

单相多次元熱流動解析コードAQUAによる国際水理学会(IAHR)
第7回新型炉熱流動ワーキンググループベンチマーク問題の解析

1991年7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)

单相多次元熱流動解析コードAQUAによる国際水理学会 (IAHR) 第7回新型炉熱流動ワーキンググループベンチマーク問題の解析

村松 寿晴* , 村田 正幸**

要 旨

国際水理学会新型炉熱流動ワーキンググループ会議 (ドイツ・カールスルーエ原子力研究所, 8/27-29, 1991)のベンチマーク活動に動燃事業団として参加することを目的として, 動燃事業団所有の单相多次元熱流動解析コードAQUAを用いてベンチマーク問題の解析を行った。今回のベンチマーク問題は, 高速炉の崩壊熱を自然循環によって除去する場合, 上部プレナム内に発生する温度成層化現象および炉心-プレナム相互作用をシミュレーションするものである。

高次差分法と応力代数式乱流モデルの組み合わせを用いたAQUAコードによる解析結果は, 低流量条件での実験で確認されたもぐり込み挙動が的確に再現できたと共に, プレナム内における温度および水平方向流速成分の軸方向分布が良好に再現された。

* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

** (株) エヌデーデー

Analysis of the Benchmark Problem for the 7th Meeting of the IAHR working
Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics with
Multi-Dimensional Code AQUA.

Toshiharu Muramatsu*

Masayuki Murata**

Abstract

For the purpose of the participation to a benchmark exercise of the 7th Meeting of the International Association for Hydraulic Research (IAHR) Working Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics, which is to be held in Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, FRG, August 27-29, 1991, two experimental cases of the benchmark problems were calculated using a combined method of higher-order accurate schemes and the Algebraic Stress turbulence Model (ASM) of a multi-dimensional thermohydraulic analysis code AQUA developed at PNC.

From the analyses, the following analytical results have been obtained:

- (1) Penetration phenomena at the inlet channel observed in experiments were predicted well with the combined method.
- (2) Axial distributions of temperature and horizontal velocity components in the test plenum agreed with experiments.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC PNC

** NDD Co. Ltd.

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 実験概要	2
2.1 実験装置	2
2.2 計測設備	2
2.3 実験条件	2
第3章 実験解析	4
3.1 計算条件	4
3.2 境界条件	4
3.2.1 プレナム入口配管	4
3.2.2 入口部温度	4
3.2.3 固体壁	5
3.2.4 冷却壁	5
3.3 解析結果 (IAHR提出分)	5
3.3.1 Case 1	5
3.3.2 Case 4	5
第4章 実験結果との比較	7
4.1 軸方向温度流速分布	7
4.1.1 Case 1	7
4.1.2 Case 4	7
4.2 もぐり込み特性	8
第5章 結 言	9
参 考 文 献	10
付録A 応力代数式乱流モデル	11
A.1 方程式系	11
A.2 モデル定数	12
A.3 時間スケールの取り扱い	12

List of Figures

Fig. 2. 1	Test section	14
Fig. 2. 2	Inlet channel	15
Fig. 2. 3	Cooling box	16
Fig. 2. 4	Thermocouple arrangement	17
Fig. 2. 5	Traverse thermocouple set in the inlet channel	18
Fig. 3. 1	Mesh Arrangement for the IAHR Benchmark Problem	19
Fig. 3. 2	Mesh Arrangement Used to Decide Horizontal Profiles of Velocity and Turbulent Parameters at the Inlet Channel	20
Fig. 3. 3	Comparison of Horizontal Velocity Distribution for the Case-1	20
Fig. 3. 4	Horizontal Distributions of Turbulent Kinetic Energy and Its Dissipation Rate for the Case-1	21
Fig. 3. 5	Comparison of Horizontal Velocity Distribution for the Case-4	21
Fig. 3. 6	Horizontal Distributions of Turbulent Kinetic Energy and Its Dissipation Rate for the Case-4	22
Fig. 3. 7	Velocity Vector Field for the Case-1 ($C_1=1.44$)	23
Fig. 3. 8	Isotherm for the Case-1 ($C_1=1.44$)	24
Fig. 3. 9	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-1 ($C_1=1.44$)	25
Fig. 3.10	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Travers Line P2 for the Case-1 ($C_1=1.44$)	26
Fig. 3.11	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-1 ($C_1=1.44$)	27
Fig. 3.12	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-1 ($C_1=1.44$)	28
Fig. 3.13	Velocity Vector Field for the Case-1 ($C_1=1.656$)	29
Fig. 3.14	Isotherm for the Case-1 ($C_1=1.656$)	30
Fig. 3.15	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-1 ($C_1=1.656$)	31
Fig. 3.16	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-1 ($C_1=1.656$)	32

Fig. 3.17	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-1 ($C_1=1.656$)	33
Fig. 3.18	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-1 ($C_1=1.656$)	34
Fig. 3.19	Detailed Axial Temperature Distribution at the Treverse Line P4 for the Case-1 ($C_1=1.656$)	35
Fig. 3.20	Cmparison of Turbulent Kinetic Energy Distribution for the Case-1	36
Fig. 3.21	Velocity Vector Field for the Case-4 ($C_1=1.44$)	37
Fig. 3.22	Isotherm for the Case-4 ($C_1=1.44$)	38
Fig. 3.23	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-4 ($C_1=1.44$)	39
Fig. 3.24	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-4 ($C_1=1.44$)	40
Fig. 3.25	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-4 ($C_1=1.44$)	41
Fig. 3.26	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-4 ($C_1=1.44$)	42
Fig. 3.27	Velocity Vector Field for the Case-4 ($C_1=1.656$)	43
Fig. 3.28	Isothem for the Case-4 ($C_1=1.656$)	44
Fig. 3.29	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-4 ($C_1=1.656$)	45
Fig. 3.30	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-4 ($C_1=1.656$)	46
Fig. 3.31	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-4 ($C_1=1.656$)	47
Fig. 3.32	Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-4 ($C_1=1.656$)	48
Fig. 3.33	Detailed Axial Temperature Distribution at the Traverse Line P4 for the Case-4 ($C_1=1.656$)	49
Fig. 4. 1	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P1 for the Case-1	50
Fig. 4. 2	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P2 for the Case-1	51

Fig. 4. 3	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P3 for the Case-1	52
Fig. 4. 4	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P4 for the Case-1	53
Fig. 4. 5	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P1 for the Case-4	54
Fig. 4. 6	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P2 for the Case-4	55
Fig. 4. 7	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P3 for the Case-4	56
Fig. 4. 8	Comparison of Measurement and Calculations at the Traverse Line P4 for the Case-4	57

第1章 緒 言

本報は、国際水理学会 (IAHR:International Association for Hydraulic Research) 新型炉熱流動 (旧液体金属) ワーキンググループのベンチマーク問題を、動燃事業団所有の单相多次元熱流動解析コードAQUA^{1, 2, 3)}を用いて解析した結果を取りまとめたものである。ベンチマーク問題の作成は、これまで各国持ち回りで行われており、今回は動燃事業団が担当した。今回動燃事業団が提案したベンチマーク問題は、高速増殖炉の崩壊熱を自然循環によって除去する場合、上部プレナム内に現れる特徴的な熱流動挙動 (温度成層化現象、炉心-プレナム相互作用等) をシミュレーションさせるものである。

上述したIAHR新型炉熱流動ワーキンググループは、少人数の専門家集団の中で情報交換、討論、共同作業等を通じて新型炉熱流動研究分野 (炉心、プレナム、配管、機器等) の最新技術の紹介、課題の解決と研究開発の効率化を図ることを目的としてIAHRの下部機構として組織されているものである。当ワーキンググループ会議はこれまでほぼ隔年毎に開催され、第7回会議が本年8月27-29日にドイツ・カールスルーエ原子力研究所 (KfK) において開かれる運びとなっている。なお、ベンチマーク活動は第5回会議から始められ、今回の第7回会議のためのベンチマーク問題が各国関係機関に既に配付されている。なお、ベンチマーク問題の解答 (実験結果) は、本来会議当日に初めて公表されるものであるが、今回のベンチマーク問題の作成担当が動燃事業団であったことから、AQUAコードによる解析結果の提出と同時に解答を著者が入手し、解答との簡易的な比較結果を合わせて本報に記載した。従って、ベンチマーク問題の解答との厳密な比較あるいは各種解析コード同士の比較に関しては、会議当日の詳細な討論を経てベンチマーク問題提出側よりまとめられる。また、AQUAコードの現象模擬性等についても、今後詳細な検討を実施した上で報告を行う。

第2章 実験概要

2.1 実験装置

実験装置の概略をFig. 2.1に示す。当該装置は高速増殖炉の崩壊熱を自然循環によって除去する場合、上部プレナム内に発生する特徴的な熱流動挙動を簡易的に再現できる様に設計されている。ここで対象とする特徴的な熱流動とは、上部プレナム内の熱流動挙動が浮力によって支配される温度成層化現象および炉心-プレナム相互作用の2種類である。実験における炉心および補助炉心冷却器は、Fig. 2.1に示す様にそれぞれプレナム入口配管 (Inlet Channel, 以下、単に入口配管と呼ぶ) および冷却壁 (Cold Wall)により模擬された。なお、装置奥行きは150mm、作動流体は水である。

実験においては、入口配管から高温水をプレナム内に流出させ、時計回りの大きな循環渦を発生させる。この内、冷却壁 (右壁) に沿って下降する流れは冷却され、これによる低温水はプレナム底壁に沿い入口部に向って、温度成層化現象を発生させる。またこの時、入口配管からプレナム内へ流出する高温水の慣性力と入口配管における低温水の浮力とのバランスによっては、この低温水が入口配管内に部分的に流入する“もぐり込み (penetration)”が生じる (炉心-プレナム相互作用の発生)。

Fig. 2.2に入口配管の構造を示す。入口配管の上流側には、入口配管端部 (プレナム入口面)において水平方向に発達した流速分布が得られる様、整流装置が配置されている。

Fig. 2.3に冷却壁に接続されている冷却設備を示す。冷却壁自体は、厚さ5mmの銅板製で、壁温は一様になるように配慮されている。冷却水は、6本の熱電対が設置されている冷却箱 (Cooling Box)内をジグザグに上方に向かって流れる。

2.2 計測設備

Fig. 2.4にプレナム内における温度測定位置を示す。温度計測系は、67本の固定熱電対 (銅-コンスタンタン型直径1mm) と水平方向位置P1, P2, P3およびP4における軸方向位置の温度を移動計測する可動熱電対 (上記同仕様) とから成る。Fig. 2.5に入口配管内における可動熱電対の構成を示す。一方、実験装置内における流速は、2次元レーザードップラー流速計により計測される。なお、実験装置内温度および流速は、共に奥行き方向中心断面での状態量が実験データとして採用される。

2.3 実験条件

実験における主要なパラメータは、入口配管における温度と流量および冷却箱入口温度であ

る。以下に、実験条件を列記する。

Case 1

入口配管温度	48.9°C
入口配管流量	18.0 ℓ/min
冷却箱入口温度	12.6°C
冷却箱入口流量	25.0 ℓ/min
除熱量	$-2.13 \times 10^4 \text{W/m}^2$

Case 4

入口配管温度	49.1°C
入口配管流量	45.0 ℓ/min
冷却箱入口温度	13.1°C
冷却箱入口流量	25.0 ℓ/min
除熱量	$-2.40 \times 10^4 \text{W/m}^2$

第3章 実験解析

3.1 計算条件

数値計算条件を以下に列記する。

座 標	$x-y-z$, 2次元直交座標
メッシュ分割	$67^i \times 1^j \times 63^k$, 総計2468セル (Fig. 3.1 参照)
時間積分法	修正ICE法 ⁵⁾ , 定常計算, Δ ファジイ制御 ⁶⁾
対流項差分法	運動量式……………QUICK法 エネルギー式…QUICK-FRAM法 乱流量式……………1次風上差分法
乱流モデル	応力代数式乱流モデル (付録A 参照)
モデル定数	$C_1=1.44$ (標準値 ⁸⁾) および $1.656(+15\%$ ^{注1)})

(注1 : サーマルキャビティ問題を用いてのパラメータサーベイ解析より規定。詳細は、文献7)を参照のこと)

3.2 境界条件

3.2.1 入口配管

入口配管における水平方向流速分布に関しては、実験結果として与えられているものの、乱流パラメータ (k および ϵ) に関する情報が得られていないことから、ベンチマーク計算の実施に先立ちこれらを規定する計算を行った。用いた計算体系は、Fig. 3.2 に示す様に、 $20^i \times 1^j \times 3^k$ の計算メッシュを有する2次元直交座標系である。なお、物理量の完全な発達を実現するため、出口面と入口面とを周期境界条件で接続するモデルを採用した。Case 1 および Case 2 について得られた軸方向流速および乱流パラメータの水平方向分布を Fig. 3.3 ~ Fig. 3.6 に示す。軸方向流速の水平方向分布に関しては、両ケースとも実験結果と良好な一致を示している。乱流パラメータの水平方向分布に関しては、両ケース共に固体壁近傍で絶対値が増加する傾向を示す。

ベンチマーク計算では、ここでの解析から得られた水平方向分布を内挿して、入口配管各セルに対応する位置にそれぞれ与える。

3.2.2 入口配管温度

時間的に一定であり、水平方向に一様である条件を課す。

3.2.3 固体壁

断熱および非スリップ条件を課す。

3.2.4 冷却壁

一定熱流束 (Case 1 : $-2.13 \times 10^4 \text{W/m}^2$, Case 4 : $-2.40 \times 10^4 \text{W/m}^2$) を課す。

3.3 解析結果 (IAHR提出分)

3.3.1 Case 1

モデル定数 C_1 を1.44とした条件でのプレナム内流速分布および温度分布をFig. 3.7~Fig. 3.8に示す。また、水平方向位置P1, P2, P3およびP4における温度と水平方向流速成分 V_x の軸方向分布をFig. 3.9~Fig. 3.12に示す。

一方、モデル定数 C_1 を1.656(+15%)とした条件でのプレナム内流速分布および温度分布をFig. 3.13~Fig. 3.14に、また水平方向位置をP1, P2, P3およびP4における温度と水平方向流速成分 V_x の軸方向分布をFig. 3.15~Fig. 3.18に示す。さらに、水平方向位置P1における詳細軸方向温度分布をFig. 3.19に示す。

モデル定数 C_1 の変更による解析結果への影響は、Fig. 3.7およびFig. 3.13に示した流速分布に明確に現れている。すなわち、モデル C_1 を1.44とした場合には入口配管においても渦り込みの発生は確認できない (Fig. 3.7) もの、1.656とした条件では渦り込みの発生が確認できる (Fig. 3.13)。この差異を発生させる要因は、Fig. 3.20に示した乱流運動エネルギーの空間分布により容易に説明できる。なお、図中の値は、 $\text{Log}_{10}(k \times 10^8)$ により線形化されている。結果より分かる通り、モデル定数 C_1 を1.44とした場合に比べ、1.656とした場合の方がプレナム内全体の乱流運動エネルギーの絶対値が減少している。これは、モデル定数 C_1 を1.656とした場合には、乱流運動エネルギー散逸率 ε の生成量を1.44の場合に比べ大きめに評価し、結果的に乱流運動エネルギーが減少するためである。また、この乱流運動エネルギーの全体的な減少に伴い乱流粘性係数 ($\mu_t = \rho C \mu k^2 / \varepsilon$) 自体も減少することから、プレナム内での流速分布も非常に複雑なものに遷移している (Fig. 3.7, Fig. 3.13参照)。これらモデル定数の値の良否については、次節での実験結果との比較で詳述する。

3.3.2 Case 4

モデル定数 C_1 を1.44とした条件でのプレナム内流速分布および温度分布をFig. 3.21~Fig. 3.22に示す。また、水平方向位置P1, P2, P3およびP4における温度と水平方向流速成分 V_x の軸方向分布をFig. 3.23~Fig. 3.26示す。

一方、モデル定数 C_1 を1.656(+15%)とした条件でのプレナム内流速分布および温度分布をFig. 3.27~Fig. 3.28に、また水平方向位置をP1, P2, P3およびP4における温度と水平方向流速成

分 V_x の軸方向分布をFig. 3.29～Fig. 3.32に示す。さらに、水平方向位置P1における詳細軸方向温度分布をFig. 3.33に示す。

モデル定数 C_1 の変更による解析結果への影響は、Case1での場合ほど顕著でなく、両者とも入口部でのもぐり込みは発生していない。ただし、水平方向位置P1, P2, P3およびP4での温度および水平方向流速成分 V_x の軸方向分布に着目した場合には、プレナム内に発生している循環渦の変化に伴い、有意な差異が発生している。詳細については、次節で述べる。

第4章 実験結果との比較

4.1 軸方向温度流速分布

4.1.1 Case 1

Fig. 4.1～Fig. 4.4に、水平方向位置P1, P2, P3およびP4における温度と水平方向流速成分 V_x の軸方向分布に関する実験結果との比較を示す。図中、「・」が実験結果を、1点鎖線がモデル定数 C_1 を1.44とした場合の解析結果を、また実線が C_1 を1.656とした場合の結果を示す。まず、流速分布に関する比較では、モデル定数 C_1 を1.656とした場合に実験結果との一致度が向上する。ただし、傾斜を有する上壁近傍の流速に関しては、モデル定数 C_1 を変更しても大きな改善は見られない。これは、モデル定数の問題よりも、解析モデル上、傾斜壁を階段状メッシュで近似していることに起因しているものと考えられる。すなわち、階段状メッシュを採用した場合には、斜め上方に向かうベクトル成分が階段状メッシュの下面に沿う水平方向ベクトルに換算され、結果として水平方向流速成分が強調されたものとなる。これに関しては、メッシュ数を増加させて傾斜壁を忠実に模擬することにより解決されることが考えられる。

一方、軸方向温度分布の比較に関しては、モデル定数 C_1 を1.656に変更することによって、底壁に沿って入口配管方向に流れる低水温の軸方向厚さが増している。この効果は、入口配管において低温水のもぐり込みを発生させる大きな要因となる。

以上に示した実験結果との比較より、モデル定数 C_1 を1.656とした場合に実験結果との一致がより良好となることが結論付けられる。

4.1.2 Case 4

Fig. 4.5～Fig. 4.8に、水平方向位置P1, P2, P3およびP4における温度と水平方向流速成分 V_x の軸方向分布に関する実験結果との比較を示す。まず、流速分布に関する比較では、水平方向位置P3における結果を除き、モデル定数 C_1 を1.44とした場合に実験結果との一致度が向上する。これは、入口配管からプレナムへの流出流量がCase1の場合に比べ2.5倍と大きく、プレナム内各部での乱流強度が増したためであると考えられる。すなわち、もともと高乱流場への適用を前提に規定されていたモデル定数群の適用性が、回復したことによると解釈することができる。水平方向位置P3での不一致は、P3位置がプレナム内に発生している循環渦の中心位置近傍の水平方向位置に対応（Fig. 3.21参照）していることから乱流強度が減少し、モデル定数群の適用性が低下したためであると推測される。

一方、軸方向温度分布の比較に関しては、モデル定数 C_1 を1.656とした場合の方が実験結果との一致は良好である。これに関しては、流速分布に関する一致傾向と矛盾するが、Case 4の

熱流動特性が今回対象としたモデル定数 C_1 の影響範囲を越えているか、あるいは運動量に関するモデル定数とエネルギーに関するモデル定数とをそれぞれについて調整する必要がある等がこの原因として考えられるが、推論の域を出ない。

4.2 もぐり込み特性

実験により得られているもぐり込み特性 (Case 1) は次の通りである。

もぐり込み深さ	頻度
1～2 cm	41回/1000秒
2～3 cm	76回/1000秒
3～4 cm	19回/1000秒
4～5 cm	6回/1000秒
5～6 cm	1回/1000秒

解析によるもぐり込み特性は、時間的には変動せず、約 7.8cm のもぐり込み深さである。この値は、実験結果の約数倍程度に相当するもぐり込み深さであり、一致度は不十分である。前節で示した様に、モデル定数 C_1 を高々15%変更しただけでもぐり込みが発生した事実より、モデル定数 C_1 は今回の問題において非常に重要なパラメータの一つであることが推定される。逆に、この値を最適に制御することによって、低流量条件の熱流動挙動に対しても、これまでに開発されてきた乱流モデルが十分な精度を持って適用できることを示唆している。

第5章 結 言

国際水理学会新型炉熱流動ワーキンググループ会議（ドイツ・カールスルーエ原子力研究所，8/27-29，1991）のベンチマーク活動に動燃事業団として参加することを目的として，動燃事業団所有の单相多次元熱流動解析コードAQUAを用いてベンチマーク問題の解析を行った。今回のベンチマーク問題は，高速炉の崩壊熱を自然環境によって除去する場合，上部プレナム内に発生する温度成層化現象および炉心-プレナム相互作用をシミュレーションするものである。

高次差分法と応力代数式乱流モデルの組み合わせを用いたAQUAコードによる解析結果は，低流量条件での実験で確認されたもぐり込み挙動が的確に再現できたと共に，プレナム内における温度および水平方向流速成分の軸方向分布が良好に再現された。

参 考 文 献

- 1) 村松, 前川他, “単相多次元熱流動解析コードAQUA, 入力マニュアル”,
PNC N9520 87-011, 1987年5月
- 2) 前川, 村松他, “単相多次元熱流動解析コードAQUA, 数値計算説明書”,
PNC N9520 87-012, 1987年5月
- 3) 村松, 前川他, “単相多次元熱流動解析コードAQUA, プログラム解説書,
PNC N9520 87-013, 1987年5月
- 4) Kamide, H., Ieda, Y. and Ninokata, H. “Benchmark Experiment of Buoyancy Driven
Penetration Phenomena”, PNC ZN9410 91-190, 1991
- 5) Harlow, F. H. and Amsden, A. A., “A numerical fluid dynamics calculation
method for all flow speeds”, J. Comp. Phys., 8(1971)197-213
- 6) 村松, “計算力学とCAE シリーズ, 4. ファジイ推論, 第3章 熱流体解析コードの運用効率
化”, 培風館, 1991年
- 7) Kim, J. and Muramatsu, T., “Investigation on Applicability of Turbulence Models to
Low Reynolds Number Flows”, PNC ZN9410 91-196, 1991
- 8) Rodi, W., “A new algebraic relation for calculating the Reynolds stresses”,
ZAMM56, T219-T221, 1976
- 9) Haroutunian, V and Launder, B. E., “Second-moment modeling of free buoyant flows,
A comparison of parabolic and elliptic”, UMIST Dep. of Mech. Eng., TFD/87/6, 1987

付録A 応力代数式乱流モデル⁸⁾

A. 1 方程式系

AQUAコード内で使用している方程式系を以下に示す。

[乱流運動エネルギー, k]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_1 \frac{\partial k}{\partial x_1} = - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-C_k \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_1} \frac{\partial k}{\partial x_k} + V \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + P + G - \varepsilon \quad (\text{A. 1})$$

[乱流運動エネルギー散逸率, ε]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-C_\varepsilon \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_j u_1} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) \left(1 + C_{\varepsilon 3} \frac{G}{P + G} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon \quad (\text{A. 2})$$

[温度ゆらぎ強度, $\overline{\theta^2}$]

$$\frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_j u_1} \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_1} + \alpha \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_1} \right) - 2 \overline{u_j \theta} \frac{\partial T}{\partial x_j} - 2 C_{\theta 1} \frac{k}{\varepsilon} \overline{\theta^2} \quad (\text{A. 3})$$

[レイノルズ応力, $-\overline{u_i u_j}$]

$$-\overline{u_i u_j} = \frac{k}{C_{R1} \varepsilon} \frac{(C_{R2} - 1) P_{ij} + (C_{R3} - 1) G_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (C_{R2} P + C_{R3} G + (C_{R1} - 1) \varepsilon)}{1 + \left(\frac{P + G}{\varepsilon} - 1 \right) / C_{R1}} \quad (\text{A. 4})$$

[乱流熱流束, $-\overline{u_i \theta}$]

$$-\overline{u_i \theta} = \frac{k}{C_{T1} \varepsilon} \frac{- \left(\overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - (1 + C_{T3}) \beta g_i \overline{\theta^2} - C_{T2} \overline{u_m \theta} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_m} \right)}{1 + \left(\frac{P + G}{\varepsilon} - 1 \right) / G_{T1}} \quad (\text{A. 5})$$

ここで,

$$P = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{A. 6}$$

$$G = -\beta g_i u_i \theta \tag{A. 7}$$

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \overline{u_j u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{A. 8}$$

$$G_{ij} = -\beta(g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{u_i \theta}) \tag{A. 9}$$

である。なお、固体壁に隣接するセルにおける k および ε には壁関数が、また温度ゆらぎ強度は、局所を仮定して以下の様に与えられる。

$$\overline{\theta^2} = -\frac{2}{C_{\theta 1}} \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_i \theta} \frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{A. 10}$$

A. 2 モデル定数

高乱流条件への適用を前提として推奨されているモデル定数⁸⁾とAQUAコードで採用されているモデル定数とを合わせて以下に示す。

	C_s	C_1	C_2	C_3	C_D	C_{z1}	C_z	C_{R1}	C_{R2}	C_{R3}	C_{T1}	C_{T2}	C_{T3}
Rodi ⁸⁾	0.11	1.44	1.92	0.7	0.15	0.62	0.13	1.8~ 2.8	0.4~ 0.6	0.3~ 0.5	3.2	0.5	0.5
AQUA	ditto	ditto	ditto	ditto	ditto	ditto	ditto	2.3	0.5	0.4	ditto	ditto	ditto

上記モデル定数中、乱流運動エネルギー散逸率 ε の輸送方程式中に現れる C_1 、 C_2 および C_3 の値の妥当性に関しては、これまでに実施された高乱流条件での数多くの適用例から十分に検証されているものと考えられる。一方、レイノルズ応力および乱流熱流束に関する代数的関係式中に現れる $C_{R1} \sim C_{R3}$ および $C_{T1} \sim C_{T3}$ 等のモデル定数は、実験的手法による値の決定が非常に困難なこと等より十分な検証がなされているとは言い難い。

A. 3 時間スケールの取り扱い

温度ゆらぎの生成から消滅までの特性時間を規定する時間スケール R の逆数 R^{-1} は、文献⁹⁾によれば以下の様に表される。

$$R^{-1} = 1.2 + 2.29 \frac{(\overline{u_1 \theta})^2}{\theta^2 k} \quad (\text{A. 11})$$

上式中第2項は、浮力エネルギーに対する慣性エネルギーに比率として表現される、いわばフラックスリチャードソン数(Ri_r)の形で規定されている。すなわち、乱流運動エネルギー k の浮力効果による散逸過程と同様に、温度勾配が大きく浮力効果が慣性力よりも卓越する場において、温度ゆらぎ強度エネルギーがより大きく散逸する様に寄与することを意味する。

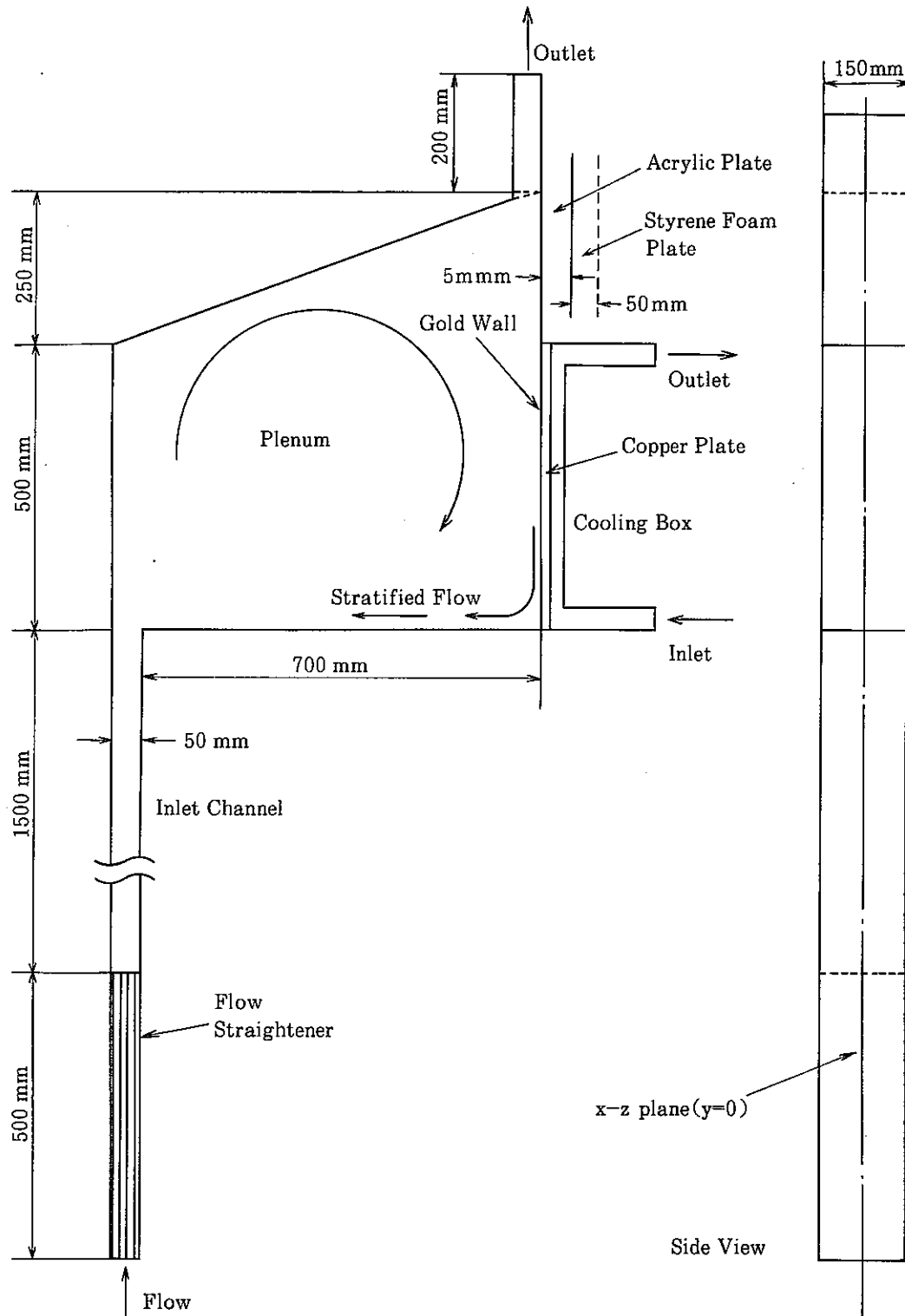


Fig. 2.1 Test section

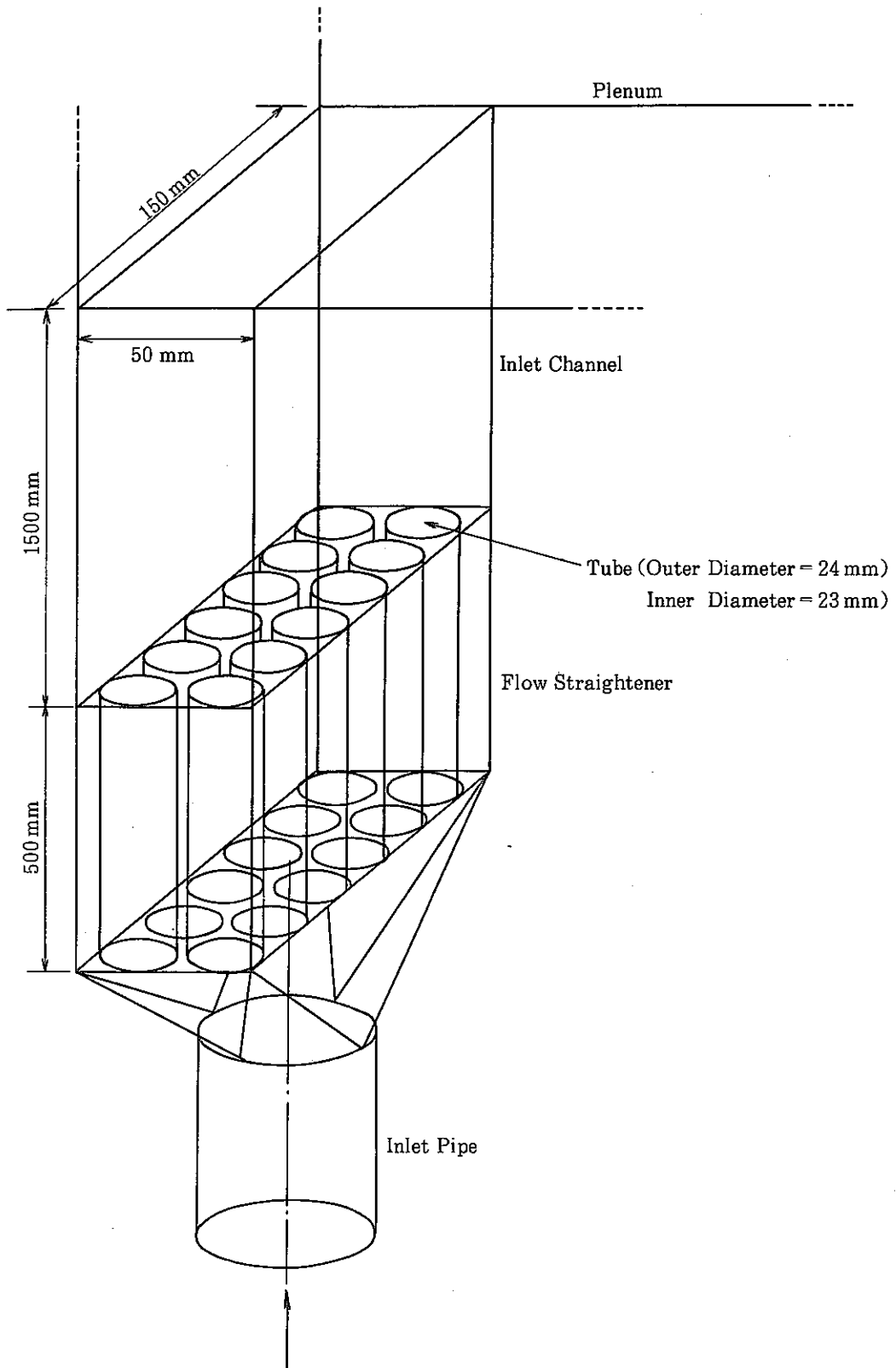


Fig. 2.2 Inlet channel

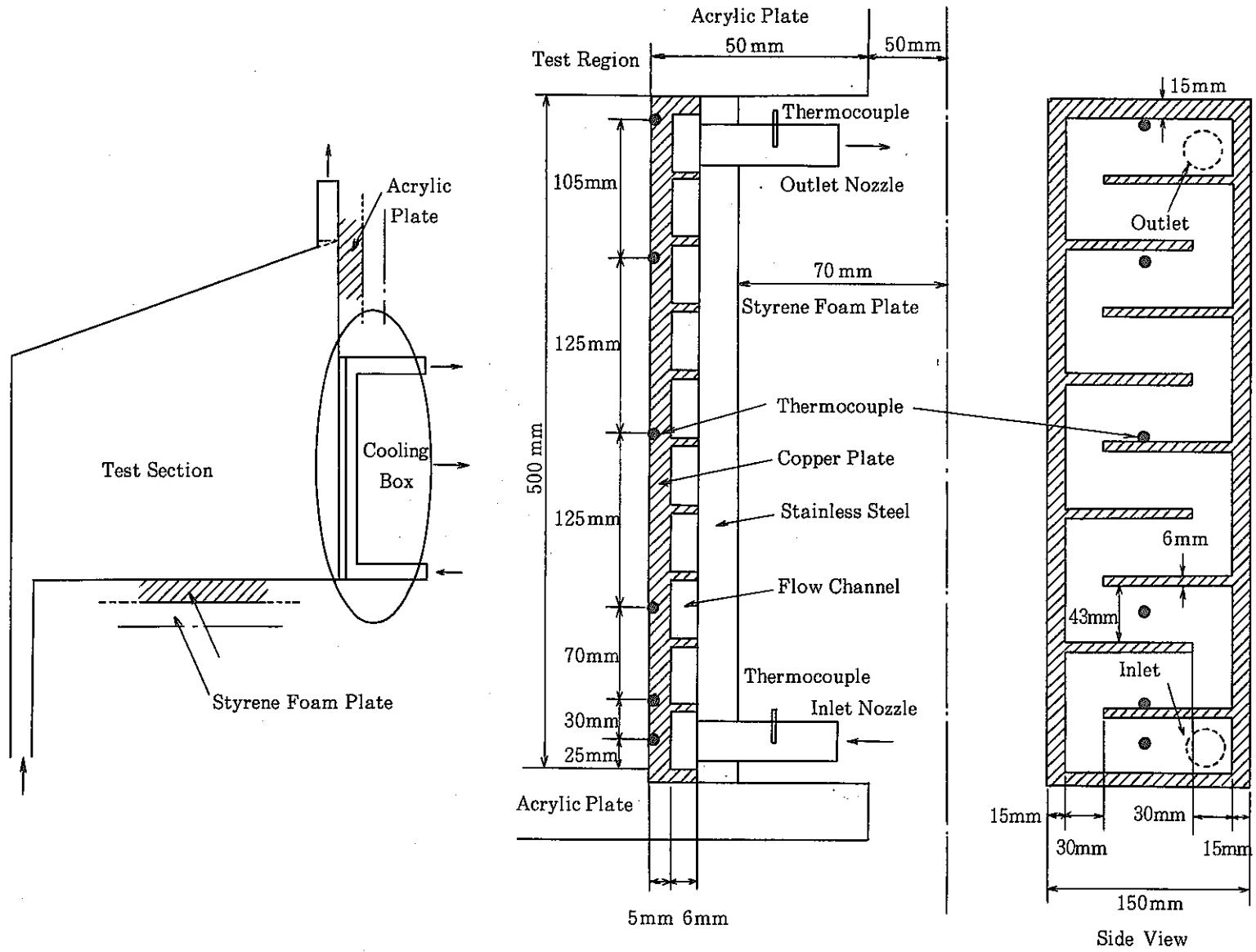


Fig. 2.3 Cooling box

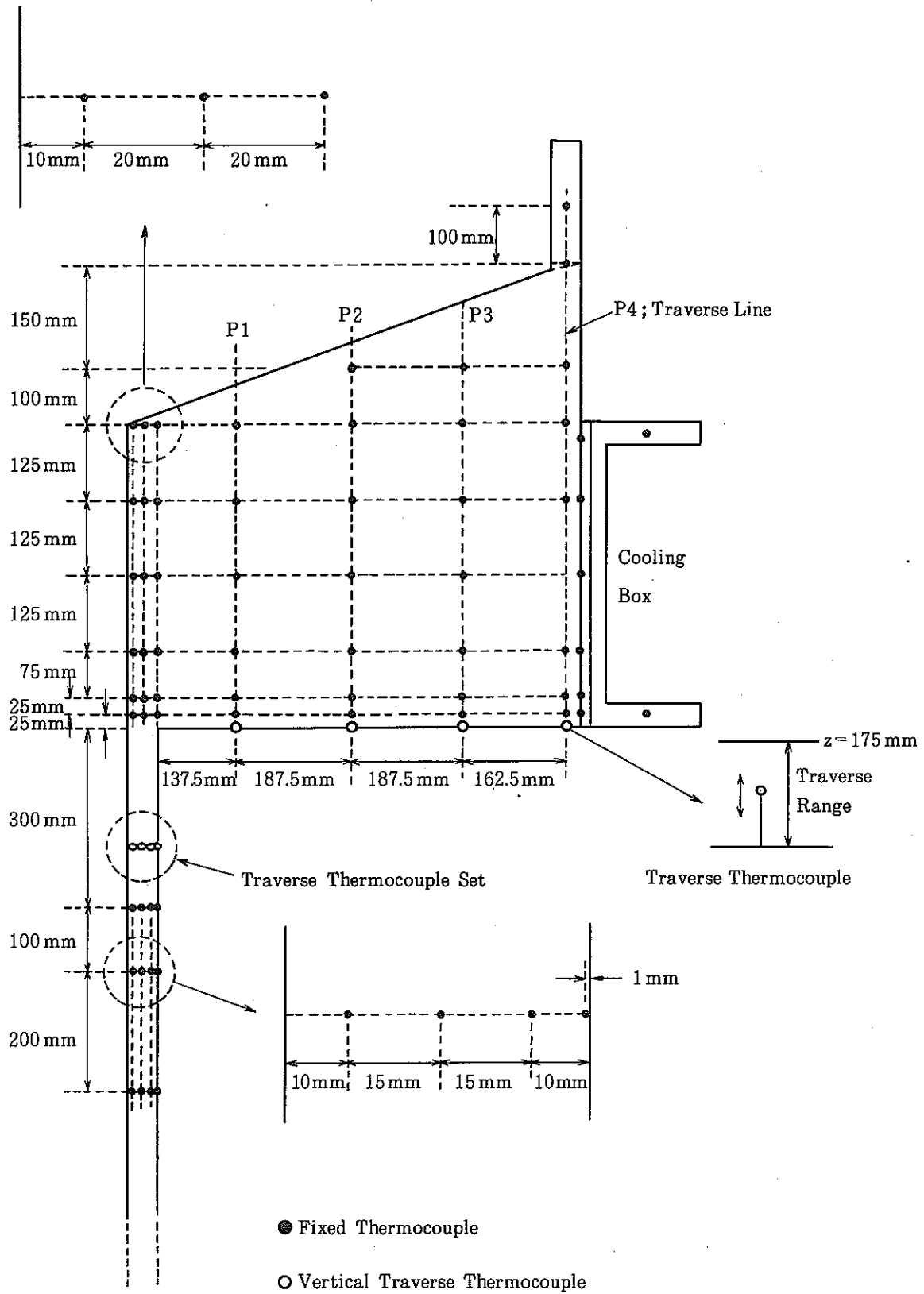


Fig. 2. 4 Thermocouple arrangement

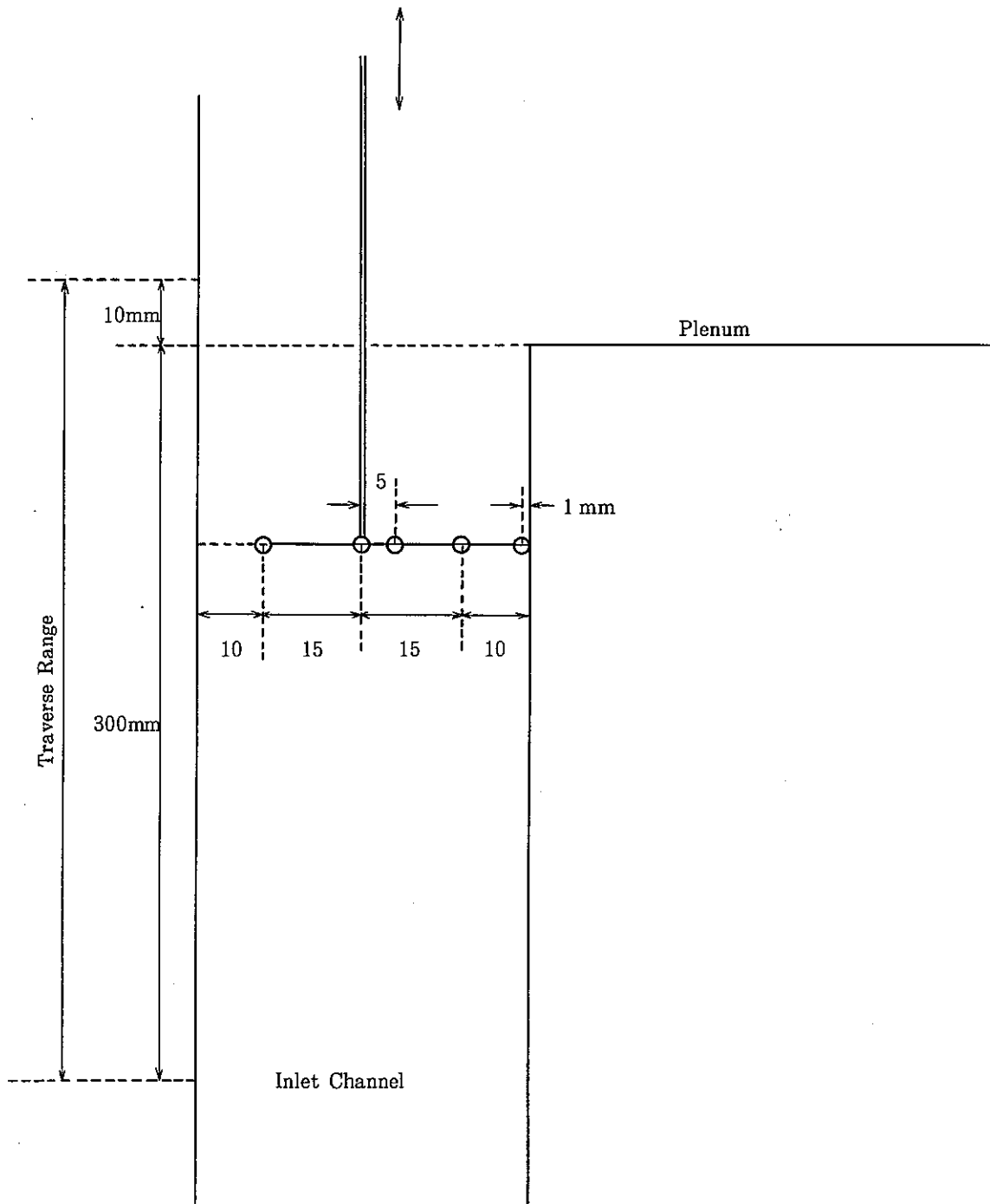


Fig. 2.5 Traverse thermocouple set in the inlet channel

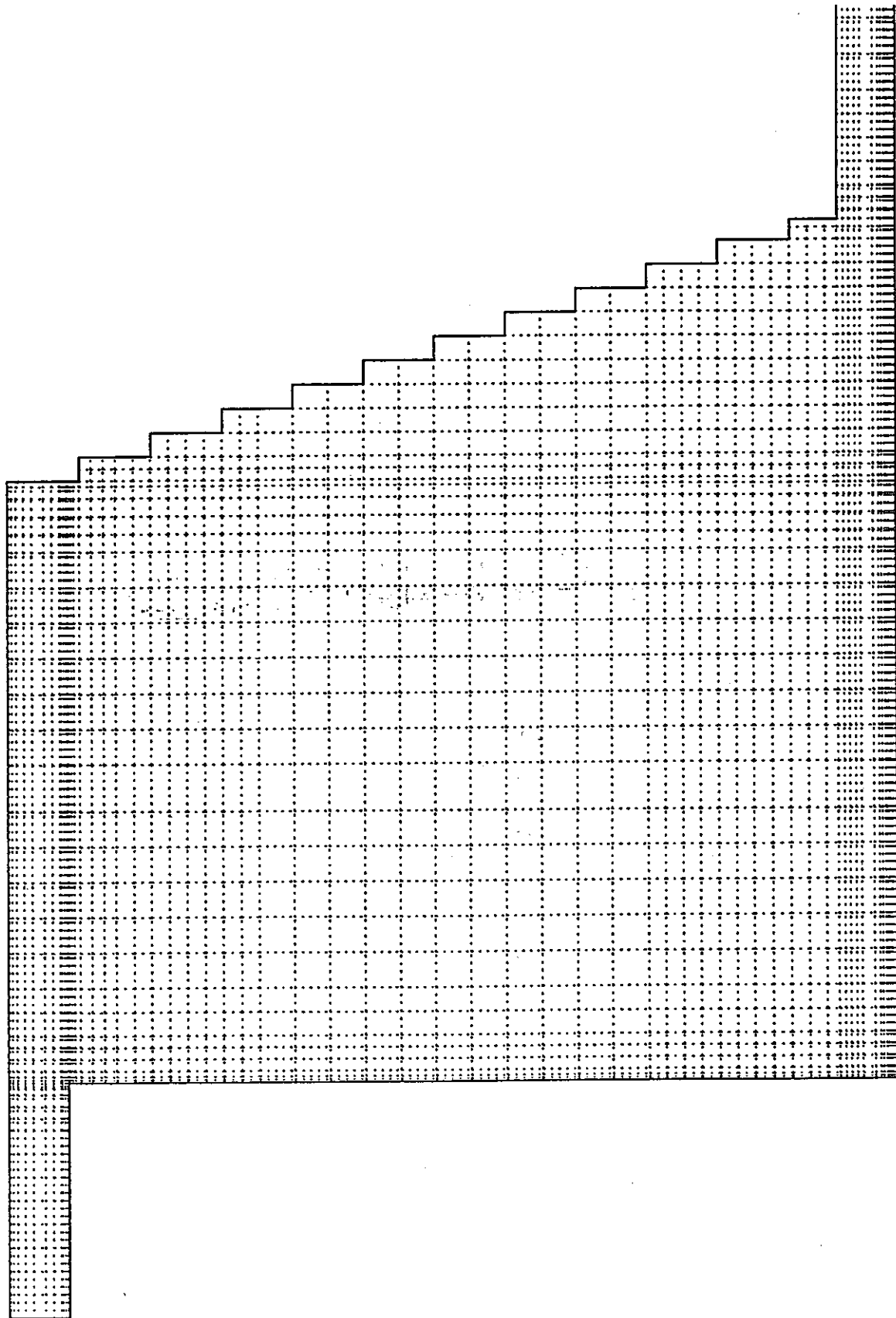


Fig. 3.1 Mesh Arrangement for the IAHR Benchmark Problem

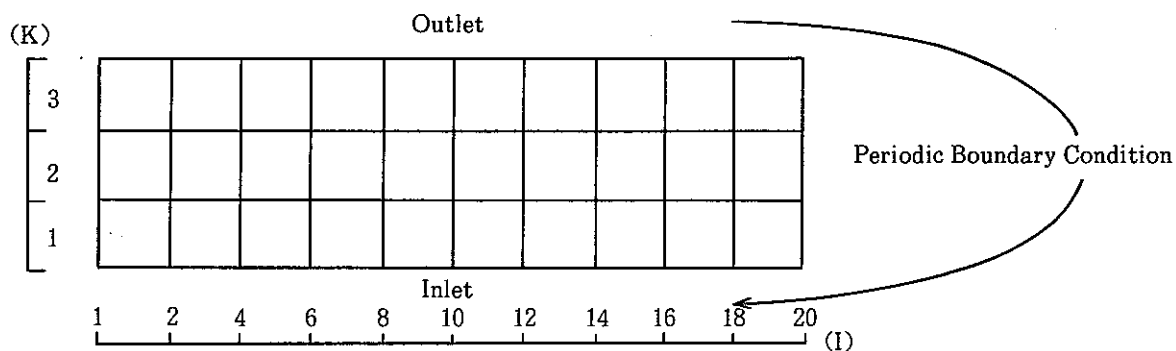


Fig. 3.2 Mesh Arrangement Used to Decide Horizontal Profiles of Velocity and Turbulent Parameters at the Inlet Channel

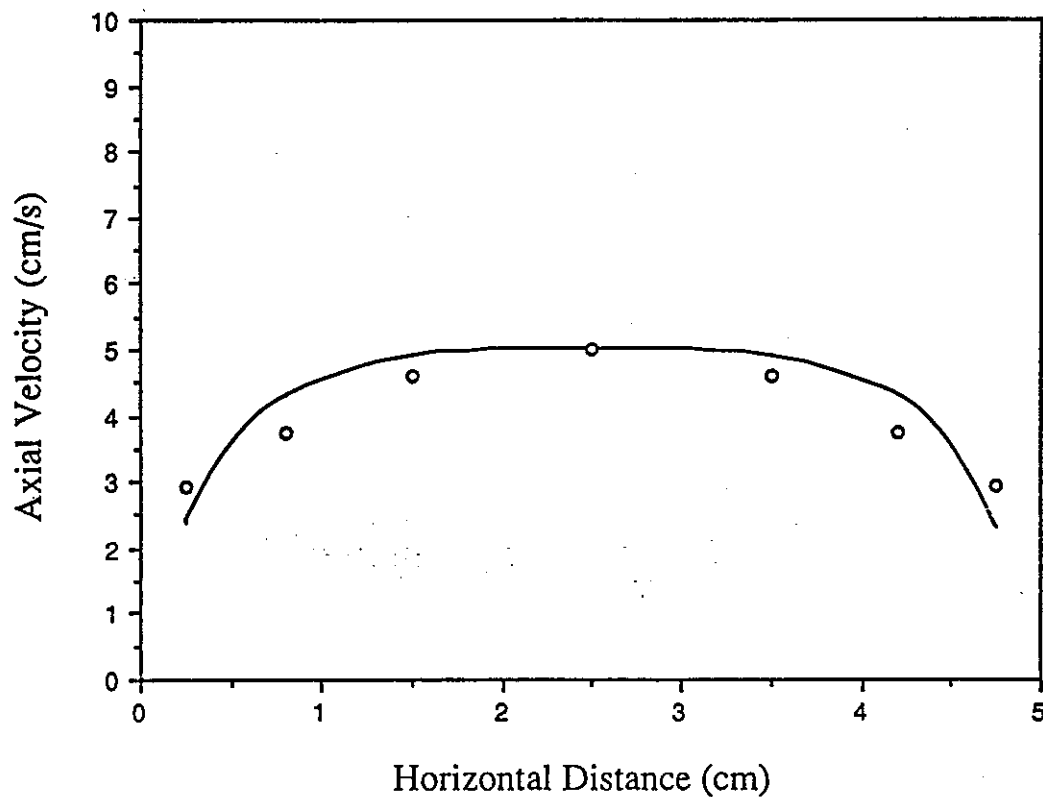


Fig. 3.3 Comparison of Horizontal Velocity Distribution for the Case-1
(— : Measurement, ○ : Calculation)

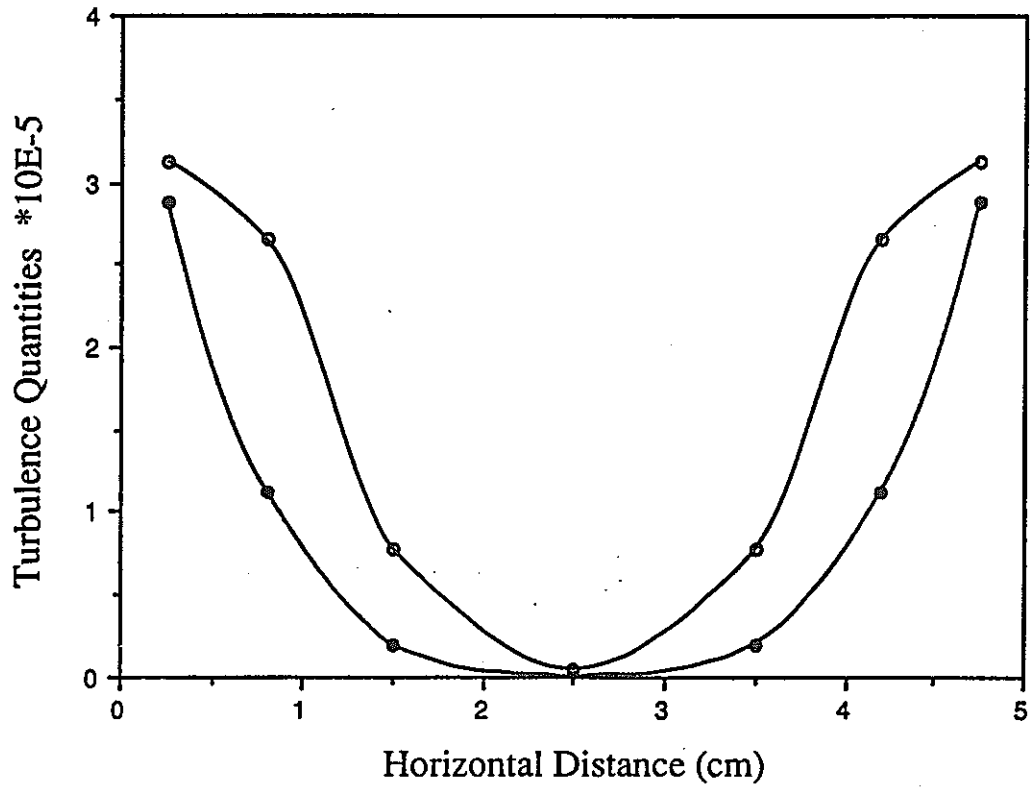


Fig. 3.4 Horizontal Distributions of Turbulent Kinetic Energy and Its Dissipation Rate for the Case-1

(○ : Turbulent Kinetic Energy, ● : Its Dissipation Rate)

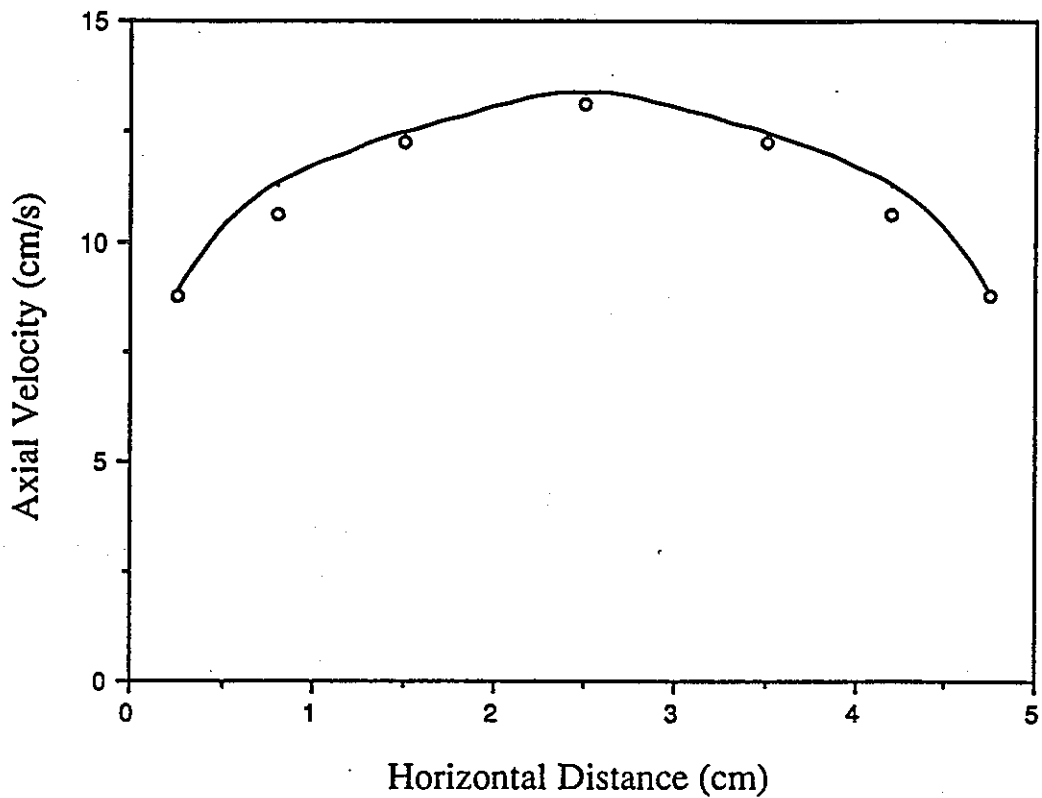


Fig. 3.5 Comparison of Horizontal Velocity Distribution for the Case-4

(- : Measurement, ○ : Calculation)

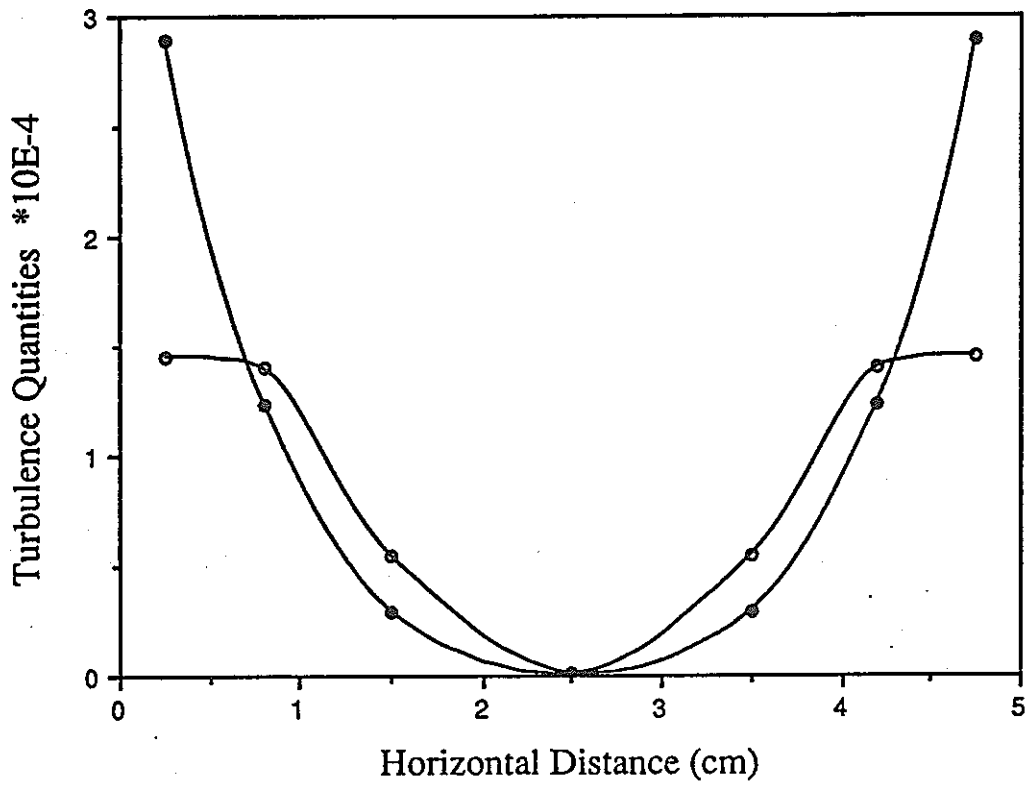


Fig. 3. 6 Horizontal Distributions of Turbulent Kinetic Energy and Its Dissipation Rate for the Case-4
(○ : Turbulent Kinetic Energy, ● : Its Dissipation Rate)

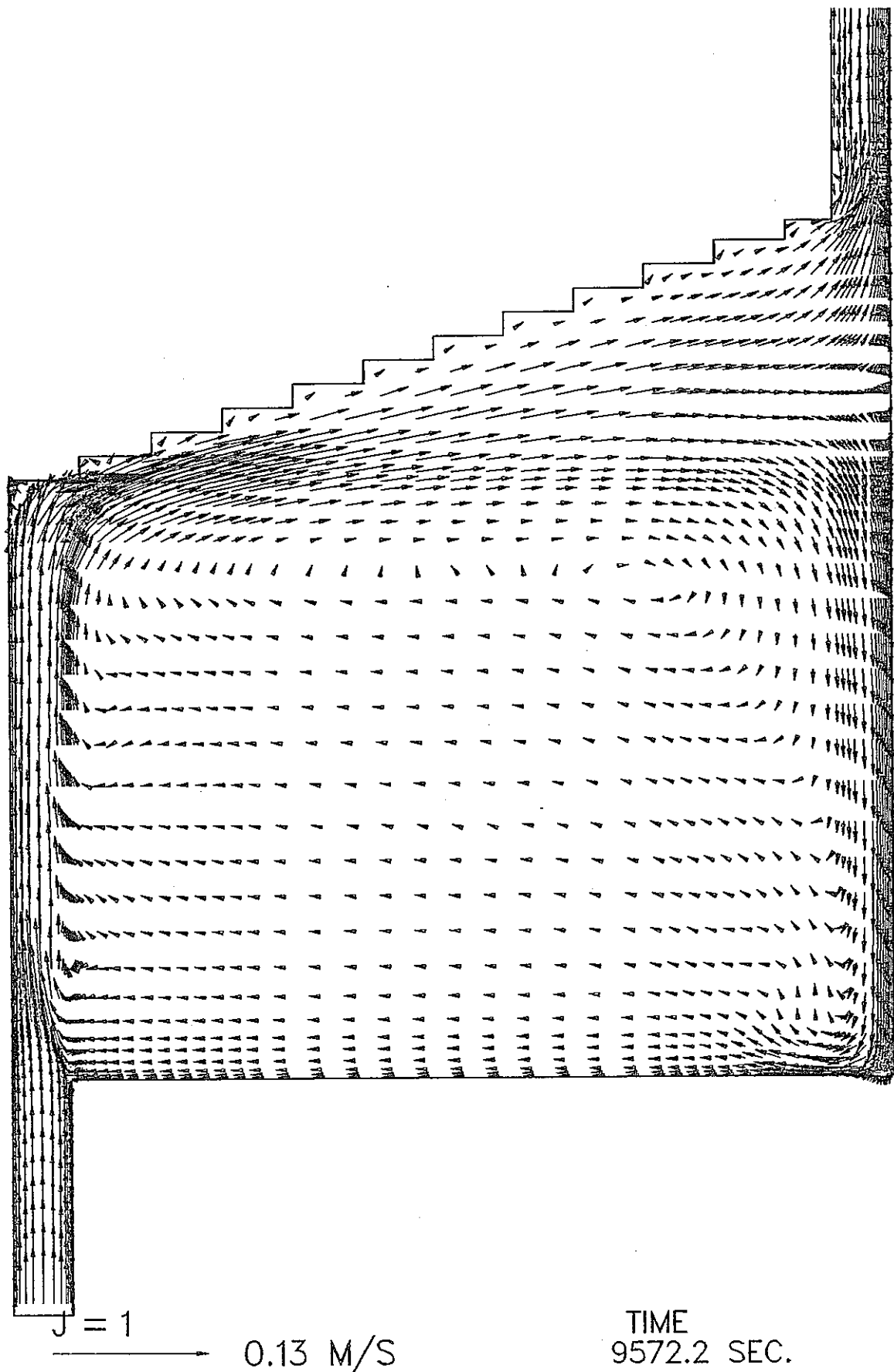


Fig. 3.7 Velocity Vector Field for the Case-1 ($C_1=1.44$)

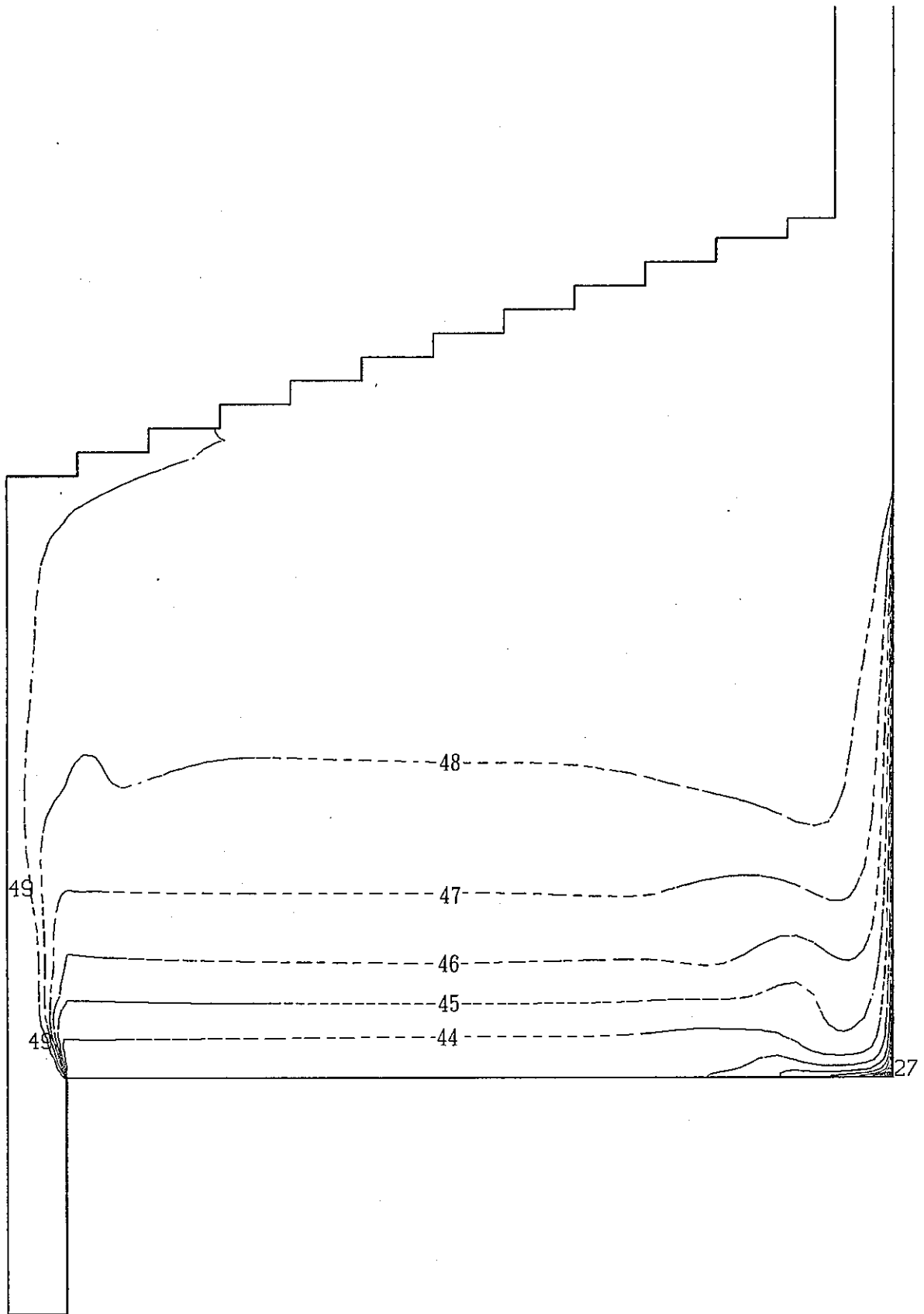
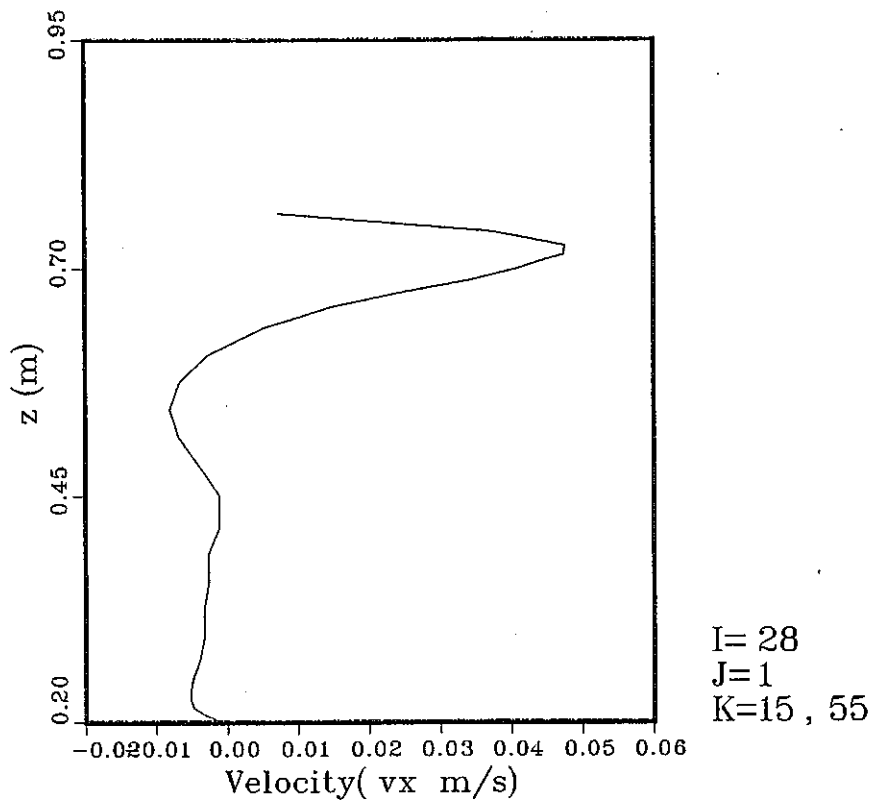


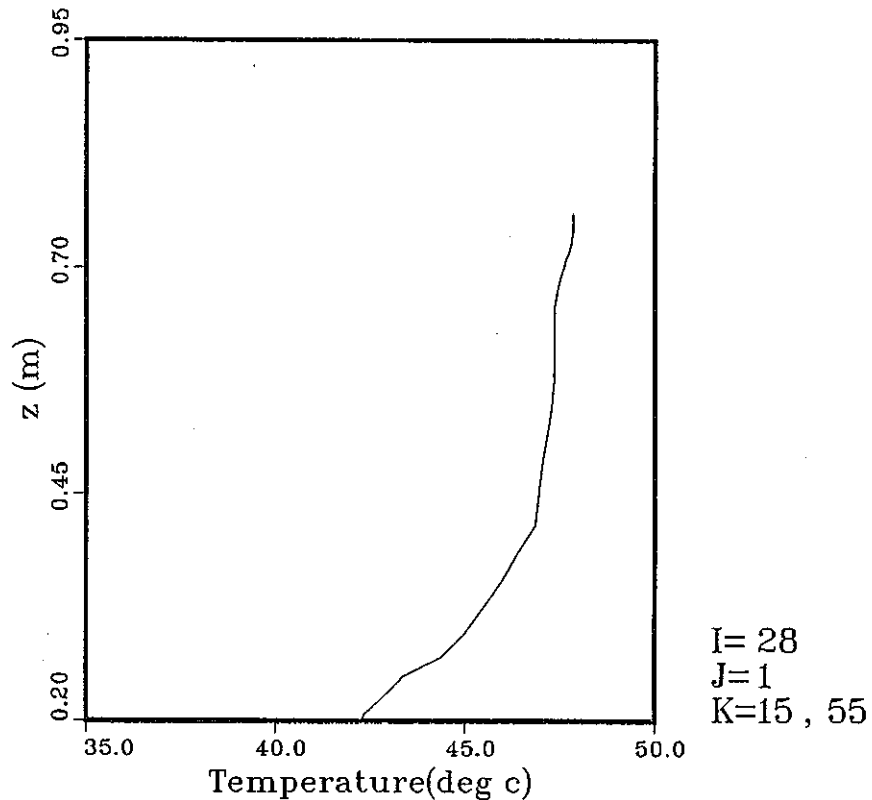
Fig. 3. 8 Isotherm for the Case-1 ($C_1=1.44$)

Axial velocity distribution p1



TIME 9567.0 SEC.

Axial temperature distribution p1



TIME 9567.0 SEC.

Fig. 3.9 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-1 ($C_1 = 1.44$)

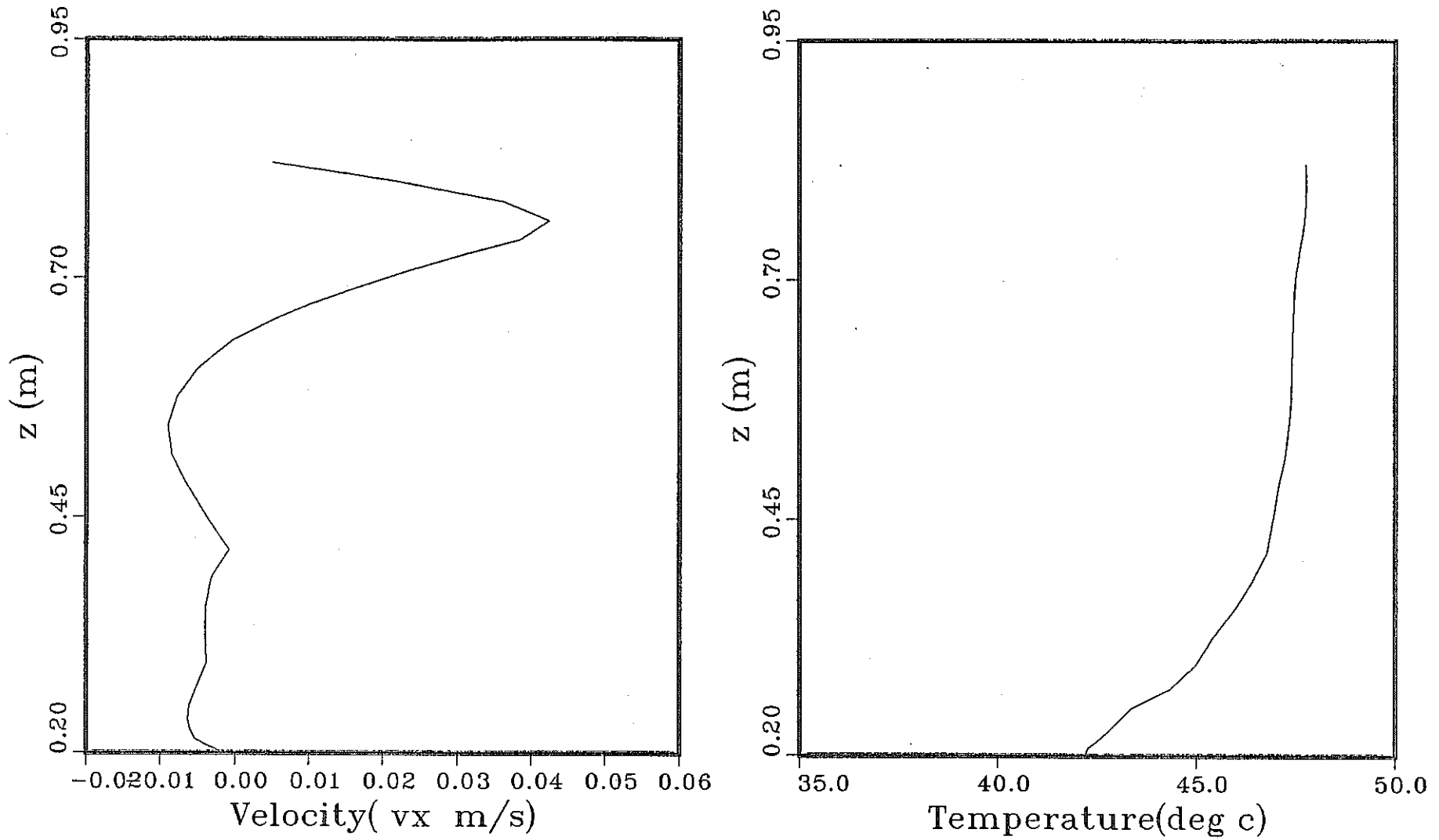


Fig. 3.10 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-1 ($C_1 = 1.44$)

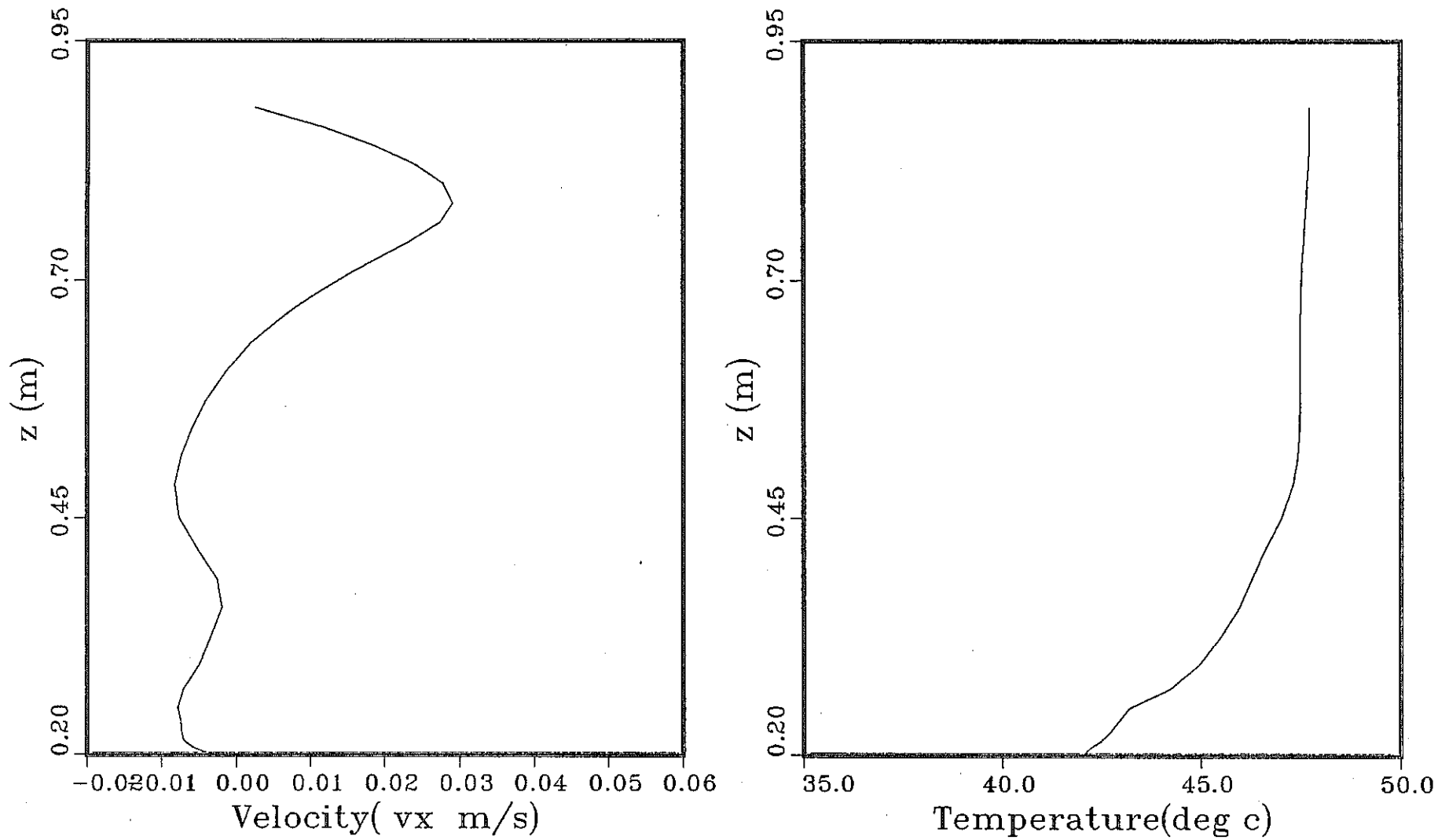


Fig. 3.11 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-1 ($C_1=1.44$)

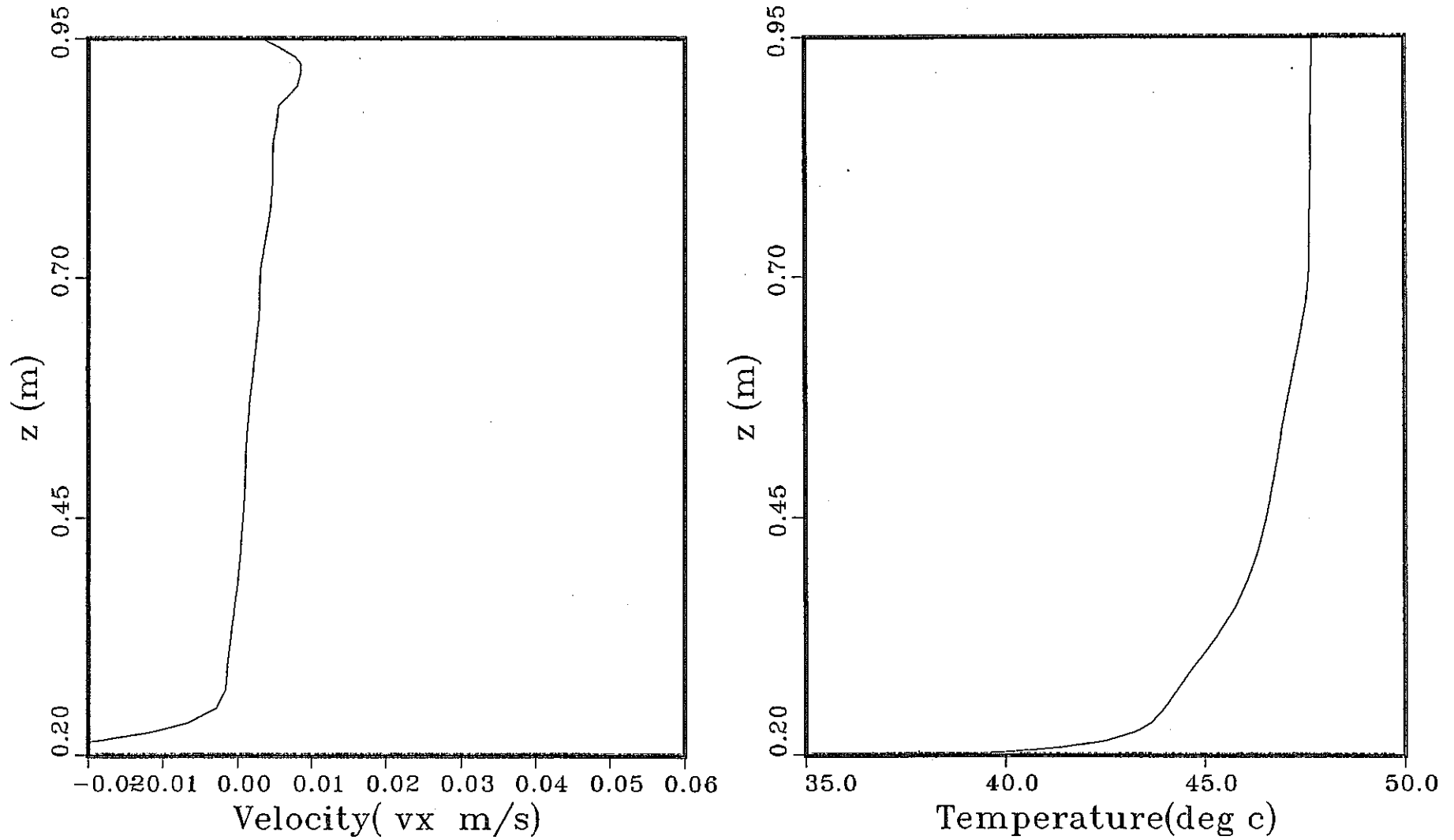


Fig. 3.12 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-1 ($C_1=1.44$)

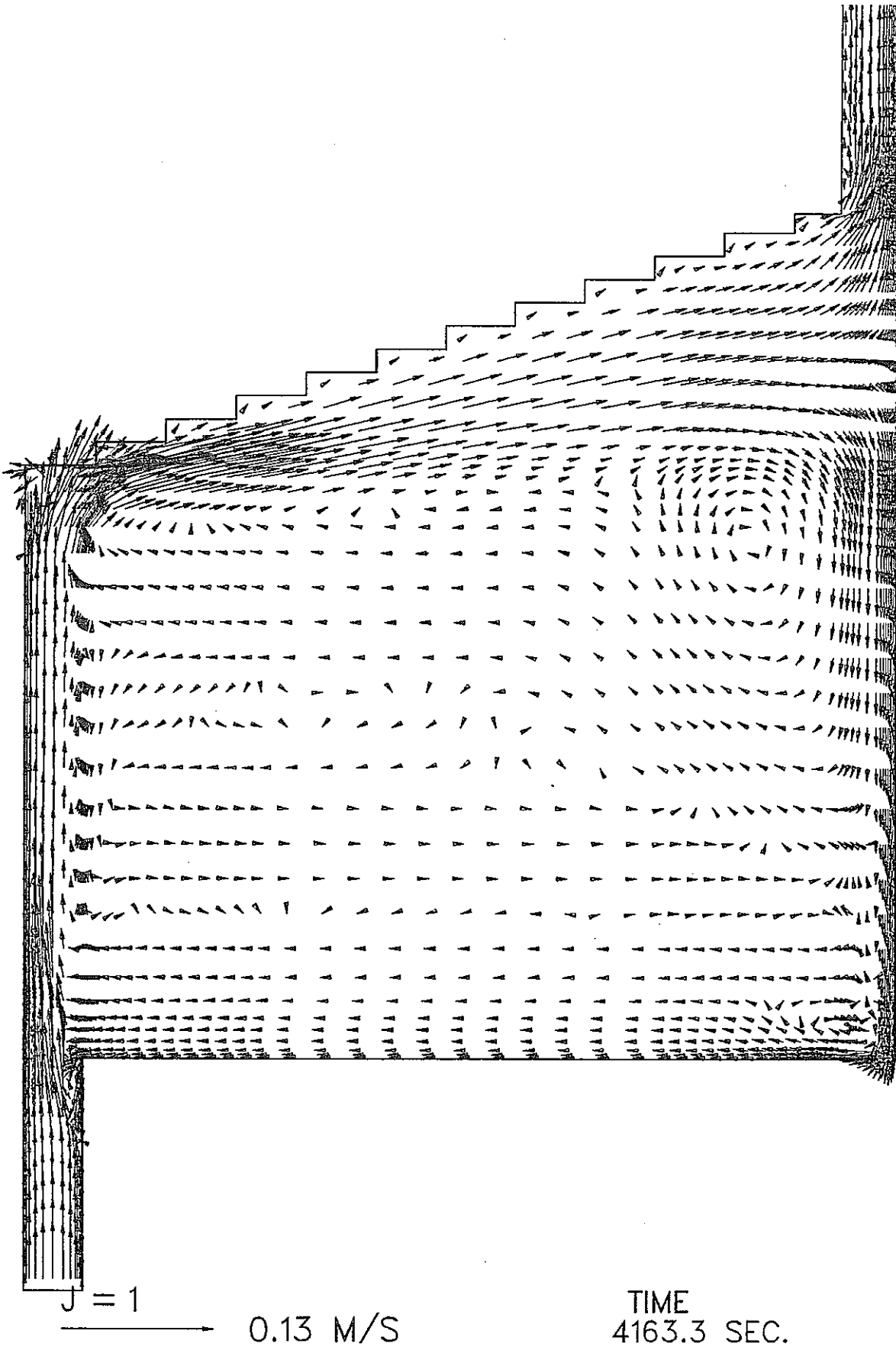


Fig. 3.13 Velocity Vector Field for the Case-1 ($C_1=1.656$)

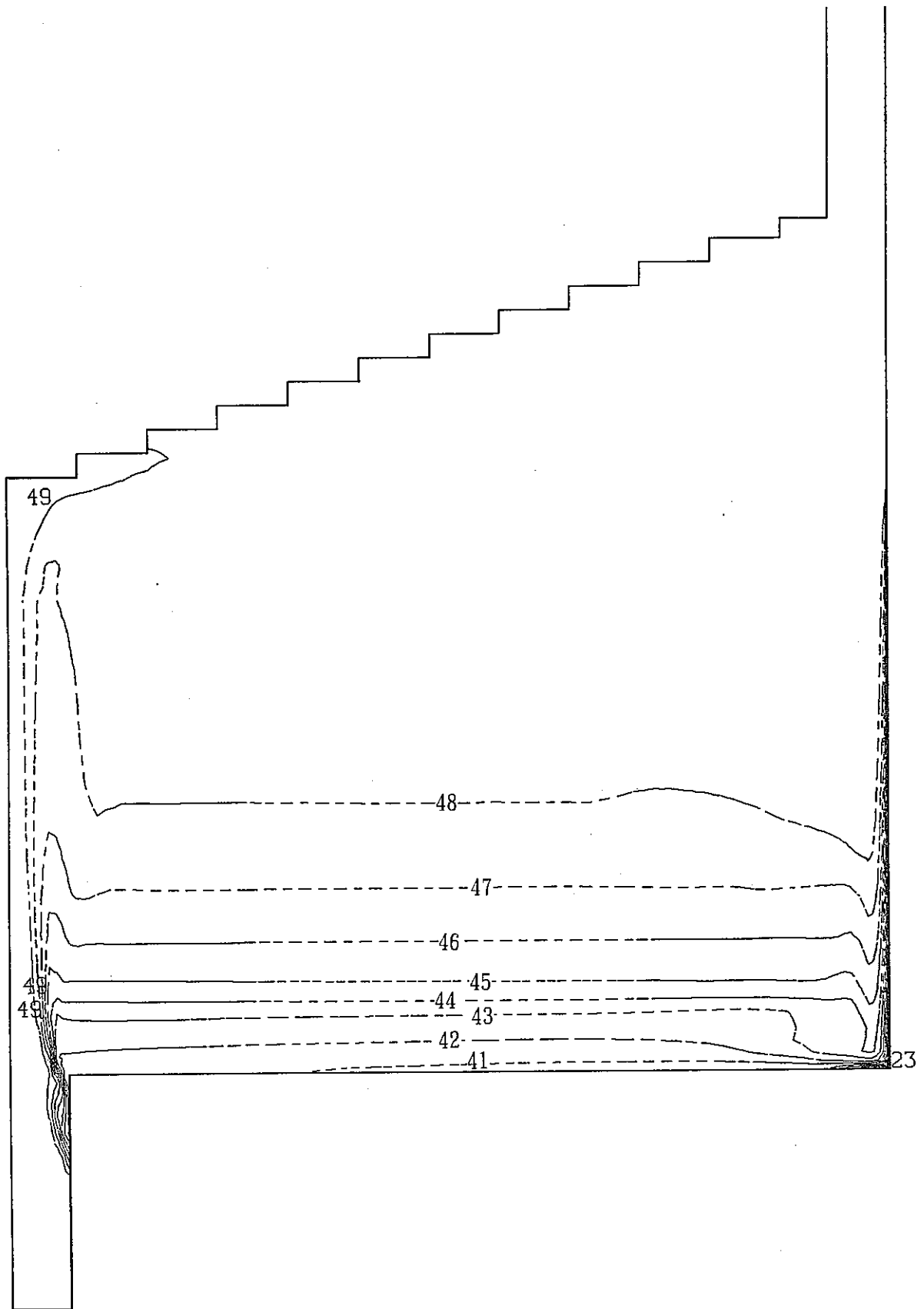


Fig. 3.14 Isotherm for the Case-1 ($C_1=1.656$)

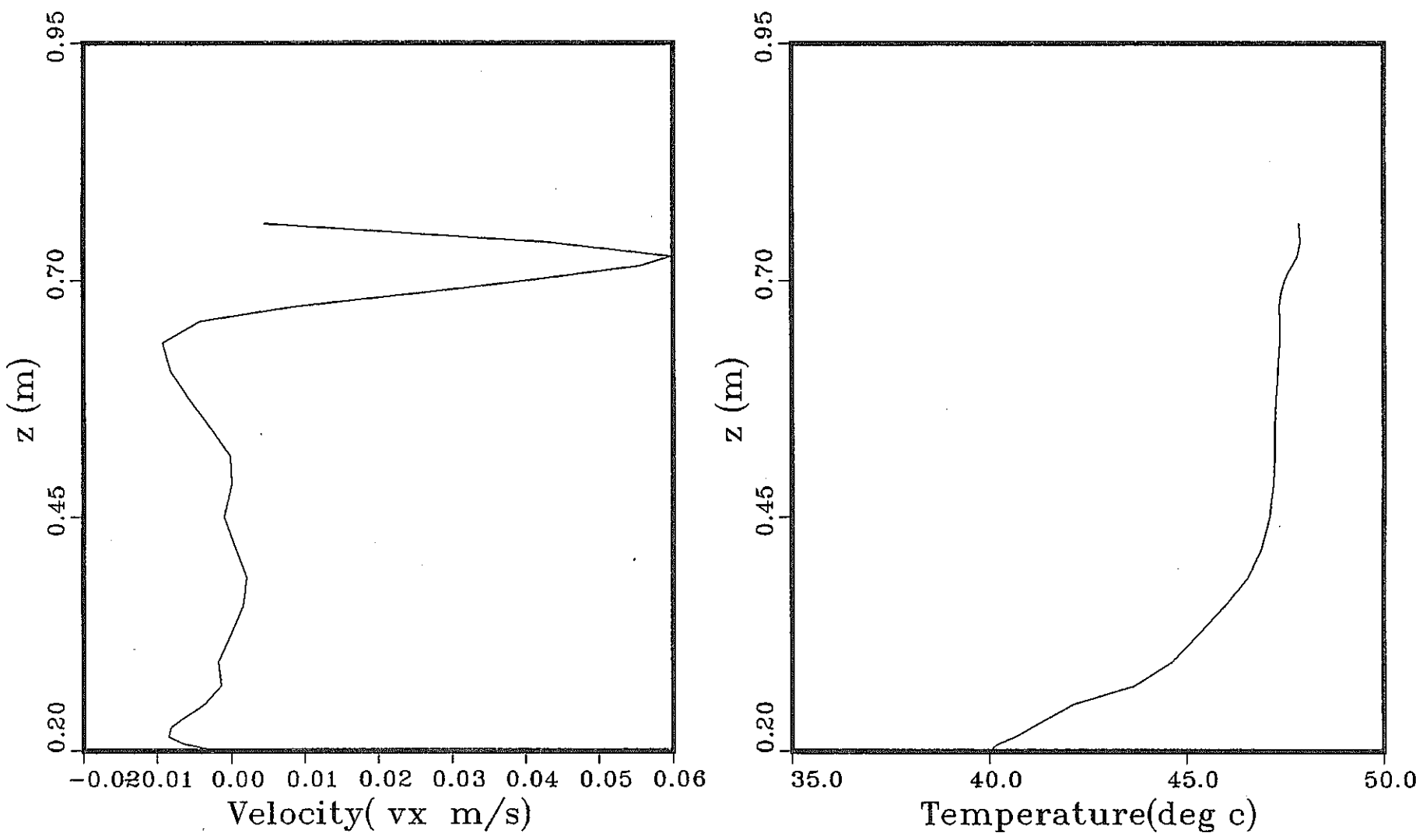


Fig. 3.15 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-1 ($C_i = 1.656$)

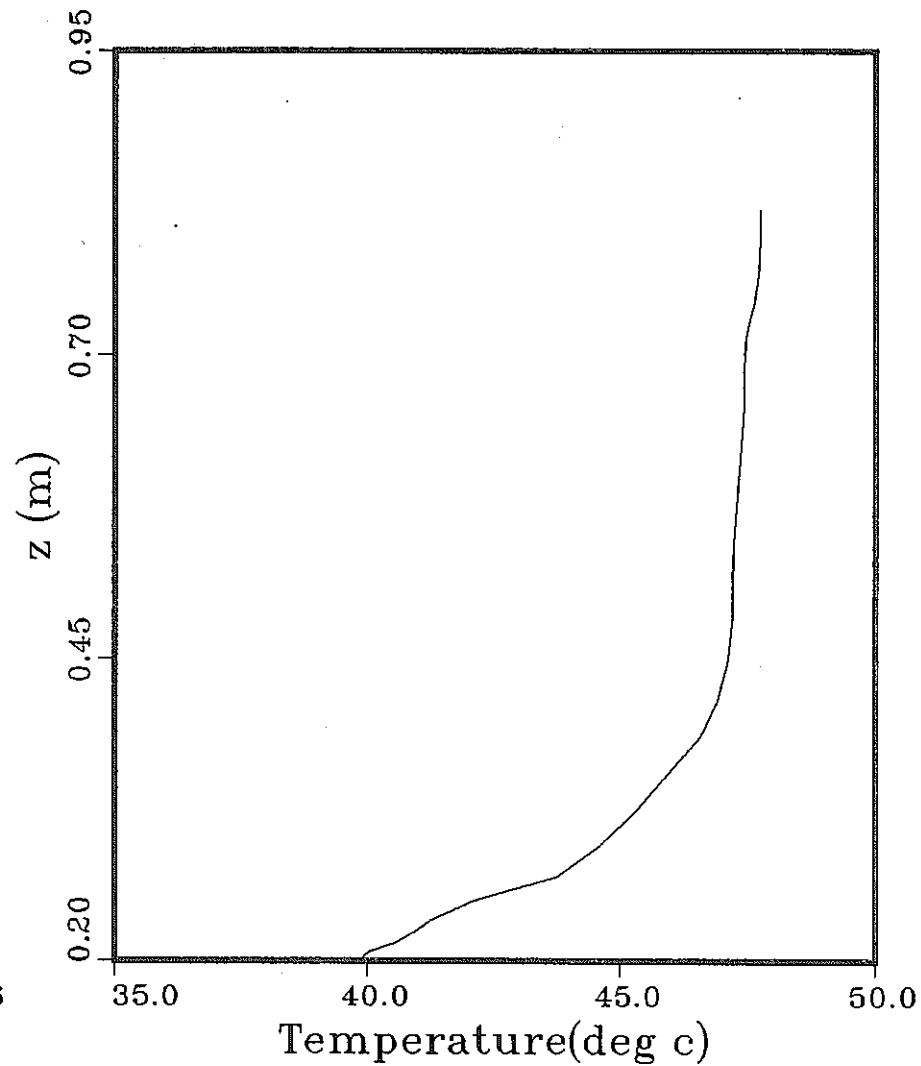
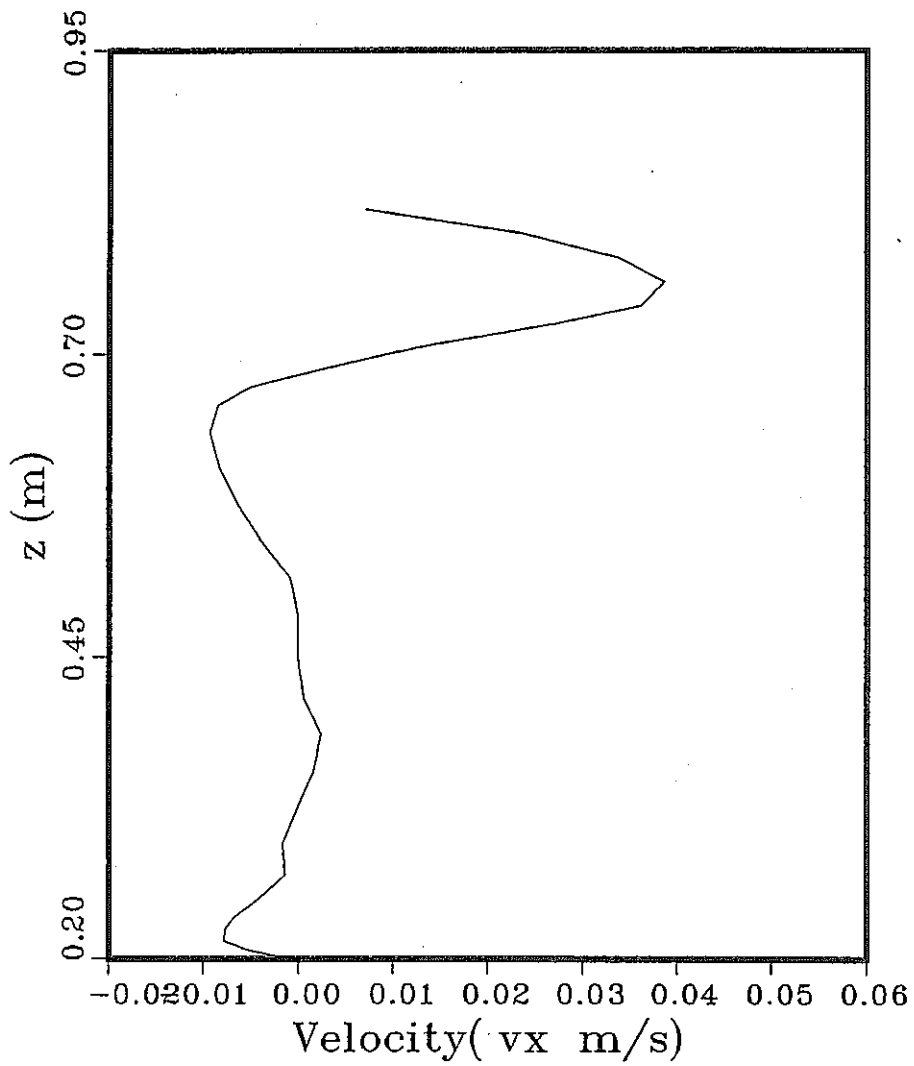


Fig. 3.16 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-1 ($C_1 = 1.656$)

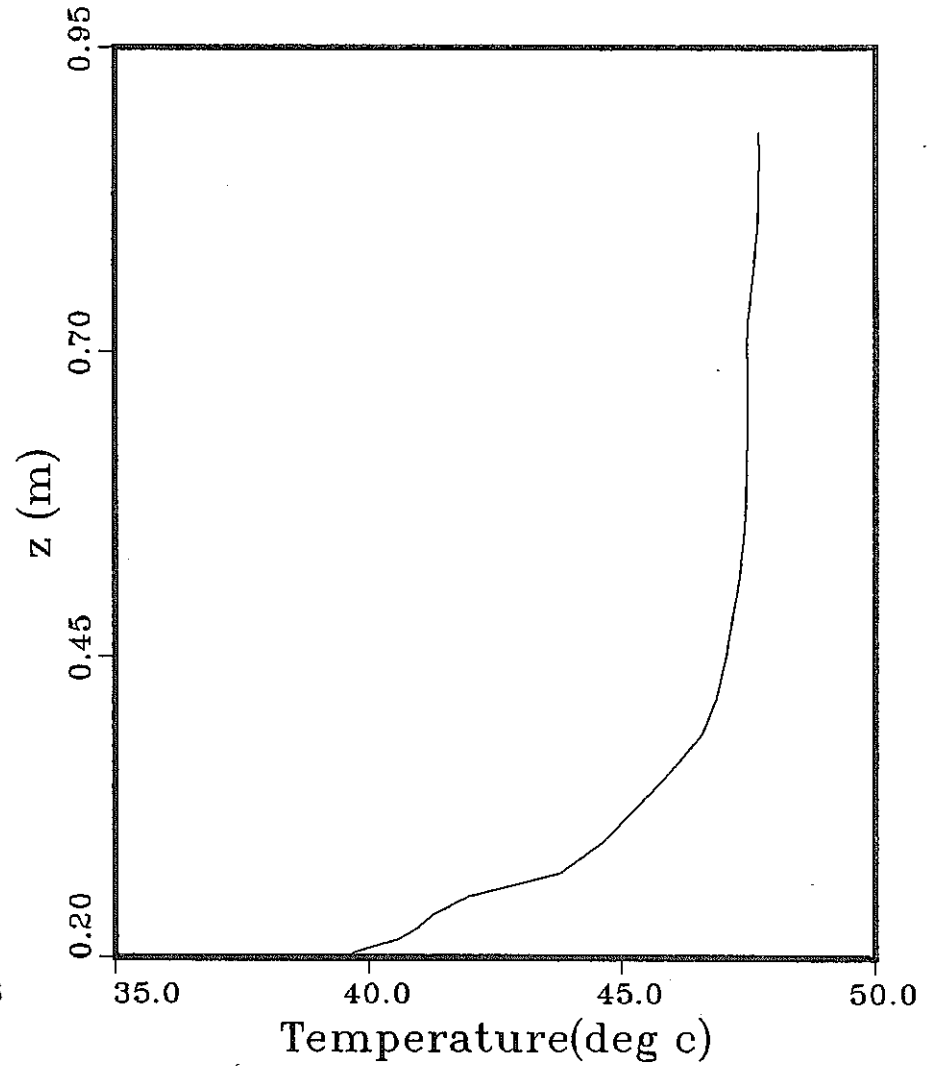
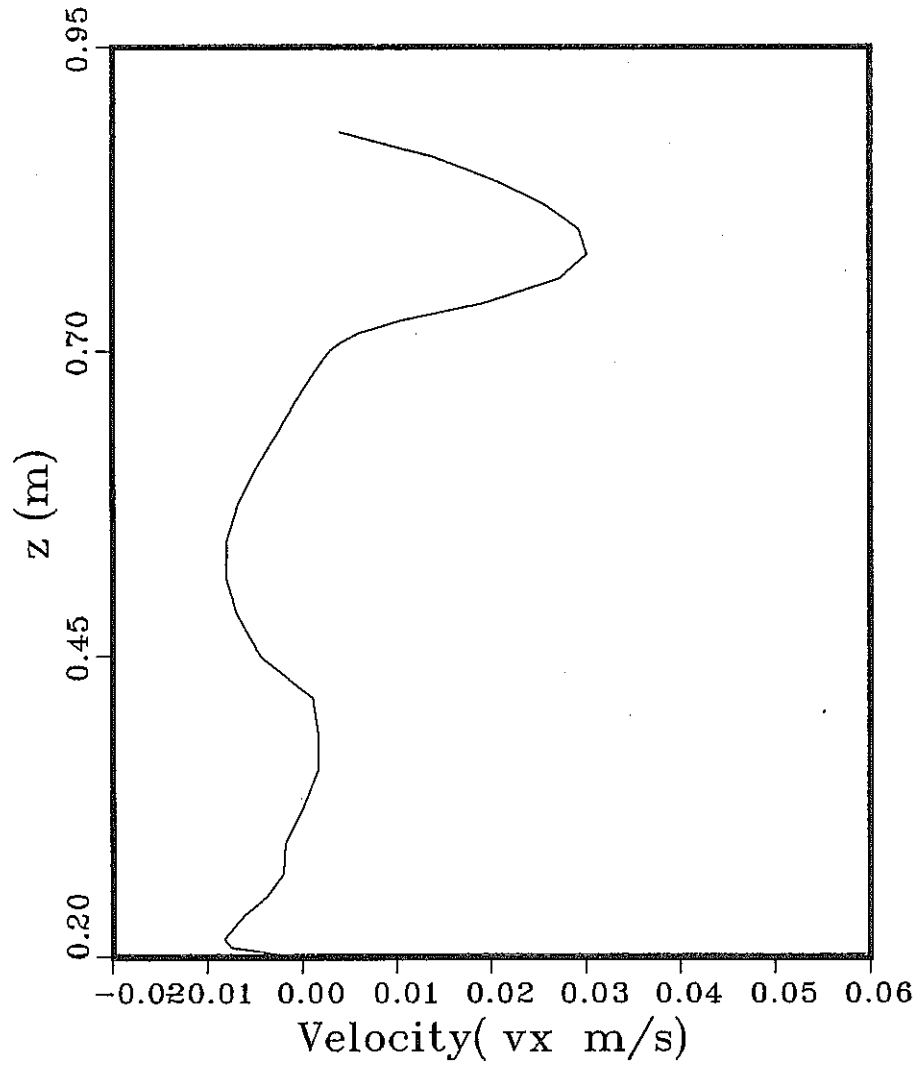


Fig. 3.17 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-1 ($C_1=1.656$)

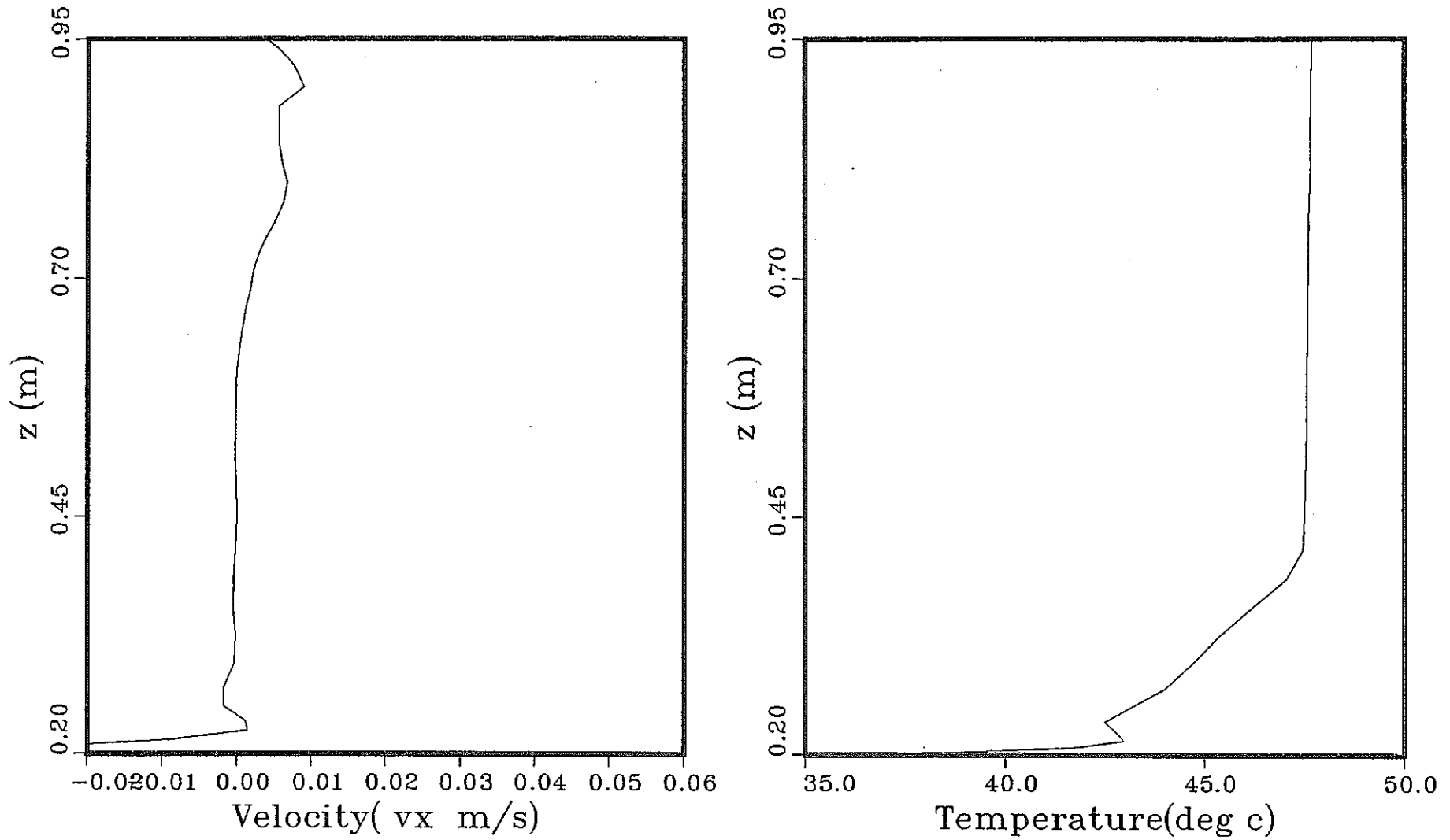


Fig. 3.18 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-1 ($C_1=1.656$)

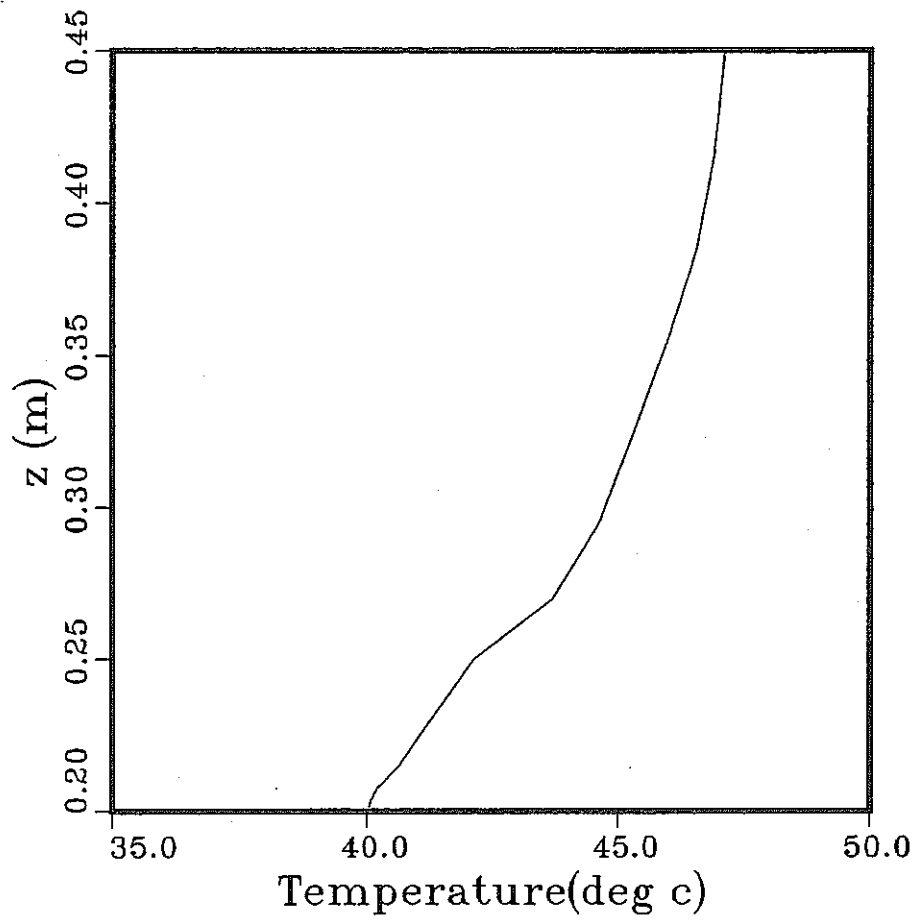
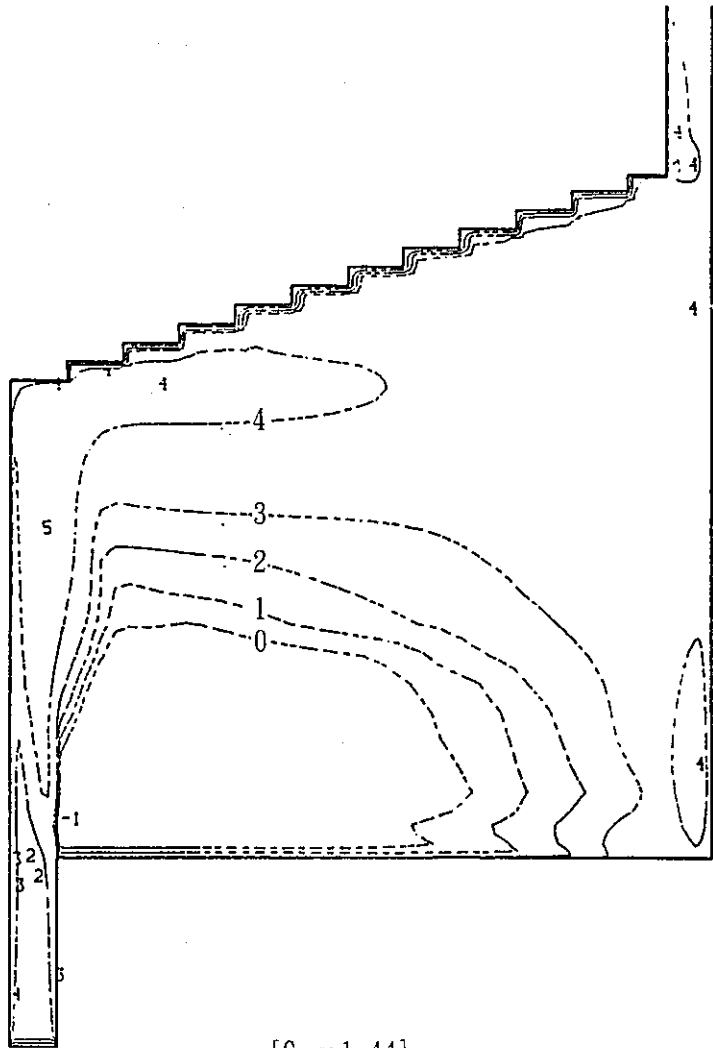
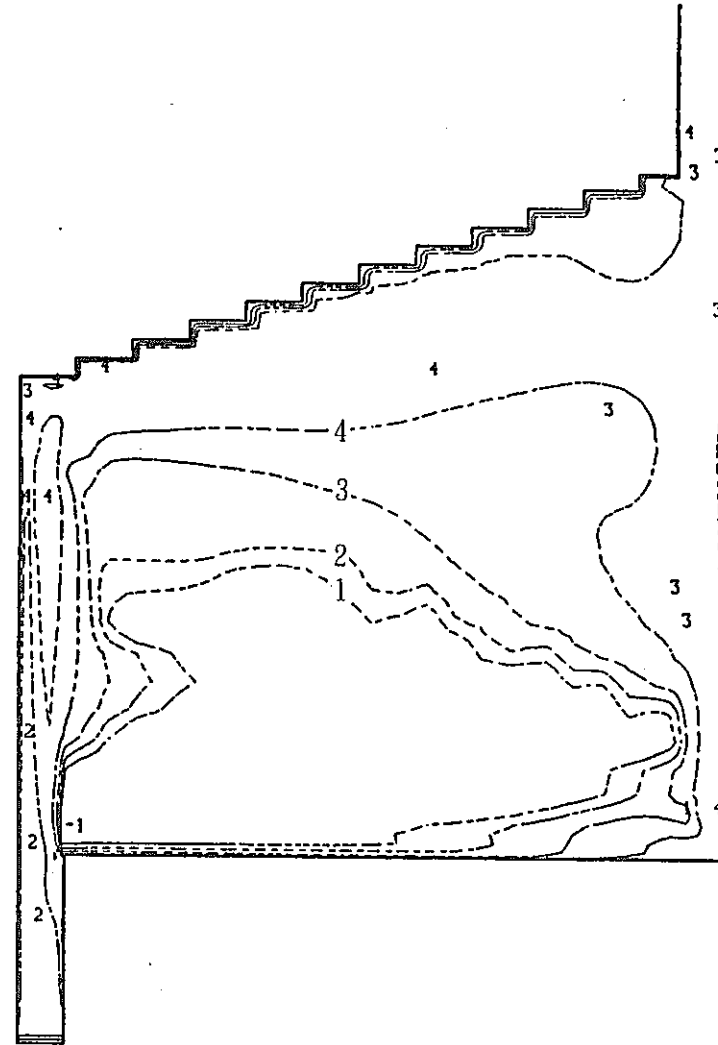


Fig. 3.19 Detailed Axial Temperature Distribution at the Traverse Line P4 for the Case-1 ($C_1=1.656$)



[$C_1 = 1.44$]



[$C_1 = 1.656$]

Fig. 3.20 Comparison of Turbulent Kinetic Energy Distribution for the Case-1
 $K = \log_{10}(K * 10^8)$

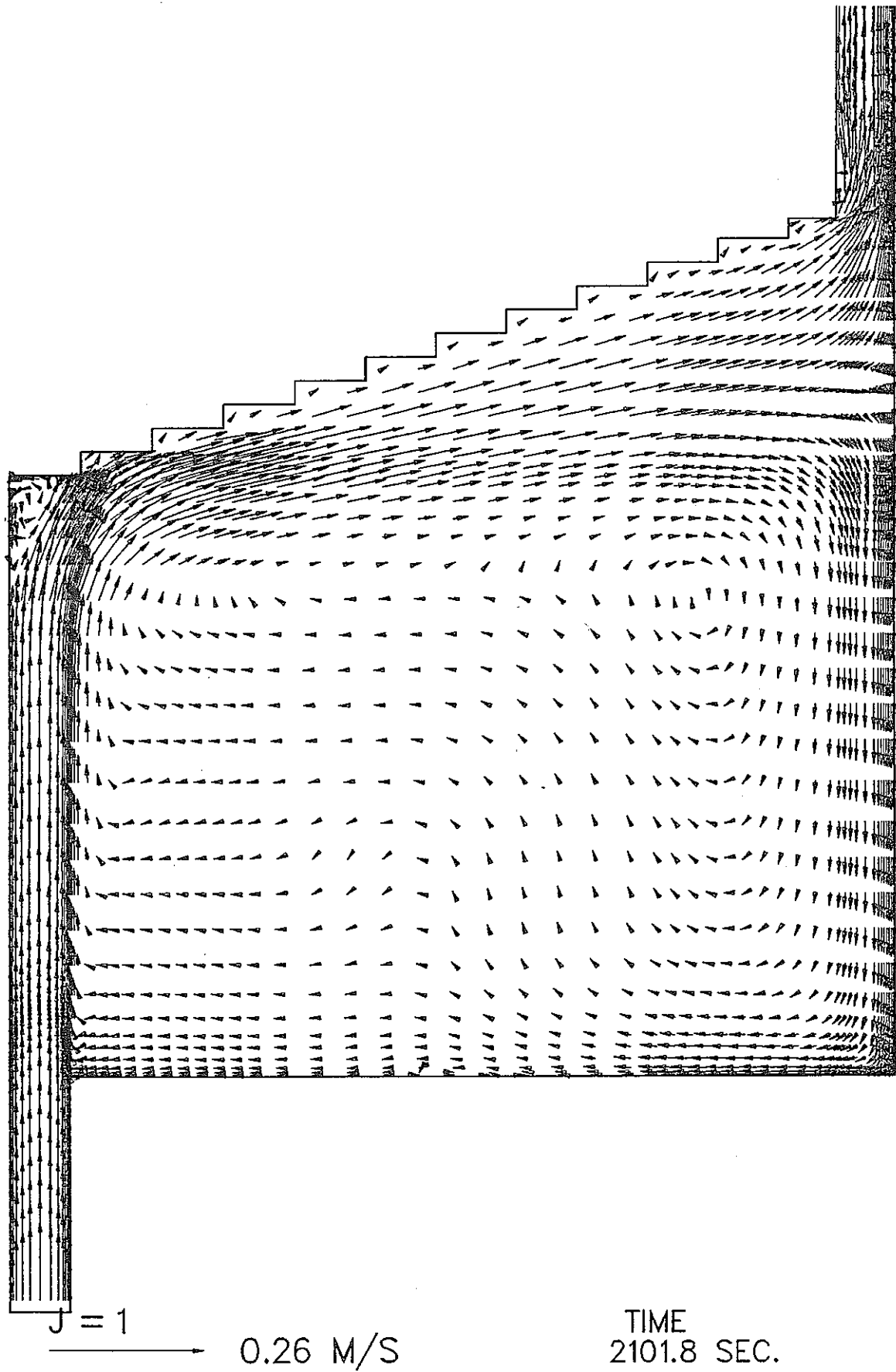


Fig. 3.21 Velocity Vector Field for the Case-4($C_1=1.44$)

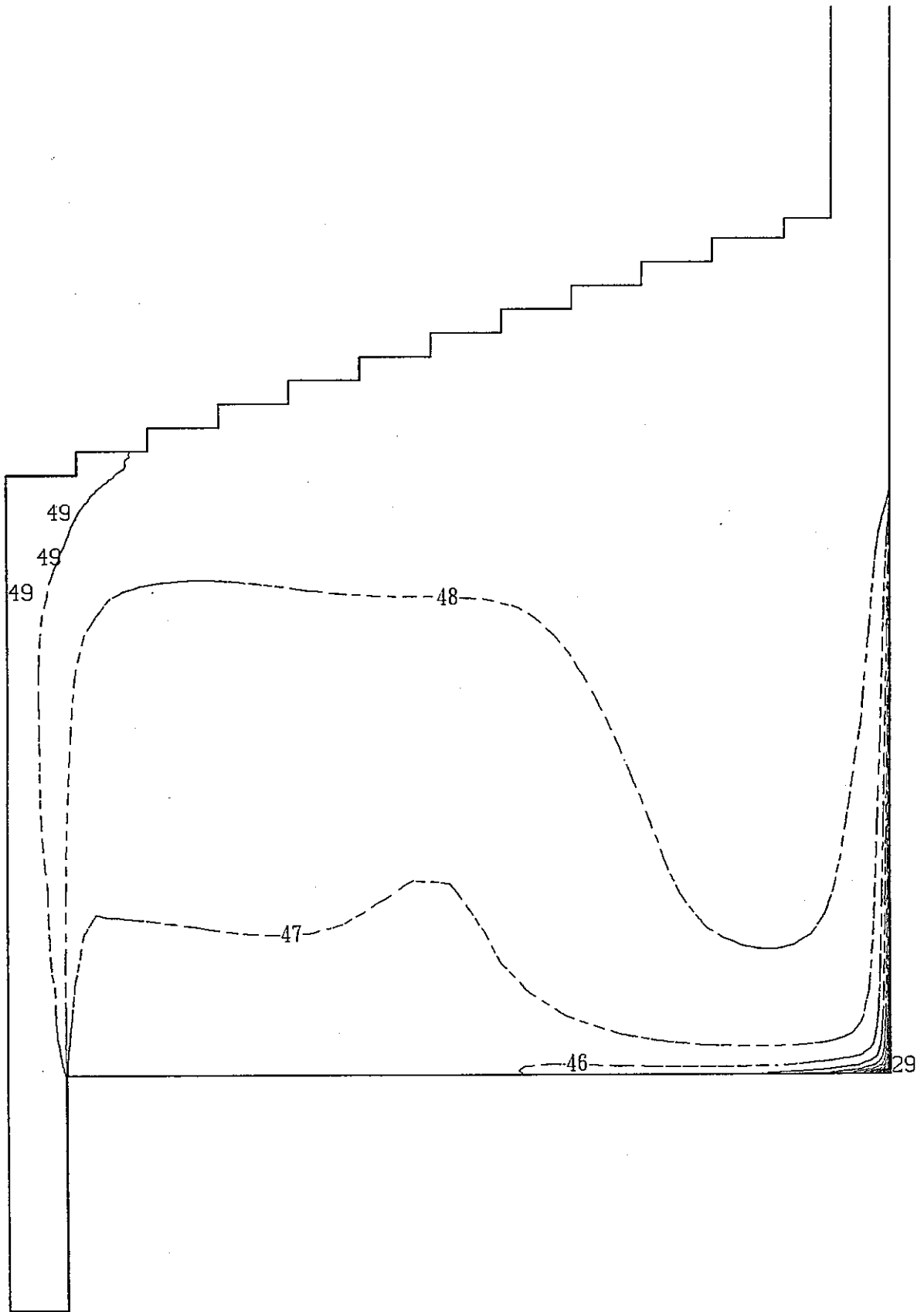


Fig. 3.22 Isotherm for the Case-4($C_1=1.44$)

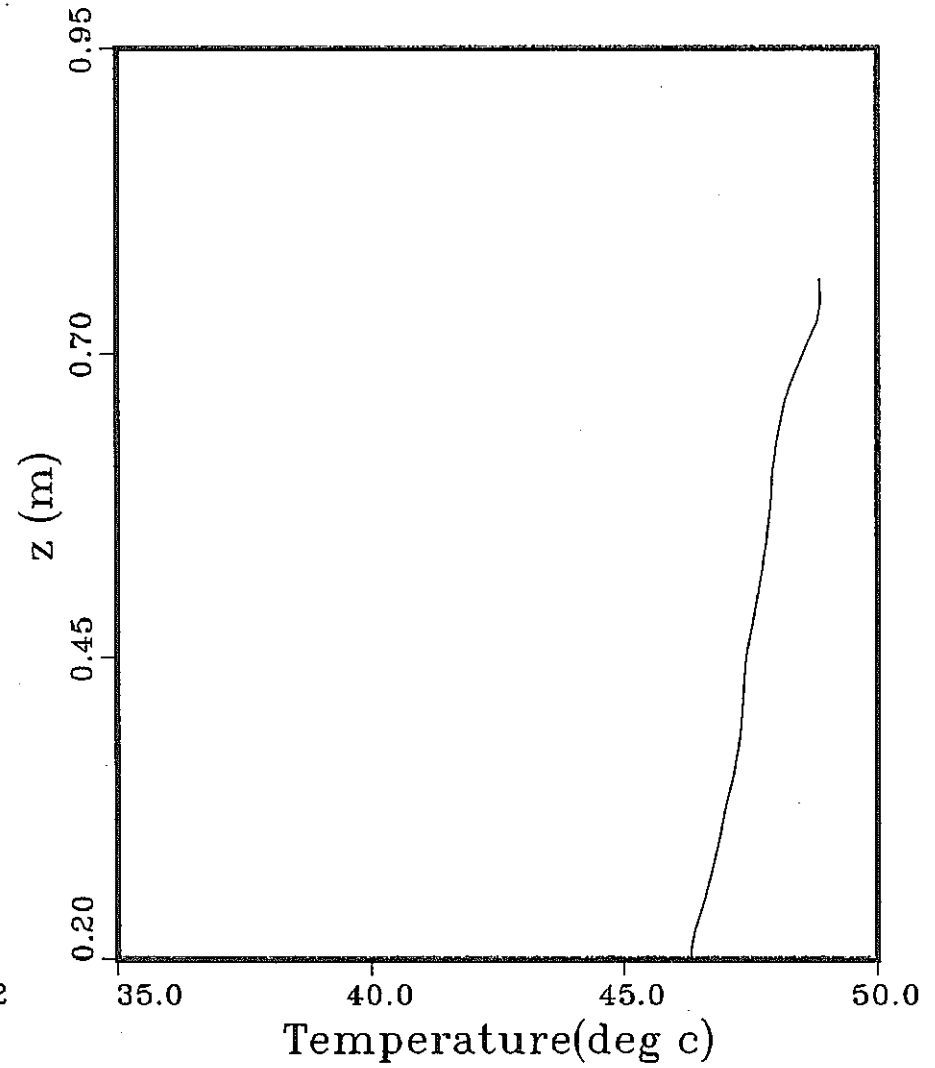
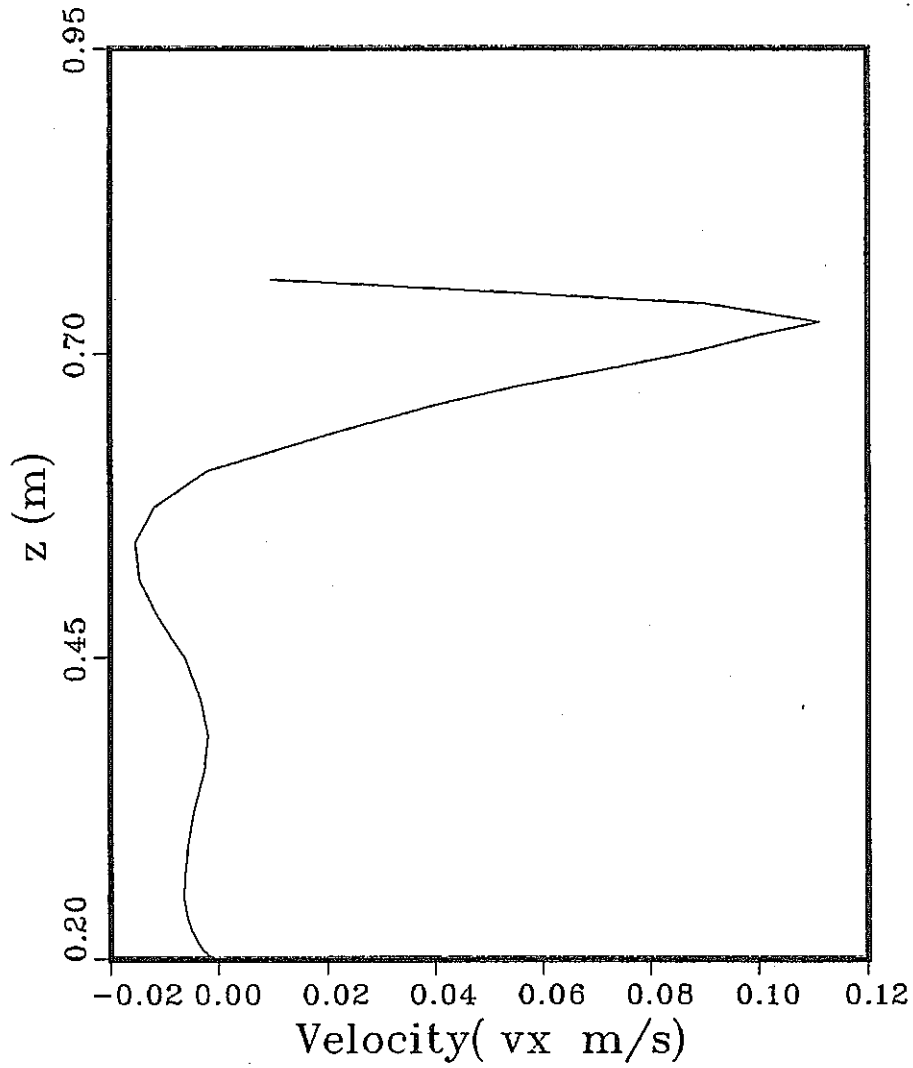


Fig. 3.23 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-4($C_1=1.44$)

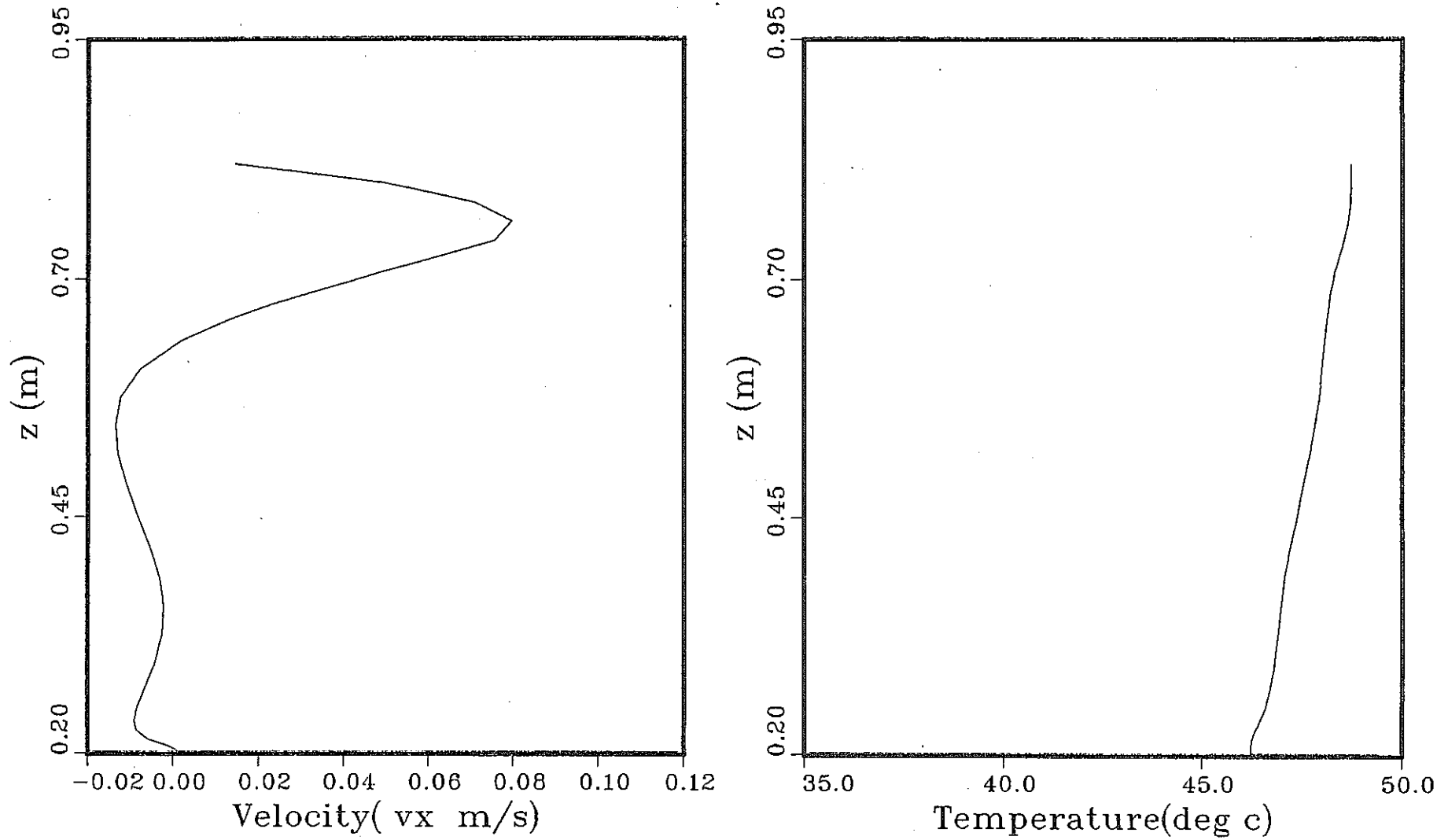


Fig. 3.24 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-4($C_1 = 1.44$)

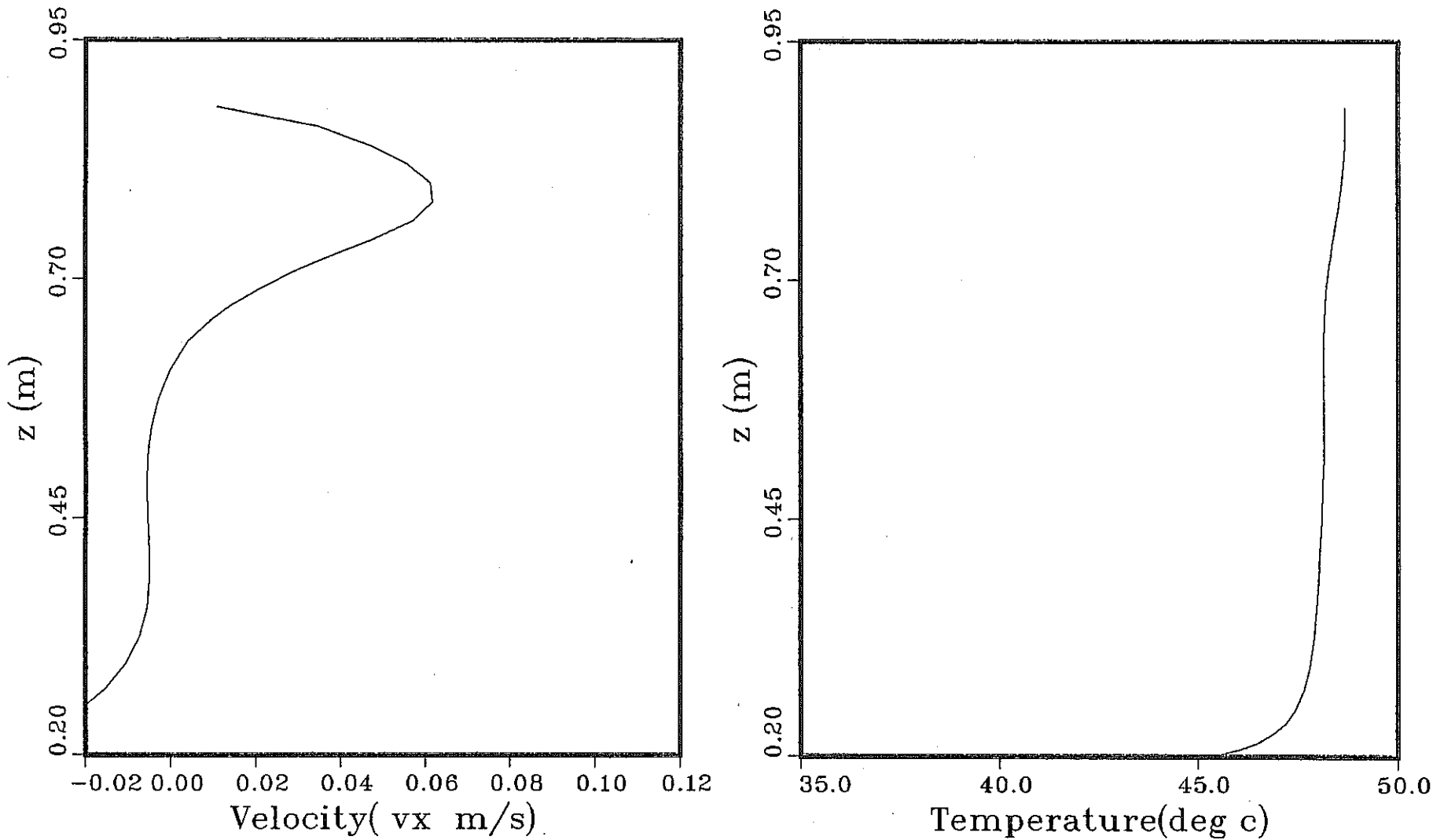


Fig. 3.25 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-4($C_1=1.44$)

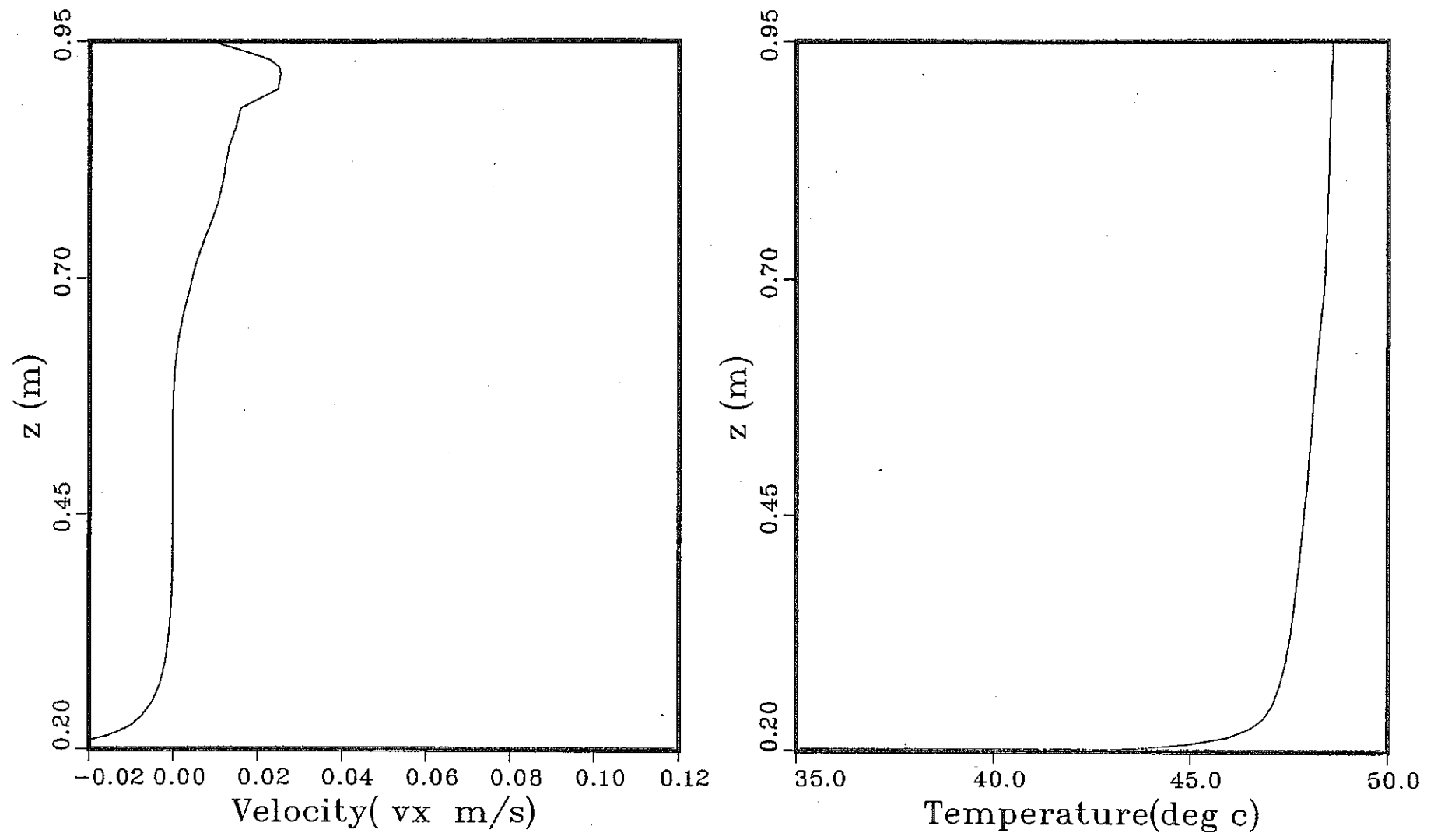


Fig. 3.26 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-4($C_1=1.44$)

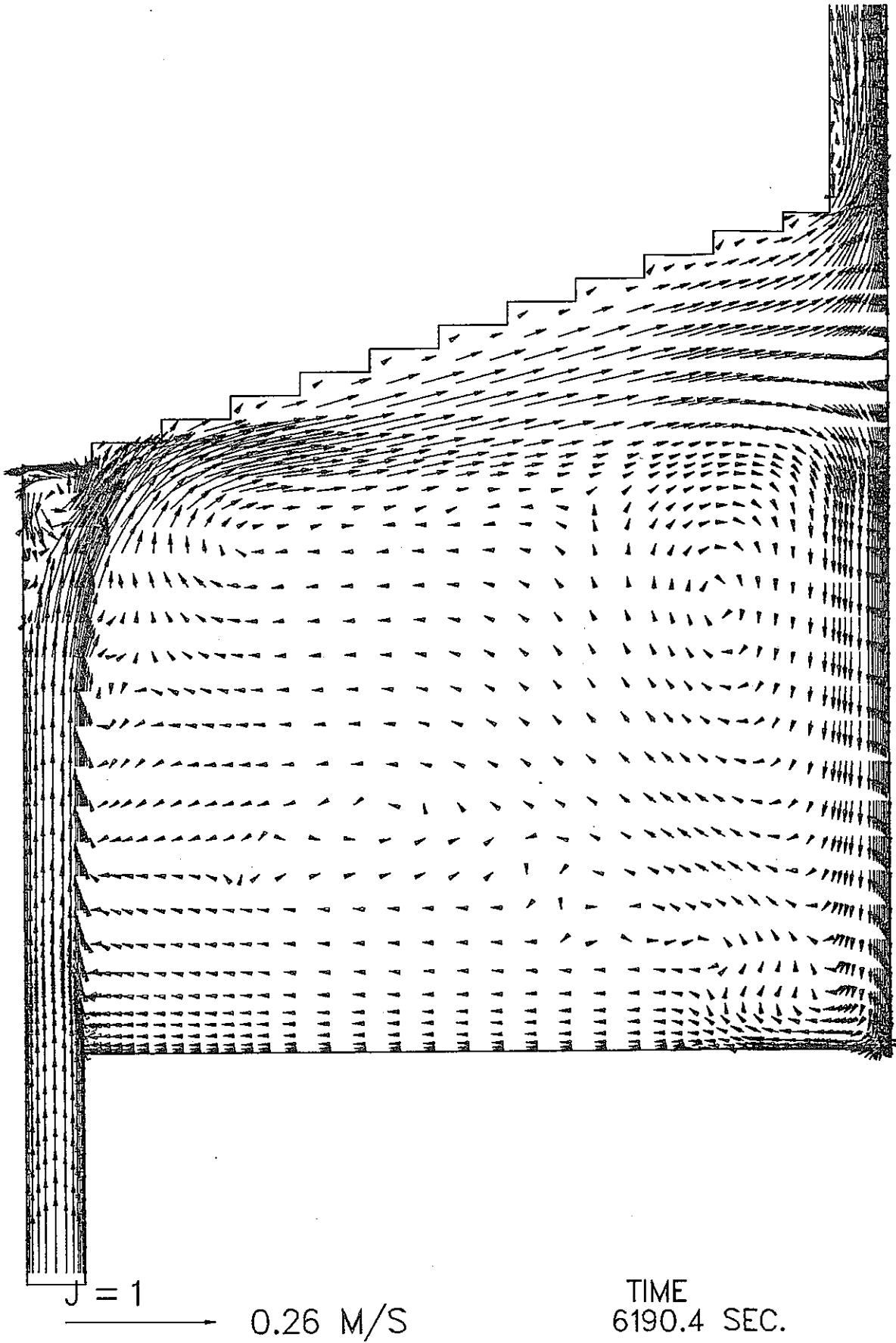


Fig. 3.27 Velocity Vector Field for the Case-4($C_1=1.656$)

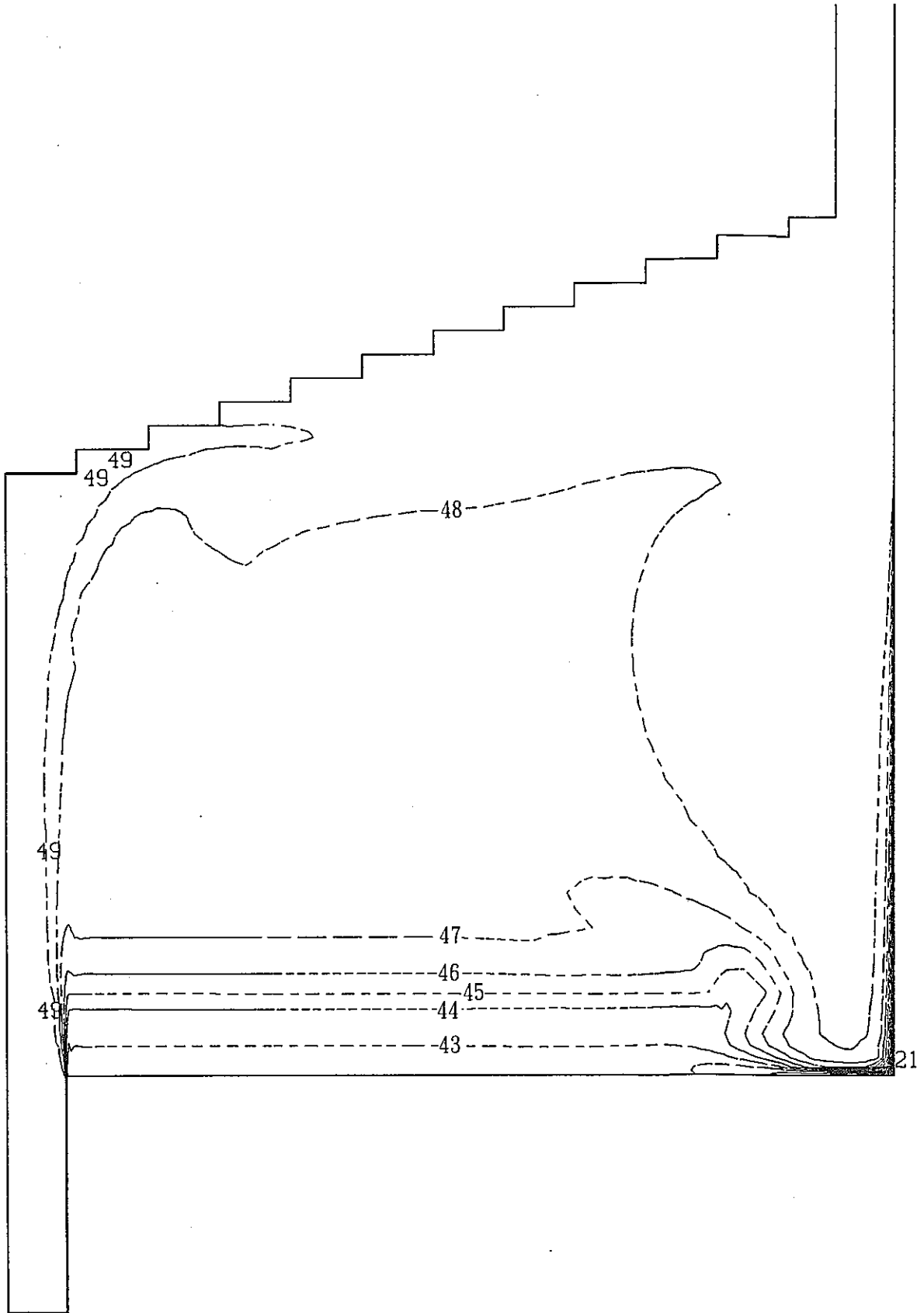


Fig. 3.28 Isotherm for the Case-4($C_1=1.656$)

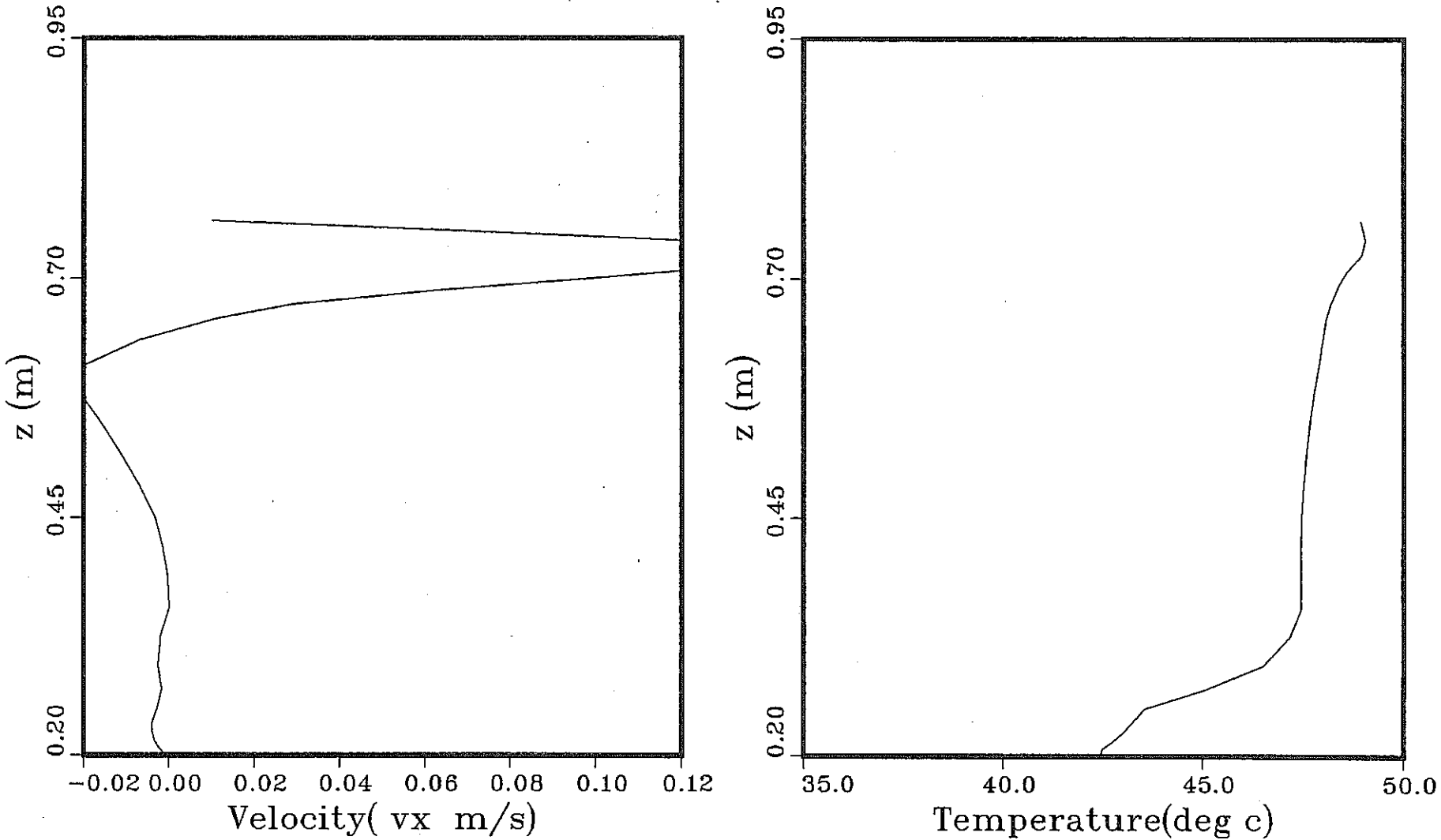


Fig. 3.29 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P1 for the Case-4($C_1=1.656$)

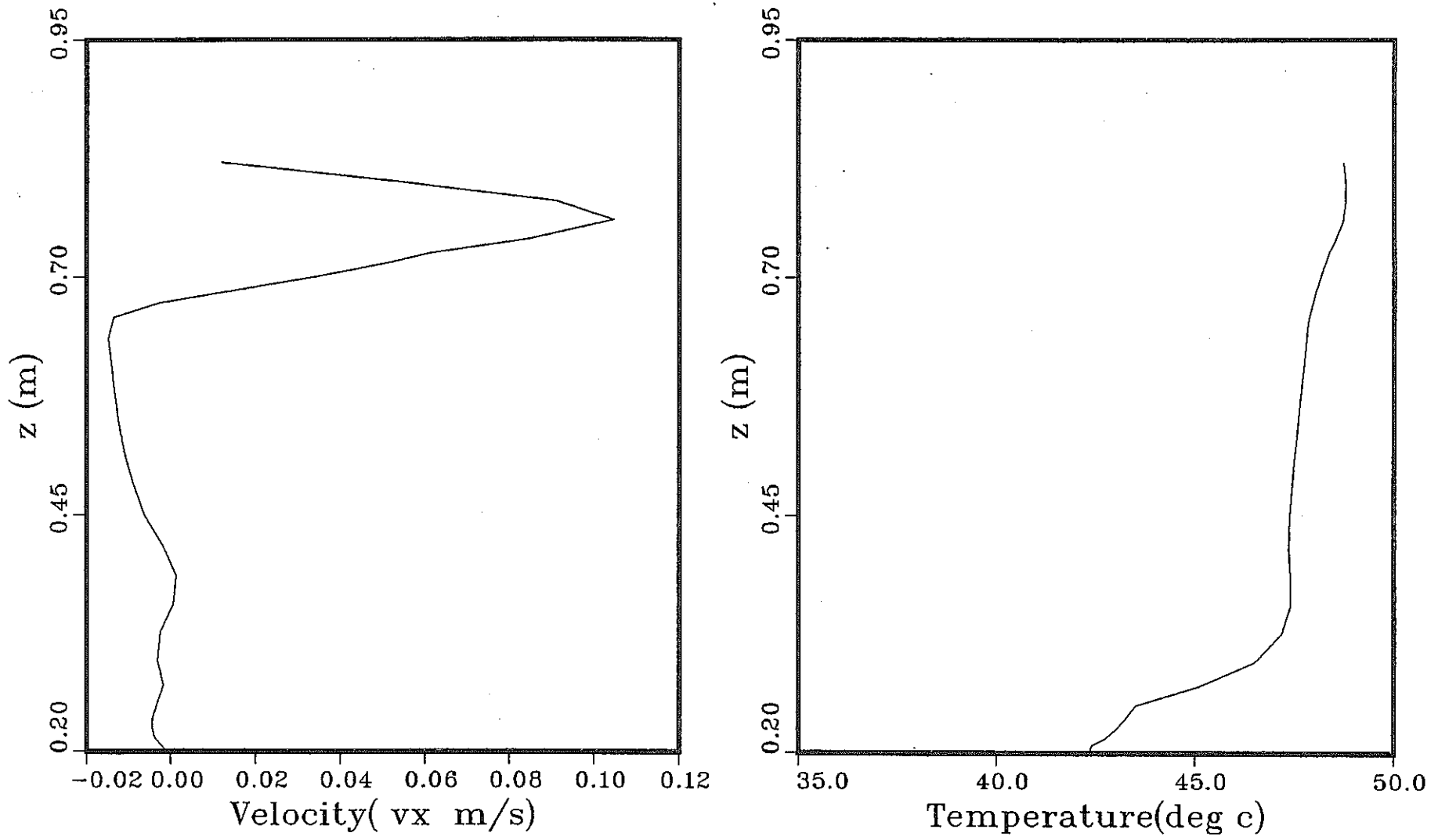


Fig. 3.30 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P2 for the Case-4($C_1=1.656$)

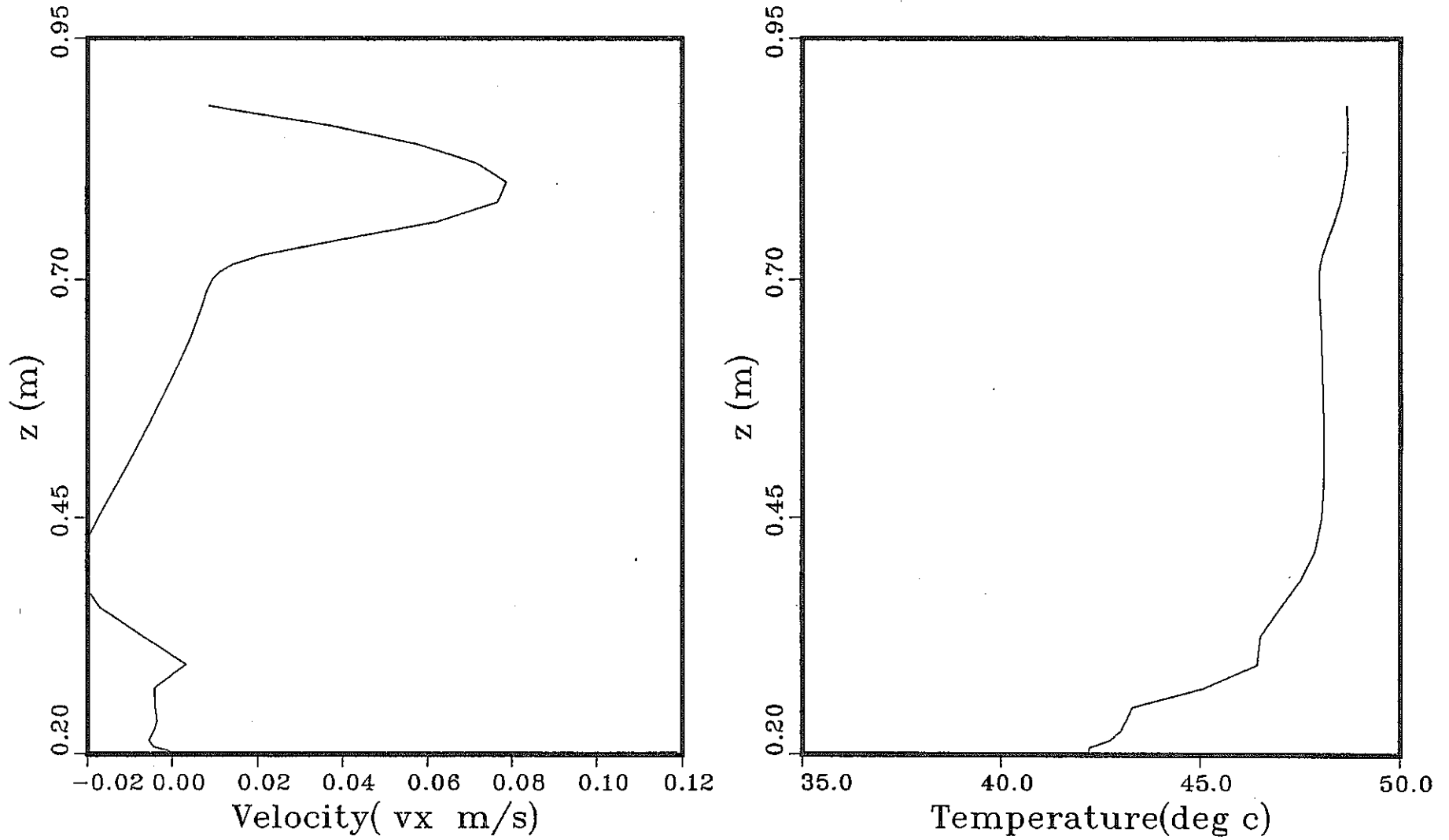


Fig. 3.31 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P3 for the Case-4($C_1=1.656$)

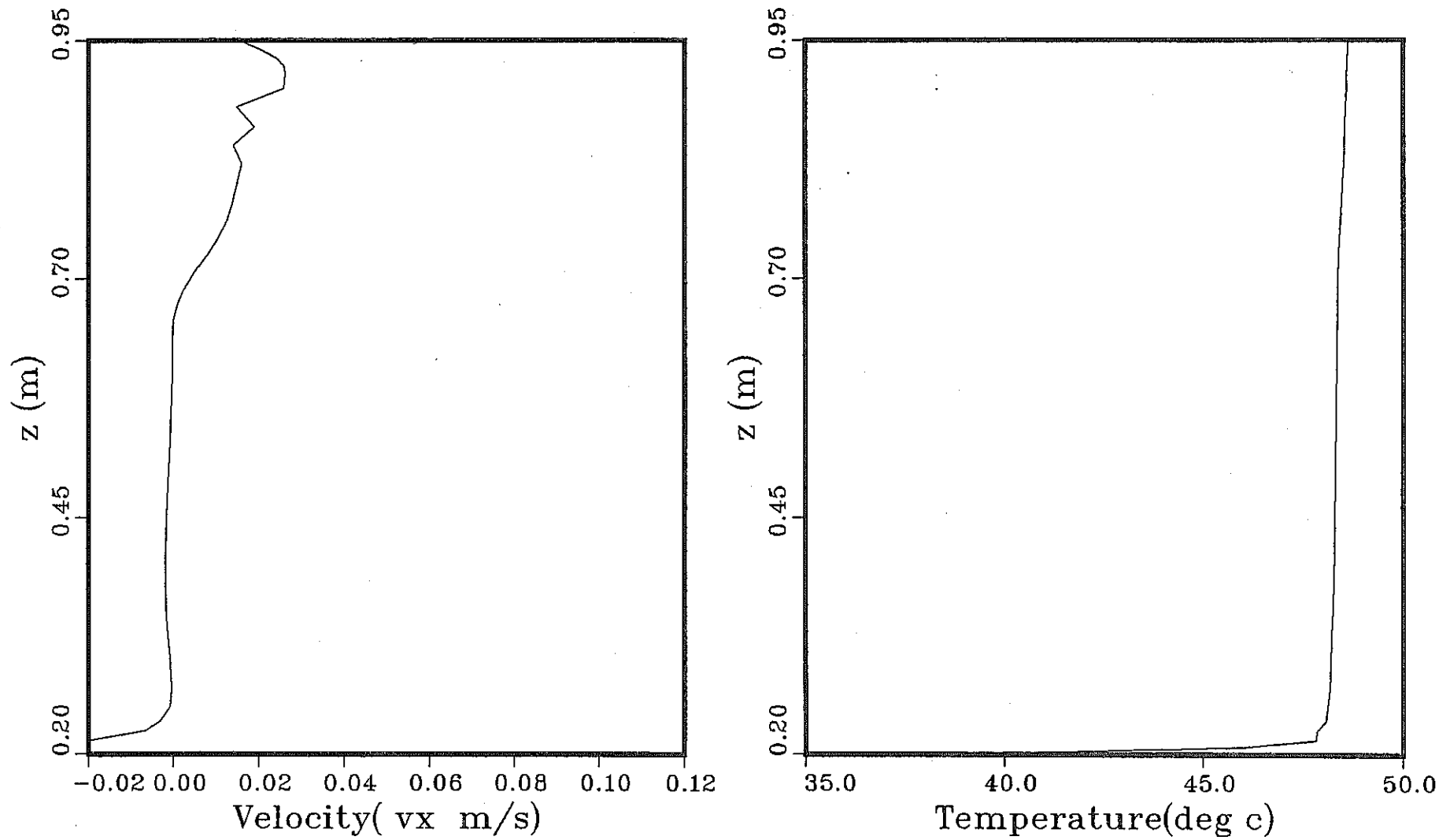


Fig. 3.32 Axial Distributions of Temperature and Horizontal Velocity Component at the Traverse Line P4 for the Case-4($C_1=1.656$)

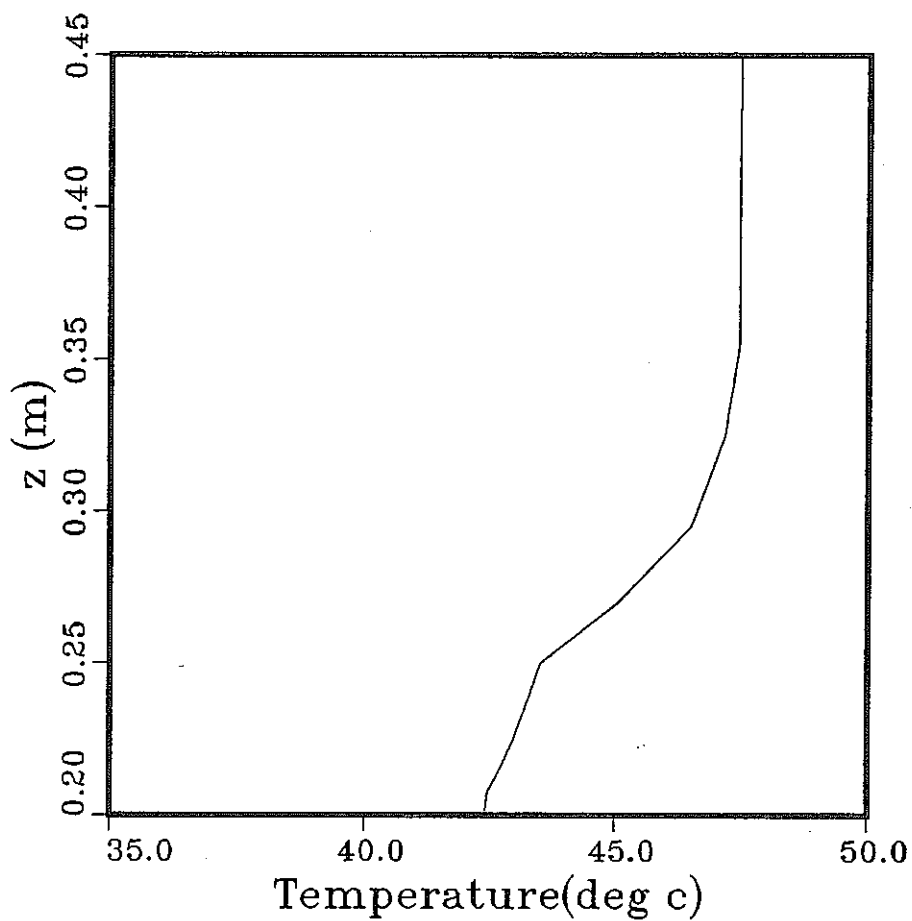


Fig. 3.33 Detailed Axial Temperature Distribution at the Traverse Line P4 for the Case-4($C_1 = 1.656$)

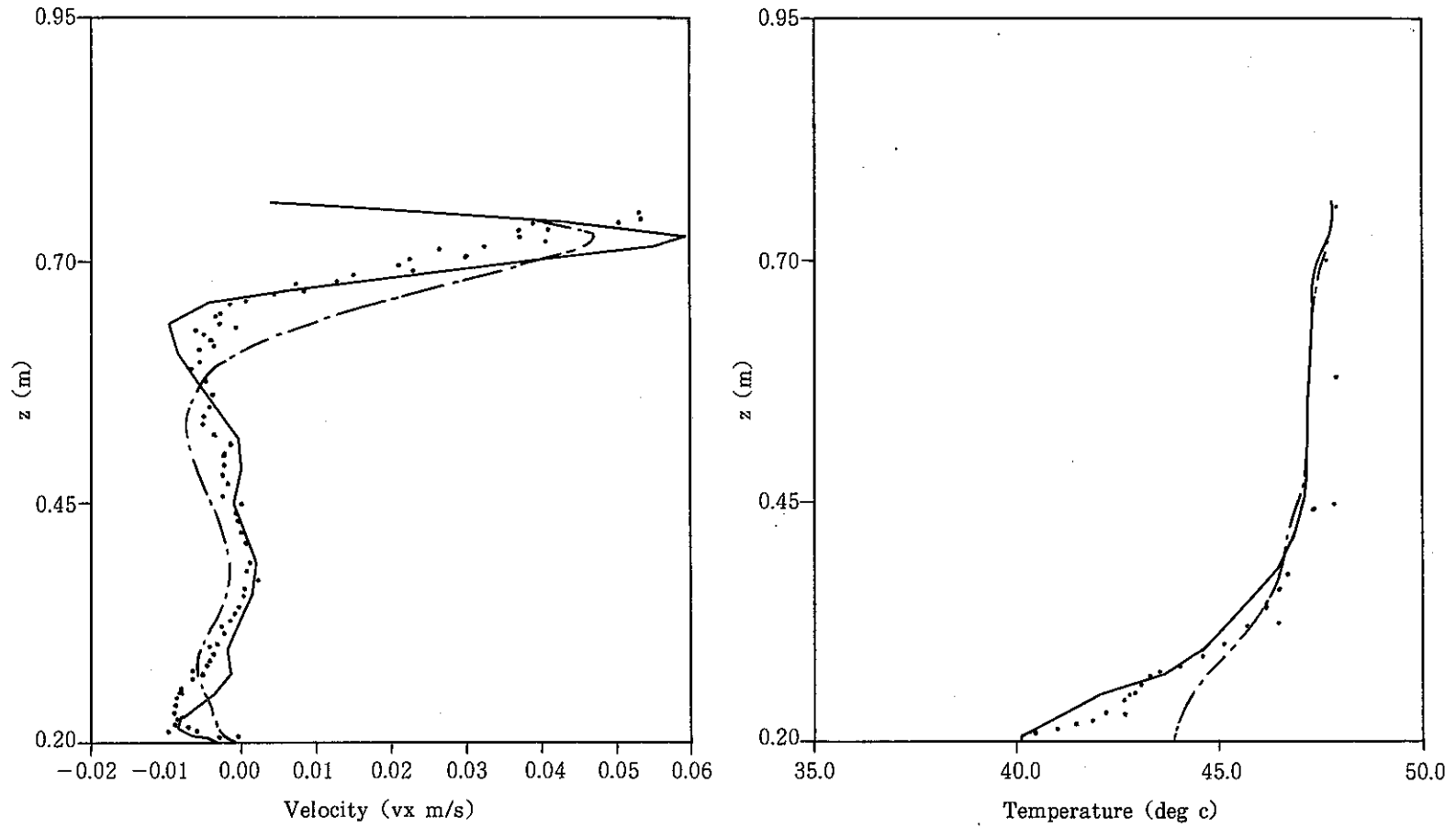


Fig. 4.1 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line
P1 for the Case-1

- : Measured
- : Calculated($C_1 = 1.44$)
- : Calculated($C_1 = 1.656$)

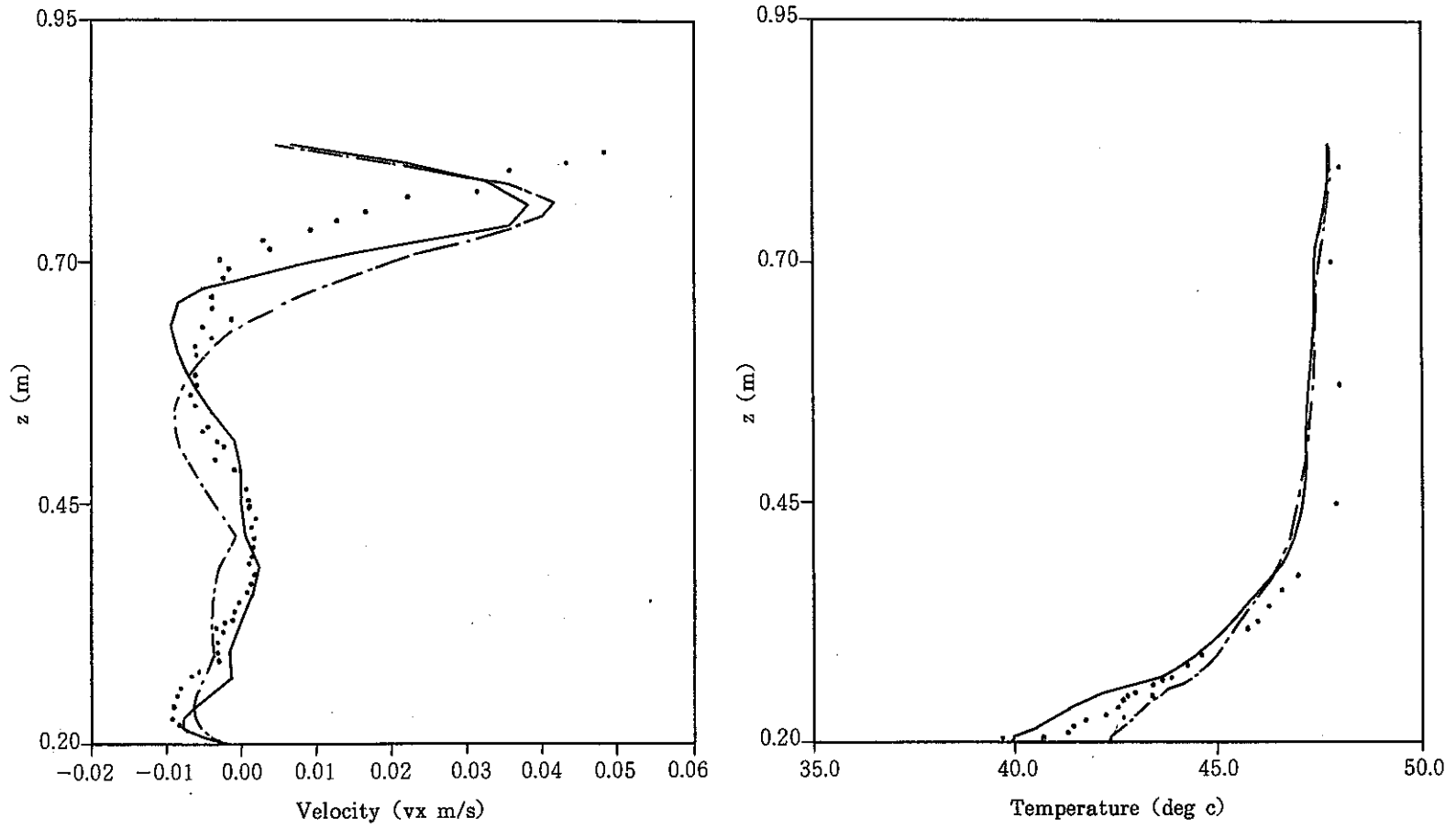


Fig. 4.2 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line
P2 for the Case-1

- : Measured
- - - : Calculated($C_1=1.44$)
- : Calculated($C_1=1.656$)

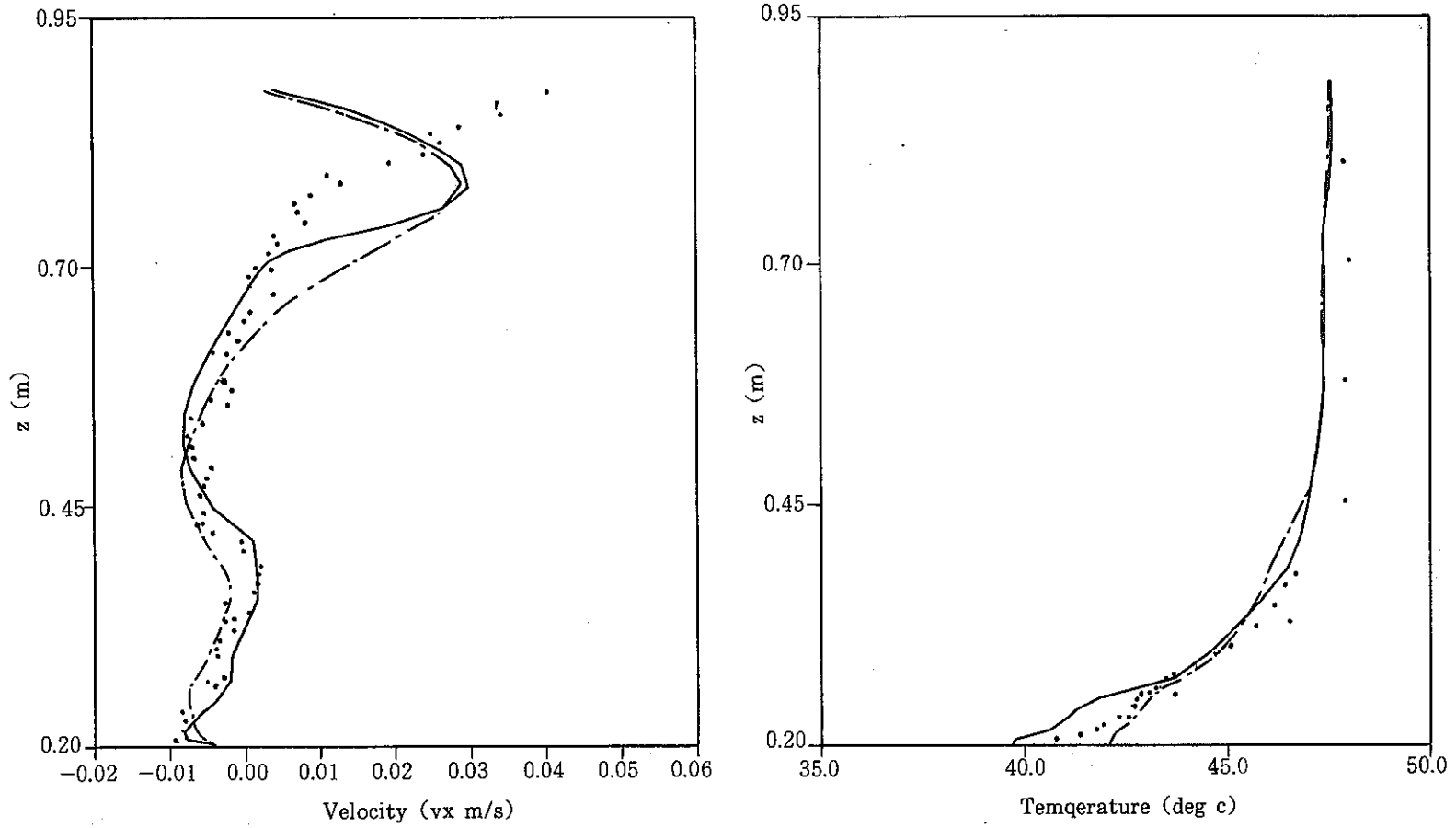


Fig. 4.3 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line P3 for the Case-1

- : Measured
- : Calculated(C₁=1.44)
- : Calculated(C₁=1.656)

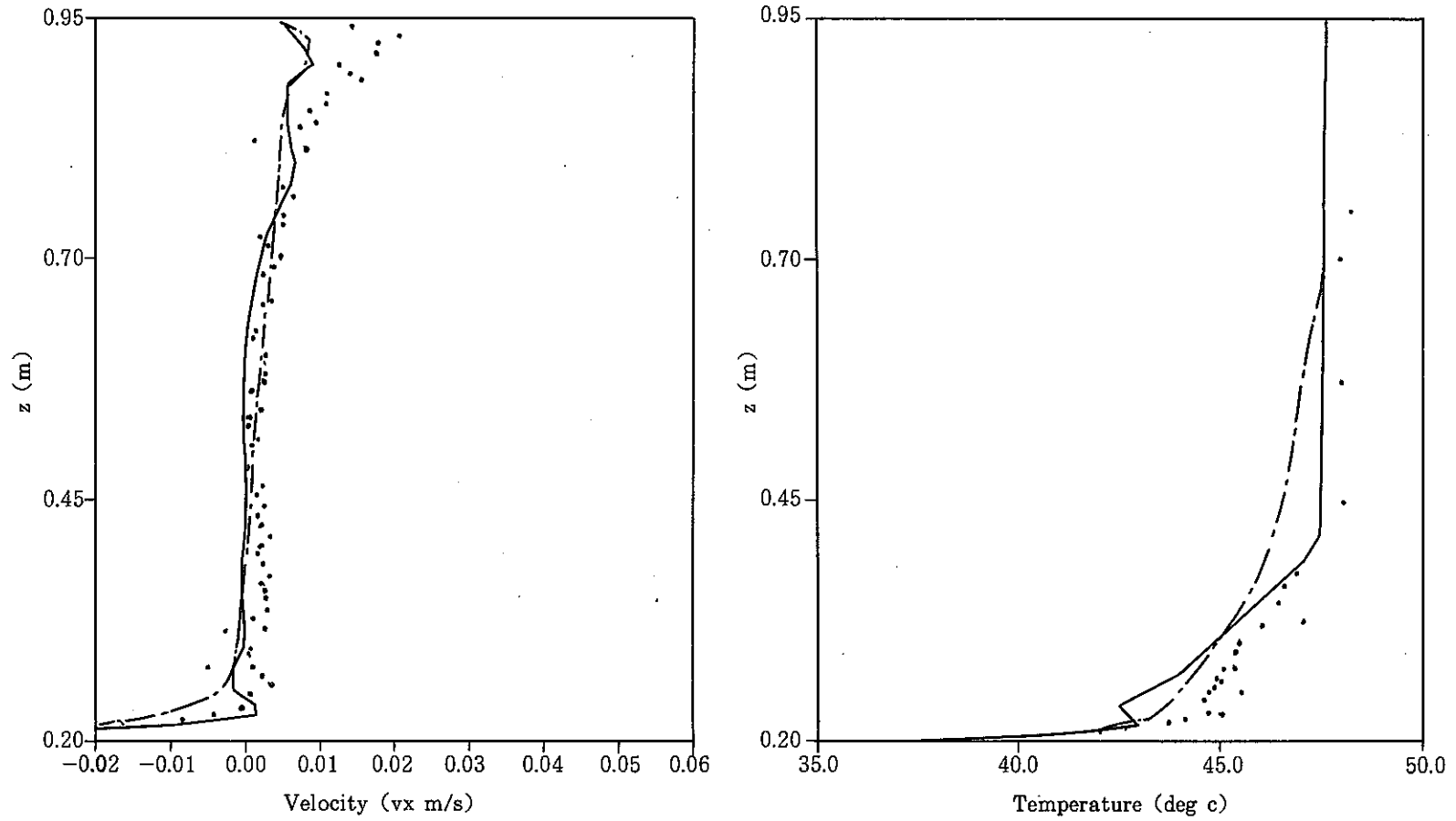


Fig. 4.4 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line
P4 for the Case-1

- : Measured
- : Calculated($C_1 = 1.44$)
- : Calculated($C_1 = 1.656$)

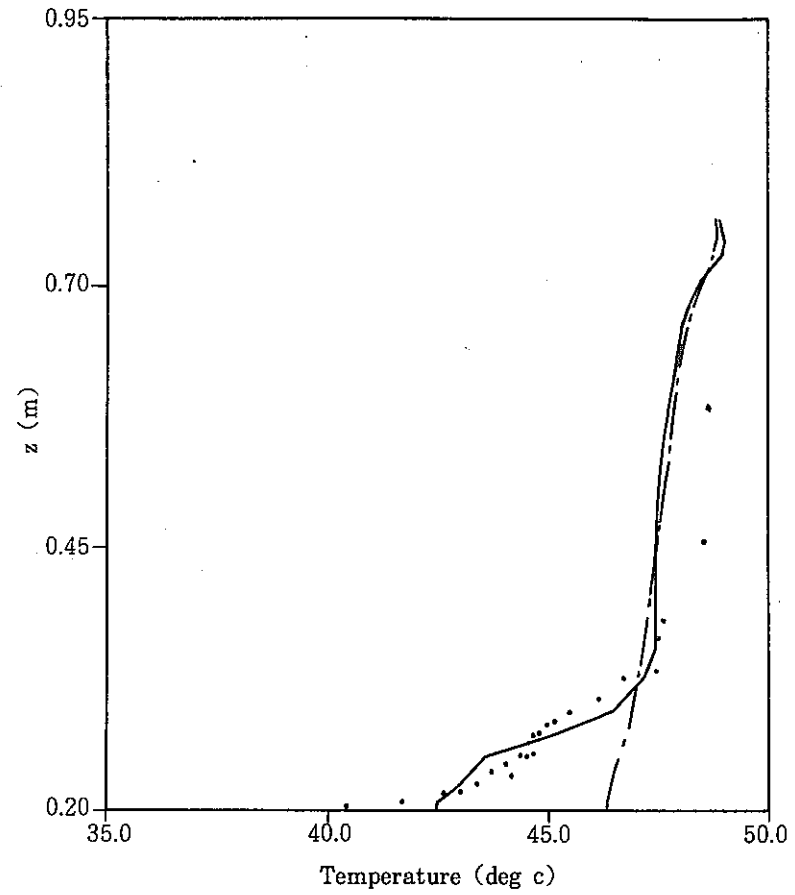
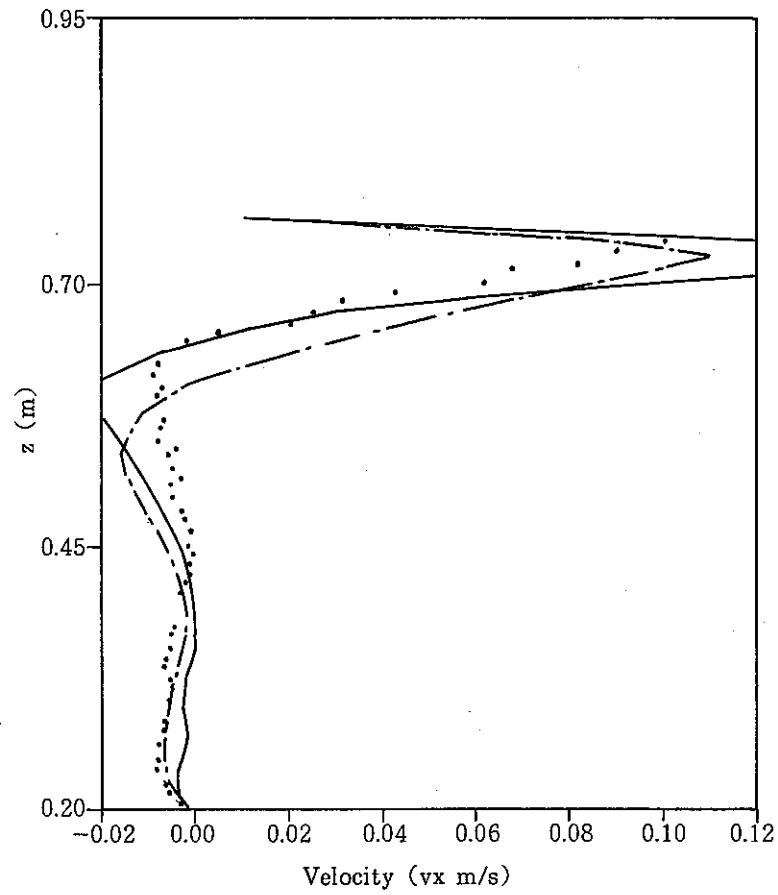


Fig. 4.5 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line
PI for the Case-4

- : Measured
- - - : Calculated($C_1 = 1.44$)
- : Calculated($C_1 = 1.656$)

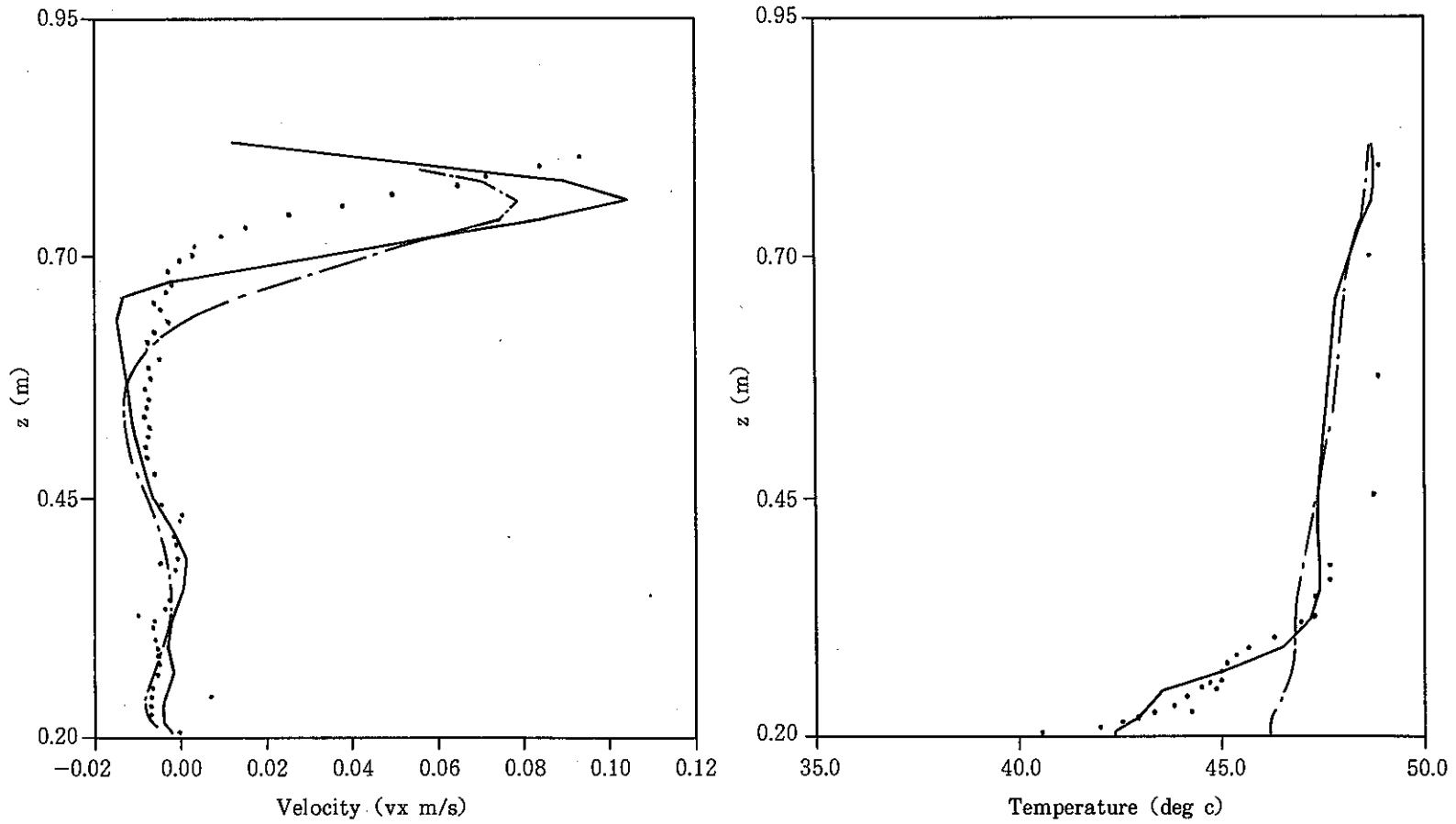


Fig. 4.6 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line P2 for the Case-4

- : Measured
- : Calculated(C₁=1.44)
- : Calculated(C₁=1.656)

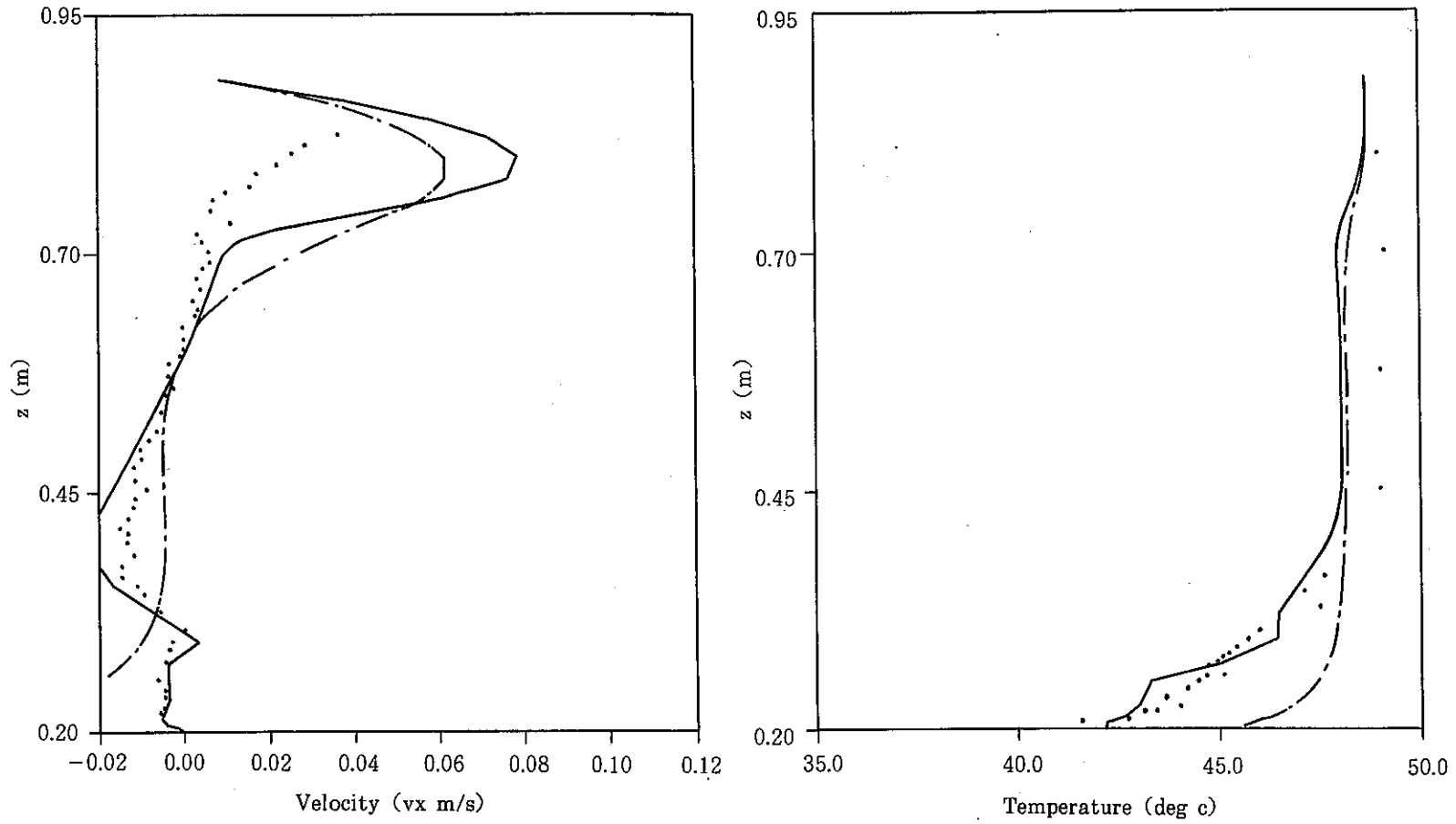


Fig. 4.7 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line P3 for the Case-4

- : Measured
- : Calculated($C_1=1.44$)
- : Calculated($C_1=1.656$)

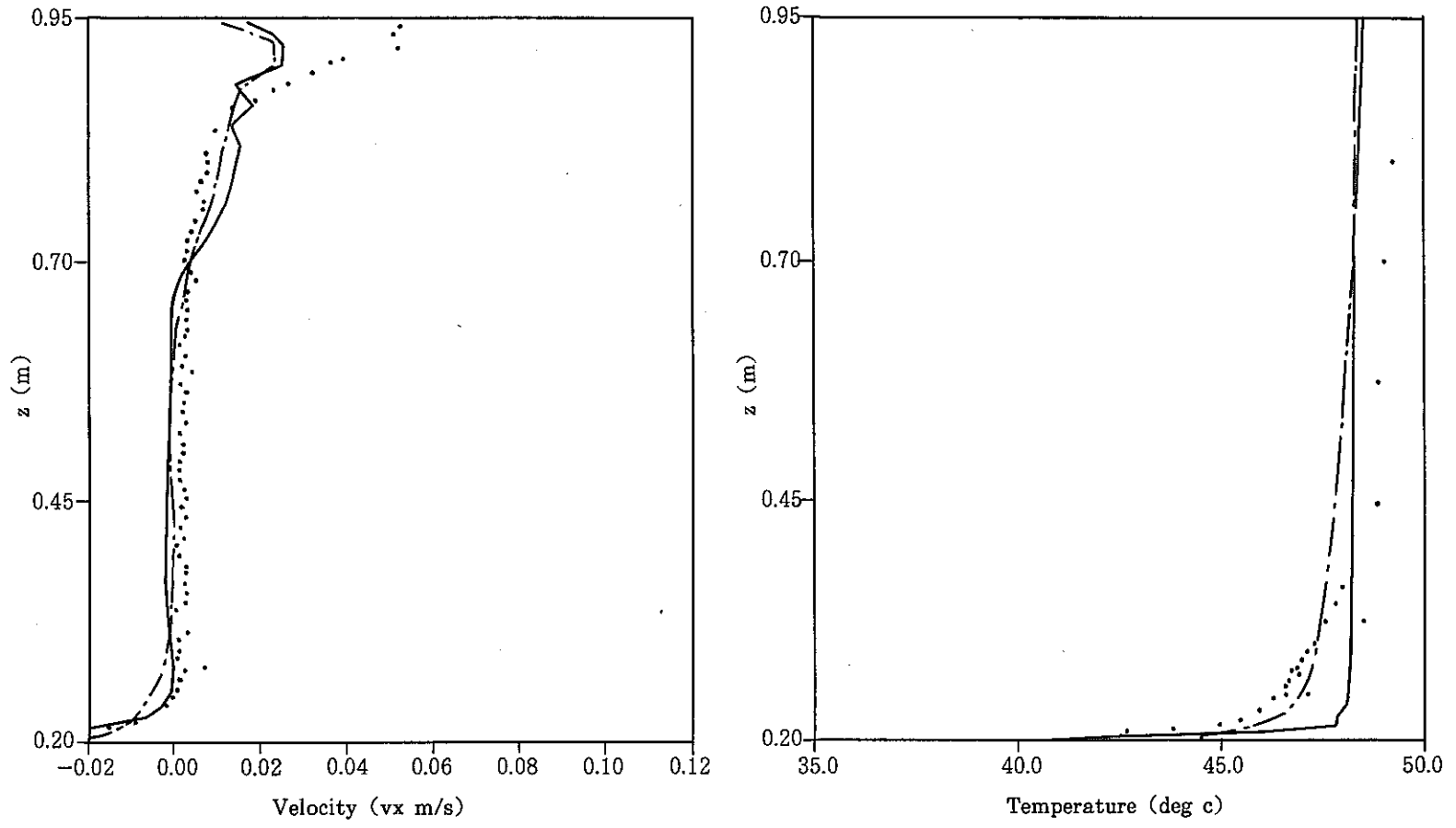


Fig. 4.8 Comparison of Measurement and Calculations at the traverse Line P4 for the Case-4

- : Measured
- : Calculated($C_1 = 1.44$)
- : Calculated($C_1 = 1.656$)