

多次元伝熱流動解析コードの整備改良(II)

タスク1: COMMIX-1A へのK- ϵ 2方程式乱流モデルの追加

1985年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため限られた関係者だけに配布するものです。
したがってその取扱いには充分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載
引用等には事業団の承認が必要です。

多次元伝熱流動解析コードの整備改良(II)

タスク1: COMMIX-1Aへの $k-\epsilon$ 2方程式乱流モデルの追加

村松 寿晴* , 前川 勇*
二ノ方 寿* , 青木 忠雄*

要 旨

单相多次元熱流動解析コードCOMMIX-1A (Ver 1.2.0) には、乱流現象を記述する物理モデルとして乱流運動エネルギー k に関する1方程式モデルが用意されている。しかし、1方程式モデルでは、乱流機構の基本的要素である特性距離 l の見積りを個々の場合毎の経験的な代数的関係に委ねているため、一般性のある問題には不相当である。そこで、さらにもう1個の補助方程式を加え、 l に関する情報を補なり2方程式モデルを追加した。今回追加した補助方程式の未知変数には、乱流運動エネルギーの散逸率 ϵ を選定した。

今回追加した2方程式乱流モデル($k-\epsilon$ モデル)についての実験検証は、以下に示す3種類の問題について実施した。

- 1) 円管流れ
- 2) 拡流流れ
- 3) 浮力流れ

1)の円管流れでは、半径10mmの管内乱流($Re=3.9 \times 10^5$)を解析し、実験値と比較した。この結果、 k の分布で最大73%の過少評価傾向が見られたが、流速分布は1%以内で一致した。2)の拡流流れでは、入口部高さ12.2mm、拡大部高さ24.4mmのダクトにおける乱流($Re=3 \times 10^4$)を解析した。実験値との比較では、再付着点距離(Reattachment Length)が約18%大き目に得られたが、流速、乱流パラメータは良く一致した。3)の浮力流れでは、温度壁を有する高さ33.8mmの矩形体系の流れを解析した。結果は、2次の精度を持つ文献記載のコード出力値に対し、温度、 k および ϵ の分布はほぼ定性的に一致した。

* 大洗工学センター，高速炉安全工学部，高速炉工学室

Improvement and Validation of Three-Dimensional Thermal-Hydraulic Analysis Code (II)

Task 1: Incorporation of k- ϵ two-equation turbulence model with COMMIX-1A

Toshiharu Muramatsu*, Isamu Maekawa*,
Hisashi Ninokata* and Tadao Aoki*

Abstract

COMMIX-1A is a single-phase three-dimensional thermal-hydraulic analysis code with finite difference method developed at U.S. Argonne National Laboratory. The code is provided with one-equation turbulence model in terms of turbulent kinetic energy, k . However the major shortcoming of the model is that the transport of turbulent length scale ℓ is not accounted for. Therefore the supplementary equation related to the turbulent length scale ℓ has been added to the original model. The dissipation rate of turbulent kinetic energy ϵ has been selected as the unknown variable of the additional equation. The model governed by the set of two equations is thus called "k- ϵ model".

The incorporated k- ϵ model in the COMMIX-1A has been validated in the analyses of the following three turbulence experiments:

- 1) Pipe flow,
- 2) Expansion flow and
- 3) Buoyancy flow.

In turbulent pipe flow of $Re=3.9 \times 10^5$, calculated velocity distribution agrees well within the error of 1%, but distribution of k is underestimated by maximum 73% in the axial region. In the turbulent channel expansion flow case with backward facing step, calculated reattachment length is overestimated by 18%. In the enclosed buoyancy driven recirculating flow case, calculated temperature, k and ϵ distributions have shown good agreement with those of the experiment with accuracy of second order in space.

* Reactor Engineering Section, FBR Safety Engineering Div.,
OEC, PNC.

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 乱流のモデル化と計算手法	2
2.1 乱流モデル	2
2.1.1 kモデル	2
2.1.2 k-εモデル	3
2.2 離散化	4
2.3 計算手法	9
2.3.1 計算の流れ	9
2.3.2 壁面近傍での取り扱い	10
第3章 解析検証	14
3.1 円管流れ	14
3.2 拡流流れ	15
3.3 浮力流れ	15
第4章 結 言	17
参考文献	18
付録A 入力データ (k-εモデル用)	45
B プロッタ・パッケージ	46
C 実験検証問題入力データ	47
D Subprograms Description	52

List of Tables

Table 3.1 Analysis Condition for Turbulent Pipe Flow
(Validation Test 1) 19

Table 3.2 Analysis Condition for Channel Expansion
Flow Model (Validation Test 2) 21

Table 3.3 Analysis Condition for Buoyancy-Driven
Flow (Validation Test 3) 23

List of Figures

Figure 2.1	Finite Control Volume in Cartesian Coordinates	25
Figure 2.2	Overall Flow Chart of COMMIX-1A (k- ϵ Version)	26
Figure 2.3	General Flow Chart of Two Equations Turbulence Model	27
Figure 3.1	Analysis Model & Mesh Arrangement for Turbulent Pipe Flow (Validation Test 1) ...	28
Figure 3.2	Radial Velocity Profiles at Z/D=40.5	29
Figure 3.3	Axial Velocity Profiles	30
Figure 3.4	Turbulent Energy Profiles at Z/D=28.5 from Entrance	31
Figure 3.5	Dissipation Rate Profile of k at Z/D=28.5 from Entrance	32
Figure 3.6	Turbulent Viscosity Profiles at Distances (Z/D) of 15, 30, 35, 40, 45 and 50 from Entrance	33
Figure 3.7	Mean Velocity Distribution near the Wall ..	34
Figure 3.8	Mesh Arrangement for Single Sudden Expansion Model (Validation Test 2)	35
Figure 3.9	Velocity Distribution on Single Sudden Expansion Problem	36
Figure 3.10	Normalized Velocity Distribution in a Rectangular Duct with a Single Sudden Expansion	37
Figure 3.11	Normalized Turbulent Kinetic Energy in a Rectangular Duct with a Single Sudden Expansion	38
Figure 3.12	Turbulent Viscosity Distribution in a Rectangular Duct with a Single Sudden Expansion	39

Figure 3.13	Analysis Model & Mesh Arrangement for Buoyancy-driven Flow Problem (Validation Test 3)	40
Figure 3.14	Velocity Pattern of Enclosed Buoyancy Driven Recirculating Flow Problem	41
Figure 3.15	Calculated Isotherm in Square Cavity by COMMIX ($Gr=10^8$)	42
Figure 3.16	Calculated Isotherm in Square Cavity by Second Order Approximation Code ($Gr=10^8$) ..	42
Figure 3.17	Calculated Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by COMMIX	43
Figure 3.18	Calculated Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by Second Order Approximation Code	43
Figure 3.19	Calculated Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by COMMIX..	44
Figure 3.20	Calculated Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by Second Order Approximation Code	44

Nomenclature

A	Surface Area
C_1, C_2, C_3, C_μ	Empirical Constant
C_p	Specific Heat
g	Gravity
k	Turbulent Kinetic Energy
l	Turbulent Length
Pr _t	Turbulent Prandtl Number
T	Temperature
u, v, w	Velocity Component
y_p	Distance from Wall
x, y, z	Coordinate Direction
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Mesh Length in x, y and z
β	Thermal Expansion Coefficient
γ_v	Volume Porosity
ϵ	Dissipation Rate of k
κ	Kármán Constant
μ	Viscosity
ν	Kinematic Viscosity
ρ	Density of Fluid
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	Empirical Constant
τ_w	Shear Stress
ϕ	Dependent Variable
ω	Acceleration Factor
t	Turbulence
B	Boundary

第 1 章 緒 言

昭和 58 年 1 月に米国 NRC を通して ANL から動燃事業団に導入された有限差分法による单相 3 次元汎用熱流動解析コード“COMMIX-1A (Ver.120)⁽¹⁾”は、動燃事業団における高速炉の設計および伝熱流動安全解析を推進するための標準コードとして位置付けられようとしている。

原子炉内熱流動現象の多くは、Re 数の大きな乱流場にあり、詳細な現象の取り扱いではこの乱流現象を記述する物理モデルが不可欠となる。COMMIX-1A (Ver.120) では、流れを規定するモデルとして、以下の 3 種類が用意されている。

- i) 層流モデル
- ii) 乱流粘性を一定とするモデル
- iii) 乱流運動エネルギー k に関する 1 方程式モデル

i) のモデルは、乱流粘性係数 μ_t および乱流熱伝導度 λ_t のいわゆる乱流パラメータを零とするモデル、ii) のモデルは、乱流パラメータの値を固定し、時間および空間に分布を持たせないモデル、iii) のモデルは、各時間ステップで全ての計算セルに対して乱流パラメータを評価するモデルである。しかし、乱流現象を上記 i) あるいは ii) のモデルで表現する場合、乱流パラメータは空間分布を持たないため実際の現象に対しては予測の精度（信頼性）、適用範囲（普遍性）共に不十分なものとなる。また、iii) のモデルでは乱流機構の基本的な要素である特性距離 l の見積りを個々の場合ごとの経験的な代数的関係に委ねているため、適用範囲が限定される。そこでさらにもう 1 個の補助方程式を加えて、 l に関する情報を補う 2 方程式モデルを COMMIX-1A に追加した。今回追加した補助方程式の未知変数には、乱流運動エネルギーの散逸率 ε ($\varepsilon \propto k^{3/2} / l$) を選定した。

本報告書は、今回追加した $k - \varepsilon$ モデルの詳細と実験データとの比較検証を行った結果について記したものである。

第 2 章 乱流のモデル化と計算方法

2.1 乱流モデル

2.1.1 k モデル ¹⁾

COMMIX-1A のオリジナル版に組み込まれている乱流運動エネルギー k についての支配方程式を (2.1) 式に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot U_i \cdot k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_K \quad \dots\dots (2.1)$$

(2.1) 式中の S_K は、乱流運動エネルギー k の生成項であり、(2.2) 式で示される。

$$S_K = P_K - \rho \cdot \epsilon + S_{Gk} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 P_K : Re 応力による k の生成

ϵ : k の散逸

S_{Gk} : 浮力による k の生成

σ_k : 経験定数 (= 1.0)

Re 応力による k の生成は (2.3) 式により表わされる。

$$P_K = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、 μ_t : 乱流粘性係数

U_i : i 方向流速

U_j : j 方向流速

x_i : i 方向

x_j : j 方向

単位体積当りの k の散逸量は、

$$\rho \cdot \epsilon = \rho \cdot k^{3/2} / l \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

で表わされる。ここで、 l は乱流特性距離である。

浮力による k の生成は (2.5) 式により表わされる。

$$S_{Gk} = g_j \cdot \beta \cdot \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで, g_j : 重力加速度

$$\beta : \text{体積膨張率} \left(= - \frac{\partial \rho}{\rho \cdot \partial T} \right)$$

ρ : 密度

P_{rt} : 乱流プラントル数

T : 温度

2.1.2 $k - \epsilon$ モデル²⁾

今回追加した $k - \epsilon$ モデルの支配方程式について以下に示す。乱流運動エネルギー k についての方程式は, 2.1.1 節で述べたものと散逸項の取り扱いを除いて同様である。すなわち, 散逸量は ϵ 方程式より与えられるため, 乱流特性距離 l を用いた近似は行わず直接 $\rho \cdot \epsilon$ を代入する。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot U_i \cdot k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \rho \cdot \epsilon + g_j \cdot \beta \frac{\mu_t}{P_{rt}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

乱流運動エネルギーの散逸量 ϵ を支配する方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot U_i \cdot \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \dots\dots\dots (2.6)$$

式中の S_ϵ は,

$$S_\epsilon = P_\epsilon - \epsilon_D + S_{G\epsilon} \dots\dots\dots (2.7)$$

である。

ここで, P_ϵ : Re 応力による ϵ の生成

ϵ_D : 粘性による ϵ の消散

$S_{G\epsilon}$: 浮力による ϵ の生成

σ_ϵ : 経験定数 (= 1.3)

Re 応力による ϵ の生成は,

$$P_\epsilon = C_1 \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot \mu_t \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$

で表わされる。ここで, C_1 は経験定数である。

単位体積当りの粘性による ϵ の消散量は,

$$\epsilon_D = C_2 \cdot \rho \cdot \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots\dots (2.9)$$

で表わされる。ここで、 C_2 は経験定数である。

浮力による ϵ の生成は、(2.10) 式で表わされる。

$$S_{G\epsilon} = C_3 \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot g_j \cdot \beta \frac{\mu_t}{P_{rt}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで、 C_3 は経験定数である。

2.2 離散化

k および ϵ についての支配方程式の離散化は、文献 3) をベースに Figure 2.1 の様なコントロール・ボリュームを用いて行った。

[時間項]

(2.1) 式および (2.6) 式内の時間項を Figure 2.1 に示すセル①回りで積分を行うと、

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \phi) dV = V_0 \left[\rho_0^I \frac{\phi_0 - \phi_0^n}{\Delta t} + \phi_0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^I \right] \dots\dots\dots (2.11)$$

で表わされる。

ここで、 ϕ : 被輸送量 (k, ϵ)

V_0 : 実効体積 ($= \gamma_v \cdot \Delta x_i \cdot \Delta x_j \cdot \Delta x_k$)

ρ : 密度

I : 前 iteration の値

n : 前 time step の値

[対流・拡散項]

(2.1) 式および (2.6) 式内の対流および拡散項を 3次元表示すると、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot U_i \cdot \phi) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot U_j \cdot \phi) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \cdot U_k \cdot \phi) - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) = \frac{\partial}{\partial x_\ell} (J_\phi)_\ell \dots\dots\dots (2.12) \end{aligned}$$

となる。ここで、Figure 2.1 に示すセル①回りで積分を行うと、

$$\begin{aligned}
 & \int_v \frac{\partial}{\partial x_\ell} (J \phi)_\ell d v \\
 &= \{ (\rho \cdot U_2 \cdot A_2 \cdot \phi_{20}) - (\rho \cdot U_1 \cdot A_1 \cdot \phi_{10}) \} - \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_2 \cdot \frac{\partial \phi_{20}}{\partial x_{20}} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_1 \cdot \frac{\partial \phi_{10}}{\partial x_{10}} \right) \right\} + \{ (\rho \cdot v_4 \cdot A_4 \cdot \phi_{40}) - (\rho \cdot v_3 \cdot A_3 \cdot \phi_{30}) \} \\
 &\quad - \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_4 \cdot \frac{\partial \phi_{40}}{\partial x_{40}} \right) - \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_3 \cdot \frac{\partial \phi_{30}}{\partial x_{30}} \right) \right\} + \{ (\rho \cdot w_6 \cdot A_6 \cdot \phi_{60}) \\
 &\quad - (\rho \cdot w_5 \cdot A_5 \cdot \phi_{50}) \} - \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_6 \cdot \frac{\partial \phi_{60}}{\partial x_{60}} \right) - \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_5 \cdot \frac{\partial \phi_{50}}{\partial x_{50}} \right) \right\} \\
 &\quad \dots\dots\dots (2.13)
 \end{aligned}$$

ここで、座標軸 i について風上差分を行うと、

$$\begin{aligned}
 & (\rho \cdot U_2 \cdot A_2 \cdot \phi_{20}) - (\rho \cdot U_1 \cdot A_1 \cdot \phi_{10}) - \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_2 \cdot \frac{\partial \phi_{20}}{\partial x_{20}} \right) - \left(\frac{\mu}{\sigma_{k\epsilon}} \cdot A_1 \cdot \frac{\partial \phi_{10}}{\partial x_{10}} \right) \\
 &= [0, F_2] \phi_0 - [0, -F_2] \phi_2 - [0, F_1] \phi_1 + [0, -F_1] \phi_0 - D_2 (\phi_2 - \phi_0) \\
 &\quad + D_1 (\phi_0 - \phi_1) \\
 &= \phi_0 \{ [0, F_2] + D_2 + [0, -F_1] + D_1 \} - \phi_2 \{ [0, -F_2] + D_2 \} \\
 &\quad - \phi_1 \{ [0, F_1] + D_1 \} \dots\dots\dots (2.14)
 \end{aligned}$$

となる。式中の [A, B] は、A と B のうちから大きな値を取り出す操作を意味する。

同様に、他座標についても風上差分を行いまとめると、

$$\begin{aligned}
 & \int_v \frac{\partial}{\partial x_\ell} (J \phi)_\ell \\
 &= \phi_0 \{ [0, F_2] + D_2 + [0, -F_1] + D_1 \\
 &\quad + [0, F_4] + D_4 + [0, -F_3] + D_3 \\
 &\quad + [0, F_6] + D_6 + [0, -F_5] + D_5 \} \\
 &\quad - [\phi_2 \{ [0, -F_2] + D_2 \} + \phi_1 \{ [0, F_1] + D_1 \} \\
 &\quad + \phi_4 \{ [0, -F_4] + D_4 \} + \phi_3 \{ [0, F_3] + D_3 \} \\
 &\quad + \phi_6 \{ [0, -F_6] + D_6 \} + \phi_5 \{ [0, F_5] + D_5 \}] \dots\dots\dots (2.15)
 \end{aligned}$$

になる。ここで、

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \langle \rho_1 \rangle u_1 A_1 & D_1 &= A_1 / \left\{ \left(\frac{\Delta x_{i-1}}{2 \mu_1} + \frac{\Delta x_i}{2 \mu_0} \right) \cdot \sigma_{k \varepsilon} \right\} \\
 F_2 &= \langle \rho_2 \rangle u_2 A_2 & D_2 &= A_2 / \left\{ \left(\frac{\Delta x_i}{2 \mu_0} + \frac{\Delta x_{i+1}}{2 \mu_2} \right) \cdot \sigma_{k \varepsilon} \right\} \\
 F_3 &= \langle \rho_3 \rangle v_3 A_3 & D_3 &= A_3 / \left\{ \left(\frac{\Delta x_{j-1}}{2 \mu_3} + \frac{\Delta x_j}{2 \mu_0} \right) \cdot \sigma_{k \varepsilon} \right\} \\
 F_4 &= \langle \rho_4 \rangle v_4 A_4 & D_4 &= A_4 / \left\{ \left(\frac{\Delta x_j}{2 \mu_0} + \frac{\Delta x_{j+1}}{2 \mu_4} \right) \cdot \sigma_{k \varepsilon} \right\} \\
 F_5 &= \langle \rho_5 \rangle w_5 A_5 & D_5 &= A_5 / \left\{ \left(\frac{\Delta x_{k-1}}{2 \mu_5} + \frac{\Delta x_k}{2 \mu_0} \right) \cdot \sigma_{k \varepsilon} \right\} \\
 F_6 &= \langle \rho_6 \rangle w_6 A_6 & D_6 &= A_6 / \left\{ \left(\frac{\Delta x_k}{2 \mu_0} + \frac{\Delta x_{k+1}}{2 \mu_6} \right) \cdot \sigma_{k \varepsilon} \right\}
 \end{aligned}$$

$\langle \rho_n \rangle$: Upwind Density.

[生成項 (Re 応力)]

(2.3) 式の Re 応力による k の生成をコントロール・ボリュームで積分すると,

$$\begin{aligned}
 \int_V P_k dv = V_0 \cdot \mu_t \left\{ 2 \left(\frac{du_i}{dx_i} \right)^2 + 2 \left(\frac{du_j}{dx_j} \right)^2 + 2 \left(\frac{du_k}{dx_k} \right)^2 \right. \\
 \left. + \left(\frac{du_j}{dx_i} + \frac{du_i}{dx_j} \right)^2 + \left(\frac{du_k}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_k} \right)^2 + \left(\frac{du_i}{dx_k} + \frac{du_k}{dx_i} \right)^2 \right\} \\
 \dots\dots\dots (2.16)
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 \frac{du_i}{dx_i} &= \frac{u_0 - u_1}{\Delta x_i}, & \frac{du_j}{dx_j} &= \frac{v_0 - v_3}{\Delta x_j}, & \frac{du_k}{dx_k} &= \frac{w_0 - w_5}{\Delta x_k} \\
 \frac{du_j}{dx_i} &= \left\{ \frac{1}{2} (v_2 + v_{23}) - \frac{1}{2} (v_1 + v_{13}) \right\} / 2 \Delta x_i \\
 \frac{du_i}{dx_j} &= \left\{ \frac{1}{2} (u_4 + u_{14}) - \frac{1}{2} (u_3 + u_{13}) \right\} / 2 \Delta x_j \\
 \frac{du_k}{dx_j} &= \left\{ \frac{1}{2} (w_4 + w_{45}) - \frac{1}{2} (w_3 + w_{35}) \right\} / 2 \Delta x_j \\
 \frac{du_j}{dx_k} &= \left\{ \frac{1}{2} (v_6 + v_{36}) - \frac{1}{2} (v_5 + v_{35}) \right\} / 2 \Delta x_k
 \end{aligned}$$

$$\frac{d u_i}{d x_k} = \left\{ \frac{1}{2} (u_6 + u_{16}) - \frac{1}{2} (u_5 + u_{15}) \right\} / 2 \Delta x_k$$

$$\frac{d u_k}{d x_i} = \left\{ \frac{1}{2} (w_2 + w_{25}) - \frac{1}{2} (w_1 + w_{15}) \right\} / 2 \Delta x_i$$

$$u_{13} = u_{i-1/2, j-1, k}, u_{14} = u_{i-1/2, j+1, k}, u_{15} = u_{i-1/2, j, k-1}, u_{16} = u_{i-1/2, j, k+1}$$

$$v_{13} = v_{i-1, j-1/2, k}, v_{23} = v_{i+1, j-1/2, k}, v_{35} = v_{i, j-1/2, k-1}, v_{36} = v_{i, j-1/2, k+1}$$

$$w_{15} = w_{i-1, j, k-1/2}, w_{25} = w_{i+1, j, k-1/2}, w_{35} = w_{i, j-1, k-1/2}, w_{45} = w_{i, j+1, k-1/2}$$

また、(2.8)式のRe応力によるεの生成項をコントロール・ボリュームで積分すると、

$$\int_v P_\epsilon d v = C_1 \frac{\epsilon}{k} \int_v P_k d v \dots\dots\dots (2.17)$$

となる。

[生成項(浮力)]

(2.5)式の浮力によるkの生成項をコントロール・ボリュームで積分すると、

$$\int_v S_{Gk} d v = V_0 \cdot \beta \cdot \frac{\mu_t}{P_{rt}} \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta x_i} \cdot g_i + \frac{\Delta T_j}{\Delta x_j} \cdot g_j + \frac{\Delta T_k}{\Delta x_k} \cdot g_k \right) \dots\dots\dots (2.18)$$

ここで、

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta x_i} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_i}, \frac{\Delta T_j}{\Delta x_j} = \frac{T_4 - T_3}{\Delta x_j}, \frac{\Delta T_k}{\Delta x_k} = \frac{T_6 - T_5}{\Delta x_k}$$

また、(2.10)式の浮力によるεの生成項をコントロール・ボリュームで積分すると、

$$\int_v S_{G\epsilon} d v = C_3 \cdot \frac{\epsilon}{k} \int_v S_{Gk} d v \dots\dots\dots (2.19)$$

になる。

[散逸項]

(2.4)式の粘性によるkの散逸項をコントロール・ボリュームで積分すると、

$$\int_v \rho \cdot \epsilon d v = V_0 \cdot \rho \cdot \epsilon \dots\dots\dots (2.20)$$

また、(2.9)式の粘性による ε の散逸項をコントロール・ボリュームで積分すると、

$$\int_V \varepsilon_D dv = V_0 \cdot C_2 \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.21)$$

になる。

以上を総合し、まとめると k の方程式は、

$$A_0 k_0 = \sum_{\ell=1}^6 A_\ell k_\ell + B_0 \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

ここで、

$$A_0 = \frac{1}{\omega} \{ V_0 \cdot \rho_0 / \Delta t + a_0 \}$$

$$a_0 = \sum_{\ell=1}^6 A_\ell$$

$$F_\ell = \langle \rho_\ell \rangle A_{r\ell} \cdot u_\ell$$

$$A_\ell = [0, (-1)^{\ell+1} \cdot F_\ell] + D_\ell$$

$$B_0 = \frac{\rho_0 V_0}{\Delta t} k_0^n - \rho_0 \varepsilon_0 V_0 + (P_k + S_{Gk}) V_0 + (1 - \omega) A_0 k_0^I$$

ω : 加速定数

また、 ε の方程式は、

$$A_0 \varepsilon_0 = \sum_{\ell=1}^6 A_\ell \varepsilon_\ell + B_0 \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

ここで、

$$A_0 = \frac{1}{\omega} \left\{ V_0 \rho_0 / \Delta t + a_0 + C_2 \frac{\varepsilon^I}{k} \rho_0 \right\}$$

$$B_0 = \frac{\rho_0 V_0}{\Delta t} \varepsilon_0^n + (P_\varepsilon + S_{G\varepsilon}) V_0 + (1 - \omega) A_0 \varepsilon_0^I$$

2.3 計算手法

2.3.1 計算の流れ

Figure. 2.2 に今回追加した $k-\epsilon$ 乱流モデルを含めた COMMIX-1A 全体のフロー・チャートを示す。図よりわかる通り、時間に関するコントロールは、Subroutine TIMSTP で行われ、乱流計算は運動量の計算が終了した直後に実行される。Figure. 2.3 に今回追加した $k-\epsilon$ 乱流モデルについてのみのフロー・チャートを示す。以下に各サブルーチンについての説明を行う。

S.P.BCTURB は、Iteration 中に得られる境界流速を用いて境界における k と ϵ の値を更新するものであり、以下の関係を用いて値を与える。

VELBN \geq 0.0 の時

$$k_B = C_{INK1} * VELBN^2$$

$$\epsilon_B = C_{INE1} * k_B^2$$

VELBN = 0.0 の時

$$k_B = C_{INK1} * VEL^2$$

$$\epsilon_B = C_{INE1} * k_B^2$$

ここで、

$$VEL = SQRT(u_0^2 + v_0^2 + w_0^2)$$

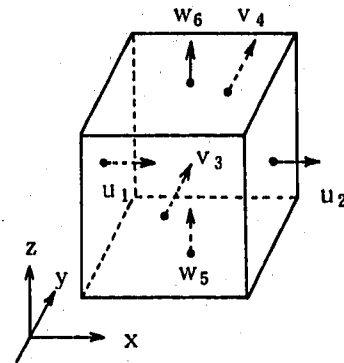
$$u_0 = \frac{1}{2} (u_1 + u_2)$$

$$v_0 = \frac{1}{2} (v_3 + v_4)$$

$$w_0 = \frac{1}{2} (w_5 + w_6)$$

C_{INK1} 定数

C_{INE1} 定数



S.P.TKLOOP は、 k 計算に関する S.P. のコントロールを行う部分であり、オプションにより壁近傍での ϵ の設定を行うものである。S.P.TKLOOP がコントロールするサブルーチンは、Figure. 2.3 に示してある通りである。オプションによる壁近傍での ϵ の設定については、次節（壁近傍での取り扱い）で述べる。

S.P.TSHEAR および S.P.TKSORC とも k の生成を計算する部分であるが、S.P.TSHEAR (ITURKE=10) では浮力による生成項は取り扱わない。また、壁隣接セルでは、セル流速の 50% が k の生成に寄与するとしている。S.P.TKSORC (ITURKE=15) では、浮力による生成項も含め、(2.3) 式および (2.5) 式が忠実に計算される。

S.P.TKENERでは、(2.15)式の対流・拡散項の計算を行い、kの生成項と合わせて(2.22)式の係数(A1, A2, A3, A4, A5, A6, A0, B0)の計算を行う。また、オプションによりS.P.WLFNCKで壁隣接セルのkまたはkの生成項を計算する。詳細は次節2.3.2で述べる。

S.P.SOLVENでは、SOR(Successive Over-Relaxation)法により(2.22)式を満足するk₀の計算を行う。

S.P.TELOOP等εに関するサブルーチンも以上と同様の処理を行う。

S.P.TURV11では、以項の計算により得られるkとεを用いて乱流粘性係数μ_tおよび乱流熱伝導率λ_tの計算を行う。

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$\lambda_t = \mu_t \cdot \frac{C_p}{Pr_t} \dots\dots\dots (2.25)$$

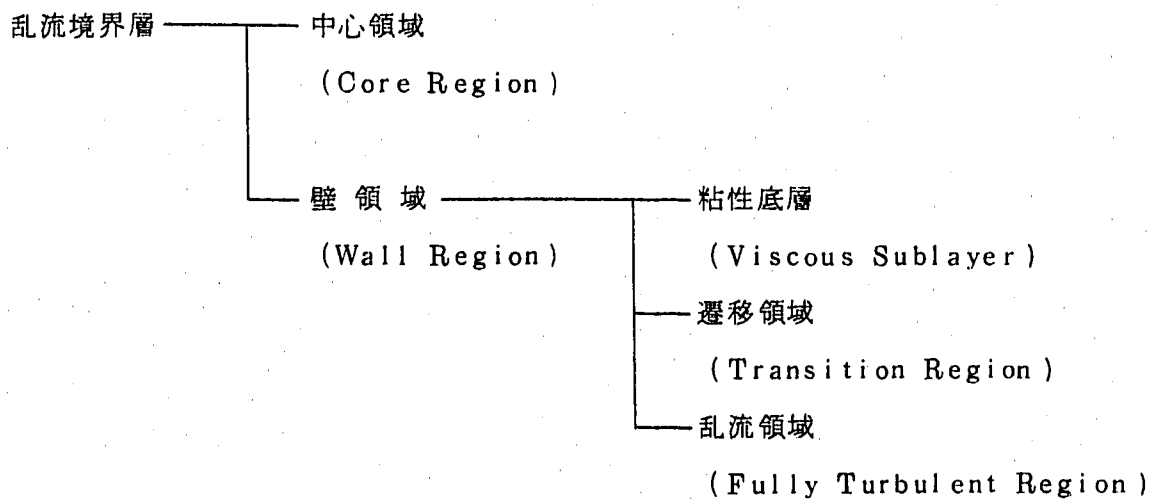
ここで、C_μ : 定数 (0.09)

C_p : 比 熱

Pr_t : 乱流プラントル数
4), 5)

2.3.2 壁面近傍での取り扱い

乱流境界層は、一般に以下のように分類される。



COMMIXにおいては、粘性底層および遷移領域のごく薄い部分は考慮せず、一般的に良く知られた対数速度分布則が適用できる乱流領域を対象とする。

壁領域では、局部剪断応力は壁での剪断応力から大きく変化しない領域で乱流粘性係数μ_tと剪断応力τ_wは、

$$\mu_t \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_w \dots\dots\dots (2.26)$$

で表わされ、(2.26)式はほぼ

$$\frac{u}{y} = \frac{\tau_w}{\mu_t} \dots\dots\dots (2.27)$$

となる。また、剪断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \rho \cdot u^{*2} \dots\dots\dots (2.28)$$

で表わされ、以上より(2.29)式が導びかれる。

$$\frac{u}{u^*} = \frac{u^* y}{\mu_t / \rho} = \frac{u^* y}{\nu_t} \dots\dots\dots (2.29)$$

ここで、 u^* : 摩擦速度

ν_t : 乱流動粘性係数

一方、乱流領域では、剪断応力が大きく、粘性底層と変化がないと仮定すると、

$$\mu_t \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_w \dots\dots\dots (2.30)$$

また、拡散距離が小さい時は、拡散係数は距離に対して線形に変化するとして、

$$\mu_t = \rho \cdot \kappa \cdot u^* y \dots\dots\dots (2.31)$$

が導びかれる。(2.31)式を(2.30)式に代入して整理すると、

$$\rho \cdot \kappa \cdot u^* y \frac{\partial u}{\partial y} = \rho \cdot u^{*2} \dots\dots\dots (2.32)$$

$$\kappa \cdot y \frac{\partial (u/u^*)}{\partial y} = 1 \dots\dots\dots (2.33)$$

$$\kappa \left(\frac{u^* y}{\nu} \right) \frac{\partial (u/u^*)}{\partial (u^* y / \nu)} = 1 \dots\dots\dots (2.34)$$

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u^* y}{\nu} \right) + C \dots\dots\dots (2.35)$$

が得られ、(2.29)式および(2.35)式がWall Functionとして定義される。ここ

で κ はカルマン定数 (≈ 0.4) である。

乱流運動エネルギー k は、壁近傍で局所平衡状態が成立するとし、 k の生成量と散逸量の平衡が仮定される。

$$\begin{aligned}
 P_k &= \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \\
 &= \tau_w \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \\
 &= \tau_w^2 / \mu_t \quad \left(\because \tau_w = \mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (2.36)
 \end{aligned}$$

一方、乱流粘性係数 μ_t は、 k と ε を用いて、

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2.37)$$

で表わされる。したがって、局所平衡状態では、

$$P_k = \rho \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (2.38)$$

(2.36) 式および (2.37) 式を (2.38) 式に代入すると、

$$\tau_w^2 = \rho^2 \cdot C_\mu \cdot k^2 \dots\dots\dots (2.39)$$

$$\tau_w = \rho \cdot C_\mu^{\frac{1}{2}} \cdot k \dots\dots\dots (2.40)$$

が得られる。一方先に求めた (2.35) 式より、

$$u^* = \frac{u}{\frac{1}{\kappa} \ln \left(C_1 \frac{u^* y}{\nu} \right)} \dots\dots\dots (2.41)$$

この両辺に $\rho \cdot u^*$ を掛けると、

$$\begin{aligned}
 \rho \cdot u^{*2} &= \frac{\rho \cdot u^* u}{\frac{1}{\kappa} \ln \left(C_1 \frac{u^* y}{\nu} \right)} \\
 &= \tau_w \dots\dots\dots (2.42)
 \end{aligned}$$

また、 u^* は (2.40) 式より、

$$u^* = C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.43)$$

以上をまとめると,

$$\tau_w = \frac{\rho \cdot C_\mu^{\frac{1}{4}} \cdot k^{\frac{1}{2}} \cdot u}{\frac{1}{\kappa} \ln \left(C_1 \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}} y}{\nu} \right)} \dots\dots\dots (2.44)$$

したがって, k の生成量は, (2.36) 式より,

$$P_k = \tau_w \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$= \tau_w \frac{u}{y} \dots\dots\dots (2.45)$$

乱流エネルギーの散逸量 ε は, (2.31) 式と (2.37) 式とから,

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} \cdot k^{\frac{3}{2}}}{\kappa \cdot y} \dots\dots\dots (2.46)$$

が導びかれる。

今回追加した乱流モデル内の壁近傍での取り扱いは, 入力データ KFLOW の値により選択される。

i) オプション 1 (KFLOW=-3)

壁隣接セル内の k は (2.44) 式の τ_w を与え, S.P.SOLVEN で内部セルの k とともに解く。ε は, (2.46) 式で与え S.P.SOLVEN では解かない。

ii) オプション 2 (KFLOW=1)

壁隣接セル内の k および ε は, それぞれ (2.40) 式および (2.46) 式から直接与え, S.P.SOLVEN では解かない。

以上, オプションの選択は, ユーザーに任せられる。

第3章 解析検証

3.1 円管流れ

Barbin & Jones⁶⁾により実施された円管流れ実験の解析を実施した。解析体系をFigure 3.1に、また解析条件をTable 3.1に示す。解析はTable 3.1に示したケースをReferenceとした。このケースでのRe数は 5×10^5 、 Z/D （助走距離/管直径）は6.0である。 $Z/D = 4.05$ の位置における径方向流速分布の実験値と計算値の比較をFigure 3.2に示す。また、Figure 3.3に軸方向流速分布の実験値と計算値の比較を示す。いずれの計算結果についても実験値と良い一致を示している。 $Z/D = 2.85$ の位置における径方向乱流運動エネルギー k の分布をFigure 3.4に示す。計算値の実験値との比較については、径方向全体についてわずかに低目である。また、Figure 3.5およびFigure 3.6にそれぞれ径方向乱流運動エネルギー散逸率 ϵ および径方向乱流粘性係数 μ_t の分布を示す。Figure 3.6から判かるとおり、 Z/D が増し入口から遠ざかるにしたがい乱流粘性強度は壁面から管中心部に拡散され、その分布の最大値は管中心に近づいてゆく。Figure 3.7は壁面近傍における流速分布を壁からの距離の関数としてまとめたものである。図中の実線、点線及び一点鎖線は理論値^{*}であり、丸印はCOMMIXによる計算値である。この計算値は、ほぼ対数則分布の理論値（実線）と一致しており、壁近傍での処理が正常に行なわれていることが分かる。

* 実線：対数則分布⁽⁵⁾

$$\frac{\bar{U}}{U_\tau} = 2.44 I_n \frac{U_\tau \cdot y_p}{\nu} + 4.9$$

一点鎖線： $1/7$ 乗則分布⁽⁵⁾

$$\frac{\bar{U}}{U_\tau} = 8.3 \left(\frac{U_\tau \cdot y_p}{\nu} \right)^{1/7}$$

点線：層流底層分布

$$\frac{\bar{U}}{U_\tau} = \frac{U_\tau \cdot y_p}{\nu}$$

3.2 拡流流れ

第2の検証試験として、D. E. Abbott⁷⁾らが実施した循環流れを含む拡流流れ実験の解析を行なった。Figure 3.8にメッシュ分割図を示す。解析体系はx-y 2次元とし、入口部より2.59mの位置に拡流部を設けている。解析条件の一覧をTable. 3.2に示す。流体は20℃等温の水とし、壁は全てNo-Slipとした。Figure 3.9に拡流部近傍の流速分布図を示す。拡流部下流位置に淀み域が見られ、流れの再付着点(Reattachment Point)は拡流部位置から約0.406mの場所である。実験でのこの長さは0.3429mであり、計算結果の値は約18%大きい。拡流部下流の各位置での軸方向流速分布を実験値とともにFigure 3.10に示す。実験値と計算値との比較では、いずれの下流側位置においても軸方向ノード6~9を除いては良い一致を示している。軸方向ノード6~9での不一致の原因は明らかではないが、拡流部上流側の助走区間での境界条件設定で実験と計算で差異があるものと思われる。そこで拡流部直前の実験流速分布を境界条件として計算を再度行なった。結果はFigure 3.10中に点線で併記した。この計算値は同図中の実線の値よりも実験値との一致具合は良好である。Figure 3.11に拡流部下流各位置における軸方向乱流運動エネルギー(規格化値)分布を示す。図中の黒丸が実験値であり、計算値(Figure 3.10の実線に対応)はいずれの下流位置においても良い一致を示している。ただし、計算値は実験値に対し全体的にピークが緩和された傾向が見られる。Figure 3.12に拡流部下流位置における軸方向乱流粘性係数分布を示す(計算結果のみ)。乱流粘性係数が最大を示す位置は拡流部直後の淀み域周辺であり、これは循環流れ中心部近傍である。

以上に示した拡流流れ問題の検証により、循環流れを含む任意体系の解析がほぼ行なえることが確かめられた。

3.3 浮力流れ

第3の検証試験は、Marie-Pierre Fraikin⁸⁾らが実施した浮力流れ問題である。解析体系はFigure 3.13に示すとおり、正方形の2次元体系であり各4面の壁に温度差を与え浮力を発生させる。この温度差はGr数を規定することにより決定される。解析条件をTable. 3.3に示す。また、*方程式内浮力項(2.10式)の比例定数C₃は、強制流場では1.44が適切であるが浮力場であることから経験的に0.7⁸⁾として計算を行なった。Figure 3.14に流速分布の定常解を示す。また、Figure 3.16の規格化等温線分布は文献8に記載の解析コード出力であり、今回COMMIXにより解析した結果はこれと傾向は同じである。ただし、文献記載の解析コードは空間に対して2次の項まで差分化に含めているため、壁近傍等の温度勾配の激しい場所でCOMMIX出力と若干の違いが見られる。Figure. 3.17にCOMMIXにより計算された乱流運動エネルギー分布を示す。ここで乱流運動エネルギーは、下式により無次元化されている。

$$k^* = \frac{L^2}{\nu^2} \cdot k$$

- L : 辺の長さ
- ν : 動粘性係数
- k : 乱流運動エネルギー
- * : 無次元表示

また、Figure 3.18 は文献記載の無次元乱流運動エネルギー分布である。両者の比較の結果では、分布の違いは若干あるが最大値等を示す位置はほぼ同じである。Figure 3.19 に無次元化された乱流運動エネルギーの散逸率分布を示す。この分布は、以下の式により整理されている。

$$\varepsilon^* = \frac{L^4}{\nu^3} \cdot \varepsilon$$

ここで、 ε は COMMIX により計算された乱流運動エネルギーの散逸率である。また、Figure 3.20 は文献記載の ε 分布である。 ε についての比較についても k の場合と同様のことが言える。以上より、浮力を含む体系についての解析の妥当性を明らかにした。

第4章 結 言

現在まで動燃内各部所で使用されてきている单相多次元熱流動解析コードCOMMIX-1A (Ver. 1.2.0) に $k-\epsilon$ 2 方程式乱流モデルを追加し、実験検証を行なった。今回追加した乱流モデルは、乱流運動エネルギー k の輸送と k の散逸率 ϵ の輸送を取り扱うものである。

実験検証は、以下の3種類の問題について実施した。

- 1) 円管流れ
- 2) 拡流流れ
- 3) 浮力流れ

1) の円管流れ問題は、半径 10 mm の管内乱流 ($Re = 3.9 \times 10^5$) を解析し、軸方向及び径方向の流速ならびに乱流パラメータを実験値と比較するものである。その結果、乱流運動エネルギー k の分布で最大 73% の過少評価傾向が見られたが、流速分布は軸方向及び径方向とも実験値と 1% 以内で一致することが確かめられた。2) の拡流流れ問題は、入口部高さ、12.2 mm、拡大部 24.4 mm のダクトにおける乱流 ($Re = 3 \times 10^4$) を解析するものである。この結果、拡流部により生ずる渦の再付着点距離 (Reattachment Length) が実験値に比べ約 18% 大き目に得られたが、流速及び乱流パラメータは良く一致した。3) の浮力流れ問題は、温度壁を有する高さ 33.8 mm の形体系の流れを解析した。計算された結果は、2次の精度を持つ文献記載のコード出力値に対し、温度及び乱流パラメータの分布はほぼ定性的に一致した。

今後、さらに各種基本流動現象及び実機等に適用させ、 $k-\epsilon$ 乱流モデルの限界及び問題点の明確化を行なってゆくとともにモデルの改良を施してゆく予定である。

参 考 文 献

- 1) H. M. Domanus, "COMMIX-1A: A Three-Dimensional Transient Single-Phase Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Single and Multicomponent Systems" ANL Draft Report Sep., 1982
- 2) A. K. Ahluwalia, "Numerical Simulation of Transient Turbulent Buoyant Flows" Numerical Methods in Thermal Problems, Proc. 3rd Int. Conf. Section 8 1983
- 3) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" McGRAW-HILL
- 4) J. O. Hinze, "Turbulence, 2nd ed. "McGRAW-HILL 1975
- 5) H. Schlichting, "Boundary-Layer Theory" McGRAW-HILL 1968
- 6) A. R. Barbin, "Turbulent Flow in the Inlet Region of a Smooth Pipe" J. of Basic Engineering 1963
- 7) D. E. Abbott, "Experimental Investigation of Subsonic Turbulent Flow Over Single and Double Backward Facing Steps" J. of Basic Engineering 1962
- 8) M. P. Fraikin, "Application of a k- ϵ Turbulence Model to an Enclosed Buoyancy Driven Recirculating Flow" Chem. Eng. Commun. Vol.13 1982

Table 3.1 Analysis Condition for Turbulent Pipe Flow
(Validation Test 1)

Items	Values	Input Parameter
1. Configuration	R-Z (2d)	IGEOM=-1
2. Mesh No. in R	20	IMAX
in Z	30	KMAX
3. Mesh Size in R	20 * 0.0050 [m]	DX
in Z	30 * 0.4000 [m]	DZ
4. Time Step	0.0158 [Sec.]	DT
5. Boundary Condition	No-Slip	
6. Water Temperature	20°C isothermal	TEMP
7. Inlet Velocity	2.525 [m/s] Uniform	VELOC
8. Turbulence Model	k-ε Model	ITURKE=15
9. Wall Function		
10. KEITER	1 (default)	
11. C1E	1.44 (default)	
12. C2E	1.92 (default)	
13. C3E	1.44 (default)	
14. SIGK	1.00 (default)	
15. SIGE	1.00	
16. Under-Relaxation Factor for Momentum Eqs.	0.8 (default)	OMEGAV
17. Relaxation Factor for Pressure Solution	1.5 (default)	OMEGA
18. Relaxation Factor for k Equation	0.95 (default)	OMEGAK
19. Relaxation Factor for k and ε Solution	0.8 (default)	RELAXK

Table 3.1 (Continued)

Items	Values	Input Parameter
20. Relaxation Factor for ϵ Equation	0.95 (default)	OMEPSI
21. CINK1	6.62×10^{-6}	
22. CINE1	6.62×10^{-6}	

Table 3.2 Analysis Condition for Channel Expansion Flow Model (Validation Test 2)

Items	Values	Input Parameter
1. Configuration	X-Y (2d)	IGEOM=0
2. Mesh No. in X	53	IMAX
in Y	12	JMAX
3. Mesh Size in X	14*0.1524, 3*0.1016, 9*0.0508, 27*0.1016	DX
in Y	12*0.02032	DY
4. Time Step	0.0158 [Sec.]	DT
5. Boundary Condition	No-Slip	
6. Water Temperature	20°C Isothermal	TEMP
7. Inlet Velocity	0.24550 [m/s] Uniform	VELOC
8. Turbulence Model	k-ε Model	ITURKE=15
9. Wall Function		
10. KEITER	1 (default)	
11. C1E	1.44 (default)	
12. C2E	1.92 (default)	
13. C3E	1.44 (default)	
14. SIGK	1.00 (default)	
15. SIGE	1.00	
16. Under-Relaxation Factor for Momentum Eqs.	0.8 (default)	OMEGAV
17. Relaxation Factor for Pressure Solution	1.5 (default)	OMEGA
18. Relaxation Factor for k Equation	0.95 (default)	OMEGAK
19. Relaxation Factor for k and ε Solution	0.8 (default)	RELAXK

Table 3.2 (Continued)

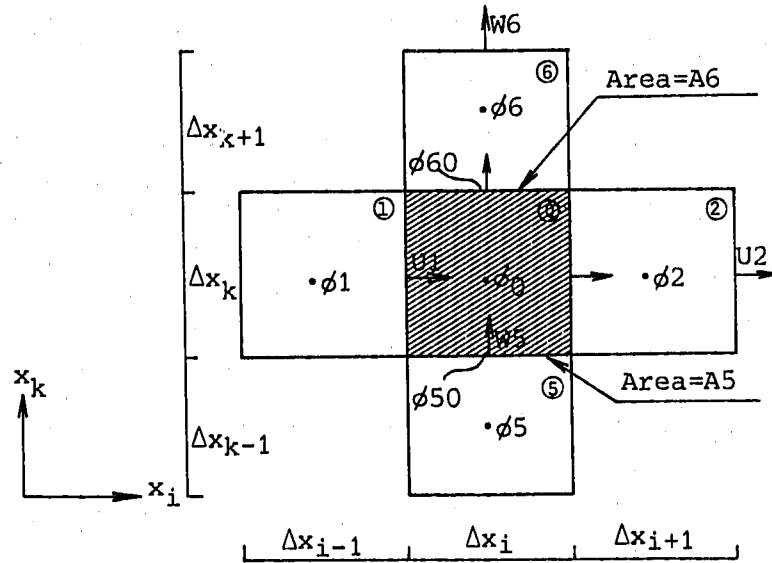
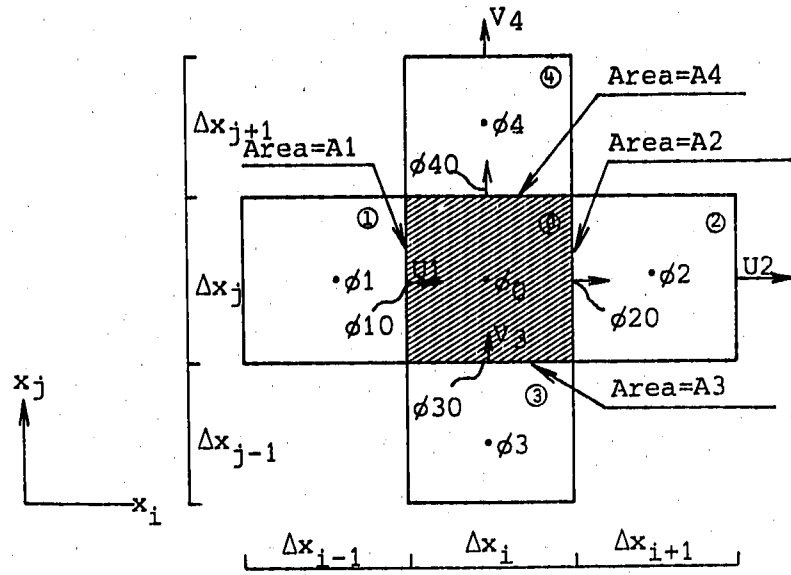
Items	Values	Input Parameter
20. Relaxation Factor for ϵ Equation	0.95 (default)	OMEPSI
21. CINK1	4.8×10^{-7}	
22. CINE1	4.8×10^{-7}	

Table 3.3 Analysis Condition for Buoyancy-Driven Flow
(Validation Test 3)

Items	Values	Input Parameter
1. Configuration	X-Y (2d)	IGEOM=0
2. Mesh No. in X	25	IMAX
in Y	25	JMAX
3. Mesh Size in X	0.005, 2*0.0084, 0.0109, 0.0117, 0.0134, 2*0.0151,	DX
in Y	0.0167, 7*0.0184, 0.0167, 2*0.0151, 0.0134, 0.0117, 0.0109, 2*0.0084, 0.005 [m]	DY
4. Time Step	10 [Sec.]	DT
5. Boundary Condition	No-Slip	
6. Water Temperature	Hot 65°C Cold 64°C	TEMP
7. Inlet Velocity	0.0	VELOC
8. Turbulence Model	k-ε Model	ITURKE=15
9. Wall Function		
10. KEITER	1 (default)	
11. C1E	1.44 (default)	
12. C2E	1.92 (default)	
13. C3E	0.70	
14. SIGK	1.00 (default)	
15. SIGE	1.00	
16. Under-Relaxation Factor for Momentum Eqs.	0.8 (default)	OMEGAV
17. Relaxation Factor for Pressure Solution	1.5 (default)	OMEGA
18. Relaxation Factor for k Equation	0.95 (default)	OMEGAK

Table 3.3 (Continued)

Items	Values	Input Parameter
19. Relaxation Factor for k and ϵ Solution	0.8 (default)	RELAXK
20. Relaxation Factor for ϵ Equation	0.95 (default)	OMEPSI
21. CINK1	2.9×10^{-10}	
22. CINE1	2.9×10^{-10}	
23. Gravity in Y	9.8 [m/s ²]	GRAVY



$\phi : k \text{ or } \epsilon$

Figure 2.1 Finite Control Volume in Cartesian Coordinates

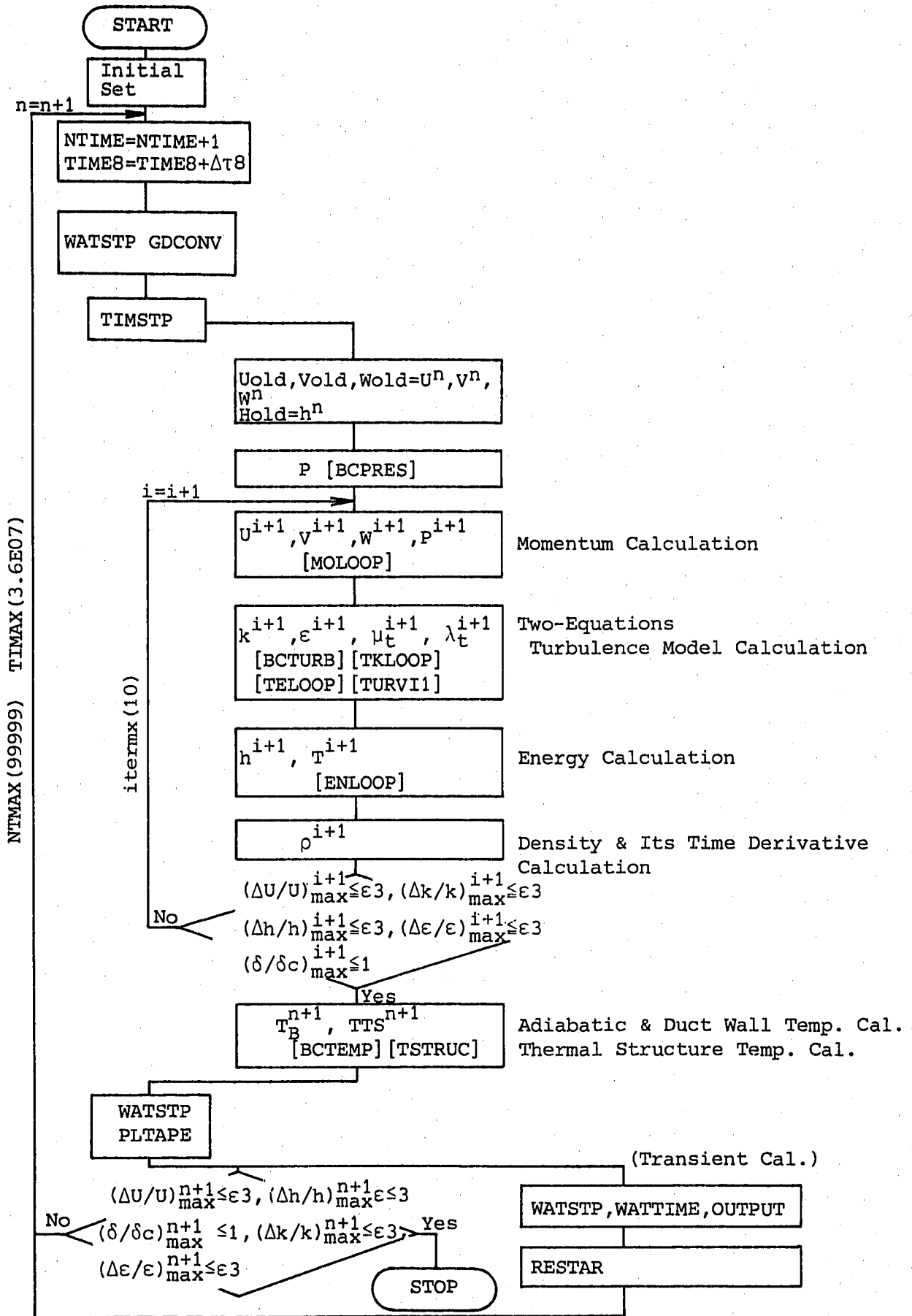


Figure 2.2 Overall Flow Chart of COMMIX-1A (k-ε Version)

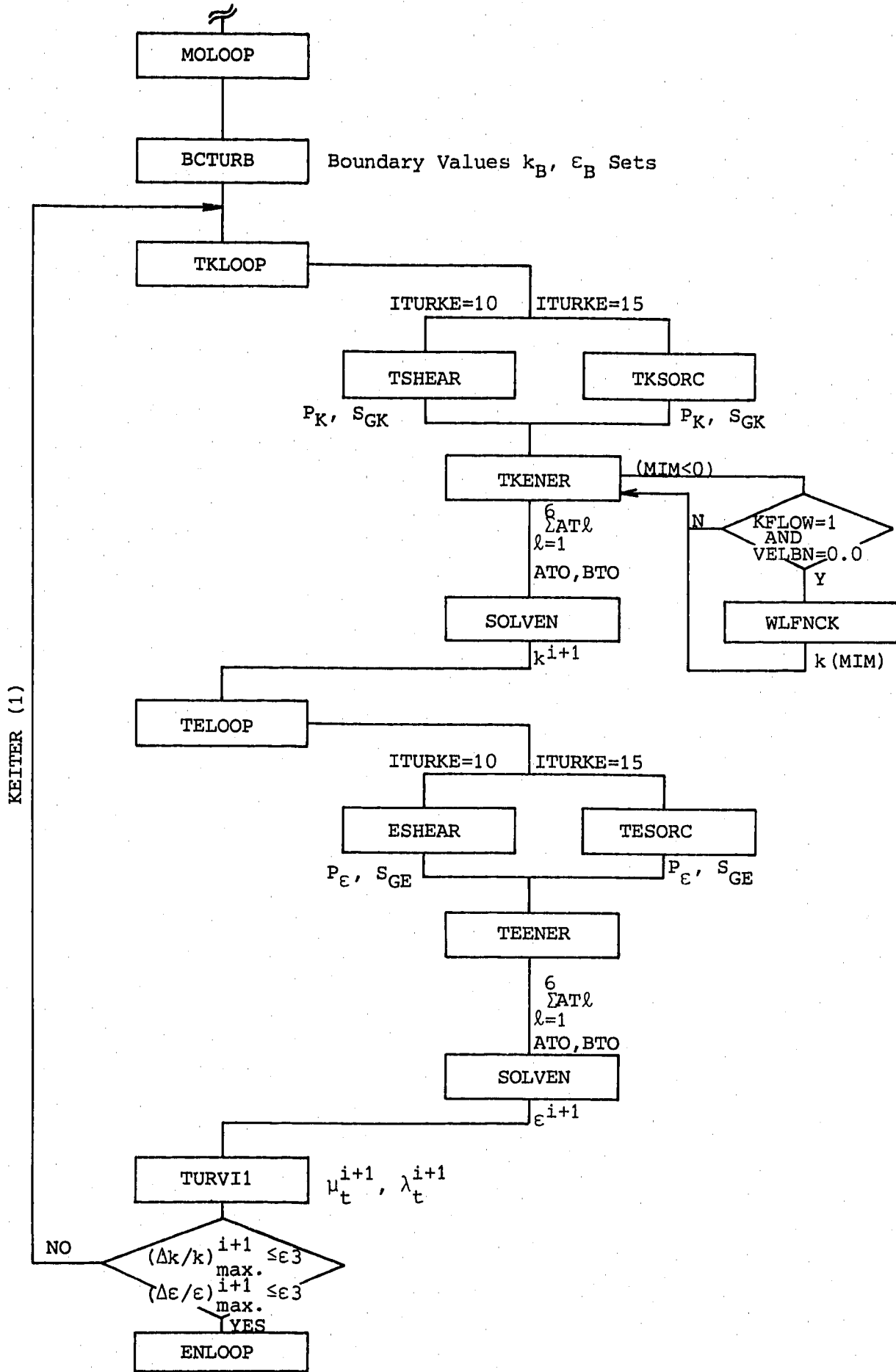


Figure 2.3 General Flow Chart of Two Equations Turbulence Model

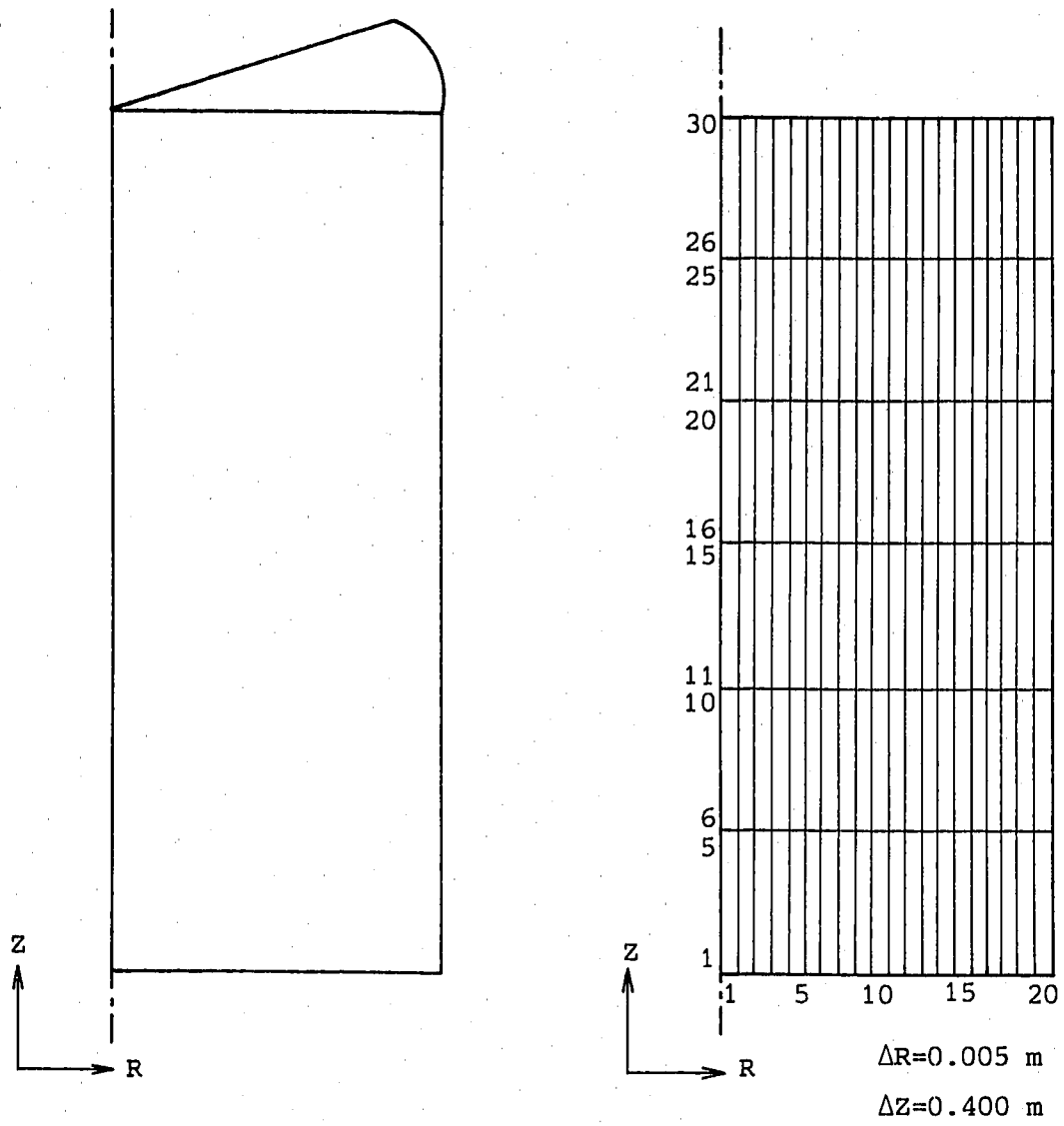


Figure 3.1 Analysis Model & Mesh Arrangement for Turbulent Pipe Flow (Validation Test 1)

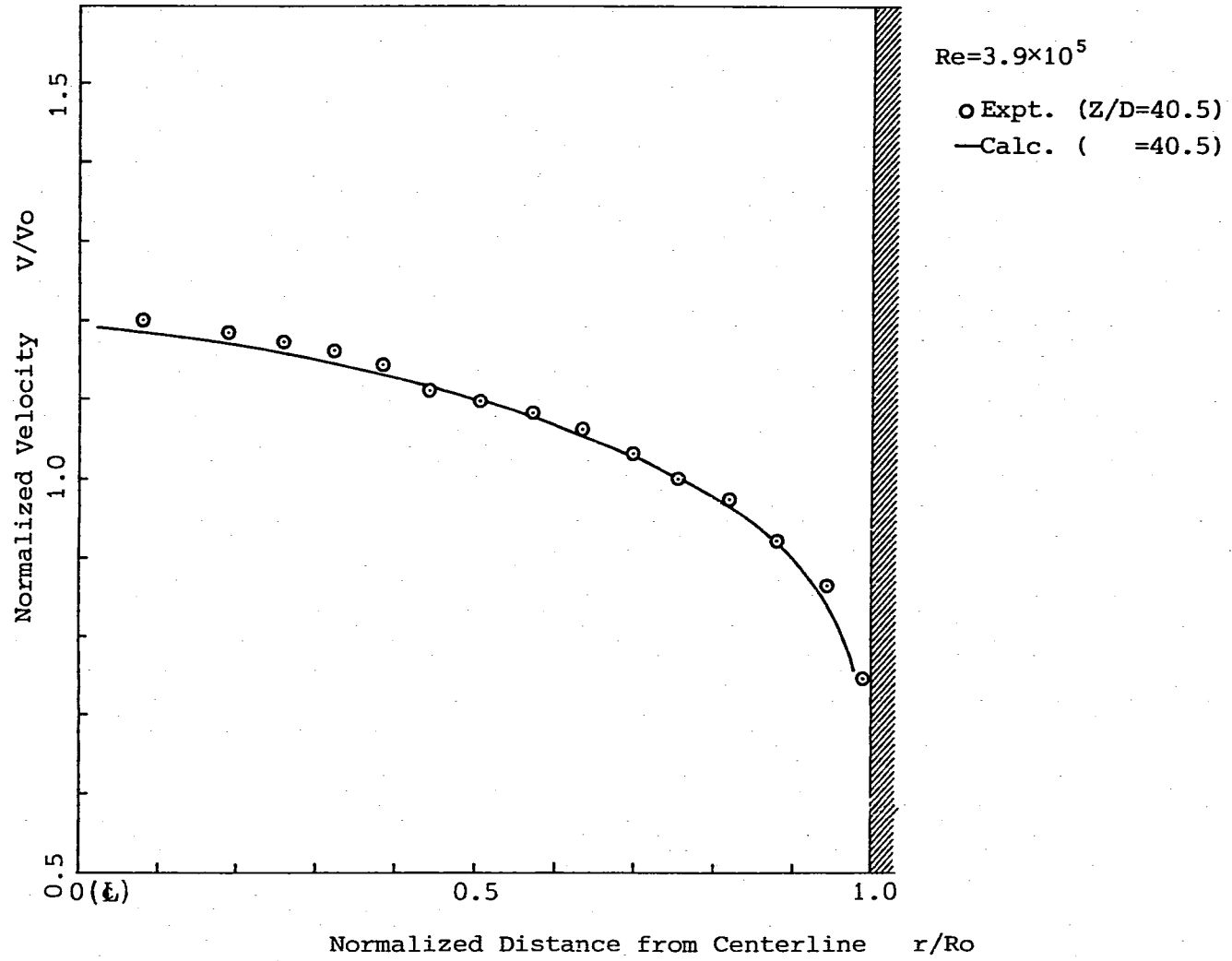


Figure 3.2 Radial Velocity Profiles at Z/D=40.5

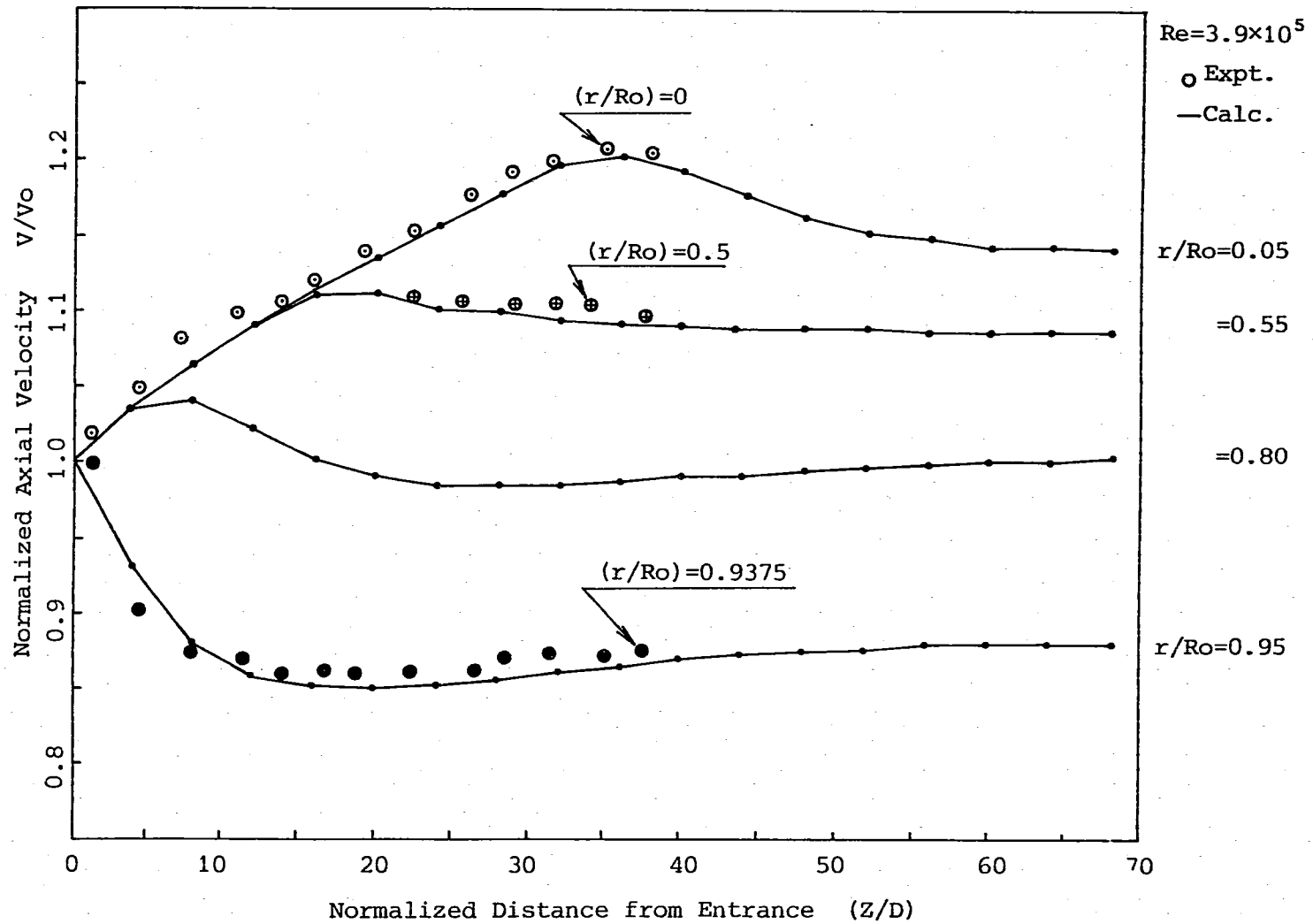


Figure 3.3 Axial Velocity Profiles

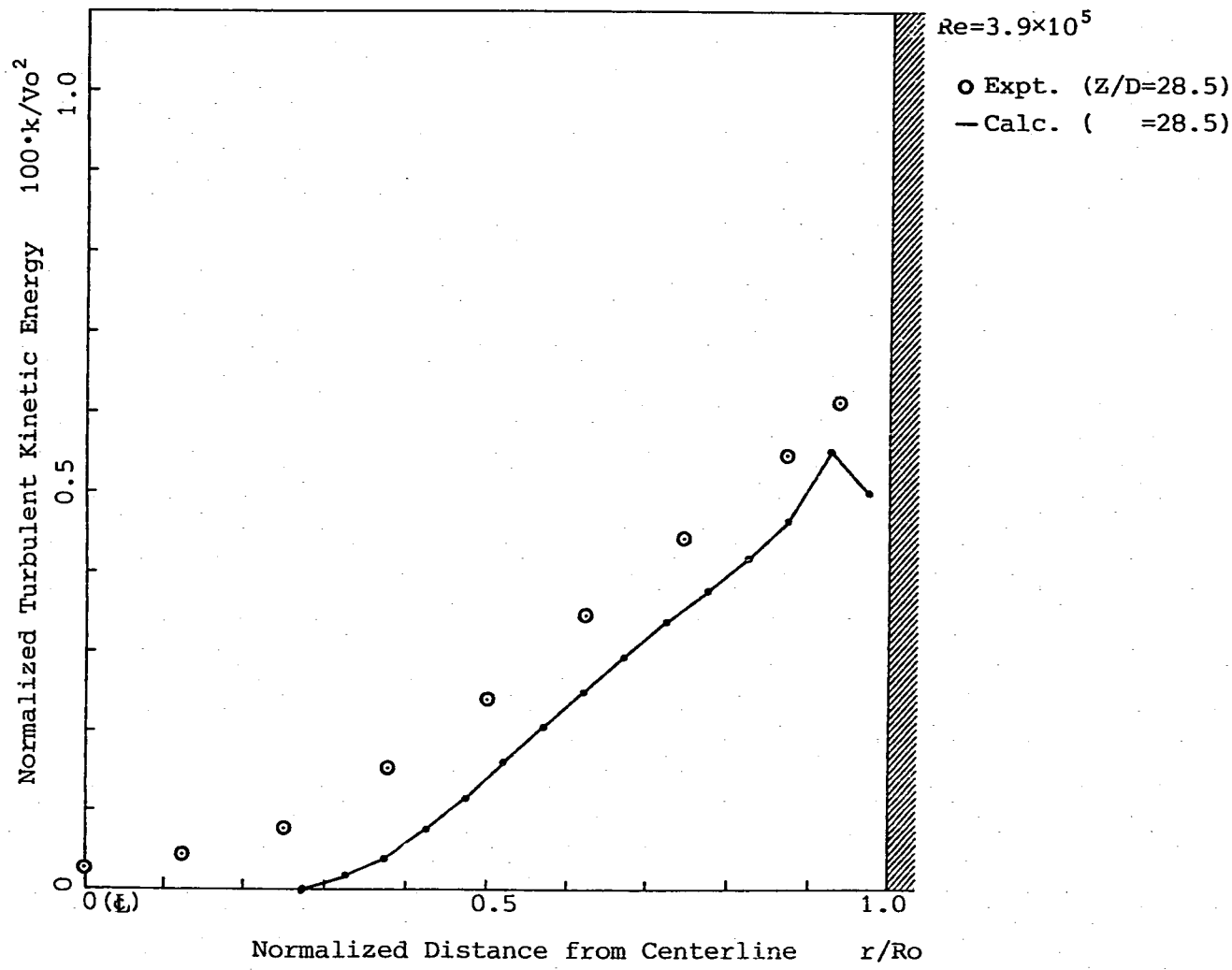


Figure 3.4 Turbulent Energy Profiles at $Z/D=28.5$ from Entrance

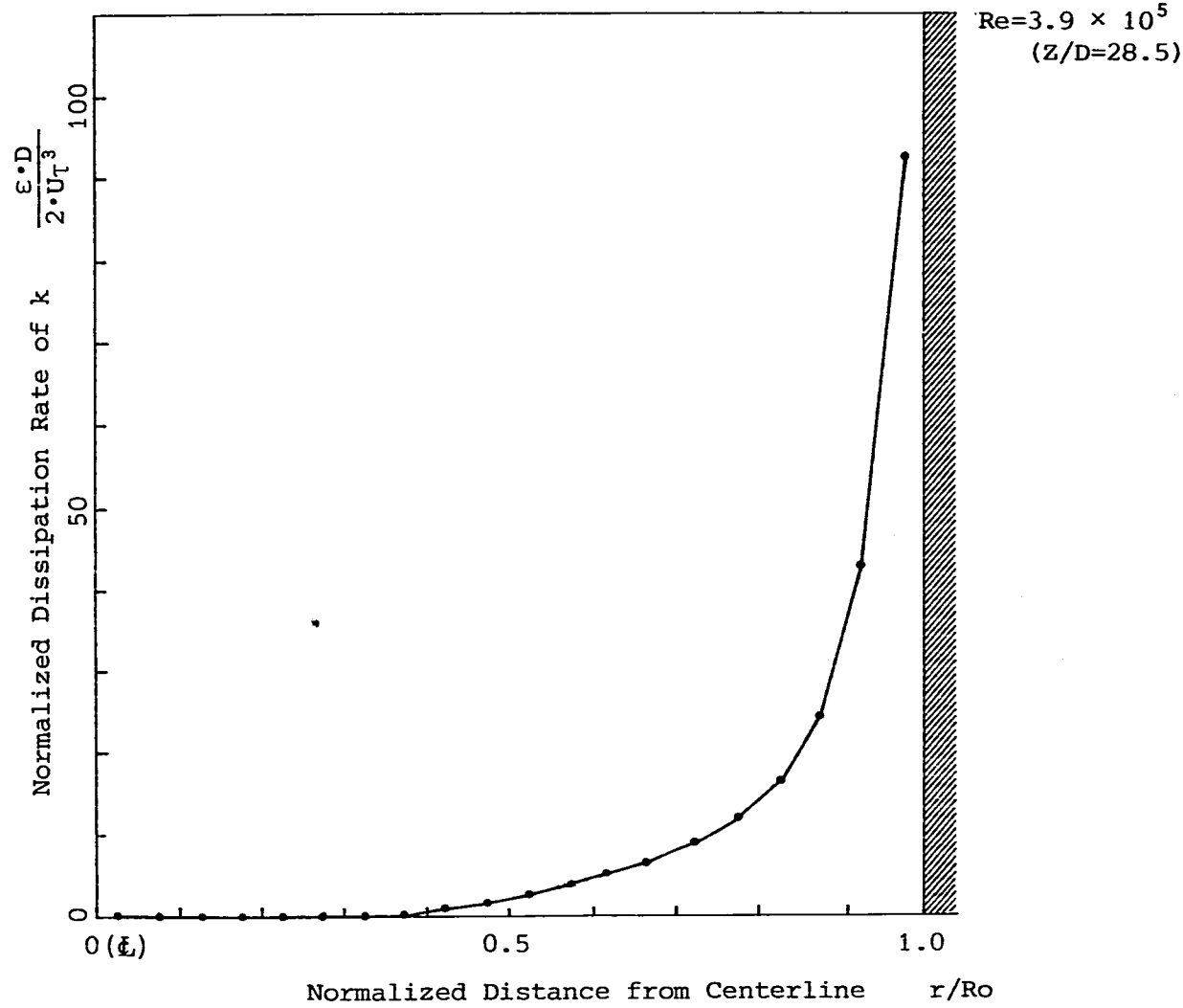


Figure 3.5 Dissipation Rate Profile of k at Z/D=28.5 from Entrance

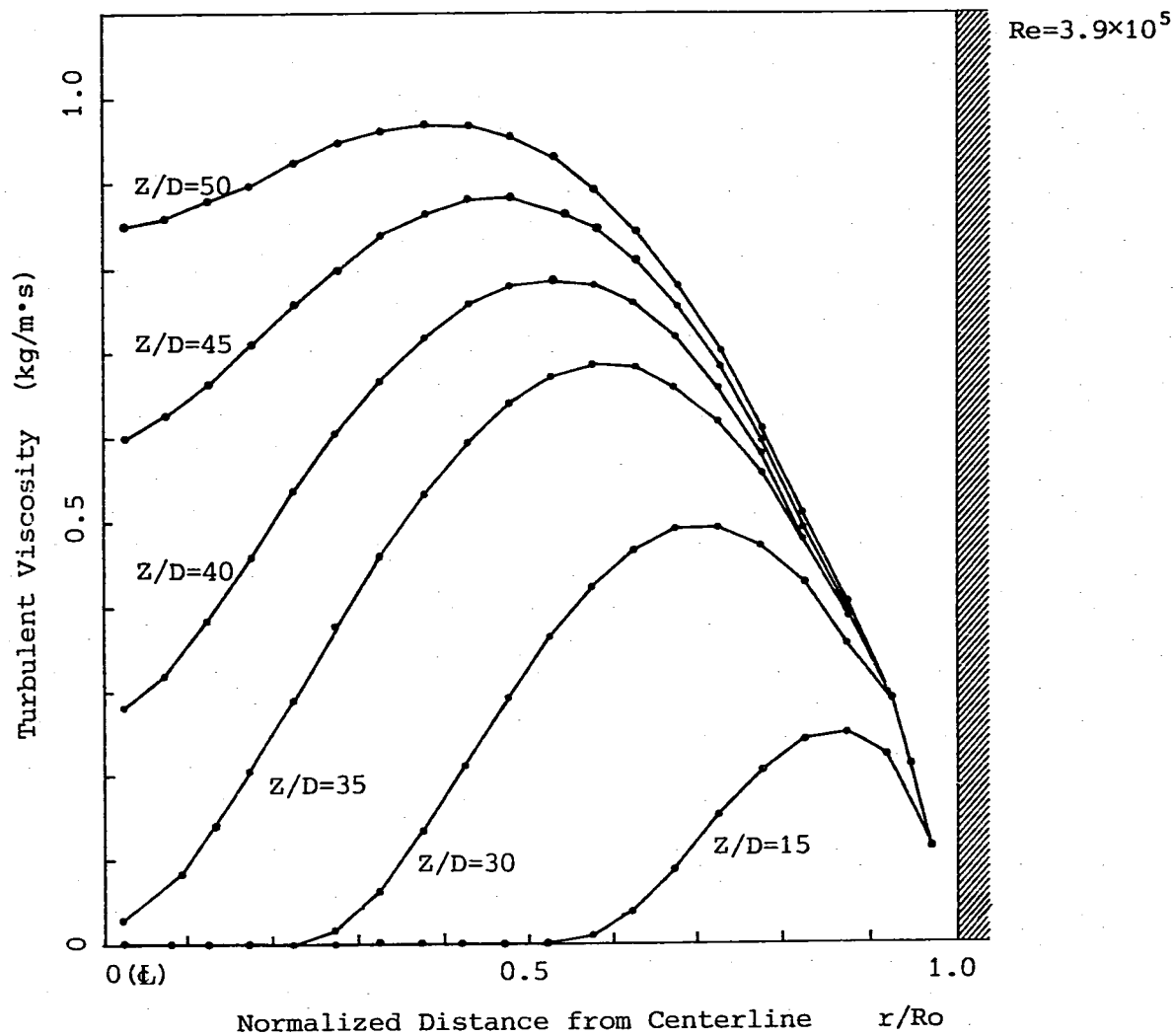


Figure 3.6 Turbulent Viscosity Profiles at Distances (Z/D) of 15, 30, 35, 40, 45 and 50 from Entrance

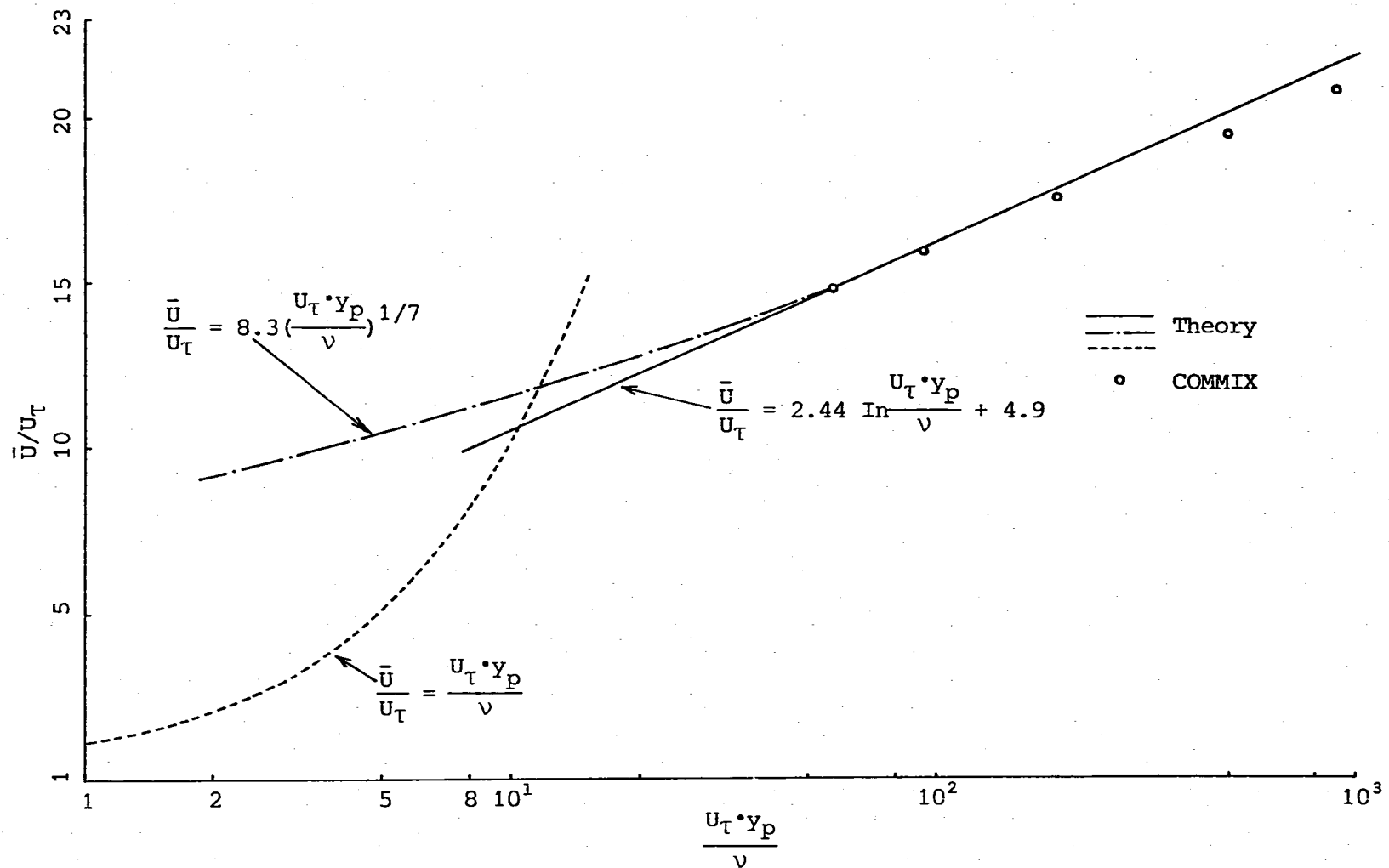


Figure 3.7 Mean Velocity Distribution near the Wall

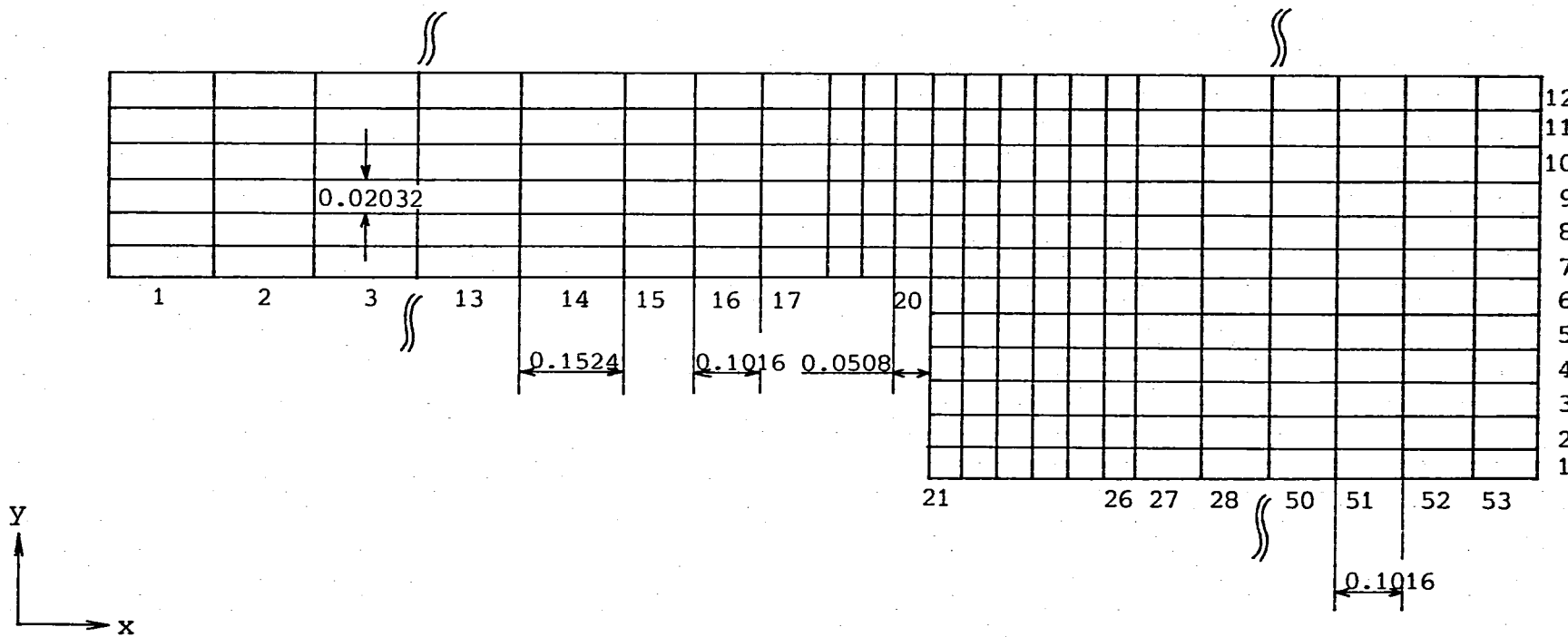
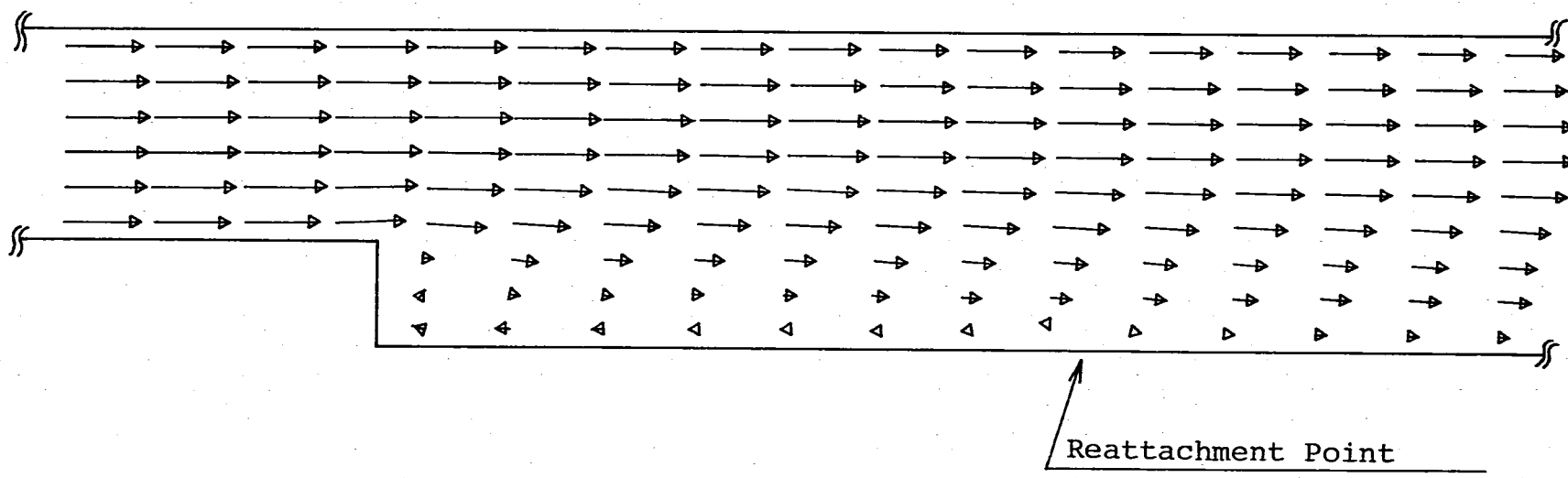


Figure 3.8 Mesh Arrangement for Single Sudden Expansion Model (Validation Test 2)



K=1 → 0.56 M/S

Figure 3.9 Velocity Distribution on Single Sudden Expansion Problem

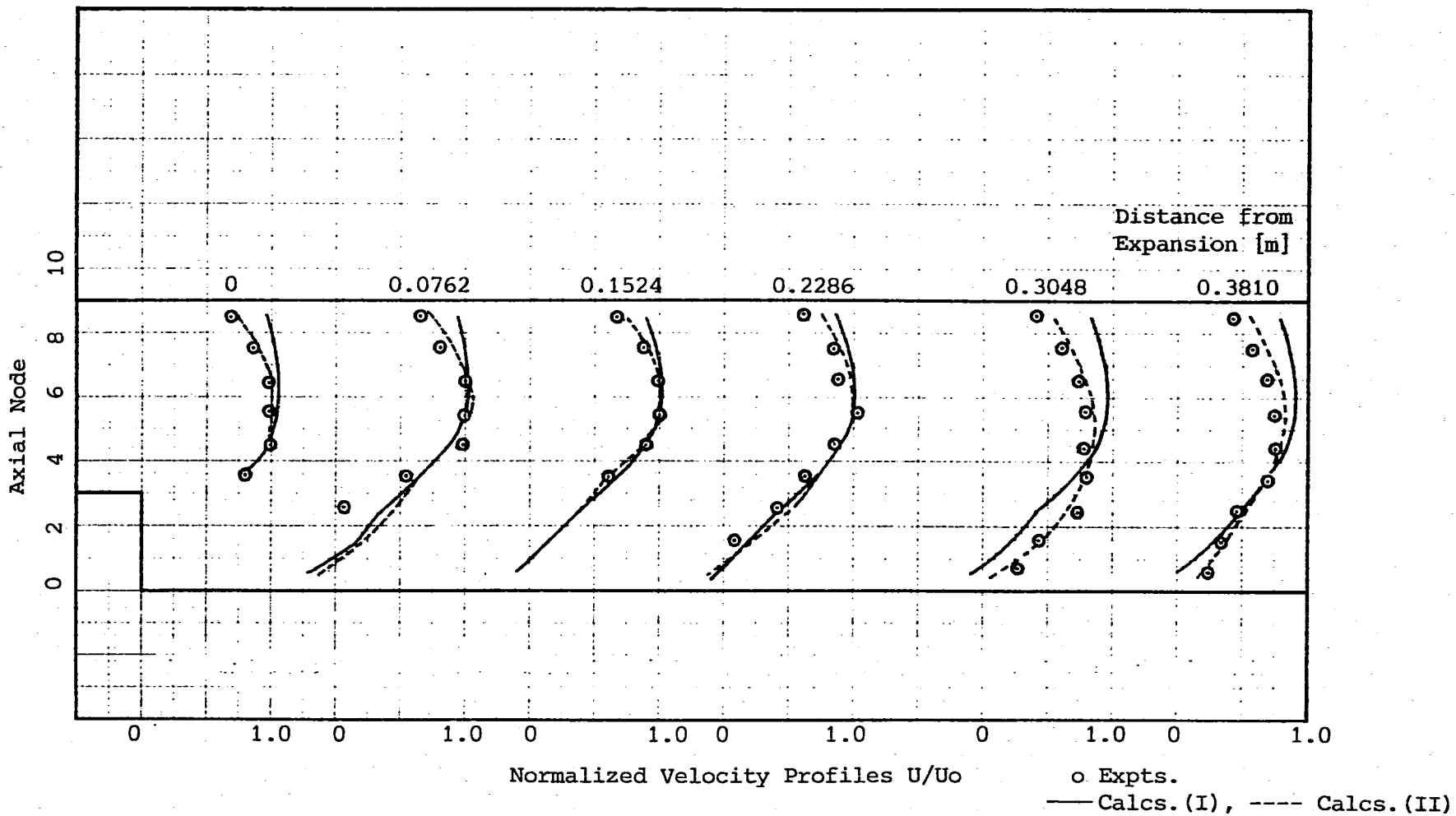


Figure 3.10 Normalized Velocity Distribution in a Rectangular Duct with a Single Sudden Expansion

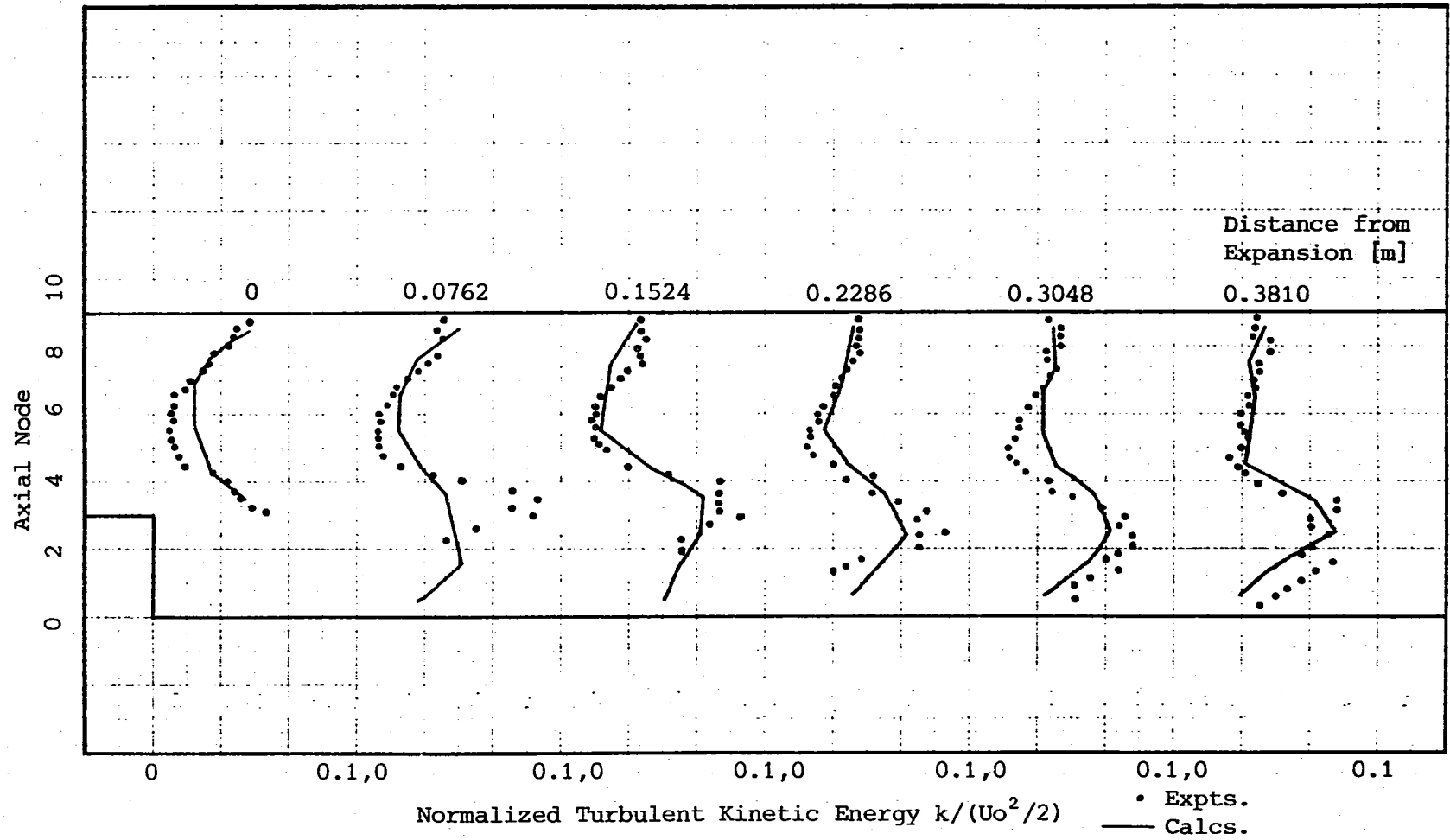


Figure 3.11 Normalized Turbulent Kinetic Energy in a Rectangular Duct with a Single Sudden Expansion

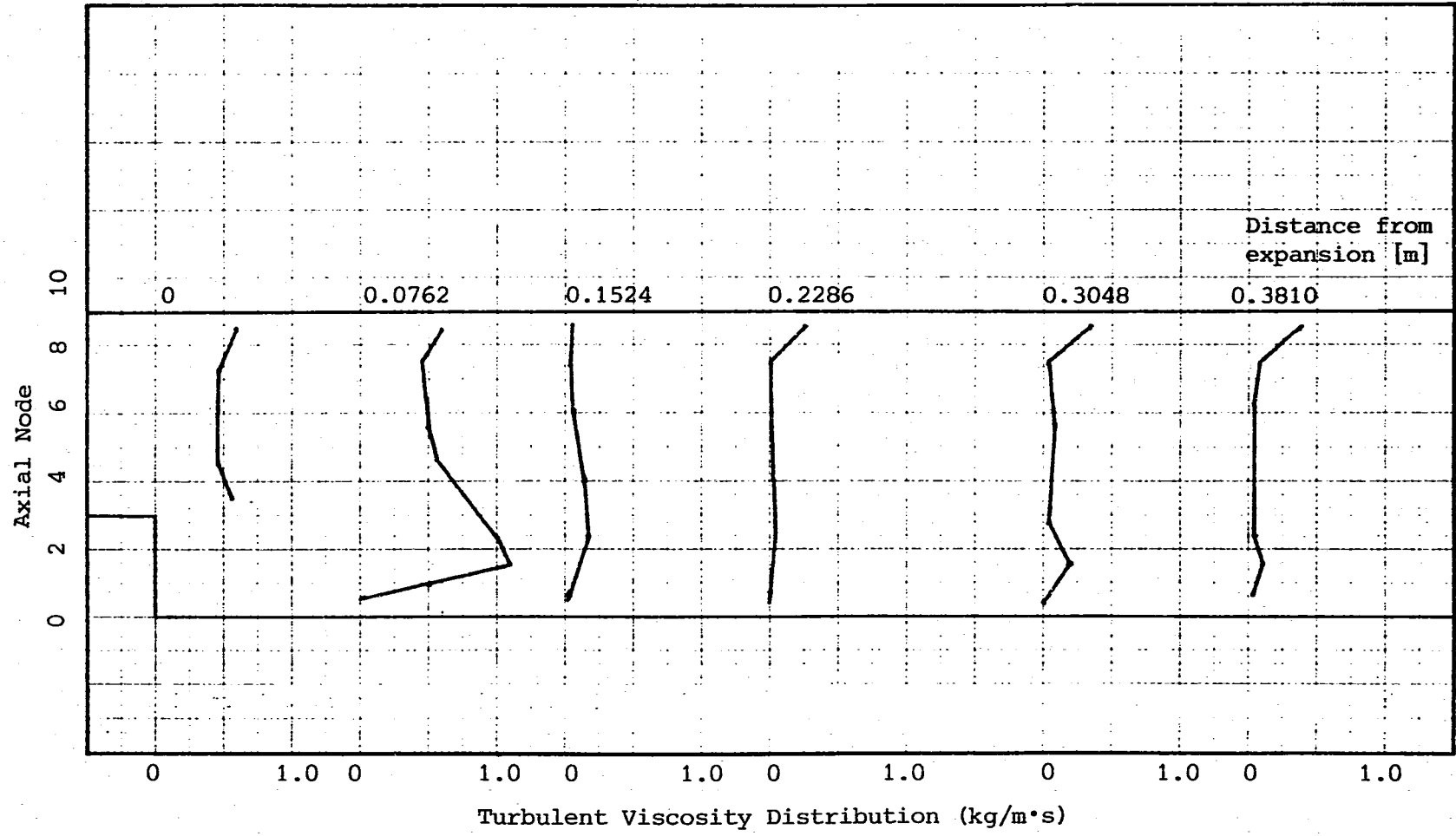


Figure 3.12 Turbulent Viscosity Distribution in a Rectangular Duct with a Single Sudden Expansion

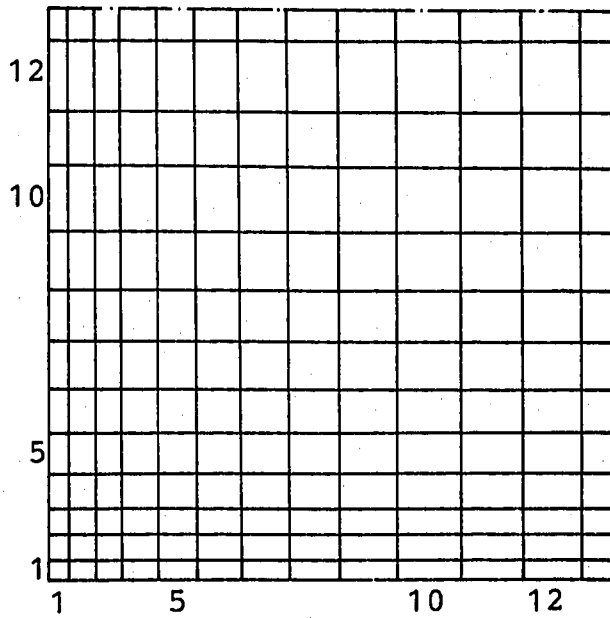
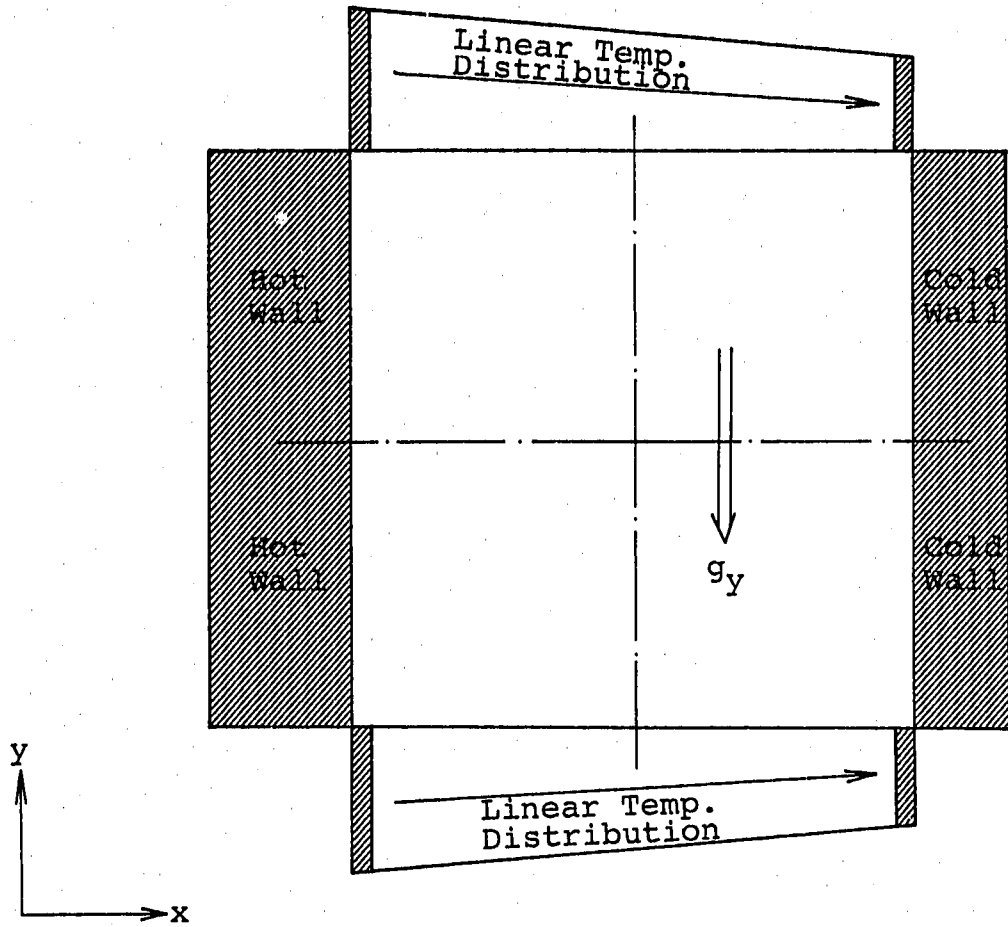


Figure 3.13 Analysis Model & Mesh Arrangement for Buoyancy-Driven Flow Problem (Validation Test 3)

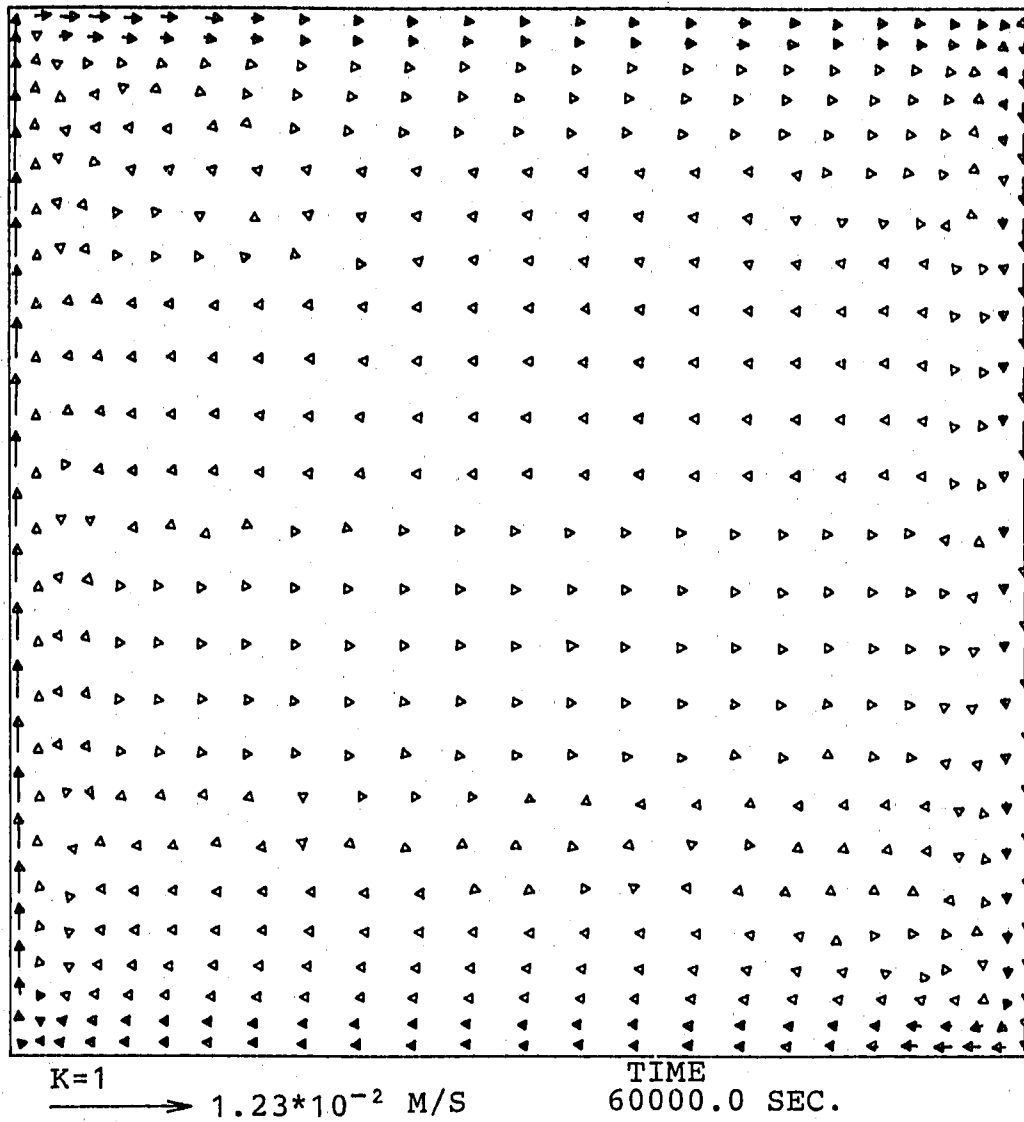


Figure 3.14 Velocity Pattern of Enclosed Buoyancy Driven Recirculating Flow Problem

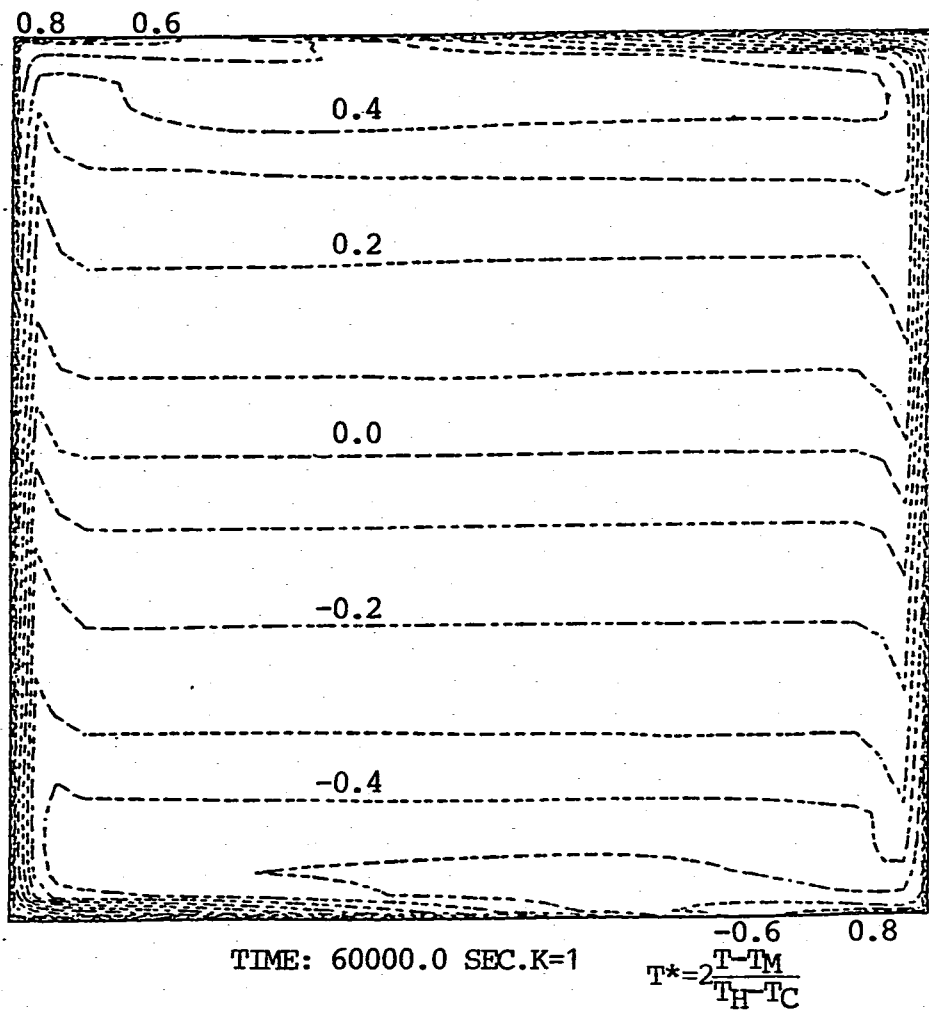


Figure 3.15 Calculated Isotherm in Square Cavity by COMMIX ($Gr=10^8$)

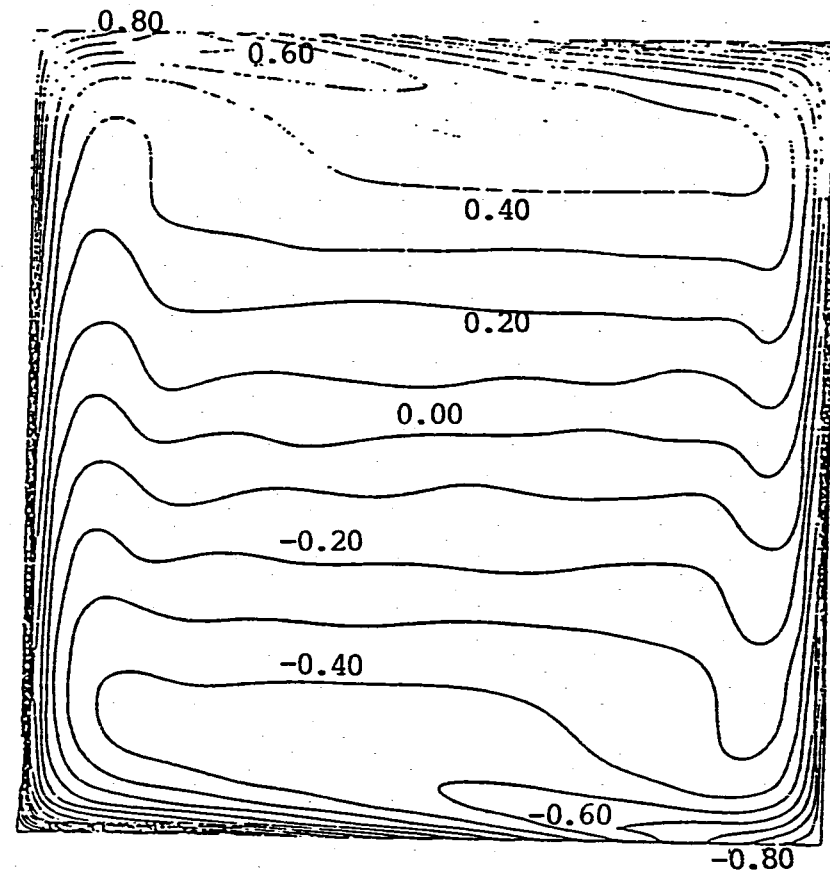
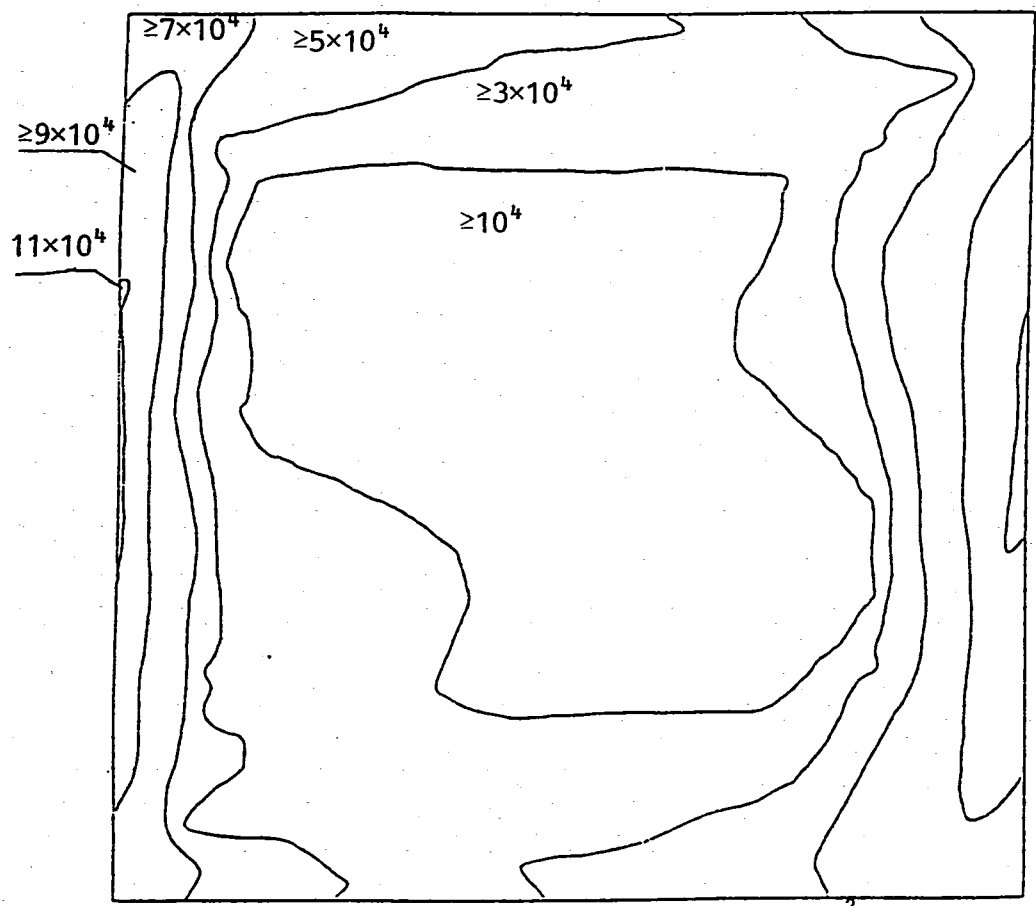


Figure 3.16 Calculated Isotherm in Square Cavity by Second Order Approximation Code ($Gr=10^8$)



$$k^* = \frac{L^2}{\nu^2} \cdot k$$

Figure 3.17 Calculated Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by COMMIX

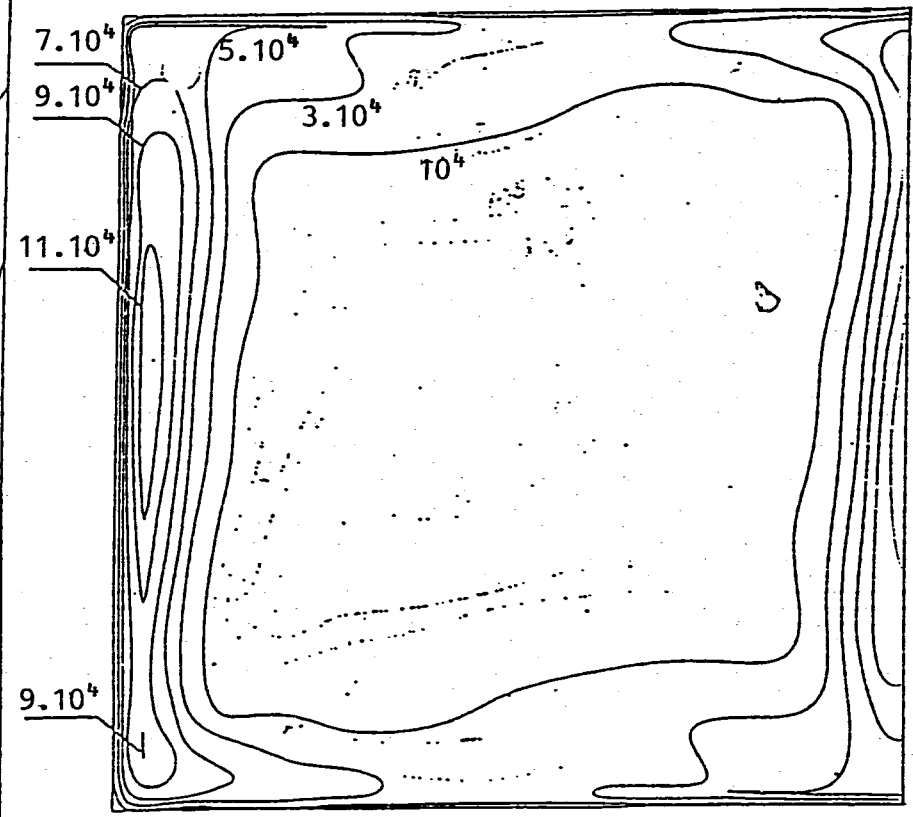
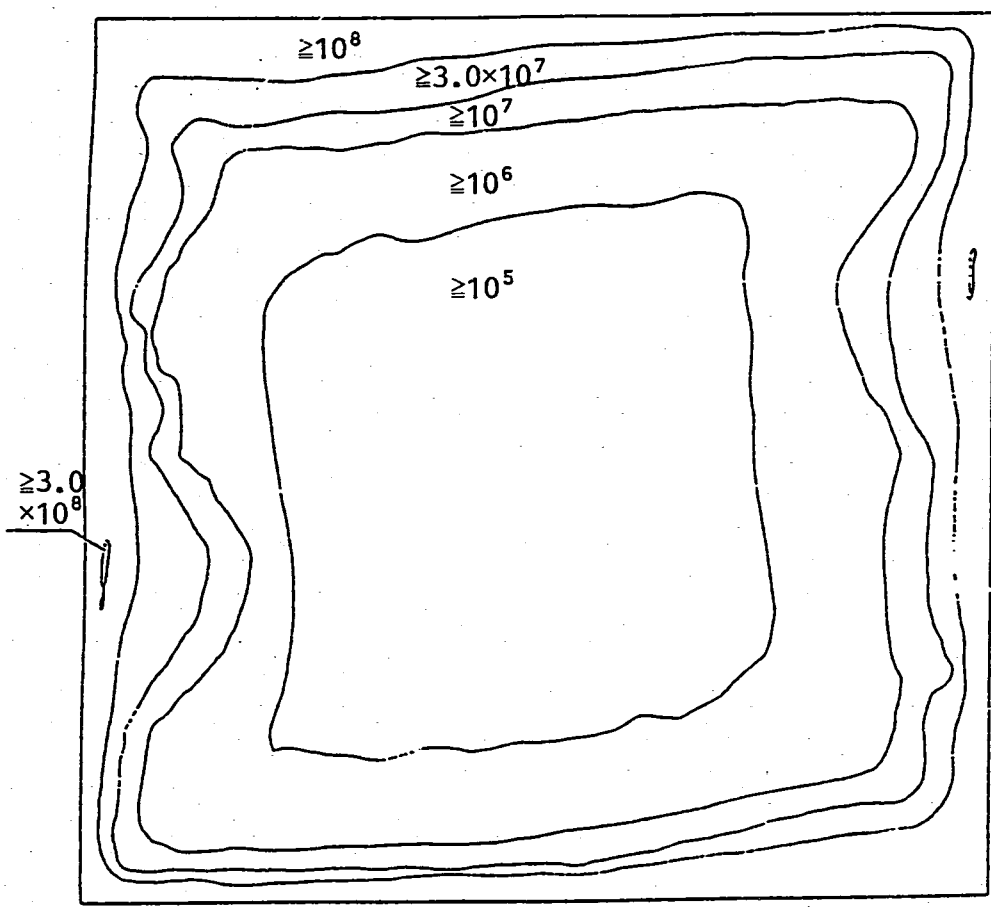


Figure 3.18 Calculated Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by Second Order Approximation Code



$$\epsilon^* = \frac{L^4}{\nu^3} \cdot \epsilon$$

Figure 3.19 Calculated Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by COMMIX

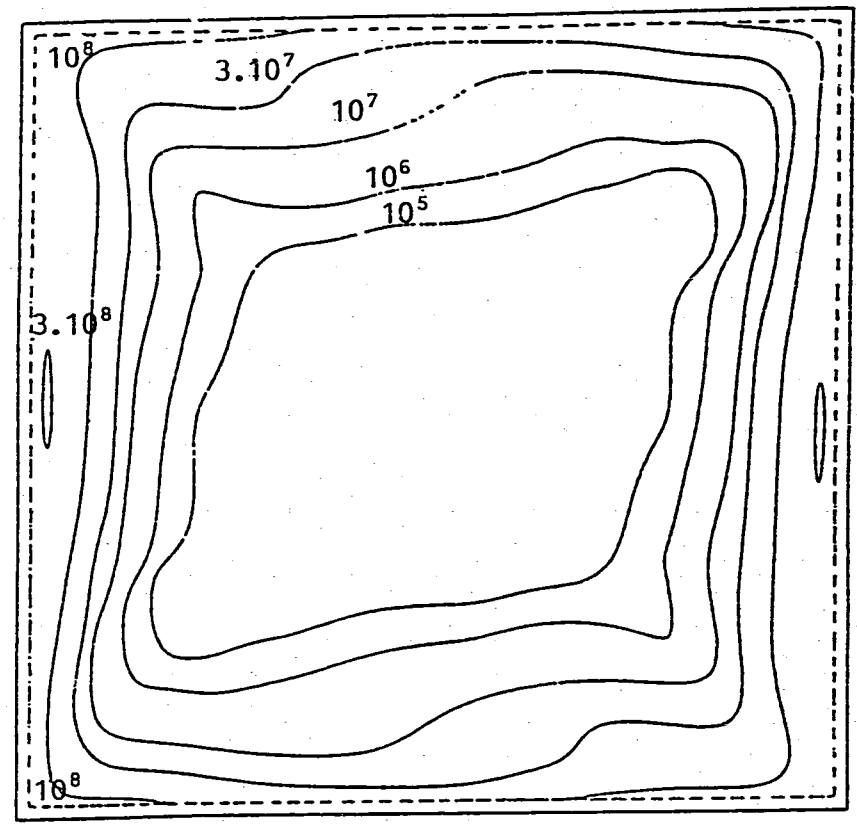


Figure 3.20 Calculated Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy in Square Cavity by Second Order Approximation Code

付録.A 入力データ (k-εモデル用)

今回のk-ε乱流モデル追加により、変更あるいは追加された入力データの説明を行なう。

Namelist/GEOM/

- ITURKE 乱流モデルの選択フラグ(15)
 = 0 : 乱流モデルを解かない
 =10 : 浮力による生成を考慮せず、また運動方程式に壁の影響を与えない
 =15 : 浮力による生成を考慮し、運動方程式に壁の影響を与える

Namelist/DATA/

- KEITER Figure 2.3に示したS.P.TKLOOP, TELOOP, TURVIを含むループの繰り返し回数(1)
- C1E ε方程式内生成項(2.8式)の比例定数(1.44)
- C2E ε方程式内消散項(2.9式)の比例定数(1.92)
- C3E ε方程式内浮力項(2.10式)の比例定数(1.44)
- OMEPSI ε方程式の係数に対するrelaxation factor(0.95)
- CINK1 境界値 k_B 設定のための係数(0.001)
 $k_B = CINK1 * V^2$
- CINE1 境界値 ϵ_B 設定のための係数(0.001)
 $\epsilon_B = CINE1 * k_B^2$
- SIGK k方程式内拡散項(2.1式)の比例定数 σ_k (1.0)
- SIGE ε方程式内拡散項(2.6式)の比例定数 σ_ϵ (1.3)
- CINK2 初期値 k_I 設定のための係数(0.001)
 $k_I = CINK2 * V^2$
- CINE2 初期値 ϵ_I 設定のための係数(0.001)
 $\epsilon_I = CINE2 * k_I^2$

(注) カッコ内の値は、デフォルト値である。

付録.B プロッタ・パッケージ

今回の $k-\epsilon$ 乱流モデルの追加に伴ない、プロッタ・パッケージの機能追加を行なった。追加した機能は、以下に示す通りである。

1. 乱流運動エネルギー k の Contour 図出力
2. 乱流運動エネルギー散逸量 ϵ の Contour 図出力
3. 乱流粘性係数 μ_t の Contour 図出力
4. 乱流熱伝導度 λ_t の Contour 図出力

実行は、従来の温度 Contour 図用の入力データ Namelist/PLOT/中に変数 ICONT を追加して使用する。ICONT の意味は、

ICONT = 0	Temperafure (default)
= 1	k
= 2	ϵ
= 3	μ_t
= 4	λ_t

である。ただし、乱流パラメータ出力時の入力データ TMIN, TMAX, DELT は省略する必要がある。これは乱流パラメータ中の最大値, 最小値を自動検索し、Contour 間隔は 10 等分した値を用いるような自動スケール機能が追加されているためである。

使用するロード・モジュールは、以下に示すものである。

“T107C.COMMIX1A.PLOTTER.NEW.LOAD(TURV)”

付録 C 実験検証問題入力データ

Table C.1 Input data for turbulent pipe flow (Validation Test 1)

```

*****
*
* THE VERIFICATION TESTS FOR K - E TURBULENCE MODEL IN
*
* THE NEW COMMIX-1A PROGRAM (K - E VERSION).
*
*
* CREATE JUN. 11, '84
*
* MODIFY AUG. 02, '84
*
* RUN OCT. 11, '84
*
* L.MOUL KEMODE
*
* PROGRAM
*
*****
&GEOM IGEOM=-1, NL1=2400, NH1=1200, ISYMCH=3, IFITEN=3, IFREB=0,
IFRES=1, IMAX=10, JMAX=1, KMAX=60, NSURF=4,
DX=10*0.0100, DY=6.283185, DZ=60*0.05,
XNORML= 0. ,0. , 1. , -1.,
YNORML= 0. ,0. ,0. ,0.,
ZNORML= 1. , -1. ,0. ,0.,
ITURKE=15,

&END
REG -1. 1 10 1 1 1 1 1
REG -1. 1 10 1 1 60 60 2
REG -1. 1 1 1 1 1 60 3
REG -1. 10 10 1 1 1 60 4
END
&DATA IFENER=0, NTHCON=0, NTHMAX=5000, IDTIME=0, IT=1,
DT(1)=0.0158, TIMAX=1.0300,
CINK1=6.62E-9, CINK2=6.62E-9,
KFLOW= 1, -2, -3, 1,
KTEMP= 4*400,
TEMPO= 20, VELOC(1)=2.525,
IZREB = 1,
NTPLOT= -50,
NTPRNT=1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 100, -9999,
NTHPR =01201, 03201, 09201, 14201, 21201, 02201,
07201, 08201, 16201,
KEITER=1, ITKBUG=0, ITIBUG=0,

&END
END
UL 0.00001 1 10 1 1 1 60
VL 0.00001 1 10 1 1 1 60
WL 2.52001 1 10 1 1 1 60
END

```


Table O.2 Input data for channel expansion flow Model
(Validation Test 2)

```

*****
*
*   THE VERIFICATION TESTS FOR K - E TURBULENCE MODEL IN
*
*   THE NEW COMMIX-1A PROGRAM (K - E VERSION).
*
*   --- SINGLE SUDDEN EXPANSION PROBLEM ---
*
*
*
*
*           CREATE      JUN. 11, '84
*
*           MODIFY      AUG. 02, '84
*
*           RUN         OCT. 11, '84
*
*           D.S.NAME    COMMIX1A.KEMODEL.LOAD
*
*           L.MODUL     KEMODEL
*
*           PROGRAM
*
*****
&GEOM  IGEOM=0, NL1=1142, NM1=517, ISYCH=3, IFITEN=3, IFREB=0,
        IFRES=1, IMAX=61, JMAY=9, KMAX= 1, NSURF=13,
        DX=13*0.1524, 3*0.1016, 24*0.0508, 21*0.1016,
        DY=9*0.02032,
        DZ=0.01,
        XNORML= 1. ,1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , 1. , 1. , 1. , 1. ,
        YNORML= 0. , 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. , 1. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        ZNORML= 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. , 1. , -1. , 0. , 0. , 0. , 0. , 0. ,
        ITURKE=15,

&END
REG -1.       1  1  4  4  1  1  1
REG -1.      23 23  1  3  1  1  2
REG -1.      61 61  1  9  1  1  3
REG -1.      23 61  1  1  1  1  4
REG -1.       1  61  9  9  1  1  5
REG -1.       1  22  4  9  1  1  6
REG -1.      23  61  1  9  1  1  6
REG -1.       1  22  4  9  1  1  7
REG -1.      23  61  1  9  1  1  7
REG -1.       1  22  4  4  1  1  8
REG -1.       1  1  5  5  1  1  9
REG -1.       1  1  6  6  1  1 10
REG -1.       1  1  7  7  1  1 11
REG -1.       1  1  8  8  1  1 12
REG -1.       1  1  9  9  1  1 13
&DATA  IFENER=0 , NTHCON=0 , NTMAX=5000, IDTIME=0, IT=1,
        DT(1)=0.0158, TIMAX=100300,
        CINK1=6.62E-5, CINK2=6.62E-5,
        KFLOW= 1,1, -2,1,1, -3, -3, 1,
        KTEMP=      8*400,
        TEMPO=      20.,
        VELOC(1)=1.9898,
        VELOC(9)=2.5510,
        VELOC(10)=2.5510,
        VELOC(11)=2.5510,
        VELOC(12)=2.1684,
        VELOC(13)=1.7857,
        IZREB = 1,
        NTPLOT= -10,
        NTPRNT=5,10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 100, -9999,
        NTHPR = 01301, 03301, 09301, 14301, 21301,
                08301, 16301,
        KEITER= 1, ITKBUG=0, ITIBUG=0,
&END
END
UL      2.24510  1  61  1  9  1  1
VL      0.00001  1  61  1  9  1  1
WL      0.00001  1  61  1  9  1  1
END

```

Table C.3 Input data for buoyancy-driven flow
(Validation Test 3)

```
*****
*
*   THE VERIFICATION TESTS FOR K - E TURBULENCE MODEL IN
*
*       THE NEW COMMIX-1A PROGRAM (K - E VERSION).
*
*   --- ENCLOSED BUOYANCY DRIVEN RECIRCULATING FLOW ---
*
*       ( GR = 1 E 08 )
*
*
*
*
*       CREATE      JUN. 11, '84
*
*       MODIFY     AUG. 02, '84
*
*       RUN        SEP. 26, '84
*
*       D.S.NAME   COMMIX1A.KEMODEL.LOAD
*
*       L.MODUL    W100000
*
*       PROGRAM
*
*****
&GEOM  IGEOM=0, NL1=1500, NM1=625, ISYMCH=3, IFITEN=3, IFREB=0,
        IFRES=1, IMAX=25, JHAX=25, KHAX= 1, NSURF=54,
        DX=0.005, 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, 0.005,
        DY=0.005, 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, 0.005,
        DZ=0.0001,
        XNORML= 1.  -1.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
        YNORML= 0.  0.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.,
               1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.,
               1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  -1.  -1.  -1.,
               -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.,
               -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.  -1.,
        ZNORML= 0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
               0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.,
        ITURKE=15,
&END
REG -1.  1  1  1  25  1  1  1
REG -1.  25 25 1  25  1  1  2
REG -1.  1  1  1  1  1  1  3
REG -1.  2  2  1  1  1  1  4
REG -1.  3  3  1  1  1  1  5
REG -1.  4  4  1  1  1  1  6
REG -1.  5  5  1  1  1  1  7
REG -1.  6  6  1  1  1  1  8
REG -1.  7  7  1  1  1  1  9
REG -1.  8  8  1  1  1  1  10
REG -1.  9  9  1  1  1  1  11
REG -1.  10 10 1  1  1  1  12
REG -1.  11 11 1  1  1  1  13
REG -1.  12 12 1  1  1  1  14
REG -1.  13 13 1  1  1  1  15
REG -1.  14 14 1  1  1  1  16
REG -1.  15 15 1  1  1  1  17
REG -1.  16 16 1  1  1  1  18
REG -1.  17 17 1  1  1  1  19
REG -1.  18 18 1  1  1  1  20
REG -1.  19 19 1  1  1  1  21
REG -1.  20 20 1  1  1  1  22
REG -1.  21 21 1  1  1  1  23
```

Table C.3 (Continued 1)

REG -1.	22	22	1	1	1	1	24
REG -1.	23	23	1	1	1	1	25
REG -1.	24	24	1	1	1	1	26
REG -1.	25	25	1	1	1	1	27
REG -1.	1	1	25	25	1	1	28
REG -1.	2	2	25	25	1	1	29
REG -1.	3	3	25	25	1	1	30
REG -1.	4	4	25	25	1	1	31
REG -1.	5	5	25	25	1	1	32
REG -1.	6	6	25	25	1	1	33
REG -1.	7	7	25	25	1	1	34
REG -1.	8	8	25	25	1	1	35
REG -1.	9	9	25	25	1	1	36
REG -1.	10	10	25	25	1	1	37
REG -1.	11	11	25	25	1	1	38
REG -1.	12	12	25	25	1	1	39
REG -1.	13	13	25	25	1	1	40
REG -1.	14	14	25	25	1	1	41
REG -1.	15	15	25	25	1	1	42
REG -1.	16	16	25	25	1	1	43
REG -1.	17	17	25	25	1	1	44
REG -1.	18	18	25	25	1	1	45
REG -1.	19	19	25	25	1	1	46
REG -1.	20	20	25	25	1	1	47
REG -1.	21	21	25	25	1	1	48
REG -1.	22	22	25	25	1	1	49
REG -1.	23	23	25	25	1	1	50
REG -1.	24	24	25	25	1	1	51
REG -1.	25	25	25	25	1	1	52
REG -1.	1	25	1	25	1	1	53
REG -1.	1	25	1	25	1	1	54

END

```

&DATA NTHAX=10000, IDTIME=0, IT(1)=1,
DT(1)=100.00000, C3E=0.4,
CINK1=1.62E+8, CINK2=1.62E+8,
KFLOW= 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, -3, -3,
KTEMP= 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 400, 400,
TEMPO= 64.50, GRAVY=-1.045,
TEMP( 1)=65.0,
TEMP( 2)=64.0,
TEMP( 3)=64.9852,
TEMP( 4)=64.9604,
TEMP( 5)=64.9355,
TEMP( 6)=64.9033,
TEMP( 7)=64.8687,
TEMP( 8)=64.8291,
TEMP( 9)=64.7844,
TEMP(10)=64.7398,
TEMP(11)=64.6904,
TEMP(12)=64.6360,
TEMP(13)=64.5816,
TEMP(14)=64.5272,
TEMP(15)=64.4728,
TEMP(16)=64.4184,
TEMP(17)=64.3640,
TEMP(18)=64.3096,
TEMP(19)=64.2602,
TEMP(20)=64.2156,
TEMP(21)=64.1709,
TEMP(22)=64.1313,
TEMP(23)=64.0967,
TEMP(24)=64.0645,
TEMP(25)=64.0396,
TEMP(26)=64.0148,
TEMP(27)=64.00,
TEMP(28)=64.9852,
TEMP(29)=64.9604,
TEMP(30)=64.9355,

```

Table C.3 (Continued 2)

TEMP(31)=64.9033,
 TEMP(32)=64.8687,
 TEMP(33)=64.8291,
 TEMP(34)=64.7844,
 TEMP(35)=64.7398,
 TEMP(36)=64.6904,
 TEMP(37)=64.6360,
 TEMP(38)=64.5816,
 TEMP(39)=64.5272,
 TEMP(40)=64.4728,
 TEMP(41)=64.4184,
 TEMP(42)=64.3640,
 TEMP(43)=64.3096,
 TEMP(44)=64.2602,
 TEMP(45)=64.2156,
 TEMP(46)=64.1709,
 TEMP(47)=64.1313,
 TEMP(48)=64.0967,
 TEMP(49)=64.0645,
 TEMP(50)=64.0396,
 TEMP(51)=64.0148,
 TEMP(52)=64.00,
 NTPLOT=-50,
 NTPRNT=1,10,20,30,40, 50, 100,-9999,
 NTHPR =01301, 02301, 09301, 05301, 14301, 21301, 20301,
 08301, 07301, 04301,
 KEITER= 1,ITKBUG=0,ITIBUG=0,

```

&END
VELB 0.0      1  1 25 25  1  1 28
VELB 0.0      2  2 25 25  1  1 29
VELB 0.0      3  3 25 25  1  1 30
VELB 0.0      4  4 25 25  1  1 31
VELB 0.0      5  5 25 25  1  1 32
VELB 0.0      6  6 25 25  1  1 33
VELB 0.0      7  7 25 25  1  1 34
VELB 0.0      8  8 25 25  1  1 35
VELB 0.0      9  9 25 25  1  1 36
VELB 0.0     10 10 25 25  1  1 37
VELB 0.0     11 11 25 25  1  1 38
VELB 0.0     12 12 25 25  1  1 39
VELB 0.0     13 13 25 25  1  1 40
VELB 0.0     14 14 25 25  1  1 41
VELB 0.0     15 15 25 25  1  1 42
VELB 0.0     16 16 25 25  1  1 43
VELB 0.0     17 17 25 25  1  1 44
VELB 0.0     18 18 25 25  1  1 45
VELB 0.0     19 19 25 25  1  1 46
VELB 0.0     20 20 25 25  1  1 47
VELB 0.0     21 21 25 25  1  1 48
VELB 0.0     22 22 25 25  1  1 49
VELB 0.0     23 23 25 25  1  1 50
VELB 0.0     24 24 25 25  1  1 51
VELB 0.0     25 25 25 25  1  1 52
VELB 0.0     25 25  1 25  1  1  2
END
UL    0.00001  1 24 13 25  1  1
UL   -0.00001  1 24  1 12  1  1
VL    0.00001  1 12  1 24  1  1
VL   -0.00001 13 25  1 24  1  1
TL    64.5000  1 25  1 25  1  1
END
    
```

付録D Subprograms Description
 1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	BO TURB
----------	---------

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
VELBN CINK1 CINE1 UL VL WL	A C C A A A	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> Iteration中に得られる Boundary Velocity を用いて Boundary Turbulent Kinetic Energy の値を Update する。 </div> 各規定面に含まれる表面セルについて以下の処理を実行する。 <VELBN ≥ 0.0> の場合 TURKB = CINK1 * VELBN**2 TUREB = CINE1 * TURKB**2 <VELBN = 0.0> の場合 TURKB = CINK1 * VELO**2 TUREB = CINE1 * TURKB**2 ここで, VELO = SQRT (UO ² + VO ² + WO ²) UO = 0.5 (U1 + U2) VO = 0.5 (V3 + V4) WO = 0.5 (W5 + W6) <u>U1 について</u> 内部セルがある場合 U1 = UL セルが無い場合 U1 = 0.0	TURKB TUREB	A A

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
VELBN	A	R	セル表面上の法線方向流速
CINK1	C	R	k 用比例定数 (input, default = 10 ⁻³)
CINE1	C	R	ε 用比例定数 (input, default = 10 ⁻³)
UL, VL, WL	A	R	セル流速
TURKB	A	D	k 境界値
TUREB	A	D	ε 境界値

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

サブプログラム名	INTURB
----------	--------

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
VELBN CINK2 CINE2 UL VL WL	A C C A A A	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">乱流運動エネルギーおよびその散逸率の境界値, 初期値を設定する。</div> I) 境界セルについて $TURKB = CINK2 * VELBN^{**2}$ $TUREB = CINE2 * TURKB^{**2}$ II) 全流体セルについて $TURK = CINK2 * (U0^2 + V0^2 + W0^2)$ $TURE = CINE2 * TURK^{**2}$ ここで, $U0 = 0.5 (U1 + U2)$ $U1 = UL$: 内部セルが有る場合 $= 0.0$: セルが無い場合 $= VELBN$: 境界セルの場合	TURKB TUREB TURK TURE	A A A A

2. 主要参照変数/定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
VELBN	A	R	セル表面上の法線方向流速
CINK2	C	R	k用比例定数 (input, default = 10^{-3})
CINE2	C	R	ϵ 用比例定数 (input, default = 10^{-3})
UL, VL, WL	A	R	セル流速
TURKB	A	D	k境界値
TUREB	A	D	ϵ 境界値
TURK	A	D	乱流運動エネルギー初期値
TURE	A	D	乱流運動エネルギー散逸率初期値

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	TKLOOP
----------	--------

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
TURK ITURKE	A C	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> k-ε乱流モデルのうち、乱流運動エネルギーk計算のためのControl部である。 </div> <pre> graph TD Start([S.P. START]) --> SetRMU[粘性率設定 (RMU)] SetRMU --> CalcTURKT[TURKT(MO) ← TURK(MO)] CalcTURKT --> DecITURKE{ITURKE} DecITURKE -- "≥ 15" --> CallTKSORC[Call TKSORC] DecITURKE -- "< 15" --> CallTSHEAR[Call TSHEAR] CallTSHEAR --> CallTKENER[Call TKENER] CallTKENER --> CallSOLVEN[Call SOLVEN] CallSOLVEN --> Return([RETURN]) CallTKSORC --> Return </pre>	TURKT RMU	A A

2. 主要参照変数/定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
TURK	A	R	乱流運動エネルギーk
ITURKE	C	R	乱流モデル選択フラグ
TURKT	A	D	乱流運動エネルギー前iteration値
RMU	A	D	粘性率

【場所】A: argument, C: common, B: block data, L: local 【種類】R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	TSHEAR
----------	--------

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
VELBN MIM, MIP, MJM, MJP, MKM, MKP AREA DYO DZO UL, VL, WL ALX CS DH TURVIS	A A A A A A A A L L A	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">ITURKE < 15 の時, k の生成項を計算する。</div> -x 面について <Regular boundarg> $U1 = VELBN(-MIM(MO))$ $ALX = AREA(-MIM(MO)) / (DYO + DZO)$ <Internal face> $U1 = UL(MIM(MO))$ $ALX1 = ALX(MIM(MO))$ <Face absent> $U1 = 0.0$ $ALX1 = 0.0$ $PSHEAR = CS * EFFVO * 0.25 * (UO^2 + VO^2 + WO^2) / DH^2$ $SCHL(MO) = PSHEAR$ ここで, $UO = 0.5(U1 + U2)$ $EFFVO = TURVIS(MO)$ +x, -Y, +Y, -Z, +Z 面についても同様に計算される。	SCHL	A

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
VELBN	A	R	セル表面上の法線方向流速
AREA	A	R	セル断面積
DYO	A	R	DY(I)
DZO	A	R	DZ(K)
UL, VL, WL	A	R	セル流速
ALX	A	R	Surface Pernieability
CS	L	R	= 2.0
DH	L	R	水力等価直径
TURVIS	A	R	乱流粘性係数
SCHL	A	D	k生成量

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
UL, VL, WL	A	ITURKE ≥ 15 の時, k の生成項を計算する。	SCHL	A
DX, DY, DZ	A	<x face について>		
TL	A	UAV = 0.5 (UL(MO) + UL(M1))		
XO	L	DUDX = (UL(MO) - UL(M1)) / DX(I)		
P	A	VAV1 = 0.5 (VL(M2) + VL(M23))		
PSTATO	A	VAV2 = 0.5 (VL(M1) + VL(M13))		
DRODHL		DVDX = (VAV1 - VAV2) / DX(I)		
CPLIQ		WAV1 = 0.5 (WL(M2) - WL(M25))		
TURVIS	A	WAV2 = 0.5 (WL(M1) - WL(M15))		
PRNDLH	A	DWDX = (WAV1 - WAV2) / DX(I)		
GRAVX, GRAVY, GRAVZ, RL	A	DTDX = (TL(M2) - TL(M1)) / DX(I) y, z 面も同様に算される。		
	A	$SCHL(MO) = \{ 20 * (DUDX^2 + DVDX^2 + DWDX^2) + (DUDY + DVDY)^2 + (DWDY + DVDZ)^2 + (DWDX + DUDZ)^2 \} * TURVIS$		
		<p><u>IF Cylindrical</u></p> $TERM1 = UAV^2 / XO^2$ $TERM2 = 20 * UAV * DVDY / XO$ $TERM3 = -VAV * (DUDY + DVDX) / XO$ $TERM4 = VAV^2 / XO^2$ $SCHL = SCHL + 20 * (TERM1 + TERM2 + TERM3) + TERM4$		
		<p><u>IF IFENER=1 or 2</u></p> $PTOT = P(MO) + PSTATO(MO)$ $DRODT = DRODHL + CPLIQ$ $DIFC = TURVIS(MO) / PRNDLH$ $SCHL = SCHL - DRODT * DIFC * (DTDY * GRAVX + DTDZ * GRAVZ) / RL(MO)$		

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
UL, VL, WL	A	R	セル流速
DX, DY, DZ	A	R	メッシュ幅
TL	A	R	流体温度
XO	L	R	原点からメッシュ I までの距離
P	A	R	圧力
PSTATO	A	R	静圧
TURVIS	A	R	乱流粘性係数
PRNDLH	A	R	乱流プラントル数 (0.3)
GRAVX, GRAVY, GRAVZ	A	R	加速度
RL	A	R	流体密度
SCHL	A	D	k 生成量

【場所】 A: argument, C: common, B: block data, L: local 【種類】 R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)	
RLT	A	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> k-ε modelのうち、乱流運動エネルギーkについての係数(ATO, BTO, AT1~AT6)を計算する。 </div> <-x face>について i) internal face ii) Regular boundary RL1=RLT(MO) AREAX1=AREA(-M1) AREAX1=ALX(M1)*AXO UL1=VELBN(-M1) FH1L=AREAX1*UL(M1)*RL1 FH1L=AREAX1*UL1*RLB(-M1) DIFTH1=DIFFH(M1) DH1L=00 XK1=0.5(DX(I)*DIFTH1+DX(I-1)*DIFTHO) IF(KFLOW, EQ, 1, AND, VELBN, EQ, 0, 0) COND1=DIFTHO*DIFTH1/XK1 Call WLFNCK DH1L=AREAX1*COND1 iii) Face absent FH1L=00 DH1L=00 +x, -y, +y, -z, +z面についても同様な処理を行なう。 QSOURC=QSOURC+SCHL(MO) AHOLD=RL(MO)*VCELLO/DTIME AT1(MO)=AMAX1(00, FH1L)+DH1L AT2(MO)=AMAX1(00, -FH2L)+DH2L AT3(MO)=AMAX1(00, FH3L)+DH3L AT4(MO)=AMAX1(00, -FH4L)+DH4L AT5(MO)=AMAX1(00, FH5L)+DH5L AT6(MO)=AMAX1(00, -FH6L)+DH6L AT0=AT1+AT2+AT3+AT4+AT5+AT6+AHOLD-SPLMO*VCELLO SCHLV=QSOURC*VCELLO BTO=SCHLV+AHOLD*TURK BTO=BTO+(1.0-OMEGAK)*ATO*TURKT/OHEGAK ATO=ATO/OMEGAK	AT1~AT6	A	
ALX	A		ATO, BTO	A	
AXO	L				
UL, VL, WL	A				
DIFFH	A				
DX, DY, DZ	A				
SCHL	A				
RL	A				
VCELLO	L				
DTIME	A				
SPLMO	L				
TURK	A				
TURKT	A				
OMEGAK	A				

2. 主要参照変数/定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
RLT			流体密度
ALX	A	R	Surface Permeability
AXO	L	R	DY(J)*DZ(K)
UL, VL, WL	A	R	セル流速
DIFFH	A	R	$\mu_t + \mu$
DX, DY, DZ	A	R	メッシュ幅
SCHL	A	R	k生成量
RL	A	R	流体密度
VCELLO	L	R	セル体積 (AL * DX * DY * DZ)
DTIME	A	R	時間ステップ
SPLMO	L	R	k散逸率
TURK	A	R	乱流運動エネルギー-k
TURKT	A	R	乱流運動エネルギー-k前 iteration 値
OMEGAK	A	R	Under Relaxation Factor
AT1~AT6	A	D	$ATO \cdot TURK = \sum_{\ell=1}^6 AT_{\ell} \cdot TURK_{\ell} + BTO \text{ の係数}$
ATO, BTO			

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	SOLVEN
----------	--------

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
V(MO) ATO(MO) BTO(MO) AT1~AT6 V,VB OMEGA HCONV	A A A A A A A	<p>任意変数Vと境界値VBに関し, $AO \cdot VO - \sum_{l=1}^6 A_l \cdot V_l - BO = 0$ の連立1次方程式をSOR法で解く。</p> <pre> IT=0 100 CONTINUE IT=IT+1 VOLD=V(MO) AV0=ATO(MO)*VOLD B0=BTO(MO) A1=AT1(MO) A6=AT6(MO) Internal Boundary Absent AV6=A6*V(M6) AV6=A6*VB(-M6) AV6=0.0 DL=AV0-AV1-AV2-AV3-AV4-AV5-AV6-B0 DV=-OMEGA*DL/AO VNEW=VOLD+DV V(MO)=VNEW IF(ABS(DHMAX),LE,HCONV)GOTO540 IF(IT,LT,ITMAX) GOTO 100 540 CONTINUE RETURN </pre>	V(MO)	A

2. 主要参照変数/定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
V(MO)	A	R, D	連立方程式の根 } S.P. TKENER参照
ATO(MO)	A	R	
BTO(MO)	A	R	
AT1~AT6	A	R	TKLOOPで呼ばれるケースではV=TURK, TELOOPで呼ばれるケースではV=TURE
V, VB	A	R	
OMEGA	A	R	Relaxation Factor
HCONV	A	R	EPSI5, = 10 ⁻⁵

(場所) A: argument, C: common, B: block data, L: local (種類) R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	WLFNCK
----------	--------

参照変数 (R)	場所 (AOB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (AOB)
AKAPPA DX(I) RL(MO) CDQTR V1(MO), V2(MO) CMU EE	A A A A A L A	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> S. P. TKENERより (KFLOW. EQ. 1. AND. VELBN. EQ. 0.0) の場合に Call され, 境界隣接セルの乱流運動エネルギー k を設定する。 </div> $TURK(MO) = TAU / (RL(MO) * SQRT(CMU))$ ここで, $TAU = AKAPPA * TERM * URES / DENOM$ $DENOM = ALOG(EE * YP * TERM / RMU)$ $YP = 0.5 * DX(I)$ $TERM = RL(MO) * CDQTR * SQRT(TURK(MO))$ $URES = SQRT(V1AV * V1AV + V2AV * V2AV)$ $V1AV = 0.5 (V1(MO) + V1(MO))$ $V2AV = 0.5 (V2(MO) + V2(MO))$	TURK(MO)	A

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
AKAPPA	A	R	カルマン定数, = 0.4
DX(I)	A	R	メッシュ幅
RL(MO)	A	R	流体密度
CDQTR	A	R	定数, = 0.09
V1(MO), V2(MO)	A	R	セル流速
CMU	L	R	定数, = 0.09
TURK(MO)	A	D	乱流運動エネルギー k
EE	A	R	定数, = 9.0

【場所】A: argument, C: common, B: block data, L: local 【種類】R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	TELOOP
----------	--------

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACH)
TURE ITURKE	A A	<p>k -- ε 乱流モデルのうち、乱流運動エネルギー散逸率 ε 計算のための Control 部である。</p> <pre> graph TD Start([S.P. START]) --> SetVisc[粘性率設定 (RMU)] SetVisc --> AssignTure[TURET(MO)=TURE(MO)] AssignTure --> DecisionITurke{ITURKE} DecisionITurke -- Yes --> CallEShear[Call ESHEAR] DecisionITurke -- No --> CallTESORC[Call TESORC] CallEShear --> CallTEENER[Call TEENER] CallTESORC --> CallTEENER CallTEENER --> CallSOLVEN[Call SOLVEN] CallSOLVEN --> Return([RETURN]) </pre>	TURKT RMU	A A

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
TURE	A	R	乱流運動エネルギー散逸率 ε
ITURKE	C	R	乱流モデル選択フラグ
TURET	A	D	乱流運動エネルギー散逸率前 iteration 値
RMU	A	D	粘性率

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

サブプログラム名	ESHEAR
----------	--------

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
VELBN MIM, MIP, MJM, MJP, MKM, MKP AREA DYO DZO UL, VL, WL ALX CS DH TURVIS C1E	A A A A A A A A L L A A	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 10px;">ITURKE < 15 の時, ε の生成項を計算する。</div> <p>-x 面について</p> <p>< Regular boundary > $U1 = VELBN(-MIM(MO))$ $ALX = AREA(-MIM(MO)) / (DYO + DZO)$</p> <p>< Internal face > $U1 = UL(MIM(MO))$ $ALX1 = ALX(MIM(MO))$</p> <p>< Face absent > $U1 = 0.0$ $ALX1 = 0.0$</p> <p>$PSHEAR = CS * EFFVO * 0.25 * (UO^2 + VO^2 + WO^2) / DH^2$ $SCHL(MO) = PSHEAR * C1E * TURE / TURK$</p> <p>ここで, $UO = 0.5 (U1 + U2)$ $EFFVO = TURVIS(MO)$</p> <p>+x, -Y, +Y, -Z, +Z 面についても同様に計算される。</p>	SCHL	A

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
VELBN	A	R	セル表面上の法線方向流速
AREA	A	R	セル断面積
DYO	A	R	DY(I)
DZO	A	R	DZ(K)
UL, VL, WL	A	R	セル流速
ALX	A	R	Surface permeability
CS	L	R	= 2.0
DH	L	R	水力等価直径
TURVIS	A	R	乱流粘性係数
SCHL	A	D	ε 生成量
C1E	A	R	比例定数

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local (種類) R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

サブプログラム名	TESORC
----------	--------

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
UL, VL, WL DX, DY, DZ TL XO P PSTATO DRODHL CPLIQ TURVIS PRNDLH GRAVX, GRAVY, GRAVZ, RL	A A A L A A A A A A A A A A A A A A A	<p>ITURKE ≥ 15 の時, ε の生成項を計算する。 < x face について > UAV = 0.5 (UL(M0) + UL(M1)) DUDX = (UL(M0) - UL(M1)) / DX(I) VAV1 = 0.5 (VL(M2) + VL(M23)) VAV2 = 0.5 (VL(M1) + VL(M13)) DVDX = (VAV1 - VAV2) / DX(I) WAV1 = 0.5 (WL(M2) - WL(M25)) WAV2 = 0.5 (WL(M1) - WL(M15)) DWDX = (WAV1 - WAV2) / DX(I) DTDX = (TL(M2) - TL(M1)) / DX(I)</p> <p>y, z 面も同様に計算される。 $SCHL(M0) = \{ 20 * (DUDX^2 + DVDX^2 + DWDX^2) + (DUDY + DVDX)^2 + (DWDY + DVDZ)^2 + (DWDX + DUDZ)^2 \} * TURVIS * C1E * TURE / TURK$</p> <p><u>IF Cylindrical</u> TERM1 = UAV² / XO TERM2 = 20 * UAV * DVDY / XO TERM3 = VAV * (DUDY + DVDX) / XO TERM4 = VAV² / XO² SCHL = SCHL + 20 * (TERM1 + TERM2 + TERM3) + TERM4</p> <p><u>IF IFENER = 1 or 2</u> PTOT = P(M0) + PSTATO(M0) DRODT = DRODHL + CPLIQ DIFC = TURVIS(M0) / PRNDLH SCHL = SCHL - DRODT * DIFC * (DTDY * GRAVX + DTDZ * GRAVZ) / RL(M0) SCHL = SCHL * C3E * TURE / TURK</p>	SCHL	A

2. 主要参照変数 / 定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
UL, VL, WL	A	R	セル流速
DX, DY, DZ	A	R	メッシュ幅
TL	A	R	流体温度
XO	L	R	原点からメッシュ I までの距離
P	A	R	圧力
PSTATO	A	R	静圧
TURVIS	A	R	乱流粘性係数
PRNDLH	A	R	乱流プラントル数 (0.9)
GRAVX, GRAVY, GRAVZ	A	R	加速度
RL	A	R	流体密度
SCHL	A	D	ε 生成量

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

1. 主要参照変数と実行内容および定義変数

参照変数 (R)	場所 (ACB)	実行内容	定義変数 (D)	場所 (ACB)
RLT	A	k-ε modelのうち、乱流運動エネルギー散逸率εについての係数 (ATO, BTO, AT1~AT6)を計算する。	AT1~AT6	A
RLX	A			ATO, BTO
AXO	L	<-x face>について		
UL, VL, WL	A	i) internal face	ii) Regular boundary	
DIFFH	A	RL1=RLT(MO)	AREAX1=AREA(-M1)	
DX, DY, DZ	A	AREAX1=ALX(M1)*AXO	UL1=VELBN(-M1)	
SCHL	A	FH1L=AREAX1*UL(M1)*RL1	FH1L=AREAX1*UL1*RLB(-M1)	
RL	A	DIFTH1=DIFPH(M1)	DH1L=00	
VCELLO	L	XK1=0.5(DX(I)*DIFTH1+DX(I-1)*IFTHO)	IF(KTLOW, EQ, 1, AND, VELBN, EQ, 00)	
DTIME	A	COND1=DIFTHO*DIFTH1/XK1	TURE= $\frac{CDTURE^{3/4} * TURK^{3/2}}{AKAPPA * DX(I)}$	
SPLMO	L	DH1L=AREAX1*COND1		
TURE	A		iii) Face absent	
TURET	A		FH1L=00	
			DH1L=00	
OMEGAK	A	+x, -Y, +Y, -z, +z 面についても同様な処理を行なう。 QSOURC=QSOURC+SCHL(MO) AHOLD=RL(MO)*VCELLO/DTIME AT1(MO)=AMAX1(00, FH1L)+DH1L AT2(MO)=AMAX1(00, -FH2L)+DH2L AT3(MO)=AMAX1(00, FH3L)+DH3L AT4(MO)=AMAX1(00, -FH4L)+DH4L AT5(MO)=AMAX1(00, FH5L)+DH5L AT6(MO)=AMAX1(00, -FH6L)+DH6L ATO=AT1+AT2+AT3+AT4+AT5+AT6+AHOLD-SPLMO*VCELLO SCHLV=QSOURC*VCELLO BTO=SCHLV+AHOLD*TURE BTO=BTO+(1.0-OMEGAK)*ATO*TUR T/OHEGAK ATO=ATO/OMEGAK		

2. 主要参照変数/定義変数の意味

変数	場所 A/L	種類 R/D	意味
RLT			流体密度
ALX	A	R	Surface Permeability
AXO	L	R	DY(J)*DZ(K)
UL, VL, WL	A	R	セル流速
DIFFH	A	R	μt + μ
DX, DY, DZ	A	R	メッシュ幅
SCHL	A	R	ε生成量
RL	A	R	流体密度
VCELLO	L	R	セル体積 (AL*DX*DY*DZ)
DTIME	A	R	時間ステップ
SPLMO	L	R	ε散逸率 (=C2E*RL*TURE/TURK)
TURE	A	R	乱流運動エネルギー散逸率ε
TURET	A	R	乱流運動エネルギー散逸率ε前 iteration 値
OMEGAK	A	R	Under Relaxation Factor
AT1~AT6	A	D	ATO * TURK = $\sum_{i=1}^6 AT_i \cdot TURE_i + BTO$ の係数
BTO, BTO			

[場所] A: argument, C: common, B: block data, L: local [種類] R: reference, D: definition

