

### (2)解析モデル形状

図 6.2.1 に異径T字分岐の場合の解析モデルの形状と計算メッシュを示す。直進管の出口側と分岐管は、分岐部における止水域や逆流域の影響が出口へ及ばない様に、6D (D は管径) 程度と十分に長くした。

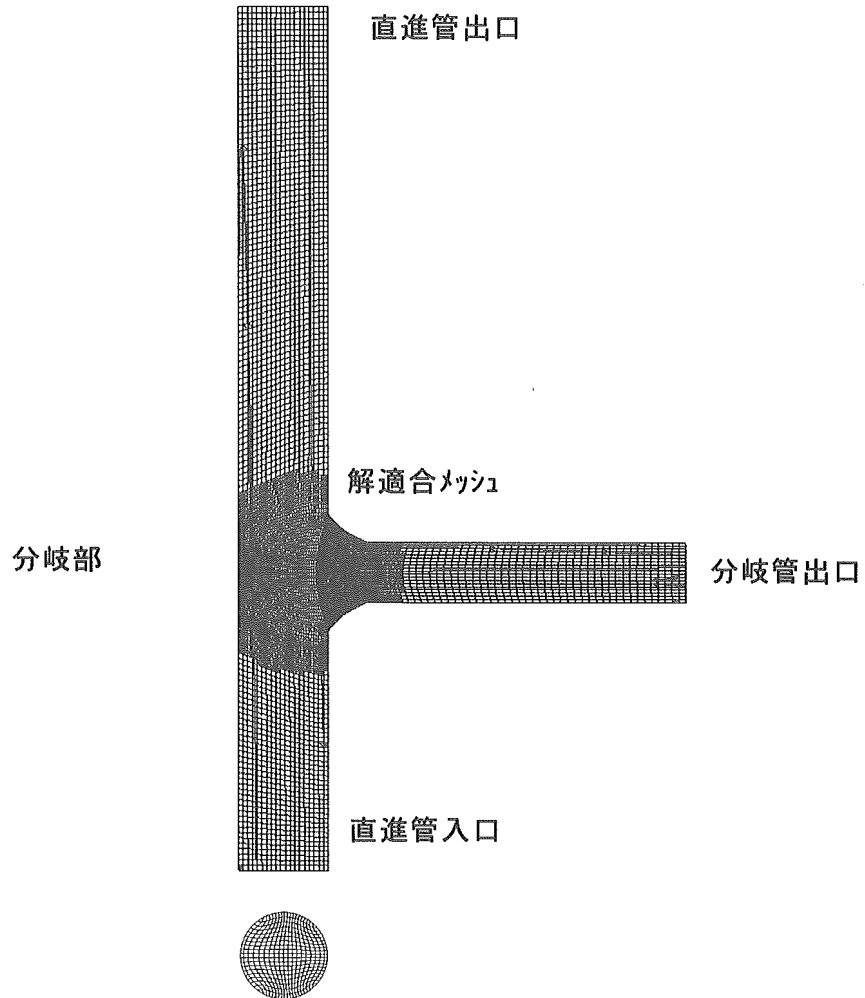


図 6.2.1 異径T字分岐の解析モデルの形状と計算メッシュ

### (3)メッシュ

メッシュ数は 92000 (直進管  $20 \times 20 \times 160$ 、分岐管  $20 \times 20 \times 70$ ) とした。また、分岐部とその下流については止水域や剥離域を十分に捉えるために、解適合メッシュ法等により適宜、メッシュを細かくした。

(4)境界条件

①直進管入口

直進管入口のレイノルズ数  $Re$  は  $10^4$  より大きく、十分に発達した乱流の状態のため、図 6.2.2 の様な指数法則 (1/7 乗則) の流速分布を与える。(なお、入口で本流速分布を与えることにより、分岐部での止水域等も明瞭に捉えることができた。)

$$u = u_{\max} \left( \frac{R - \chi}{R} \right)^n$$

$$n = \frac{1}{7} \quad \left( \frac{1}{7} \text{ 乗則} \right)$$

$$u_{\max} / u_{\text{mean}} = 1.224$$

$u_{\text{mean}}$ : 平均流速

(表 6.2.1 の Va)

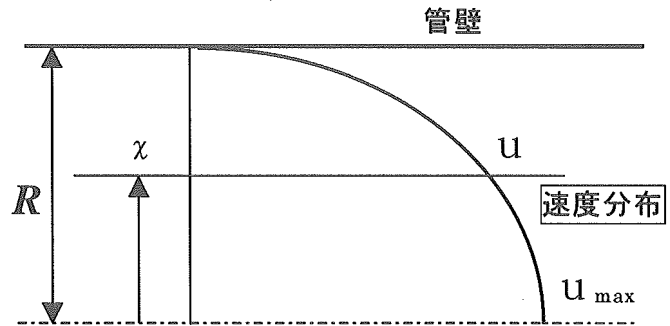


図 6.2.2 直進管入口の速度分布 (境界条件)

②分岐管出口

表 6.2.1 の流速  $V_c$  (平均流速) を用いる。

③直進管出口

自由流出とする。

3) 流れ解析結果と考察 (同径 T 字分岐)

(1)同径 T 字分岐 ケース 1

解析結果を図 6.2.3 に、速度ベクトルを図 6.2.4 に示す。なお速度ベクトル図では、流れ方向を明瞭に示すため、ベクトルの長さは流速に関わらず一定とし、色諧調により流速を示した。

- ① 等流速分布 (垂直断面図、水平断面図) より、分岐部の管底面近傍に、流速  $0.2\text{m/s}$  以下の低流速域が生じることが分かる。基礎実験結果では、 $0.3\text{m/s}$  以下では濁質が完全停止するため、この低流速域では濁質はほとんど流れず、手前に堆積すると考えられる。
- ② 等流速分布 (水平断面図) を見ると、主流 (壁から少し離れた所から管中心にかけての速い流れ) は、速度を保ちながら、分岐管へ流入する。
- ③ 垂直断面での流線を見ると、管壁付近の主流は直進側へは流れず、ほとんどが分岐管へ流入する。この主流が低流速域の手前の管底に堆積している濁質を巻き込み、分岐管に流すため、直進方向には濁質が流れないと考えられる。

また垂直断面の流線を見ると壁付近の主流がほとんど分岐管へ流入するため、直進管の分岐部下流側では、管路中央部の流線が拡大している。即ち拡大流路 (ディフューザ) 内相当の流れとなっており、この部分での大きな減速と圧力上昇が低流速域を発達させていると思われる。

- ④ 速度ベクトル図を見ると、低流速域では逆流が発生している。実験の際、分岐部下流側の濁質が上流側へ移動する現象が確認されたが、この逆流が原因だと思われる。

## (2)同径T字分岐 ケース2

解析結果を図6.2.5に示す。

- ① 等流速分布（垂直断面図）より、分岐部の管底面近傍に、ケース1より小さいが流速  $0.2\text{m/s}$  以下の低流速域が生じていることが分かる。そのため濁質は直進方向へ流れにくくなっているが、ケース1に比べて、直進方向にも多少、濁質が流れていくものと考えられる。
- ② 等流速分布（水平断面図）を見ると、主流は、速度を保ちながら直進側出口側に流れている。しかし、垂直断面での流線を見ると、管底面付近の流線は分岐部の直進方向下流側では少なく、ケース1と同様に、管底面の流れは分岐管に流れ込んでいることが分かる。そのため管底部に堆積している濁質は、流線に沿って分岐管方向に流入すると考えられる。
- ③ 垂直断面での流線から、分岐管内には一对の双子渦(2次流れ)が生じていることが分かる。この双子渦は、曲がり管等で遠心力により生じる渦と同じものであり、分岐部で流線が曲がることによる遠心力で生じると思われる。

## (3)同径T字分岐 ケース3

解析結果を図6.2.6に示す。

- ① 等流速分布図（垂直断面図、水平断面図）より、管底面近傍には、ケース2より小さいが流速  $0.2\text{m/s}$  以下の低流速域が生じているため、濁質は直進方向に流れにくくなっている。
- ② 垂直断面の流線を見ると、管底面付近の流線は分岐部の直進方向下流側では少なく、ケース1、2と同様に、管底面の流れは分岐管に流れ込んでいることが分かる。そのため管底部に堆積している濁質は、流線に沿って分岐管方向に流入すると考えられる。しかし、等流速分布（垂直断面図）より  $1.8\text{m/s}$  程度の速い流れが、直進管下流の管中央付近に残り、ケース2に比べて、管底部の直進方向の流れが卓越している。そのため、管底部に堆積している濁質のうち、管中心に近い粒子が直進方向に流れていくものと考えられるため、ケース2よりも濁質が直進方向に流れやすくなっていると思われる。

## 4) 解析結果と考察（異径T字分岐）

### (1)異径T字分岐 ケース1

解析結果を図6.2.7に示す。

- ① 等流速分布（垂直断面図）を見ると、直進管の出口側の底面近傍に、 $0.2\text{m/s}$  以下の低流速域が、 $2.5D$ 以上とかなり広範囲に生じる。基礎実験結果では、 $0.3\text{m/s}$  以下では濁質が完全停止するため、この低流速域では濁質はほとんど流れず、手前に堆積すると考えられる。
- ② 等流速分布（水平断面図）を見ると、主流(壁近傍から少し離れた所から管中心にかけての速い流れ)は、速度を保ちながら分岐管へ流入する。
- ③ 垂直断面の流線を見ると、壁付近の主流がほとんど分岐管へ流入するため、管底面に堆積している濁質は、異径分の段差を乗り越えて流線に沿って分岐管方向に流入すると考えられる。

## (2)異径T字分岐 ケース2

解析結果を図 6.2.8 に示す。

- ① 等流速分布（垂直断面図）を見ると、直進管出口側に低流速域は形成されるが、その発達範囲はケース1よりも小さく、また流速も 0.6m/s 程度と大きいため、管底面の濁質は堆積せずに直進方向に流れると考えられる。
- ② 等流速分布（水平断面図）を見ると、ケース1とは異なり、主流は直進管出口側に速度を保ちながら流れる傾向が高いため、濁質は直進管側に流れやすくなる。
- ③ 垂直断面の流線を見ると、壁付近の主流はケース1にくらべて直進管へ流入する割合が多い。ただし、分岐管内で管壁より中央部の流速が小さくなっていることから、分岐管内での流れはわずかに旋回していることが考えられる。そのため、管底を移動する濁質を巻き込み、濁質が分岐管にわずかに流入すると考えられるが管底面に堆積している濁質が分岐管へ流れるには、異径分の段差を乗り越える必要があるため、ほとんどの濁質が直進方向に流れると考えられる。

## (3)異径T字分岐 ケース3

解析結果を図 6.2.9 に示す。

- ① 等流速分布（垂直断面図、水平断面図）より、1.8m/s 程度の速い流れが、直進管下流の管中央付近に残る。主流の減速による境界層の発達や低流速域が見られない。
- ② 垂直断面の流線を見ると、管底面付近の流線はほとんど直進管に流れ込んでいることが分かる。また、分岐管内の速度分布をみても、分岐管内で旋回はないと考えられるため、管底面に堆積している濁質を巻き込む流れは小さいと思われる。よって濁質は直進管出口方向に流れ、分岐管方向には流入しないものと考えられる。



2.50e+00  
 2.38e+00  
 2.25e+00  
 2.13e+00  
 2.00e+00  
 1.88e+00  
 1.75e+00  
 1.63e+00  
 1.50e+00  
 1.38e+00  
 1.25e+00  
 1.13e+00  
 1.00e+00  
 8.75e-01  
 7.50e-01  
 6.25e-01  
 5.00e-01  
 3.75e-01  
 2.50e-01  
 1.25e-01  
 0.00e+00

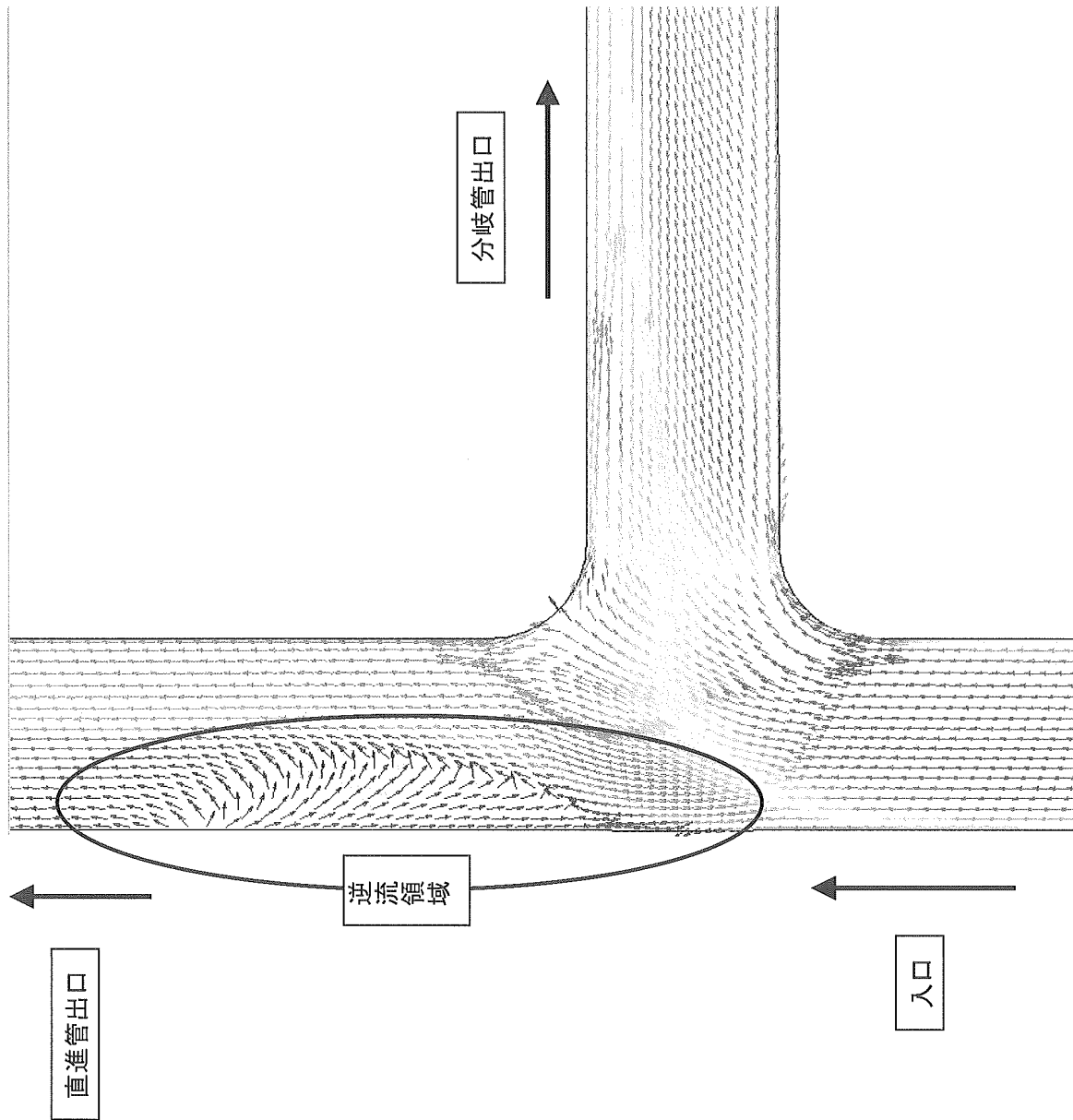


図 6.2.4 同径T字分岐ケース1 速度ベクトル (分岐部水平断面)

【流速の大きさ】

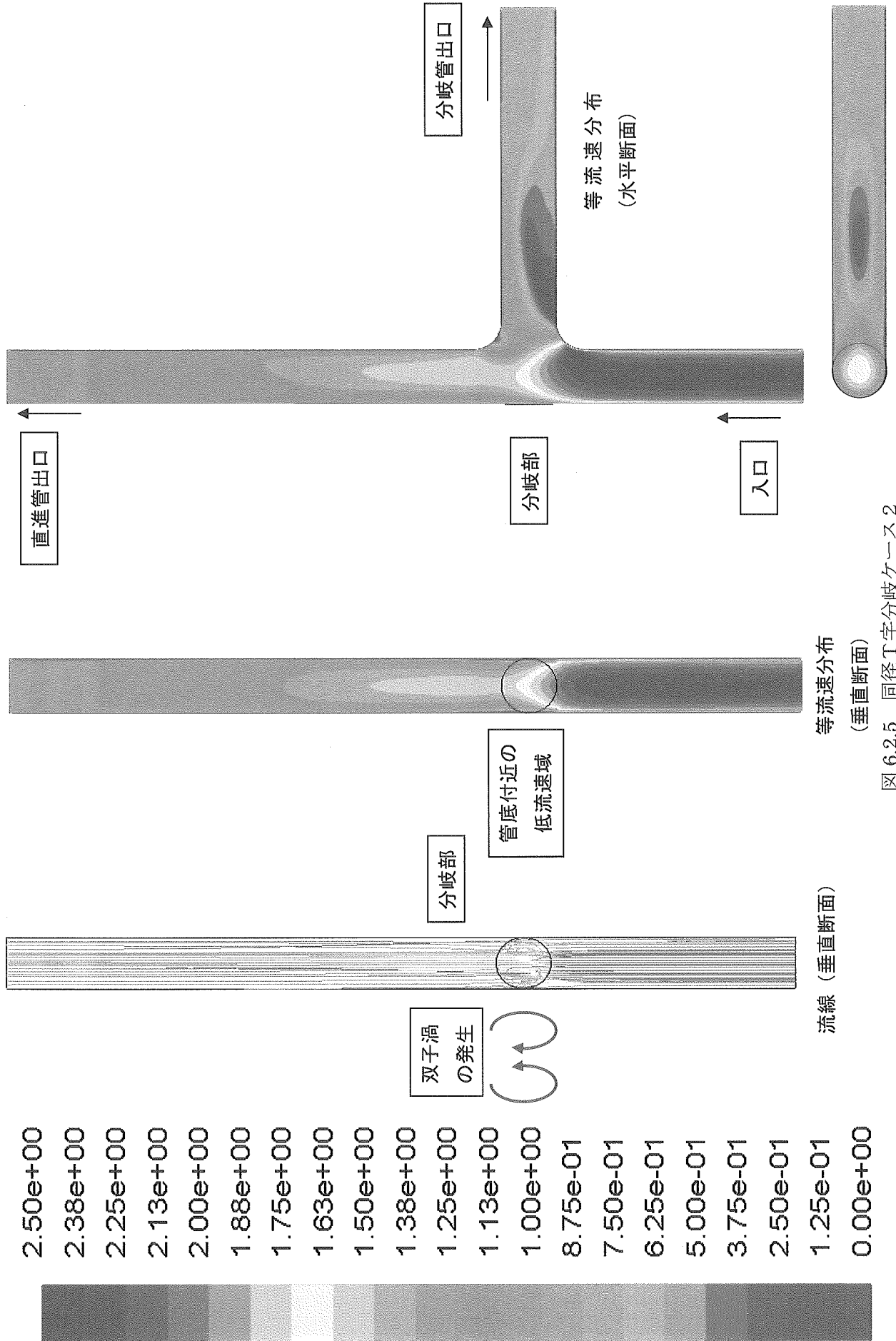


図 6.2.5 同径 T 字分岐ケース 2

【流速の大きさ】

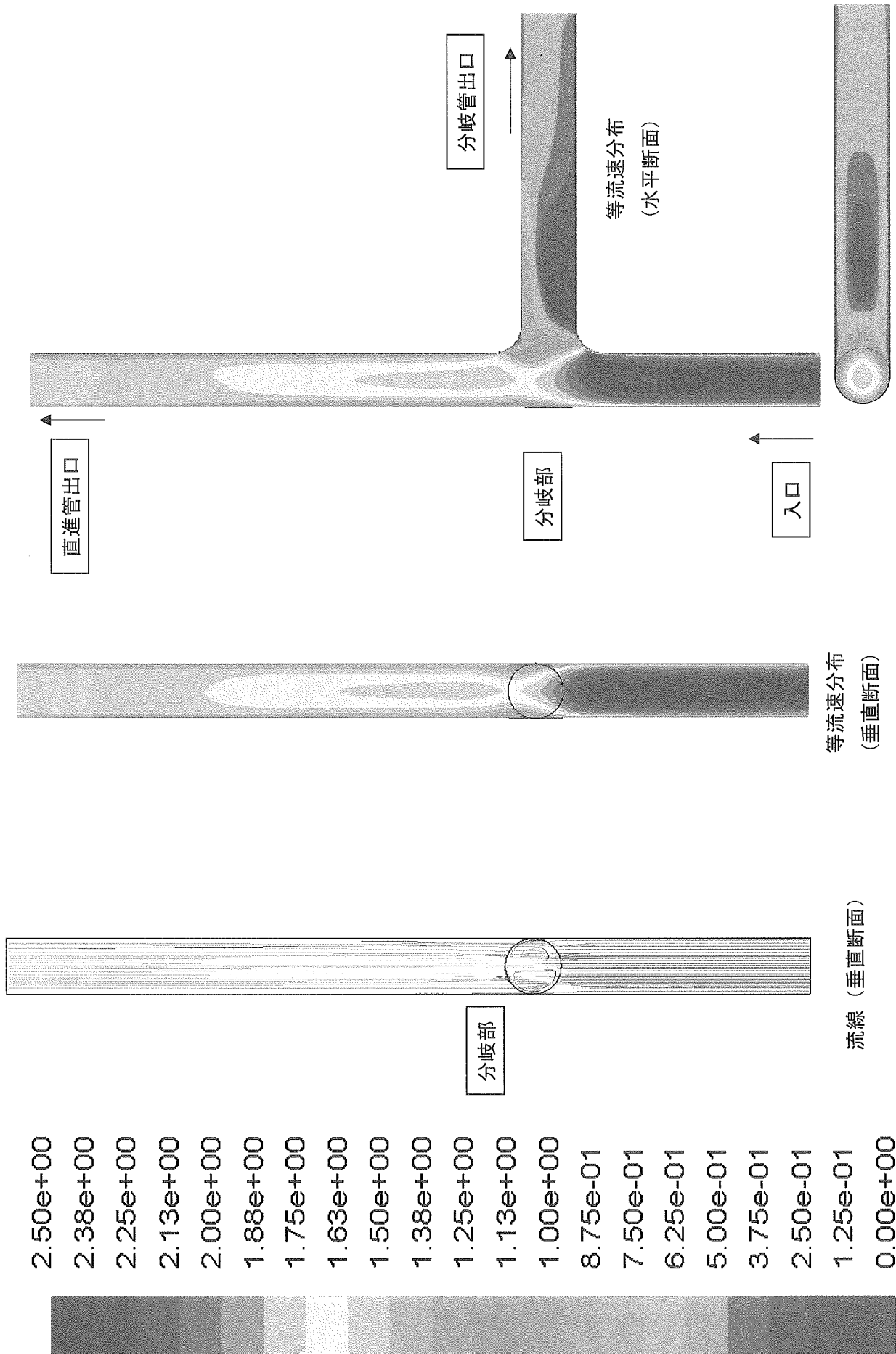


図 6.2.6 同径 T 字分岐ケース 3



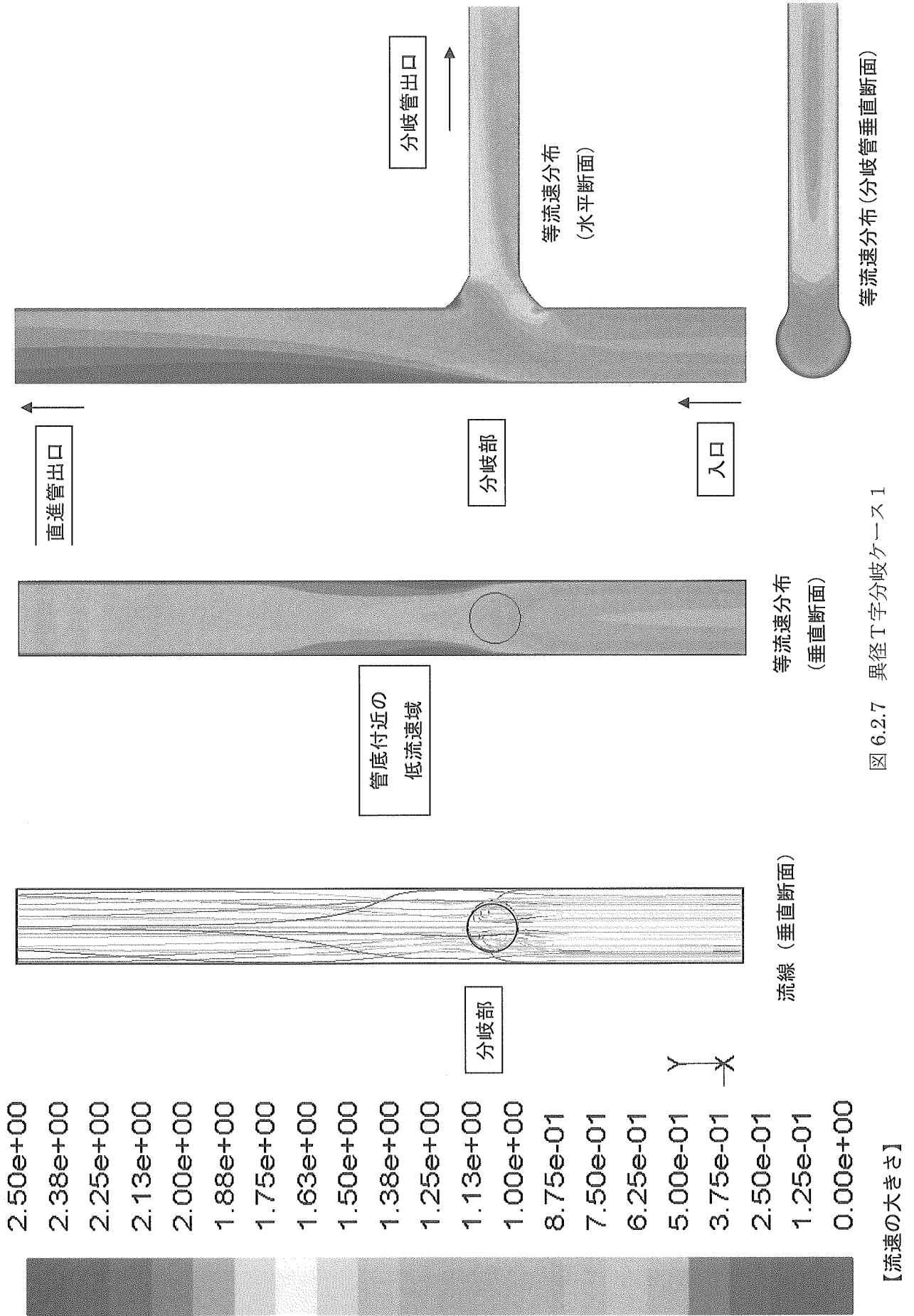


図 6.2.7 異径T字分岐ケース 1

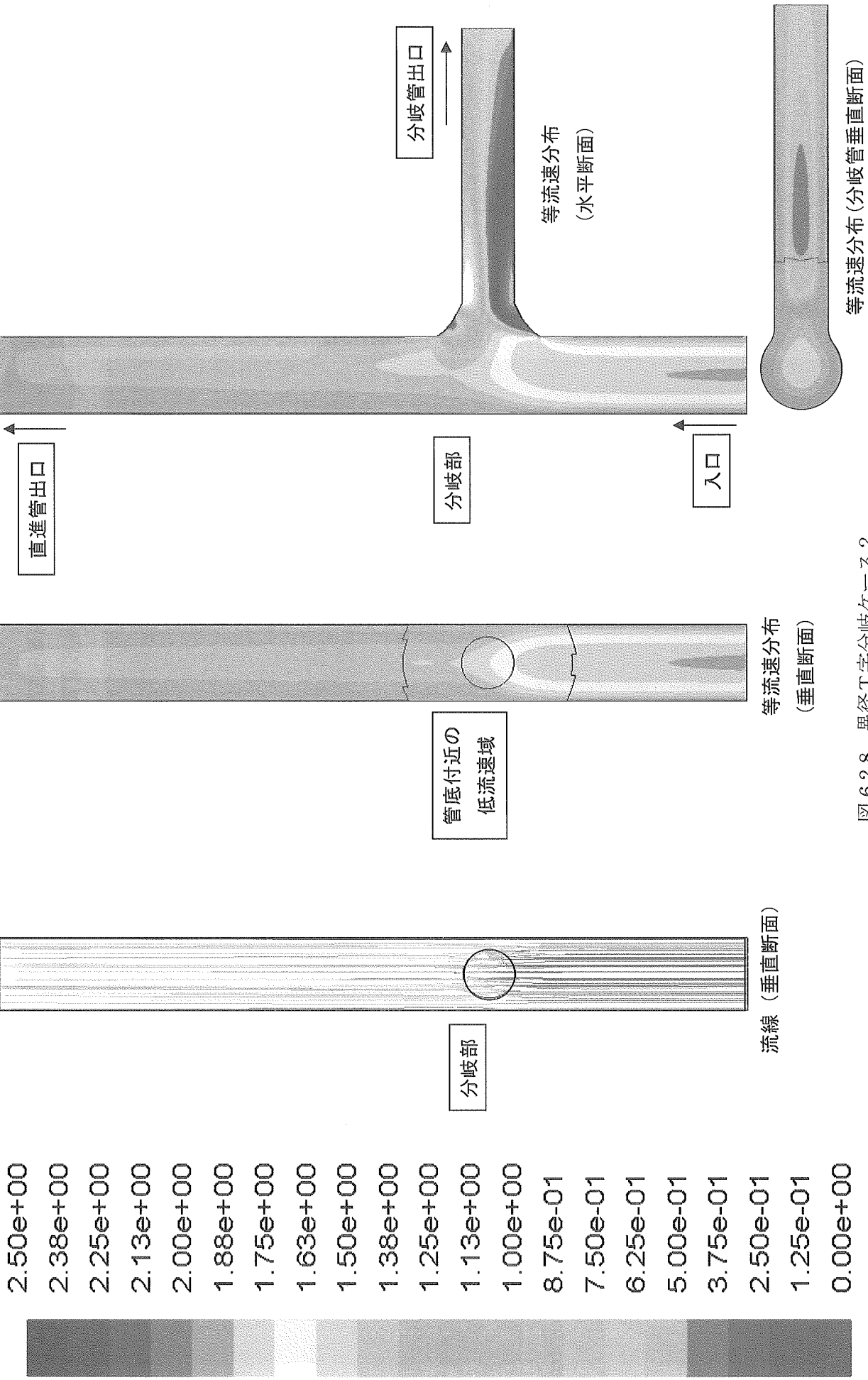


図 6.2.8 異径 T 字分岐ケース 2

【流速の大きさ】

2.50e+00  
 2.38e+00  
 2.25e+00  
 2.13e+00  
 2.00e+00  
 1.88e+00  
 1.75e+00  
 1.63e+00  
 1.50e+00  
 1.38e+00  
 1.25e+00  
 1.13e+00  
 1.00e+00  
 8.75e-01  
 7.50e-01  
 6.25e-01  
 5.00e-01  
 3.75e-01  
 2.50e-01  
 1.25e-01  
 0.00e+00

【流速の大きさ】

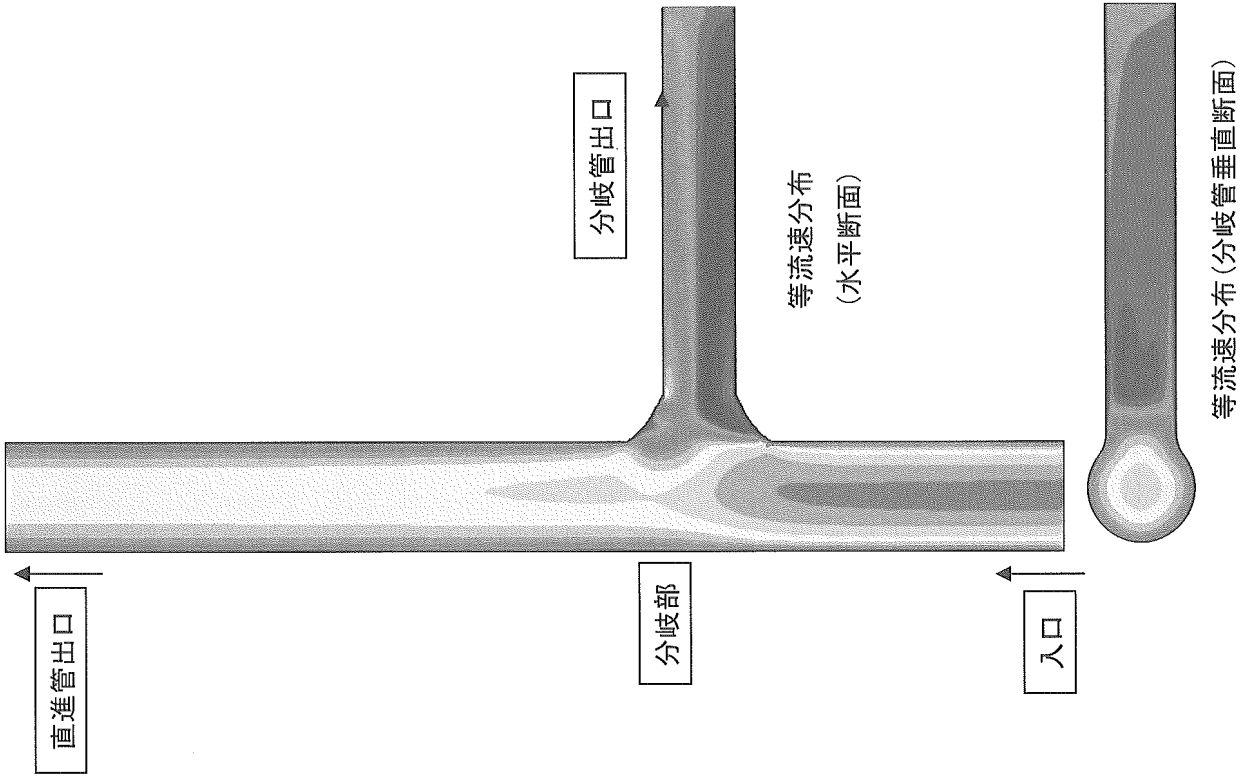
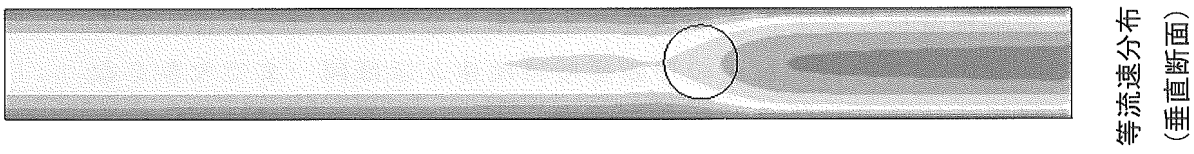
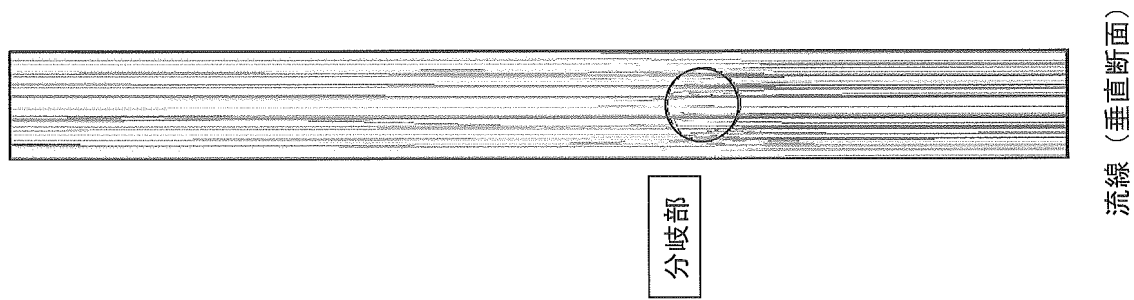


図 6.2.9 異径 T 字分岐ケース 3

## 5) T字分岐の各流れ場内での粒子追跡

同径と異径の2種類のT字分岐について、流れ場の解析を行うことにより、濁質分配比が違う理由が説明できた。そこで流れ場に粒子を注入して粒子軌跡の挙動を見た。

なお本解析ソフトの粒子追跡モデルは、大気中や水中の低濃度汚染物質の移流や拡散、あるいはエンジンやゴミ焼却炉内の油渦やスス等の微小粒子の挙動を追うことは十分可能である。しかし、下記のような問題点があり、管路底を掃流砂のように移動する濁質の挙動を追うには十分なモデルではない。

- ① 質点モデルであり、直径 0 mm の点として扱うため、ある大きさを持つ粒子周りに生じる圧力分布は求まらない。
  - ・ 流体力としては、粒子直径の設定値から球の抗力を求める。
  - ・ 粒子周りの流速は一定と仮定しており、壁付近や物体後方に生じる速度勾配の大きいせん断流内での流体力は、正確に求まらない。
- ② 壁面や粒子間の摩擦力は考慮できない。
  - ・ 河床を転動や滑動する流砂の挙動は複雑だが、河川工学では実験と掃流理論を併用した詳細な研究により、そのメカニズムや各種特性量や輸送量を求めており、濁質に働く主な力は流体力（抗力と揚力）と摩擦力である。
  - ・ 粒子径を数 mm 程度にすると、水から受ける流体力を摩擦力でつり合わせることができない。このため粒子の移動速度は流速とほぼ同一まで大きくなり、その慣性力により粒子は分岐部を直進して、分岐管へ曲がれない。そこで本解析では以下のとおり、抗力を求めるための粒子直径を小さく設定した。
- ③ 水中の砂や空気中の液滴のように、粒子群が流れ場から大きな運動量を奪って流れ場を大きく変える場合は、計算の収束性や精度が悪くなる。

粒子群が流れ場から大きな運動量を奪うと、その周囲の速度勾配が大きくなる。また重力や浮力等の体積力が働く場合も多いので、粒子の周辺のメッシュを十分に細かくしないと、収束性や計算精度が悪くなる。

上記課題を考慮し、注入する微小粒子の条件を以下のとおりとした。

- ・ 比重            2            (濁質と同一の比重)
- ・ 粒子直径      0.1 mm    (球の抗力を求めるための設定値)
- ・ 粒子個数      100 個
- ・ 注入位置      直進管入口の管底、幅 20 mm

粒子追跡結果から得られた濁質分配比を表 6.2.2 に、粒子軌跡を図 6.2.10 から図 6.2.12 に示す。なお、粒子移動速度の絶対値を軌跡の色で示した。これらの結果から以下のことが分かった。

表 6.2.2 粒子追跡から得られた分配比

	解析 ケース	直進方向分配比	
		粒子追跡	実験
同径 T 字分岐 $\phi 100 \times \phi 100$	1	0.00	0.025
	2	0.15	0.258
	3	1.00	0.375
異径 T 字分岐 $\phi 150 \times \phi 100$	1	0.00	0.000
	2	1.00	0.820
	3	1.00	0.960

- ① 表 6.2.2 の様に、直進管出口での濁質分配比は同径の解析ケース 3 を除いて、実験結果と定量的にかなり良く対応する。
  - ・ 特にケース 2 では、同径 T 字分岐の方が異径 T 字分岐に比べて濁質分配比が小さい。同径 T 字分岐の方が分岐管へ濁質が多く流れ込む現象を、解析で良く再現できている。
  - ・ 同径の解析ケース 3 については、濁質は分岐管方向に移動する傾向はみられたが、分岐管側へ流れ込むまでには至らなかった。この原因は、解析条件設定が不十分で実験時の砂の挙動を正確に再現できていないことが考えられる。
- ② 直進管内では粒子は管底を移動しており粒子移動速度は小さいが、分岐管内で粒子は複雑な軌跡を示している。特に同径 T 字分岐のケース 2 でその現象が顕著で、図 6.2.11 に示すように粒子は分岐管の管壁に押付けられ、らせん状に旋回している。これは前述の双子渦（2 次流れ）の影響であると思われる。

## 6) 結論

- ① 同径と異径の T 字分岐において基礎実験的な解析を行ったが、解析による流れ場は、例えばケース 1 で見られる低流速域及び逆流発生のように、実験観察結果とある程度対応している。
- ② 更に実験において、同径 T 字分岐と異径 T 字分岐で分配特性が異なった理由をある程度説明することができた。
- ③ 汎用流れ解析ソフト FLUENT の粒子追跡モデルは、管路内の濁質の掃流砂的挙動を追うには不十分だが、適切な解析条件を設定することにより、濁質のマクロ的な挙動をある程度再現することができた。

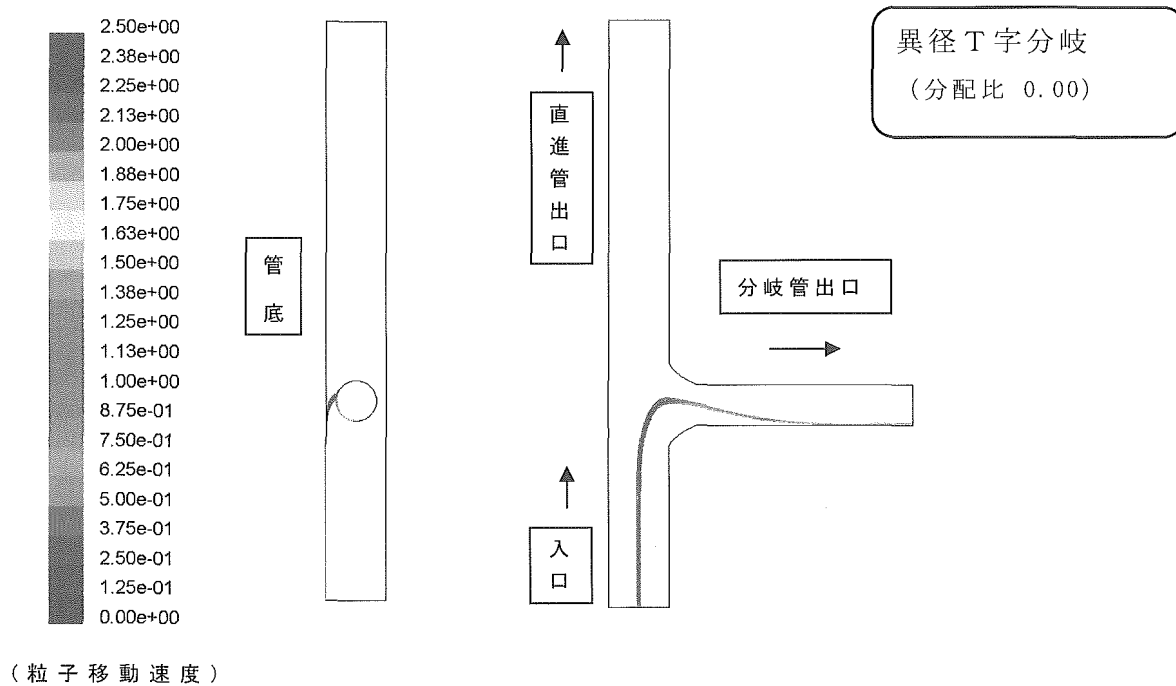
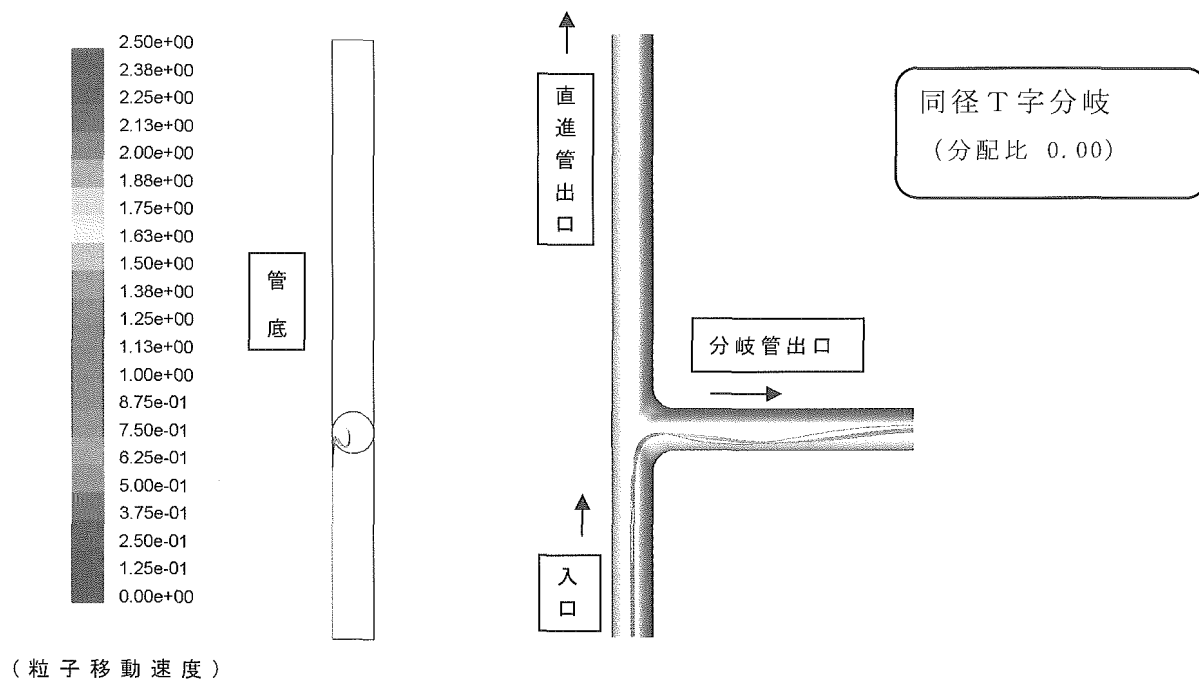


図 6.2.10 粒子追跡結果 ケース 1

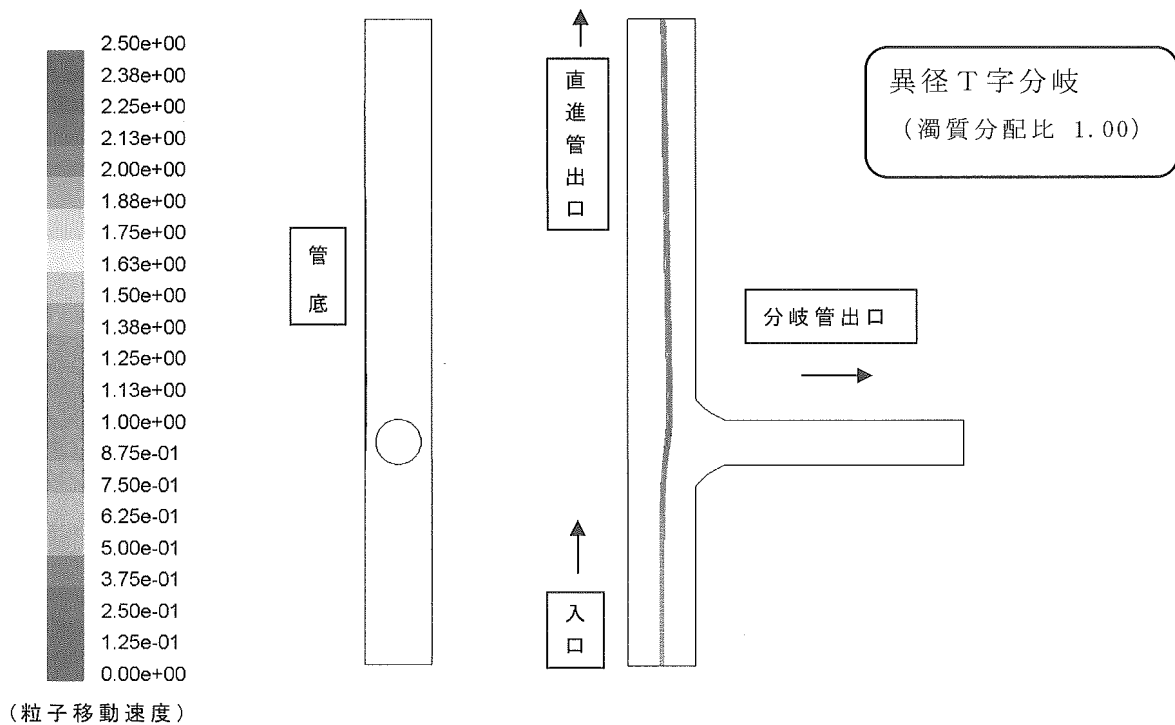
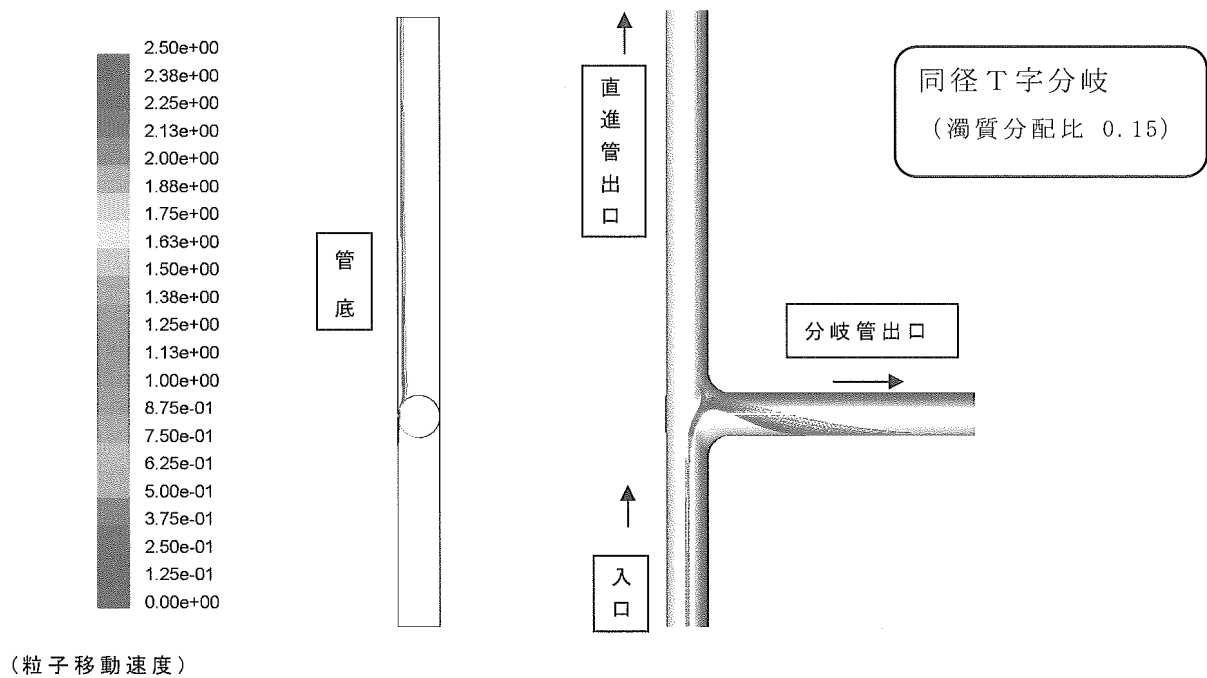


図 6.2.11 粒子追跡結果 ケース 2

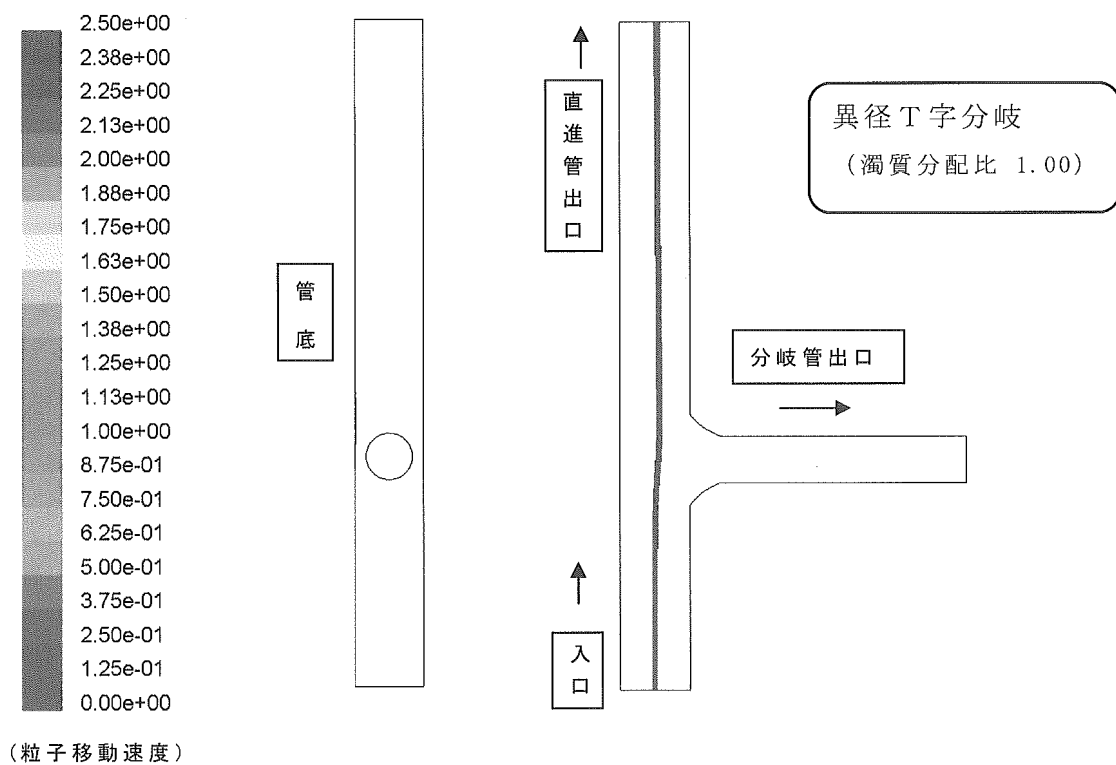
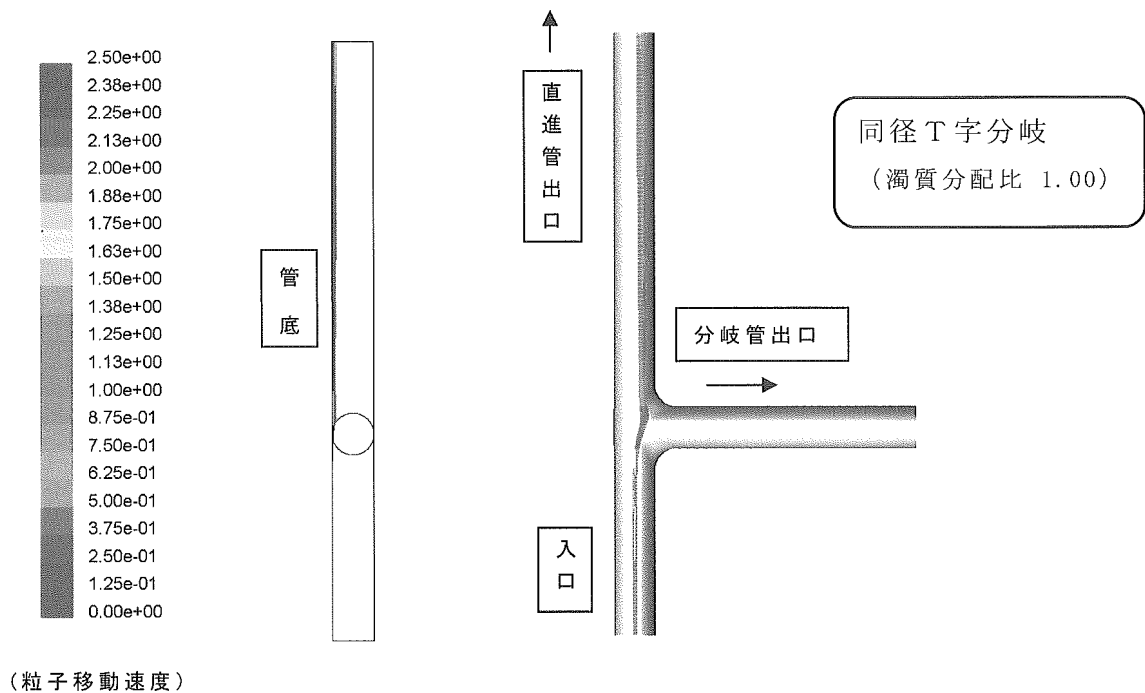


図 6.2.12 粒子追跡結果 ケース 3



### 6.3 管網における濁質分布状況の推定

「6.1 濁質分配比の推定」で求めた近似式を用いて、管網での基礎実験である枝状管網、田型管網（水平注入／取出し）、田型管網（斜め注入／取出し）の濁質分配量を推定する。

#### 6.3.1 仮定条件

濁質分配量の推定にあたり仮定条件を定めた。

- ① T字分岐1  $\phi 100 \times \phi 100$  の濁質分配比  $B/A$  は、分岐部への流入流速によらず、「6.1 濁質分配比の推定 1)」で求めた  $V_a = 1.5\text{m/s}$  以下の近似式(式 1)を適用する。
- ② T字分岐1  $\phi 1.50 \times \phi 100$  の濁質分配比  $B/A$  は、分岐部への流入流速によらず、「6.1 濁質分配比の推定 2)」で求めた近似式(式 3)を適用する。
- ③ T字分岐2 の濁質分配比  $B/A$  は、流速比  $V_b/V_a$  と同じとする。
- ④ 十字分岐（1 流入／3 流出）  $\phi 1.50 \times \phi 100$  の濁質分配比  $B/A$  は、分岐部への流入流速によらず、「6.1 濁質分配比の推定 3)」で求めた近似式(式 3)を適用する。また、 $V_c$ 、 $V_d$  の分配比は流速比と同じとする。
- ⑤ 十字分岐（1 流入／3 流出）で、流出部のどれかの流速が  $0\text{m/s}$  の場合は、T字分岐とみなす。
- ⑥ 十字分岐（2 流入／2 流出）は、分岐部への流入流速によらず、「6.1 濁質分配比の推定 4)」で求めた近似式(式 1,3)を適用する。流入流速の遅い方（図 6.3.1 では C）の影響は無視し T字分岐1 と同様と見なし濁質分配比を算出する。但し、流入流速を無視した方（C）の流量を他方（A）に加えた補正流速により濁質分配比  $B/A$  を算出する。
- ⑦ 濁質（中砂）は、「5.2 管路基礎実験 5.2.2 濁質沈降実験」より、 $\phi 150$  では流速  $0.479 \sim 0.387\text{m/s}$  の間で、 $\phi 100$  では流速  $0.396 \sim 0.316\text{m/s}$  の間で大部分が停止する。濁質の停止速度は、管網基礎実験結果を考慮し表 6.3.1 と仮定した。

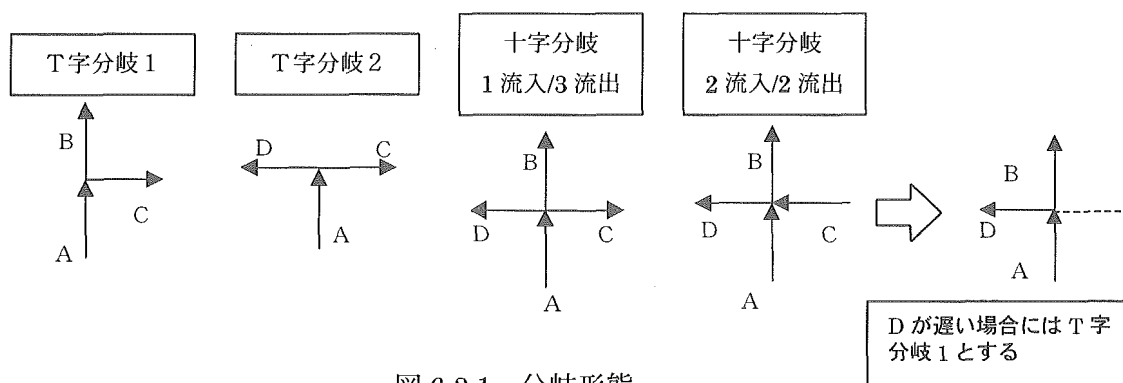


図 6.3.1 分岐形態

表 6.3.1 濁質停止速度

管 網	口 径	
	$\phi$ 100	$\phi$ 150
枝状分岐	0.36m/s	0.43m/s
田型 (水平)	0.36m/s	0.43m/s
田型 (斜め)	0.35m/s	0.43m/s

※  $\phi$  100 : 0.36m/s は 0.316~0.396m/s の中間値

※  $\phi$  150 : 0.43m/s は 0.387~0.479m/s の中間値

### 6.3.2 濁質分配量推定手順

濁質分配量は以下の手順で推定した。

- ①管網基礎実験の結果より、管網内の各管路の流速を算出する。
- ②各分岐部の分岐形態（T字、十字）及び流速比より、仮定条件に基づき濁質分配比を定める。
- ③実験で投入した濁質投入量を用いて、上流側から順番に各分岐部での濁質分配量を求める。
- ④管路流速が濁質停止速度未満であれば、流入した濁質量を管路内滞留濁質量とする。
- ⑤実験管路で回収した手順に基づき、管路毎の濁質量を合計する。

### 6.3.3 推定結果及び考察

#### (1) 枝状分岐

濁質推定量と実験で得られた濁質量の比較を表 6.3.2 に示す。

濁質推定量は、実験の濁質回収作業上、同一に回収された管路の濁質量を合計し、更に実験の濁質回収率で補正し実験値と比較した。

推定された濁質量は、実験結果と全般的に良く一致した。特に、実験で濁質が多く分配された管路⑧+⑫及び管路⑩には、推定でも多くの濁質が分配されており、定量的にも良く一致している。推定では、濁質量が 0 の管路にも実験では微量の濁質が回収されたが、これは継手部や分岐部などに留まった濁質が回収時の速い流速のため回収されたと考えられる。

表 6.3.2 枝状分岐濁質分配量

管路	推定濁質量(g)			実験濁質量(g)
	管路毎	実験回収管路毎	実験回収率補正	
管路①	0	0	0	27.51
管路②	0	②+③ 0	②+③ 0	②+③ 76.37
管路③	0	②+③ 0	②+③ 0	管路②+管路③
管路④	0	0	0	0.24
管路⑤	0	0	0	26.45
管路⑥	0	0	0	16.45
管路⑦	0	0	0	24.27
管路⑧	39.82	⑧+⑫ 504.00	⑧+⑫ 399.03	⑧+⑫ 300.11
管路⑨	4.00	4.00	3.17	27.04
管路⑩	17.71	⑩+⑬ 17.71	⑩+⑬ 14.02	⑩+⑬ 25.53
管路⑪	474.29	474.29	375.50	267.75
管路⑫	464.18	管路⑧+管路⑫	管路⑧+管路⑫	管路⑧+管路⑫
管路⑬	0	管路⑩+管路⑬	管路⑩+管路⑬	管路⑩+管路⑬
合計	1000	1000	791.72	791.72

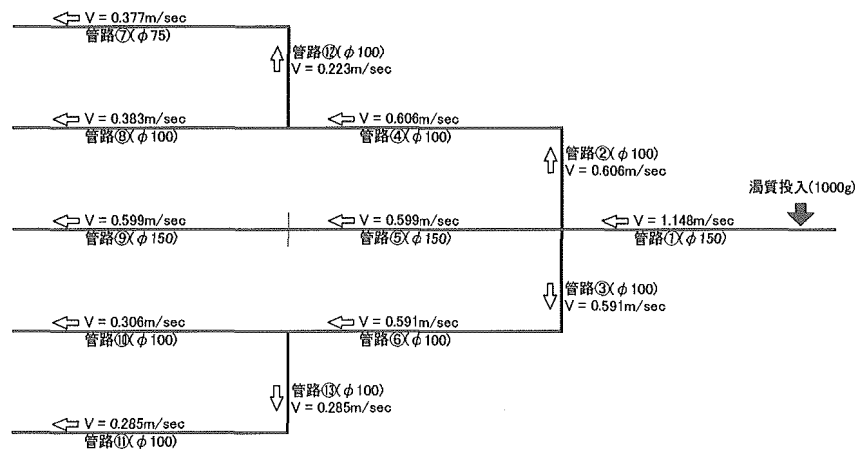


図 6.3.2 枝状分岐実験流速分布

(2)田型管網（水平注入／取出し）

濁質推定量と実験で得られた濁質量の比較を表 6.3.3 に示す。

推定量と実験値は概ね良く一致した。特に実験で濁質が多く堆積した管路⑤、⑨には、推定でも多くの濁質が堆積した。

なお、管路②は流速 0.443m/s であり、推定上では濁質は堆積しないが、実験では 302.46g の濁質堆積が見られた。実験時間を長くすれば、管路②に堆積している濁質は管路⑤へ移動するため、最終的に管路⑤へは  $302.46 + 667.89 = 970.35\text{g}$  の濁質が堆積すると考えられる。

表 6.3.3 田型管網（水平注入／取出し）濁質分配量

管路	推定濁質量(g)			実験濁質量(g)
	管路毎	実験回収管路毎	実験回収率補正	
管路①	138.00	138.00	119.49	168.95
管路②	0	0	0	302.46
管路③	0	0	0	52.97
管路④	0	④+⑥ 169.86	④+⑥ 147.07	④+⑥ 148.24
管路⑤	765.00	765.00	662.38	667.89
管路⑥	169.86	管路④+管路⑥	管路④+管路⑥	管路④+管路⑥
管路⑦	0	0	0	27.65
管路⑧	0	0	0	51.28
管路⑨	1927.14	1927.14	1668.62	1052.12
管路⑩	0	0	0	6.91
管路⑪	0	⑪+⑬ 0	⑪+⑬ 0	⑪+⑬ 32.29
管路⑫	0	0	0	6.00
管路⑬	0	管路⑪+管路⑬	管路⑪+管路⑬	管路⑪+管路⑬
末端	0	0	0	80.8
合計	3000	3000	2597.57	2597.57

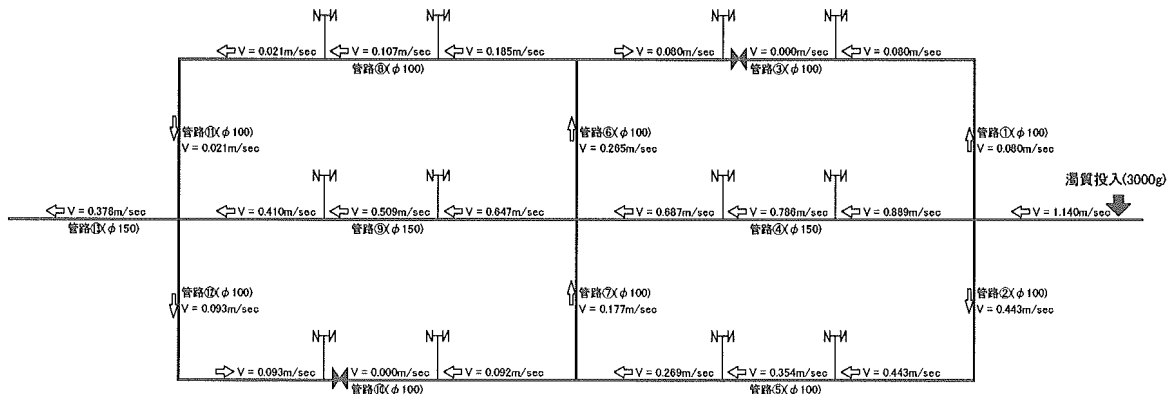


図 6.3.3 田型管網（水平注入／取出し）実験流速分布