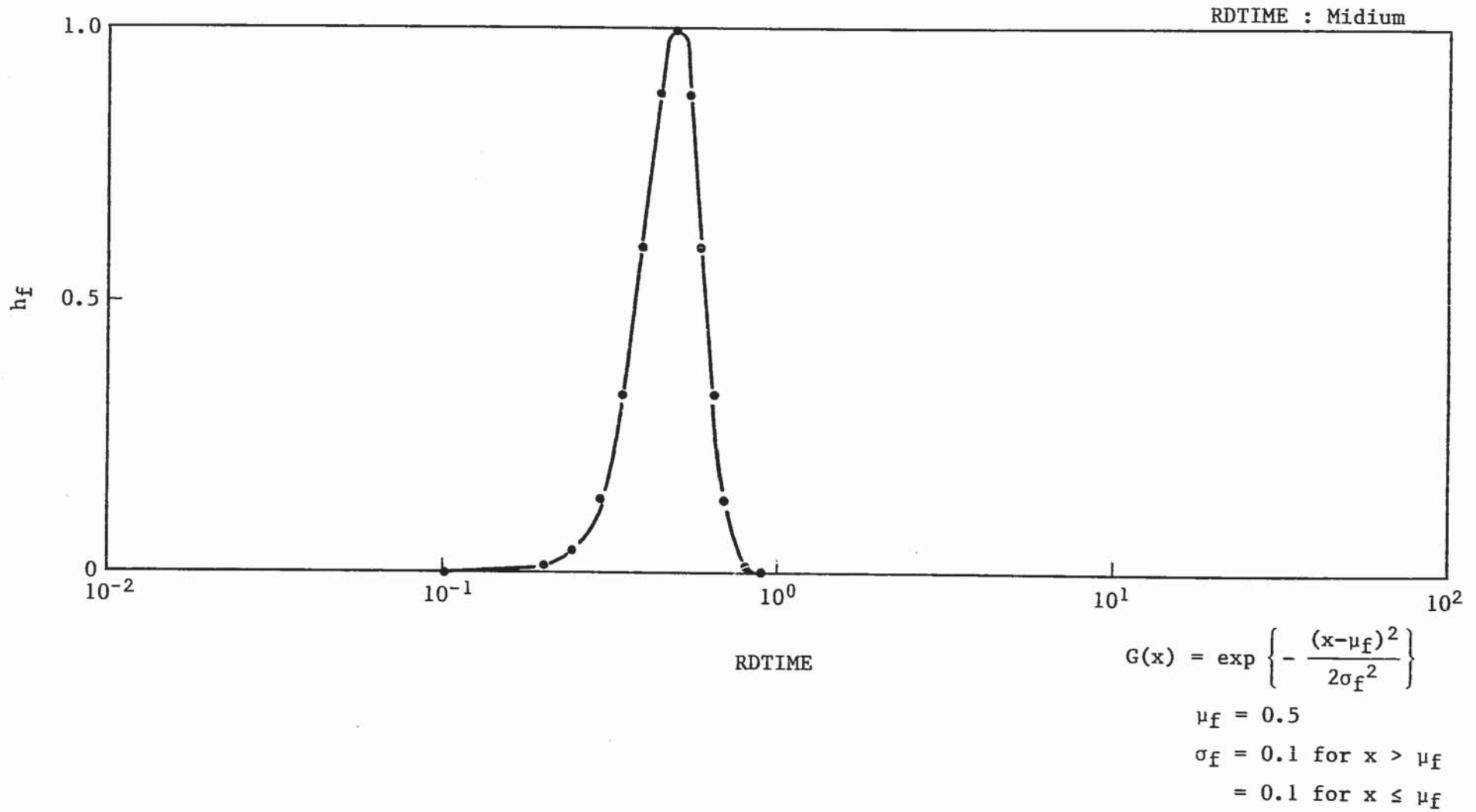


Fig. 3.8 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (3)
(RDTIME is Midium)

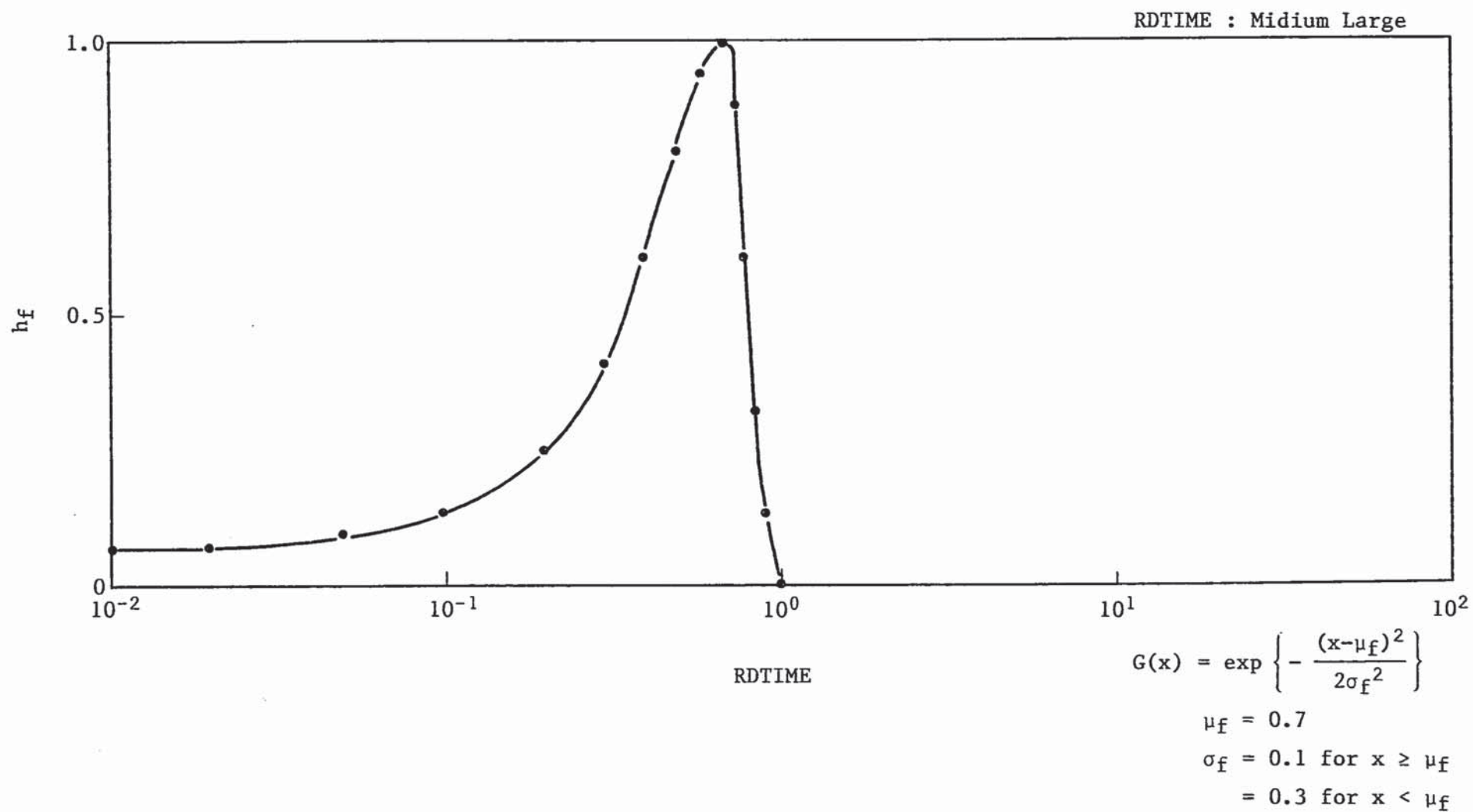


Fig. 3.9 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (4)
(RDTIME is Midium Large)

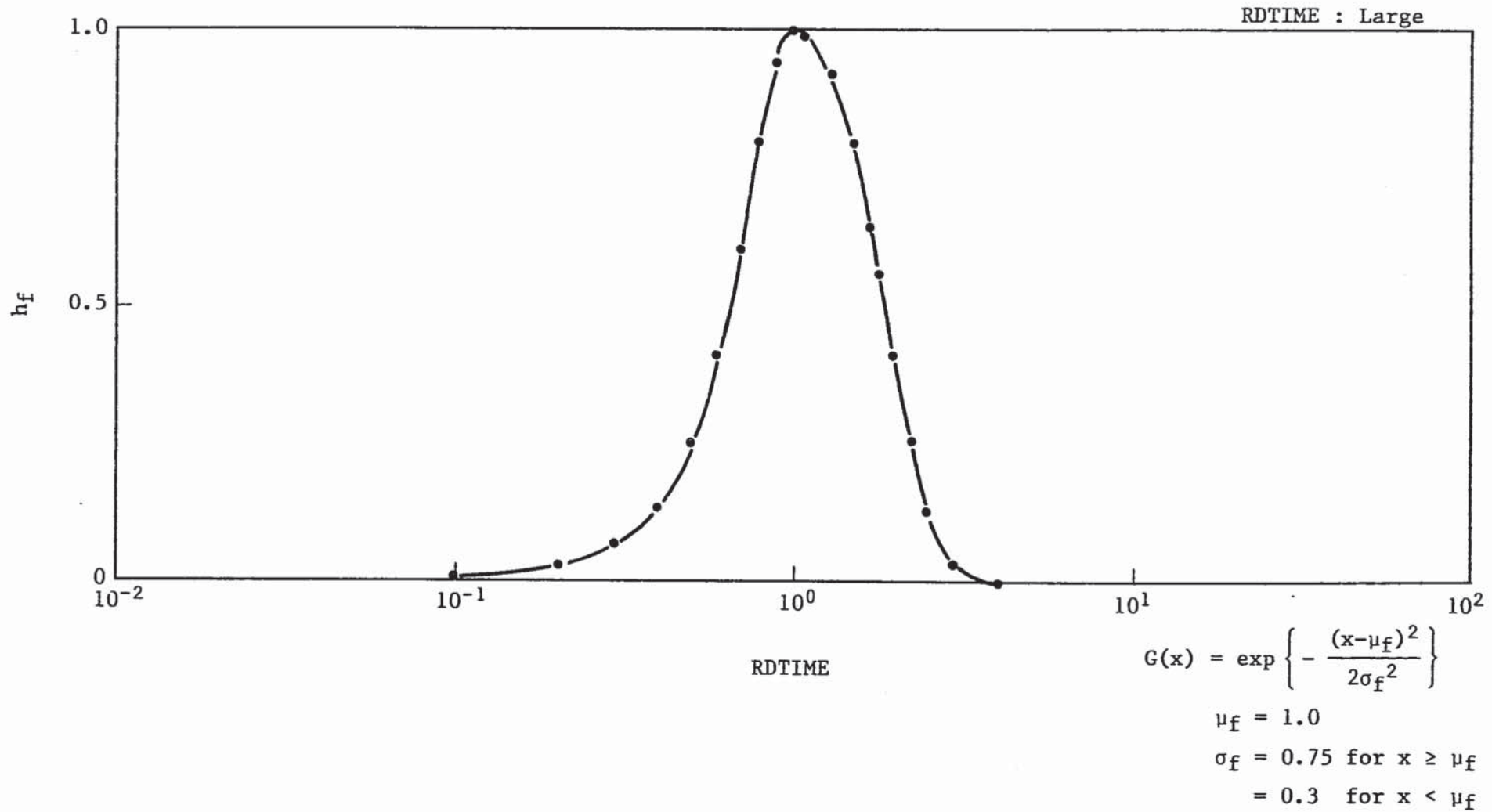


Fig. 3.10 Member Ship Function for RDTIME Setting under MICE Scheme (5)
(RDTIME is Large)

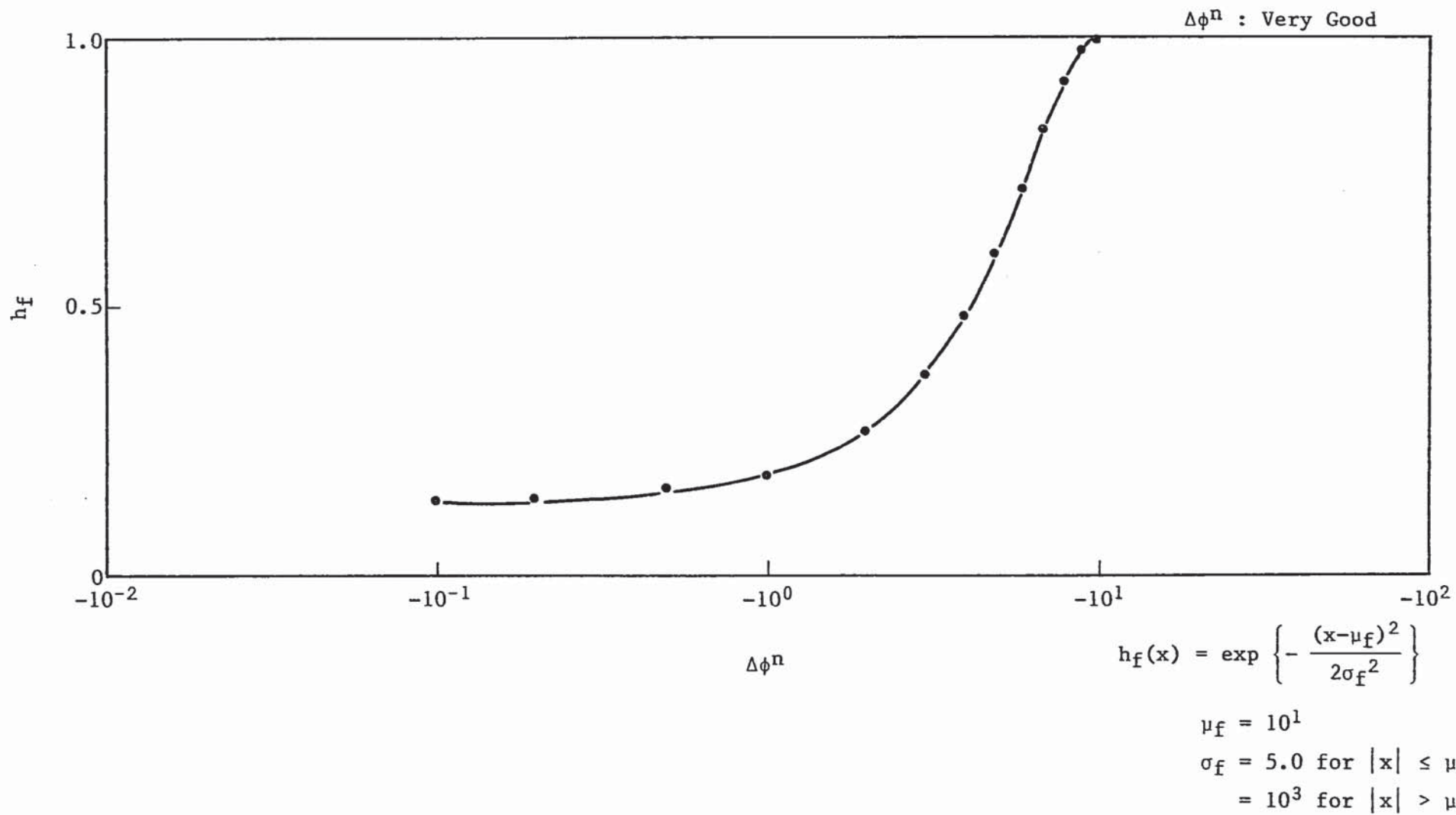


Fig. 3.11 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k&ε (1)
 ($\Delta\phi^n$ is Very Good)

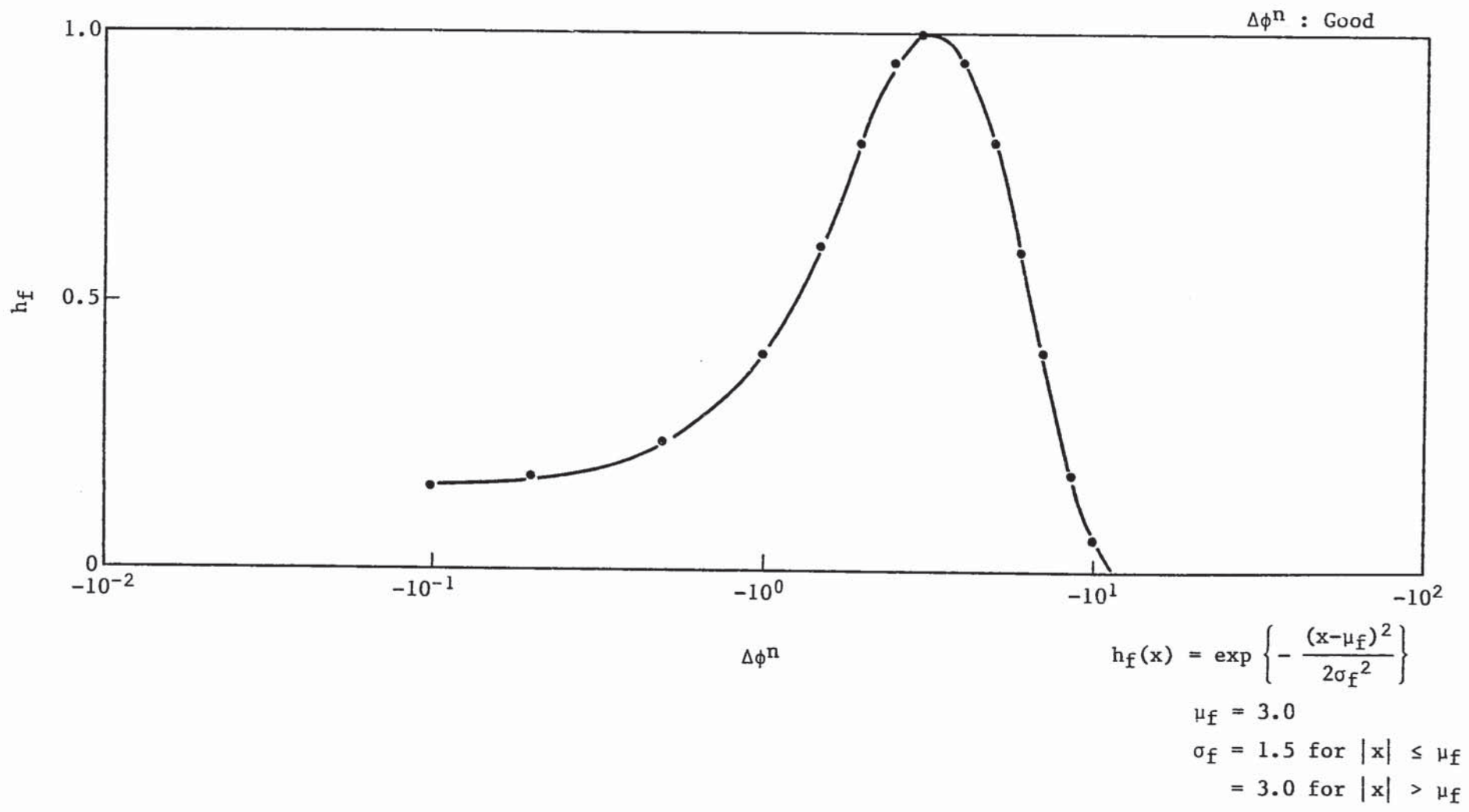


Fig. 3.12 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k&ε (2)
 (Δφⁿ is Good)

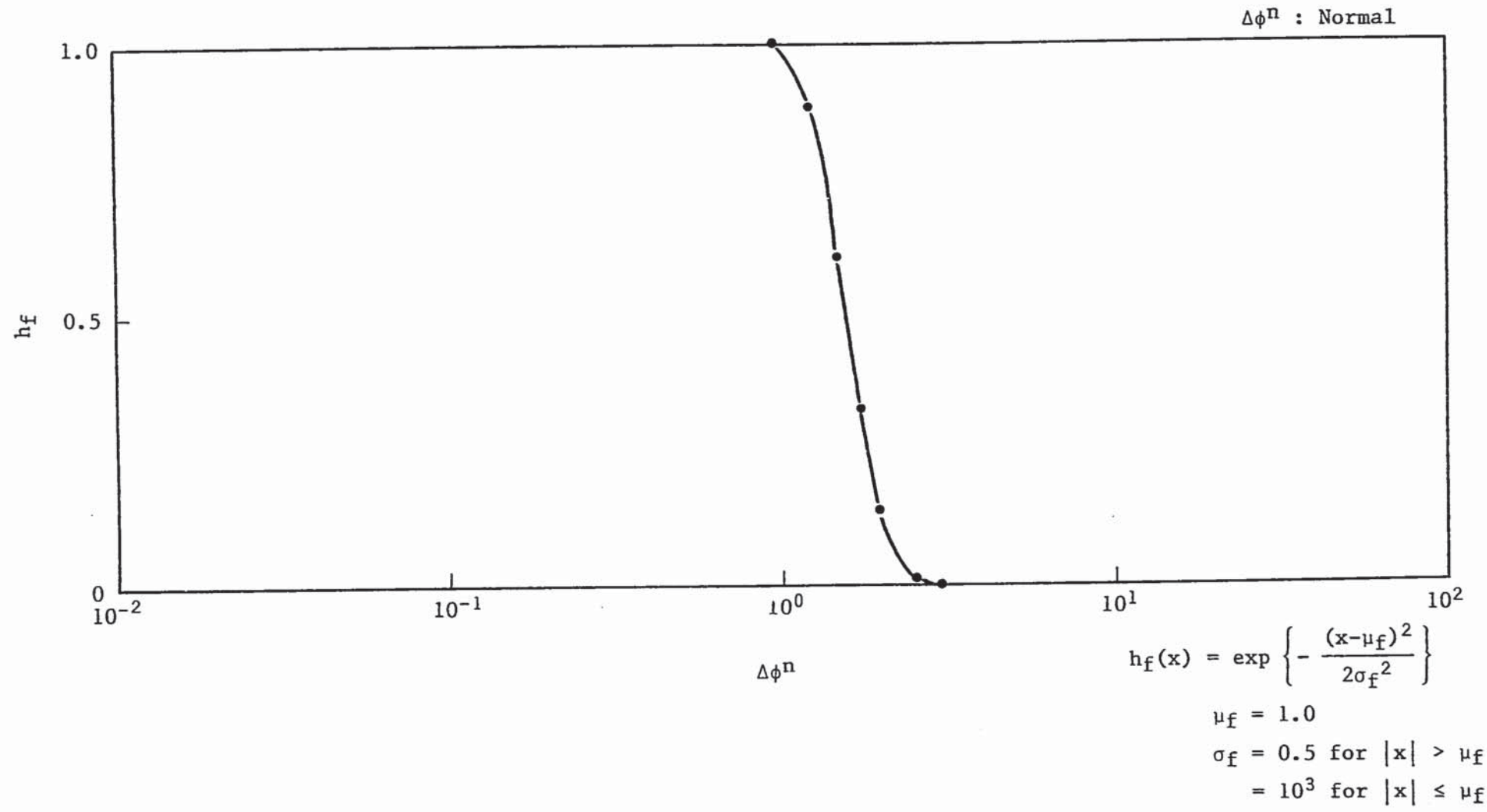


Fig. 3.13 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k&ε (3)
 ($\Delta\phi^n$ is Normal)

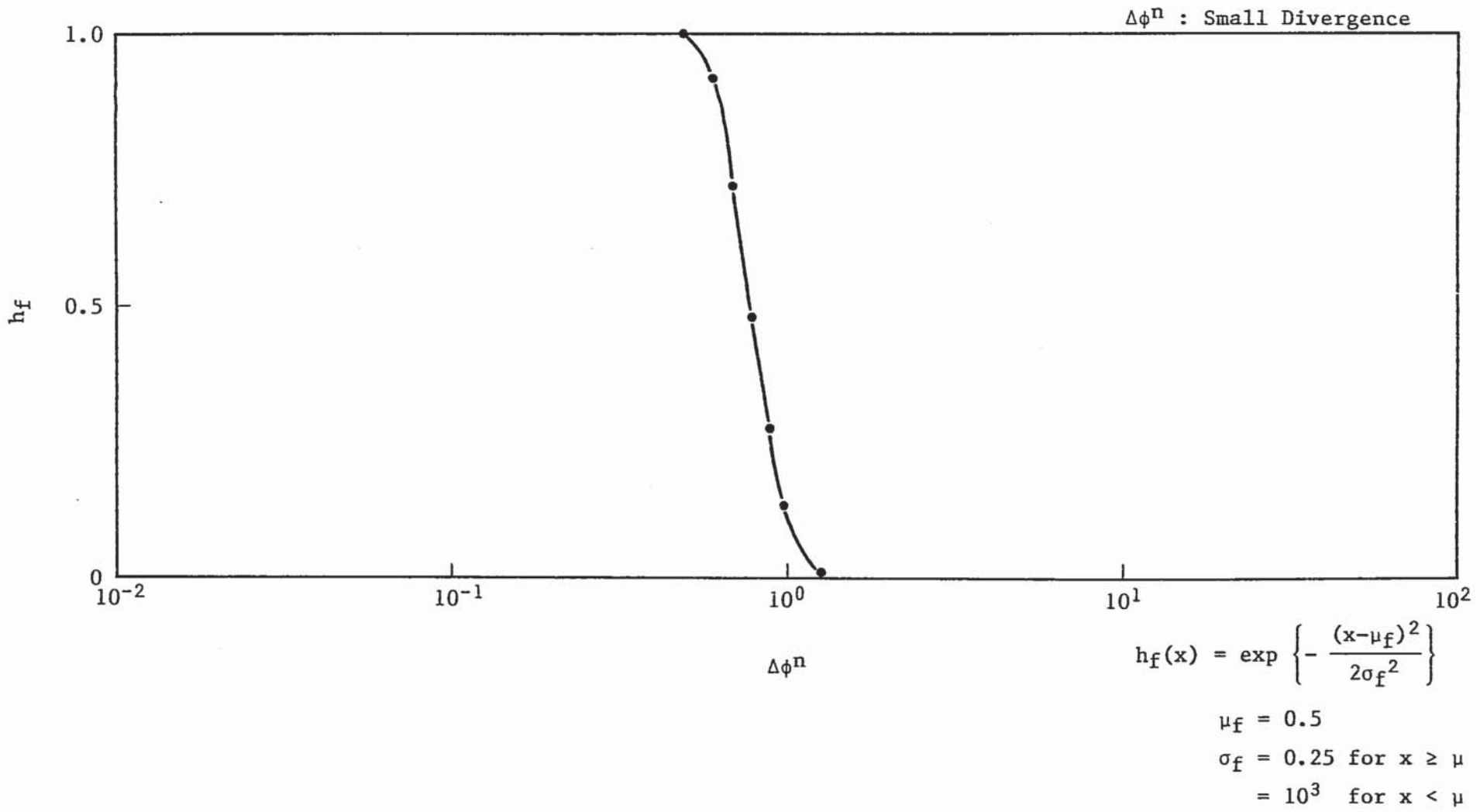


Fig. 3.14 Member Ship Function for Convergency of U.V.W.h,k&ε (4)
 ($\Delta\phi^n$ is Small Divergence)

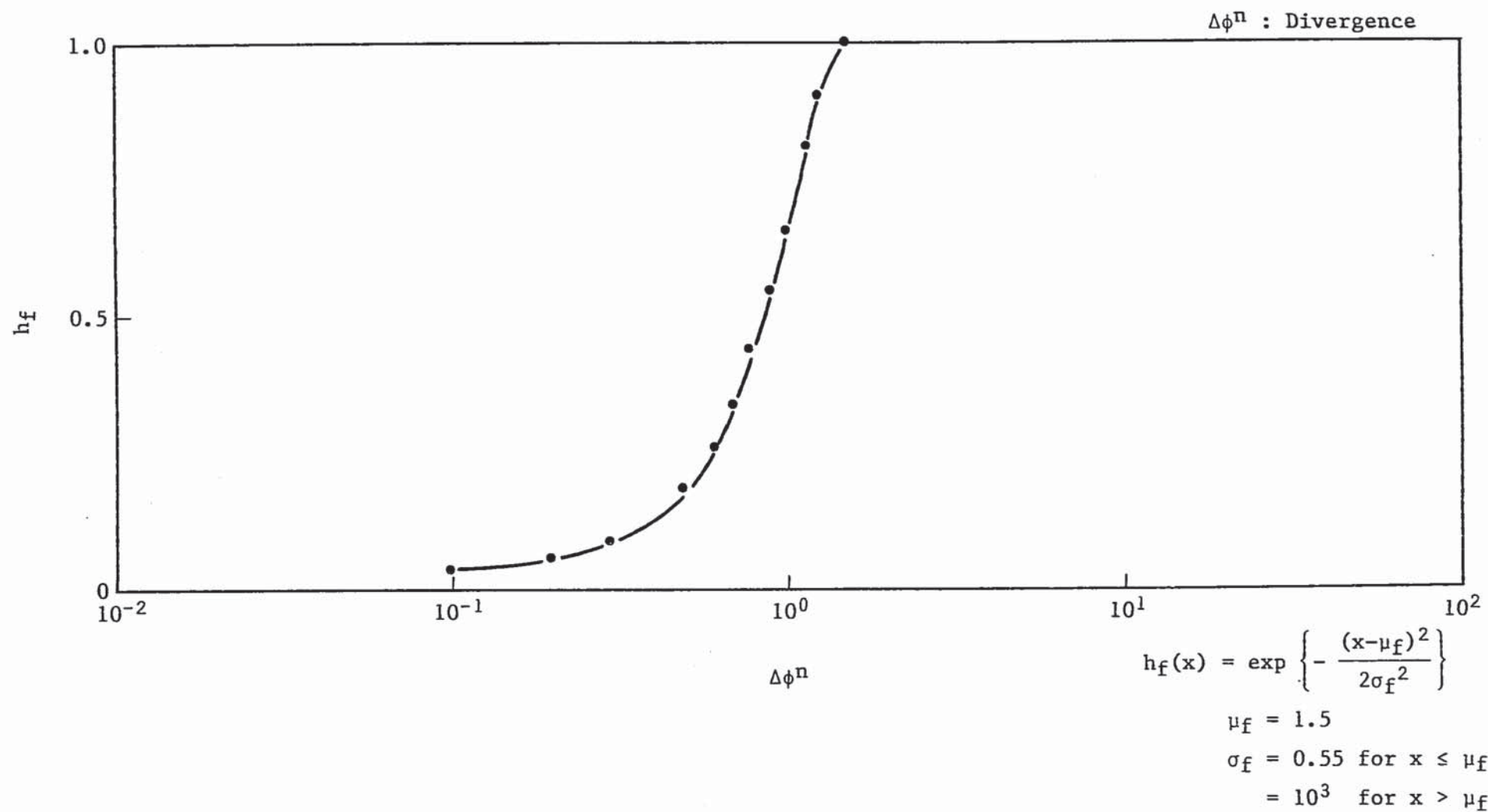


Fig. 3.15 Member Ship Function for Convergency of U,V,W,h,k&ε (5)
($\Delta\phi^n$ is Divergence)

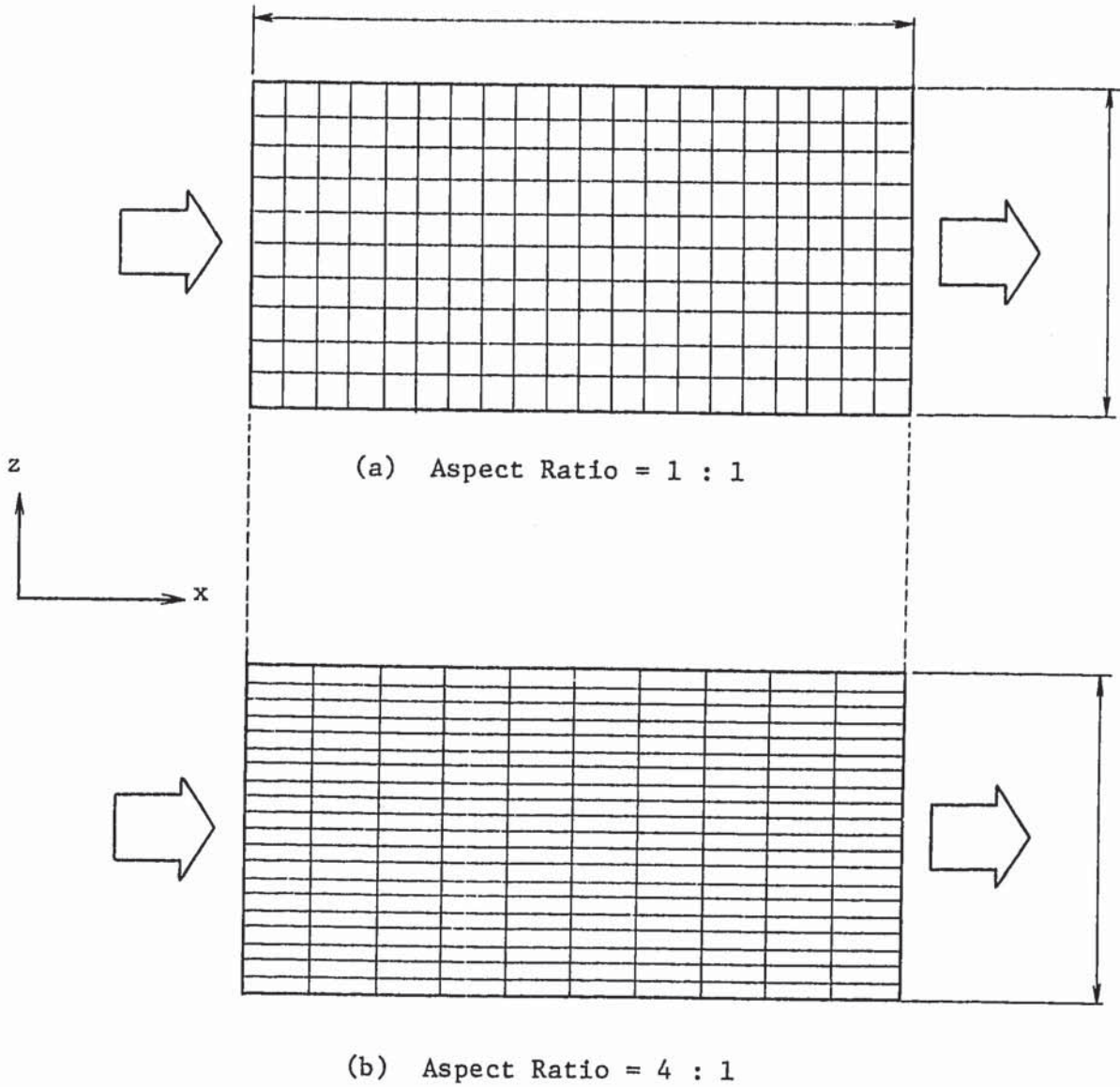


Fig. 3.16 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Steady-State Problem with MICE Scheme


```

*****
***                                     **
***      THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER      **
***                                     **
***      WITH M-ICE SCHEME                                       **
***                                     **
***      --- ASPECT RATIO = 1 : 1 ---                             **
***                                     **
*****
***                                     **
***                                     **
***      DATE : JUN. 29, '87                                       **
***                                     **
*****
&GEOM  ITURKE=20, IFPCG= 5,
        IGEOM= 0, NL1= 500, MM1= 200, ISYMCH=2, IFITEN=2,
        IFRES=1, IMAX=20, JMAX=1, KMAX=10, NSURF= 6,
        DX=20*0.050 ,DY=0.100000, DZ=10*0.050,
        XNORML= 1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , -1. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. ,
&END
REG -1.      1  1  1  1  1  10  1
REG -1.      20 20  1  1  1  10  2
REG -1.      1  20  1  1  1  1  3
REG -1.      1  20  1  1  10  10  4
REG -1.      1  20  1  1  1  10  5
REG -1.      1  20  1  1  1  10  6
END
&DATA  IFENER= 0, NIHCON= -1, NTHAX= 20, DT=1.0
        IDTIME=1, RDTIME=0.8,
        IFMNO=2,
        IFMEN=0,
        IFMTB=1,
        IDISP=1,
        CINK1=3.300E-03,
        CINE1=1.619E-02,
        CINK2=3.300E-03,
        CINE2=1.619E-02,
        KEITER=1, HYDIN=1.0E-01,
        IT=1, TREST=15.,
        KFLOW= 1, -2, 1, -3, -3,
        KTEMP= 1, 400, 400, 400, 400, 400,
        TEMPO= 20., GRAVZ= -9.807 ,
        TEMP(1)=20., VELOC(1)=0.50000,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,14201,20201,21201,
&END
END
UL  0.50000      1  20  1  1  1  10
END

```

(a)

```

*****
***                                     **
***      THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER      **
***                                     **
***      WITH M-ICE SCHEME                                       **
***                                     **
***      --- ASPECT RATIO = 4 : 1 ---                             **
***                                     **
*****
***                                     **
***                                     **
***      DATE : JUN. 24, '87                                       **
***                                     **
*****
&GEOM  ITURKE=20, IFPCG= 5,
        IGEOM= 0, NL1= 500, MM1= 200, ISYMCH=2, IFITEN=2,
        IFRES=1, IMAX=10, JMAX=1, KMAX=20, NSURF= 6,
        DX=10*0.100 ,DY=0.100000, DZ=20*0.025,
        XNORML= 1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , -1. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. ,
&END
REG -1.      1  1  1  1  1  20  1
REG -1.      10 10  1  1  1  1  20  2
REG -1.      1  10  1  1  1  1  3
REG -1.      1  10  1  1  20  20  4
REG -1.      1  10  1  1  1  20  5
REG -1.      1  10  1  1  1  20  6
END
&DATA  IFENER= 0, NIHCON= -1, NTHAX=9999, DT=1.0
        IDTIME= 1, RDTIME=0.6,
        IFMNO=2,
        IFMEN=0,
        IFMTB=1,
        IDISP=1,
        CINK1=3.300E-03,
        CINE1=1.619E-02,
        CINK2=3.300E-03,
        CINE2=1.619E-02,
        KEITER=1, HYDIN=1.0E-01,
        IT=1, TREST=15.,
        KFLOW= 1, -2, 1, 1, -3, -3,
        KTEMP= 1, 400, 400, 400, 400, 400,
        TEMPO= 20., GRAVZ= -9.807 ,
        TEMP(1)=20., VELOC(1)=0.50000,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,14201,20201,21201,
&END
END
UL  0.50000      1  10  1  1  1  20
END

```

(b)

Fig. 3.17 Input Data for Steady-State Problem with MICE Scheme

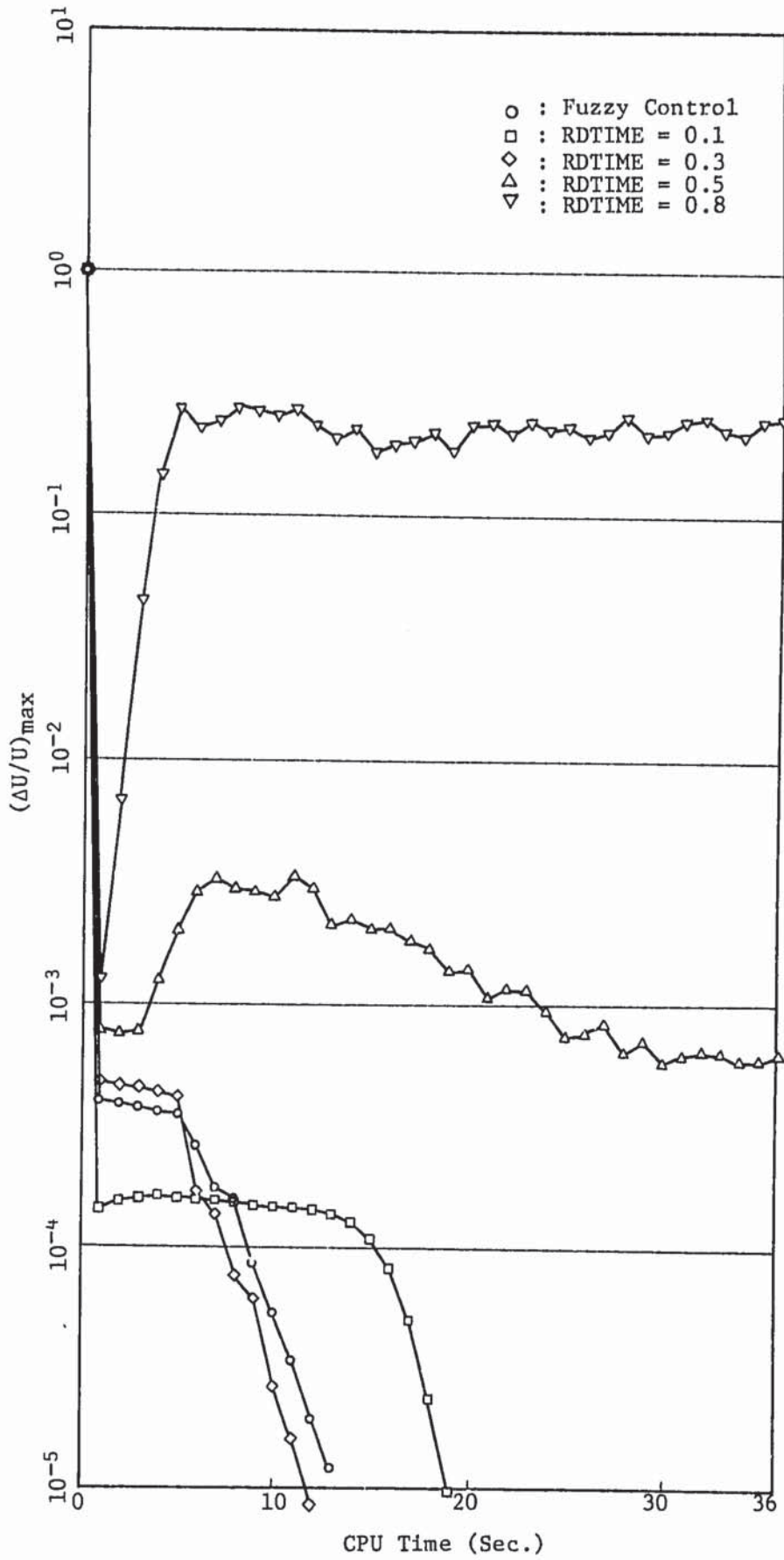


Fig. 3.18 Comparison of Concergency of $(\Delta U/U)$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme

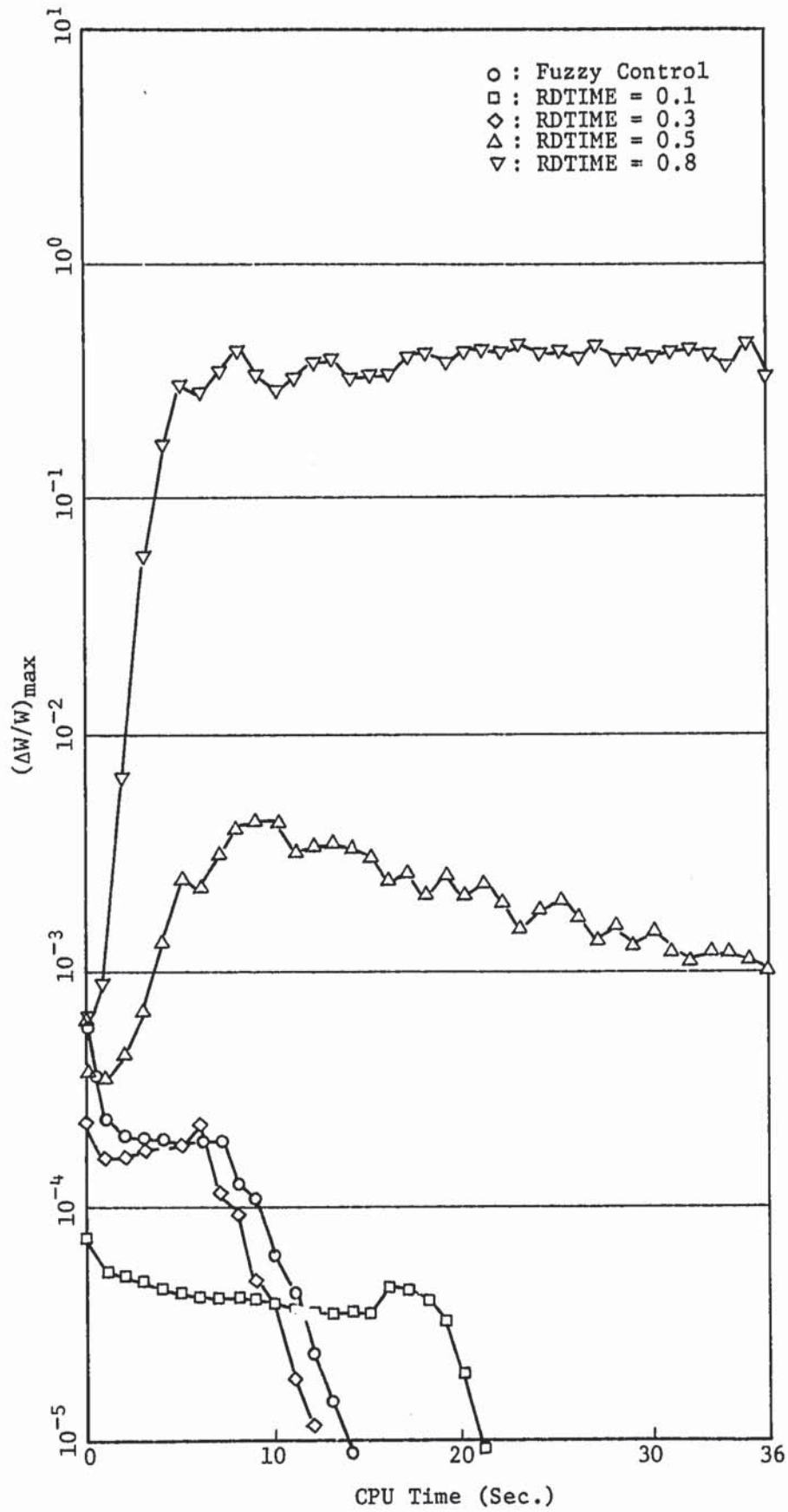


Fig. 3.19 Comparison of Concergency of $(\Delta W/W)_{max}$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme

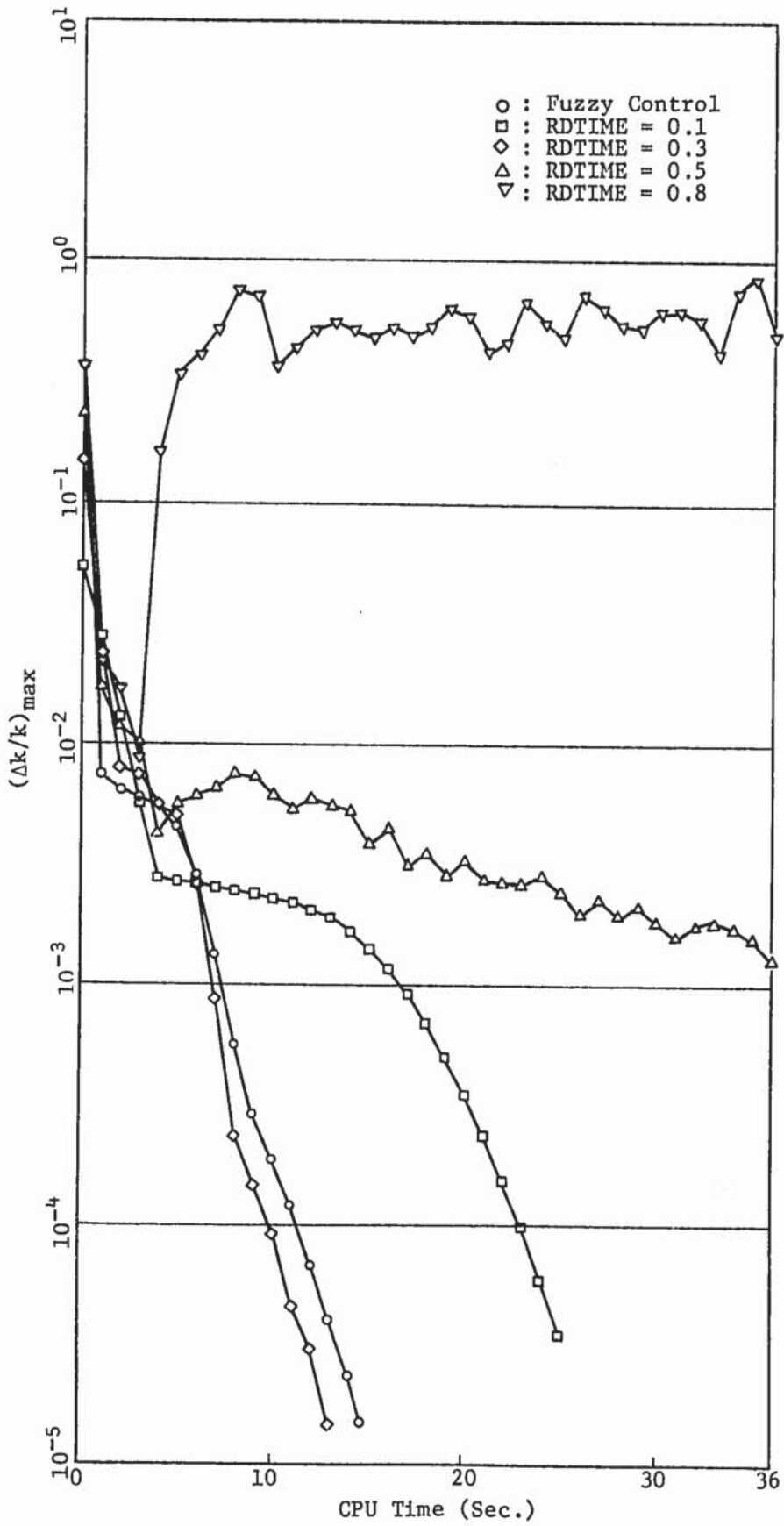


Fig. 3.20 Comparison of Convergence of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme

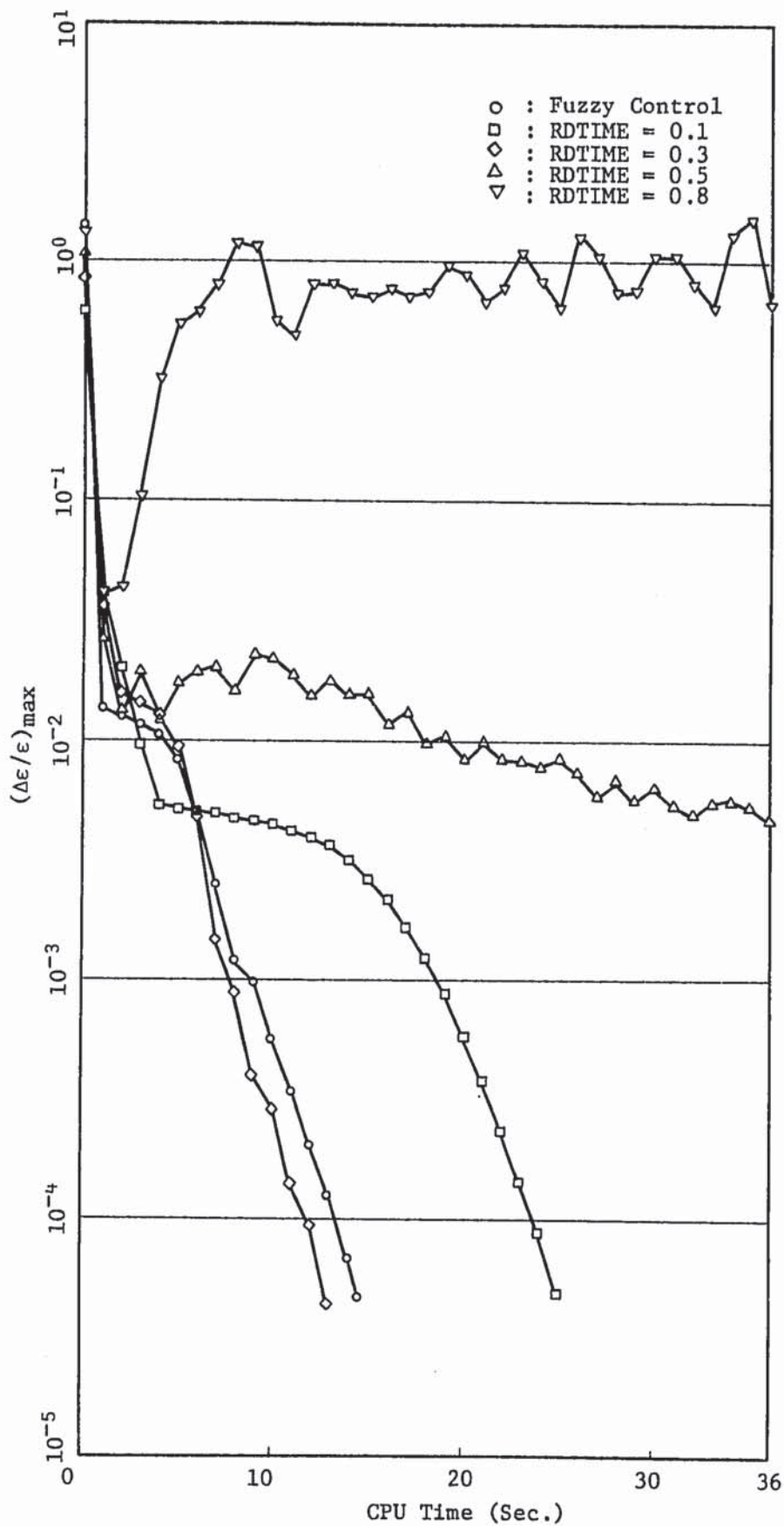


Fig. 3.21 Comparison of Convergence of $(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max}$ under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme

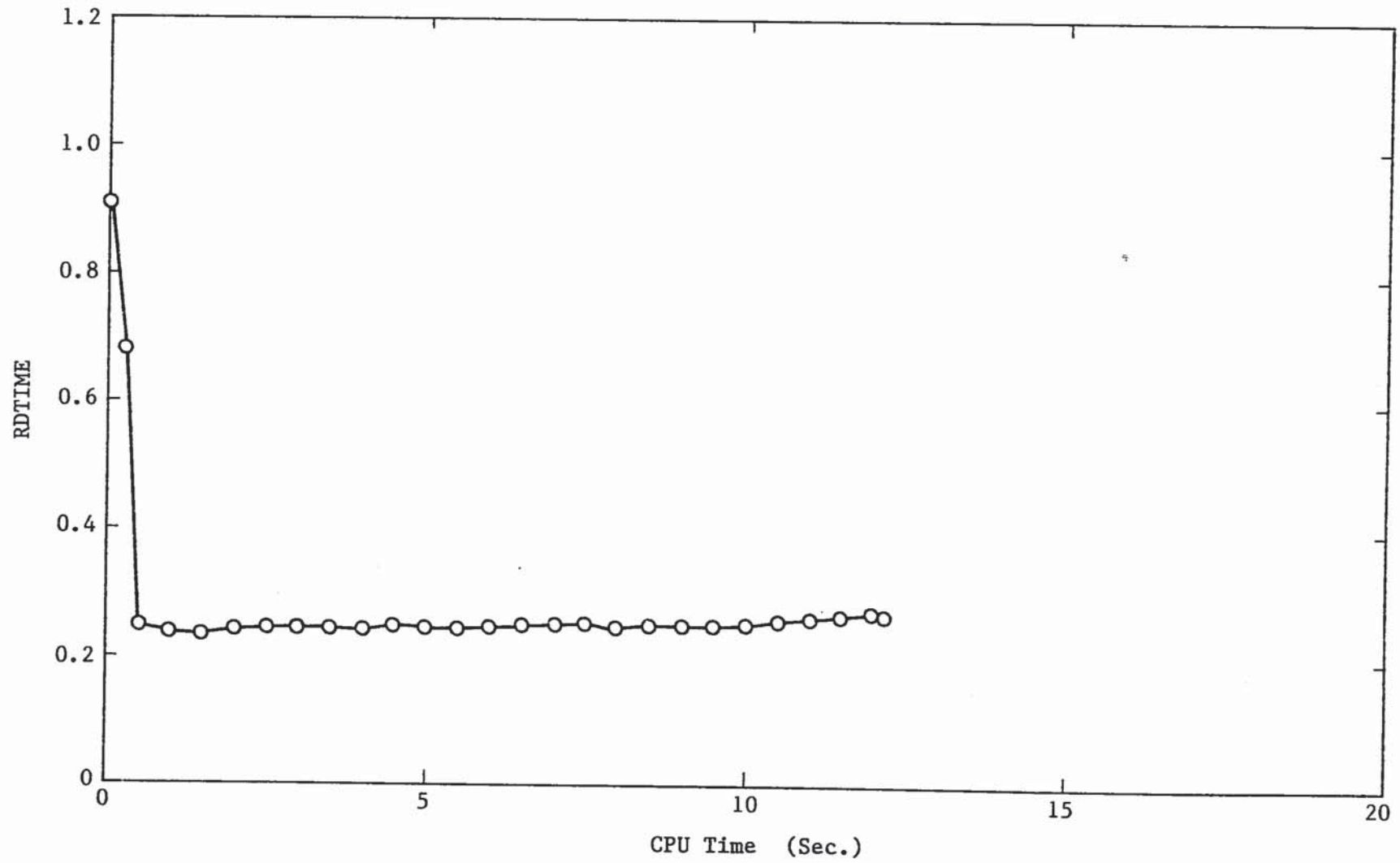


Fig. 3.22 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Steady-State Problem (a) with MICE Scheme

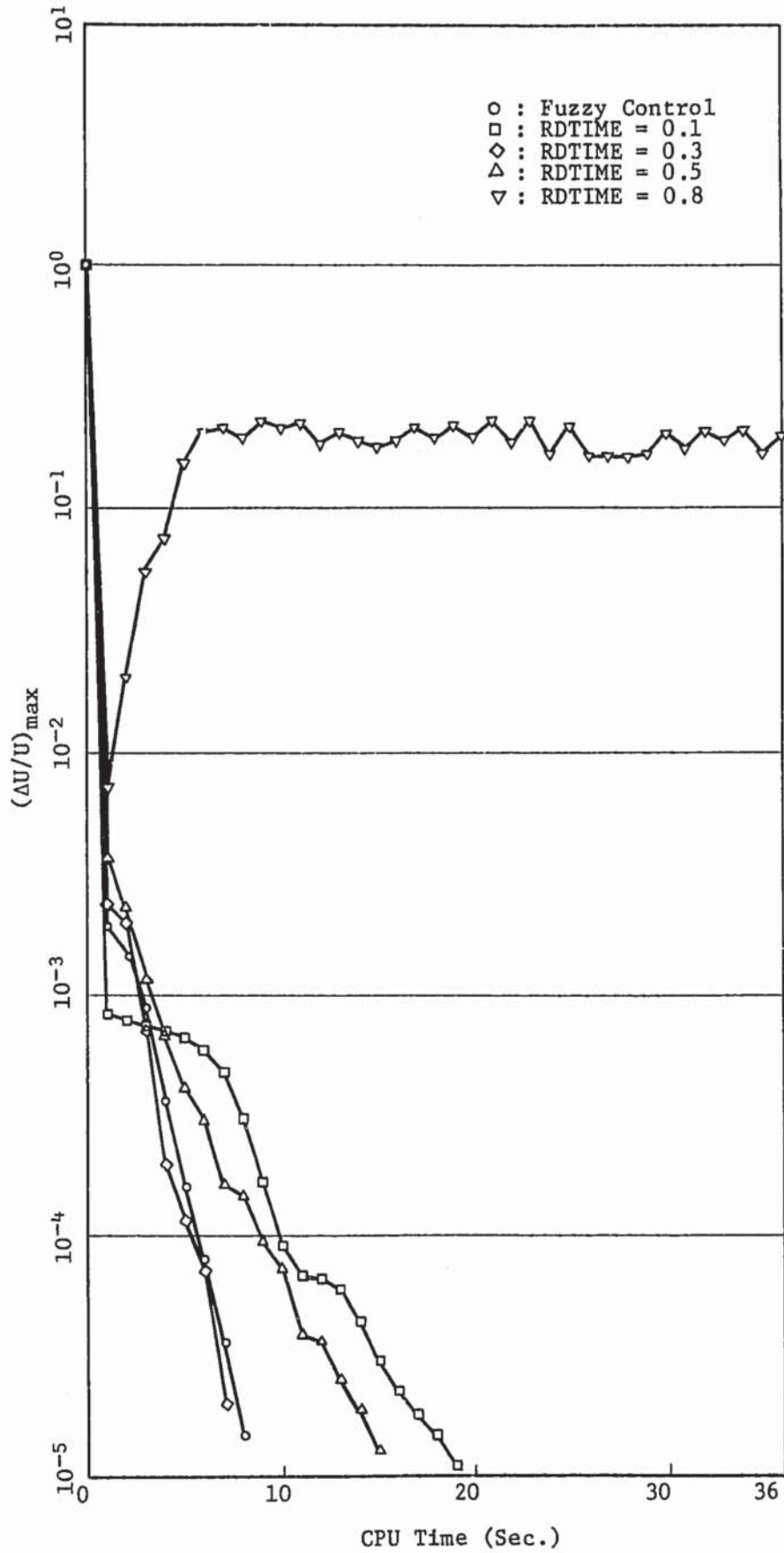


Fig. 3.23 Comparison of Concergency of $(\Delta U/U)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme

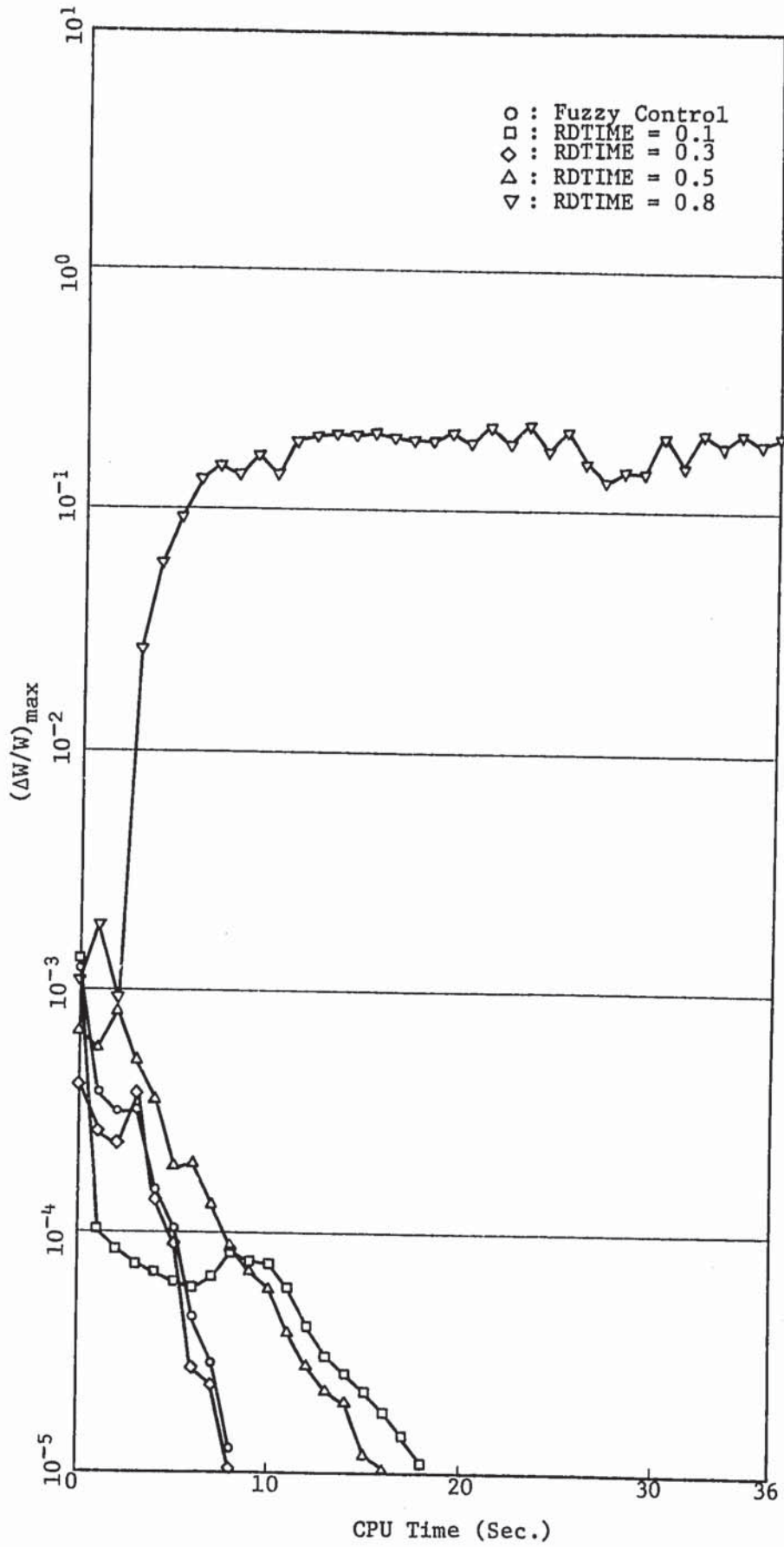


Fig. 3.24 Comparison of Concurrency of $(\Delta W/W)_{\max}$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme

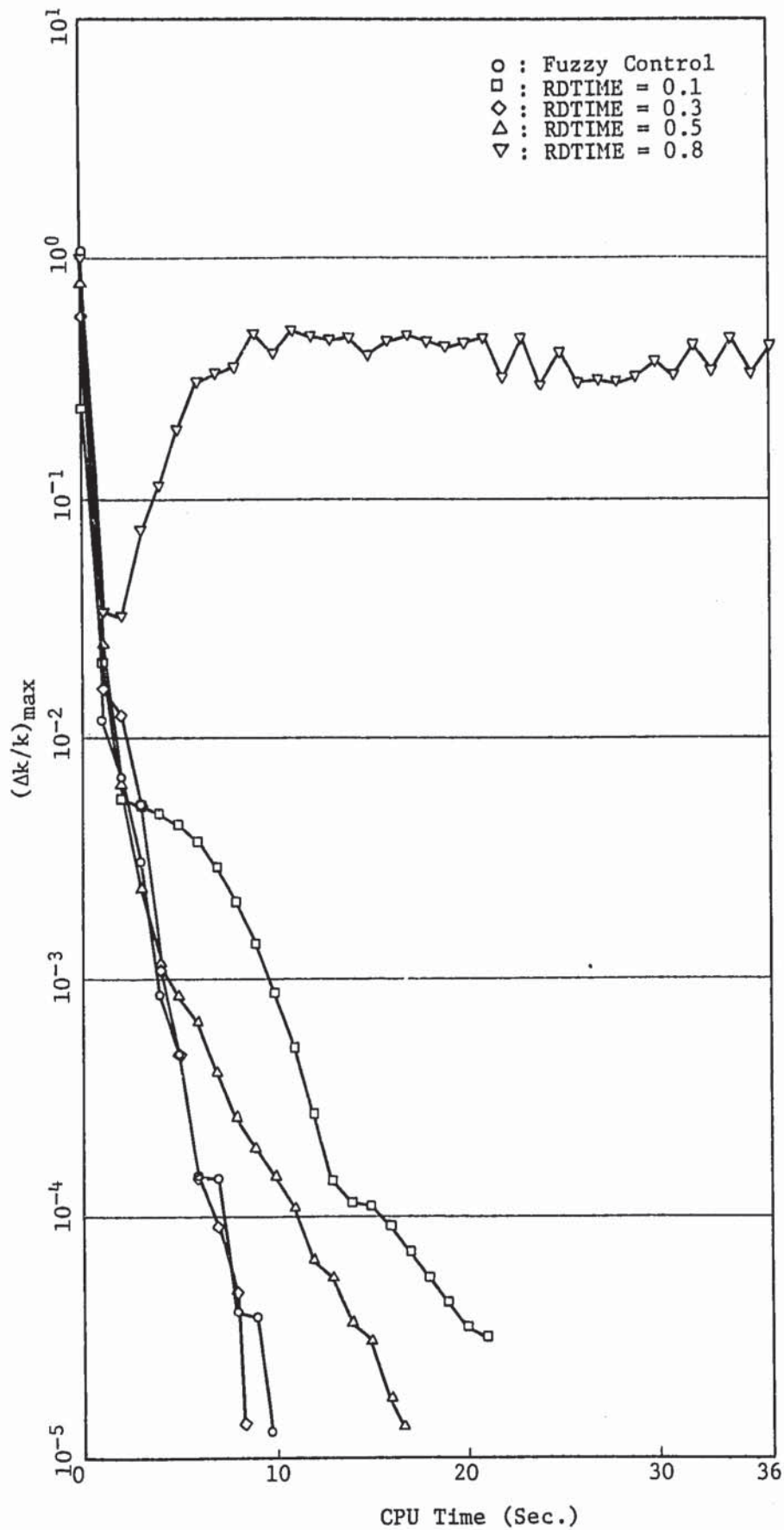


Fig. 3.25 Comparison of Convergence of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme

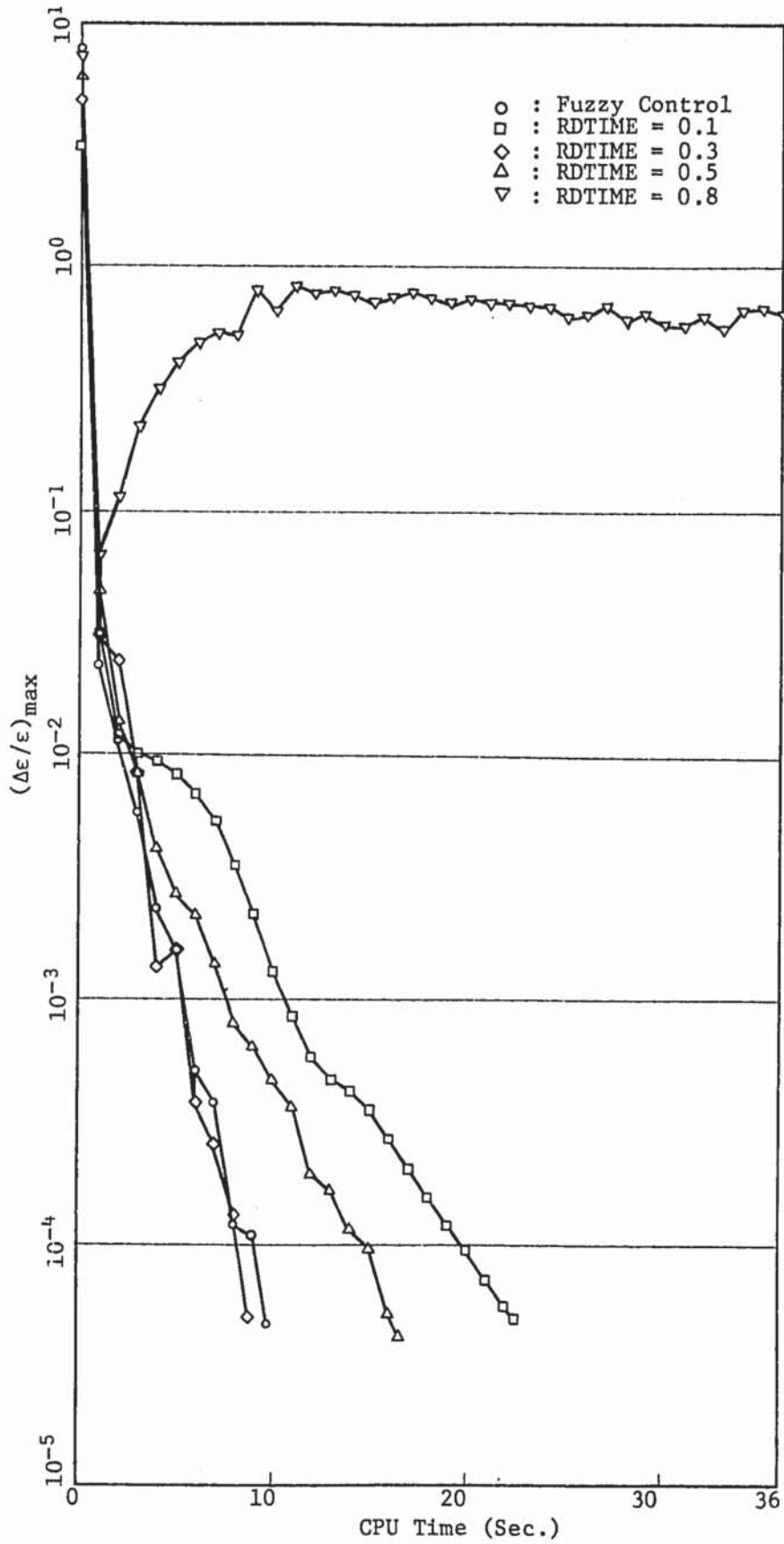


Fig. 3.26 Comparison of Concergency of $(\Delta\epsilon/\epsilon)$ under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme

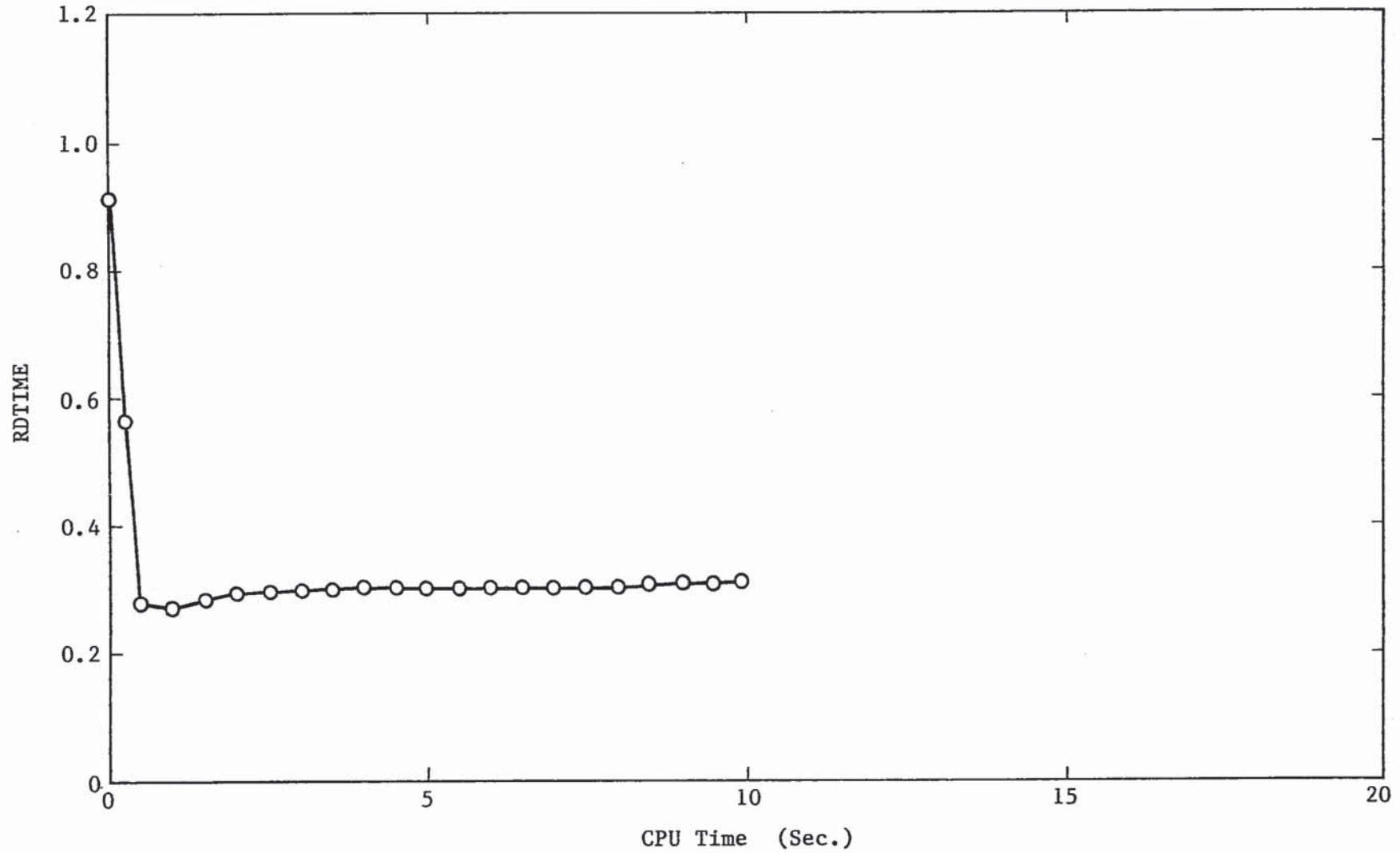


Fig. 3.27 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Steady-State Problem (b) with MICE Scheme

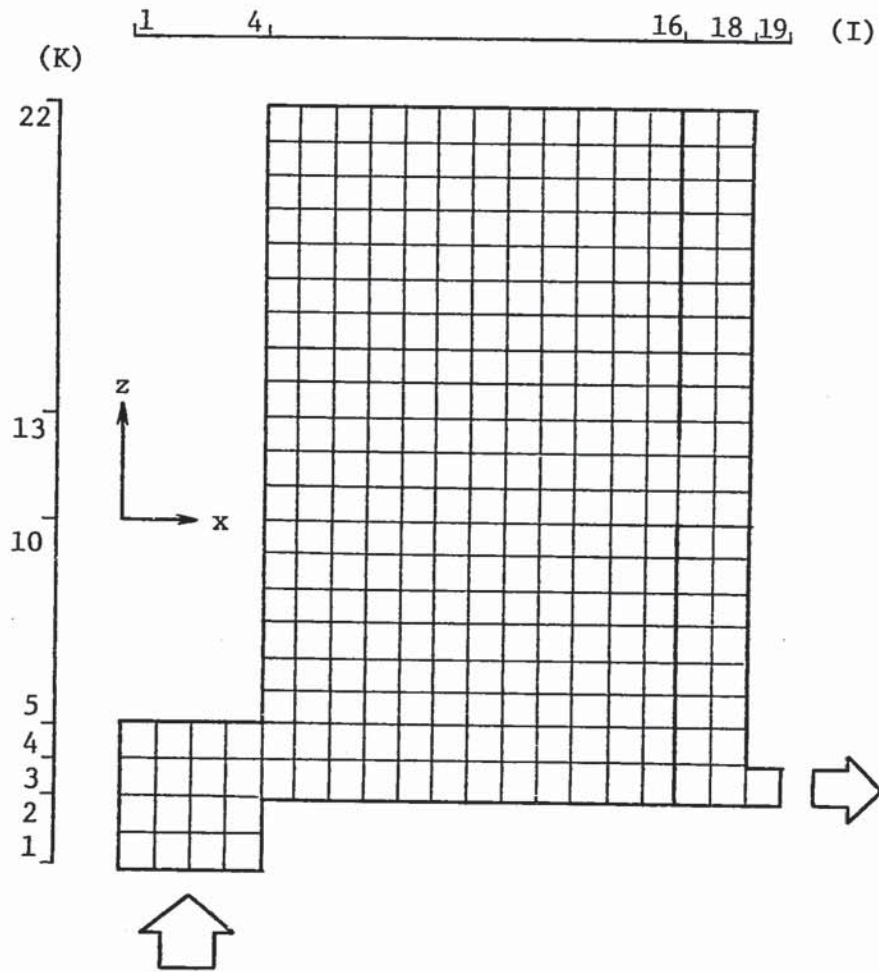


Fig. 3.28 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Transient Problem with MICE Scheme

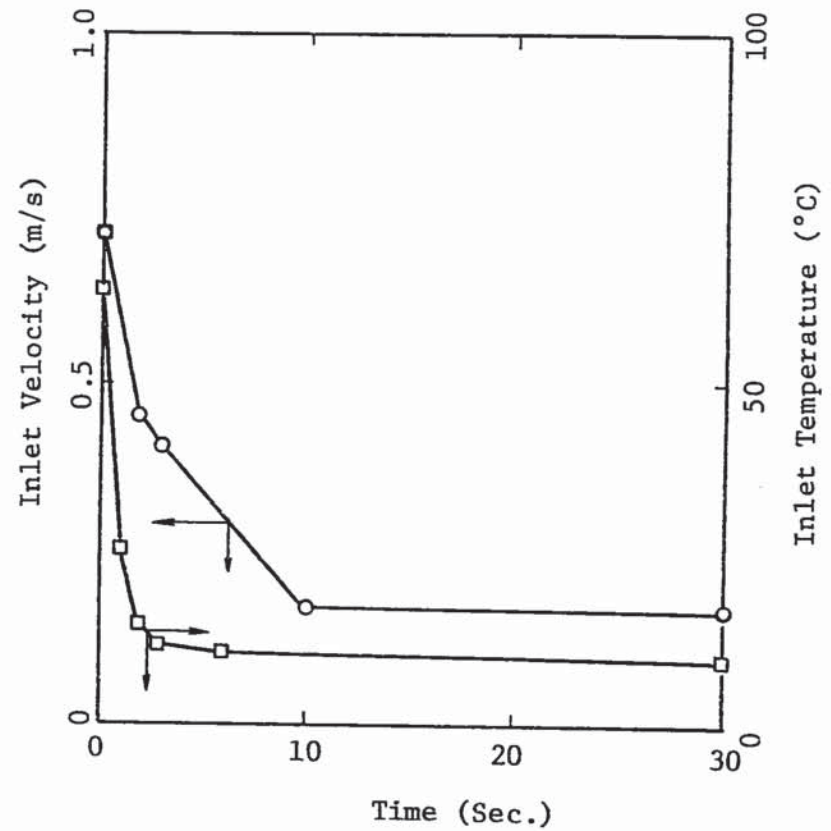


Fig. 3.29 Velocity and Temperature Transient at Inlet of the Test Section


```

*****
* TEST OF AQUA WITH FUZZY CONTROLLER *
*****
&GEOM IGEOH=-1, NL1=150, NM1=297, ISYNCH=3, IFITEN=3, IFREB=594,
IFRES=1, IMAX=19, JMAX=1, KMAX=22, NSURF=10,
DX=19*0.025 ,DY=6.283185, DZ=22*0.025,
XNORML= 1. ,0. , -1. , -1. , 0. , 0. , -1. , 1. , 1. , 0. ,
YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
ZNORML= 0. , -1. , 0. , 0. , 1. , 1. , 0. , 0. , 0. , -1. ,
ITURKE=20, IFPCG=5,

&END
REG -1. 5 5 1 1 5 22 1
REG -1. 1 4 1 1 4 4 2
REG -1. 19 19 1 1 3 3 2
REG -1. 4 4 1 1 1 2 3
REG -1. 18 18 1 1 4 22 3
REG -1. 19 19 1 1 3 3 4
REG -1. 5 19 1 1 3 3 5
REG -1. 1 2 1 1 1 1 6
REG 81.93 -4 3 3 1 1 1 1 6
REG 68.01 -4 4 4 1 1 1 1 6
REG -1. 16 16 1 1 3 10 7
REG -1. 16 16 1 1 13 22 7
REG -1. 17 17 1 1 3 10 8
REG -1. 17 17 1 1 13 22 8
REG -1. 1 1 1 1 1 4 9
REG -1. 5 18 1 1 22 22 10
END
&DATA IFENER=0 ,NTHCON=-1,NTMAX= 9999,
IDTIME= 0,
DT=1.0,
RDTIME=0.5,
EPSRD=0.0,
IFMNO=2
IFMEN=0
IFMTB=1
IDISP=1
ITMAXP= 500,IT=1,1,TREST=5.,NTSMRY=1,
CINK1=1.E-3,CINE1=700.,CINK2=1.E-6,CINE2=1.E10,KEITER=1,
HYDIN=1.E10,
KFLOW= 1, 1, 1, -5, 1, 1, 1, 1, -3, -3,
KTEMP= 400, 400, 400, 400, 400, 1,400,400,400,400,
TEMPO= 62.,GRAVZ= -9.807 ,TEMP(6)=62.,VELOC(6)=0.7003
NREBHT=3,
NREBM = 16, 240, 40,
NREBX = 2, 2, 1,
IREBIT= 50,
NTPRNT= -9999,
ISTPR =6201,
NTHPR =1201,3201,5201,8201,9201,14201,20201,21201,

&END
REBM 1 1 4 1 1 1 4
REBX 1 4 4 1 1 3 4
REBM 2 5 16 1 1 3 22
REBX 2 16 16 1 1 11 12
REBM 3 17 18 1 1 3 22
REBX 3 18 18 1 1 3 3
END
END
AL 0.8345 3 3 1 1 1 4
ALZ 0.8345 3 3 1 1 1 3
ALX 0.8621 3 3 1 1 1 4
AL 0.4948 4 4 1 1 1 2
ALZ 0.4948 4 4 1 1 1 2
AL 0.9291 4 4 1 1 3 4
ALZ 0.9291 4 4 1 1 3 3
ALX 0.7931 2 2 1 1 1 4
UL 0.01 1 19 1 1 1 22
WL 0.01 1 19 1 1 1 22
END

```

Fig. 3.30 Input Data for Steady-State Run with MICE Scheme

```

*****
*      TEST OF AQUA WITH FUZZY CONTRULLER      *
*****
&GEOM  IFRES=3,
&END
&DATA  IFENER=1,NTMAX=3000,DT(1)=.1, TSTART=0.,
        ISTATE=2,ITKBUG= 0,ITIBUG= 0,
        C3E=0.70,
        IT=10,KFLOW(6)=101,KTEMP(6)=102,
        TVAL=0.,2.,2.,3.,3.,10.,10.,300.,
              0.,1.,1.,2.,2.,3.,3.,6.,6.,30.,30.,300.,
        FVAL=1.,.639,.639,.569,.569,.24,.24,.24,
              1.,.40645,.40645,.2258,.2258,.1774,.1774,
              .16129,.16129,.15484,.15484,.15484,
        NEND=8,12,
        NTPRNT=-9999,
        NTHPR =01201, 03201, 05201, 14201, 21201, 20201,
        NTPLOT=-9999,
&END
END
END

```

Fig. 3.31 Input Data for Transient Run with MICE Scheme

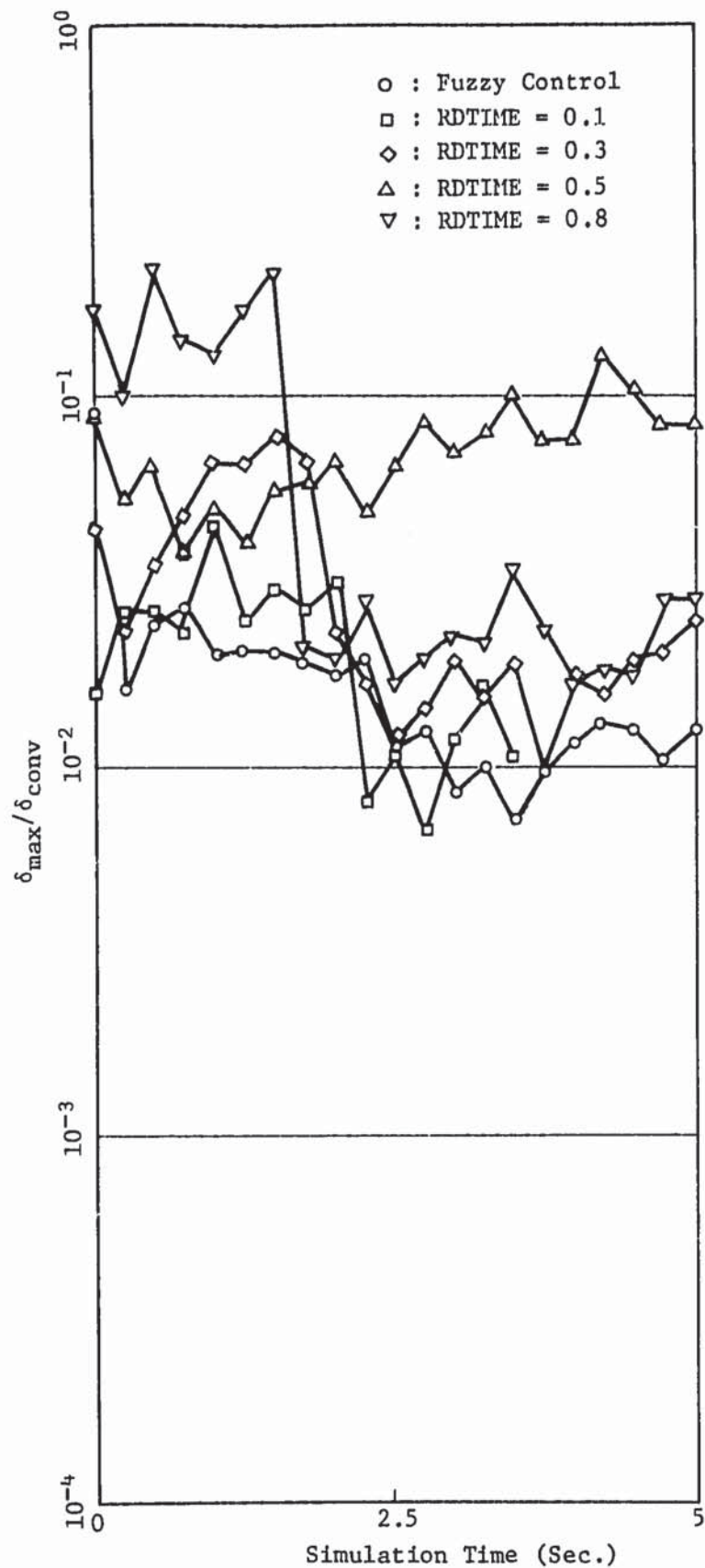


Fig. 3.32 Transition of Convergency of Mass Balance under Transient Problem with MICE Scheme

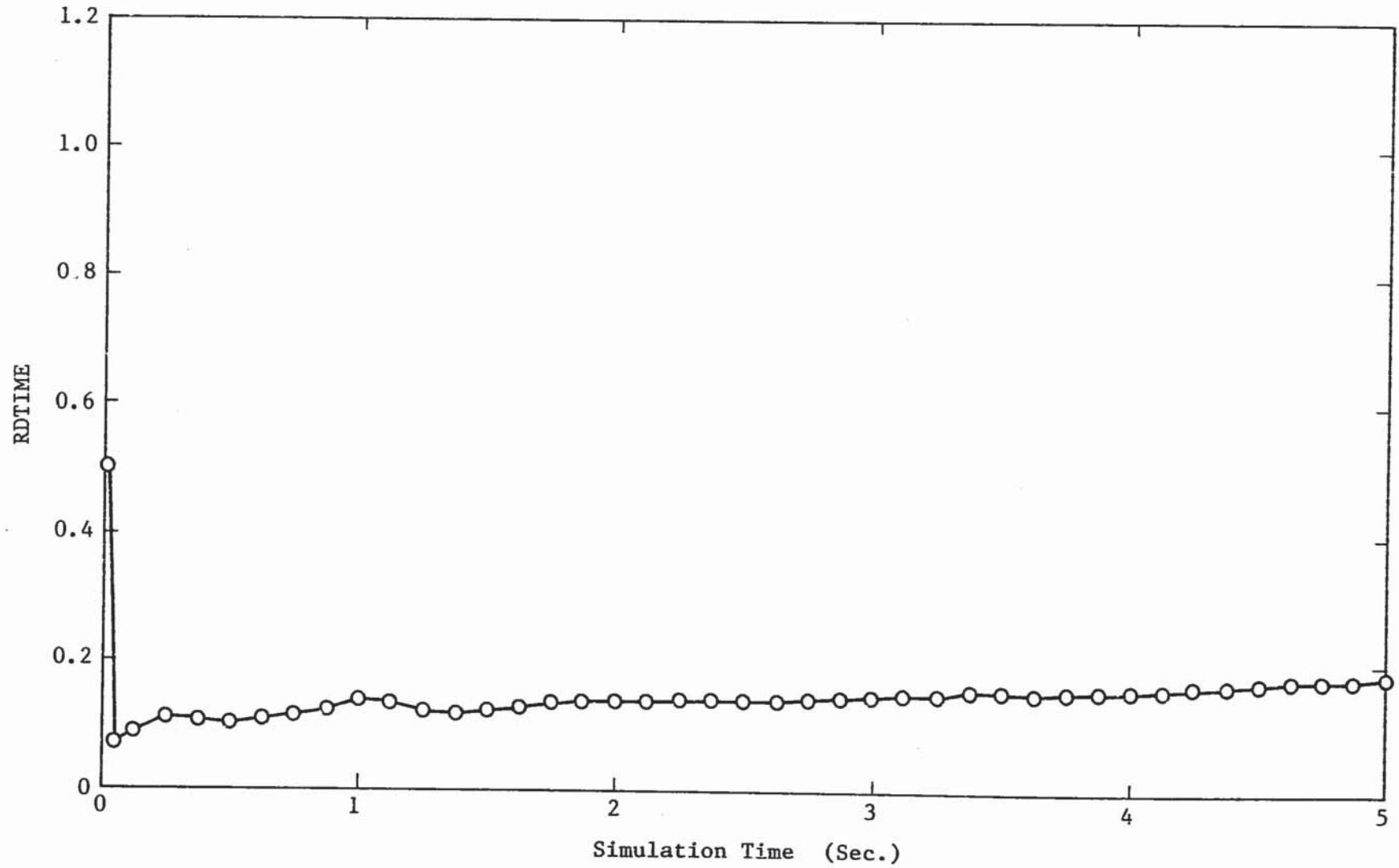


Fig. 3.33 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Transient Problem with MICE Scheme

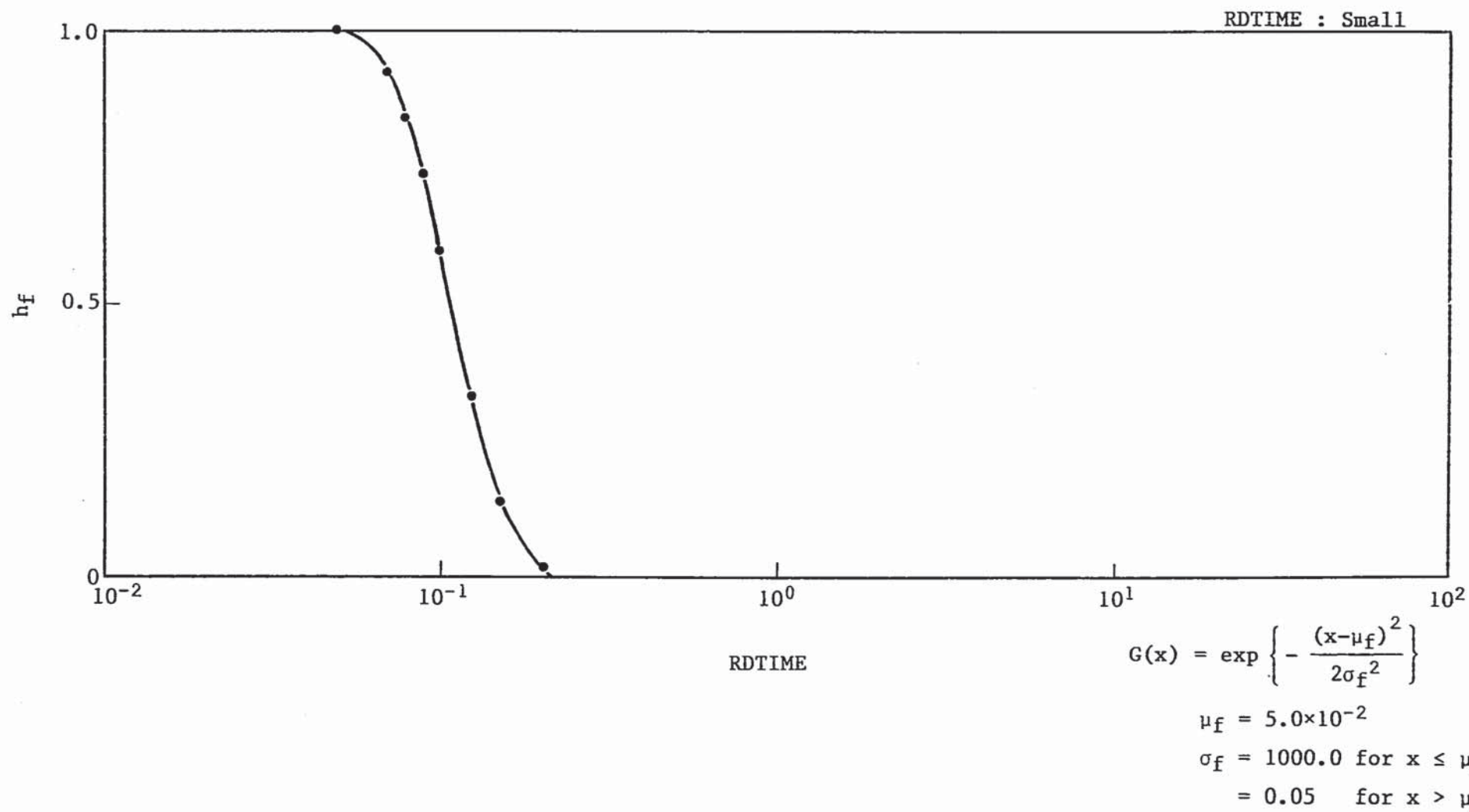
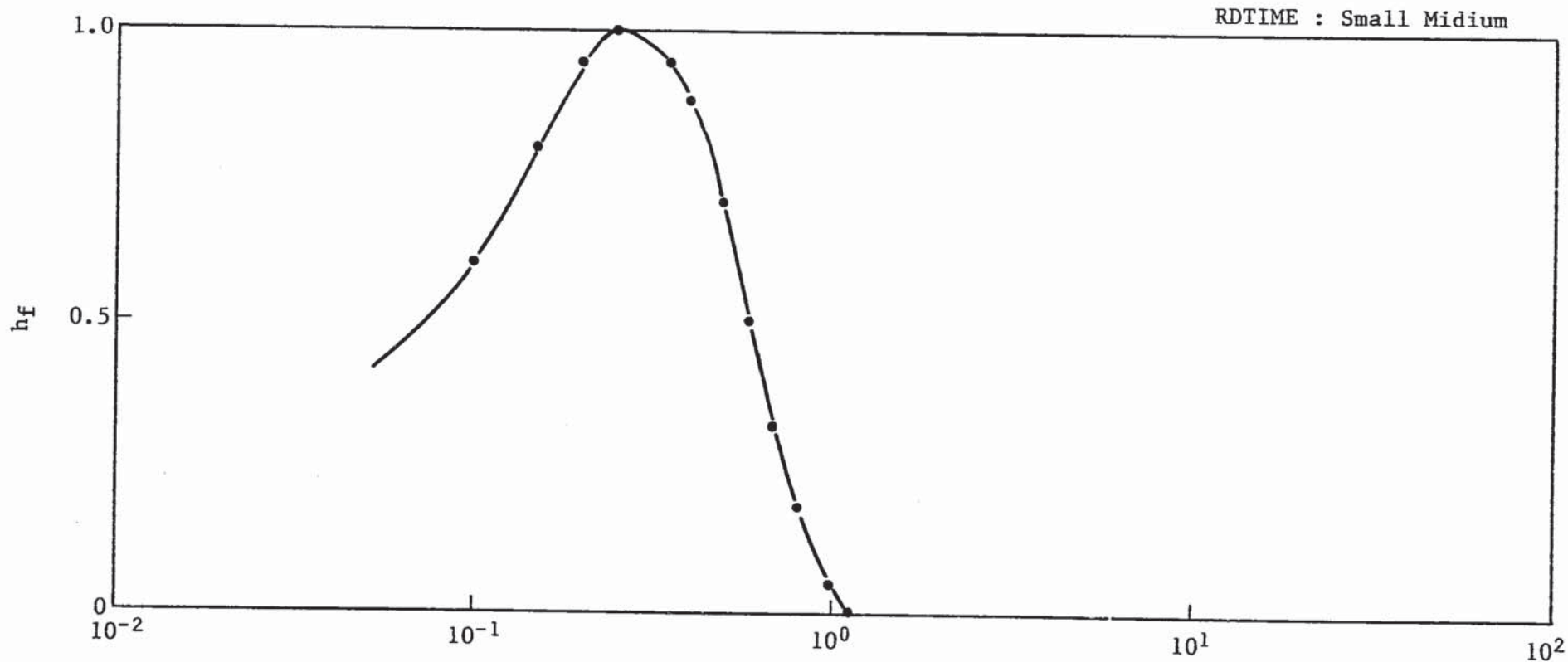


Fig. 3.34 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (1) (RDTIME is Small)



RDTIME : Small Midium

RDTIME

$$G(x) = \exp \left\{ - \frac{(x-\mu_f)^2}{2\sigma_f^2} \right\}$$

$$\mu_f = 2.5 \times 10^{-1}$$

$$\sigma_f = 0.15 \text{ for } x \leq \mu_f$$

$$= 0.30 \text{ for } x > \mu_f$$

Fig. 3.35 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (2) (RDTIME is Small Midium)

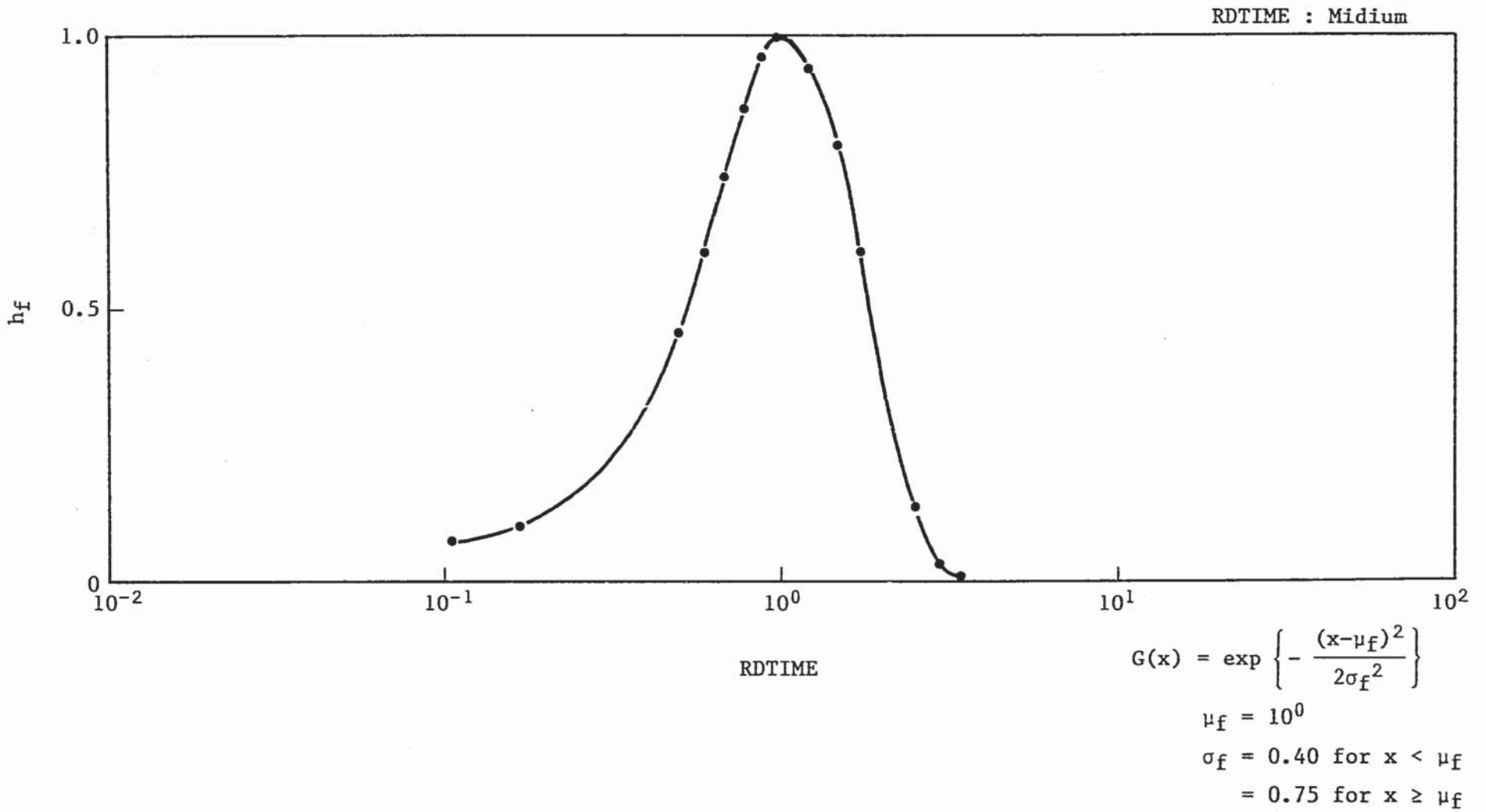


Fig. 3.36 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (3) (RDTIME is Midium)

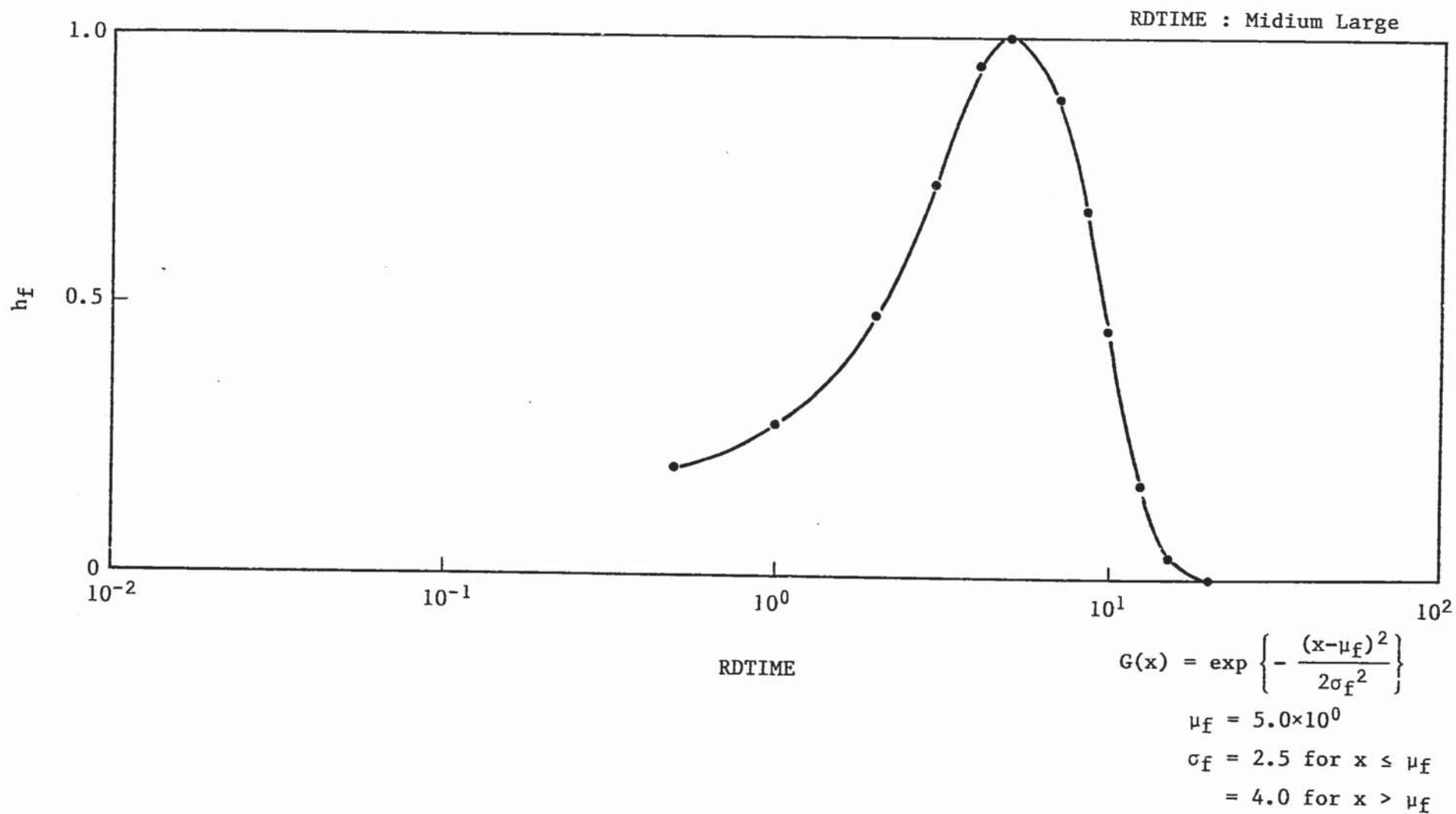


Fig. 3.37 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (4) (RDTIME is Midium Large)

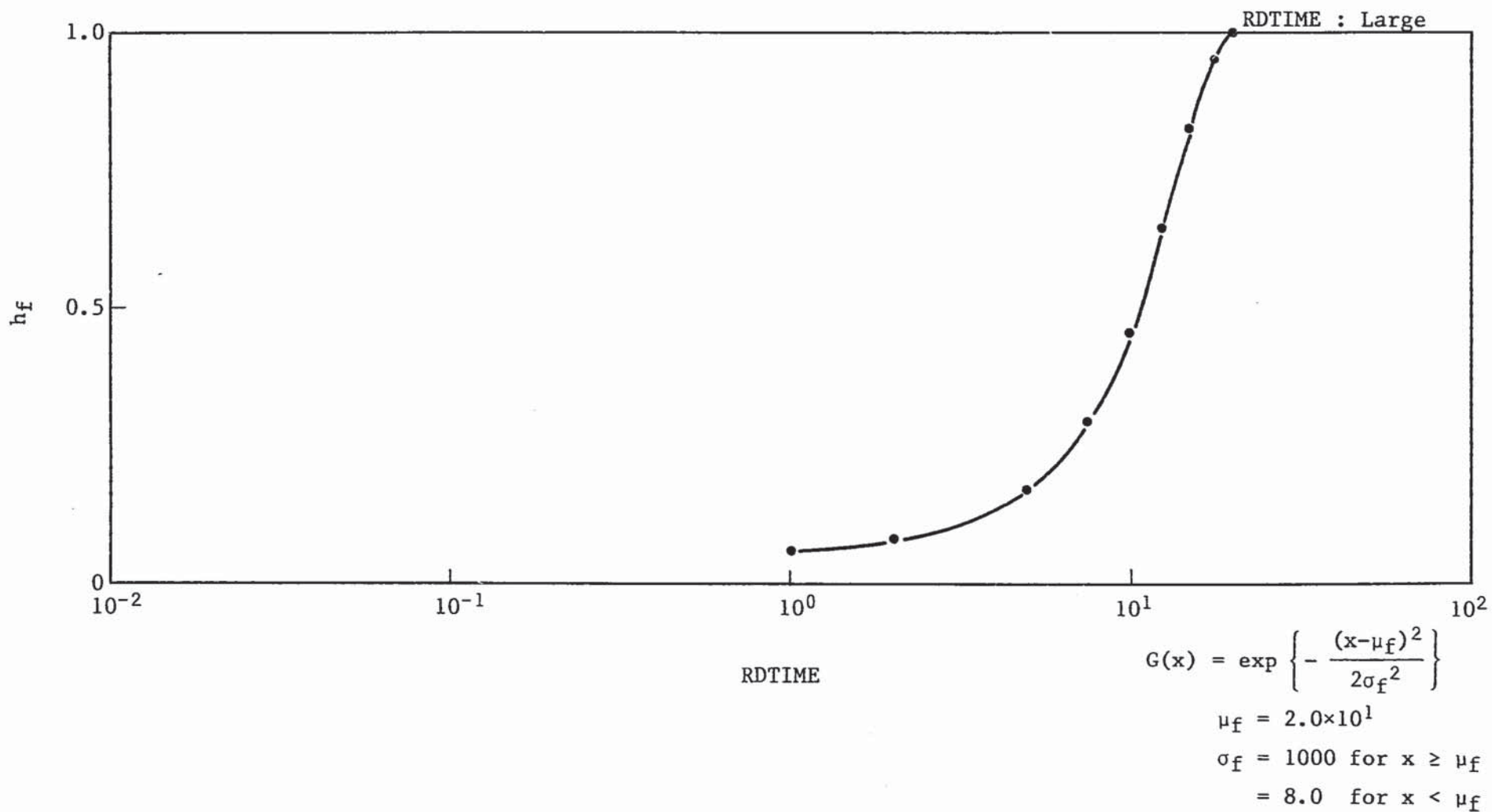


Fig. 3.38 Member Ship Function for RDTIME Setting under Steady-State Run with SIMPLEST Scheme (5) (RDTIME is Large)

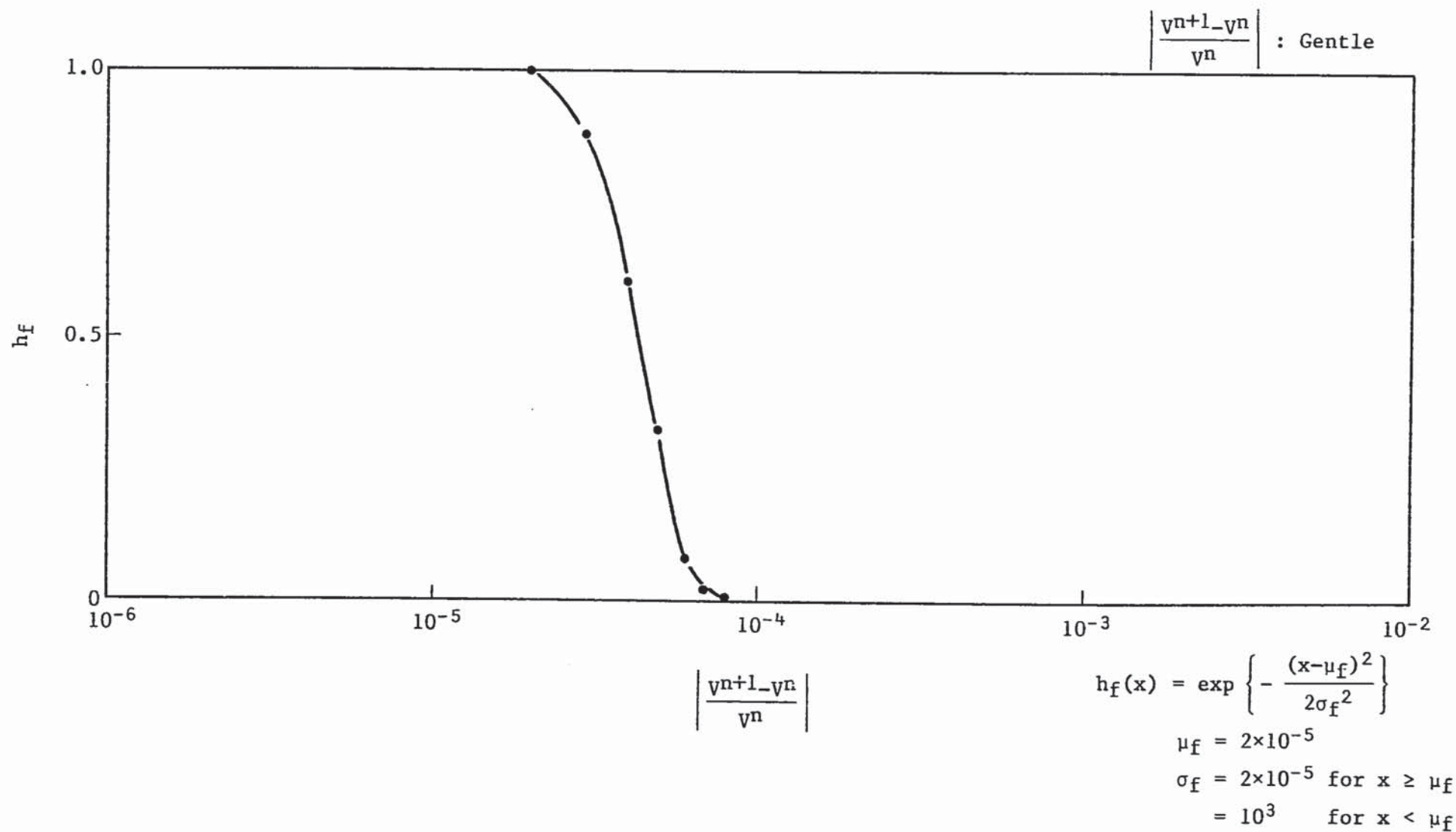


Fig. 3.39 Member Ship Function for Gradient of Transient Boundary Values under SIMPLEST Scheme (1) $\left(\frac{v^{n+1} - v^n}{v^n} \text{ is Gentle} \right)$

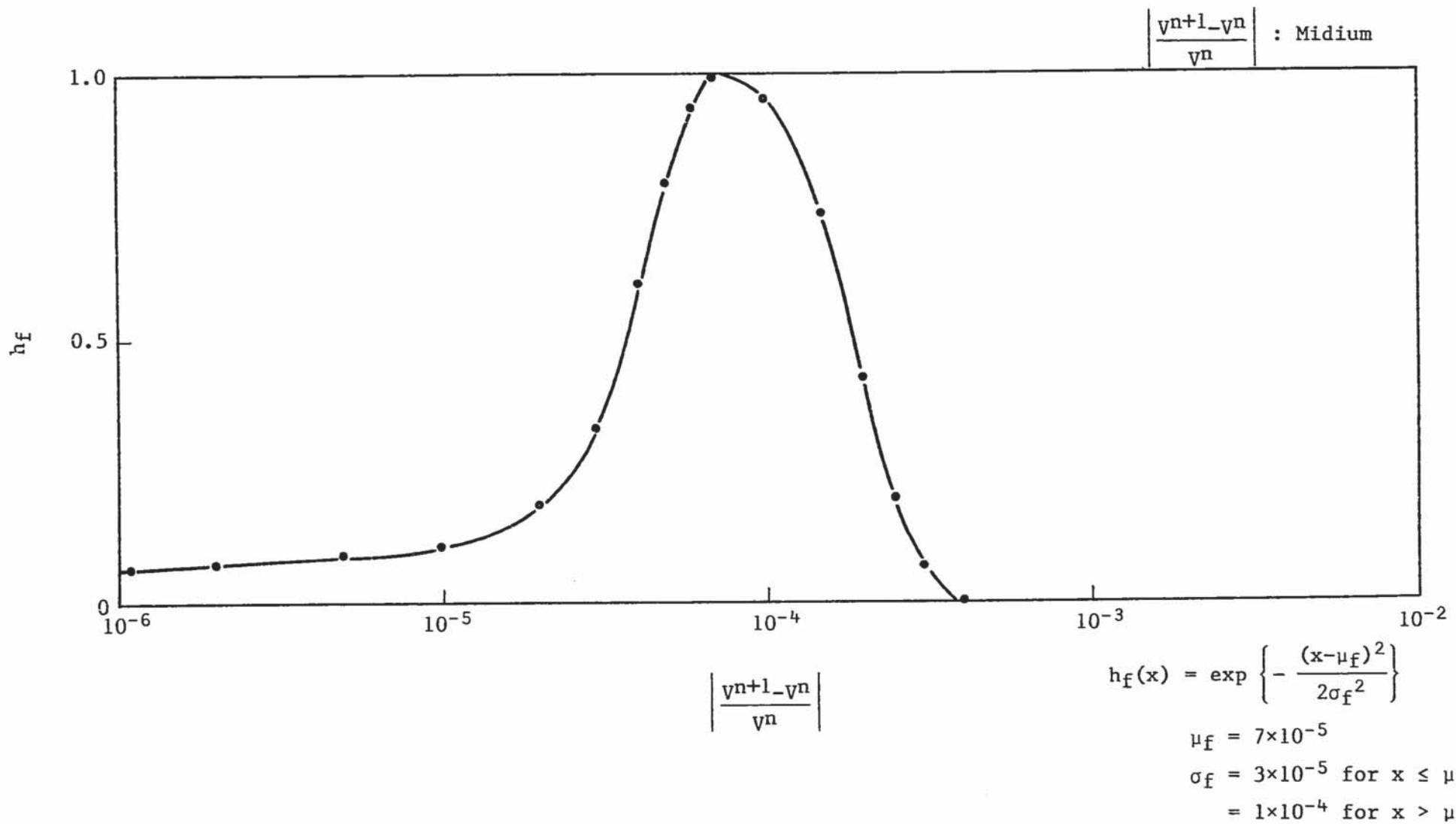


Fig. 3.40 Member Ship Function for Gradient of Transient Borndary Values under SIMPLEST Scheme (2) $\left(\frac{y^{n+1} - y^n}{y^n} \right)$ is Midium

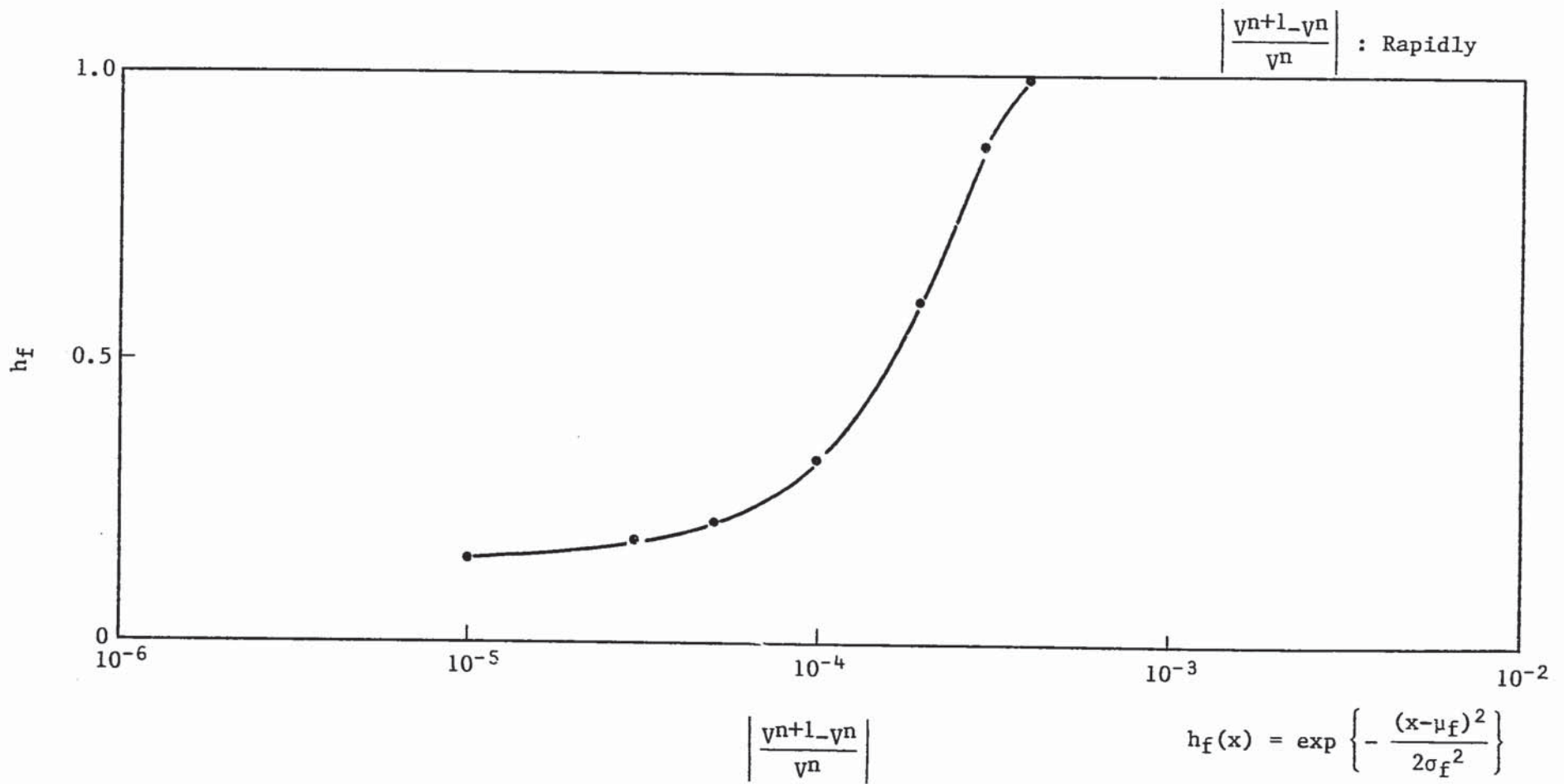


Fig. 3.41 Member Ship Function for Gradient of Transient Boundary Values under SIMPLEST Scheme (3) $\left(\frac{v^{n+1} - v^n}{v^n} \right)$ is Rapidly

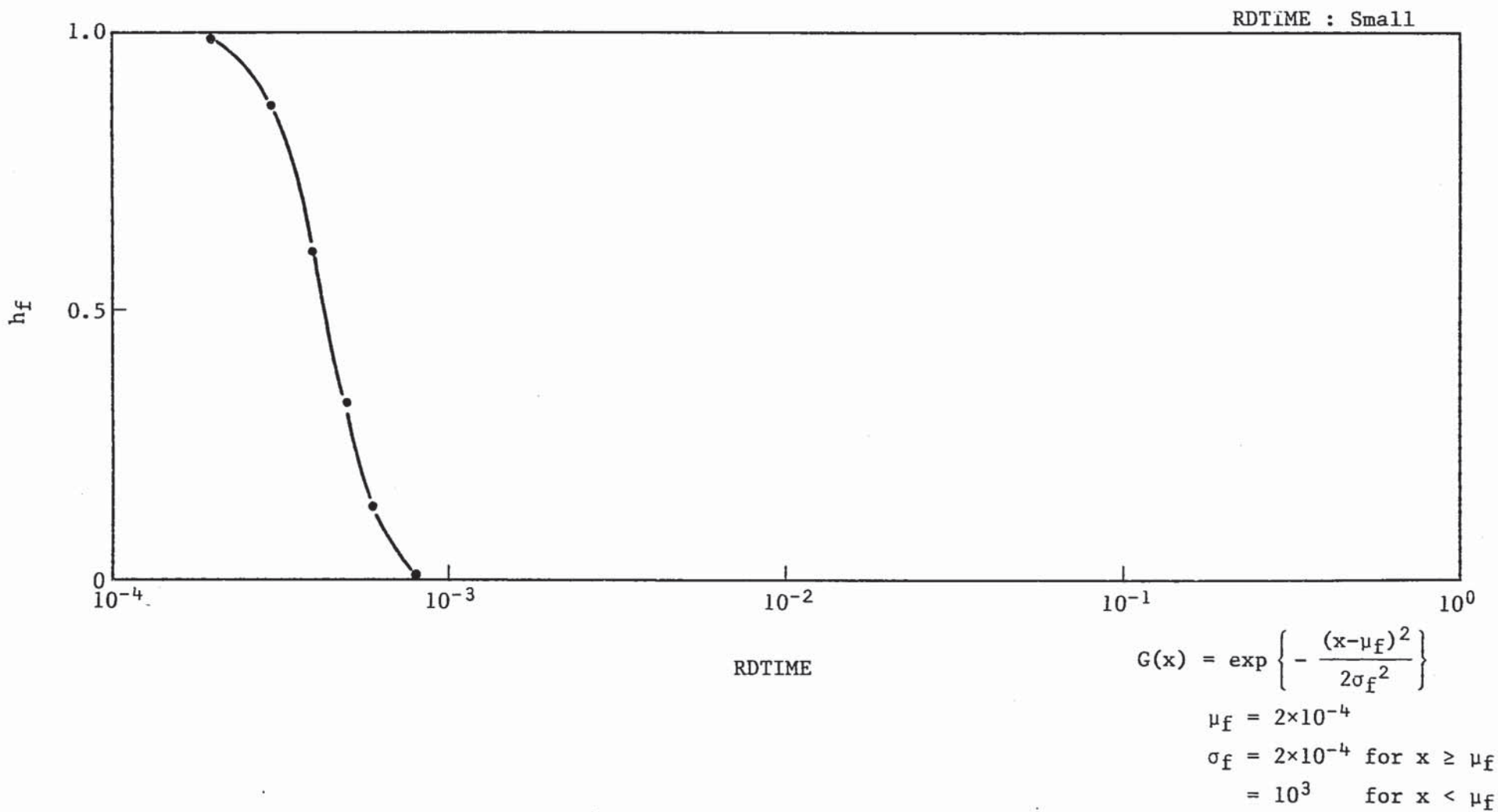


Fig. 3.42 Member Ship Function for RDTIME Setting under Transient Run with SIMPLEST Scheme (1) (RDTIME is Small)

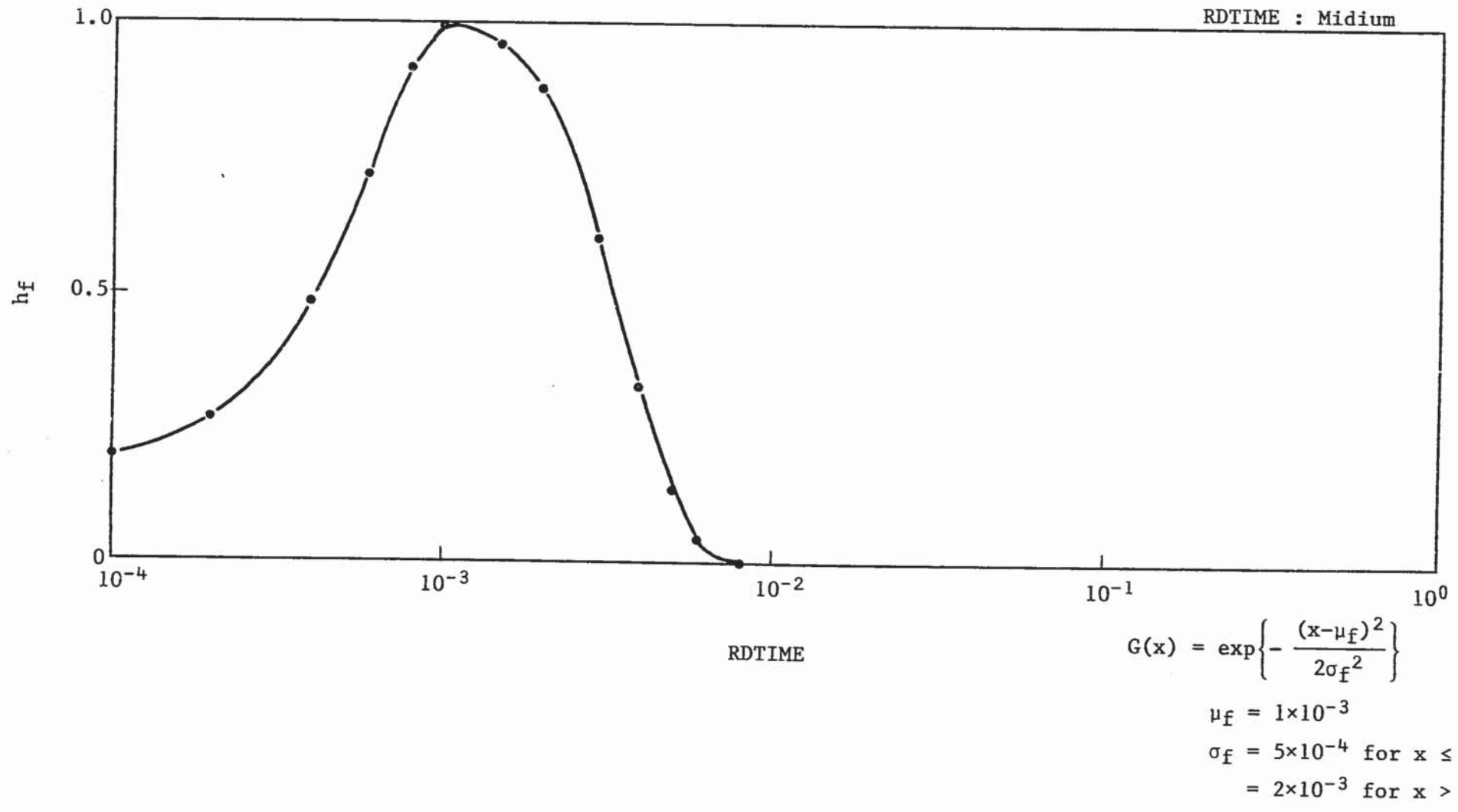


Fig. 3.43 Member Ship Function For RDTIME Setting under Transient Run with SIMPLEST Scheme (2) (RDTIME is Midium)

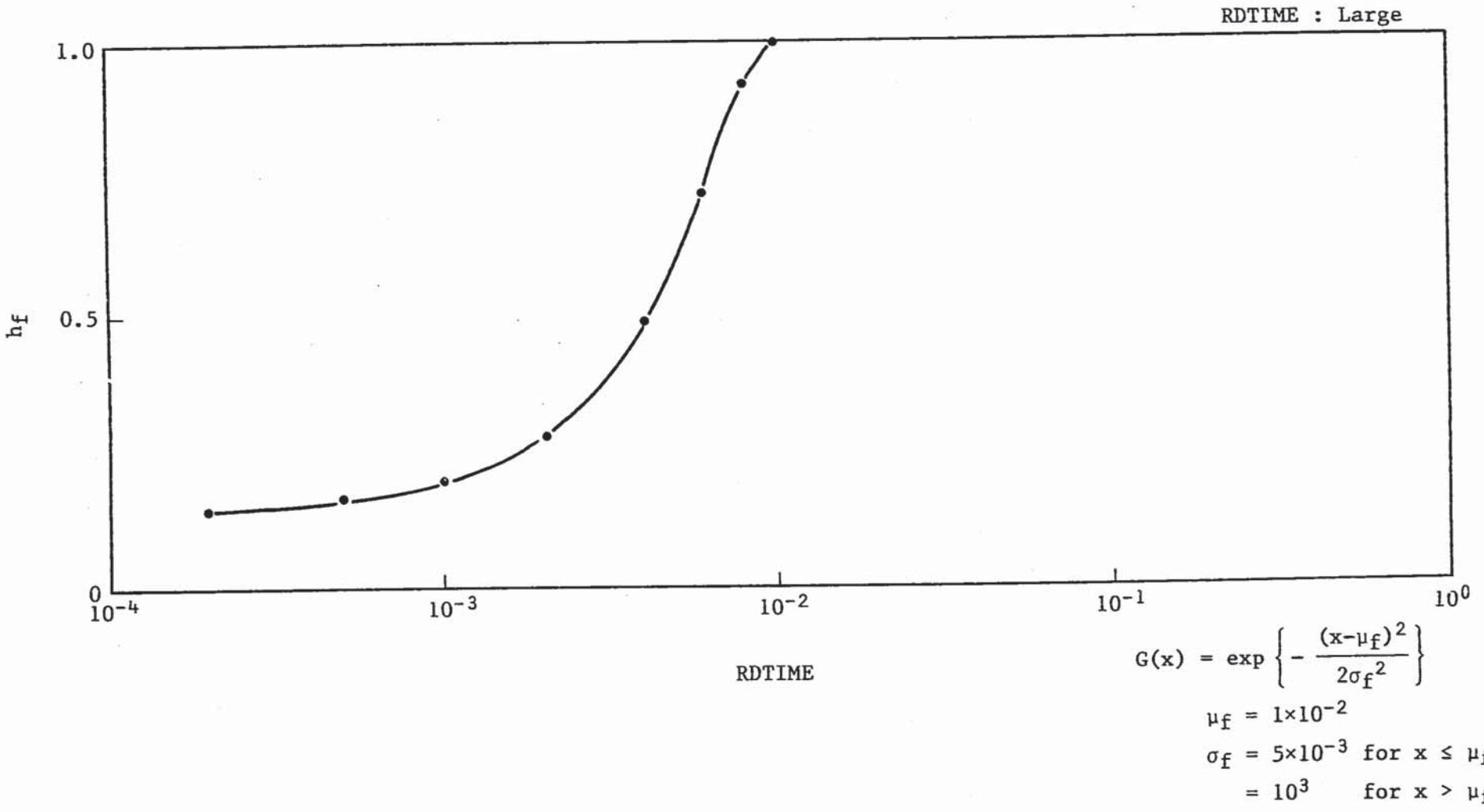


Fig. 3.44 Member Ship Function for RDTIME Setting under Transient Run with SIMPLEST Scheme (3) (RDTIME is Large)

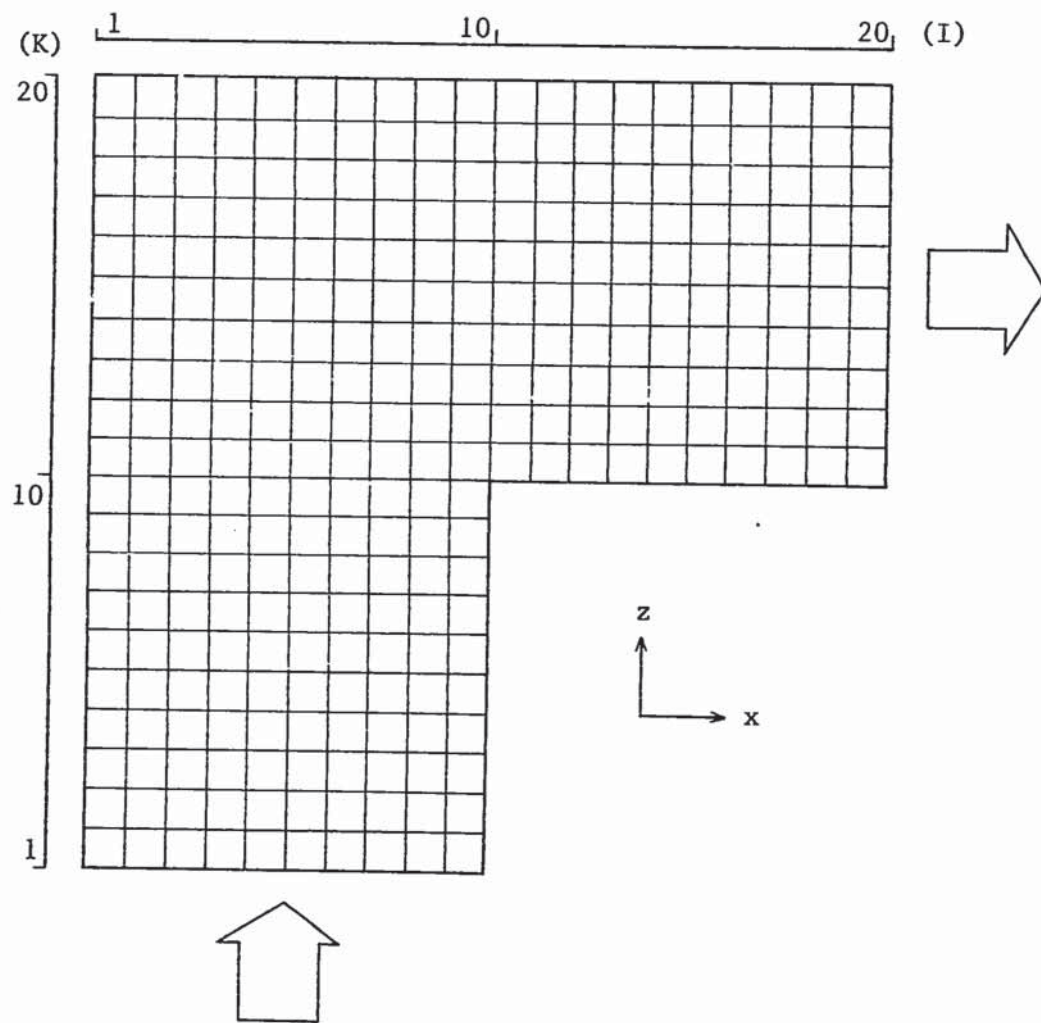


Fig. 3.45 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme

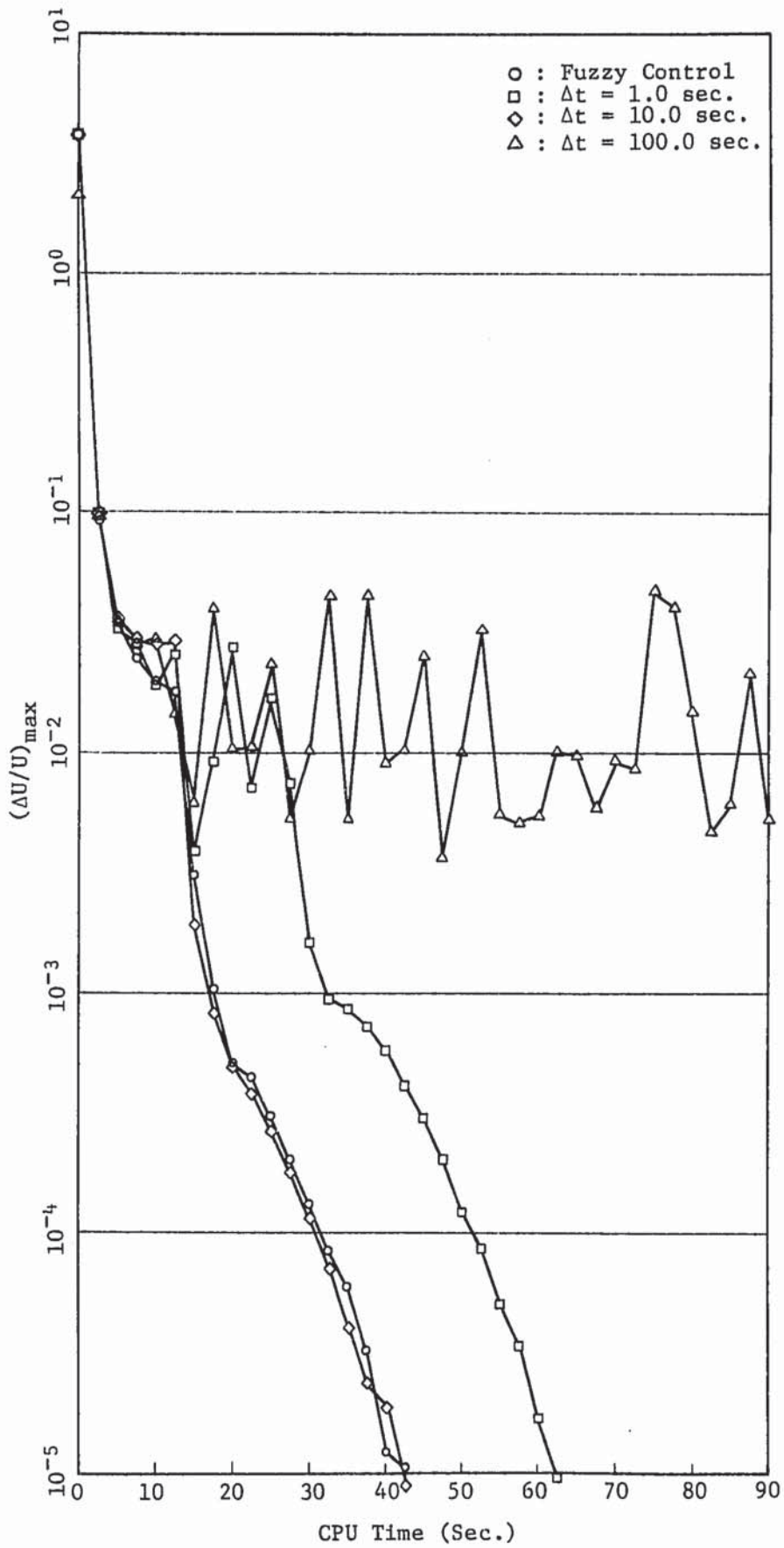


Fig. 3.47 Comparison of Convergence of $(\Delta U/U)$ under Steady-State Problem

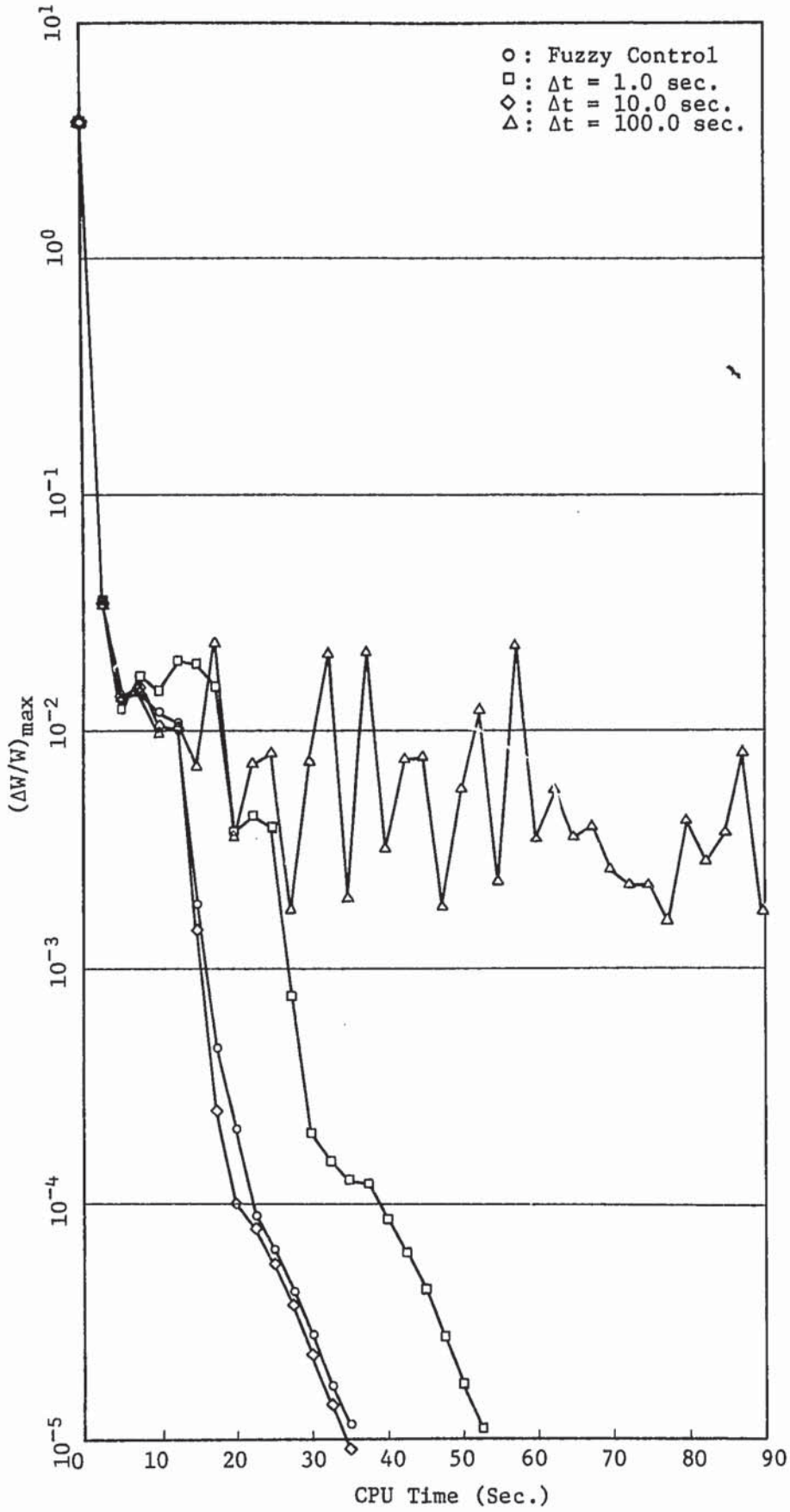


Fig. 3.48 Comparison of Convergence of $(\Delta W/W)$ under Steady-State Problem

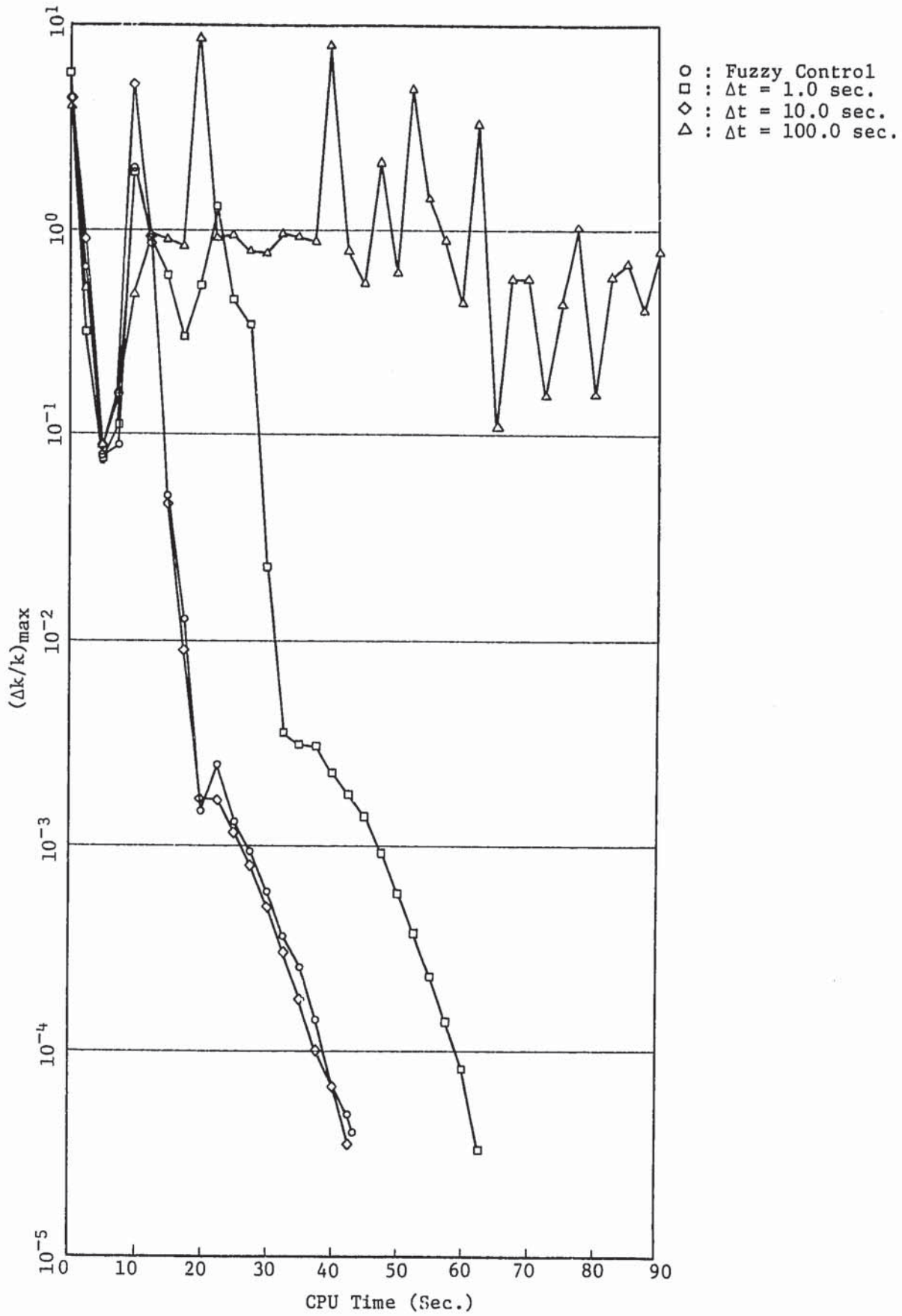


Fig. 3.49 Comparison of Convergence of $(\Delta k/k)_{max}$ under Steady-State Problem

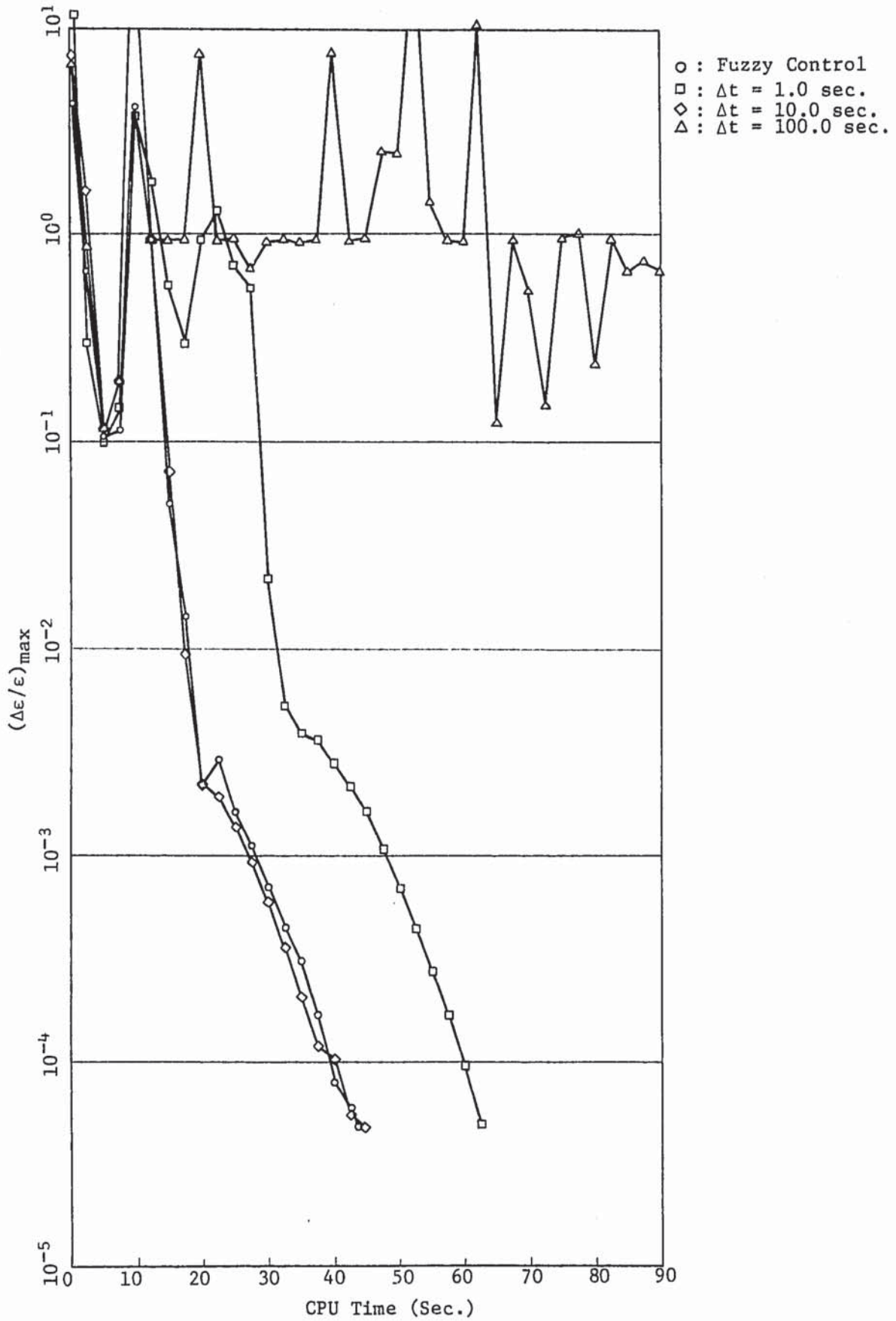


Fig. 3.50 Comparison of Convergence of $(\Delta\epsilon/\epsilon)$ under Steady-State Problem

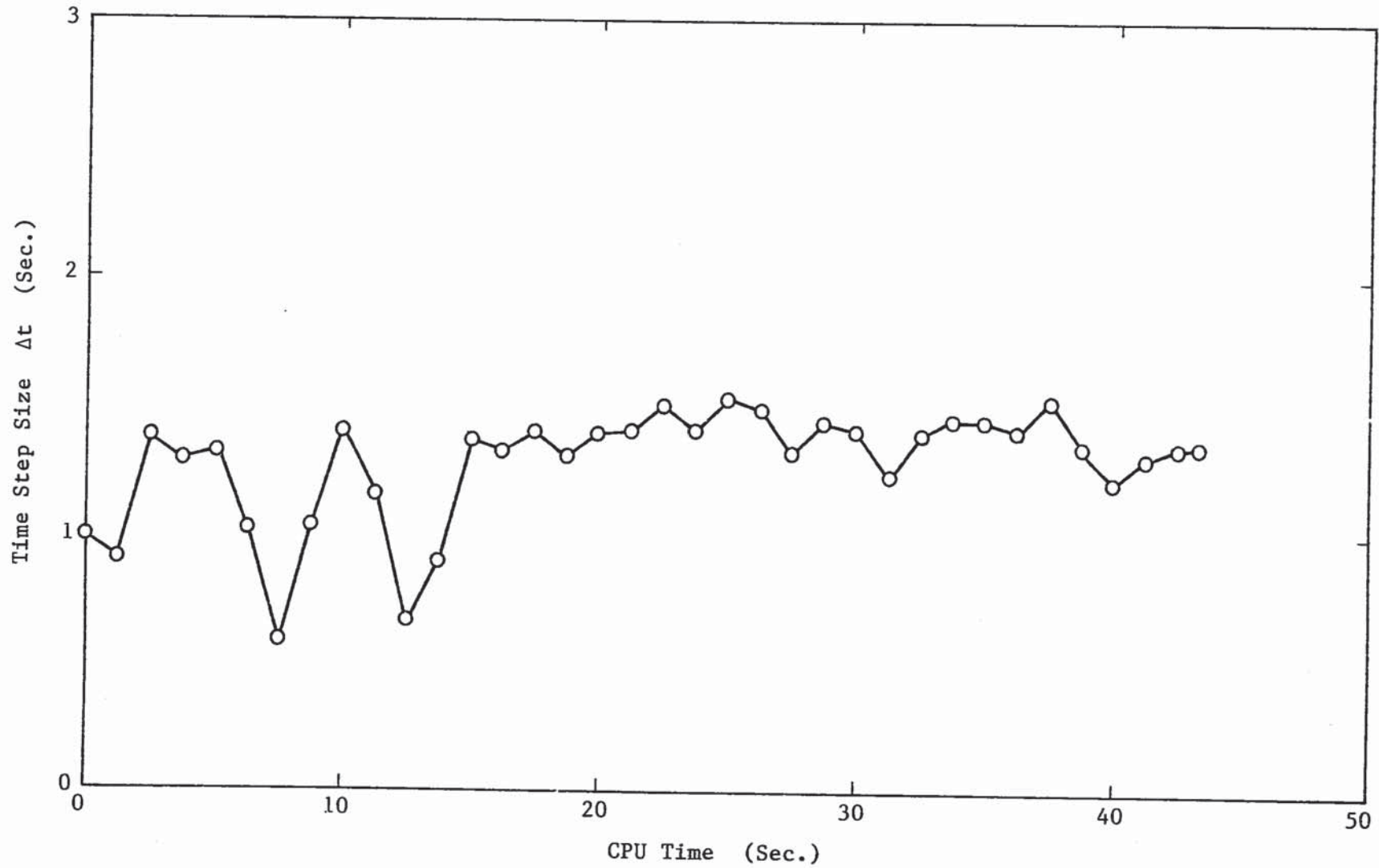


Fig. 3.51 Transition of Relaxation Factor α for Time Stepping under Steady-State Problem with SIMPLEST Scheme

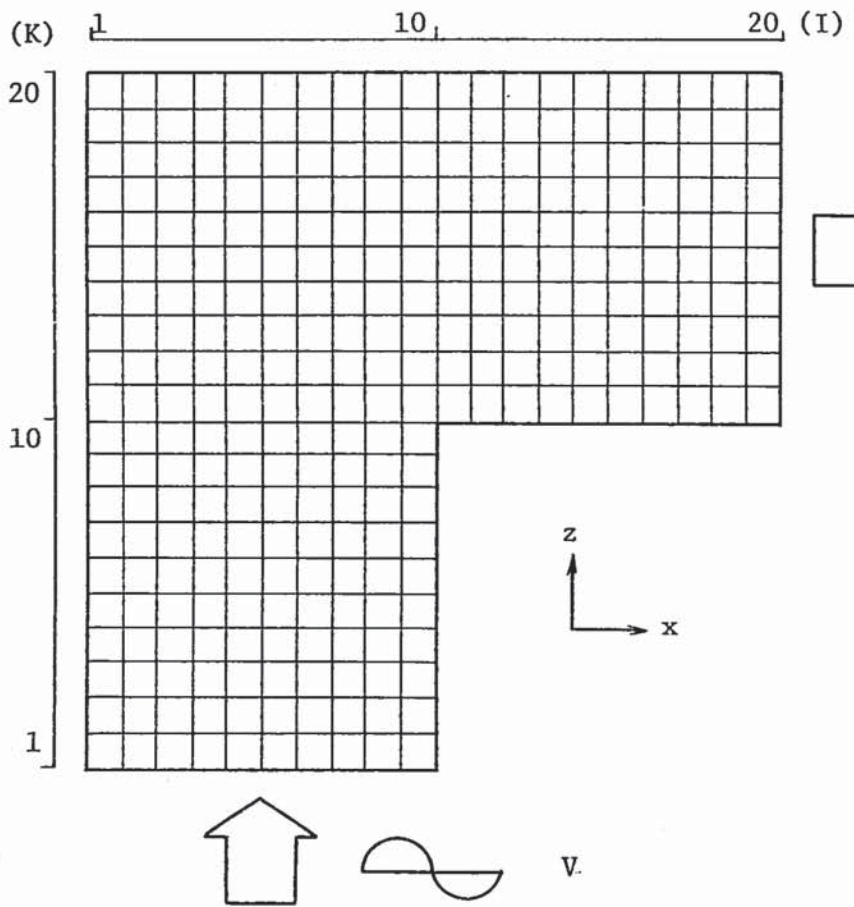


Fig. 3.52 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Transient Problem with SIMPLEST Scheme

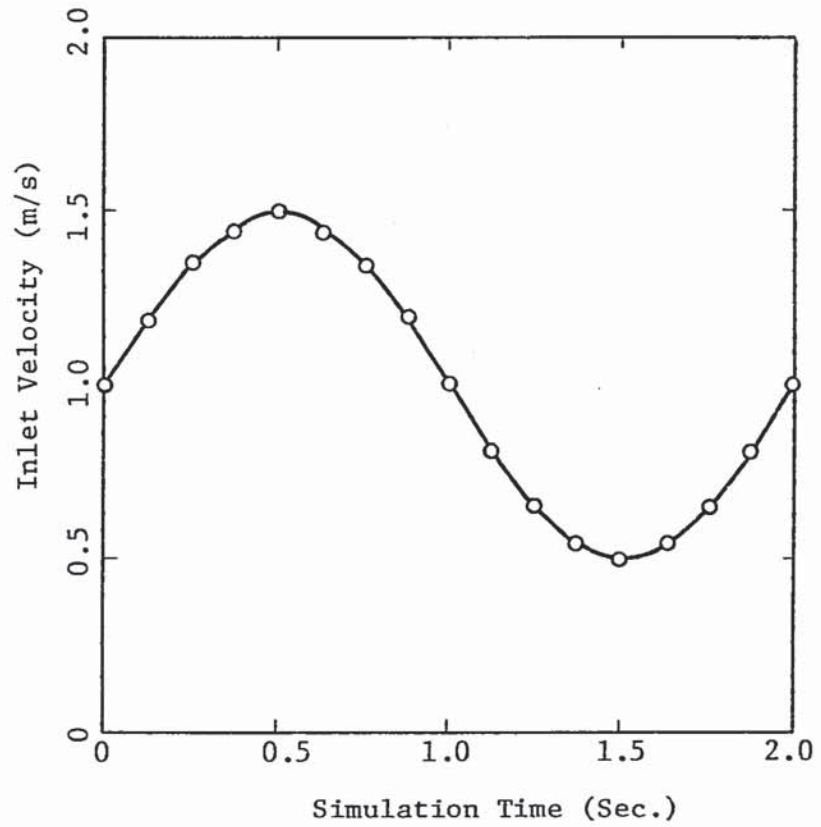


Fig. 3.53 Velocity and Temperature Transient at Inlet Boundary

```

*****
***
***          THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER          ***
***
***          WITH SIMPLEST SCHEME                                     ***
***
***
*****
***
***          DATE : JUL. 16, '87                                     ***
***
*****
&GEOM  ITURKE=20, IFPCG= 5,
        IGEOM= 0, NL1=1000, NM1= 400, ISYMCH=3, IFITEN=3,
        IFRES=1, IMAX=20, JMAX=1, KMAX=20, NSURF= 8,
        DX=20*0.025 ,DY=0.100000, DZ=20*0.025,
        XNORML= 0. , 0. , 0. , 1. ,-1. ,-1. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 1. ,-1. ,
        ZNORML= 1. , 1. ,-1. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
&END
REG -1.      1 10 1 1 1 1 1
REG -1.     11 20 1 1 11 11 2
REG -1.      1 20 1 1 20 20 3
REG -1.      1 1 1 1 1 20 4
REG -1.     10 10 1 1 1 10 5
REG -1.     20 20 1 1 11 20 6
REG -1.      1 10 1 1 1 20 7
REG -1.     11 20 1 1 11 20 7
REG -1.      1 10 1 1 1 20 8
REG -1.     11 20 1 1 11 20 8
END
&DATA  IFENER= 0,NTHCON= -1,NTMAX=5000,DT=1.000,
        IDTIME= 0, RDTIME=10.,
        IFHMO=2,
        IFMEN=0,
        IFMTB=1,
        IDISP=1,
        CINK1=3.300E-03,
        CINE1=1.619E-02,
        CINK2=3.300E-03,
        CINE2=1.619E-02,
        KEITER=1,HYDIN=1.0E-01,
        IT=1,1,TREST=15.,
        KFLOW= 1, 1, 1, 1, 1, -2, -3, -3,
        KTEMP= 400, 400, 400, 400, 400, 400, 400, 400,
        TEMPO= 20.,GRAVZ= -9.807 ,
        TEMP(1)=20.,VELOC(1)=1.00000,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,17201,09201,14201,20201,21201,
&END
END
WL 0.00001 1 20 1 1 1 20
END

```

Fig. 3.54 Input Data for Steady-State Run with SIMPLEST Scheme

```

*****
***
***           THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER           ***
***
***                   WITH SIMPLEST SCHEME                               ***
***
*****
***
***                   DATE : JUL. 21, '87                               ***
***
*****
&GEOM  IFRES=3,
&END
&DATA  IFENER=1,NTHAX=9999, TSTART=0.,
        TIMAX= 4.0,
        IDTIME=-1,DT=0.001,RDTIME=0.1,
        IOPTOM=0,OMEGA=1.50,
        ISTATE=2,
        IT= 99,KFLOW(1)=101,
        TVAL=0.000,0.125, 0.125,0.250, 0.250,0.375, 0.375,0.500,
              0.500,0.625, 0.625,0.750, 0.750,0.875, 0.875,1.000,
              1.000,1.125, 1.125,1.250, 1.250,1.375, 1.375,1.500,
              1.500,1.625, 1.625,1.750, 1.750,1.875, 1.875,2.000,
        FVAL=1.000,1.190, 1.190,1.345, 1.345,1.440, 1.440,1.500,
              1.500,1.440, 1.440,1.345, 1.345,1.190, 1.190,1.000,
              1.000,0.810, 0.810,0.655, 0.655,0.560, 0.560,0.500,
              0.500,0.560, 0.560,0.655, 0.655,0.810, 0.810,1.000,
        NEND=32,
        TPRNT=1.0,2.0,3.0,4.0,
        NTPRNT=-9999,
        NTHPR =01201, 03201, 14201, 21201, 20201,
        NTPLOT=-9999,
&END
END
END

```

Fig. 3.55 Input Data for Transient Run with SIMPLEST Scheme

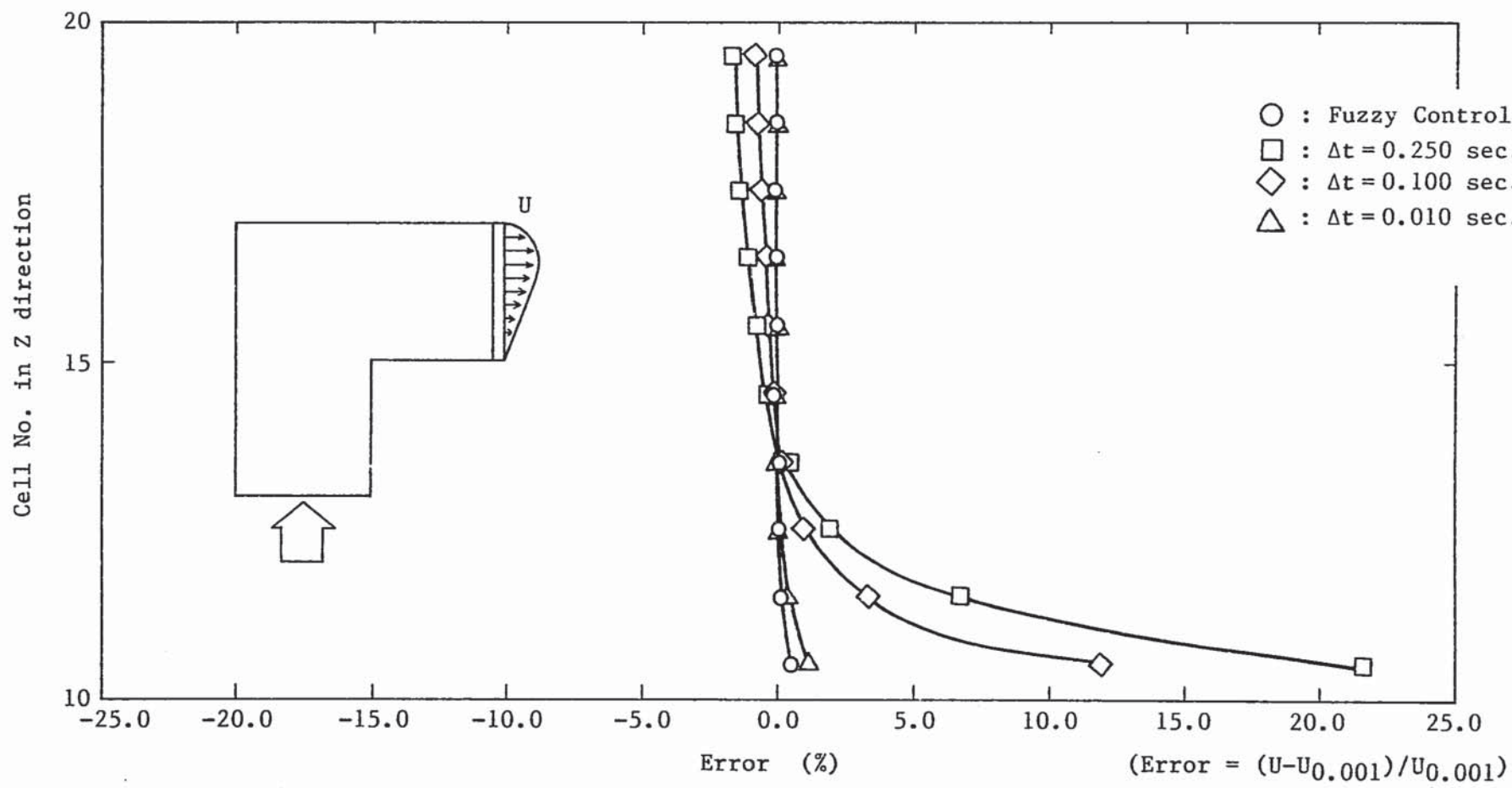


Fig. 3.56 Comparison of Velocity Component U at Outlet

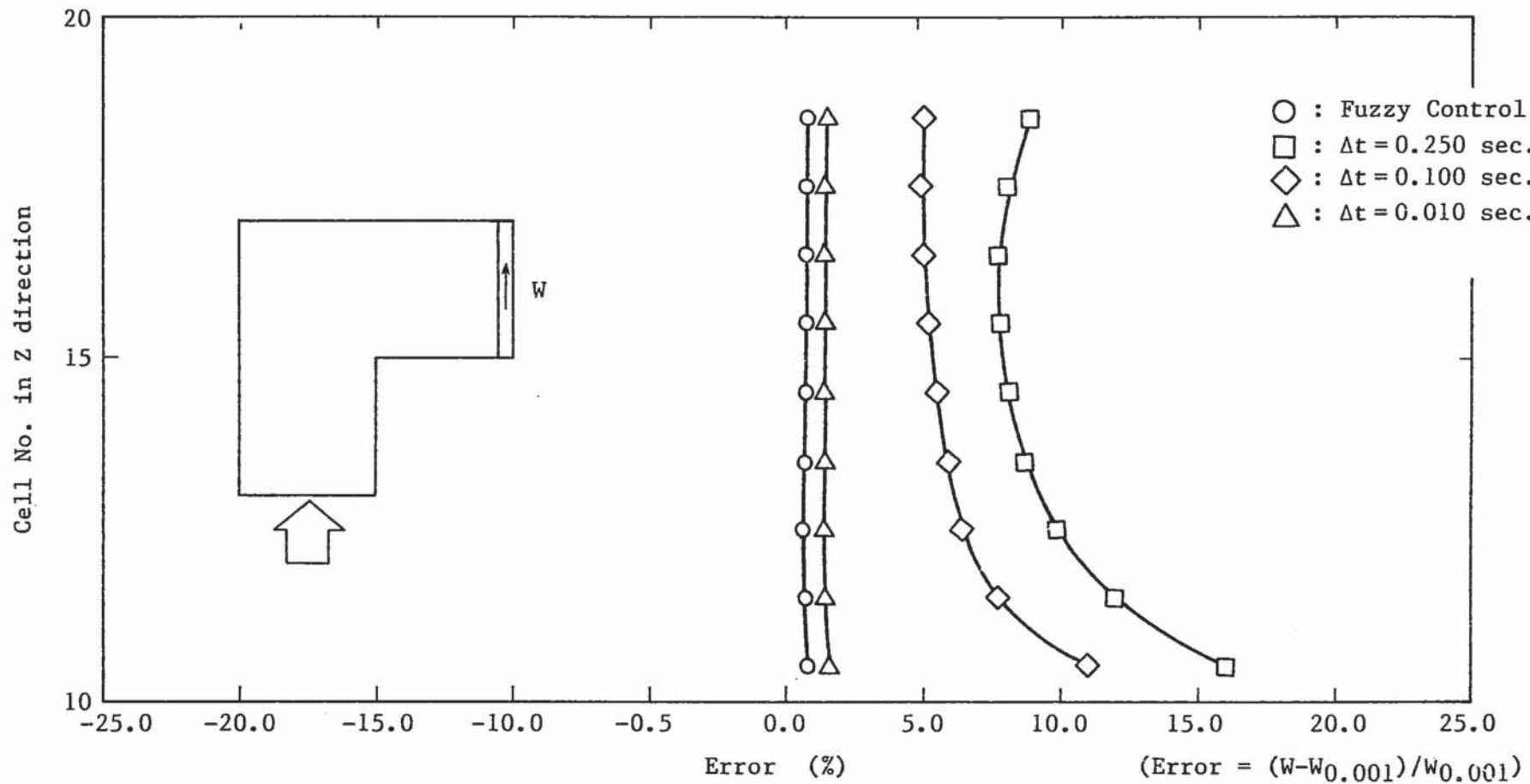


Fig. 3.57 Comparison of Velocity Component W at Outlet

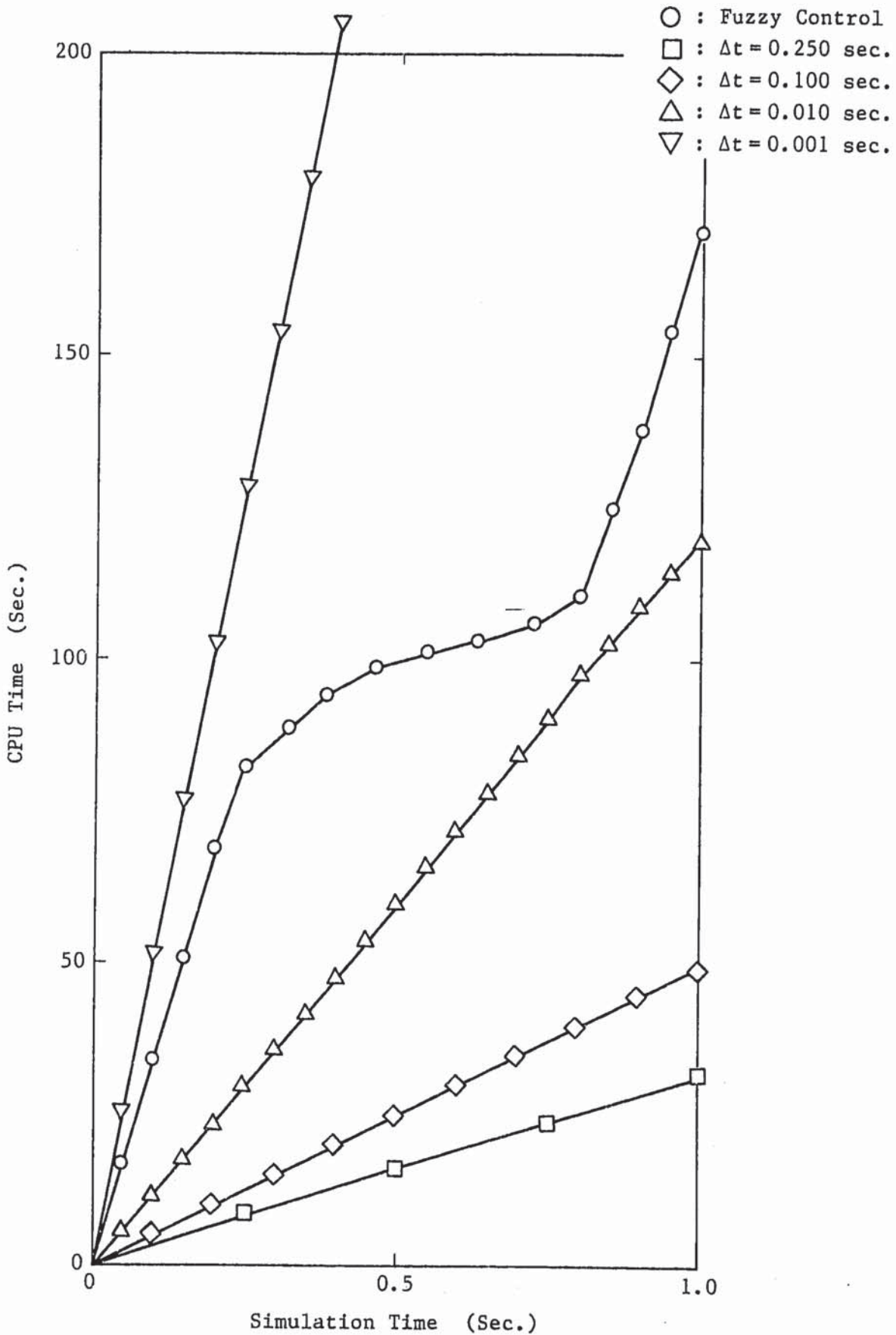


Fig. 3.58 Comparison of CPU Time under Various Time Step Size on Transient Problem with SIMPLEST Scheme

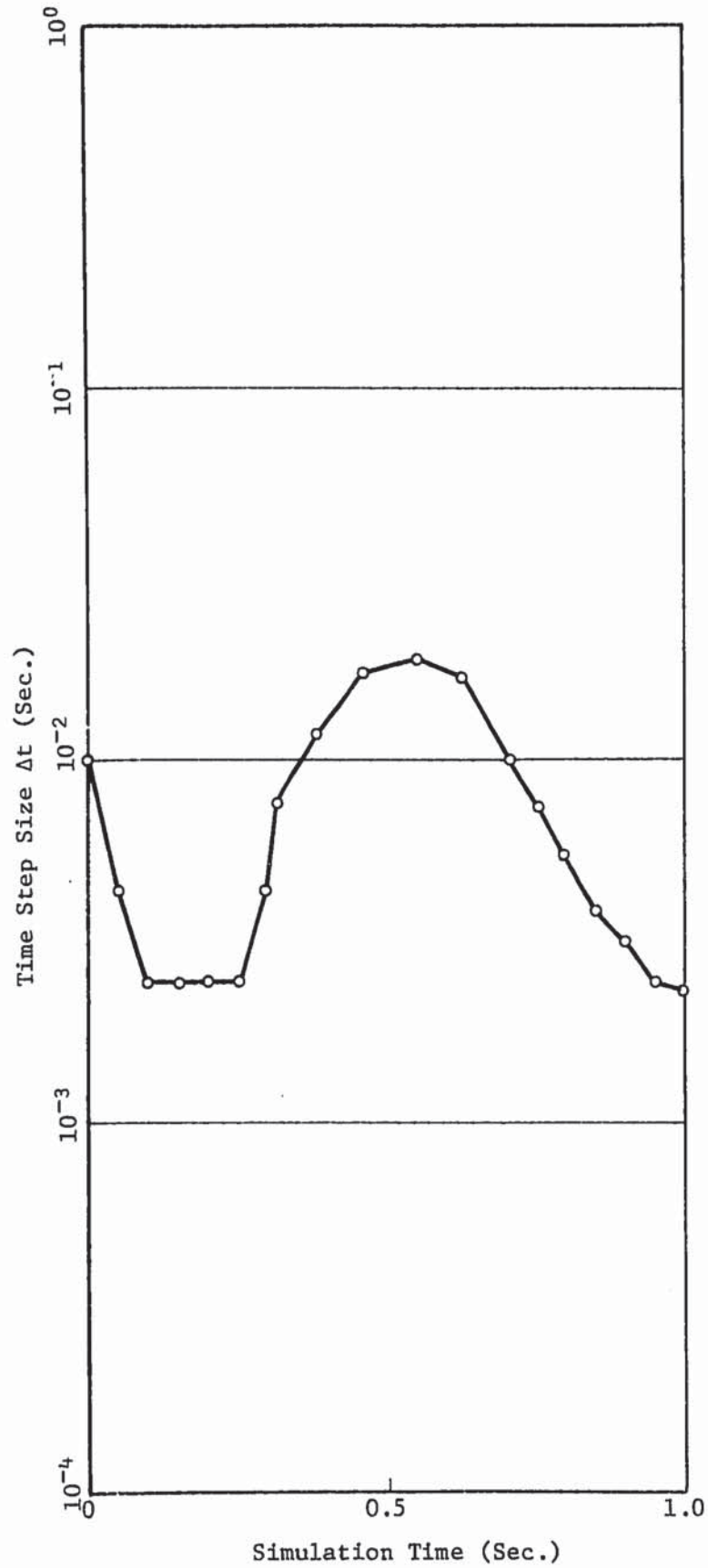


Fig. 3.59 Transient of Relaxation Factor α for Time Stepping under Transient Problem with SIMPLEST Scheme

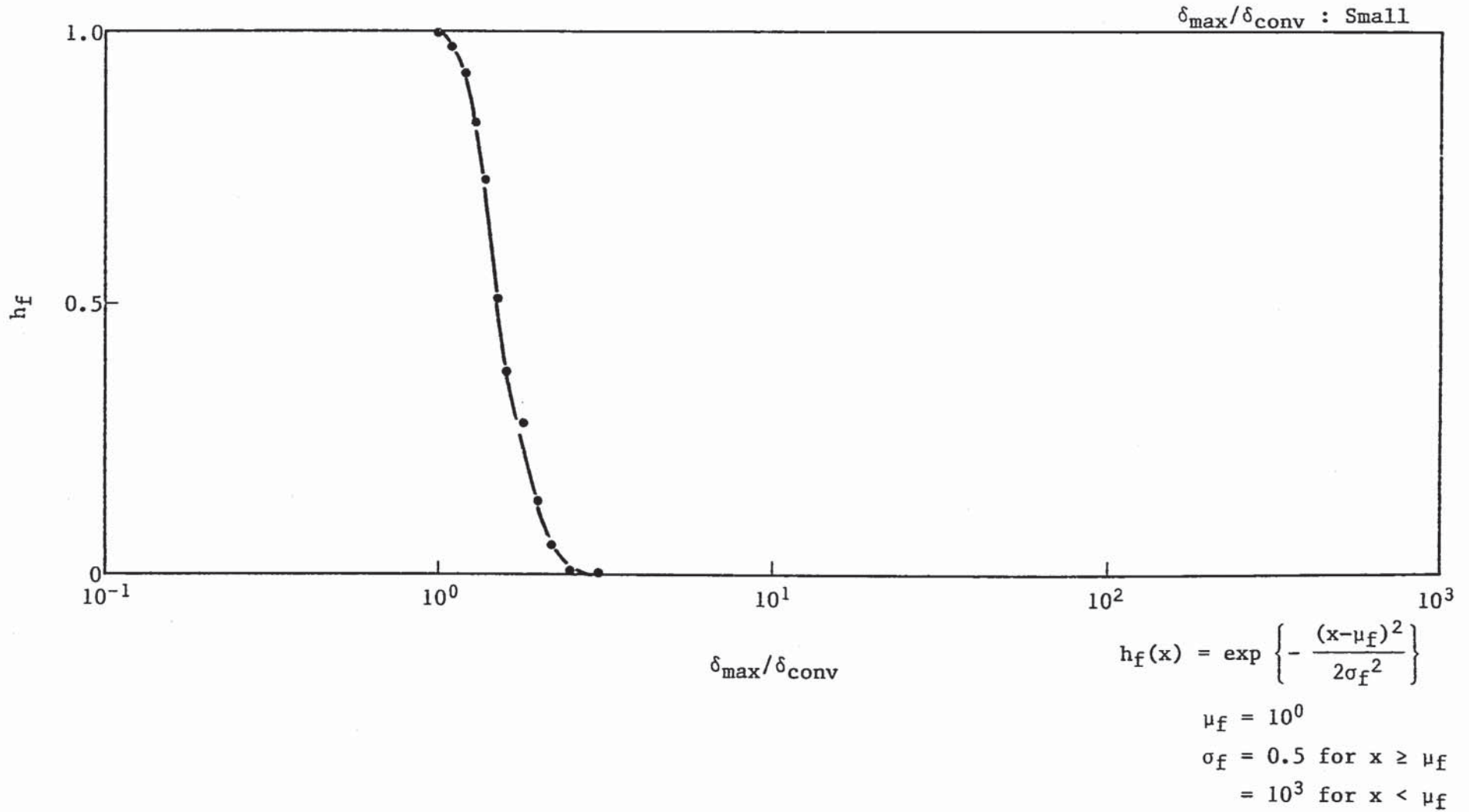
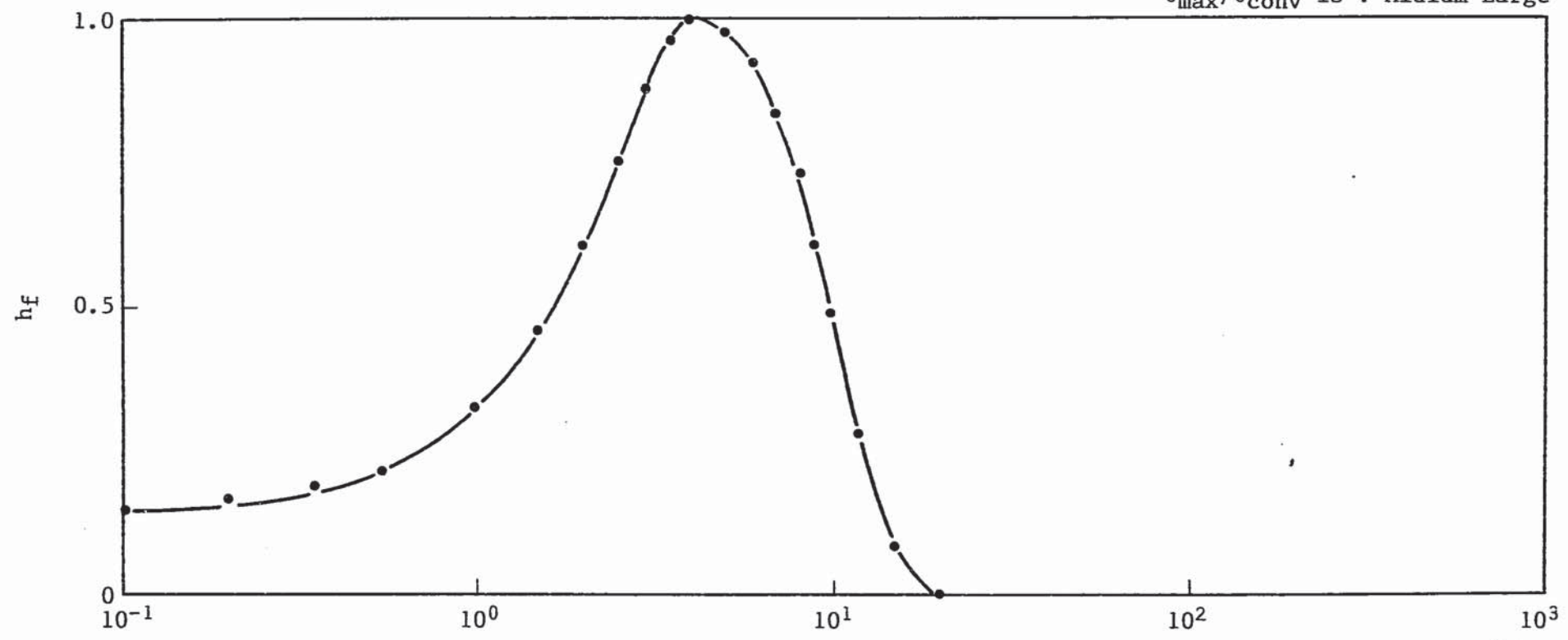


Fig. 4.1 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Relaxation Factor (1) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Small)

$\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is : Midium Large



$\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$

$$h_f(x) = \exp \left\{ - \frac{(x-\mu_f)^2}{2\sigma_f^2} \right\}$$

$$\mu_f = 4.0$$

$$\sigma_f = 2.0 \text{ for } x \leq \mu_f$$

$$= 5.0 \text{ for } x > \mu_f$$

Fig. 4.2 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Relaxation Factor (2) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Midium Large)

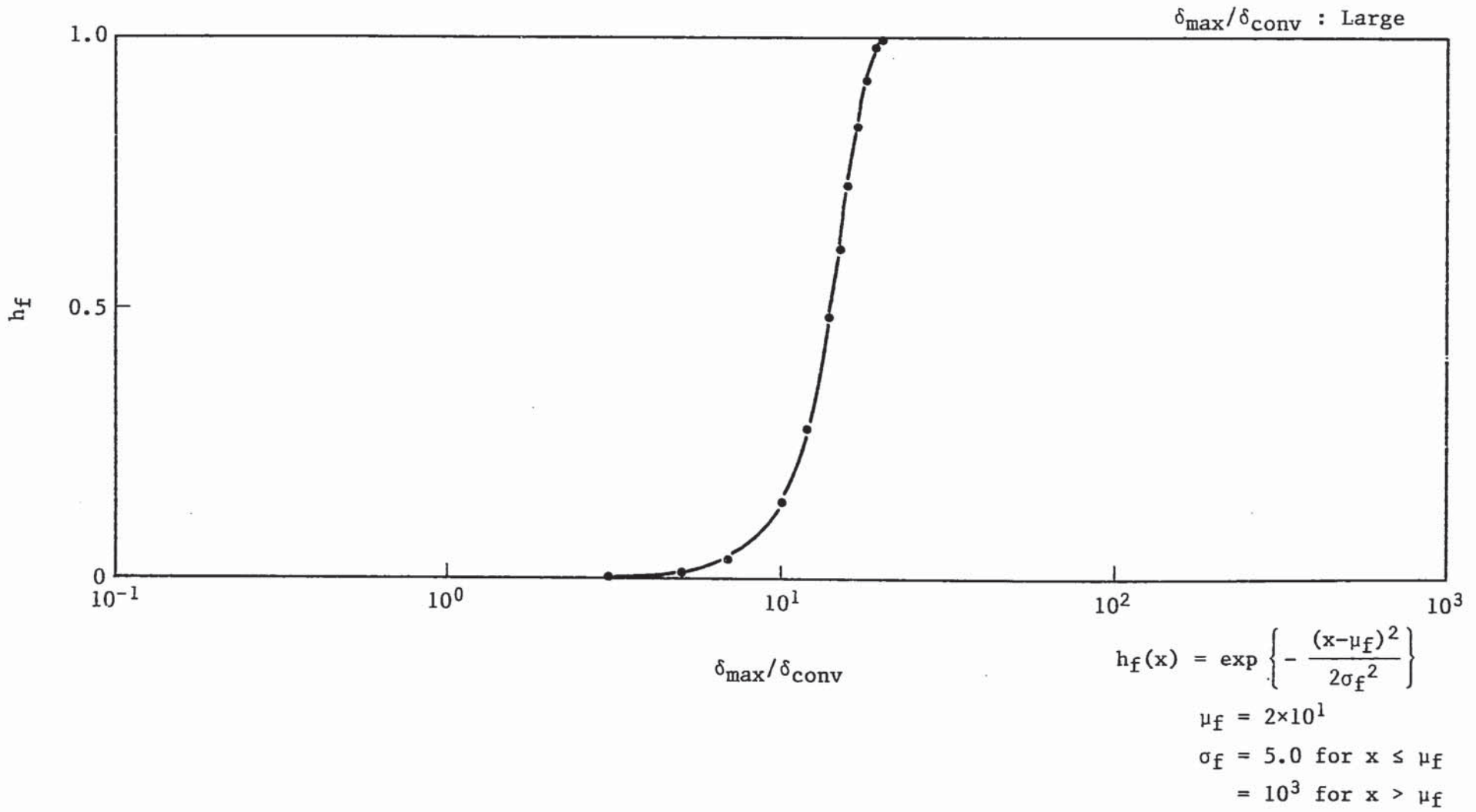


Fig. 4.3 Member Ship Function of Mass Balance Criteria for Relaxation Factor (3) ($\delta_{\max}/\delta_{\text{conv}}$ is Large)

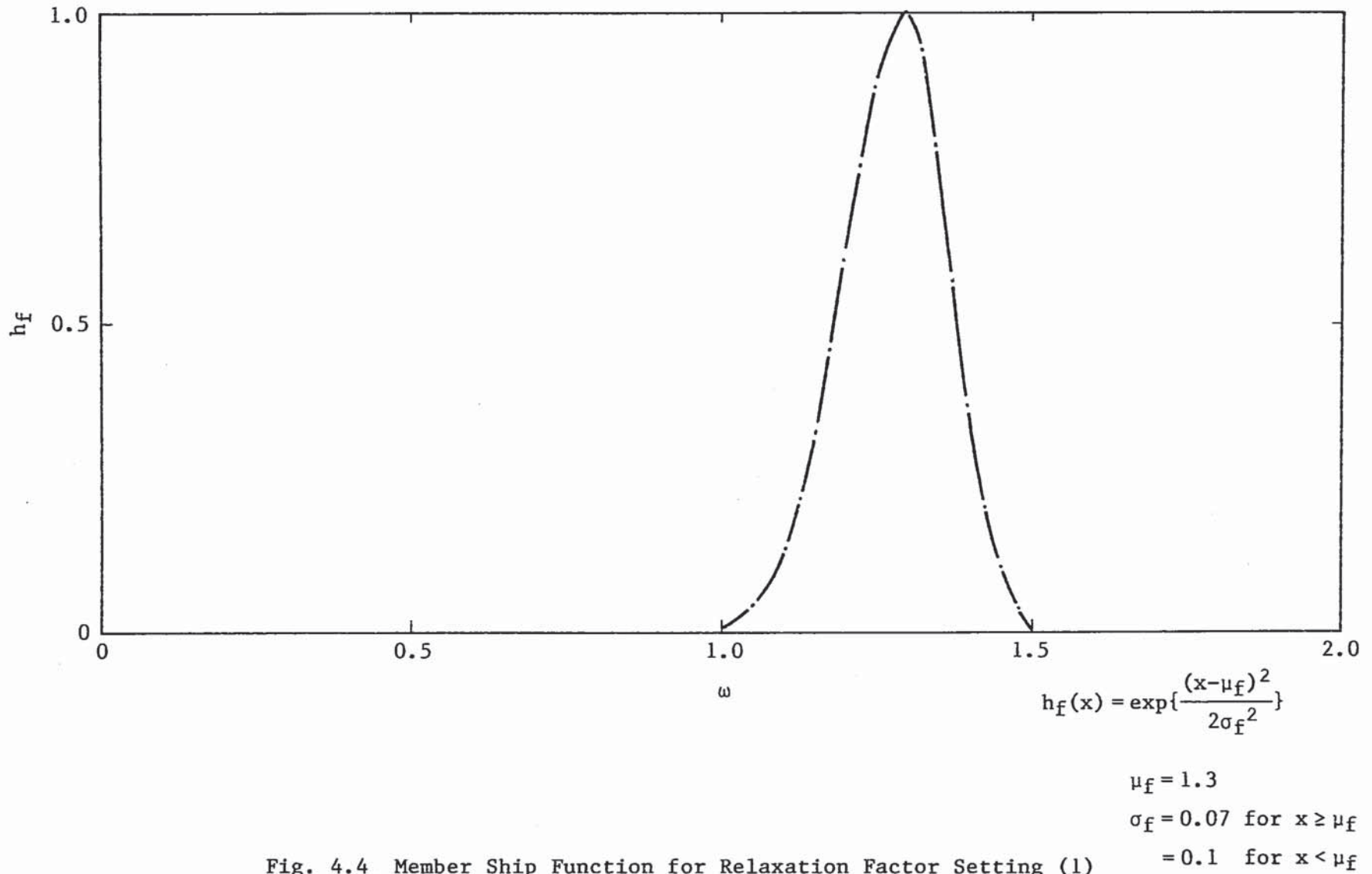


Fig. 4.4 Member Ship Function for Relaxation Factor Setting (1)
 (OMEGA is Small)

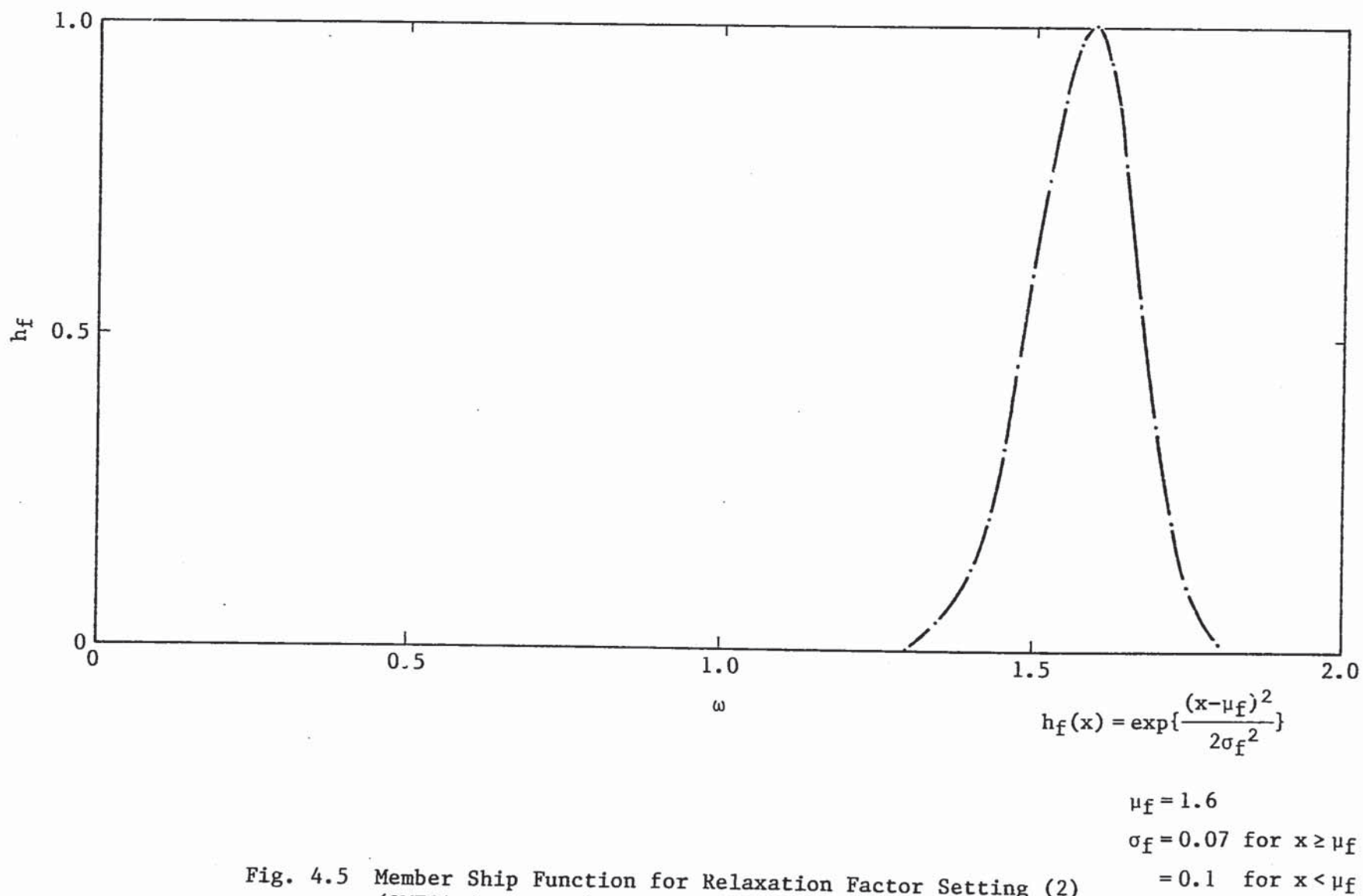


Fig. 4.5 Member Ship Function for Relaxation Factor Setting (2)
(OMEGA is Midium)

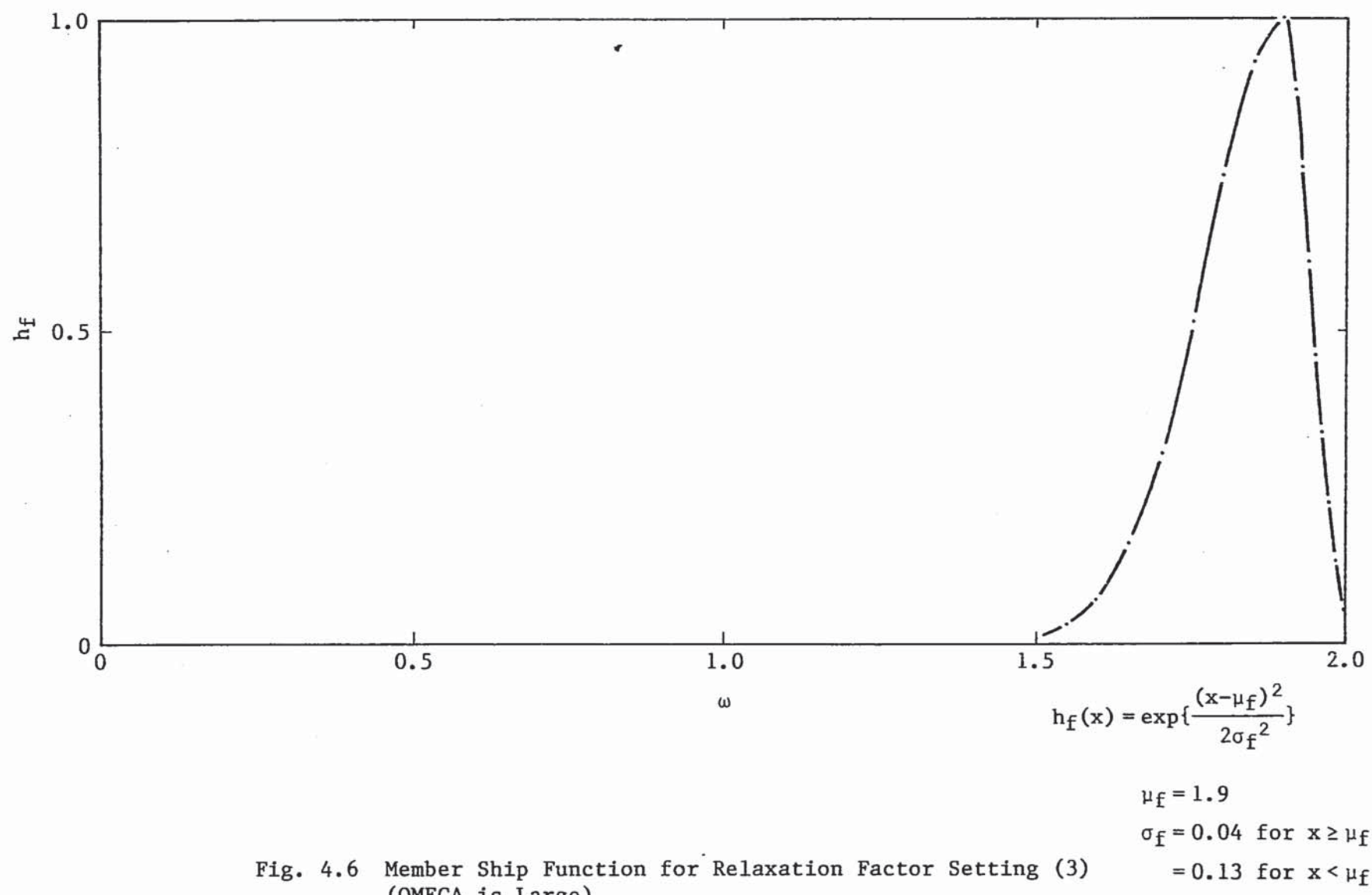


Fig. 4.6 Member Ship Function for Relaxation Factor Setting (3)
(OMEGA is Large)

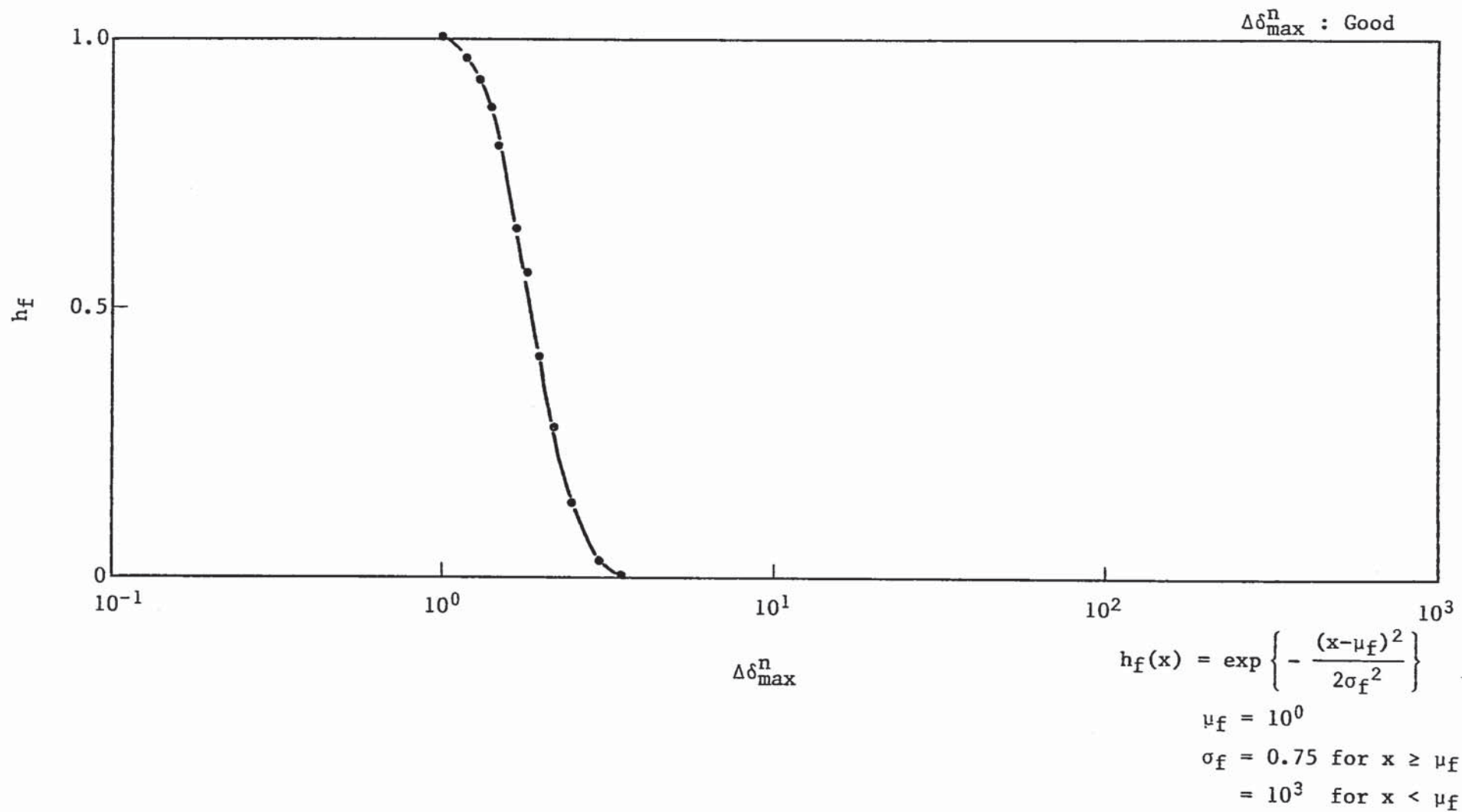


Fig. 4.7 Member Ship Function of Gradient of Mass Residual for Relaxation Factor (1) ($\Delta\delta_{\max}^n$ is Good)

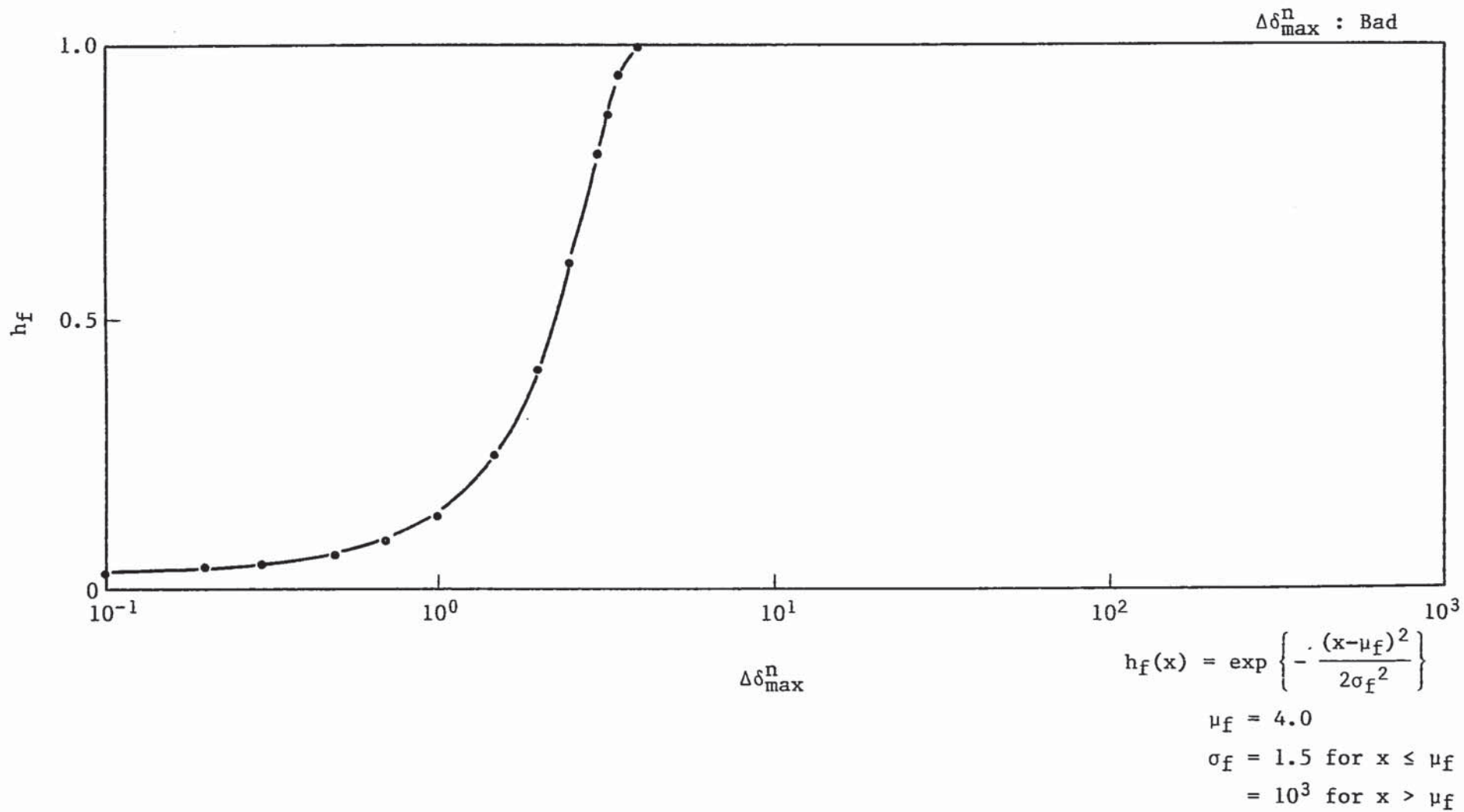


Fig. 4.8 Member Ship Function of Gradient of Mass Residual for Relaxation Factor (2) ($\Delta\delta_{\max}^n$ is Bad)

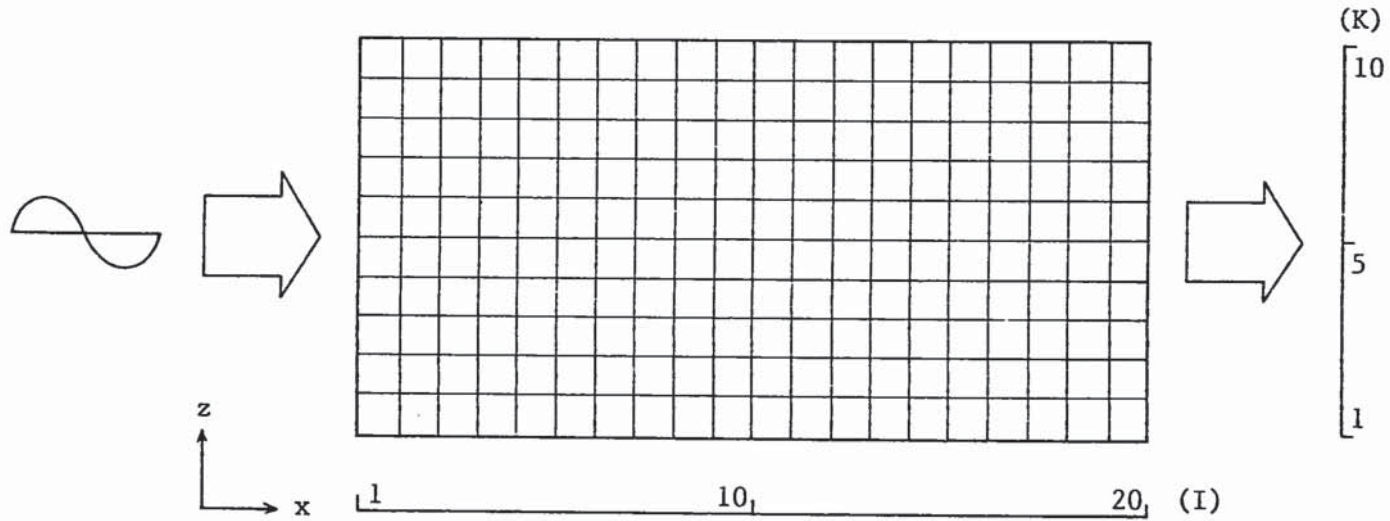


Fig. 4.9 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Transient Problem with MICE Scheme

```

*****
***          THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER          ***
***                                     WITH M-ICE SCHEME                                     ***
***          --- SURVEY OF OPTIMAL OMEGA ---          ***
*****
***                                     DATE : JUN. 25, '87                                     ***
***                                                                                                     ***
*****
KGIOM  ITURKE=20, IFPCG= 5,
       IGEOM= 0, NL1= 500, NM1= 200, ISYMCII=2, IFITEN=2,
       IFRES=1, IMAX=20, JMAX=1, KMAX=10, NSURF= 6,
       DX=20=0.050, DY=0.100000, DZ=10=0.050,
       XNORML= 1., -1., 0., 0., 0., 0.,
       YNORML= 0., 0., 0., 0., 1., -1.,
       ZNORML= 0., 0., 1., -1., 0., 0.,

&END
REG -1. 1 1 1 1 1 10 1
REG -1. 20 20 1 1 1 10 2
REG -1. 1 20 1 1 1 1 3
REG -1. 1 20 1 1 10 10 4
REG -1. 1 20 1 1 1 10 5
REG -1. 1 20 1 1 1 10 6
END
&DATA IFENER= 0, NIHCUM= -1, NIHMAX=9999, ISTATE=0,
      DT=1.0,
      IDTIME= 1, RDTIME=0.8,
      IFMNO=2,
      IFNEN=0,
      IFHTD=1,
      IDISP=1,
      CINK1=3.300E-03,
      CINE1=1.619E-02,
      CINK2=3.300E-03,
      CINE2=1.619E-02,
      KEITER=1, HYDIN=1.0E-01,
      IT=1, IREST=15.,
      KFLOW= 1, -2, 1, 1, -3, -3,
      KTEMP= 1, 400, 400, 400, 400, 400,
      TEMPO= 20., GRAVZ= -9.807,
      TEMP(1)=20., VELOC(1)=0.50000,
      NIPRN1= -9999,
      NIHPR =01201,03201,05201,17201,09201,14201,20201,21201,

&END
LND
UI 0.50000 1 20 1 1 1 10
IND

```

Fig. 4.10 Input Data for Steady-State Run with MICE Scheme

```

*****
***          THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER          ***
***                                     WITH M-ICE SCHEME                                     ***
***          --- SURVEY OF OPTIMAL OMEGA ---          ***
*****
***                                     DATE : JUN. 25, '87                                     ***
***                                                                                                     ***
*****
&GEOM  IFRES=3,
       !FPCG=0,

&END
&DATA IFENER=0, NIHMAX= 2, TSTART=0.,
      IDTIME= 1, D1=0.1, RDTIME=0.5,
      IOPTOM=2, OMEGA=1.50,
      ISTATE=2, I1KBUG= 0, I11BUG= 0,
      IT= 1, KFLOW(1)=101,
      IVAL=0.00,0.25,0.25,0.50,0.50,0.75,0.75,1.00,
      1.00,1.25,1.25,1.50,1.50,1.75,1.75,2.00,
      2.00,2.25,2.25,2.50,2.50,2.75,2.75,3.00,
      3.00,3.25,3.25,3.50,3.50,3.75,3.75,4.00,
      4.00,4.25,4.25,4.50,4.50,4.75,4.75,5.00,
      5.00,5.25,5.25,5.50,5.50,5.75,5.75,6.00,
      6.00,6.25,6.25,6.50,6.50,6.75,6.75,7.00,
      7.00,7.25,7.25,7.50,7.50,7.75,7.75,8.00,
      8.00,8.25,8.25,8.50,8.50,8.75,8.75,9.00,
      9.00,9.25,9.25,9.50,9.50,9.75,9.75,10.0,
      FVAL -1.00,1.05,1.05,1.10,1.10,1.05,1.05,1.00,
      1.00,0.95,0.95,0.90,0.90,0.95,0.95,1.00,
      1.00,1.05,1.05,1.10,1.10,1.05,1.05,1.00,
      1.00,0.95,0.95,0.90,0.90,0.95,0.95,1.00,
      1.00,1.05,1.05,1.10,1.10,1.05,1.05,1.00,
      1.00,0.95,0.95,0.90,0.90,0.95,0.95,1.00,
      1.00,1.05,1.05,1.10,1.10,1.05,1.05,1.00,
      1.00,0.95,0.95,0.90,0.90,0.95,0.95,1.00,

      NEND=80,
      NIHPR= -9999,
      NIHPR =01201, 03201, 14201, 21201, 20201,
      NIPL01= -9999,

&END
END
END

```

Fig. 4.11 Input Data for Transient Run with MICE Scheme

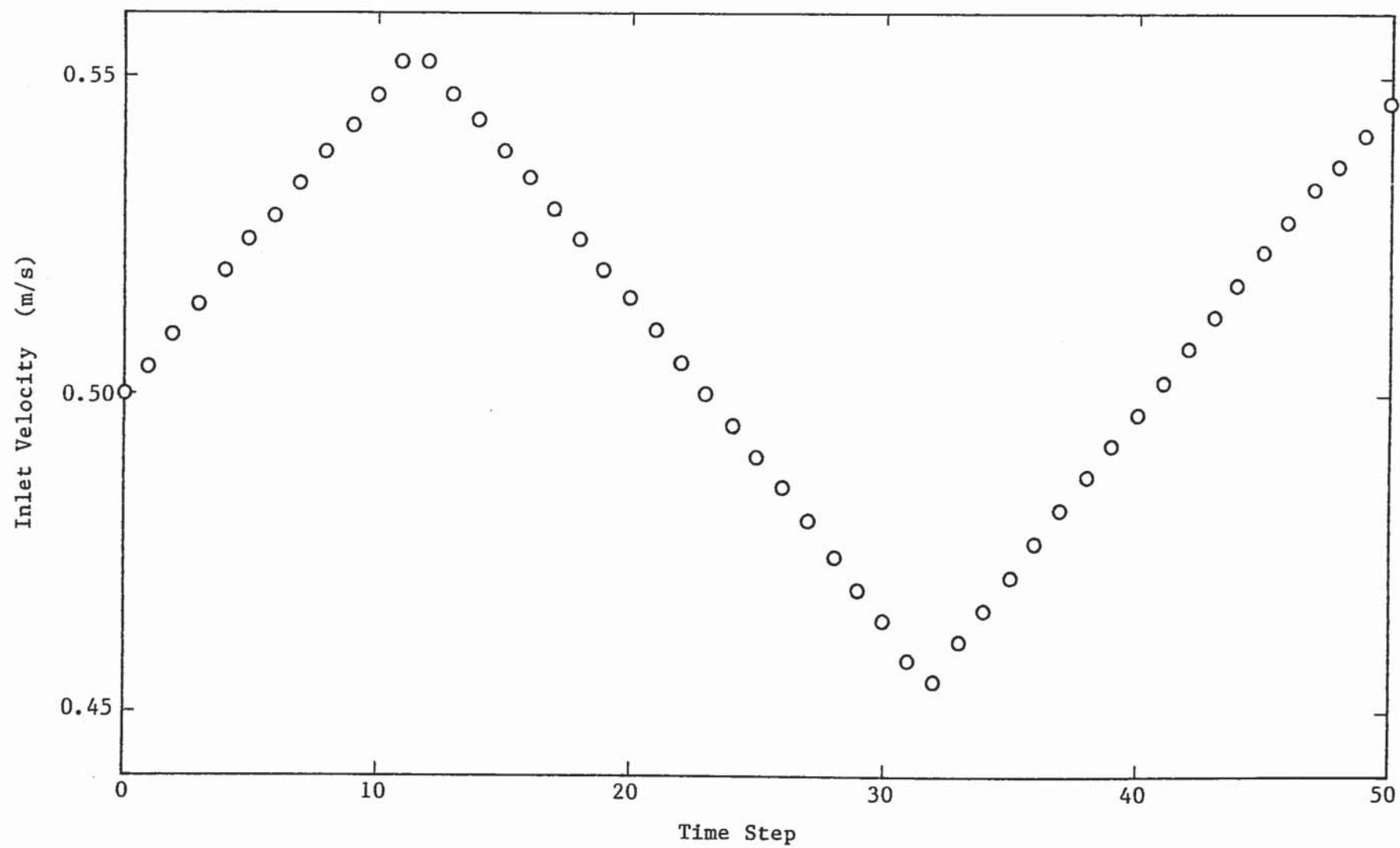


Fig. 4.12 Velocity Transient at Inlet Boundary

```

*****
***                                     **
***           THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER           **
***                                     **
***           WITH M-ICE SCHEME                                         **
***                                     **
*****
***                                     **
***                                     **
***           DATE : JUL. 06, '87                                       **
***                                     **
*****
&GEOM  ITURKE=20, IFPCG= 0,
        IGEO= 0, NL1= 500, NM1= 200, ISYCH=2, IFITEN=2,
        IFRES=1, IMAX=20, JMAX=1, KMAX=10, NSURF= 6,
        DX=20*0.050 ,DY=0.100000, DZ=10*0.050,
        XNORML= 1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , -0. , 1. , -1. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. ,

&END
REG -1.      1  1  1  1  1  10  1
REG -1.      20 20  1  1  1  10  2
REG -1.      1  20  1  1  1  1  3
REG -1.      1  20  1  1  10  10  4
REG -1.      1  20  1  1  1  10  5
REG -1.      1  20  1  1  1  10  6
END
&DATA  IFENER= 0,NTHCON= -1,NTMAX=9999,ISTATE=0,
        DT=1.0,
        IDTIME=-1,ROTIME=0.8,
        IOPTOM= 1,OMEGA=1.5,
        IFMHO=2,
        IFMEN=0,
        IFMTB=1,
        IDISP=1,
        CINK1=3.300E-03,
        CINE1=1.619E-02,
        CINK2=3.300E-03,
        CINE2=1.619E-02,
        KEITER=1,HYDIN=1.0E-01,
        IT=1,1,TREST=15.,
        KFLOW=  1,  -2,  1,  1,  -3,  -3,
        KTEMP=  1,  400, 400, 400, 400, 400,
        TEMPO=  20.,GRAVZ= -9.807 ,
        TEMP(1)=20.,VELOC(1)=0.50000,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,14201,20201,21201,

&END
END
UL  0.50000      1  20  1  1  1  10
END

```

Fig. 4.13 Input Data for Steady-State Problem with MICE Scheme

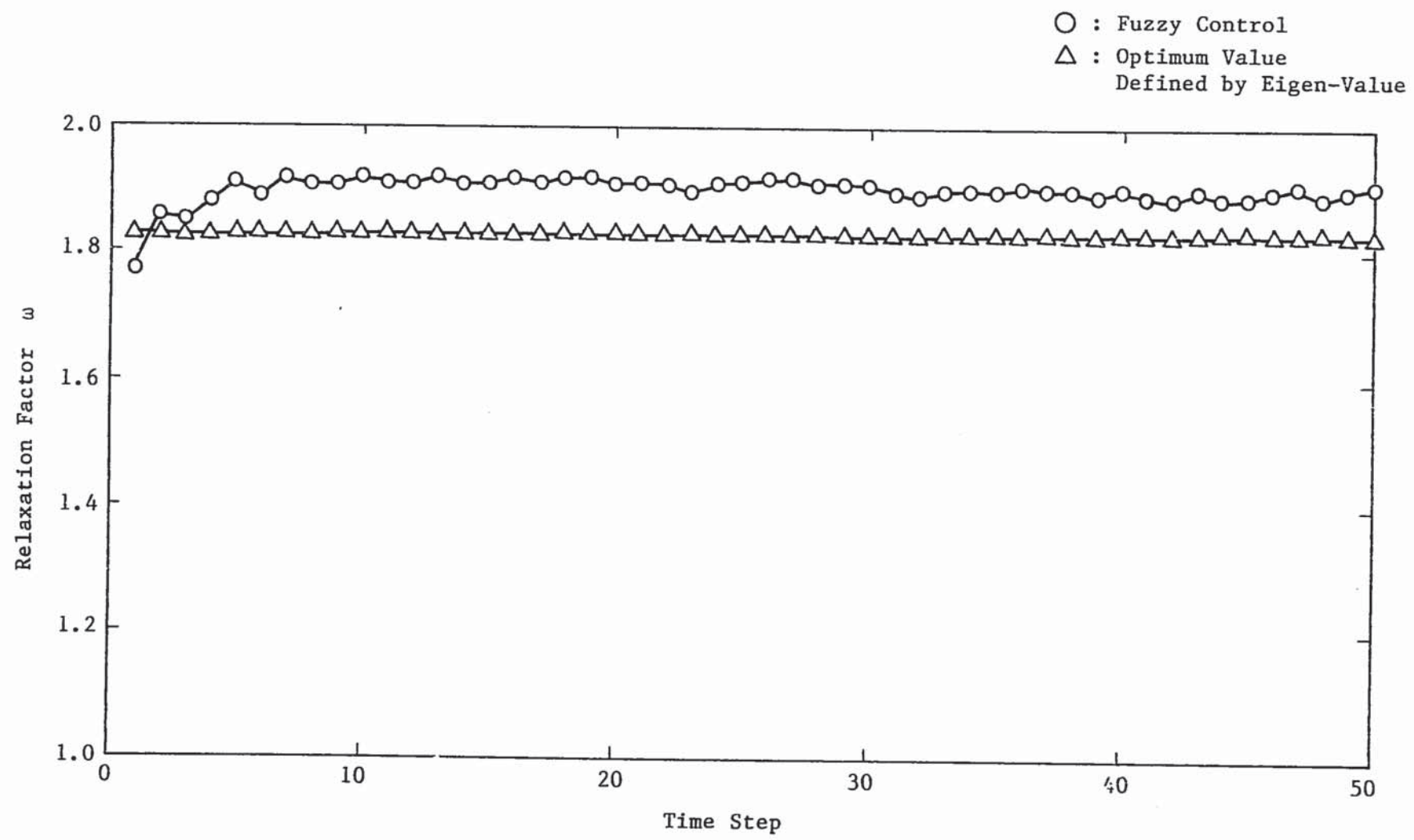


Fig. 4.14 Transition of Relaxation Factor ω under Transient Problem with MICE Scheme

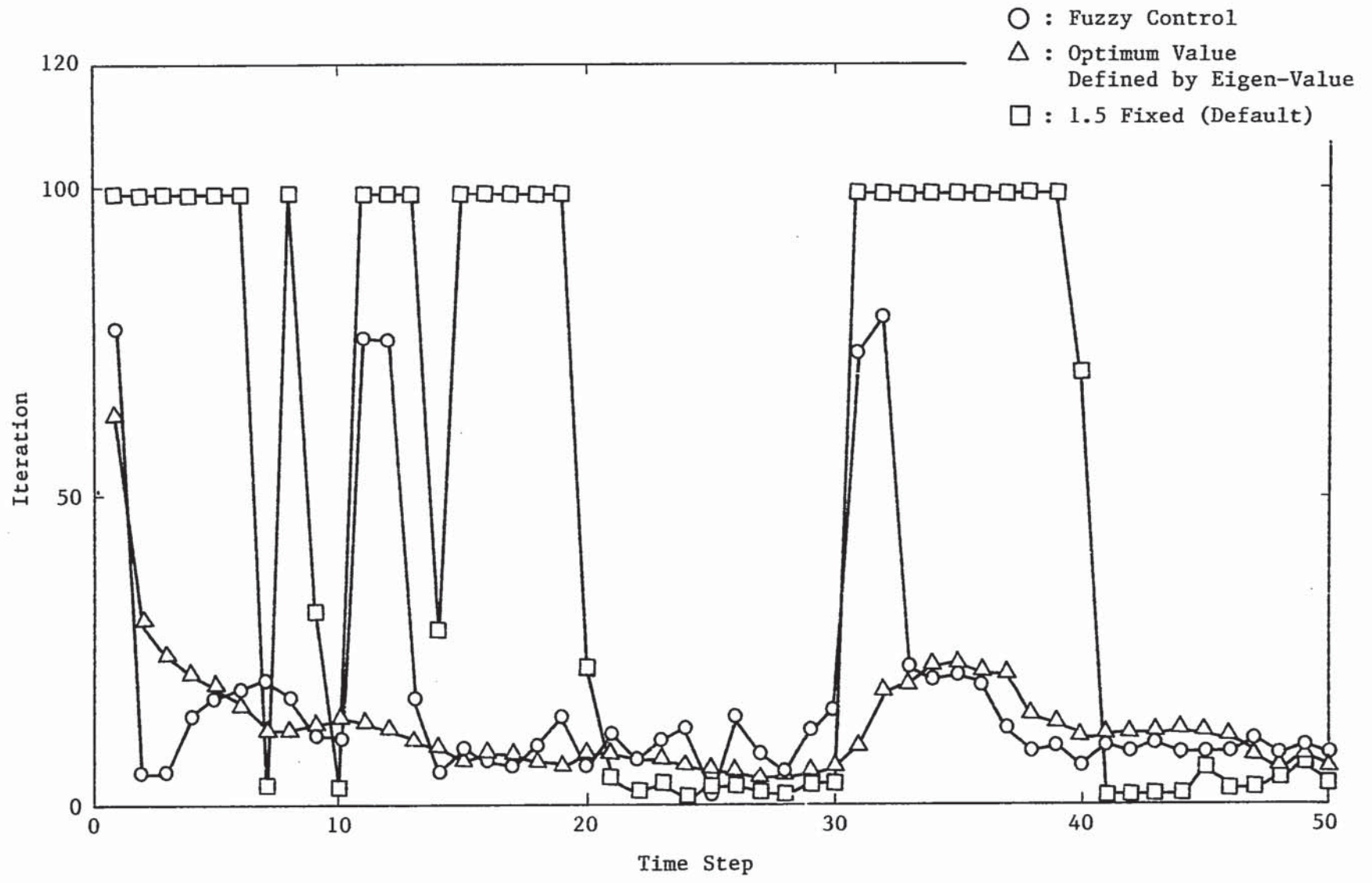


Fig. 4.15 Transition of Pressure Iteration Number under Transient Problem with MICE Scheme

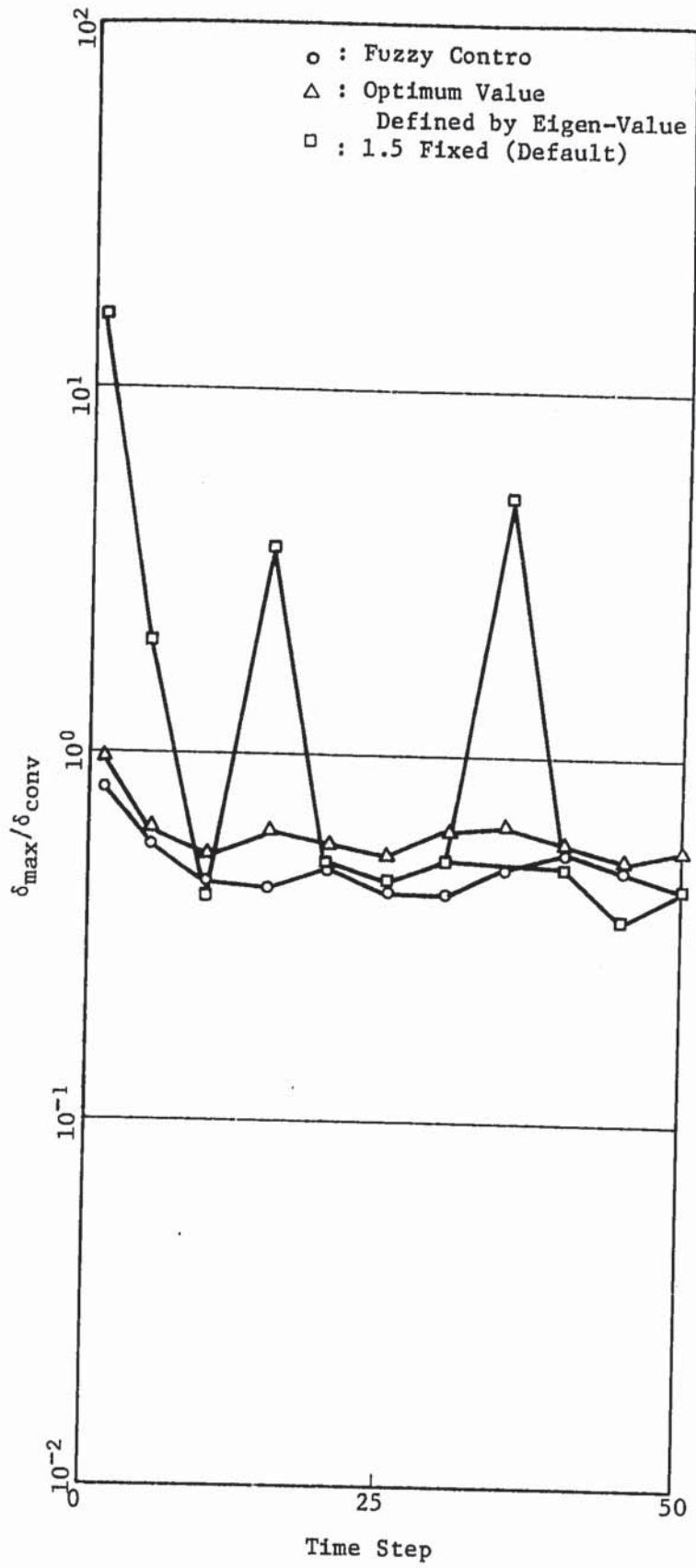


Fig. 4.16 Transition of Convergency of Mass Balance

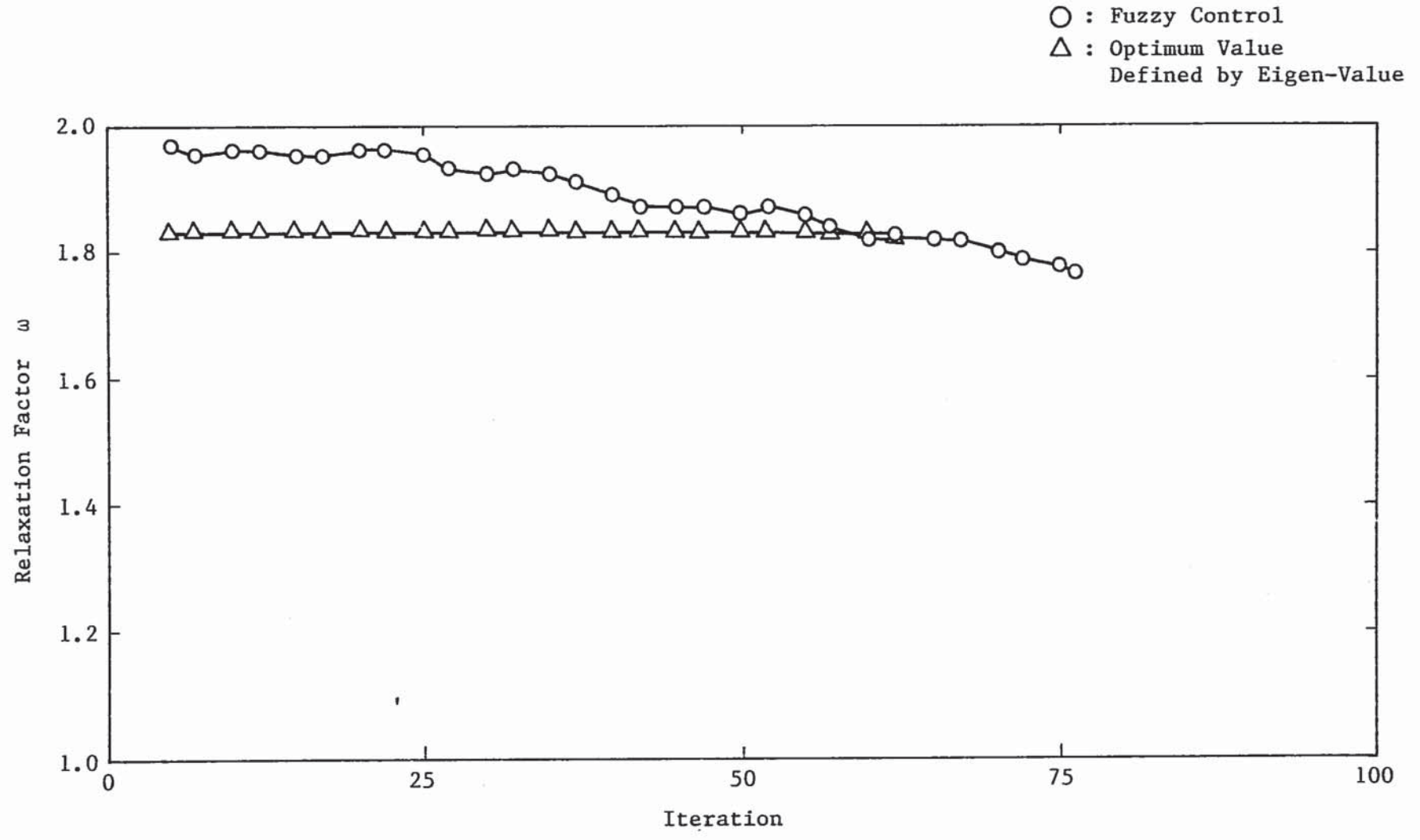


Fig. 4.17 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process(#1) under Transition Problem with MICE Scheme

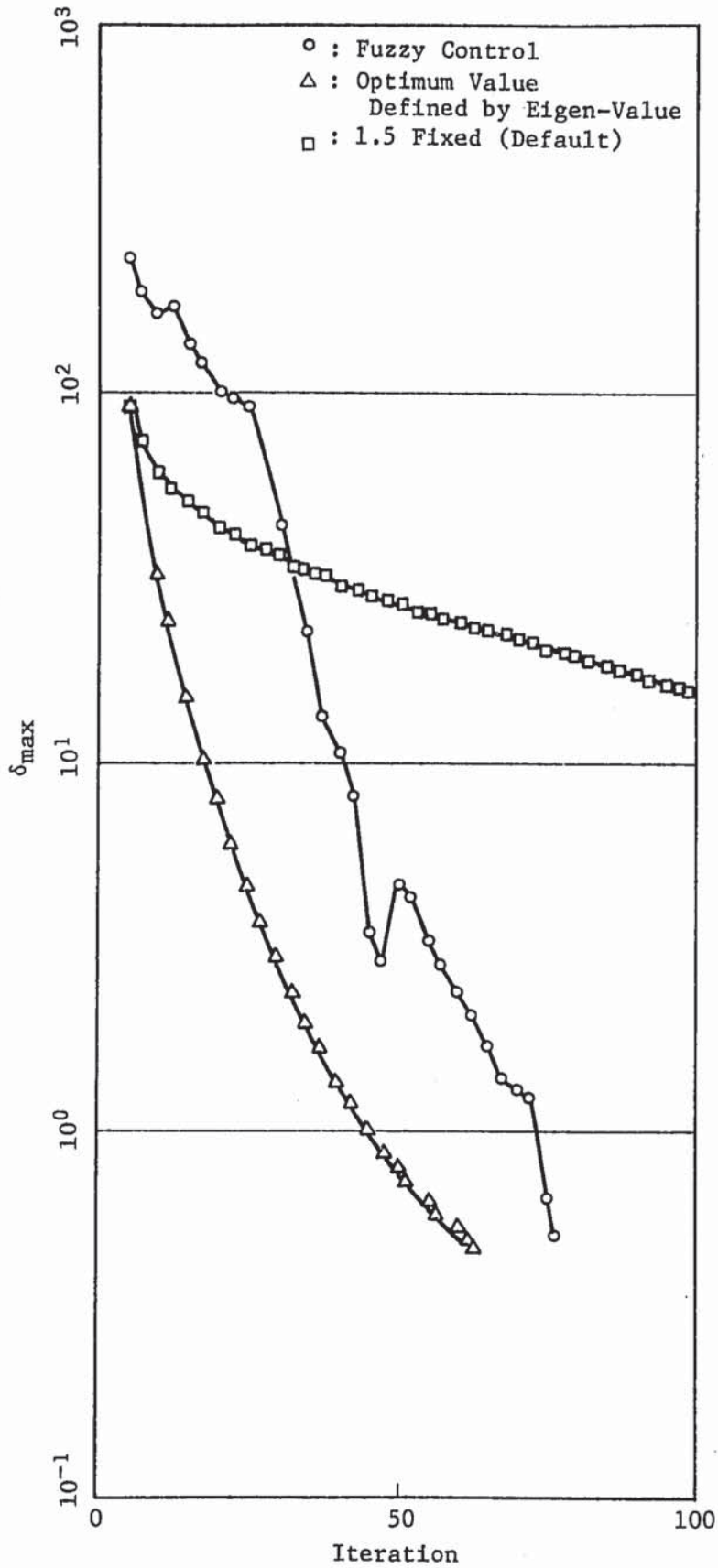


Fig. 4.18 Comparison of Convergency of Mass Residual on One Time Step Process (#1) under Transient Problem with MICE Scheme

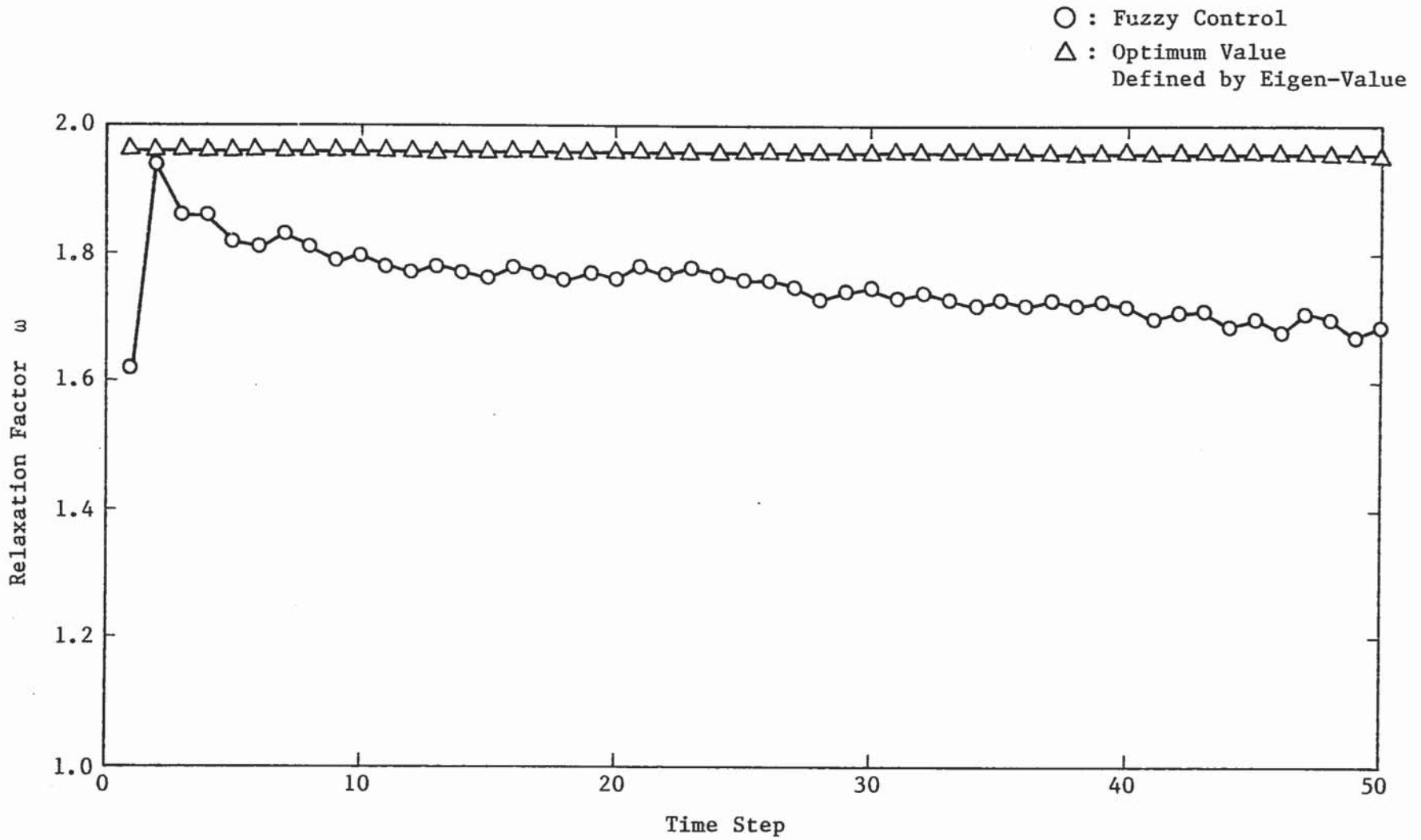


Fig. 4.19 Transition of Relaxation Factor ω under Steady-State Problem with MICE Scheme

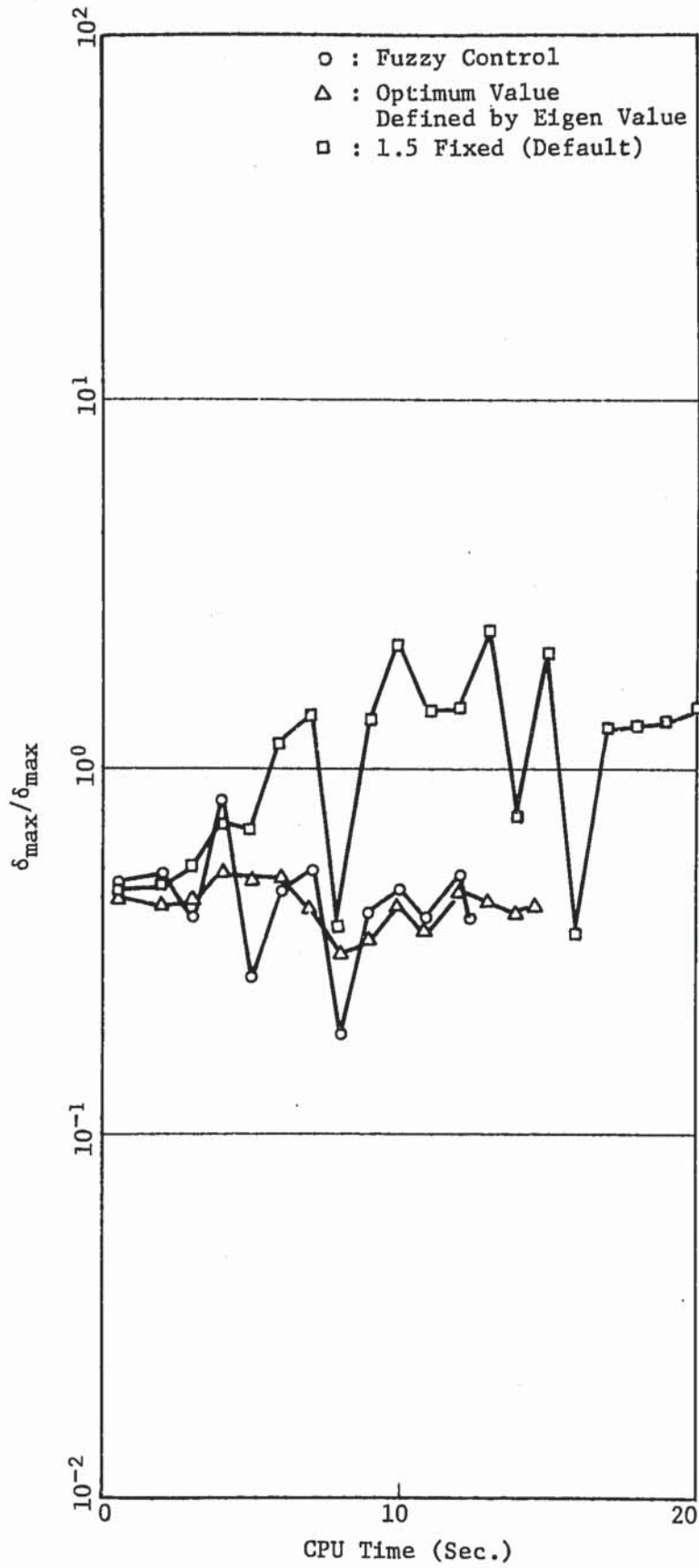


Fig. 4.20 Transition of Convergency of Mass Balance under Steady-State Problem with MICE Scheme

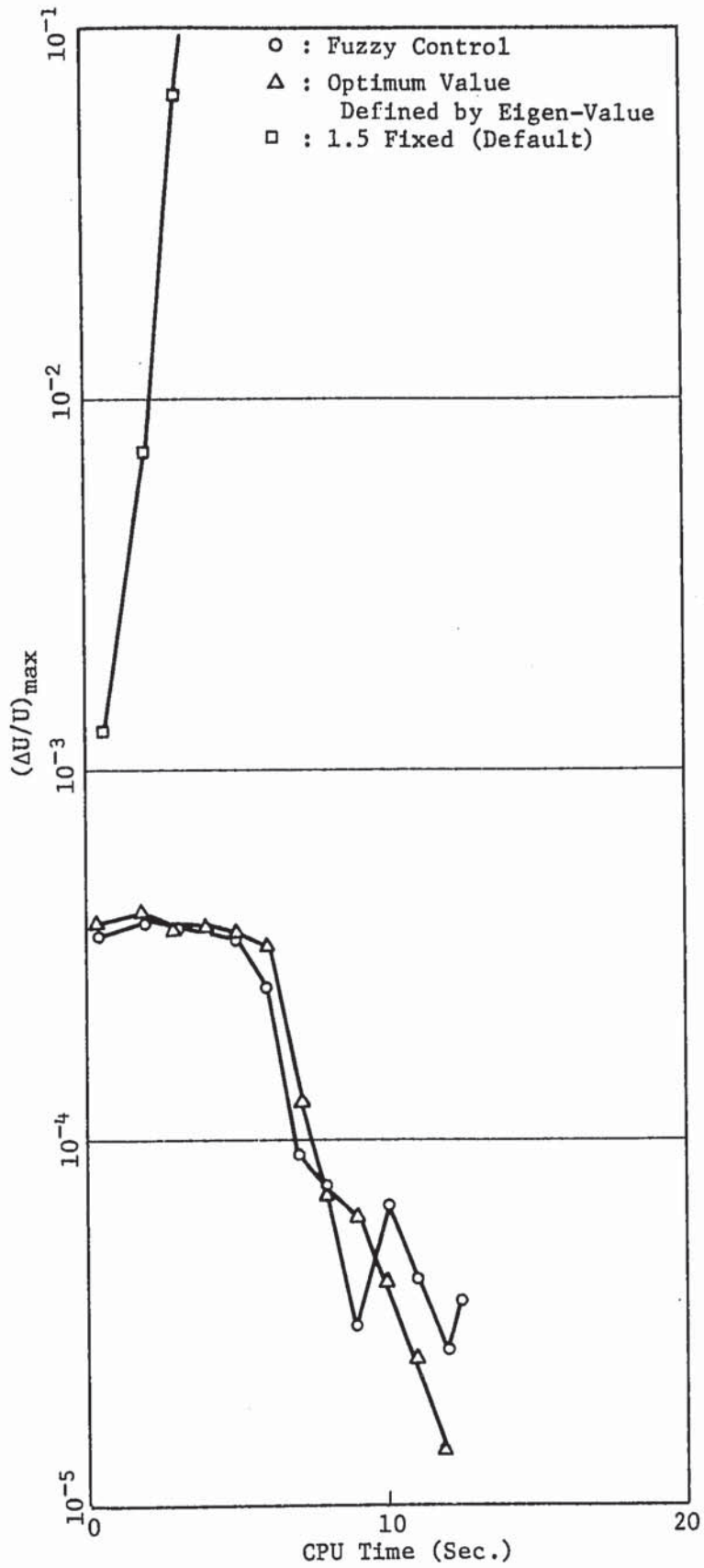


Fig. 4.21 Comparison of Convergence of $(\Delta U/U)$ under Steady-State Problem with MICE Scheme

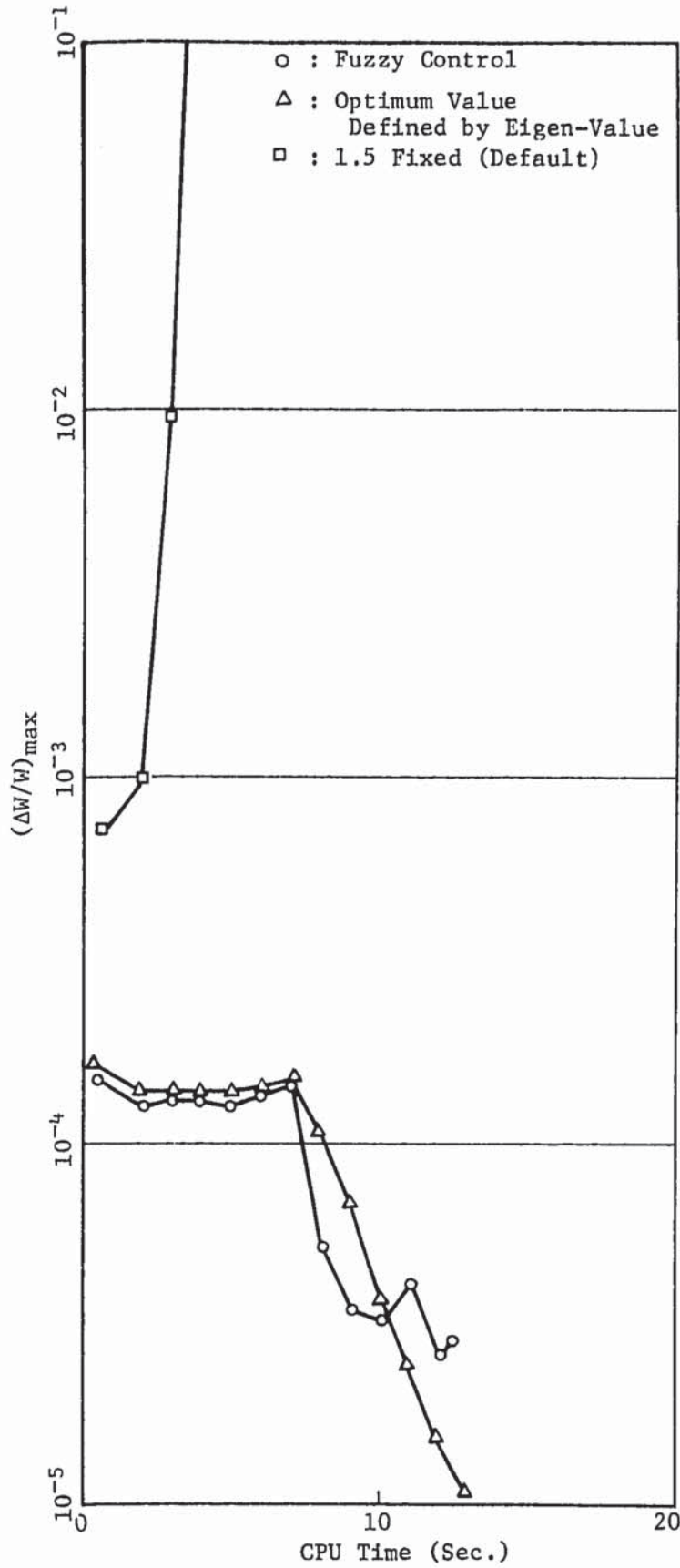


Fig. 4.22 Comparison of Concergency of $(\Delta W/W)$ under Steady-State Problem with MICE Scheme

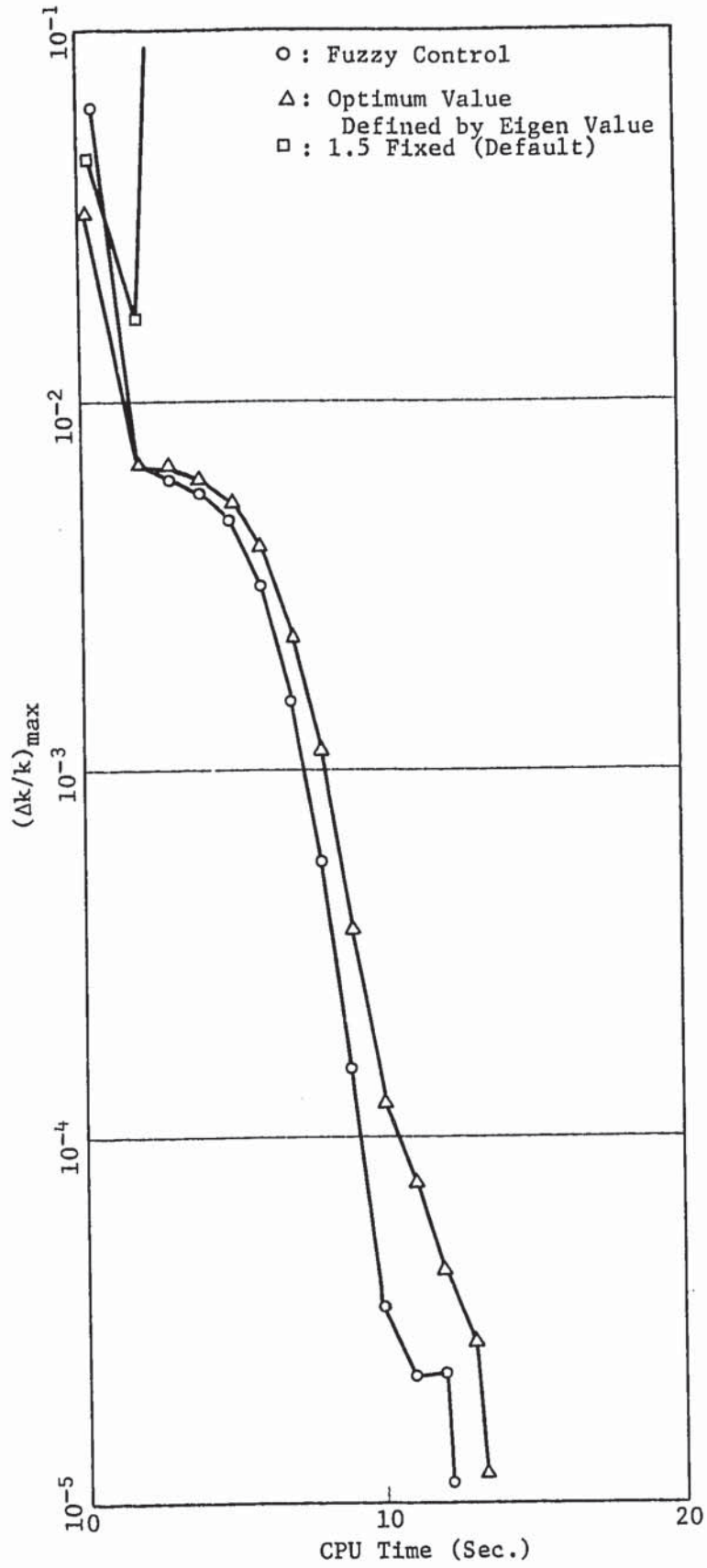


Fig. 4.23 Comparison of Concergency of $(\Delta k/k)$ under Steady-State Problem with MICE Scheme

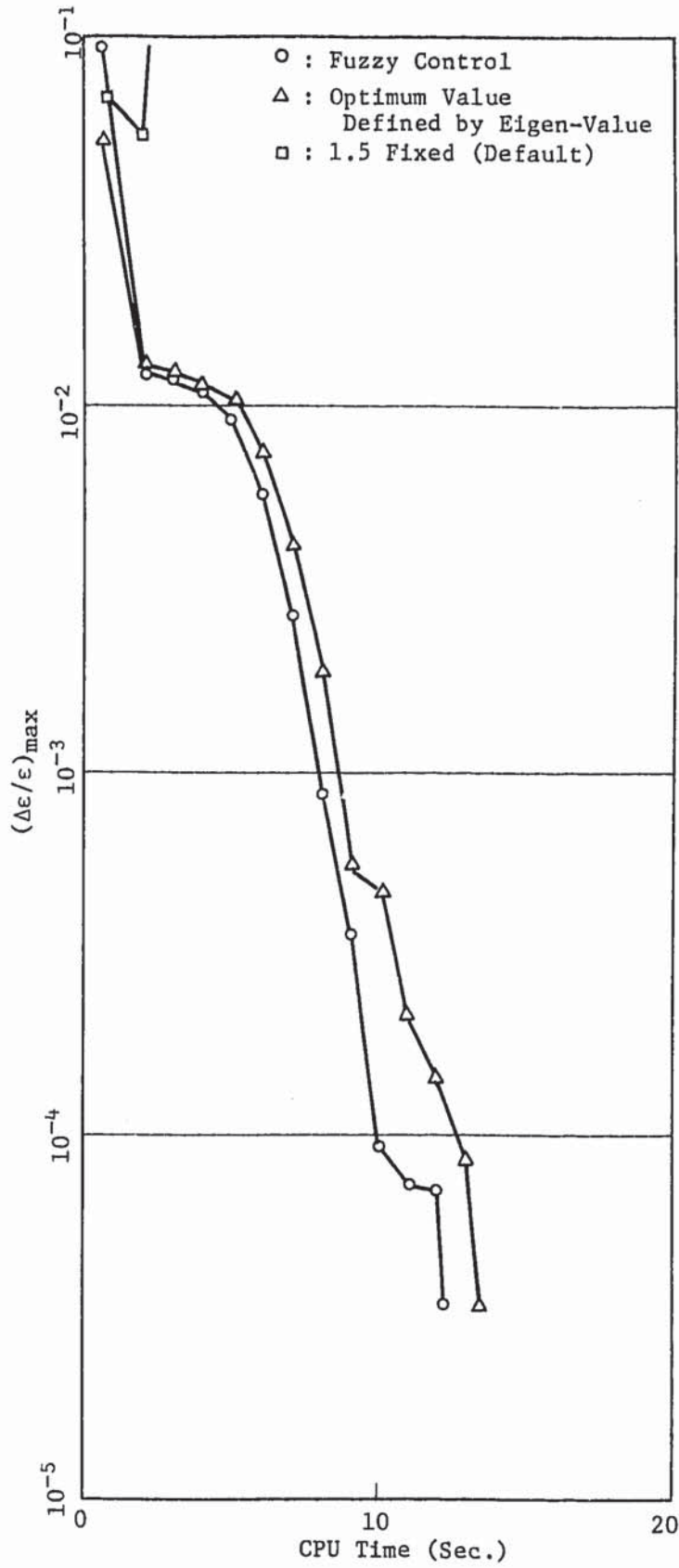


Fig. 4.24 Comparison of Convergence of $(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max}$ under Steady-State Problem with MICE Scheme

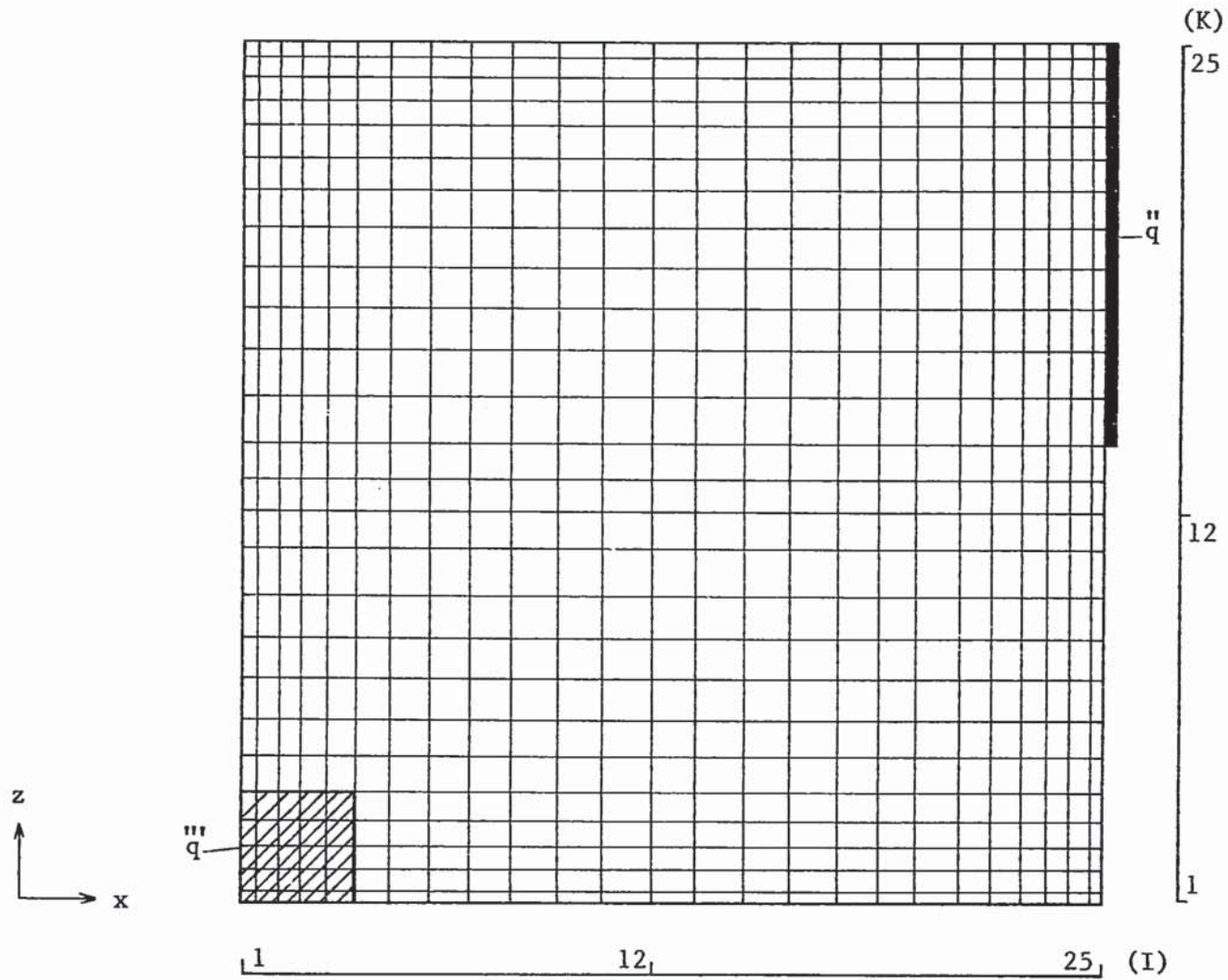


Fig. 4.25 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)


```

*****
***
***              THIS DATA IS FOR THE AQUA SAMPLE RUN
***
***              WITH M-ICE SCHEME
***
***          - THE THERMAL CAVITY FLOW WITH HEATING -
***
*****
***
***              DATE : JUL. 07, '87
***
*****
%GEOM  ITURKE= 0, IFPCG= 0,
       IGEDM= 0, NL1=1500, NM1= 625, ISYMCH=2, IFITEN=2,
       IFRES=1, IMAX=25, JMAX=1,   KMAX=25, NSURF= 7,
       DX=0.0050, 2*0.0084, 0.0109, 0.0117, 0.0134, 2*0.0151,
           0.0167, 7*0.0184, 0.0167, 2*0.0151, 0.0134, 0.0117,
           0.0109, 2*0.0084, 0.0050,
       DY=0.100000,
       DZ=0.0050, 2*0.0084, 0.0109, 0.0117, 0.0134, 2*0.0151,
           0.0167, 7*0.0184, 0.0167, 2*0.0151, 0.0134, 0.0117,
           0.0109, 2*0.0084, 0.0050,
       XNORML= 1. , -1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
       YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , -1. ,
       ZNORML= 0. , 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. ,

&END
REG -1.      1  1  1  1  1  25  1
REG -1.     25 25  1  1  1  13  2
REG -1.     25 25  1  1  14  25  3
REG -1.      1 25  1  1  1  1  4
REG -1.      1 25  1  1  25  25  5
REG -1.      1 25  1  1  1  25  6
REG -1.      1 25  1  1  1  25  7
END
&DATA  IFENER=1 ,NTHCON=-1,NTMAX= 50,IDTIME=0,DT=0.1,
       IDISP=1,
       IFMMO=2,
       IFMEN=0,
       EPS1=1.0E-07,DCONV2=-1.0,
       IOPTOM= 1,OMEGA=1.5,ITHXP=500,
       IFPROP=1,
       FCOH=0.27697E6, FC1H=1014.0,
       FCORO=1.85048, FC1RO=-0.00248,
       FCOK=0.07627,  FC1K=0.0,
       FCOMU=5.266E-5, FC1MU=0.0,
       FCTLO= 20.0,  FCTH1=100.0,
       IT=1,1,TREST=15.,
       KFLOW= 1, 1, 1, 1, 1, -3, -3,
       KTEMP=400,400,200,400,400,400,400,
       TEMPO= 20.00,GRAVZ= -9.807 ,
       NTPRNT= -9999,
       NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,

&END
QBN -100.00   25 25  1  1  14  25
END
UL  0.00001   1 25  1  1  1  25
QSOU 100.000  1  5  1  1  1  5
END

```

Fig. 4.26 Input Data for Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)

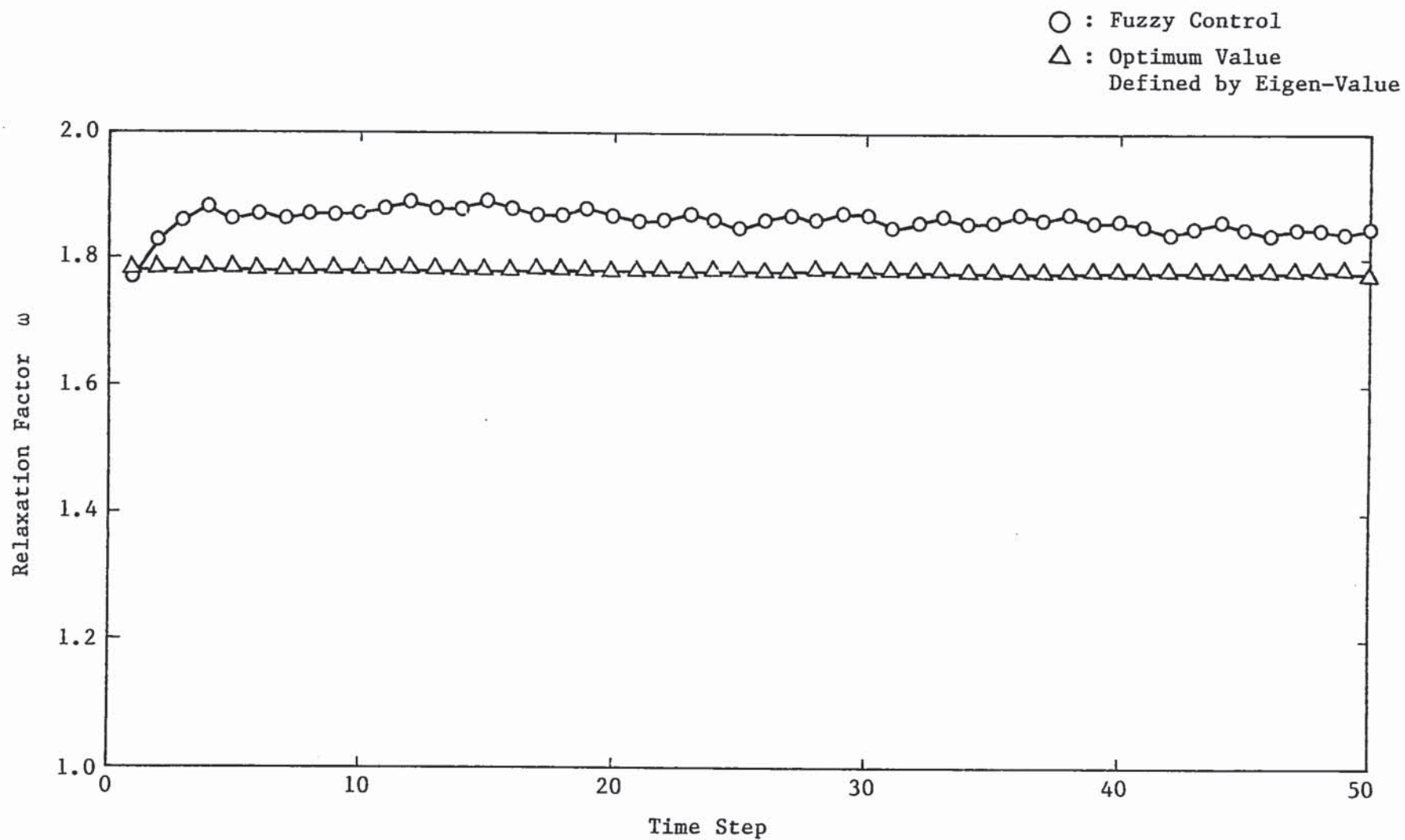


Fig. 4.27 Transition of Relaxation Factor ω under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)

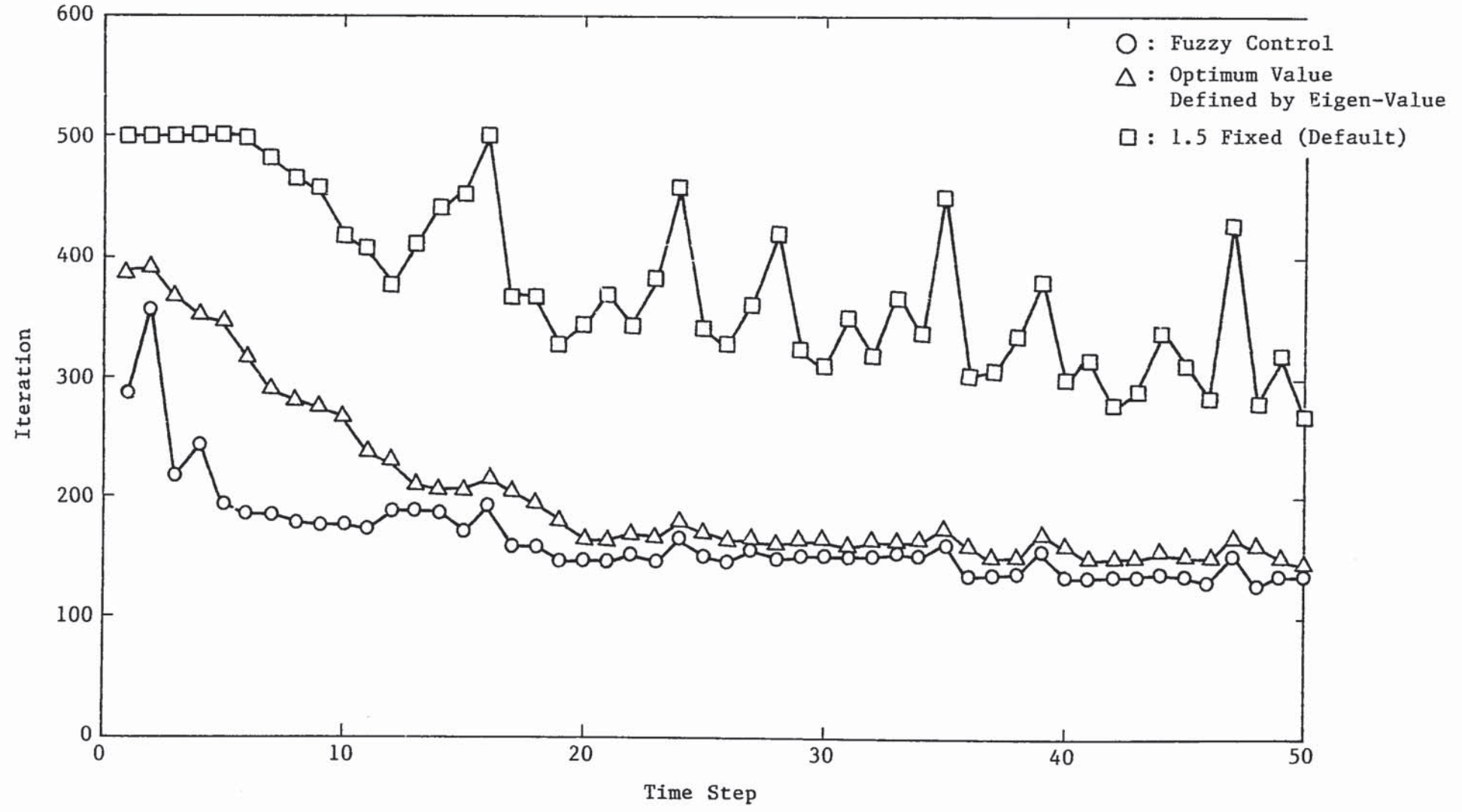


Fig. 4.28 Transition of Pressure Iteration Number under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)

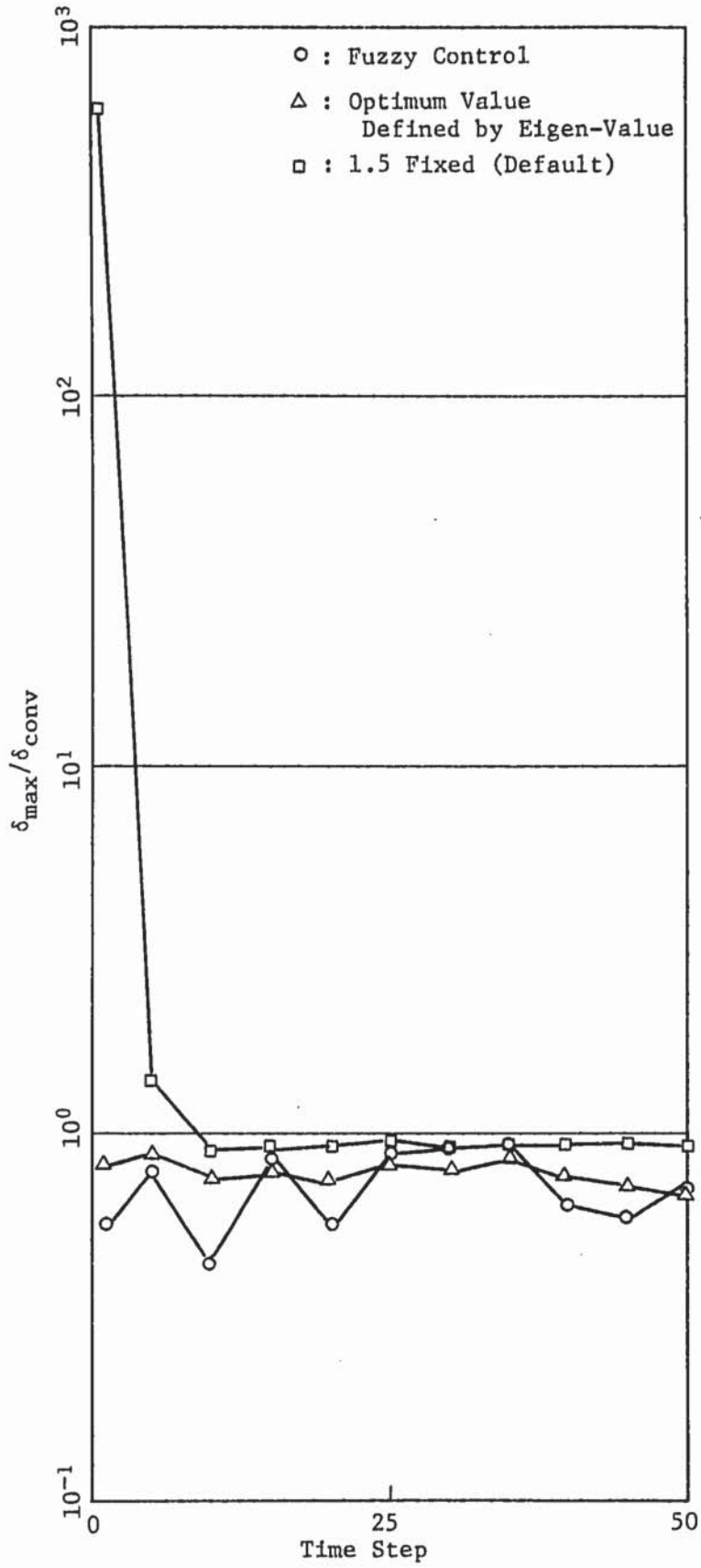


Fig. 4.29 Transition of Convergency of Mass Balance under Natural Circulation

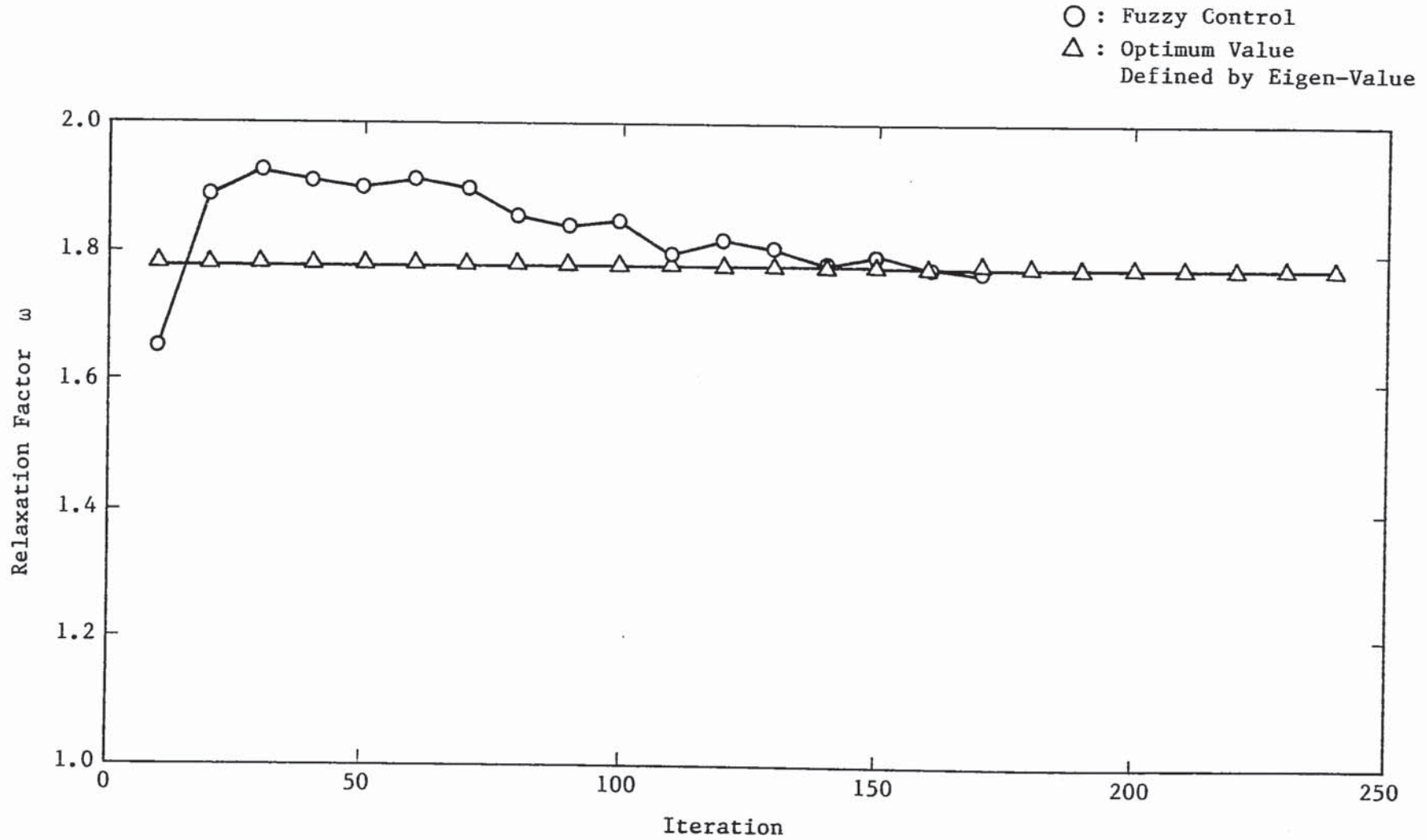


Fig. 4.30 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process(#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)

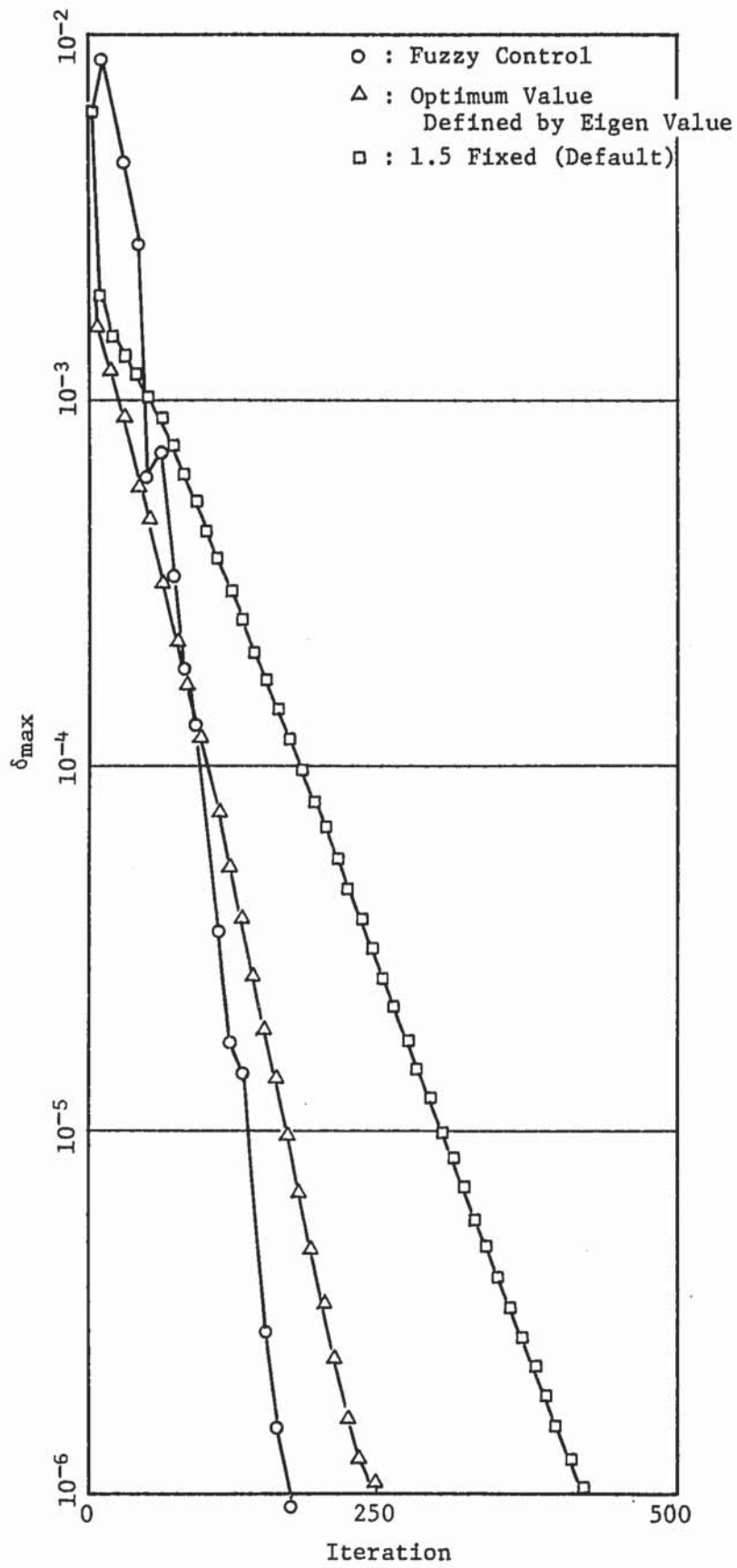


Fig. 4.31 Comparison of Convergency of Mass Residual on One Time Step Process (#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Fine)

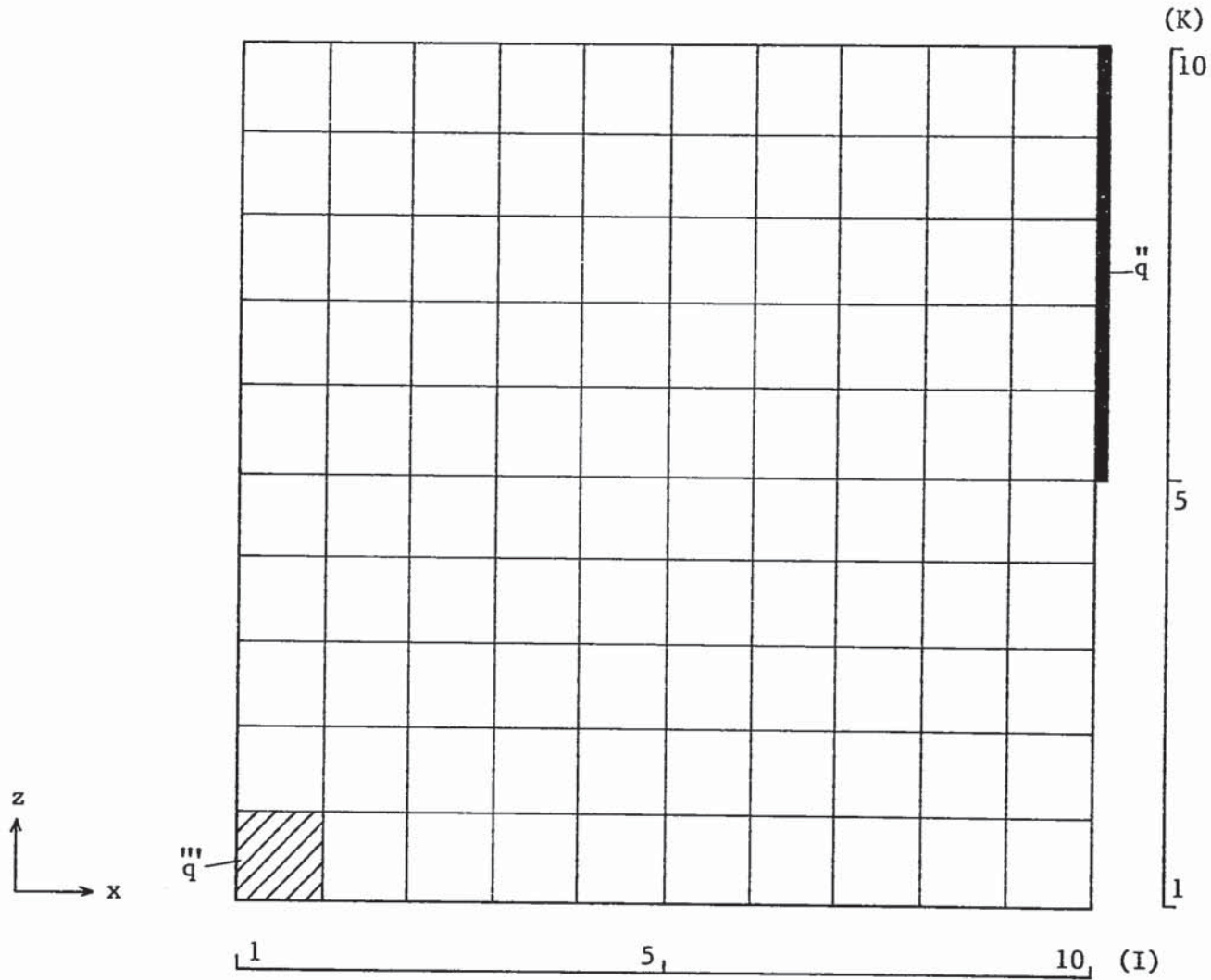


Fig. 4.32 Mesh Arrangement for Evaluation of The Fuzzy Controller on Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

```

*****
***
***           THIS DATA IS FOR THE AQUA SAMPLE RUN           ***
***
***           WITH M-ICE SCHEME                               ***
***
***           - THE THERMAL CAVITY FLOW WITH HEATING -       ***
***
*****
***
***                                     DATE : JUL. 08, '87     ***
***
*****
&GEOM  ITURKE= 0, IFPCG= 0,
        IGEOM= 0, NL1=1500, NM1= 625, ISYMCH=2, IFITEN=2,
        IFRES=1, IMAX=10, JMAX=1, KMAX=10, NSURF= 7,
        DX=10*0.03381997,-
        DY=0.100000,
        DZ=10*0.03381997,
        XNORML= 1. ,-1. ,-1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 1. ,-1. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 0. , 1. ,-1. , 0. , 0. ,

&END
REG -1.      1  1  1  1  1  10  1
REG -1.     10 10  1  1  1  5  2
REG -1.     10 10  1  1  6 10  3
REG -1.      1 10  1  1  1  1  4
REG -1.      1 10  1  1 10 10  5
REG -1.      1 10  1  1  1 10  6
REG -1.      1 10  1  1  1 10  7
END
&DATA  IFENER=1 ,NTHCON=-1,NTHAX= 50,LDTIME=0,DT=0.1,
        IDISP=1,
        IFMHO=2,
        IFMEN=0,
        EPS1=1.0E-07,DCONV2=-1.0,
        IOPTOM= 1,OMEGA=1.1,ITHAXP=500,
        ITIBUG=0,
        IFPROP=1,
        FCOH=0.27697E6, FC1H=1014.0,
        FCORO=1.85048, FC1RO=-0.00248,
        FCOK=0.07627, FC1K=0.0,
        FCOMU=5.266E-5, FC1MU=0.0,
        FCTLO= 20.0, FCTHI=100.0,
        IT=1,1,TREST=15.,
        KFLOW= 1, 1, 1, 1, 1, -3, -3,
        KTEMP=400,400,200,400,400,400,400,
        TEMPO= 20.00,GRAVZ= -9.807 ,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,

&END
QBN -100.00   10 10  1  1  6 10
END
UL  0.00001   1 10  1  1  1 10
QSOU 100.000  1  1  1  1  1  1
END

```

Fig. 4.33 Input Data for Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

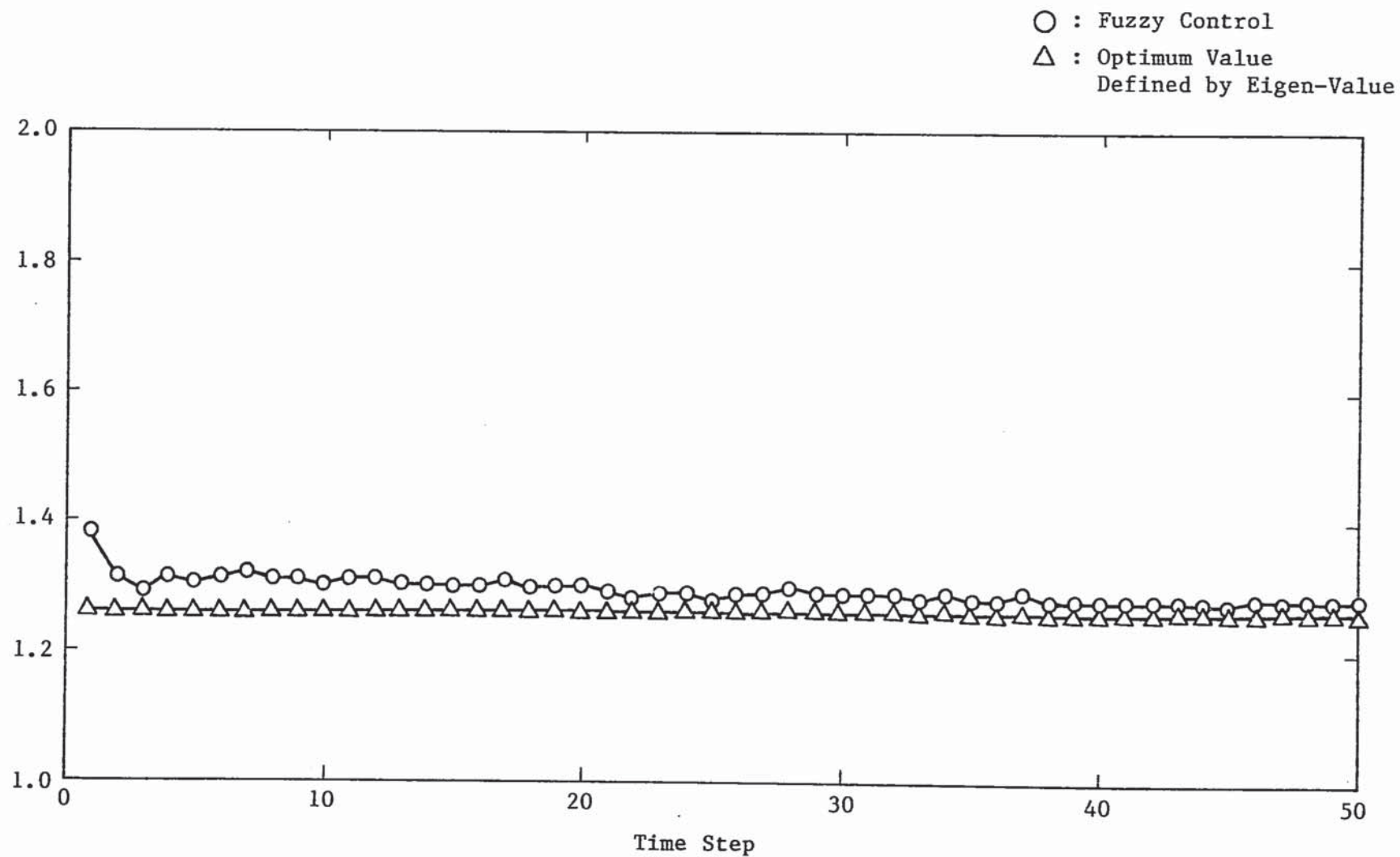


Fig. 4.34 Transition of Relaxation Factor ω under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

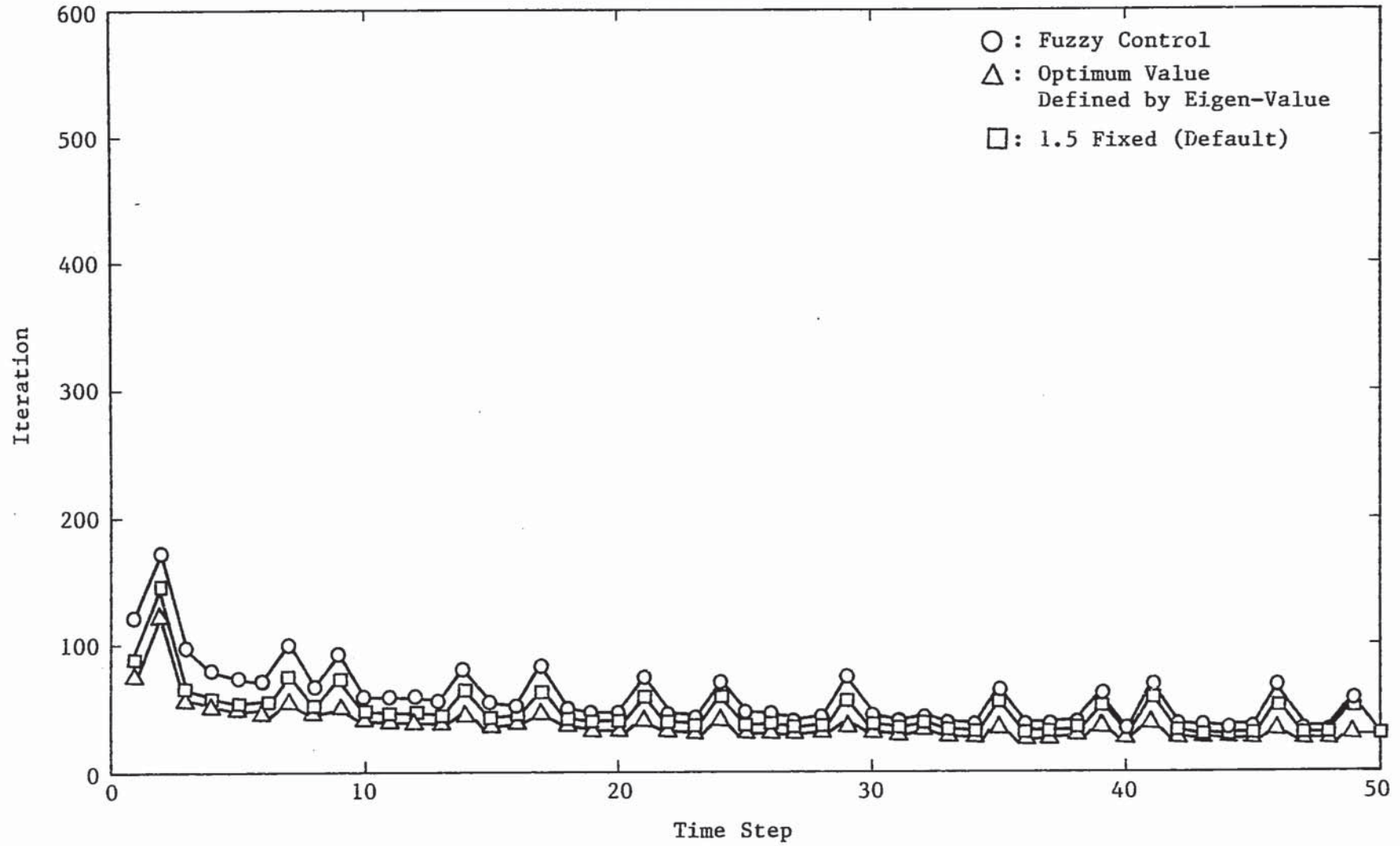


Fig. 4.35 Transition of Pressure Iteration Number under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

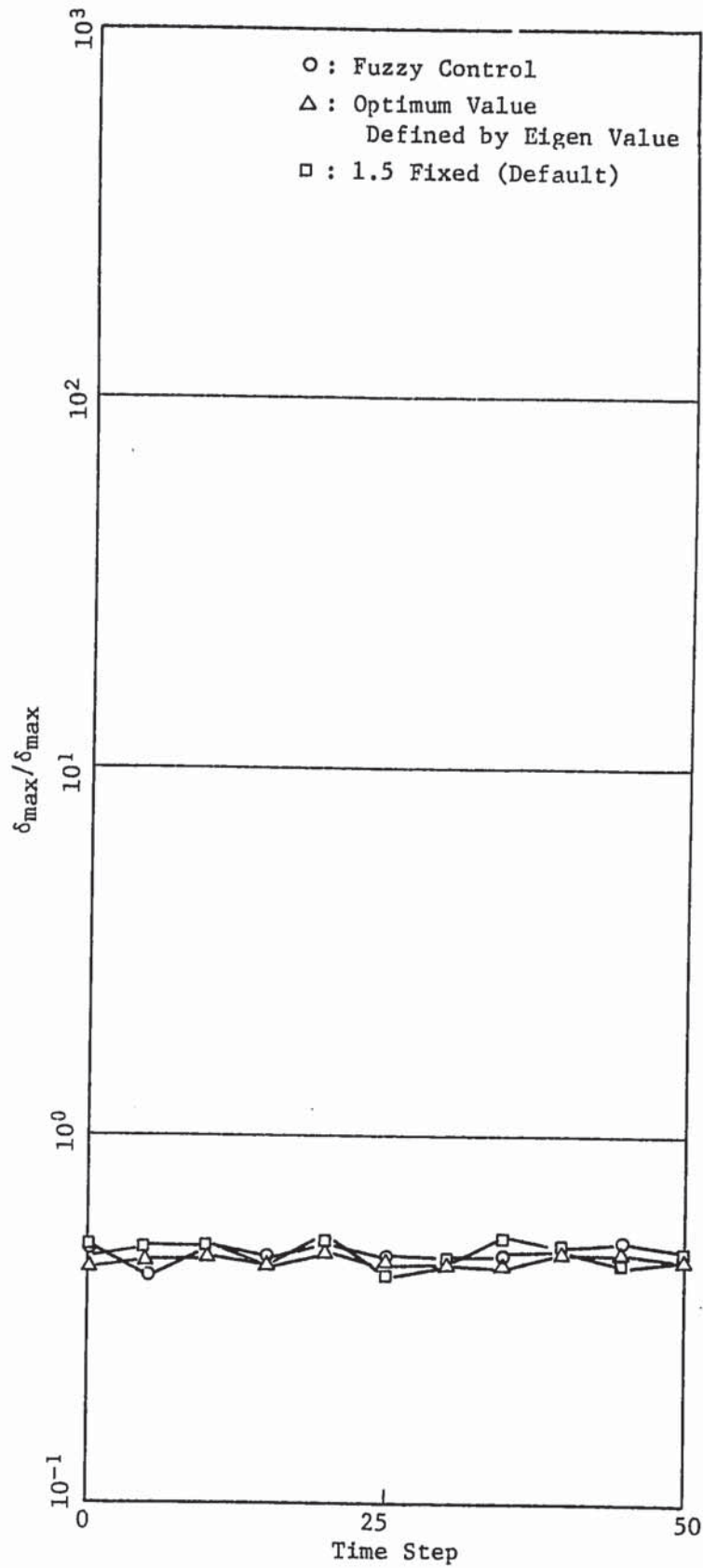


Fig. 4.36 Transition of Convergency of Mass Balance under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

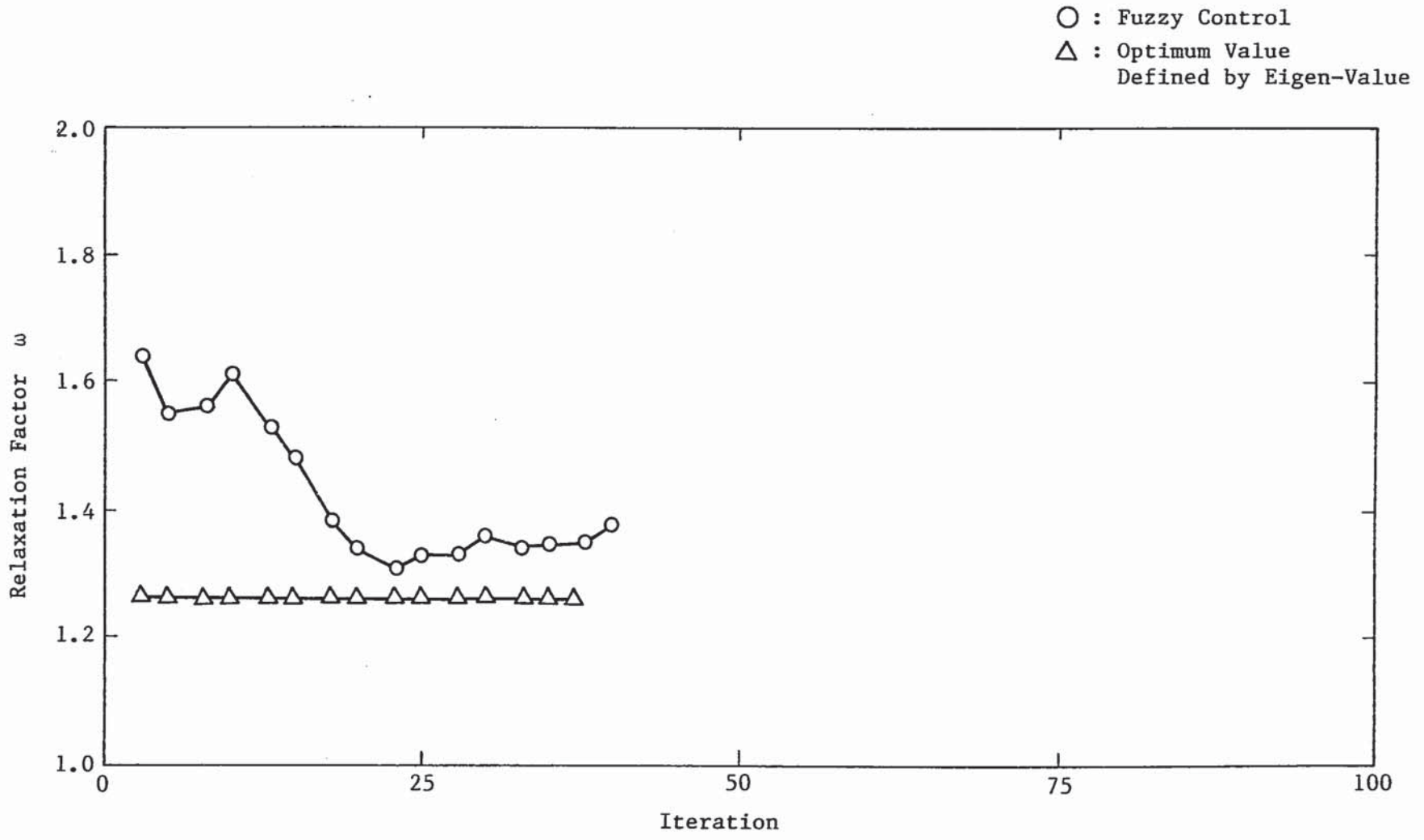


Fig. 4.37 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process(#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

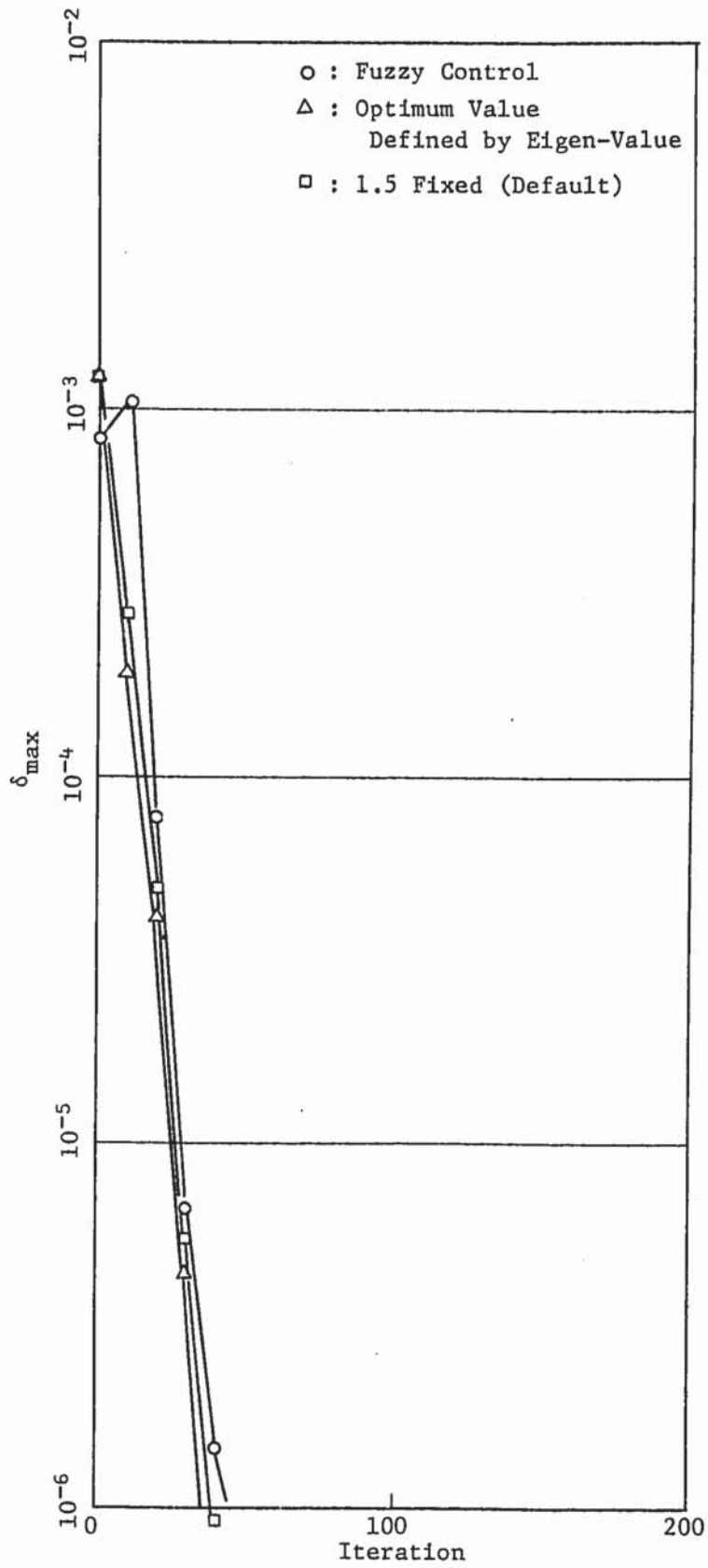


Fig. 4.38 Comparison of Convergency of Mass Residual on One Time Step Process (#1) under Natural Circulation Problem with MICE Scheme (Coarse)

```

*****
***                               ***
***   THIS DATA IS FOR THE CHECK OF FUZZY CONTROLLER   ***
***                               ***
***   WITH SIMPLEST SCHEME                               ***
***                               ***
***   --- STEADY-STATE RUN ---                             ***
***                               ***
***                               ***
***                               ***
***                               ***
***   DATE : JUL. 28, '87                                   ***
***                               ***
*****
&GEOM  ITURKE= 0, IFPCG= 0,
        IGEOM= 0, NL1= 500, NM1= 200, ISYCH=3, IFITEN=3,
        IFRES=1, IMAX=20,, JMAX=1, KMAX=10, NSURF= 6,
        DX=20*0.500      ,DY=0.100000,   DZ=10*0.050,
        XNORML= 1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , -1. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. ,

&END
REG -1.      1  1  1  1  1  10  1
REG -1.      20 20  1  1  1  10  2
REG -1.      1  20  1  1  1  1  3
REG -1.      1  20  1  1  10  10  4
REG -1.      1  20  1  1  1  10  5
REG -1.      1  20  1  1  1  10  6
END
&DATA  IFENER= 0,NTHCON= -1,NTMAX=9999,DT=1.000,
        IDTIME= 0,RDTIME=1.000,
        IOPTOM=0,OMEGA=1.8,
        IFMFO=2,
        IFMEN=0,
        IFMTB=1,
        IDISP=1,
        CINK1=3.300E-03,
        CINE1=1.619E-02,
        CINK2=3.300E-03,
        CINE2=1.619E-02,
        KEITER=1,HYDIN=1.0E-01,
        IT= 1,TREST=15.,
        KFLOW=  1,  -2,  1,  1,  -3,  -3,
        KTEMP=  1,  400, 400, 400, 400, 400,
        TEMPO=  20.,GRAVZ= -9.807 ,
        TEMP(1)=20.,VELOC(1)=0.00100,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,14201,20201,21201,
&END
END
UL  0.00100      1  20  1  1  1  10
END

```

Fig. 4.39 Input Data for Forced-Convection Problem with SIMPLEST Scheme

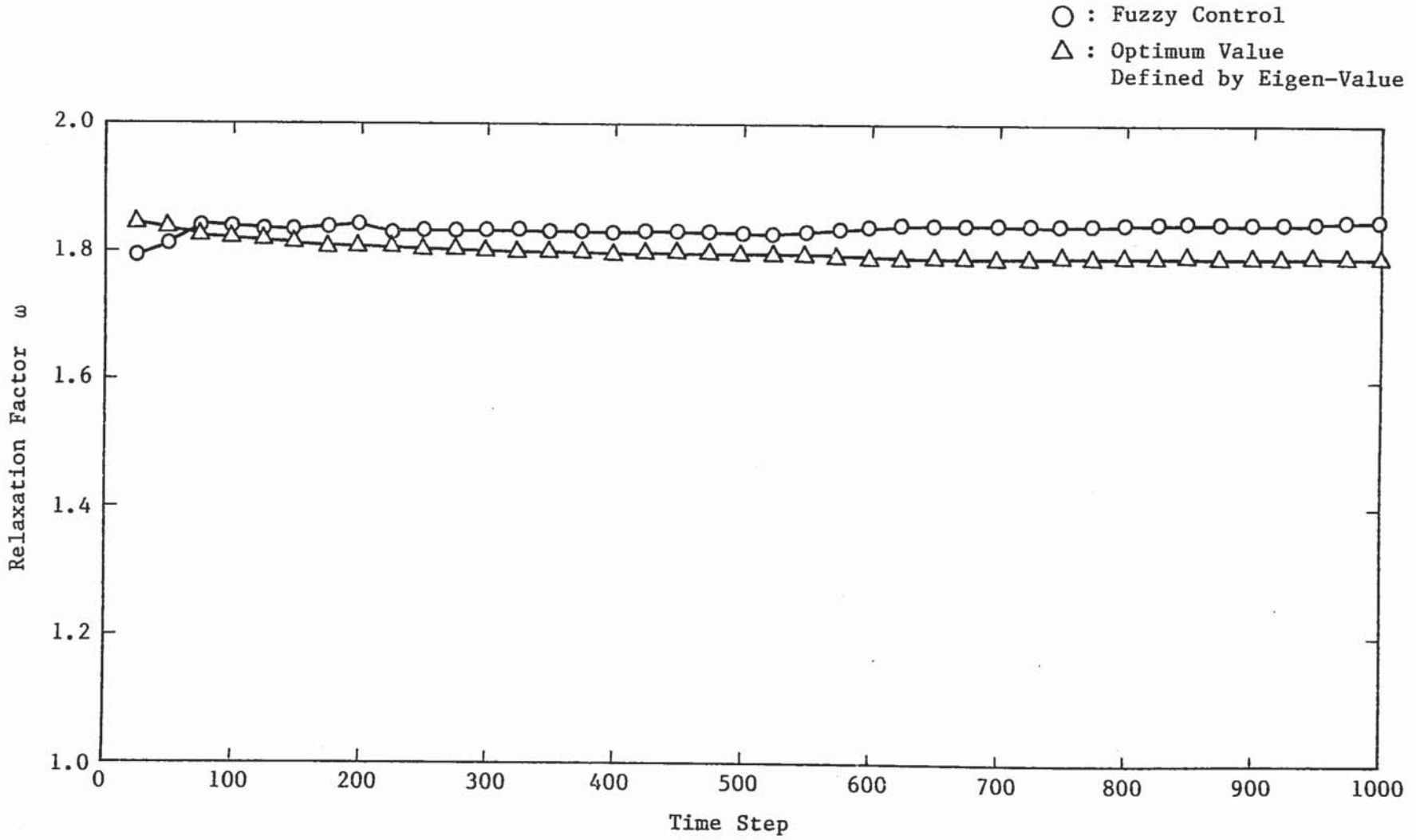


Fig. 4.40 Transition of Relaxation Factor ω under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme

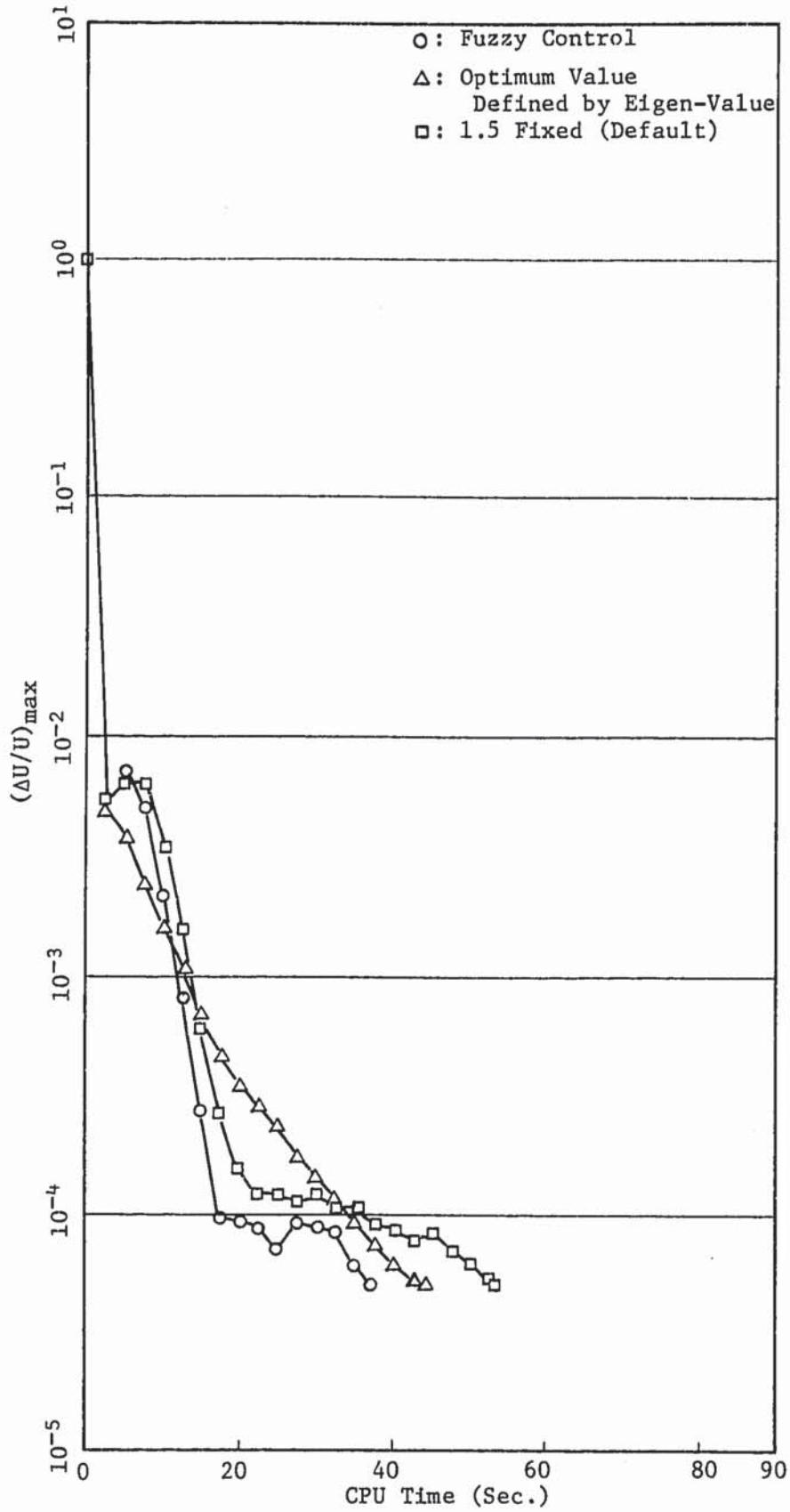


Fig. 4.41 Comparison of Concergency of $(\Delta U/U)_{\max}$ under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme

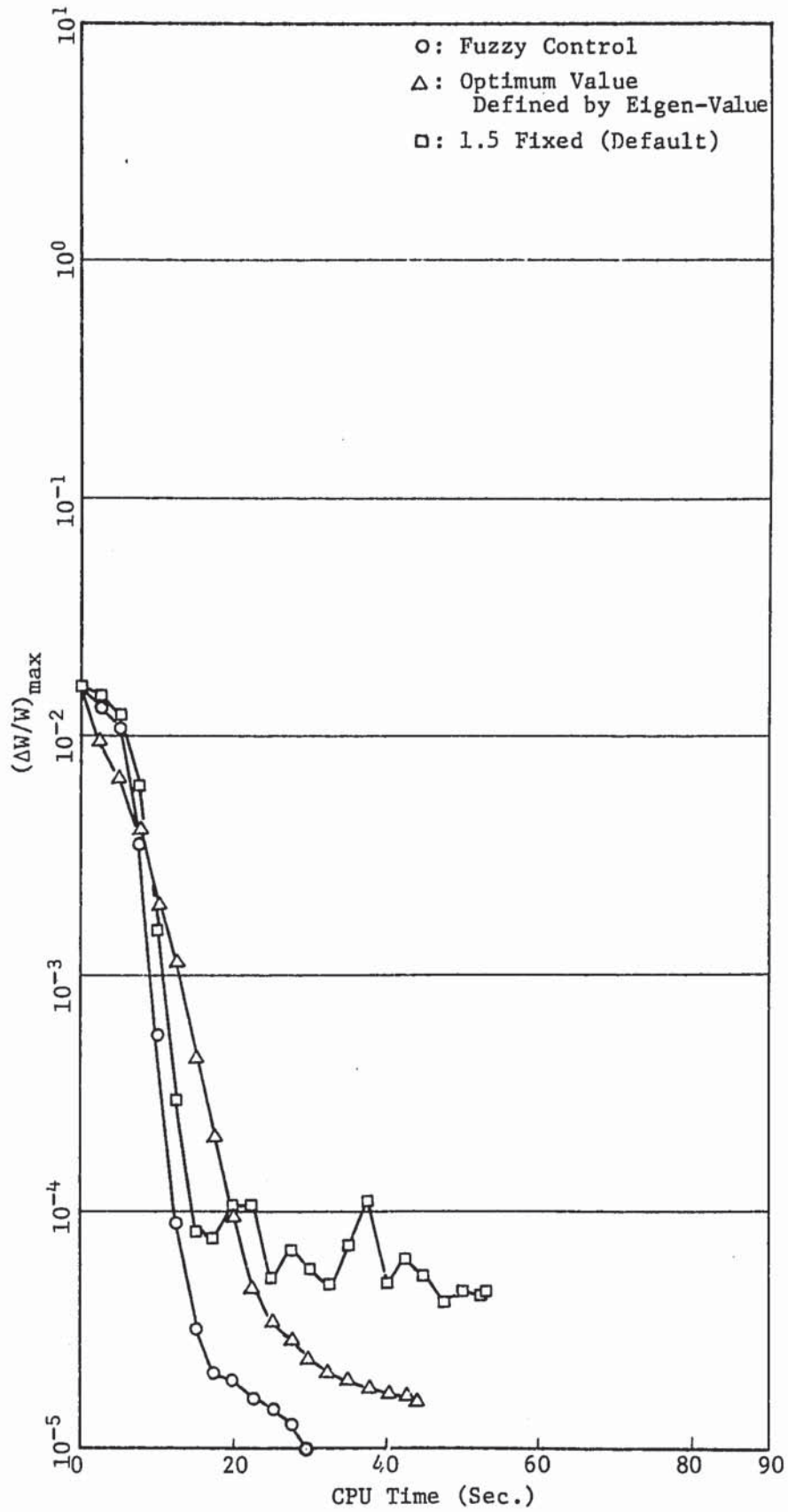


Fig. 4.42 Comparison of Convergence of $(\Delta W/W)_{\max}$ under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme

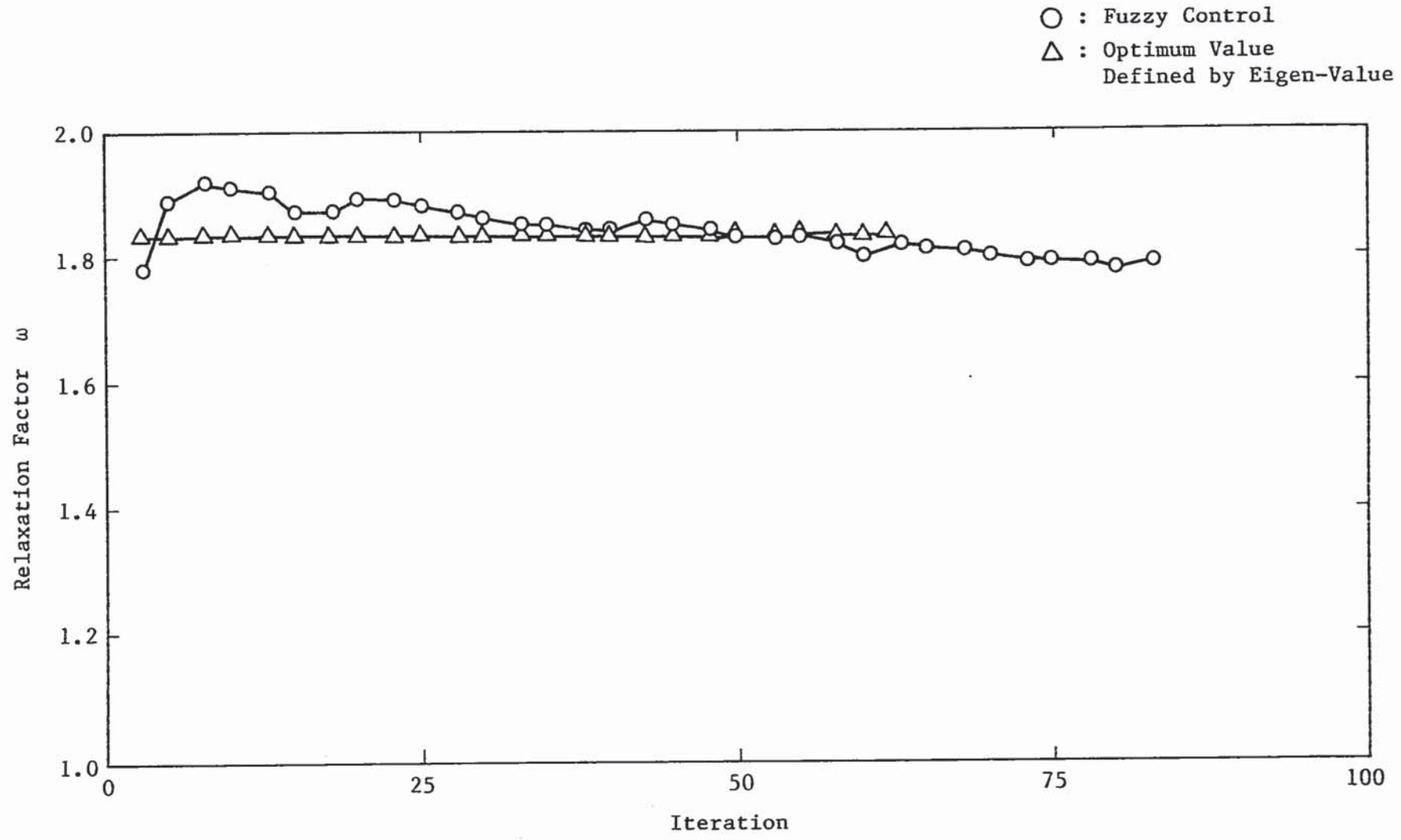


Fig. 4.43 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process(#1) under Forced Convection Problem with SIMPLEST Scheme

```

*****
***
***          THIS DATA IS FOR THE AQUA SAMPLE RUN          ***
***
***          WITH SIMPLEST SCHEME                          ***
***
*****
***
***          DATE : JUL. 29, '87                            ***
***
*****
&GEOM  ITURKE= 0, IFPCG= 0,
        IGEOM= 0, NL1=1500, NM1= 625, ISYMCH=3, IFITEN=3,
        IFRES=1, IMAX=25, JMAX=1, KMAX=25, NSURF= 6,
        DX=0.0050, 2*0.0084, 0.0109, 0.0117, 0.0134, 2*0.0151,
           0.0167, 7*0.0184, 0.0167, 2*0.0151, 0.0134, 0.0117,
           0.0109, 2*0.0084, 0.0050,
        DY=0.100000,
        DZ=0.0050, 2*0.0084, 0.0109, 0.0117, 0.0134, 2*0.0151,
           0.0167, 7*0.0184, 0.0167, 2*0.0151, 0.0134, 0.0117,
           0.0109, 2*0.0084, 0.0050,
        XNORML= 1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , -1. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. ,
&END
REG -1.      1  1  1  1  1  25  1
REG -1.     25 25  1  1  1  25  2
REG -1.      1 25  1  1  1  1  3
REG -1.      1 25  1  1 25 25  4
REG -1.      1 25  1  1  1 25  5
REG -1.      1 25  1  1  1 25  6
END
&DATA  IFENER=1 ,NTHCON=-1,NTMAX=9999,IDTIME=0,DT=1.0,
        IOPTOM=0,OMEGA=1.5,
        IDISP=1,
        EPS1=1.0E-07,DCONV2=-1.0,
        IFPROP=1,
        FCOH=0.27697E6, FC1H=1014.0,
        FCORD=1.85048, FC1RO=-0.00248,
        FCOK=0.07627, FC1K=0.0,
        FCOMU=5.266E-5, FC1MU=0.0,
        FCTLO= 20.0, FCTHI=100.0,
        IT=1,1,TREST=15.,
        KFLOW= 1, 1, 1, 1, -3, -3,
        KTEMP= 1, 1,400,400,400,400,
        TEMPO= 40.00,GRAVZ= -9.807 ,
        TEMP( 1)=40.0227500,
        TEMP( 2)=39.9772500,
        TEMP( 1)=40.0113750,
        TEMP( 2)=39.9886250,
        NTPRNT= -9999,
        NTHPR =01201,03201,05201,17201,09201,
&END
END
UL 0.00001  1 25  1  1  1 25
END

```

Fig. 4.44 Input Data for Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme

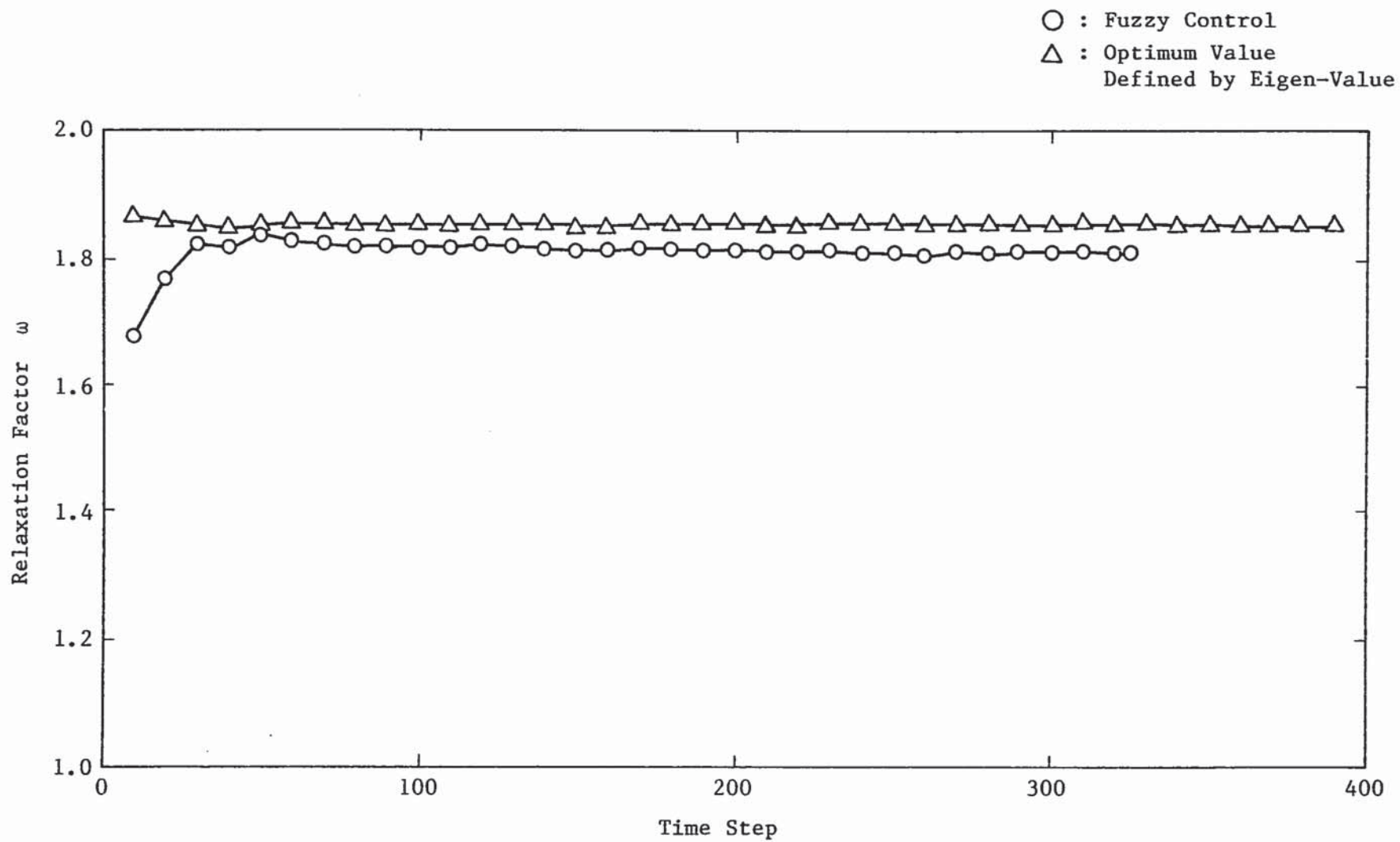


Fig. 4.45 Transition of Relaxation Factor ω under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme

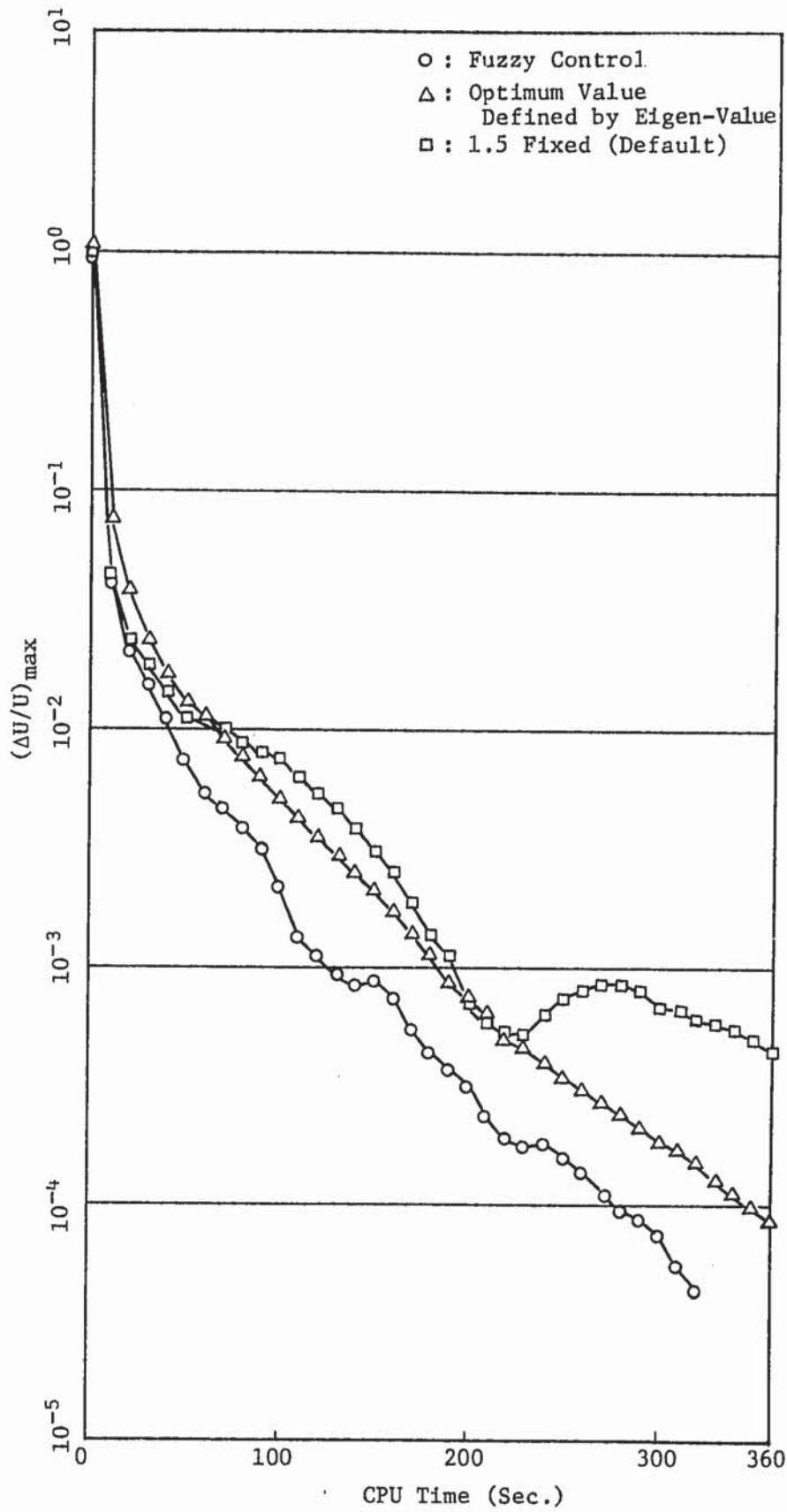


Fig. 4.46 Comparison of Concergency of $(\Delta U/U)$ under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme

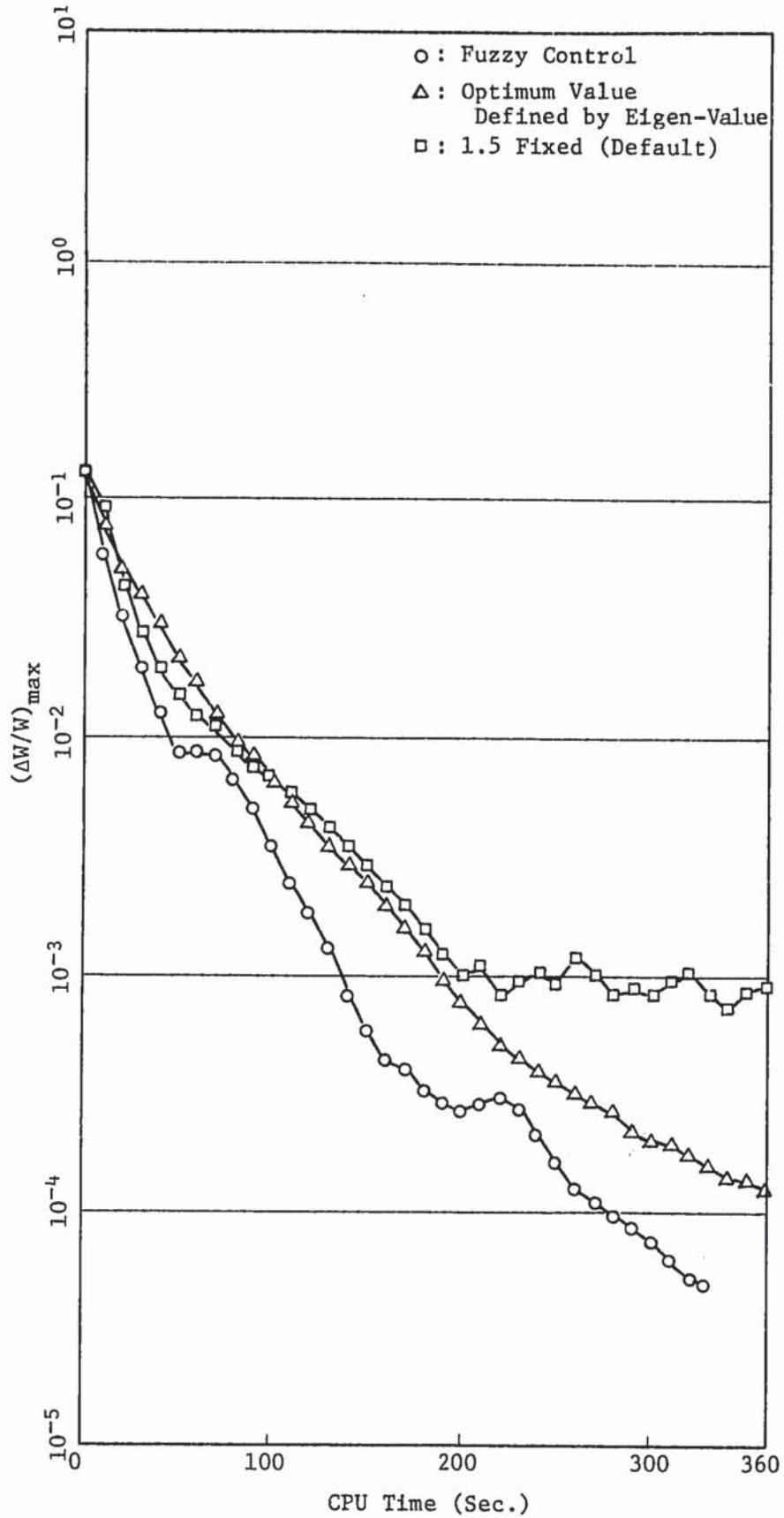


Fig. 4.47 Comparison of Convergence of $(\Delta W/W)$ under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme

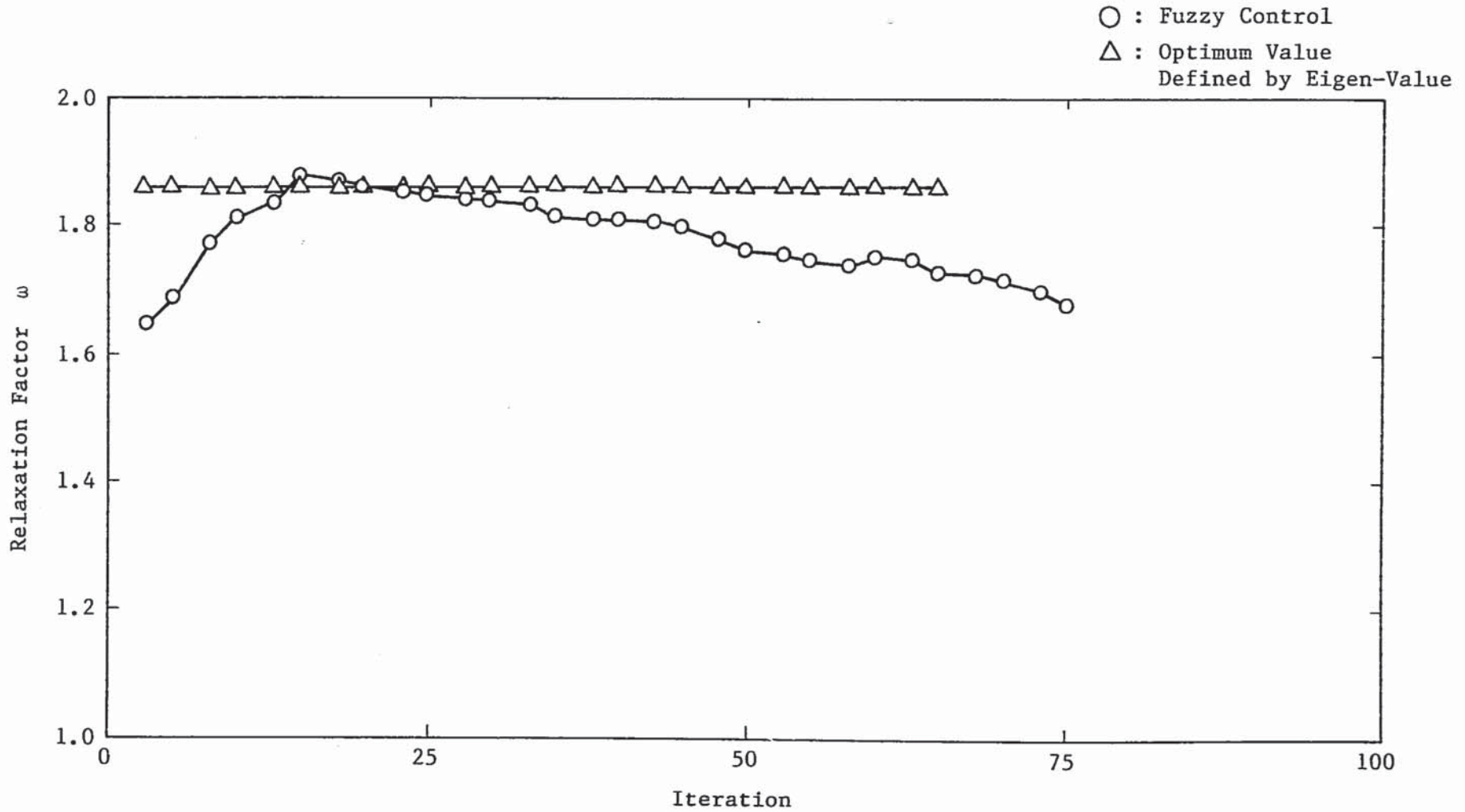


Fig. 4.48 Transition of Relaxation Factor ω on One Time Step Process(#1) under Natural Circulation Problem with SIMPLEST Scheme