

# 単相多次元コードAQUAによる配管内の流れ解析

1996年9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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, 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)1996

## 単相多次元コード AQUA による配管内流れ解析

土井 禎浩\*、村松 寿晴\*

### 要 旨

配管内の流れは、様々な伝熱流動の中で最も基本的なものの一つであり、層流から乱流までの広い範囲で様々な実験や解析が行われて来ている。しかしながら、実際のプラントで見られる配管には、断面積変化や曲り、分岐あるいは合流等が存在する。このため、個々に実験され、評価された解析手法を実際の配管の評価に適用するには、計算格子や計算時間等の解析に対する負荷が大きく、その評価は実験式に依存している場合が少なくない。

本報告は、単相多次元コード AQUA により実際の配管設計で見られる形状を模擬した解析を行い、同コードの配管内流れへの適用性を検討したものである。解析対象として、配管中に置かれた円柱に対する抗力、曲り管で生じる二次流れ、および縮流の円柱抗力に対する影響を取り上げ、既往研究との比較により AQUA による解析結果を評価した。

配管中に置かれた円柱に対する抗力の計算では、流れに垂直に置かれた円柱の抗力を AQUA の圧力分布から求め、抗力係数を用いた計算式により求められる抗力と比較した。その結果、円柱の摩擦抗力が小さく、円柱の後流領域の乱れが小さいような場合には、計算式から得られる抗力と AQUA による結果は良い一致を示すことがわかった。曲り管を対象とした解析では、3回の曲りを有する配管について二次流れの主流に及ぼす範囲を AQUA により解析した。その結果、曲り管から  $30d$  ( $d$ :管内径) の位置における二次流れの流速の主流流速に対する比は約 4% と小さく、同位置では二次流れの影響はほとんど見られなかった。また、縮流の計算では、容器底部に接続された配管内の流速分布と縮流が円柱抗力に及ぼす影響を検討した。容器と配管の直径の比が約 0.2 の本解析結果では、容器と配管の接続部から  $2d$  ( $d$ :管内径) の位置で縮流の影響は小さかった。

---

\* 大洗工学センター 基盤技術開発部 熱流体技術開発室

## Applicability of AQUA code to industrial piping flows

Yoshihiro Doi\*, Toshiharu Muramatsu\*

### Abstract

Fluid flow in circular tube is the most frequently encountered in engineering fields related to thermal hydraulics. The fluid flow in straight tube has been investigated with many experiments and analyses in laminar and turbulence conditions with sufficient accuracy. In the design of plant piping, there are many contract and enlargement of flow area as well as elbows and junctions. Such a complexity of industrial piping requires fine mesh and long simulation time for the analyses of the flow.

To evaluate the applicability of the AQUA code for flow analyses in an industrial piping, analyses for convection around submerged a cylinder, secondary flow with elbows and flow in a sudden contract were carried out. With the analysis of flow field around a submerged cylinder, drag force acting on the cylinder was evaluated from the numerical simulation with AQUA code. The drag force was agreed with the results using equation of drag coefficient depends on measured data in case of small friction of submerged cylinder and narrow separation region of the cylinder. In the analysis of the secondary flow with three elbows, AQUA code simulates the characteristics of secondary flow. The results showed that the secondary flow almost disappeared at point at  $30d$  ( $d$ ; diameter of pipe) distance from the elbow. The flow in a sudden contract was simulated. Ratio of the cross sectional area for pipe to the area for vessel is 0.2. In this case, effect of the contract to velocity distribution is small at the position that from inlet of the pipe to two times of the diameter in the downstream.

---

\* Thermalhydraulic Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

## 目 次

第1章 緒 言	1
第2章 配管中の円柱が受ける抗力	2
2.1 目的	2
2.2 解析条件	2
2.3 解析結果	3
2.4 考察	3
第3章 曲がり管内二次流れ	5
3.1 目的	5
3.2 解析条件	5
3.3 解析結果	6
3.4 考察	7
第4章 縮流の円柱抗力に対する影響	8
4.1 目的	8
4.2 解析条件	8
4.3 解析結果	9
4.4 考察	9
第5章 結 言	11
謝 辞	12
参考文献	13
付録 解析用入力データ	39

## 表リスト

表 2.1 解析ケース 1 の AQUA による結果 ( $Re = 69000$ )	14
表 2.2 解析ケース 2 の AQUA による結果 ( $Re = 172000$ )	14
表 2.3 種々の物体の抗力係数 $C_D$	15
表 2.4 式(2.4)による抗力 ( $C_D = 0.9$ )	16
表 3.1 二次流れの主流速度に対する比率 (解析ケース 1)	17
表 4.1 解析ケース 1 の AQUA による結果	18
表 4.2 解析ケース 2 の AQUA による結果	19

## 図リスト

図 2.1 解析メッシュ図	20
図 2.2 速度ベクトル図 (解析ケース 1)	21
図 2.3 速度ベクトル図 (解析ケース 2)	23
図 3.1 解析メッシュ図	25
図 3.2 垂直断面内速度ベクトル図	26
図 3.3 水平断面内速度ベクトル図	27
図 3.4 長手方向垂直断面内速度ベクトル図	28
図 3.5 二次流れの主流速度に対する比率 (解析ケース 1)	29
図 3.6 差分法による流速の相違	30
図 3.7 壁面条件による流速の相違	31
図 3.8 二次流れの強さ	32
図 4.1 解析メッシュ図	33
図 4.2 胴部、配管部速度ベクトル図 (解析ケース 1)	34
図 4.3 出口配管内の軸方向速度分布 (解析ケース 1)	35
図 4.4 胴部、配管部速度ベクトル図 (解析ケース 2)	36
図 4.5 出口配管内の軸方向速度分布 (解析ケース 2)	37
図 4.6 円柱に対する接近流速分布	38

## 第1章 緒 言

配管内の流れは、様々な伝熱流動の中で最も基本的なものの一つであり、層流から乱流の広い範囲で様々な実験や解析が実施されて来ている<sup>(1)</sup>。配管内の流れに関する数値解析は、層流について十分な精度が得られるに至っており、乱流に関しても  $k-\epsilon$  モデルや LES (Large Eddy Simulation)<sup>(1)</sup> により乱流現象を精度良く捕らえることが可能になっている。しかしながら、個々に実験され、解析評価された解析手法を実際のプラントで見られる流路に適応するには、流路の断面積変化や曲り、分岐あるいは合流等により計算格子の作成や計算時間等の解析に対する負荷が増加するため、その評価は実験式に依存している場合が少なくない。

本報告は、配管中に置かれた円柱に対する抗力、曲り管で生じる二次流れ、および縮流が円柱抗力に及ぼす影響を单相多次元コード AQUA により解析し、既往研究<sup>(2)(3)(4)</sup>との比較を行い、解析手法のナトリウム配管流れへの適用性を検討するものである。

## 第2章 配管中の円柱が受ける抗力

### 2.1 目的

流路中の流れに直角に置かれた円柱に対する抗力は、一般に実験により得られた抗力係数から求められる。これは円柱に働く力が境界層と乱流により支配されるため、抗力を解析的に精度良く評価するためには、非常に細かいメッシュ分割を必要とし、解析に多くの時間を要するためである。

本章では実用的なメッシュ分割を用いて円柱に対する圧力抗力を AQUA により計算し、解析結果と抗力係数を用いた計算式から得られる効力を比較し、解析手法の適用性を評価する。

### 2.2 解析条件

#### (1) 解析対象

直径 10mm、長さ 185mm の円柱を内径 558mm の円管内に、流れに垂直に設置された流路を解析対象とする。円柱の一端は円管の内壁に固定されている。配管内の流体はナトリウムで温度は一定とする。

#### (2) 解析ケース

円管内の平均流速をパラメータとして、以下の 2 つの解析ケースを設定した。

ケース 1 :  $Re = 69000$

ケース 2 :  $Re = 172000$

本  $Re$  数を計算する場合の代表長さは円柱直径 (10mm) である。

#### (3) 解析メッシュ

図 2.1 に解析メッシュ図を示す。解析範囲は円柱を含む円管の扇形 95 度の範囲とし、軸方向長さは、配管内径の 1.5 倍とした。

#### (4) 数値計算条件

- ・座標 :  $r-\theta-Z$ 、3次元円筒座標系
- ・メッシュ数 :  $15r*19\theta*19Z$  (5415)
- ・差分法 : 一次風上差分法
- ・時間積分法 : SIMPLEST 法
- ・乱流モデル :  $k-\epsilon$  モデル

#### (5) 解析条件

- ① ケース 1 :  $Re = 69000$



温度：486℃

流速：2.01(m/s)で断面内一様分布とする。

②ケース 2： $Re = 172000$

温度：486℃

流速：5.03(m/s)で断面内一様分布とする。

なお、配管内壁の条件は断熱、表面は非スリップ条件とし、円柱については断熱、円柱表面はスリップ条件とした。

### 2.3 解析結果

ケース 1 の  $Re = 69000$  の場合における流速ベクトル図を図 2.2 に、円柱にかかる抗力の計算結果を表 2.1 に示す。また、ケース 2 の  $Re = 172000$  の場合の流速ベクトル図を図 2.3 に、円柱にかかる抗力の計算結果を表 2.2 に示す。円柱にかかる抗力は、円柱の存在するコントロールボリュームの前面側の流体圧力と背面側の流体圧力の差に、流れに垂直な方向に対する面積（コントロールボリュームにおける前面投影面積）を積算し、これを軸方向メッシュに対して積分し求めた。長さ 185mm の円柱が受ける抗力は、ケース 1 の  $Re = 69000$  の場合には約 0.33kg、ケース 2 の  $Re = 172000$  の場合には約 2.02kg であった。

### 2.4 考察

#### (1) 物体に働く抗力

流れに置かれた物体に働く抗力は圧力抗力  $D_p$  と摩擦抗力  $D_F$  に分けられる。圧力抗力  $D_p$  は、

$$D_p = \int_S p \cos \theta dS \quad (2.1)$$

と表される<sup>(2)</sup>。ここに  $p$ ：圧力、 $\theta$ ：物体表面の微小面積  $dS$  に立てた法線と一様流速  $V$  の方向とのなす角度である。従って、ある微小面にかかる一様な方向の圧力による力は  $p \cos \theta dS$  であり、これを全表面について積分したものが(2.1)式である。

また、摩擦抗力  $D_F$  は、

$$D_F = \int_S \tau_w \sin \theta dS \quad (2.2)$$

で、 $\tau_w$  は摩擦応力である。流れに置かれた物体が受ける抗力  $D$  は、

$$D = D_p + D_F \quad (2.3)$$

である。

一方、抗力係数  $C_D$  を用いて計算される抗力  $D$  は、

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S \quad (2.4)$$

と表わされる<sup>(2)</sup>。ここに  $D$ :抗力[N]、 $C_D$ :抗力係数[-]、 $\rho$ :密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $V$ :流速[m/s]、 $S$ :前面投影面積[m<sup>2</sup>]である。

参考文献(2)に記載されている有限円柱に対する抗力係数を表 2.3 に示す。本解析の円

柱の直径と長さの比は 18.5 (185mm/10mm) であり、同表から求められる  $C_D$  値は約 0.9 である。

## (2) 解析結果と計算式による結果の比較

表 2.4 にケース 1 およびケース 2 の流速に対して  $C_D=0.9$  の時の円柱にかかる抗力をそれぞれ示す。(2.4)式による抗力は、ケース 1 の場合 0.35kg、ケース 2 の場合 2.18kg となる。AQUA による解析結果は、(2.4)式による計算結果よりも約 6~7%小さいが、比較的良い一致を示していると考えられる。

AQUA による解析では 1 メッシュに円柱をモデル化しているため、計算上は角柱であり、流れに直角な方向の面が受ける抗力は 0 である。従って、円柱を規定したコントロールボリュームの前後における流体の圧力が正しく計算されれば圧力抗力が求められる。本解析では  $Re$  数が大きく剥離点が円柱後方に移動するため、大きな後流領域が形成されず、AQUA により円柱前面と背面の圧力が解析的に求められ、(2.4)式による結果と AQUA による解析結果で円柱抗力は良い一致を示したものと考えられる。また、AQUA による解析では円柱表面をスリップ条件としているため摩擦抗力は考慮されないが、実際の流れにおいても円柱や角柱では摩擦抗力の全抗力に占める割合は約 10%以下と小さい。

以上から、物体の後流領域が小さく、摩擦抗力が小さい形状の場合には、AQUA により抗力を評価できると考えられる。本解析では広範な  $Re$  に対する検討を行っていないため本手法の適用範囲を定量的に示すことは困難である。しかしながら、抗力係数が 1~1.2 のほぼ一定値を示す  $Re=10^3\sim 2\times 10^5$  の範囲においては本手法の適用が可能であると推定される。

## 第3章 曲がり管内二次流れ

### 3.1 目的

実際に用いられる配管では断面積変化や曲がりがあり、流速分布を精度良く求めることは困難である。特に配管に複数の曲りが存在するような解析の場合には、曲りの方向が同一面内にないと三次元で複雑な格子生成が必要になる。

本章では3回の曲りを有する配管に対する二次流れをAQUAの直交座標系により解析し、二次流れが主流方向におよぶ範囲を評価する。

### 3.2 解析条件

#### (1) 解析対象

内径540mm、全長23.5mの円管に3回の90°曲りが存在する場合の配管内速度分布を解析対象とする。

#### (2) 解析ケース

流体はナトリウムであり、その温度は505℃、流速は4.97(m/s)で断面内一様分布とする。この時の $Re$ 数は代表長さを円管内径として $Re = 9.17E6$ である。配管内壁の条件は断熱、非スリップ条件またはスリップ条件とした。また、差分法の二次流れへの影響を評価するため1次風上差分法と高次差分法を用いた。解析ケースを以下に示す。

解析ケース	差分法	壁面条件
1	1次風上差分法	非スリップ
2	高次差分法	非スリップ
3	高次差分法	スリップ

#### (3) 解析メッシュ

図3.1に解析メッシュ図を示す。解析メッシュは配管の立ち上がりからx-z平面内で曲る第1エルボ、x-y平面内で曲る第2、第3エルボおよび直管部を想定して作成された。

#### (4) 数値計算条件

- ・座標 : X-Y-Z、3次元直交座標系
- ・メッシュ数 : I:46\*J:363\*K:60
- ・差分法 : 一次風上差分法、高次差分法
- ・時間積分法 : SIMPLEST法
- ・乱流モデル : k-εモデル

### 3.3 解析結果

#### (1) 速度分布

解析ケース1のAQUAによる解析結果の速度ベクトル図を図3.2、3.3および3.4に、2次流れの主流速度に対する比率を表3.1および図3.5にそれぞれ示す。図3.5の2次流れの主流速度に対する比率 $\beta$ は、配管断面内における二次流れ成分の最大値と主流方向の速度成分の最大値の比である。すなわち、 $x$ - $z$ 平面内では、二次流れは流速 $U$ および $W$ で表され、主流流速は流速 $V$ であるから $\beta$ は $U/V$ と $W/V$ の内大きい方の値を示している。

配管の垂直断面内における速度ベクトル図を図3.2に示す。第1エルボにより配管の垂直断面内に生じる二次流れは、第2エルボで主流方向に対して時計周りの流れとなる。第2エルボ終端(J=11)の二次流れの最大流速は約6 m/sで、主流速度とほぼ同じ大きさであった。第2エルボから第3エルボへ向かう過程において時計周りの二次流れの流速は次第に小さくなっている。

配管の水平断面内における速度ベクトル図を図3.3に示す。第2エルボからの距離が約 $10d$  ( $d$ :配管内径)の約5000mm付近では流れの偏りが見られる。第2エルボからの距離が約 $20d$ の約11000mm付近では、二次流れの主流速度に対する比率は約10%となり、直管流れの状態に移行しており、主流方向の速度分布に大きな偏りは見られなかった。この傾向は図3.4に示す長手方向の垂直断面内速度ベクトル図においても同様である。第3エルボ近傍では再び流れが曲げられるため二次流れを生じ、二次流れの主流速度に対する比率は大きくなるものと考えられる。第3エルボから流入口側に向かって1100mmの位置における二次流れの主流速度に対する比率は約4%と小さく、直管流れの状態に近かった。

#### (2) 計算条件による相違

##### ① 差分法による相違

図3.6に解析ケース1と解析ケース2の流速( $U$ 、 $V$ 、 $W$ )と二次流れの主流速度に対する比率 $\beta$ の比較を示す。高次差分法を用いた解析ケース2では、第2エルボの付近で二次流れが大きくなるとともに、主流速度の最大値も解析ケース1の1次風上差分法の場合に比べて大きくなっている。しかしながら、二次流れの最大流速と主流の最大流速の比である $\beta$ は、解析ケース1の1次風上差分法を用いた場合と解析ケース2の高次差分法を用いた場合でほとんど差が見られなかった。

##### ② 壁面条件による相違

図3.7に解析ケース2と解析ケース3の流速( $U$ 、 $V$ 、 $W$ )と二次流れの主流速度に対する比率 $\beta$ の比較を示す。壁面にスリップ条件を用いた解析ケース3では、二次流れ、主流速度の最大値とも第2エルボからの距離が約1000mmから4000mmの範囲で

わずかに大きくなっている点を除いて解析ケース2の壁面に非スリップ条件を用いた場合とで大きな差異は見られない。このため2次流れの最大流速と主流の最大流速の比である $\beta$ は、非スリップ条件を用いた場合とスリップ条件を用いた場合ではほぼ同じとなった。

### 3.4 考察

曲り管の管壁上の圧力分布は、二次流れのために同一にならず、内、外壁で大きく異なり、曲り管の下流部に向かうに従い、徐々に一様流れの状態に移行している。管軸方向の圧力降下状態が直管の場合と同一になるには $90^\circ$ 曲り管で下流約 $50d$  ( $d$ :管内径)の長さが必要であると考えられている<sup>(2)</sup>。AQUAによる解析結果から、第2エルボから第3エルボまでの二次流れの主流流速に対する比率 $\beta$ は、第2エルボから約 $30d$  (約15000mm)の位置で約4%と小さく、二次流れはさらに減少する傾向を示した。

図3.8は90度ベンドを有する正方形断面のダクトと円管について二次流れが主流方向に及ぶ範囲を実験<sup>(3),(4)</sup>により調べたものである。図中の $I_s$ は、

$$\text{ダクトの場合、} I_s = \frac{2}{W_m^2 d^2} \int_{-d/2}^0 \int_{-d/2}^{d/2} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2) dx dy、$$

$$\text{円管の場合、} I_s = \frac{8}{\pi d^2 W_a^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^0 (\bar{U}^2 + \bar{V}^2) r dr d\theta \text{ であり、それぞれ二次流れの大き}$$

さを表している。ここに各変数は、 $W$ :断面平均速度、 $d$ :管内径(ダクトの場合には水力等価直径) $\bar{U}, \bar{V}$ :時間平均速度である。図3.8よりベンドによる二次流れが主流方向に及ぶ範囲はダクトと円管で大きな相違はなく約 $10d$ である。図3.5の本解析による二次流れの主流に対する比率 $\beta$ は約 $10d$  (5400mm)の位置で約15%であり、約 $20d$ の位置まで二次流れが見られた。実験結果と解析結果では $Re$ 数が異なるために定量的な比較はできないが、定性的には本解析により二次流れが主流方向に及ぶ範囲とその範囲が下流方向に向かって減衰する傾向を模擬できていると考えられる。

以上より、曲り管による二次流れが主流に及ぶ範囲をAQUAにより直交座標系を用いて評価できると考えられ、本解析で用いたメッシュ分割の場合には、差分法や壁面の条件による結果の差異は小さいことがわかった。また、曲り管から $30d$  ( $d$ :管内径)の位置における二次流れと主流部の速度比は約4%と小さかった。

## 第4章 縮流の円柱抗力に対する影響

### 4.1 目的

円柱に対する抗力の計算を「第2章 配管中の円柱が受ける抗力」で行い、配管の断面積変化や曲りがある場合について、配管の曲りを「第3章 曲り管内二次流れ」で解析した。

本章では断面積変化がある場合の解析として、AQUAにより縮流を解析する。また、縮流により円柱抗力が受ける影響について検討を行う。

### 4.2 解析条件

#### (1) 解析対象

二種類の円筒容器(胴内径 3050mm と 2950mm) 底部に設けられた出口配管(内径 540mm) と出口配管部に設置された直径 22mm の円柱を解析対象とする。

#### (2) 解析ケース

解析は2つの胴内径を有する容器に、それぞれ温度の異なるナトリウムが流れている場合を想定した。それぞれの容器内のナトリウム温度および容器内の流速は以下のとおりである。

容器内ナトリウム温度：胴内径 3050 mm；469℃

胴内径 2950 mm；325℃

容器内平均流速：胴内径 3050 mm；0.156(m/s)

胴内径 2950 mm；0.166(m/s)

この時の配管内の平均流速はいずれの胴内径においても 4.97m/s とする<sup>1</sup>。内径 3050mm の容器の配管部には1本の円柱を、内径 2950mm の容器の配管部には2本の円柱をそれぞれ想定した。容器胴および配管内壁の条件は断熱、非スリップ条件である。解析ケースを以下に示す。

解析ケース	胴内径(mm)	保護管本数(本)	定常/非定常
1	3050	1	定常
2	2950	2	定常

#### (3) 解析メッシュ

図 4.1 に解析メッシュ図を示す。解析範囲は容器胴部については配管接続部より高さ 1500mm の範囲とし、配管長は 1760mm とする。解析ケース 1 では配管接続部から 1000mm の位置に円柱 1 本をモデル化し、解析ケース 2 では配管接続部から 1130mm、1430mm の位

<sup>1</sup> 配管内流速が同一になるように胴側の流速条件を設定した。

置に円柱各1本(計2本)を模擬した。なお、容器胴の鏡板形状および鏡板と配管接続部の接続形状(面取り、テーパ等)は解析には考慮していない。

#### (4) 数値計算条件

- ・座標 :  $r-\theta-z$ 、3次元円筒座標系 1/4 セクタモデル
- ・メッシュ数 : I:30\*J:19\*K:54
- ・差分法 : 1次風上差分法
- ・時間積分法 : SIMPLEST 法
- ・乱流モデル :  $k-\epsilon$  モデル

### 4.3 解析結果

#### (1) 解析ケース1

解析ケース1の場合の速度ベクトル図を図4.2に示す。また、図4.3に配管内の軸方向速度分布および軸方向速度の変化を示す。配管接続部から軸方向約600mmまでは配管壁近傍で渦を生じ(図4.2参照)、配管壁近傍の軸方向流速の低下が見られた(図4.3参照)。しかしながら、この流速低下は円柱の設置される流入部から $2d$ ( $d$ は配管内径)の約1000mmの位置では見られなかった。

#### (2) 解析ケース2

解析ケース2の場合の速度ベクトル図を図4.4に示す。また、図4.5に配管内の軸方向速度分布および軸方向速度の変化を示す。配管接続部から軸方向約600mmまでは解析ケース1と同様に、配管壁近傍で渦を生じ(図4.4参照)、配管壁近傍の軸方向流速が低下している(図4.5参照)。しかしながら、この流速低下は上流側円柱の設置される配管部から1130mmの位置では見られなかった。

### 4.4 考察

表4.1に解析ケース1の圧力分布計算結果から求められる円柱抗力を示す。解析結果から求められる円柱の抗力は2.62kg(25.7N)であった。第2章の(2.4)式から求められる抗力は $C_D$ 値を1.0とした場合、約2.41kg(23.6N)となり、解析結果にほぼ等しかった。このことから、配管接続部から $2d$ の約1000mmの位置においては、縮流が抗力に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

表4.2に解析ケース2の圧力分布計算結果から求められる円柱抗力を示す。2本ある円柱に対する抗力は、上流側で約2.70kg(26.4N)であった。(2.4)式において $C_D$ 値1.0として求められる抗力は約2.51kg(24.6N)であり、解析ケース1と同様に解析結果とほぼ同じであった。このことから、縮流の抗力への影響は小さいものと推定される。

一方、下流側の円柱では、上流側の保護管により流況が変化し、その接近流速が低下す

る。このため、下流側の円柱にかかる抗力は約 1.17kg (11.5N) となった。これは上流側の円柱にかかる抗力の約 43%である。図 4.6 の軸方向位置による軸方向流速分布から上流側円柱 (位置 1000mm) への接近流速と下流側円柱 (位置 1321mm) への接近流速を比較すると、下流側円柱への接近流速は、上流側円柱への接近流速の約 70%となっている。すなわち、下流側の円柱への接近流速は、上流側の円柱への接近流速の約 0.7 倍であり、抗力が流速の 2 乗に比例するため、下流側円柱の抗力は速度比の 2 乗である約 0.5 倍になっているものと考えられる。

以上から縮流による配管内流速分布を AQUA により解析的に評価することができ、容器と配管の直径の比が約 0.2 の場合には、容器と配管の接続部から  $2d$  ( $d$ :管内径) の位置では、縮流の影響は小さいと考えられる。



## 第5章 結 言

ナトリウム配管に対し、配管中に置かれた円柱に対する抗力、曲り管で生じる二次流れ、および縮流が円柱抗力に及ぼす影響を单相多次元コードAQUAにより解析し、解析手法の適用性を検討した。本検討により以下の成果が得られた。

### (1) 配管中に置かれた円柱に対する抗力

流体中に置かれた物体の抗力は、摩擦抗力が小さく、物体の後流領域が小さいような場合には実験的に求められる抗力<sup>(2)</sup>と良く一致し、AQUAにより解析的に評価できると考えられる。

### (2) 曲り管で生じる二次流れ

解析結果は曲り管による二次流れが主流に及ぼす範囲と二次流れの減衰傾向を測定結果<sup>(4)(5)</sup>と比して定性的に模擬しており、AQUAにより直交座標系を用いて曲り管内で生じる二次流れを評価できると考えられる。本解析で用いたメッシュ分割の場合には、差分法や壁面の条件による結果の差異は見られず、また、曲り管から $30d$  ( $d$ :管内径)の位置における二次流れと主流部の速度比は約4%と小さいかった。

### (3) 縮流が円柱抗力に及ぼす影響

縮流の下流側における円柱抗力は解析結果と実験的に求められる抗力<sup>(2)</sup>で良く一致し、縮流部の配管内流速分布をAQUAにより解析的に求められると考えられる。容器と配管の直径の比が約0.2の場合には、容器と配管の接続部から $2d$  ( $d$ :管内径)の位置では、縮流の影響は小さかった。

## 謝 辞

本解析の実施にあたり、解析対象機器に関して御教示頂いた動力炉開発本部 大滝 明 副主任研究員に感謝致します。また、解析作業の実施にあたり、AQUA コードによる計算の実行および計算結果の図形処理に関し協力して頂いた(株)CSK 松本 英一氏に感謝致します。

### 参考文献

- (1) 巽 友正 編、乱流現象の科学 その解明と制御、東京大学出版会、1986年2月
- (2) 富田 幸雄、水力学 流れ現象の基礎と構造、実教出版（株）、1982年3月
- (3) 須藤 浩三、坂野 則弘、正方形断面を有する  $90^\circ$  ベンド内の乱流、日本機械学会論文集 (B編) 54巻502号、P1319、昭和63年3月
- (4) 須藤 浩三、高見 敏弘、矢野 賢司、円形断面をした  $90^\circ$  ベンド内の乱流、日本機械学会論文集 (B編) 58巻548号、P1015、1992年4月

表 2.1 解析ケース 1 の AQUA による結果 ( $Re = 69000$ )

メッシュ 番号(I=)	長さ (mm)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧力差 (kg/cm <sup>2</sup> )	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 (kg)
		前面	背面				
15	14	1.0456	1.0289	0.0167	22	3.08	0.0514
14	19	1.0454	1.0288	0.0166	22	4.18	0.0694
13	19	1.0451	1.0288	0.0164	10	1.9	0.0311
12	19	1.0447	1.0288	0.0159	10	1.9	0.0303
11	19	1.0441	1.0288	0.0154	10	1.9	0.0292
10	19	1.0435	1.0289	0.0146	10	1.9	0.0278
9	19	1.0428	1.0291	0.0137	10	1.9	0.0260
8	19	1.0420	1.0294	0.0126	10	1.9	0.0239
7	19	1.0411	1.0299	0.0112	10	1.9	0.0213
6	19	1.0397	1.0304	0.0093	10	1.9	0.0117
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)							0.3279

表 2.2 解析ケース 2 の AQUA による結果 ( $Re = 172000$ )

メッシュ 番号(I=)	長さ (mm)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧力差 (kg/cm <sup>2</sup> )	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 (kg)
		前面	背面				
15	14	1.1069	1.0032	0.1037	22	3.08	0.3194
14	19	1.1059	1.0029	0.1030	22	4.18	0.4306
13	19	1.1038	1.0026	0.1012	10	1.9	0.1923
12	19	1.1007	1.0025	0.0982	10	1.9	0.1866
11	19	1.0970	1.0028	0.0942	10	1.9	0.1789
10	19	1.0929	1.0036	0.0893	10	1.9	0.1697
9	19	1.0886	1.0049	0.0836	10	1.9	0.1589
8	19	1.0838	1.0069	0.0769	10	1.9	0.1462
7	19	1.0781	1.0094	0.0687	10	1.9	0.1305
6	19	1.0694	1.0125	0.0569	10	1.9	0.1081
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)							2.0211



表 2.4 式(2.4)による抗力 ( $C_D=0.9$ ) $Re = 69000$ 

区間 (I=)	長さ (mm)	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 $\frac{1}{2}C_D\rho V^2S$ (kg)
15	14	22	3.08	0.0474
14	19	22	4.18	0.0643
13	19	10	1.9	0.0292
12	19	10	1.9	0.0292
11	19	10	1.9	0.0292
10	19	10	1.9	0.0292
9	19	10	1.9	0.0292
8	19	10	1.9	0.0292
7	19	10	1.9	0.0292
6	19	10	1.9	0.0292
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)				0.3453

 $Re = 172000$ 

区間 (I=)	長さ (mm)	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 $\frac{1}{2}C_D\rho V^2S$ (kg)
15	14	22	3.08	0.2996
14	19	22	4.18	0.4066
13	19	10	1.9	0.1848
12	19	10	1.9	0.1848
11	19	10	1.9	0.1848
10	19	10	1.9	0.1848
9	19	10	1.9	0.1848
8	19	10	1.9	0.1848
7	19	10	1.9	0.1848
6	19	10	1.9	0.1848
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)				2.1848

表 3.1 二次流れの主流速度に対する比率（解析ケース 1）

第 2 エルボか らの距離 (mm)	断面内 $x$ 方向 最大流速 $U$ (m/s)	断面内 $y$ 方向 最大流速 $V$ (m/s)	断面内 $z$ 方向 最大流速 $W$ (m/s)	二次流れの 主流速度に 対する比率	備考
297	5.92	6.42	3.99	0.92	第 2 エルボ出口
783	3.74	8.38	3.88	0.46	
1323	2.54	7.84	2.90	0.37	
1863	2.05	7.56	2.21	0.29	
2403	1.78	7.33	1.79	0.24	
2943	1.57	7.02	1.53	0.22	
3483	1.37	6.62	1.33	0.21	
4023	1.18	6.57	1.05	0.18	
4563	1.03	6.31	0.97	0.16	
5103	0.90	6.19	0.86	0.14	
13203	0.24	4.9	0.26	0.05	
15903	0.17	4.95	0.18	0.04	
17955	0.10	5.23	0.19	0.04	評価位置
18765	1.39	6.32	0.24	0.22	第 3 エルボ入口

表 4.1 解析ケース 1 の AQUA による結果

メッシュ 番号 (I=)	長さ (mm)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧力差 (kg/cm <sup>2</sup> )	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 (kg)
		前面	背面				
15	18.5	0.0269	-0.0309	0.0578	22	4.2075	0.2431
14	18.5	0.0403	-0.0400	0.0804	22	3.9090	0.3141
13	18.5	0.0461	-0.0457	0.0919	10	3.6105	0.3318
12	18.5	0.0497	-0.0496	0.0993	10	3.3119	0.3287
11	18.5	0.0525	-0.0523	0.1048	10	3.0134	0.3159
10	18.5	0.0543	-0.0540	0.1083	10	2.7149	0.2942
9	18.5	0.0546	-0.0543	0.1089	10	2.4164	0.2632
8	18.5	0.0528	-0.0530	0.1057	10	2.1179	0.2239
7	18.5	0.0481	-0.0498	0.0978	10	1.8193	0.1780
6	18.5	0.0383	-0.0499	0.00832	10	1.5208	0.1266
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)							2.6195



表 4.2 解析ケース 2 の AQUA による結果

## 上流側円柱

メッシュ 番号 (I=)	長さ (mm)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧力差 (kg/cm <sup>2</sup> )	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 (kg)
		前面	背面				
15	18.5	0.0445	-0.0168	0.0613	22	4.2075	0.2579
14	18.5	0.0633	-0.0217	0.0850	22	3.9090	0.3323
13	18.5	0.0705	-0.0247	0.0952	10	3.6105	0.3438
12	18.5	0.0745	-0.0268	0.1013	10	3.3119	0.3355
11	18.5	0.0780	-0.0282	0.1062	10	3.0134	0.3199
10	18.5	0.0806	-0.0290	0.1096	10	2.7149	0.2976
9	18.5	0.0817	-0.0290	0.1107	10	2.4164	0.2676
8	18.5	0.0803	-0.0280	0.1083	10	2.1179	0.2293
7	18.5	0.0754	-0.0256	0.1010	10	1.8193	0.1838
6	18.5	0.0636	-0.0220	0.0855	10	1.5208	0.1300
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)							2.6978

## 下流側円柱

メッシュ 番号 (I=)	長さ (mm)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧力差 (kg/cm <sup>2</sup> )	円柱直径 (mm)	前面投影 面積 (cm <sup>2</sup> )	抗力 (kg)
		前面	背面				
15	18.5	0.0177	-0.0139	0.0316	22	4.2075	0.1331
14	18.5	0.0177	-0.0139	0.0316	22	3.9090	0.1237
13	18.5	0.0245	-0.0158	0.0403	10	3.6105	0.1456
12	18.5	0.0276	-0.0167	0.0443	10	3.3119	0.1468
11	18.5	0.0292	-0.0172	0.0463	10	3.0134	0.1397
10	18.5	0.0305	-0.0174	0.0480	10	2.7149	0.1302
9	18.5	0.0305	-0.0172	0.0477	10	2.4164	0.1152
8	18.5	0.0297	-0.0166	0.0463	10	2.1179	0.0981
7	18.5	0.0279	-0.0156	0.0435	10	1.8193	0.0792
6	18.5	0.0238	-0.0143	0.0381	10	1.5208	0.0579
円柱に対する抗力 (I=15 から I=6 の抗力の合計値) (kg)							1.1696

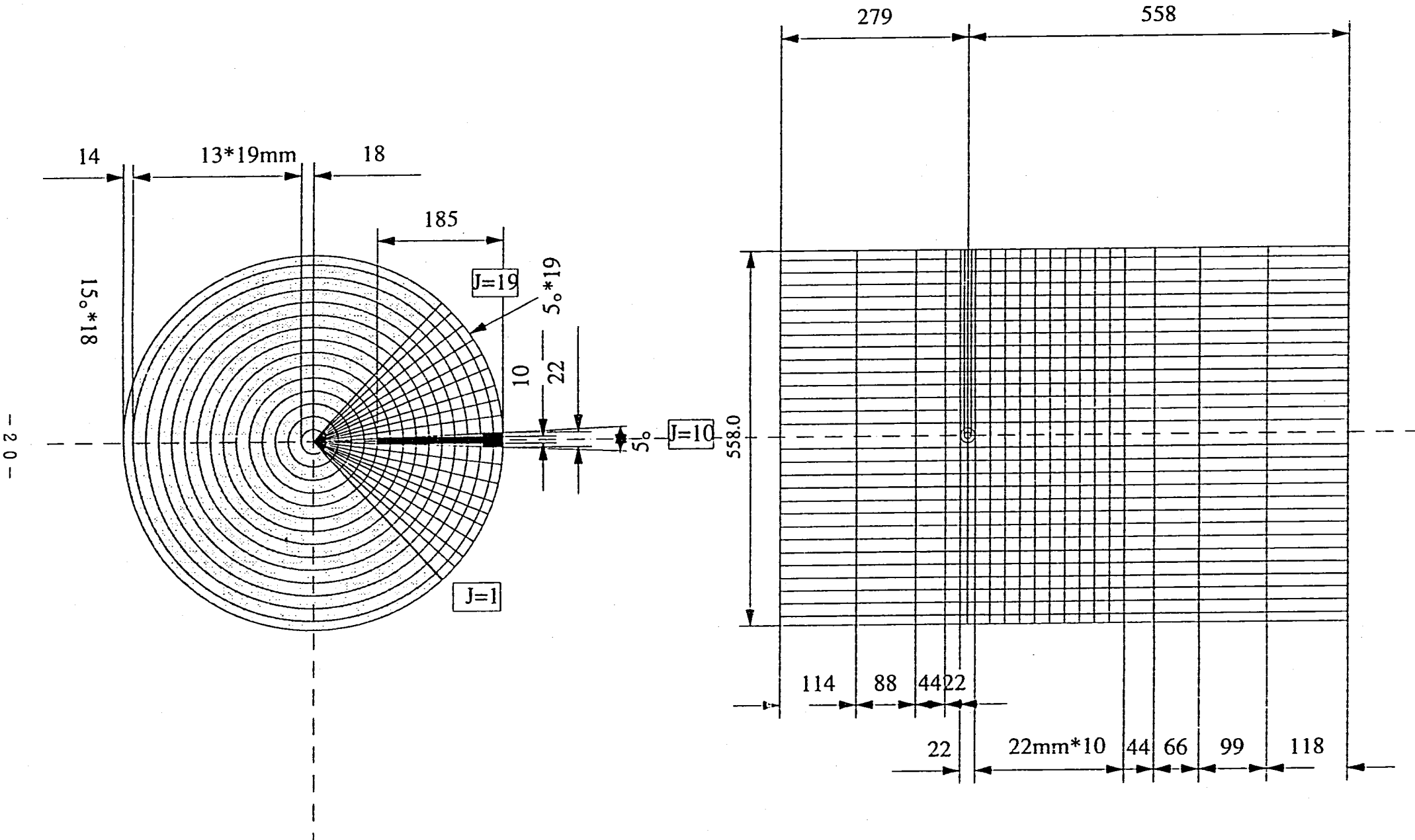


図 2.1 解析メッシュ図

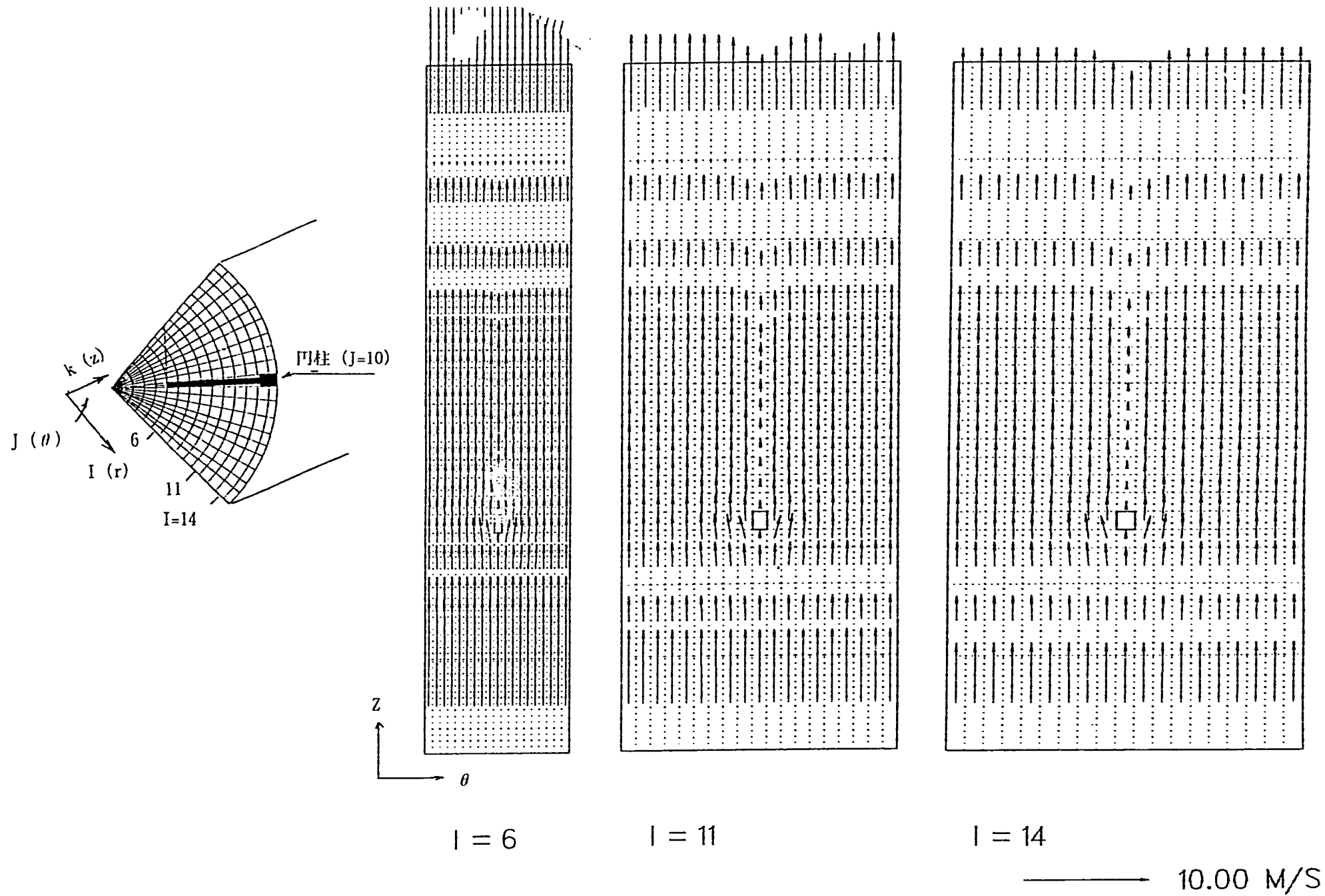


図 2.2 速度ベクトル図 (解析ケース 1)(1/2)

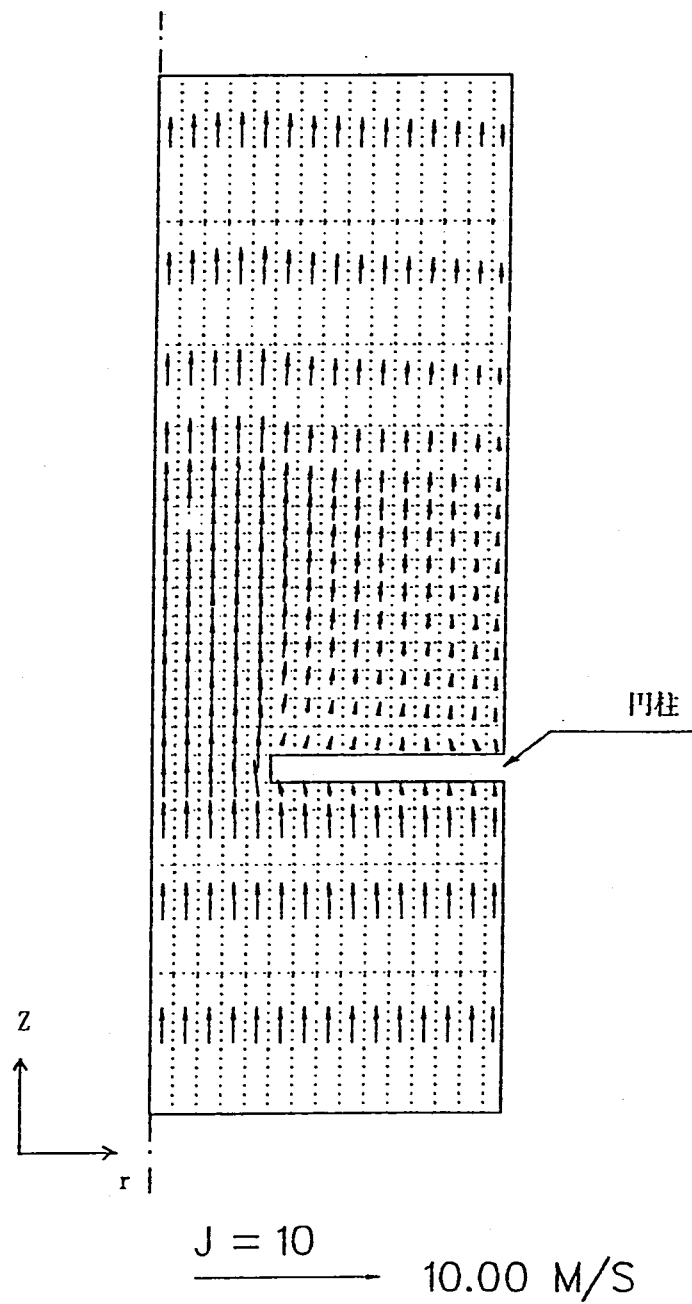


図 2.2 速度ベクトル図 (解析ケース 1) (2/2)

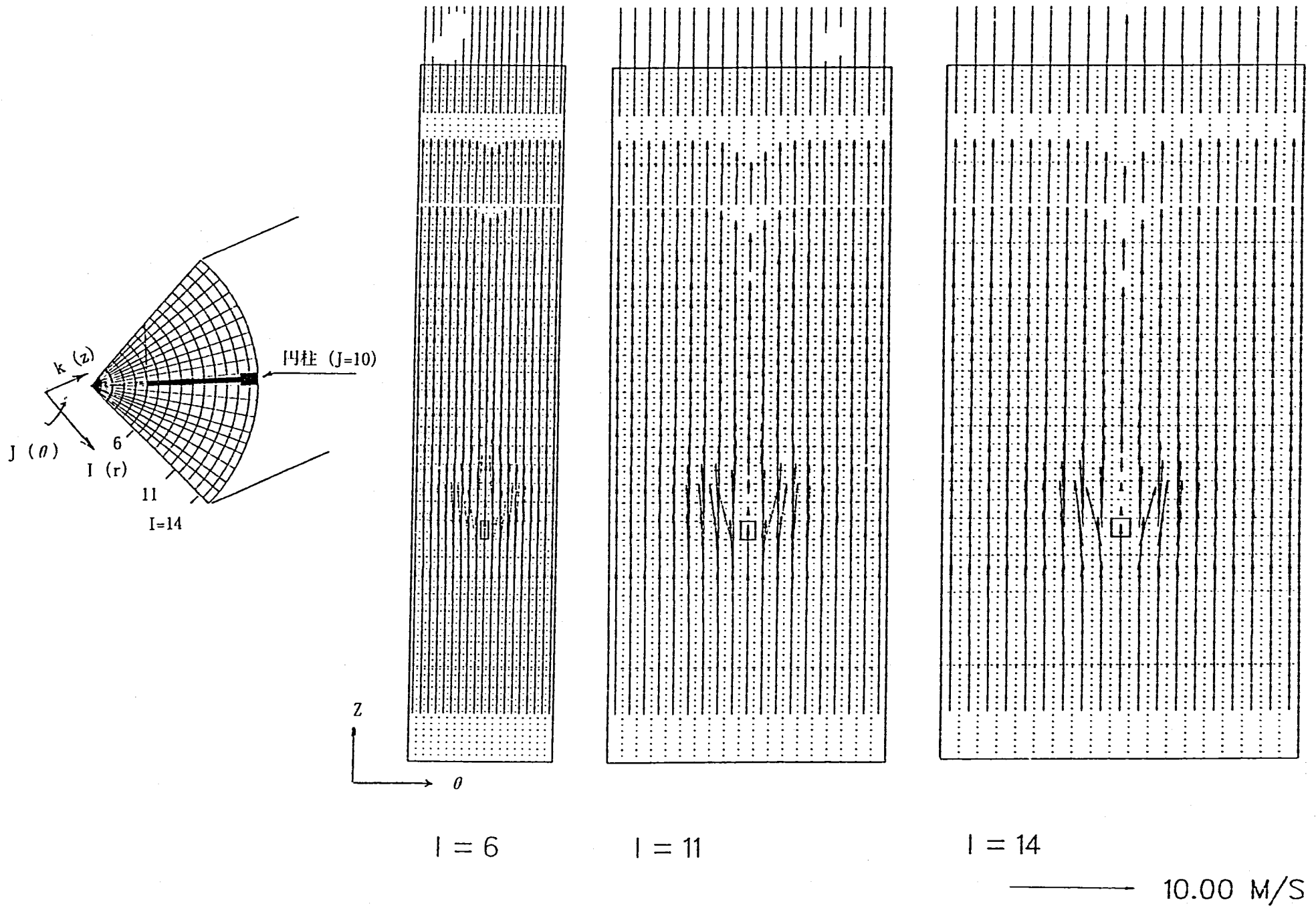


図 2.3 速度ベクトル図 (解析ケース 2) (1/2)

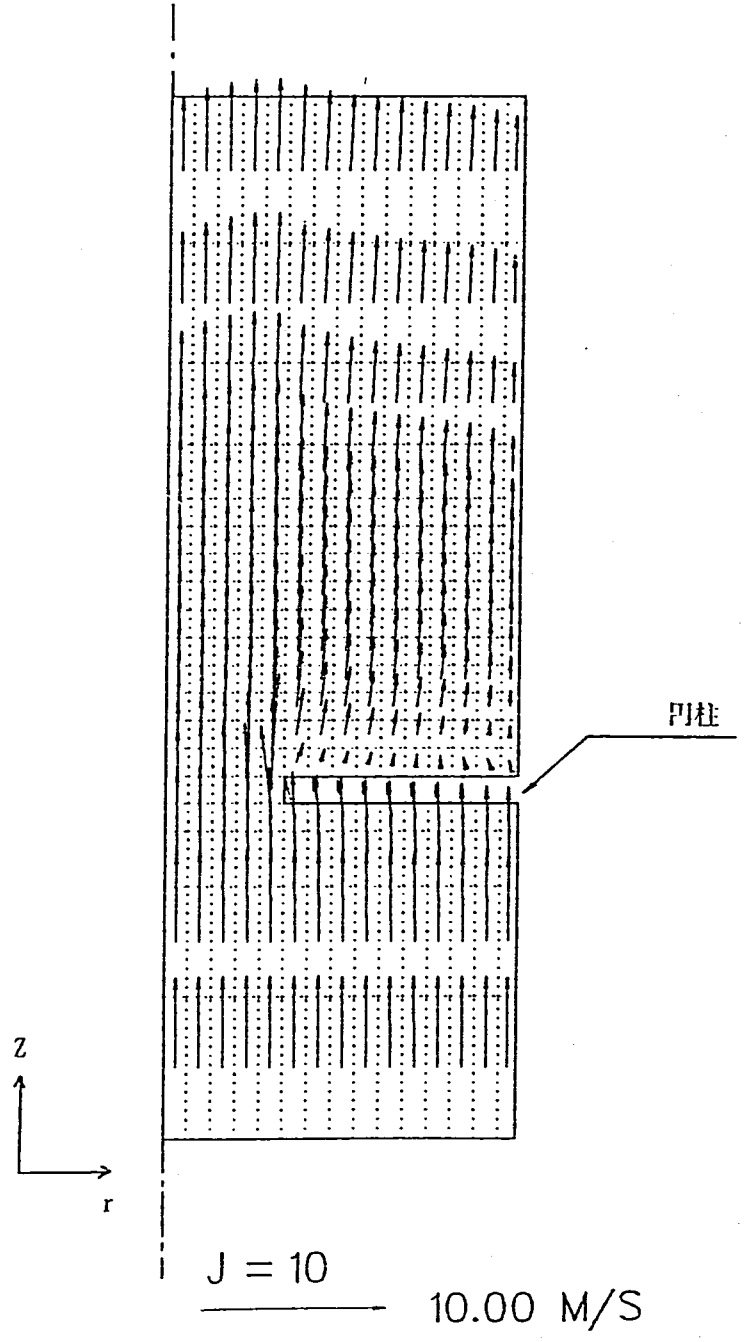


図 2.3 速度ベクトル図 (解析ケース 2) (2/2)

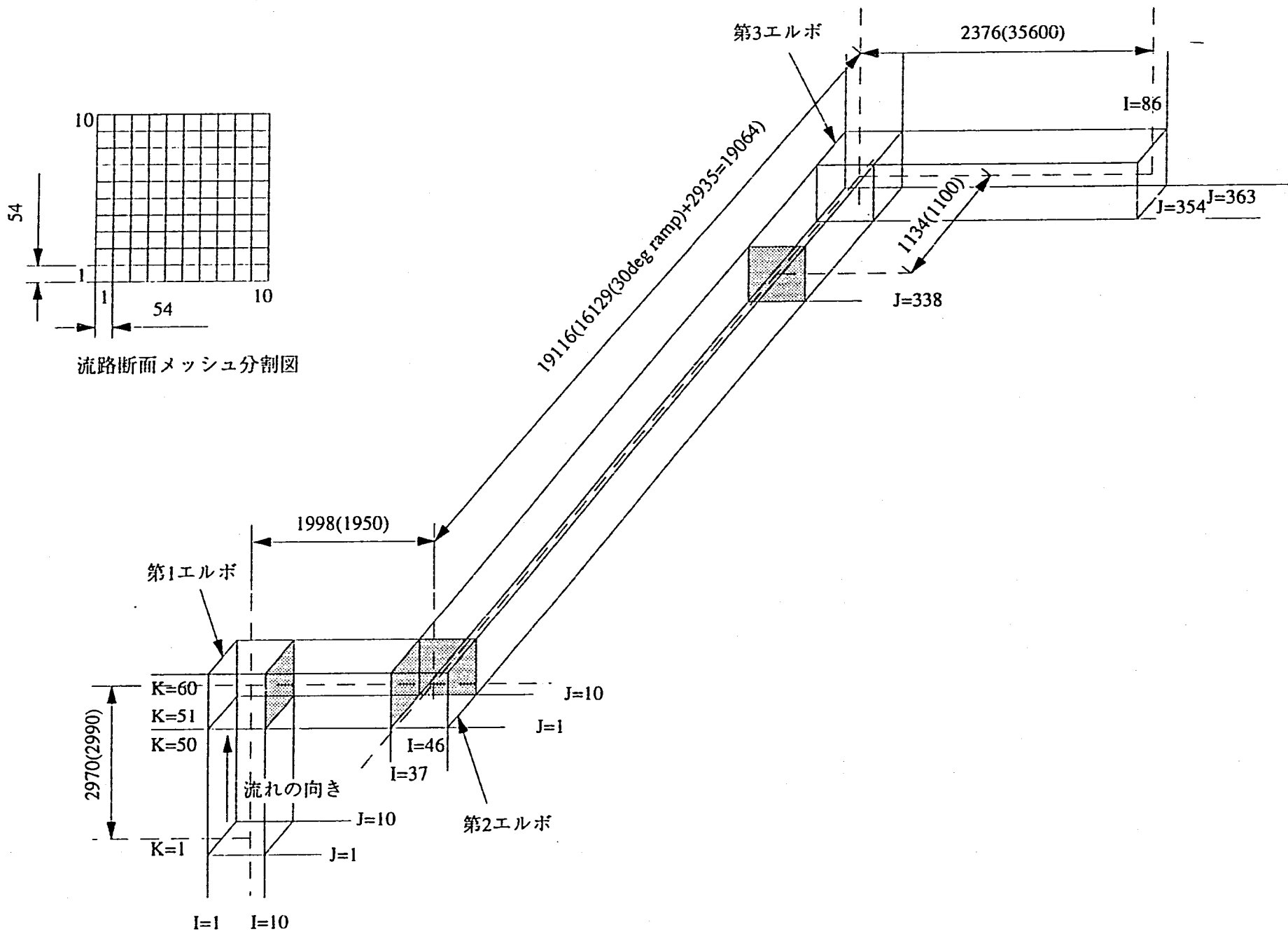


図 3.1 解析メッシュ図

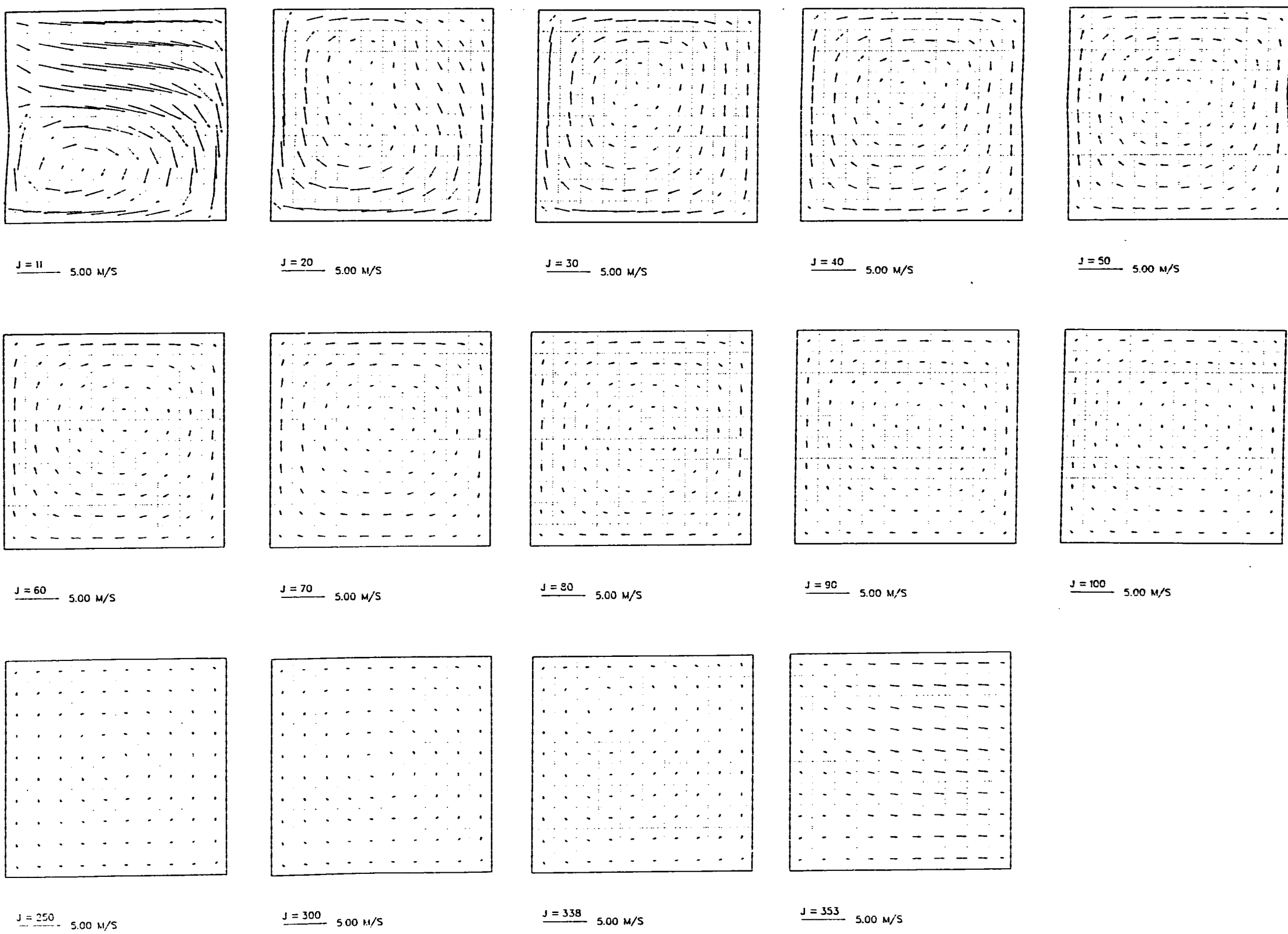
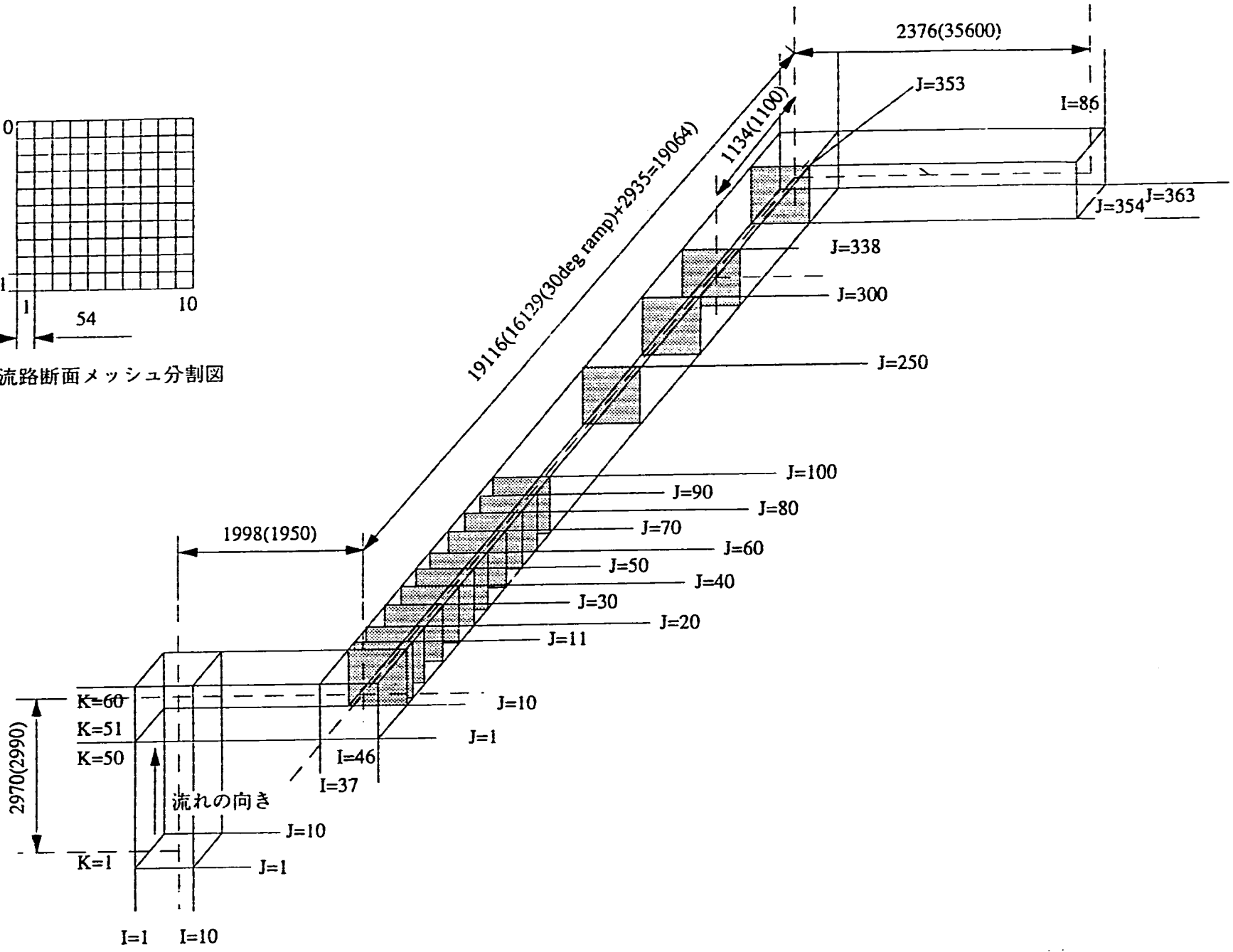
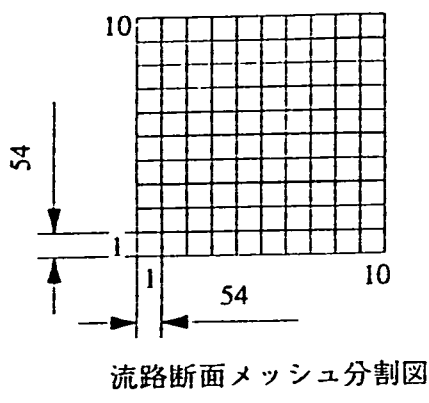
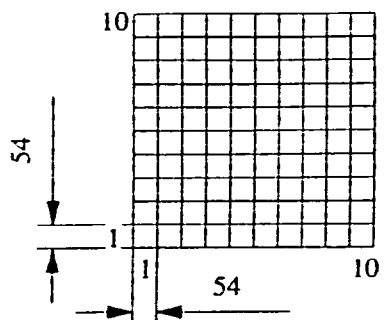
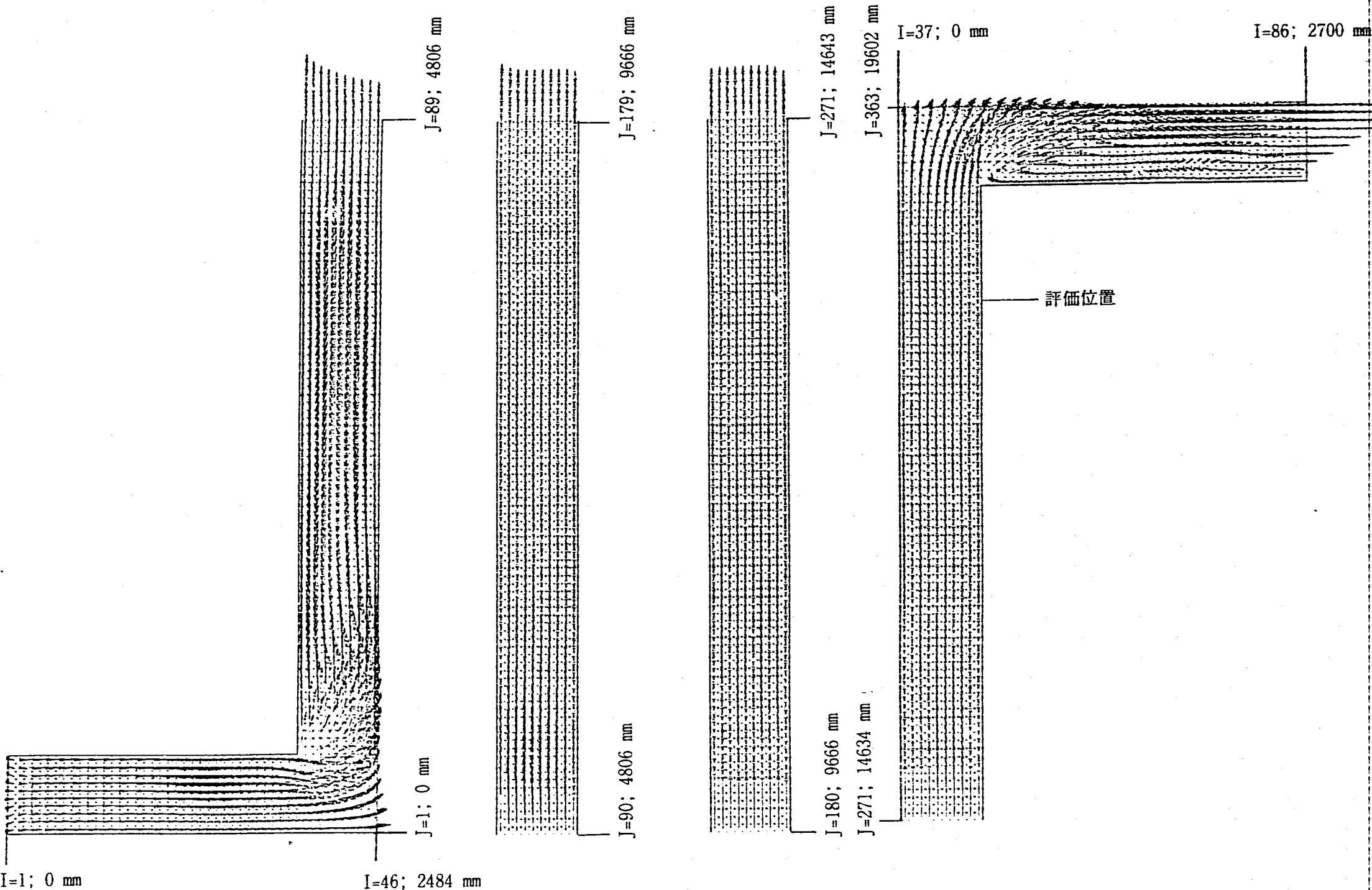
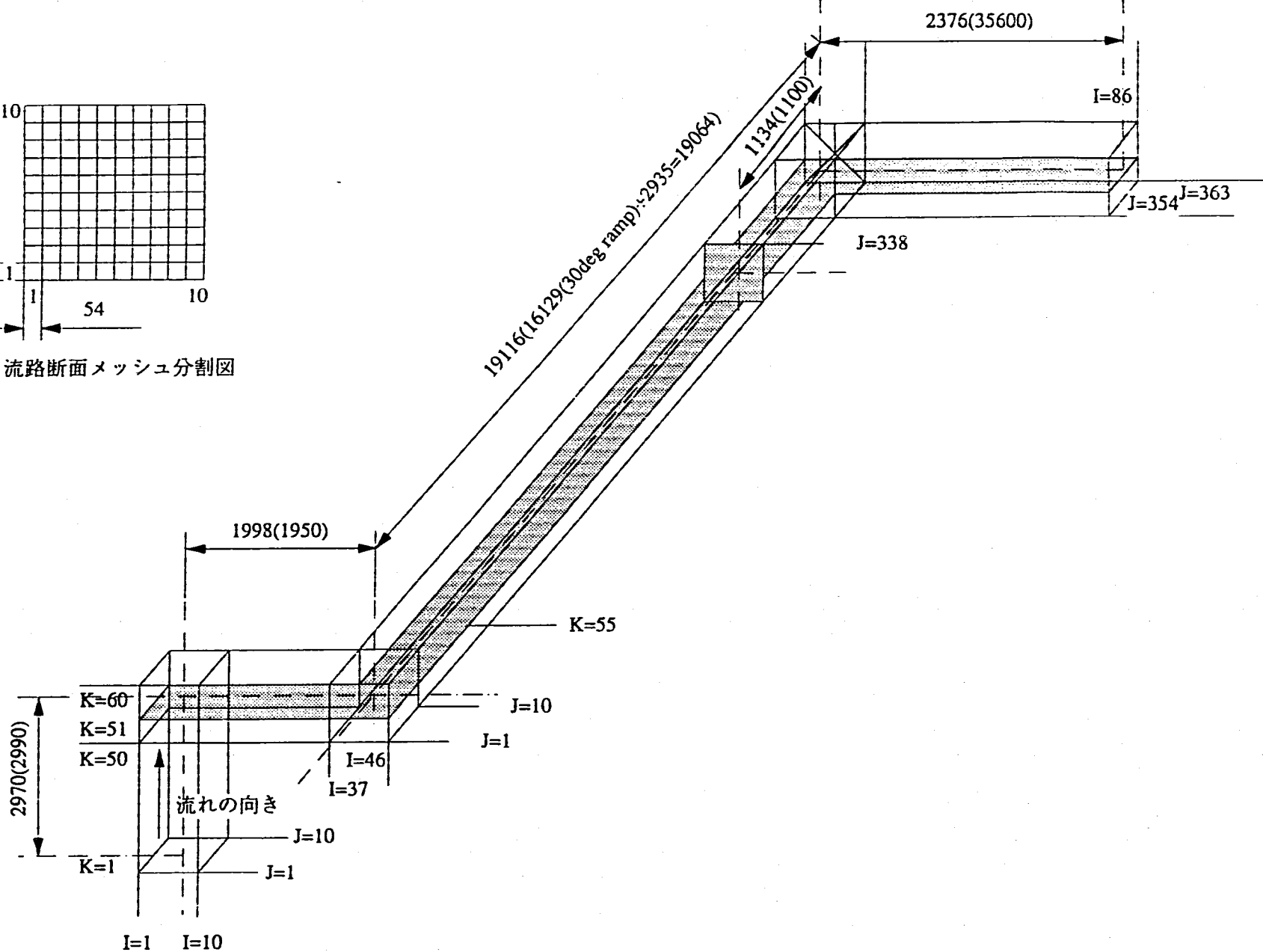


図 3.2 垂直断面内速度ベクトル図





流路断面メッシュ分割図



K = 55  
 10.00 m/s

図 3.3 水平断面内速度ベクトル図

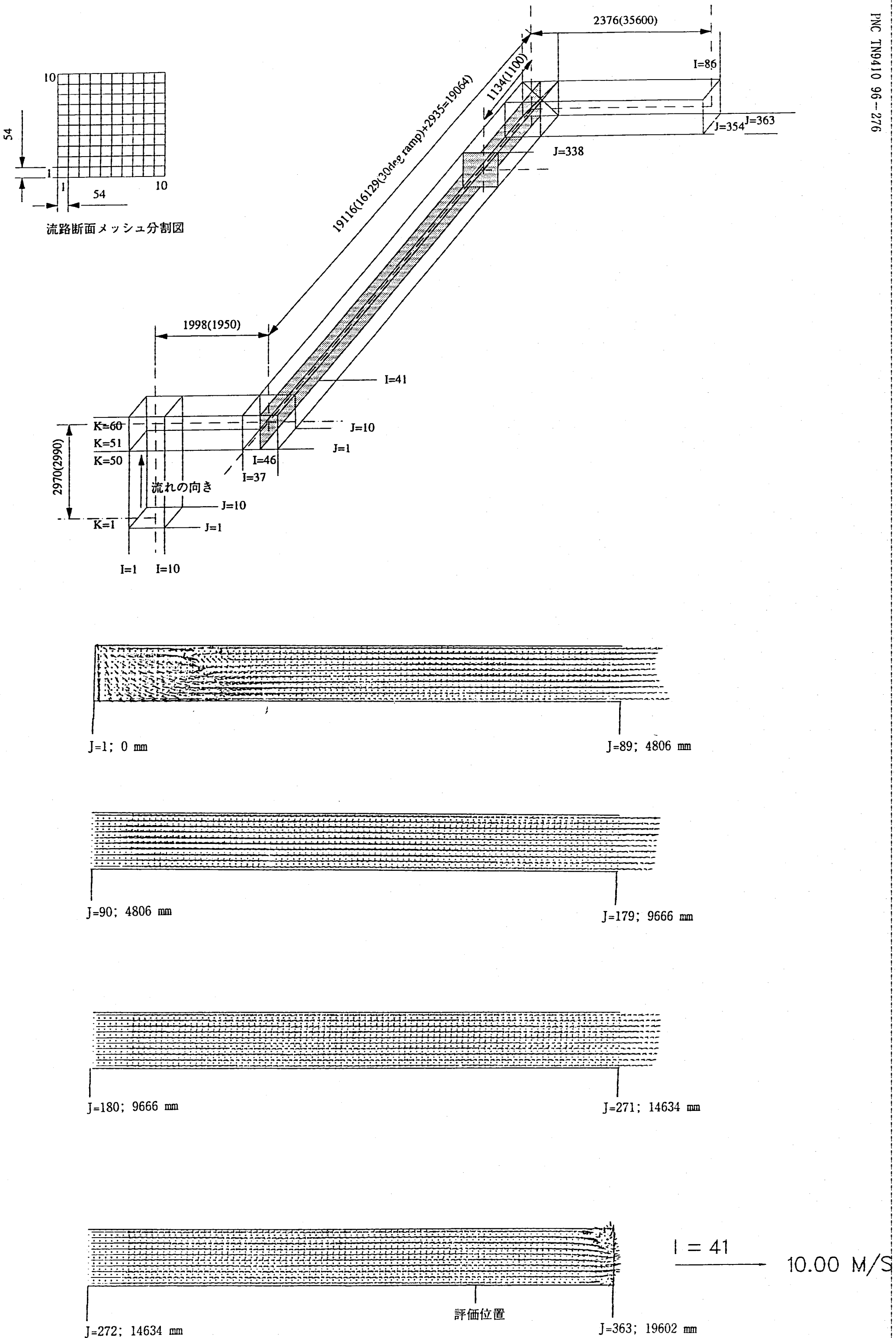


図 3.4 長手方向垂直断面内速度ベクトル図

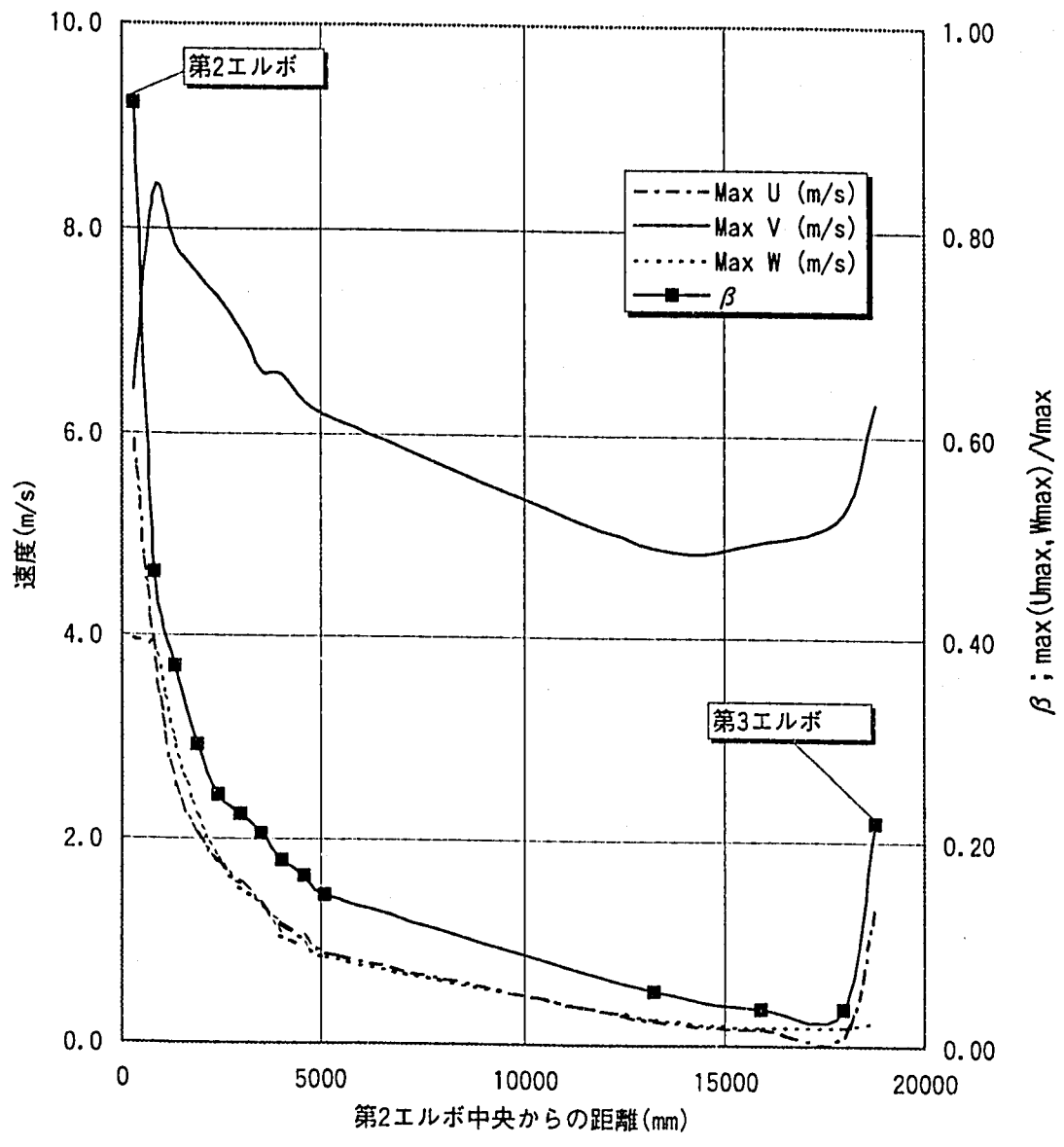


図 3.5 二次流れの主流速度に対する比率 (解析ケース 1)

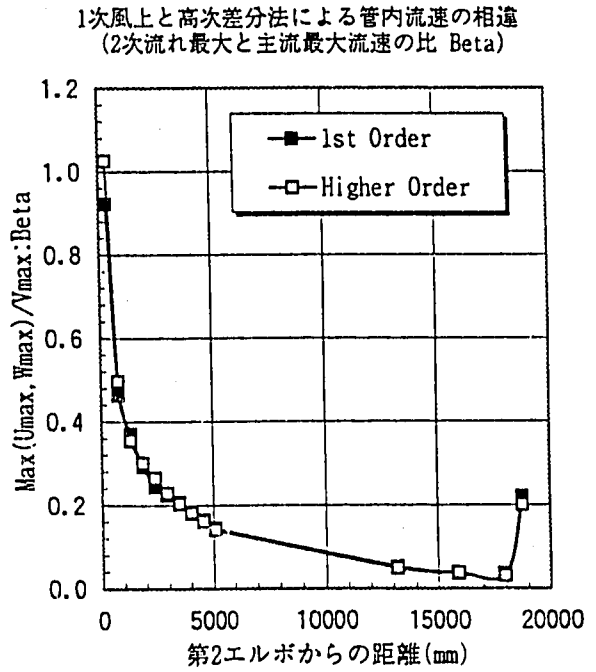
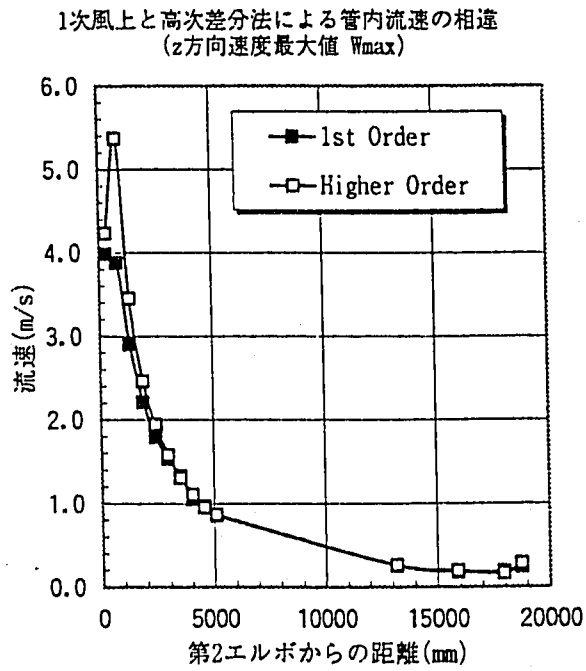
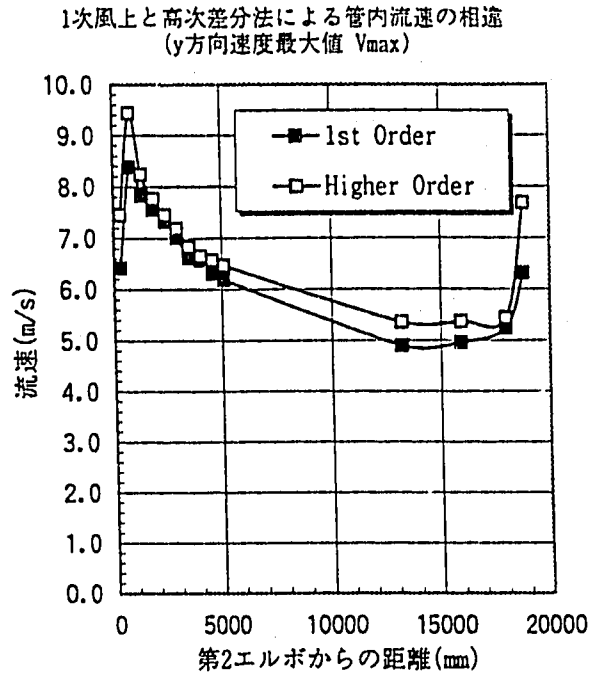
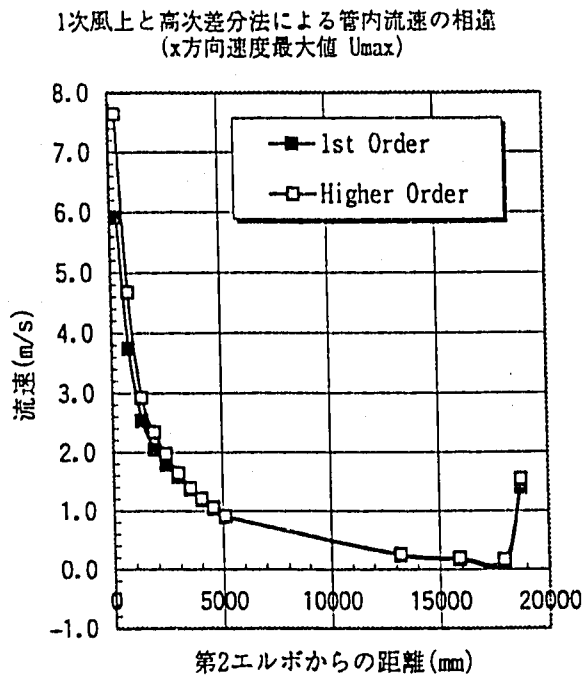


図 3.6 差分法による流速の相違

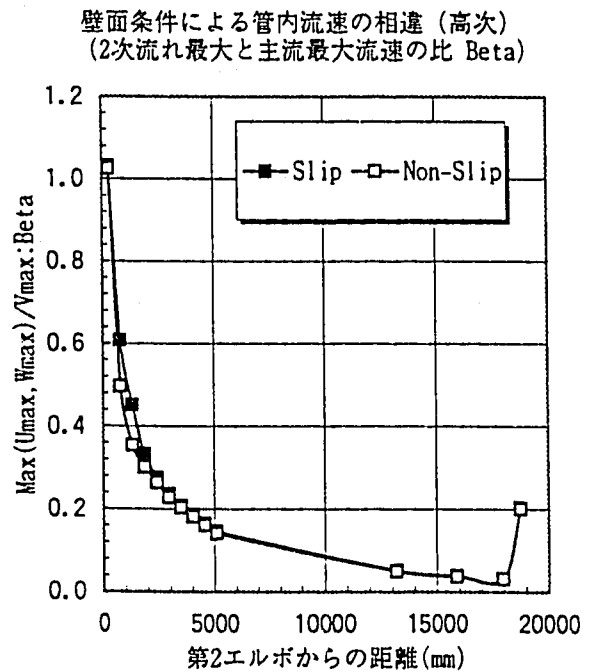
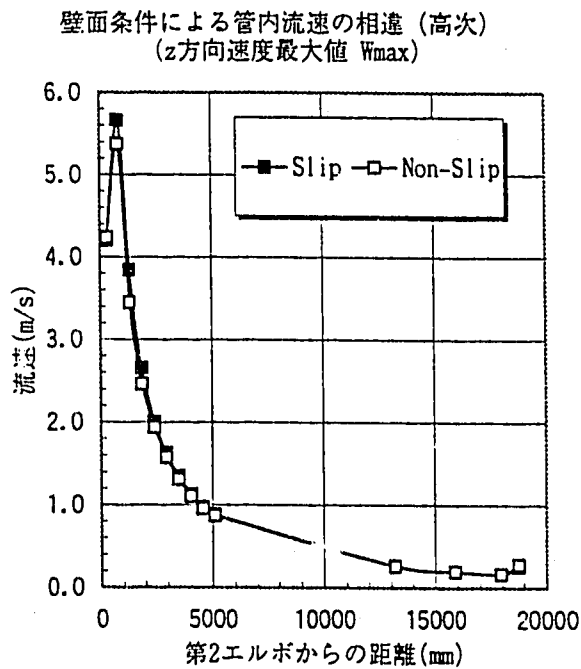
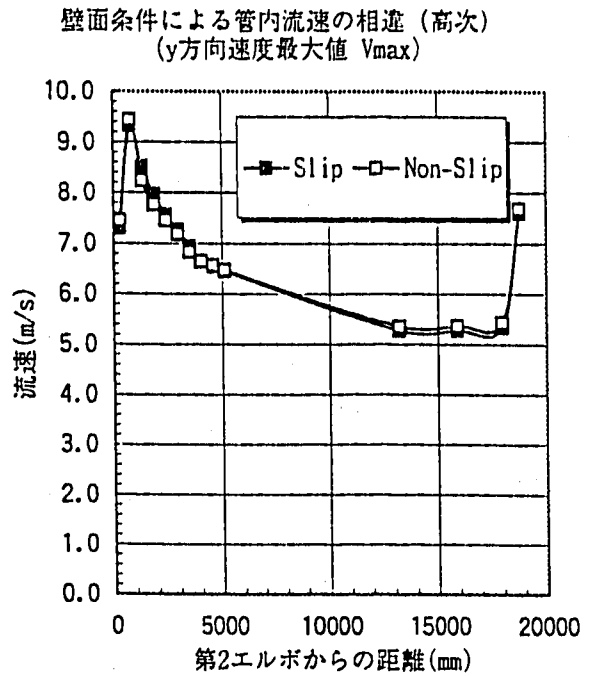
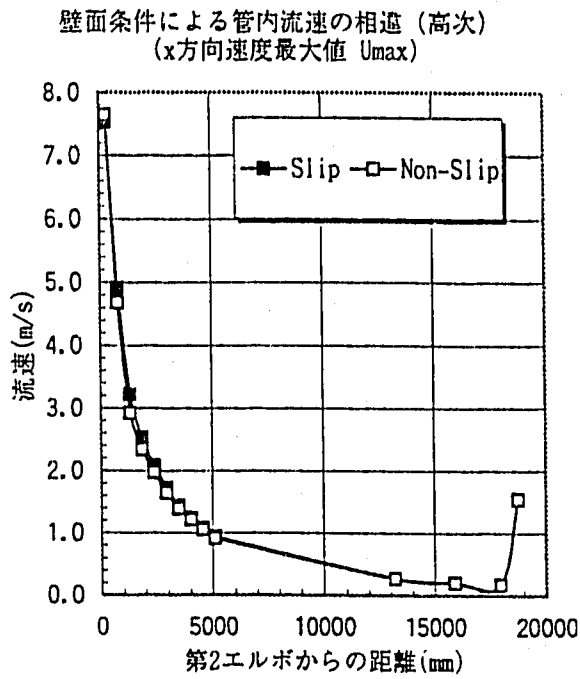
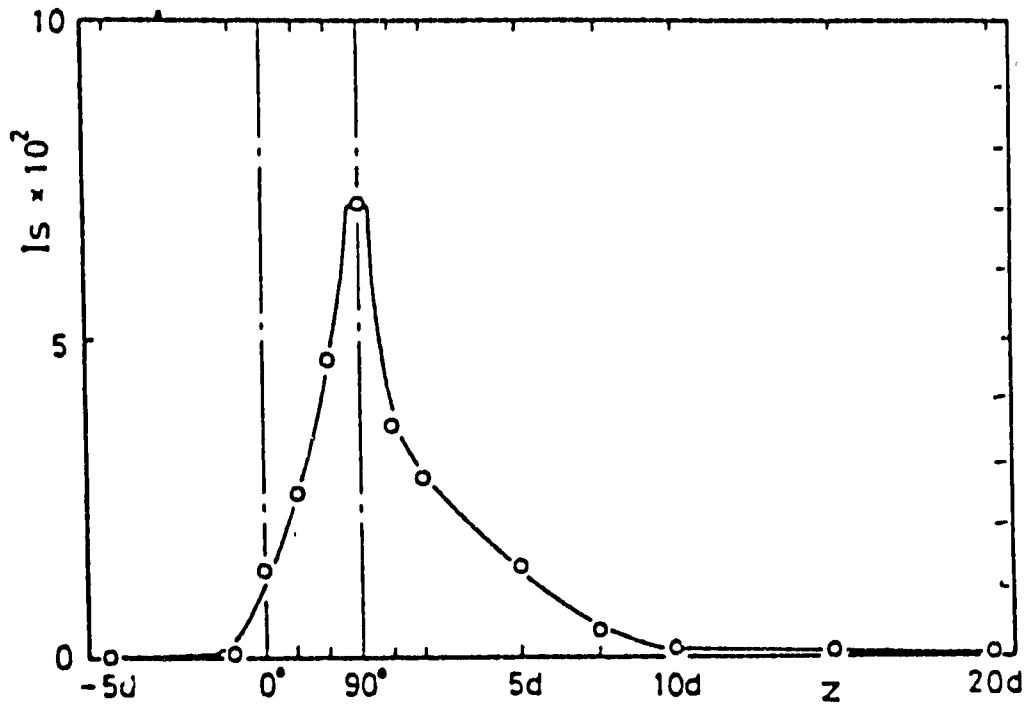
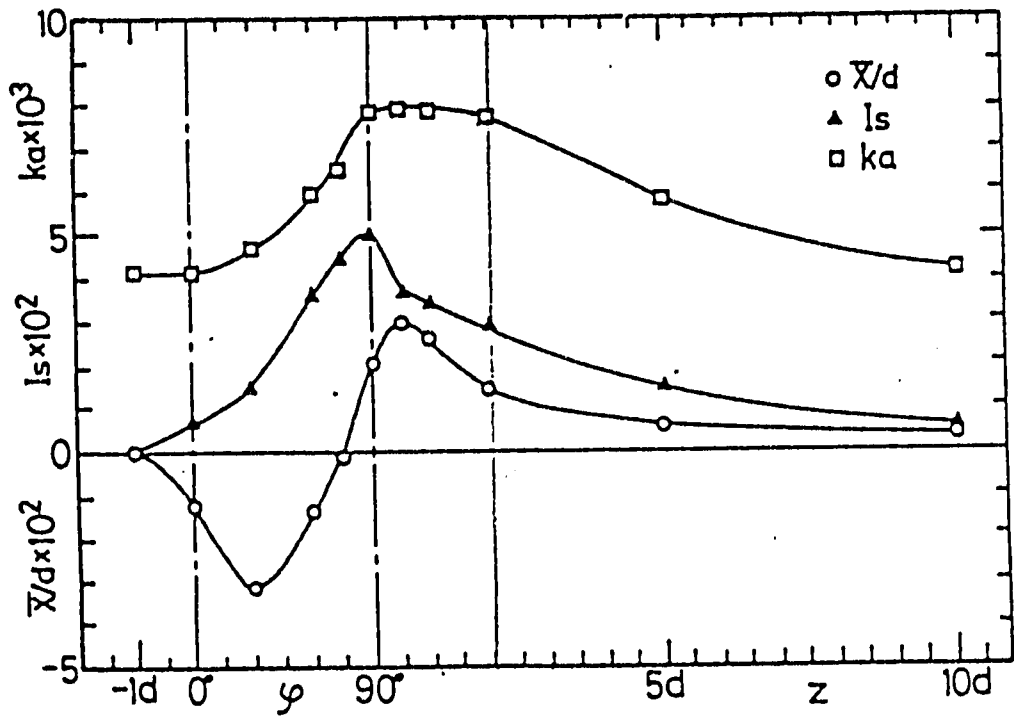


図 3.7 壁面条件による流速の相違



(a)ダクトの場合 ( $Re = 4 \times 10^4$ )



(b)円管の場合 ( $Re = 6 \times 10^4$ )

図 3.8 二次流れの強さ

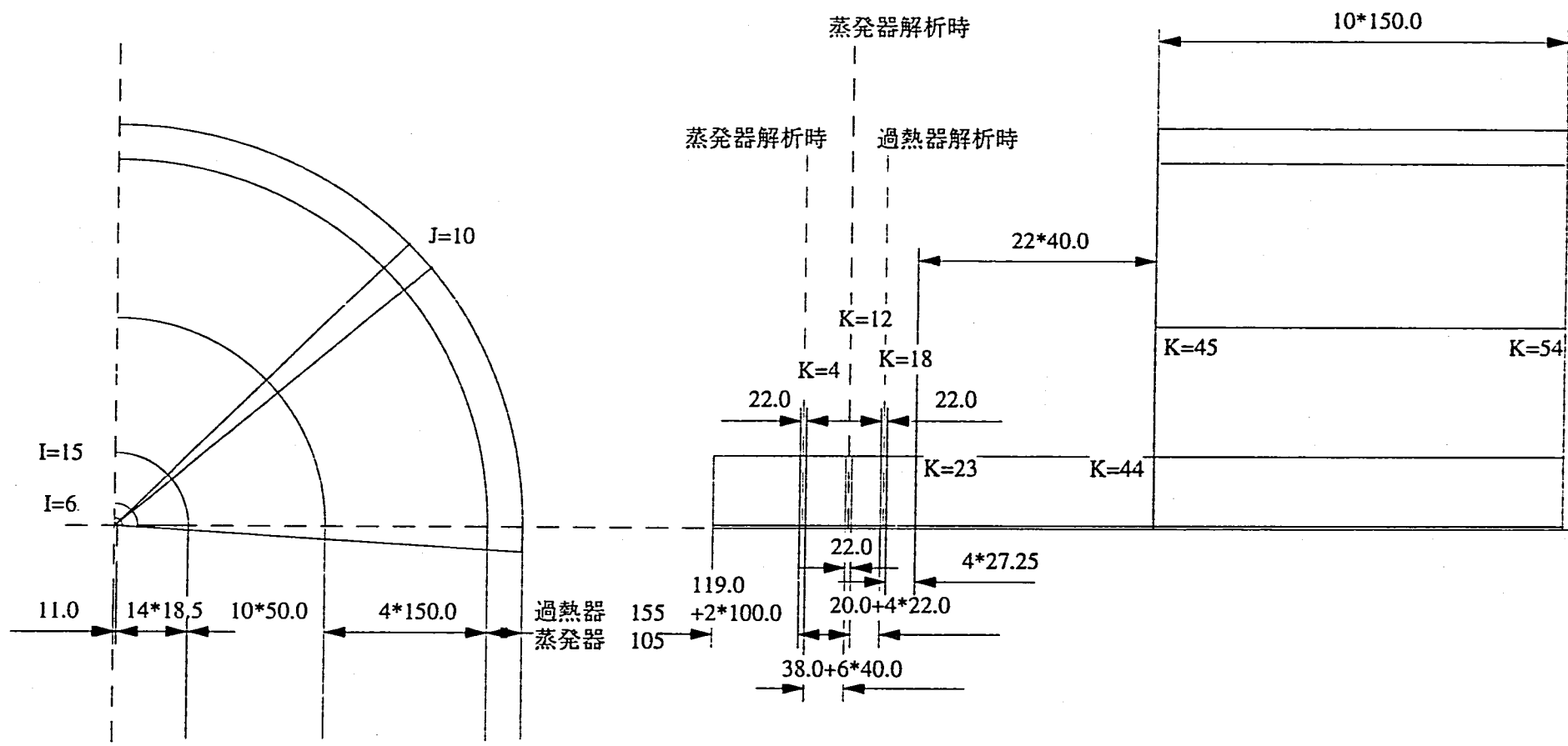


図 4.1 解析メッシュ図

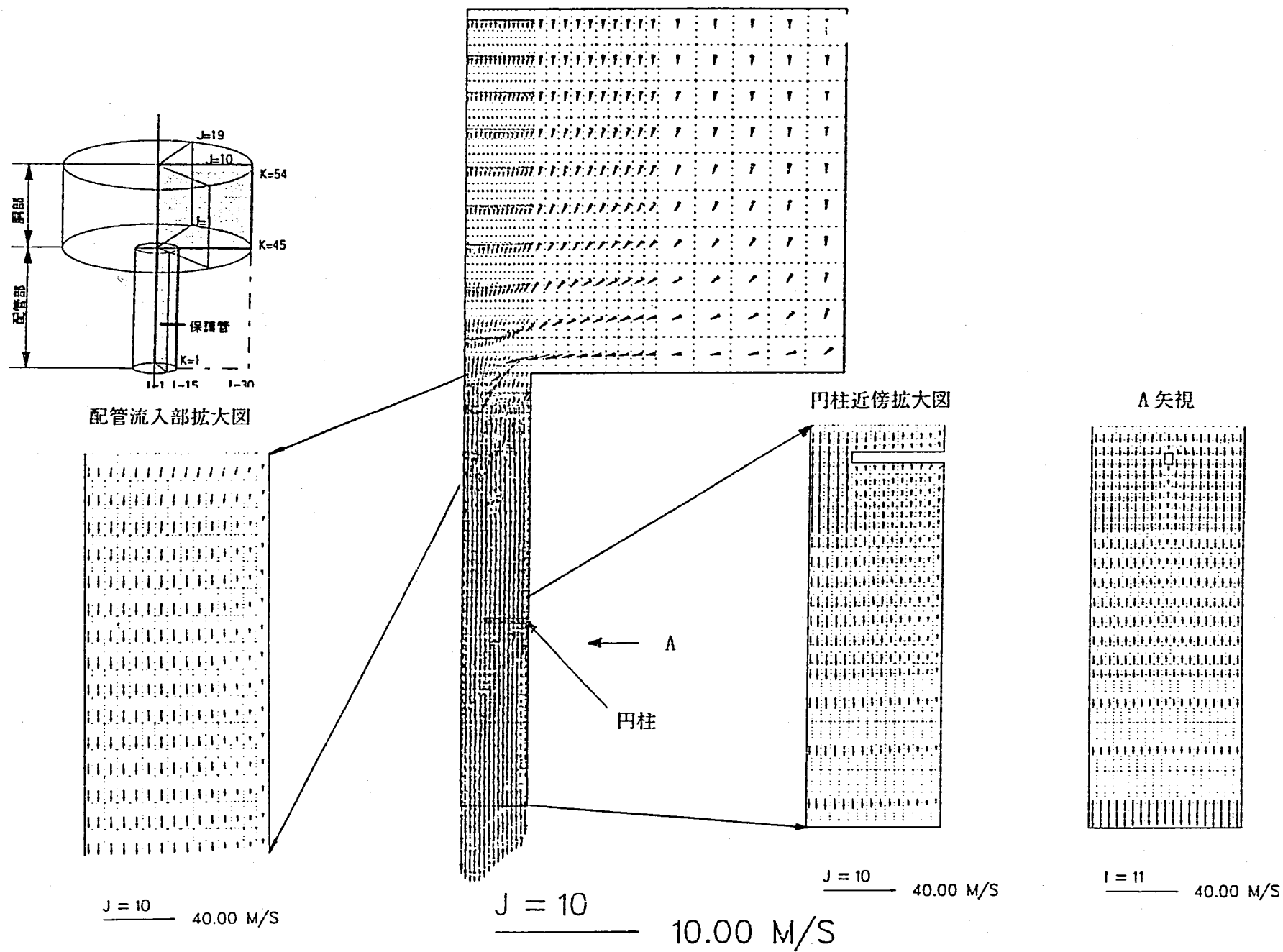


図 4.2 胴部、配管部速度ベクトル図 (解析ケース 1)



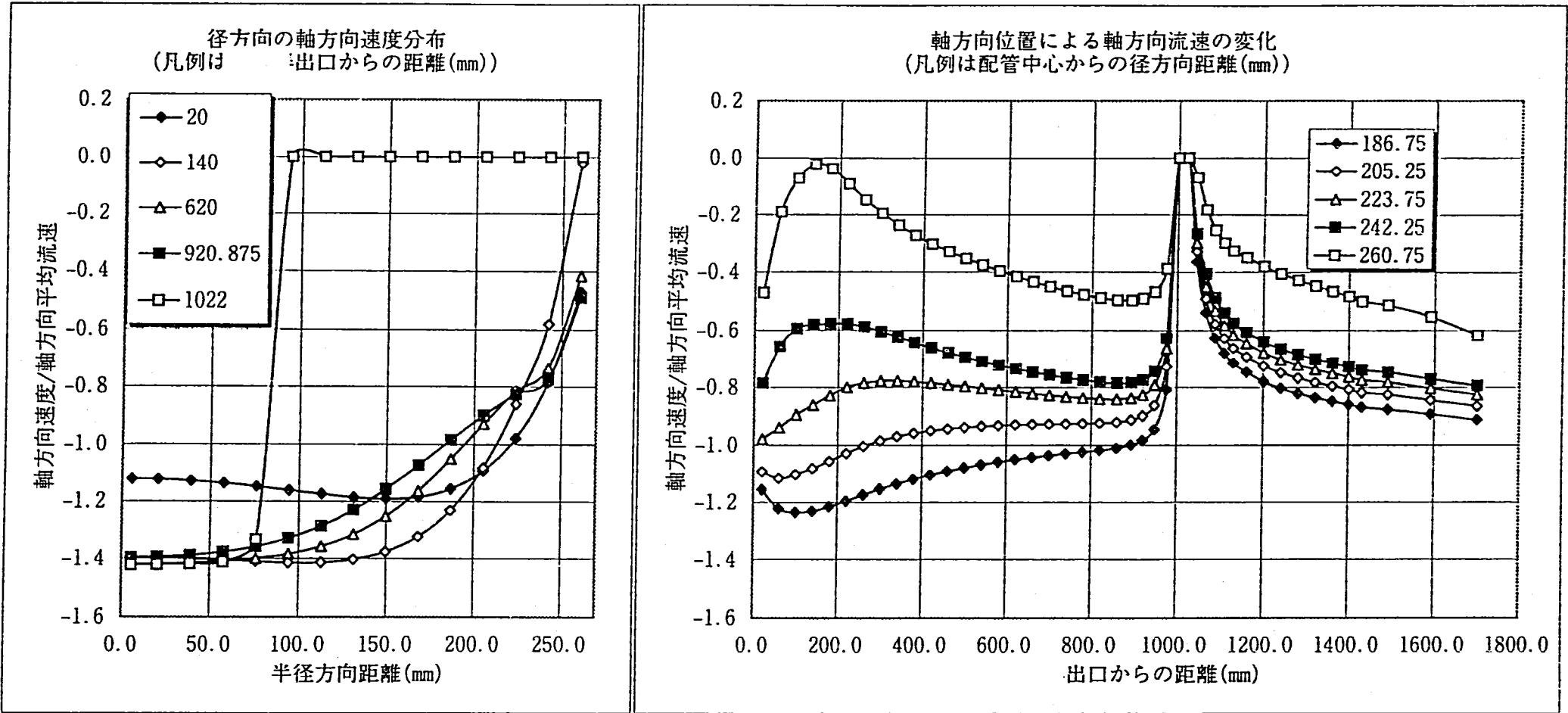


図 4.3 出口配管内の軸方向速度分布 (解析ケース 1)

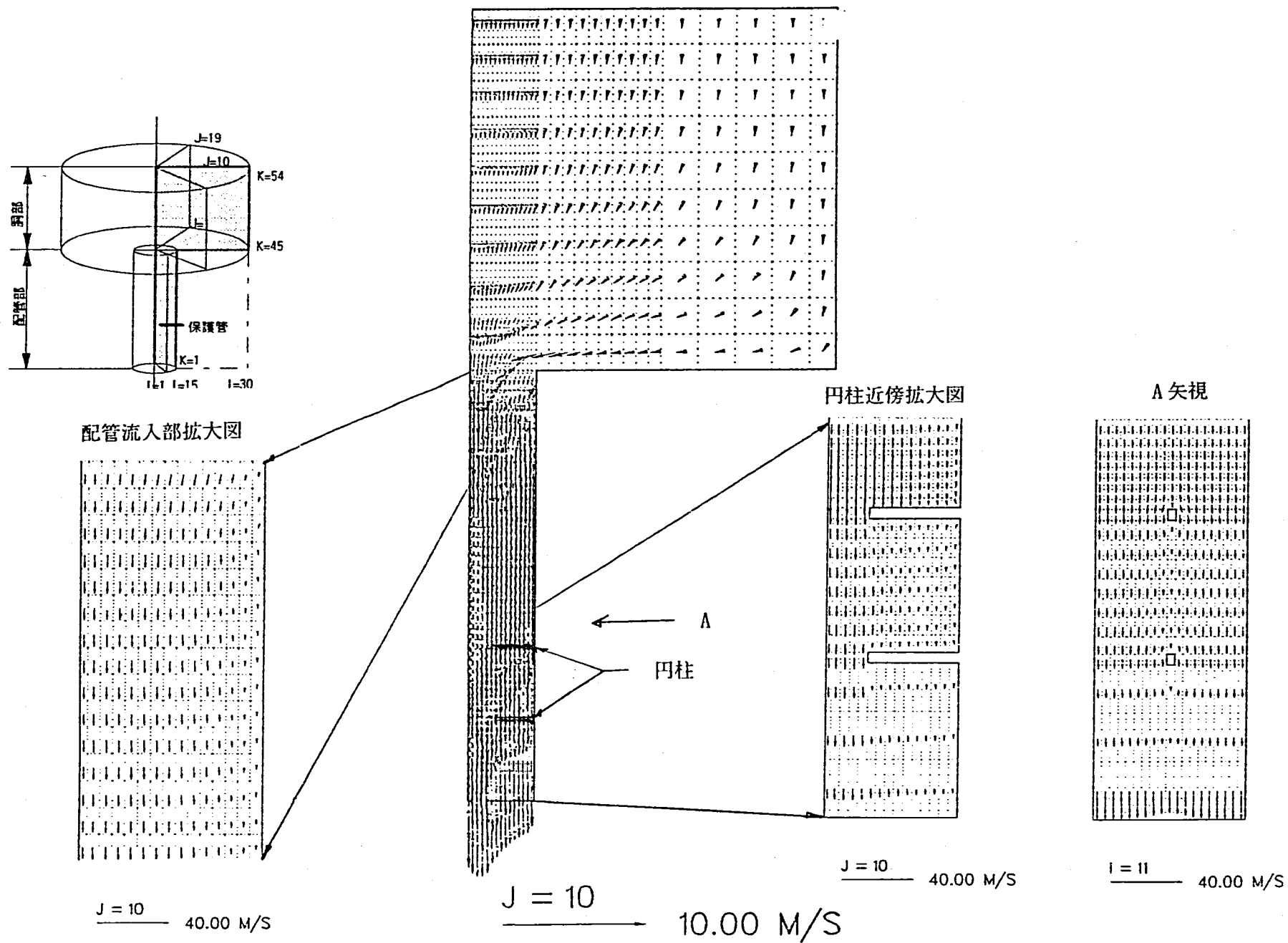


図 4.4 胴部、配管部速度ベクトル図 (解析ケース 2)

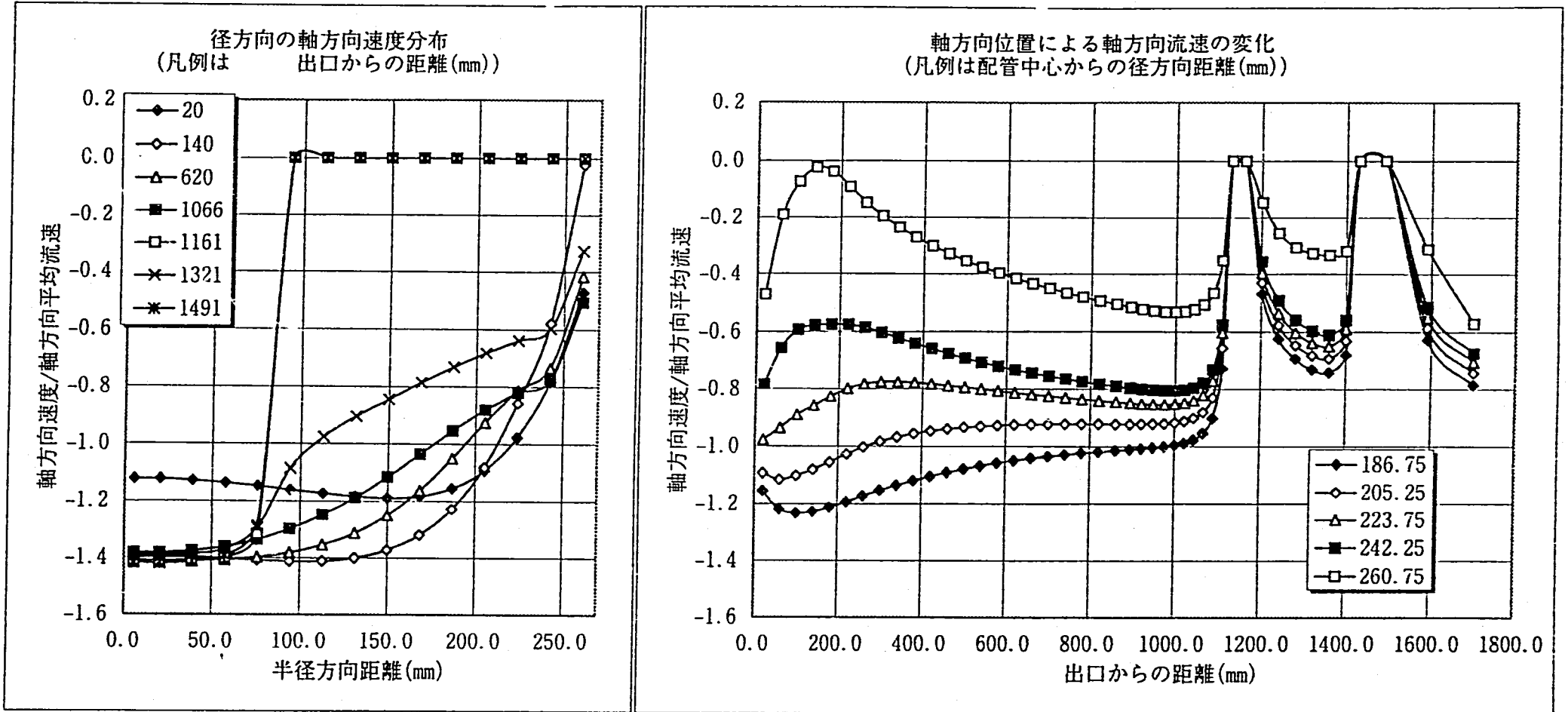


図 4.5 出口配管内の軸方向速度分布 (解析ケース 2)

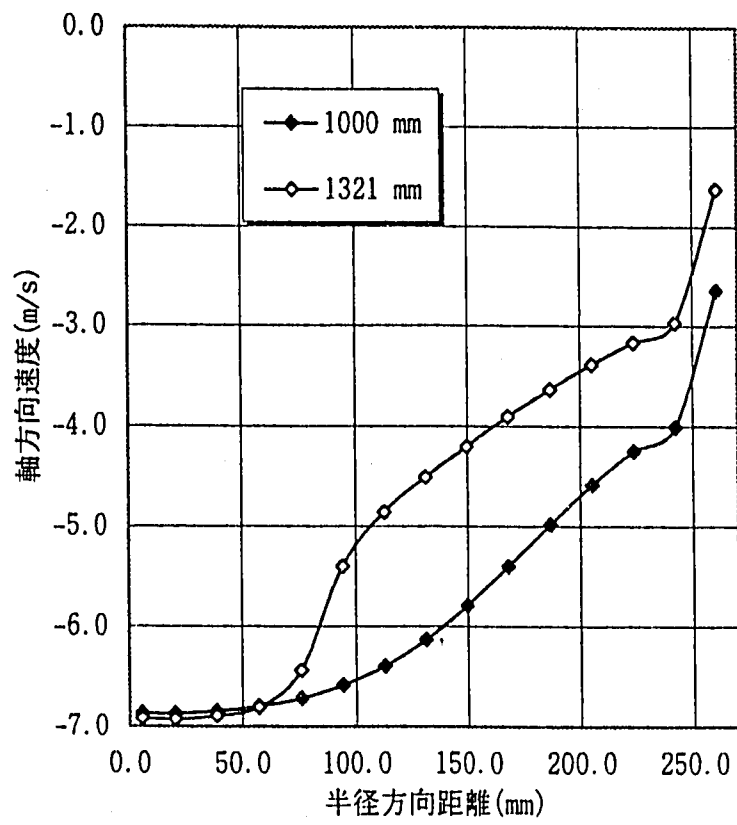


図 4.6 円柱に対する接近流速分布

## 付録 解析用入力データ

## A. 第2章 配管中の円柱が受ける抗力で使用した入力データ

```
*****
*  MONJU IHX OUTLET PIPE ANALYSIS                               *
*                                                                    *
*                               1995.12.11                          *
*                                                                    *
*****
```

```
&GEOM  IGEOM=-1, NL1=2000, NM1=5500, ISYMCH=3, IFITEN=3,
        IFRES=1,  IMAX=15,  JMAX=19,  KMAX=19,  NSURF= 9,
        DX=0.018, 13*0.019, 0.014,
        DY=19*0.0872664
        DZ=0.114, 0.088, 0.044, 12*0.022, 0.044, 0.066, 0.099, 0.118,
        XNORML= 1., -1., -1., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,
        YNORML= 0., 0., 0., 1., -1., 0., 0., 0., 0.,
        ZNORML= 0., 0., 0., 0., 0., 1., -1., 1., -1.,
        ITURKE=20, IFPCG= 5,
```

```
&END
```

```
REG    -1.0  1  1  1  19  1  19  1 CENTER LINE
REG    -1.0 15 15  1  19  1  4  2 PIPE WALL(-X)
REG    -1.0 15 15  1  19  6  19  2 P
REG    -1.0 15 15  1  9  5  5  2 P
REG    -1.0 15 15 11  19  5  5  2 P
REG    -1.0  5  5 10 10  5  5  3 THERMOCOUPLE (-X)
REG    -1.0  6 15 11 11  5  5  4 THERMOCOUPLE (+Y)
REG    -1.0  1 15  1  1  1  19  4 PIPE (+Y)
REG    -1.0  6 15  9  9  5  5  5 THERMOCOUPLE (-Y)
REG    -1.0  1 15 19 19  1  19  5 PIPE (-Y)
REG    -1.0  6 15 10 10  6  6  6 THERMOCOUPLE (+Z)
REG    -1.0  6 15 10 10  4  4  7 THERMOCOUPLE (-Z)
REG    -1.0  1 15  1  19  1  1  8 INLET (+Z)
REG    -1.0  1 15  1  19 19 19  9 OUTLET (-Z)
```

```
END
```

```
&DATA  IFENER=0, NTHCON=-1, NTMAX=99999, IT=1,
        IDTIME=0, RDTIME=0.3,
        IFMMO=1,
        IFMTB=1,
```

IDISP=0,NTSMRY=100,TREST=60.0,  
DT(1)=1.0000,  
KFLOW=-3,1,5\*-3,1,-5,  
KTEMP= 9\*400,  
TEMPO= 486.,  
VELOC(8)=5.025,TEMP(8)=486.,  
NTPRNT=-9999,  
NTPLOT=-9999,  
NTHPR =173004,173006,083004,083006,031010,

&END

&TURB

HYDIN=1.0E10,  
KEITER=1,ITKBUG=0,

&END

END

END



KFLOW= 6\*-3,1,-1,  
KTEMP= 6\*400,1,400,  
TEMPO= 505.0,  
GRAVZ=-9.807,  
VELOC(7)=4.970,  
TEMP(7)=505.0,  
NTHPR =011011,011036,022011,022175,022338,  
171011,171036,172011,172175,172338,  
NTPRNT=-9999,  
NTPLOT=-9999,

&END

&TURB

HYDIN=1.0E20,

&END

END

UL -4.9           1 60 381 390   1 10

WL 4.9            1 10 381 390 11 42

VL -4.9           1 10   1 380 43 52

END



## C. 第4章 縮流の円柱抗力に対する影響で使用した入力データ

```

*****
* STEAM GENERATOR OUTLET PIPE T/C ANALYSIS *
*
* 1996.1.26 *
*****
&GEOM IGEOM=-1, NL1=5200, NM1=18240, ISYMCH=3, IFITEN=3,
IFRES=1, IMA=30, JMAX=19, KMAX=54, NSURF= 10,
DX=0.011, 14*0.0185, 10*0.050, 4*0.150, 0.105,
DY=19*0.0872664
DZ=0.119, 2*0.1, 0.022, 0.038, 6*0.04, 0.022, 0.020, 5*0.022,
4*0.02725, 22*0.040, 10*0.15,
XNORML= 1., -1., -1., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,
YNORML= 0., 0., 0., 1., -1., 0., 0., 0., 0., 0.,
ZNORML= 0., 0., 0., 0., 0., 1., -1., 1., -1., 1.,
ITURKE=20, IFPCG= 5,
&END
REG -1.0 1 1 1 19 1 54 1 CENTER LINE
REG -1.0 15 15 1 19 1 3 2 PIPE WALL (-X)
REG -1.0 15 15 1 9 4 4 2 P
REG -1.0 15 15 11 19 4 4 2 P
REG -1.0 15 15 1 19 5 11 2 P
REG -1.0 15 15 1 9 12 12 2 P
REG -1.0 15 15 11 19 12 12 2 P
REG -1.0 15 15 1 19 13 44 2 P
REG -1.0 30 30 1 19 45 54 2 SG
REG -1.0 5 5 10 10 4 4 3 THERMOCOUPLE (-X)
REG -1.0 5 5 10 10 12 12 3 THERMOCOUPLE (-X)
REG -1.0 6 15 11 11 4 4 4 THERMOCOUPLE (+Y)
REG -1.0 6 15 11 11 12 12 4 THERMOCOUPLE (+Y)
REG -1.0 1 15 1 1 1 44 4 PIPE (+Y)
REG -1.0 1 30 1 1 45 54 4 SG (+Y)
REG -1.0 6 15 9 9 4 4 5 THERMOCOUPLE (-Y)
REG -1.0 6 15 9 9 12 12 5 THERMOCOUPLE (-Y)
REG -1.0 1 15 19 19 1 44 5 PIPE (-Y)
REG -1.0 1 30 19 19 45 54 5 SG (-Y)

```

REG	-1.0	6	15	10	10	5	5	6	THERMOCOUPLE (+Z)
REG	-1.0	6	15	10	10	13	13	6	THERMOCOUPLE (+Z)
REG	-1.0	6	15	10	10	3	3	7	THERMOCOUPLE (-Z)
REG	-1.0	6	15	10	10	11	11	7	THERMOCOUPLE (-Z)
REG	-1.0	1	15	1	19	1	1	8	OUTLET(+Z)
REG	-1.0	1	30	1	19	54	54	9	INLET (-Z)
REG	-1.0	16	30	1	19	45	45	10	SG (+Z)

END

```

&DATA IFENER=0, NTHCON=-1, NTMAX=99999, IT=1,
      IDTIME=0, RDTIME=0.3,
      IFMMO=1,
      IFMTB=1,
      IDISP=0, NTSMRY=1, TREST=60.0,
      DT(1)=1.0000,
      KFLOW=-3, 1, 5*-3, -5, 1, 1,
      KTEMP= 10*400,
      TEMPO= 325.,
      VELOC(9)=0.1663, TEMP(9)=325.,
      NTPRNT=-9999,
      NTPLOT=-9999,
      NTHPR =173017, 173019, 033017, 033019, 172010, 032010,

```

&END

&TURB

```

      HYDIN=1.0E10,
      KEITER=1, ITKBUG=0,

```

&END

END

END