

定常にぼみ渦に関するガス巻込み判定手法の検証解析

(研究報告)

2004年4月



核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

2004年4月

定常くぼみ渦に関するガス巻込み判定手法の検証解析

(研究報告)

堺 公明^{*1} 岩崎 隆^{*2} 江口 譲^{*3} 大島 宏之^{*1}

要旨

ナトリウム冷却炉の冷却材中への気体混入（エントレインメント）は、炉心の安定な運転特性に影響を及ぼす懸念があり、その発生を十分に制限する必要がある。特に、自由液面からのガス巻込み現象は、カバーガスの連続的なエントレインメントを生じる可能性があり、その発生を精度よく評価することが重要である。

本研究は、自由液面のくぼみ渦によるガス巻込み現象について、数値解析と伸長渦理論の組合せによる判定手法を提案するものである。その一環として、特に、従来、多くの実験データが取得されている自由液面の定常くぼみ渦に対する適用を行い、その予測性について検証解析を実施した。

その結果、数値解析による下降流速勾配と循環を用いて、伸長渦理論により算出したガスコア長さは、守屋及び酒井の試験結果のガスコア長さを保守的に予測することが明らかになった。また、定常くぼみ渦に関する Baum のガス巻込み試験について、ガス巻込みが発生するガスコア長さを評価し、ガスコア長さによる評価が概ね可能である見通しを得た。

*1 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr, *2 株式会社 NESI, *3 電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域

JNC TN9400 2004-017

April, 2004

Validation of Numerical Design Method for Gas Entrainment from a Steady Free Surface Vortex

Takaaki Sakai^{*1}, Takashi Iwasaki^{*2}, Yuzuru Eguchi^{*3}, Hiroyuki Ohshima^{*1}

Abstract

Numerical analysis was performed to validate a design method for a gas entrainment occurrence from a steady free surface vortex. The design method is composed of two procedures. The first procedure is a three-dimensional numerical analysis for the free surface vortex to evaluate circulation value and vertical velocity gradient in the vortex. The second is a prediction of a gas core length that can be calculated by using “the expanding-vortex theory” with the circulation and the vertical velocity gradient. To validate the design method, predicted gas core lengths were compared with Moriya and Sakai’s experimental data. In addition, gas entrainment occurrence was also compared with Baum’s gas entrainment experiments. As a result, it was clarified that the design method predicted the gas core lengths sufficiently conservative to the experimental data. In conclusion, it is prospective to evaluate the gas entrainment occurrence by the criterion of gas core length that is predicted by the numerical simulation and “the expanding-vortex theory”.

*1: Thermal-Hydraulics Research Group, OEC, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), *2: NESI Inc., *3: Central Research Institute of Electric Power Industry

目 次

1 緒 言 -----	1
2 伸長渦理論の検討 -----	2
2.1 伸長渦理論の導出-----	2
2.2 試験結果への伸長渦理論の適用-----	3
2.2.1 守屋の試験 -----	3
2.2.2 酒井らの試験 -----	4
2.2.3 伸長渦理論の適用 -----	4
3 ガスコア長さ評価解析 -----	5
3.1 守屋体系の解析-----	5
3.1.1 解析モデル及び解析ケース -----	5
3.1.2 解析結果 -----	5
3.2 酒井体系の解析-----	6
3.2.1 解析モデル及び解析ケース -----	6
3.2.2 解析結果 -----	7
4 ガス巻込み評価解析 -----	9
4.1 解析モデル及び解析ケース -----	9
4.2 解析結果 -----	9
5 結 言 -----	11
参考文献 -----	12
謝辞 -----	13

表リスト

表 3.1-1 守屋、酒井体系の解析条件	-----	14
表 3.1-2 守屋体系の解析結果の精度評価	-----	14
表 4.1 Baum 体系の解析条件	-----	14

図リスト

図 2.2.1-1	守屋の試験装置の概要	15
図 2.2.1-2	守屋の試験でのくぼみ渦の状況	15
図 2.2.1-3	守屋の試験での周方向流速分布	16
図 2.2.1-4	守屋の試験での周方向循環分布	16
図 2.2.1-5	守屋の試験での下降流速分布	17
図 2.2.2-1	酒井らの試験装置の概要	18
図 2.2.2-2	酒井らの試験でのガスコア長さ	18
図 2.2.2-3	酒井らの試験での流量と循環の関係	19
図 2.2.2-4	酒井らの試験での下降流速分布	19
図 2.2.3	試験結果と伸長渦理論の比較	20
図 3.1.1	守屋体系のメッシュ分割	21
図 3.1.2-1	$z=0.15\text{m}$ での周方向流速及び循環分布	22
図 3.1.2-2	$z=0.25\text{m}$ での周方向流速及び循環分布	23
図 3.1.2-3	$z=0.35\text{m}$ での周方向流速及び循環分布	24
図 3.1.2-4	軸方向流速分布	25
図 3.2.1	酒井体系のメッシュ分割	26
図 3.2.2-1a	$d=19.8\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	27
図 3.2.2-1b	$d=19.8\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	28
図 3.2.2-1c	$d=19.8\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	29
図 3.2.2-2a	$d=19.8\text{mm}$, $Q=7(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	30
図 3.2.2-2b	$d=19.8\text{mm}$, $Q=7(\text{l}/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	31
図 3.2.2-2c	$d=19.8\text{mm}$, $Q=7(\text{l}/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	32
図 3.2.2-3a	$d=19.8\text{mm}$, $Q=10(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	33
図 3.2.2-3b	$d=19.8\text{mm}$, $Q=10(\text{l}/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	34
図 3.2.2-3c	$d=19.8\text{mm}$, $Q=10(\text{l}/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	35
図 3.2.2-4a	$d=30.0\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	36
図 3.2.2-4b	$d=30.0\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	37
図 3.2.2-4c	$d=30.0\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	38
図 3.2.2-5a	$d=30.0\text{mm}$, $Q=7(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	39
図 3.2.2-5b	$d=30.0\text{mm}$, $Q=7(\text{l}/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	40
図 3.2.2-5c	$d=30.0\text{mm}$, $Q=7(\text{l}/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	41
図 3.2.2-6a	$d=30.0\text{mm}$, $Q=15(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	42
図 3.2.2-6b	$d=30.0\text{mm}$, $Q=15(\text{l}/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	43
図 3.2.2-6c	$d=30.0\text{mm}$, $Q=15(\text{l}/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	44
図 3.2.2-7a	$d=40.9\text{mm}$, $Q=5(\text{l}/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	45

図 3.2.2-7b $d=40.9\text{mm}$, $Q=5(1/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	46
図 3.2.2-7c $d=40.9\text{mm}$, $Q=5(1/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	47
図 3.2.2-8a $d=40.9\text{mm}$, $Q=7(1/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	48
図 3.2.2-8b $d=40.9\text{mm}$, $Q=7(1/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	49
図 3.2.2-8c $d=40.9\text{mm}$, $Q=7(1/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	50
図 3.2.2-9a $d=40.9\text{mm}$, $Q=15(1/\text{min})$, $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布	51
図 3.2.2-9b $d=40.9\text{mm}$, $Q=15(1/\text{min})$, $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布	52
図 3.2.2-9c $d=40.9\text{mm}$, $Q=15(1/\text{min})$, $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布	53
図 3.2.2-10 試験と解析の循環の比較	54
図 3.2.2-11 循環の精度評価	55
図 3.2.2-12 試験と解析の下降流速分布の比較	56
図 3.2.2-13 試験と解析の下降流速勾配の比較及び精度評価	57
図 3.2.2-14 試験と解析の粘性コア半径の比較及び精度評価	58
図 3.2.2-15 出口配管のメッシュ分割	59
図 3.2.2-16 ガスコア長さの精度評価	60
図 3.2.2-17 流量とガスコア長さの関係	61
図 4.1-1 Baum のガス巻込み実験装置	62
図 4.1-2 Baum の実験解析の形状とメッシュ	63
図 4.2-1 $h/D=10$, $Q=332(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布	64
図 4.2-2 $h/D=10$, $Q=415(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布	65
図 4.2-3 $h/D=10$, $Q=498(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布	66
図 4.2-4 $h/D=15$, $Q=498(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布	67
図 4.2-5 $h/D=15$, $Q=623(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布	68
図 4.2-6 $h/D=15$, $Q=747(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布	69
図 4.2-7 下降流速分布	70
図 4.2-8 ガスコア長さの評価	71

1 緒 言

実用化戦略調査研究の一環として検討が進められているナトリウム大型炉は、ループ数の削減、炉容器のコンパクト化により、建屋スペースの縮小、使用部材の低減を図り経済性の向上を図っている。一方で、これらの方策により炉内の冷却材流速は従来設計よりも大きくなり、自由液面からのガス巻込み、炉内構造物の流力振動、熱過渡による構造物の健全性評価など、炉上部プレナム内流動の適正化が重要な課題となっている。特に、自由液面からのガス巻込み現象については、水を作動流体とした 1/10 スケール試験及び 1/1.8 スケール液面部分モデル試験等を実施し、その防止策の検討を進めている^[1-2]。

従来、ガス巻込み現象はスケール試験によって確認され、物性の影響を考慮して評価が実施されてきたが、ガス巻込み現象は構造物配置等の体系の影響を受けることから、様々な形状を検討する概念設計段階においては試験コストが大きくなる点、並びに、最終段階では、実際の大きさでのナトリウム条件に対して外挿評価が必要である点等の課題が指摘されている。一方、数値解析による評価の場合、液面の変形を直接予測する手法は存在するがその計算負荷は非常に大きく、実炉体系に直接適用することは実用上厳しい状況にある。

また、従来、ガス巻込み現象に関する多くの基礎実験データが取得されており、定常のくぼみ渦のガスコア長さ及びエントレインメントの発生に関するデータが蓄積されている。個々の実験に基づき、ガス巻込み発生相関式が提案されているが、ほとんどが装置への入口流量及び形状に依存する体系パラメータを含んでおり、実機設計に直接適用することは困難である。

そこで、実証炉設計のガス巻込み研究に詳しい電力中央研究所の指導を得て、数値解析と伸長渦理論の組合せによるガス巻込み判定手法の検討を実施することとした。まず、既往の基礎実験体系を対象とし、液面変動を考慮しない実用計算レベルの数値解析を行い、その結果に伸長渦理論を適用し実験結果と比較することにより、くぼみ渦のガスコア長さに関する予測精度を評価する。次に、定常のくぼみ渦からのエントレインメント発生に関する既往の実験体系の数値解析を行い、その結果から、くぼみ渦のガスコア長さとエントレインメント発生の関係を評価し適用性を検証することとした。2 章では、まず、伸長渦理論の導出について示すとともに、3 章ではガスコア長さの予測精度評価、4 章では、ガス巻込み判定への適用について示す。

2 伸長渦理論の検討

自由液面からのくぼみ渦流れは、理想的な条件において伸長渦流れと呼ばれ、半理論解^[1]が存在する。この解は、容器の形状に依存しない局所的なパラメータにより得られることから汎用性が高いと考えられる。そこで、まず、それらの導出について示すとともに、伸長渦理論によってくぼみ渦の気液界面が引き込まれている深さ（ガスコア長さ）を算出し、既往の試験との比較を実施する。

2.1 伸長渦理論の導出

Bergers^[3]によれば、円筒座標系 (r , θ , z)において、以下の仮定 1~3 を適用した場合、(1)~(8)式が得られる^[4]。くぼみ渦のガスコア長さ L_g は(8)式に示すように、循環 Γ_∞ と下降流速勾配 α によって示すことができる。

仮定1：全ての物理量は周方向に変化しない。

すなわち、 $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$

仮定2：鉛直方向流速成分 w は高さ z のみの関数であり、 z に比例して増加する。

すなわち、 $w = \alpha \cdot z$ α : 正定数

仮定3：中心軸での渦度は有限の値 ω_0

理論式

$$v(r) = \frac{\Gamma_\infty}{r} \left\{ 1 - \exp \left(- \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right) \right\} \quad \text{--- (2)}$$

$$w(z) = \alpha \cdot z \quad \dots \quad (3)$$

$$\omega = \omega_0 \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right\} \quad \dots \quad (4)$$

$$\Gamma_{\infty} = \frac{1}{2} \omega_0 \cdot r_l^2 \left\{ 1 - \exp \left(- \left(\frac{I}{r_l} \right)^2 \right) \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$r_1 = \sqrt{v/\alpha} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

$$r_c = 1.121 \cdot r_i \quad \dots \quad (7)$$

$$Lg = \frac{0.693 \cdot \alpha \cdot \Gamma_{\infty}^2}{4 \cdot g \cdot v} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

記号説明

u : 径方向流速(m/s)

v : 周方向流速(m/s)

w : 軸方向流速(m/s)

r : 半径(m)

r_c : 粘性コア半径(μ)

θ : 周方向角度 (rad)

z : 軸方向長さ (m)

ω : 涡度 (1/s)

$$\Gamma_\infty : \text{循環}(\text{m}^2/\text{s}) = r v_\infty$$

ν : 動粘性係数 (m^2/s)

g : 重力加速度 (m/s^2)

Lg : ガスコア長さ (mm)

2.2 試験結果への伸長渦理論の適用

ガス巻込みに関する実験文献から、伸長渦理論でのパラメータとなる循環、軸方向流速勾配及びガスコア長さに関して記載されている論文を調査した。その結果、守屋^[4]及び酒井ら^[5]が循環及び軸方向流速勾配とガスコア長さに関して述べている。以下に双方の試験結果及び伸長渦理論の適用に関して記す。

2.2.1 守屋の試験

守屋が行ったガス巻込み試験の試験装置を図 2.2.1-1 に示す。試験結果を図 2.2.1-2~5

に示す。図 2.2.1-2 からはくぼみ渦の深さ、図 2.2.1-3 からは周方向流速分布、図 2.2.1-4 からは循環分布、図 2.2.1-5 からは軸方向流速の勾配をそれぞれ読み取ることができる。

2.2.2 酒井らの試験

酒井らが行ったガス巻込み試験の試験装置を図 2.2.2-1 に示す。試験結果を図 2.2.2-2～4 に示す。図 2.2.2-2 からはくぼみ渦の深さ、図 2.2.2-3 からは循環、図 2.2.2-4 からは軸方向流速の勾配をそれぞれ読み取ることができる。

2.2.3 伸長渦理論の適用

試験結果から伸長渦理論のパラメータとなる下降流速勾配及び循環を読み取り、伸長渦理論を適用し、ガスコア長さを算出した。結果を図 2.2.3 に示す。図に示すように、試験結果に伸長渦理論を適用して算出したガスコア長さは、試験結果より大きな値となることが確認された。この原因として、ガスコア界面が安定に存在し得る条件及び入口流れの非対称性に基づく変動成分の影響等が推定される。本比較により、伸長渦理論の一般的な特性として、定常なくぼみ渦のガスコア長さを実際よりも長く(深く)予測することが示された。

3 ガスコア長さ評価解析

守屋及び酒井らの文献では、伸長渦理論の適用性検証のために必要となる3つのパラメータ（循環、下降流速勾配及びガスコア長さ）が測定されている。そこで、それらの試験の数値解析を行い、循環、下降流速勾配を算出するとともに、伸長渦理論によってガスコア長さを算定し、実験との比較によって、その適用性を検討した。

3.1 守屋体系の解析

3.1.1 解析モデル及び解析ケース

試験装置（図 2.2.1-1）の入口矩形管から出口配管までについて、解析メッシュを作成した。メッシュは FLUENT コード用のメッシュジェネレータを使用して作成した。図 3.1.1 に示すように、メッシュ形状は 6 面体を用い、メッシュ間隔が約 10mm 程度になるように設定した。このメッシュ間隔は別途実施している解析手法検討の結果^[7-10]に基づき、ガス巻込み判定手法のために設定したものであり、粘性コア領域(r_c)に対する解析精度は低いがその外側のマクロな循環の予測は可能な解像度のメッシュ間隔である。

守屋らの試験結果のうち、解析対象として下降流速勾配を測定している条件（図 2.2.1-5）を選定した。10mm 程度のメッシュ間隔を用いた場合、旋回流速の最大値を予測することは困難であり、VOF モデル等の液面変動モデルを用いた場合でも液面の壅み深さを予測することはできない^[9]。ここでは、液面変動モデルは使用せずに、フリースリップ条件として解析を実施し、数値解析結果の渦周辺部の循環と出口配管近傍の下降流速勾配を用いて伸長渦理論によってガスコア深さを算定する。フリースリップとした場合、渦中心位置の圧力は、液面変動モデルを使用した場合と比較して低くなる傾向がある。これは保守側の効果と考えているが、今後の評価において確認が必要である。境界条件として、入口矩形管位置に入口流速条件を与えるとともに、出口配管断面に圧力条件を与えた。解析条件を表 3.1.1 に示す。

3.1.2 解析結果

図 3.1.2-1～3 に底面から 0.15m、0.25m、0.35m の位置での周方向流速及び循環分布を示す。図 3.1.2-1 の底面から 0.15m の位置では測定結果が得られているので、比較して示

している。図 3.1.2-1 に示すように、ガスコア長さを算定するために必要な循環の数値解析結果は、比較する周方向にも依存するが測定結果と概ね一致しており、数値解析結果の循環はガスコア長さの予測に適用可能と判断される。

尚、周方向流速が最大となる粘性コア半径 r_c は、試験の粘性コア半径の約 7 倍となってい る。これはメッシュ精度の限界と考えられ、ガスコア近傍の周方向流速を模擬するためには更に詳細なメッシュが必要である。

図 3.1.2-4 に、底面から 0.15m、0.25m、0.35m における軸方向流速分布を試験結果とともに示す。図 3.1.2-4 の解析の軸方向流速分布は、試験の軸方向流速の傾向を概ね再現しており、ガスコア長さを予測するためのパラメータとして、数値解析結果の下降流速勾配は利用可能と判断される。

数値解析結果の循環及び下降流速勾配を用いて、伸長渦理論によってガスコア長さを予測した。速度勾配 α は、(6) 及び(7) 式より、粘性コア半径 r_c (周方向流速が最大となる半径) からも算定可能であり、比較のために粘性コア半径からもガスコア長さの予測を試みた。表 3.1.2 にガスコア長さの予測結果と試験結果の比較を示す。下降流速勾配より算出したガスコア長さは、試験結果を過大に予測するが、粘性コア半径より算出したガスコア長さは過小に評価することが分かる。これは、粘性コア半径に対する数値解析精度が十分ではないことに起因している。以上より、守屋試験について、定常くぼみ渦のガスコア長さは数値解析結果の循環と下降流速勾配を用いることによって、保守的に予測可能であることが確認された。

3.2 酒井体系の解析

3.2.1 解析モデル及び解析ケース

図 2.2.2-1 に示す試験装置の入口矩形管から出口配管までを対象として、図 3.2.1 に示すような解析メッシュを作成した。守屋体系と同様に、メッシュ形状は 6 面体を用い、メッシュ幅は、円筒の内径が守屋体系の 1/2 程度であることから、守屋体系メッシュの半分の約 5mm 程度の幅になるように設定した。

解析ケース、解析条件を表 3.1.1 に示す。守屋体系の場合と同様に、液面変形を考慮しないフリースリップモデルを適用し、境界条件として、入口流速条件、出口配管での圧力条件

を与えた。

3.2.2 解析結果

数値解析結果について、図 3.2.2-1a-c～9a-c に底面から 0.15m、0.25m、0.35m の位置での各ケースの周方向流速及び循環分布を示す。循環の径方向分布は $r=0.05\text{m}$ 近傍で一定となる傾向が現れているが、明確に一定となる領域は見られない。これは、円筒の半径が約 0.1m と比較的小さく、径方向流速に外周及び出口の影響が現れているためと考えられる。ここでは循環の値として、平均的な値を示す $r=0.05\text{m}$ での値を参考することとした。

それらの循環について、全解析ケースについて試験の循環と比較した結果を図 3.2.2-10 に示す。また、流量及び出口配管径で循環の予測精度を整理した結果を図 3.2.2-11 に示す。

図 3.2.2-10 に示されるように、流量が増大するのにしたがい、解析は試験結果の循環を過大評価することが分かる。

酒井らの文献^[6]によると、『流入口からの流れと容器内の旋回流が干渉し、流量を増加させると流入口付近に跳水が見られることから、ここで循環が散逸していると考えられる。』と記されている。解析では跳水による散逸は生じないことから、解析の循環が試験値よりも大きくなる理由として、跳水による循環の散逸が考えられる。

次に出口配管径 30mm の場合の下降流速分布を試験結果と比較して図 3.2.2-12 に示す。流量が大きい $15\text{l}/\text{min}$ の場合、解析は試験結果よりも大きな下降流速を示す傾向にある。また、下降流速勾配予測の精度評価を図 3.2.2-13 に示す。出口配管径が小さい $d=19.8\text{mm}$ の場合、解析は下降流速勾配を過小評価するが、それ以外については、解析は試験の下降流速勾配よりも大きな値を予測することが分かる。参考のため、流量及び出口配管径で粘性コア半径を整理した結果を図 3.2.2-14 に示す。全般的に試験との相違は大きく、特に、 19.8mm のケースでは試験よりも 10 倍くらい大きく粘性コア半径を予測している。出口配管部のメッシュ分割を図 3.4.2-15 に示す。特に、 19.8mm のケースでは出口配管径に対するメッシュ幅が大きく、解析精度が低くなっていることが推定される。

次に、数値解析結果の循環及び速度勾配 α を用いて、伸長渦理論によってガスコア長さを算定した。図 3.4.2-16 に速度勾配 α を下降流速から求めた場合と粘性コア半径より求めた

場合を比較して示す。下降流速より算出したガスコア長さは、試験結果を過大評価する。一方、粘性コア半径より算出したガスコア長さは、試験結果を過小評価する。これらの結果を合わせて、図 3.4.2-17 に示す。試験結果は下降流速勾配より算出したガスコア長さと粘性コア半径より算出したガスコア長さの間に入っている。ガス巻込みの発生をガスコア長さによって判定する場合、ガスコアがより長いほうが、ガスコアがちぎれて、気泡がエントレインされる可能性が高いと考えられる。したがって、判定手法に用いる場合は、ガスコア長さを保守的に予測可能な下降流速勾配から α を算定することとする。

4 ガス巻込み評価解析

Baum^[11]は試験によって、定常状態のくぼみ渦を対象にガス巻込み発生条件を測定している。そこで、Baum の試験の解析を行い、その結果に伸長渦理論を適用し、ガス巻込み判定手法の適用性を検討する。

4.1 解析モデル及び解析ケース

図 4.1-1 に Baum の試験装置を示す。装置は直径 61cm の円筒容器内にベーンを設け旋回を与えるガス巻込みを発生させるものである。解析では、周方向に対称な形状であることから、入口管から出口管までの周対称なベーン間流路を対象とし 1/8 セクタモデルにて実施した。出口配管(17.5mm)部での解析メッシュの解像度を確保する観点から、出口配管部では約 2mm 幅、その他の領域を約 5mm 幅に設定した。メッシュ図を図 4.1-2 に示す。

境界条件は入口管で流量条件、出口管で圧力条件、周方向流速はベーン部以外を周期境界条件とした。壁境界は上面壁をフリースリップ、ベーン部及びその他の壁をノンスリップ条件とした。

液位を h 、出口配管径を D とすると、解析ケースは $D=17.5\text{mm}$ 、 $h/D=10$ 、 15 の 2 通りとし、それぞれに試験でのガス巻込み条件流量 $415\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $628\text{cm}^3/\text{s}$ 及びその前後の流量を与えた。解析ケースを表 4.1 に示す。

4.2 解析結果

図 4.2-1～3 に $h/d=10$ のケースの底面から 0.1m 、 0.15m 、 0.175m (液面)の位置、周方向 0.0 度、22.5 度、45.0 度の位置における周方向流速及び循環分布を示す。図 4.2-4～6 に $h/d=15$ のケースの底面から 0.1m 、 0.2m 、 0.2625m (液面)の位置、周方向 0.0 度、22.5 度、45.0 度の位置における周方向流速及び循環分布を示す。図 4.2-7 に各ケースの下降流速勾配を示す。図 4.2-8 に各ケースのガスコア長さを示す。

図 4.2-1～6 に示す循環は比較的一定に落ち着く領域が現れており、その領域の循環値を参考することとした。図 4.2-7 に示すように、下降流速は液位が低い方が、勾配が大きくなる傾向を示している。

循環及び下降流速勾配からガスコア長さを算出し、循環との関係で整理した結果を図4.2-8に示す。試験にてガス巻込みが発生した条件でのガスコア長さ（予測値）は $h/d=10$ では 70mm、 $h/d=15$ では 90mm に相当している。

ガス巻込み判定基準として、ガスコア長さを指標とすることを想定した場合、その値の設定には、実炉の流動条件に十分配慮した設定を行う必要がある。特に、乱れの影響や非定常性の影響は本比較からは不明確であり、今後、十分な検討が必要と考えられる。それらを前提とした上で、現実的な判定基準ガスコア長さを 50mm と仮設定した場合、ガス巻込み判定基準は、保守側に Baum のガス巻込み試験結果を予測する。

5 結 言

数値解析と伸長渦理論の組合せによるガス巻込み判定手法の適用性について見通しを得るため、既往の基礎実験体系を対象とし、液面変動を考慮しない実用計算レベルの数値解析を行い、その結果に伸長渦理論を適用し実験結果と比較することにより、くぼみ渦のガスコア長さに関する予測精度を評価した。

次に、定常のくぼみ渦からのガス巻込み発生に関する既往の実験体系の数値解析を行い、その結果から、くぼみ渦のガスコア長さとガス巻込み発生の関係を評価し適用性を検証した。その結果、以下が示された。

- (1) ガスコア長さの予測精度について、守屋及び酒井らの実験結果と比較した結果、判定手法はガスコア長さを保守側に試験よりも大きく予測することが明らかになった。
- (2) ガス巻込みの判定基準として、ガスコア長さ 50mm を仮設定した場合、それらは、Baum のガス巻込み発生に関する試験結果を適切に判定することが明らかになった。

今後の課題として、非定常の移動するくぼみ渦からのガス巻込み現象について判定手法の検討を進める必要がある。1/1.8 スケール部分モデル試験で水位を低下させた際に観察されるガス巻込み現象は、後流渦等の移動する非定常渦流れから生じることが観察されている。そのような非定常のくぼみ渦に関する基礎的な実験データは非常に限られており、今後、基礎データの取得とメカニズムの考察を進めながら、判定手法の構築を進めることが重要と考えられる。

参考文献

- [1] 大島宏之, 「高速増殖炉におけるガス巻込み研究の現状」, 日本混相流学会, 混相流, 17卷, 3号, (2003). p251.
- [2] N. Kimura, K. Hayashi, M. Igarashi, et al., "Experimental Study on Flow Optimization in Upper Plenum of Reactor Vessel for a Compact Sodium Cooled Fast Reactor", NURETH-10, Korea, Seoul, Oct. 5-9, (2003).
- [3] J.M.Burgers , 「A mathematical model illustrating the theory of turbulence」, Advances in applied mechanics edited by R.Mises, T.Karman, Academic Press INC, New York, (1948).
- [4] 守屋祥一 「伸長渦理論と詳細可視化・計測に基づく自由表面渦の流動特性評価」, 電力中央研究所報告 U97072, 平成 10 年 3 月, (1998)
- [5] 酒井清吾, 班目春樹, 岡本孝司, 「旋回渦底部からのガス巻込み」, 東京大学工学部付属原子力工学研究施設, 平成 6 年 11 月 21, 22 日, 自由液面からのガス巻込みに関する研究会(II), (1994) P. 65.
- [6] 酒井清吾, 班目春樹, 岡本孝司, 「有限容器内に形成されるくぼみ渦周りの流れ場の測定」, 日本機械学会論文集 (B 編) , 63 卷, 614 号, 論文 No. 97-0437 (1997-10) p. 3223.
- [7] Kei Ito, Takaaki Sakai, Akira Yamaguchi, "Numerical Simulation of Free Surface Vortex in Cylindrical Tank", NURETH-10, Korea, Seoul, 2003.10.
- [8] 伊藤啓, 堀公明, 山口彰, 「円筒容器内での自由表面渦の解析」, 日本機械学会 2003 年度年次大会 平成 15 年 8 月 6-8 日, 徳島大学, (2003).
- [9] 伊藤啓, 堀公明, 大島宏之, 他, 「ナトリウム冷却高速炉のガス巻込みに関する研究(5)-くぼみ渦に関する数値解析精度評価-」原子力学会 2004 年春の年会, 岡山大学, 平成 16 年 3 月, (2004).
- [10] 伊藤啓, 堀公明, 山口彰, 「自由液面からのガス巻き込みに関する数値解析(I) -円筒容器内での自由表面渦の解析-」, 核燃料サイクル機構研究報告, JNC TN9400 2002-054 (2002).
- [11] M. R. Baum, 「Gas entrainment at the free surface of a liquid inception at a laminar vortex」, Journal of British Nuclear Engineering Society, 13(2), (1974).

謝 辞

本研究を実施するにあたり、検討全般について、核燃料サイクル開発機構設置の「ガス巻込み研究ワーキンググループ」（主査：功刀資彰先生（京都大学））の各委員にご検討をたまわりました。特に、数値解析手法の適用方法につきましては、茨城大学 田中伸厚先生（数値解析検討サブワーキンググループリーダー）よりご指導をたまわりました。電力中央研究所 守屋祥一氏より、本数値解析の対象とした実験の測定方法等に関するご解説をたまわりました。同様に、東京大学 岡本孝司先生（実験サブワーキンググループリーダー）より解析対象実験のご解説をたまわりました。

ここに感謝の意を表します。

表 3.1-1 守屋、酒井体系の解析条件

	flow rate	inlet velocity	inlet circulation	inlet wide	inlet height	cylinder radius	cylinder height	outlet pipe radius	outlet pipe height
	l/min	m/s	m ² /s	m	m	m	m	m	m
守屋体系	50	0.041667	0.0083	0.04	0.5	0.2	0.5	0.025	0.16
岡本体系	5	0.083333	0.0081	0.02	0.05	0.097	0.4	0.0198, 0.03, 0.0409	0.05
"	7	0.116667	0.0113	0.02	0.05	0.097	0.4	0.0198, 0.03, 0.0409	0.05
"	10	0.166667	0.0162	0.02	0.05	0.097	0.4	0.0198, 0.03	0.05
"	15	0.250000	0.0243	0.02	0.05	0.097	0.4	0.03, 0.0409	0.05

表 3.1-2 守屋体系の解析結果の精度評価

	循環 cm ² /s	下降流速勾配 1/s	粘性コア半径 cm	窪み渦深さ(*1) cm	窪み渦深さ(*2) cm
解析	71.47	0.43	3.77	43.77	0.30
試験	70.42	0.26	0.55	11.20	11.20
解析/試験	1.01	1.64	6.87	3.91	0.03

*1: 下降流速勾配より算出

*2: 粘性コア半径より算出

表 4.1. Baum 体系の解析条件

flow rate	outlet pipe radius	height	height/ radius	remark
Q(cm ³ /s)	D(m)	h(m)	h/D(—)	
332	0.0175	0.175	10	
415	0.0175	0.175	10	試験での巻き込み条件
498	0.0175	0.175	10	
498	0.0175	0.2625	15	
623	0.0175	0.2625	15	試験での巻き込み条件
747	0.0175	0.2625	15	

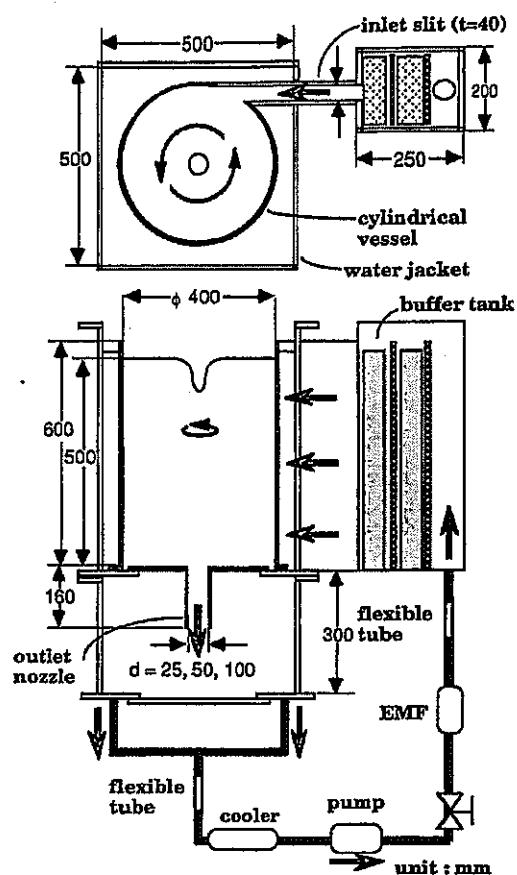


図 2.2.1-1 守屋の試験装置の概要

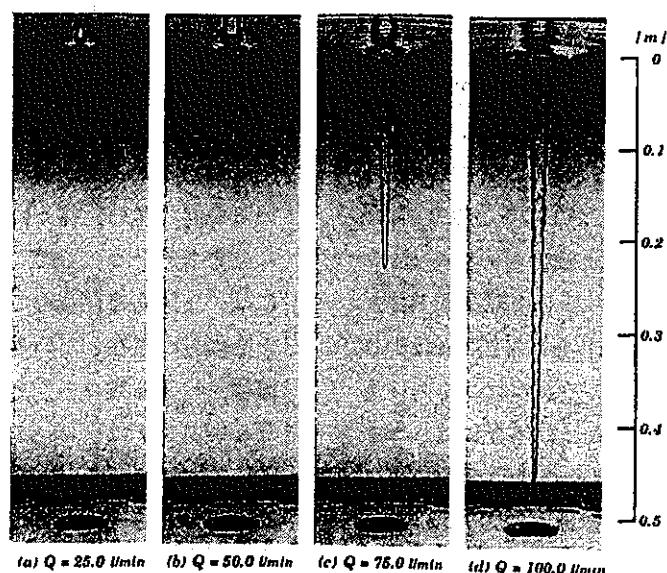


図 2.2.1-2 守屋の試験でのくぼみ渦の状況

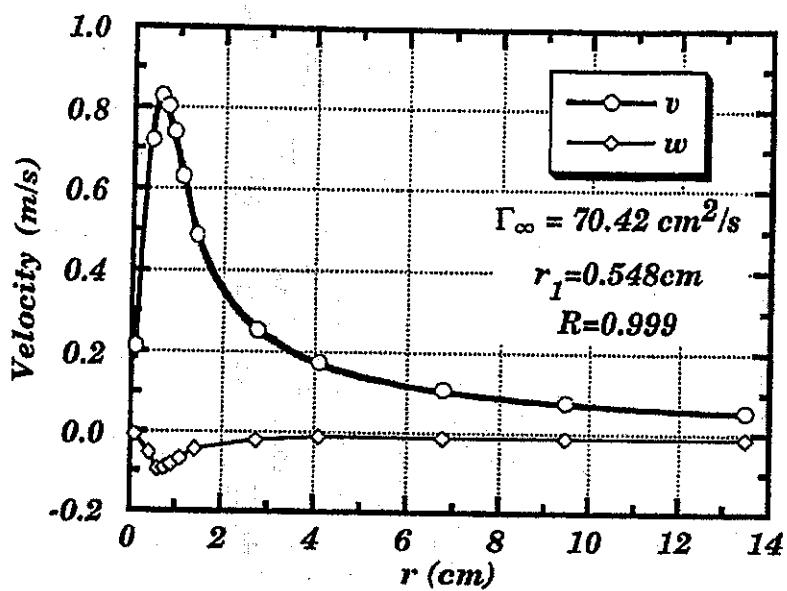


図 2.2.1-3 守屋の試験での周方向流速分布

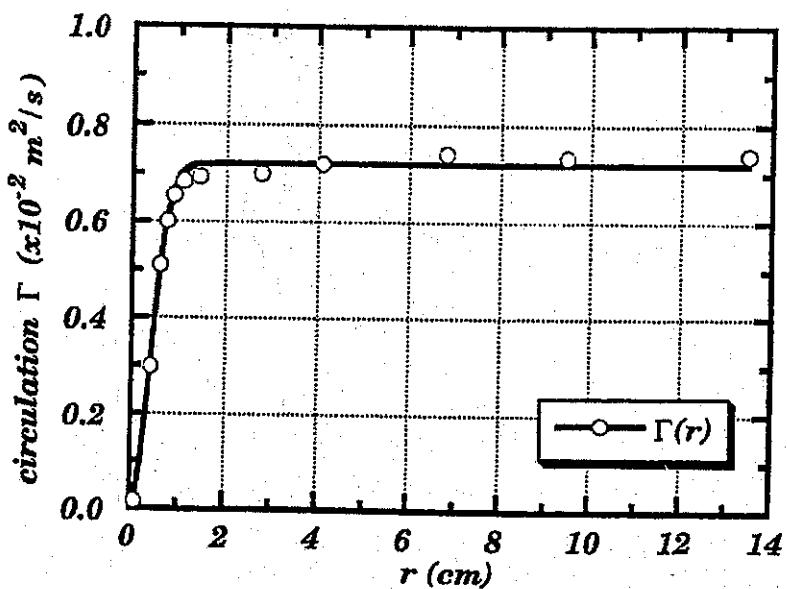


図 2.2.1-4 守屋の試験での循環分布

出口配管径 : $d=5\text{ (cm)}$
容器高さ : $h=50\text{ (cm)}$
流量 : $Q=50\text{ (l/min)}$

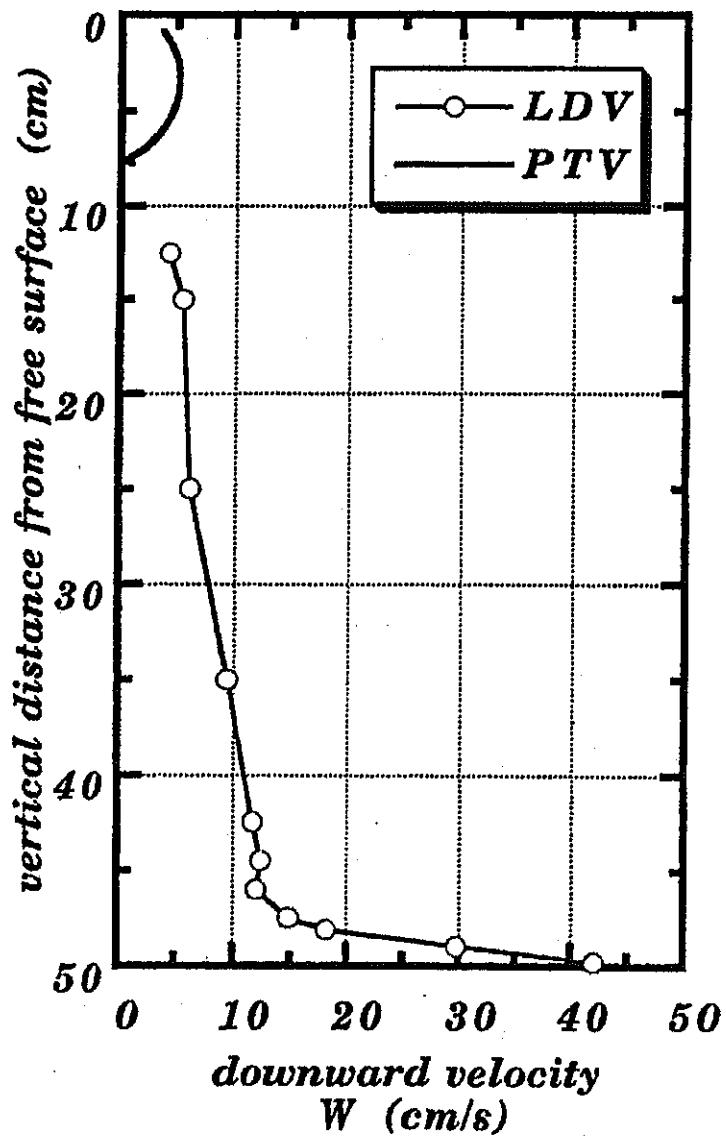


図 2.2.1-5 守屋の試験での下降流速分布

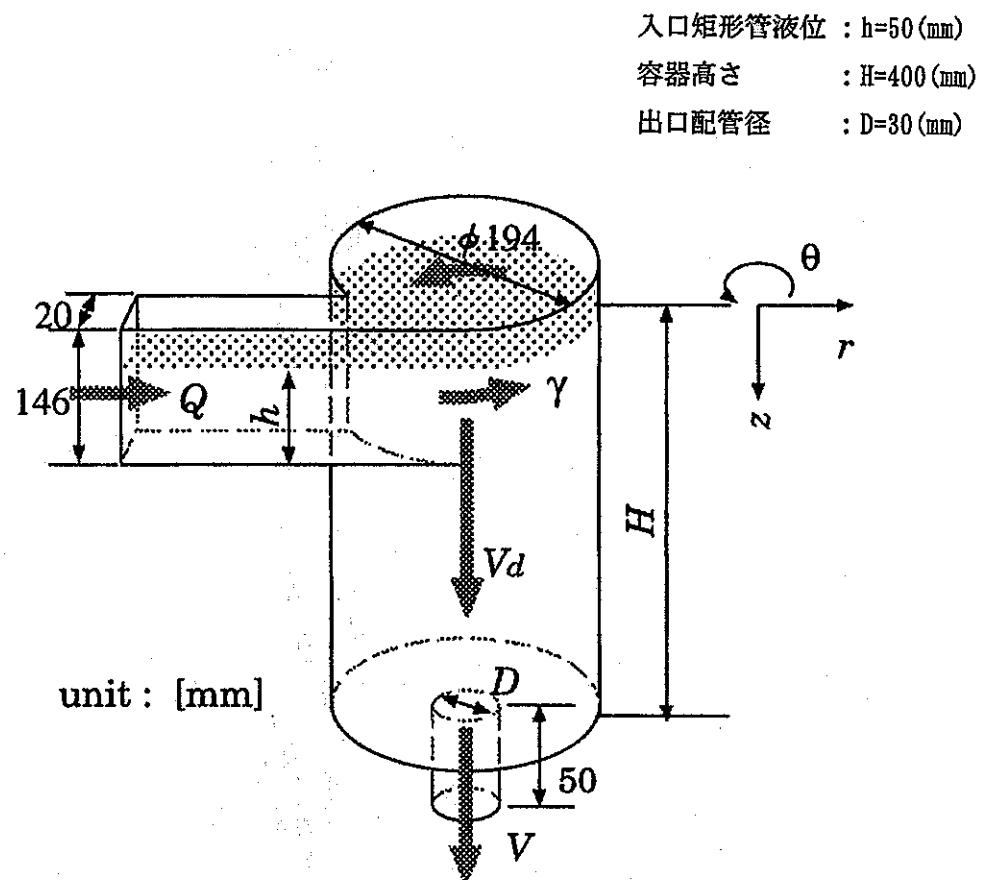


図 2.2.2-1 酒井らの試験装置の概要

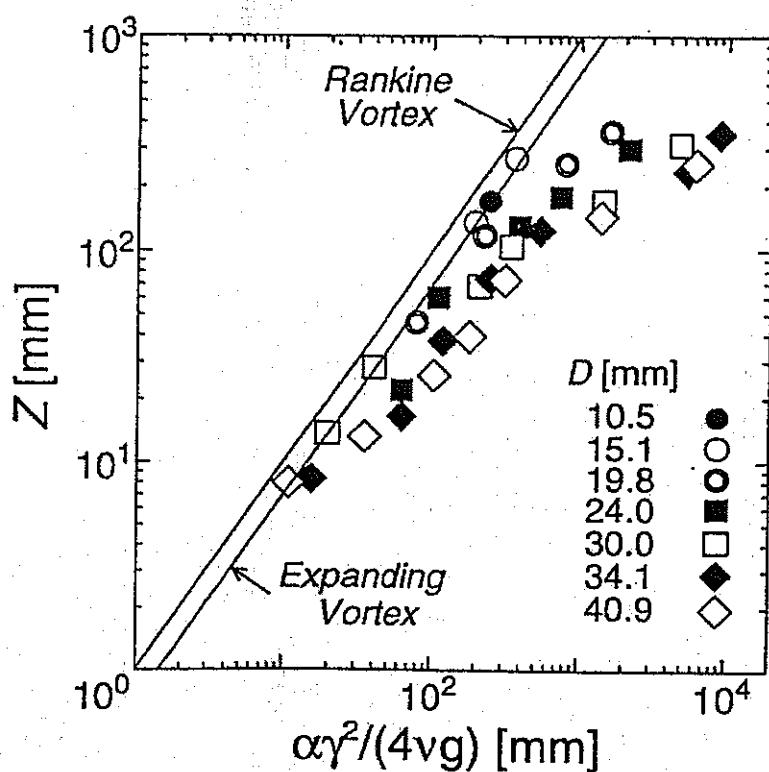


図 2.2.2-2 酒井らの試験でのガスコア長さ

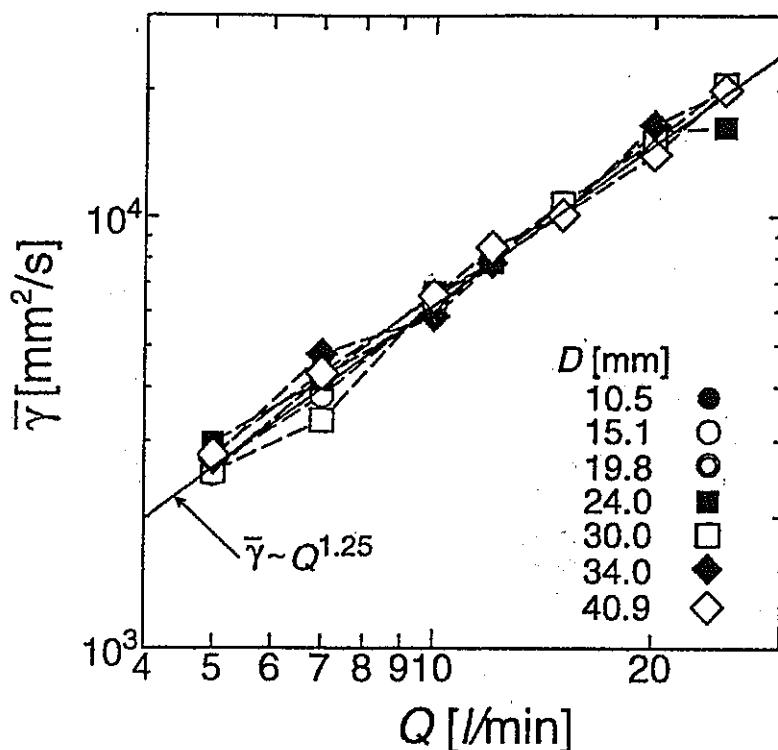


図 2.2-3 酒井らの試験での流量と循環の関係

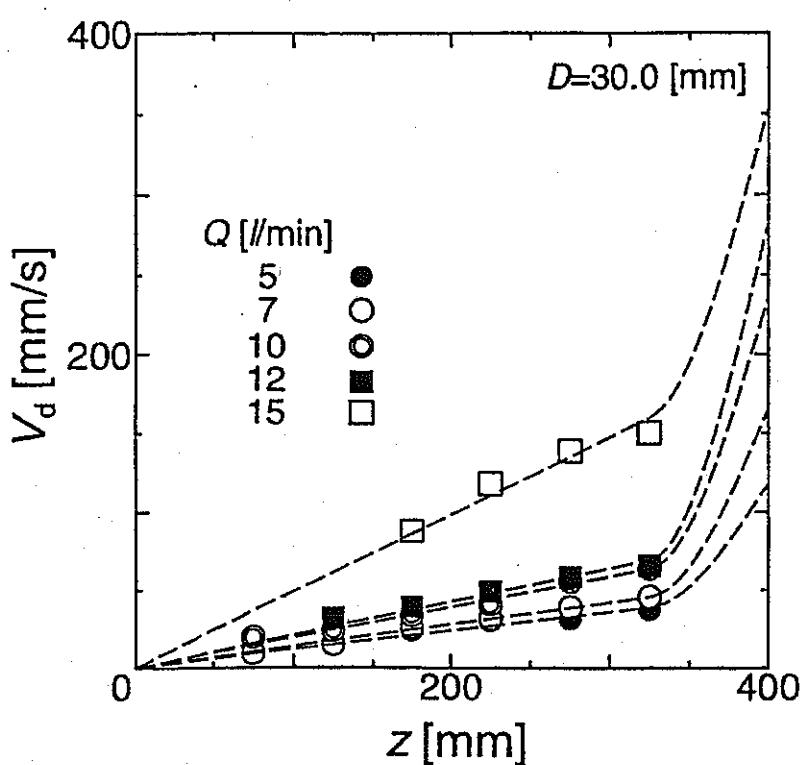


図 2.2-4 酒井らの試験での下降流速分布

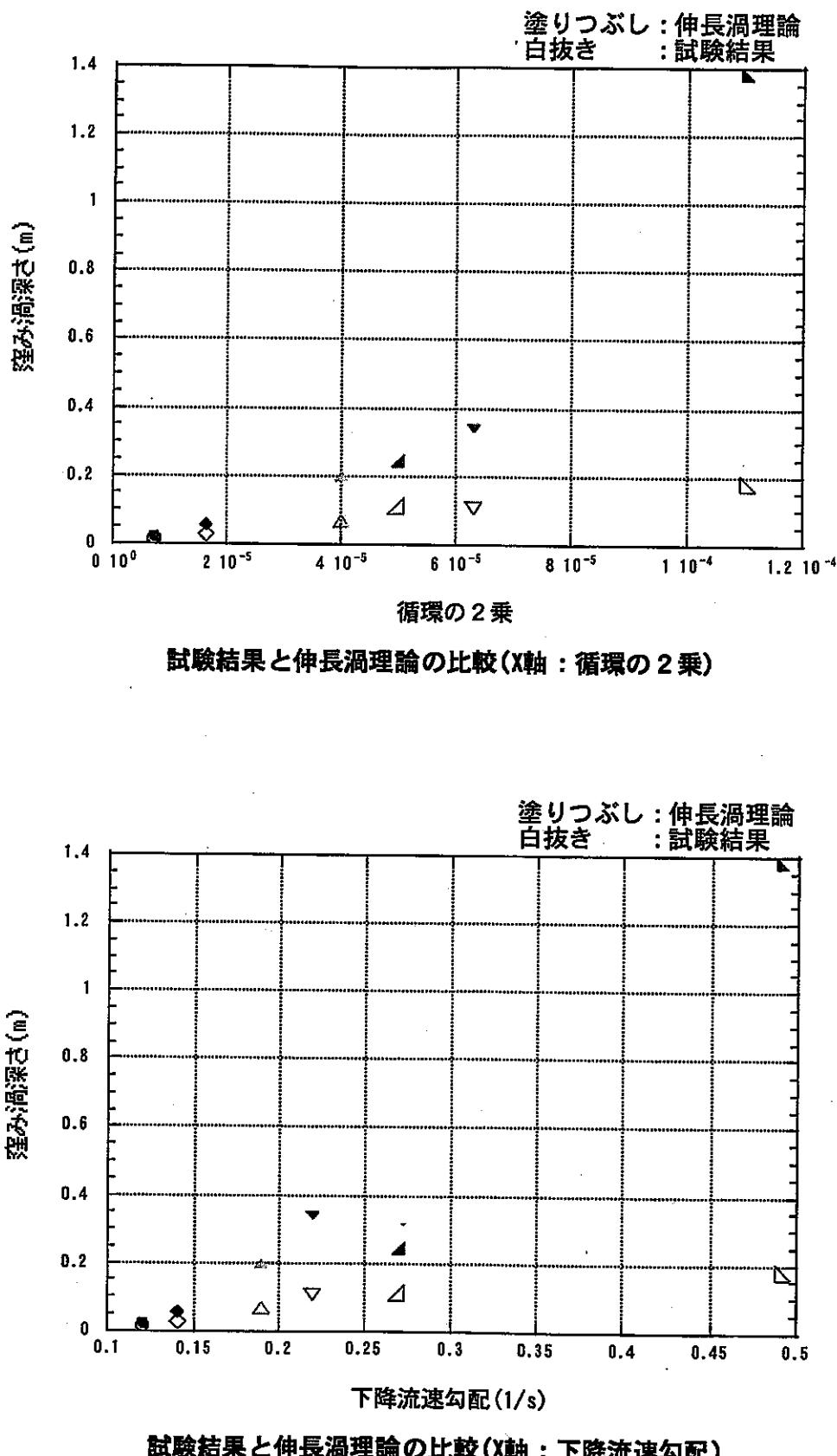


図 2.2.3 試験結果と伸長渦理論の比較

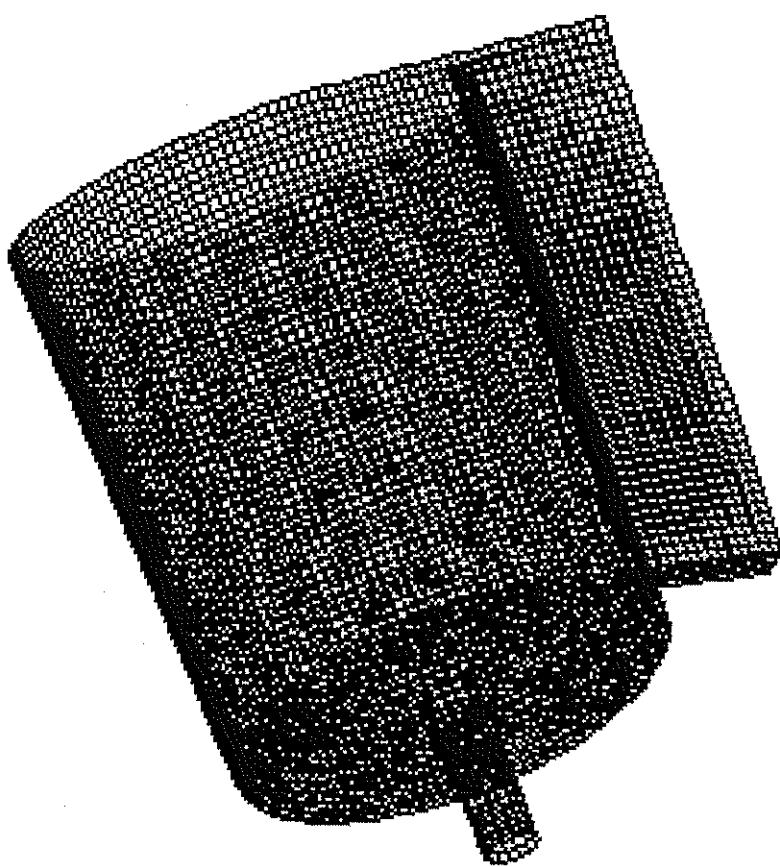
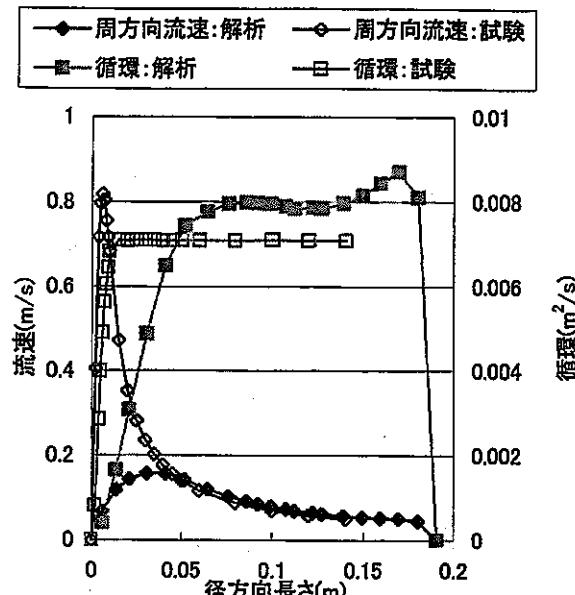
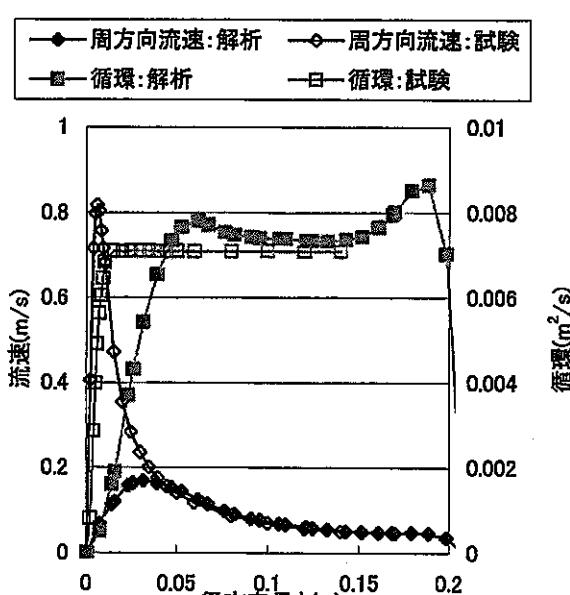


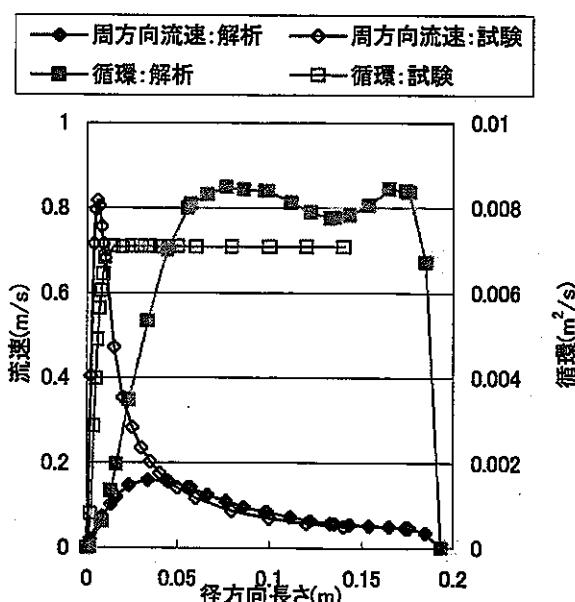
図 3.1.1 守屋体系のメッシュ分割



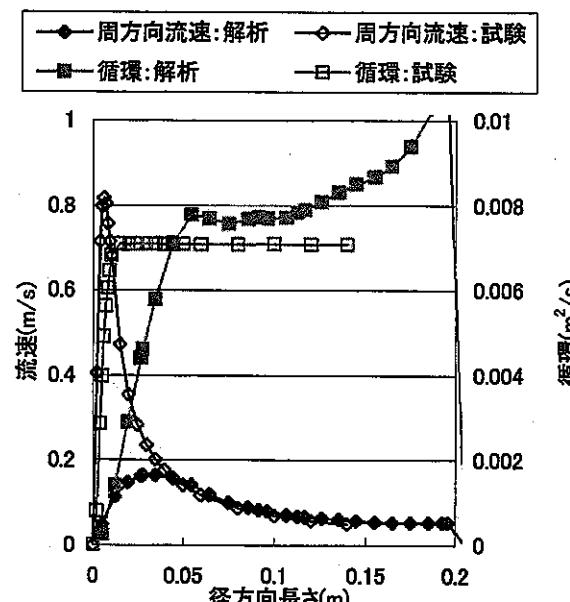
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)



周方向流速、循環分布(south side)



周方向流速、循環分布(north side)

図 3.1.2-1 $z=0.15\text{m}$ での周方向流速及び循環分布

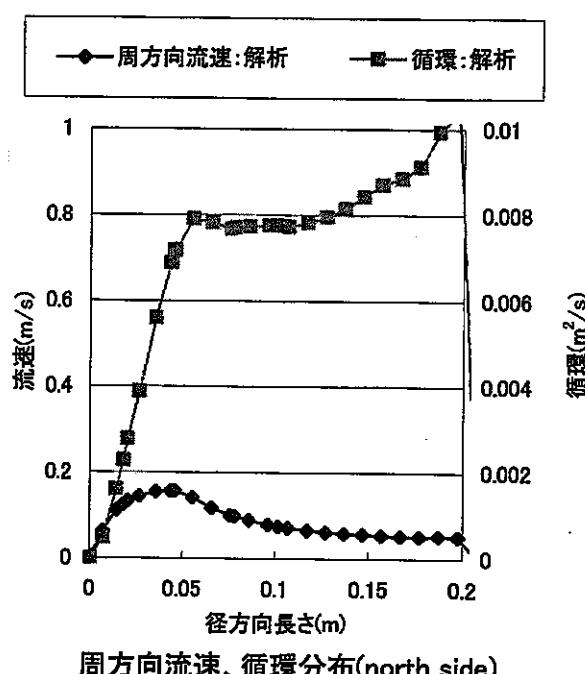
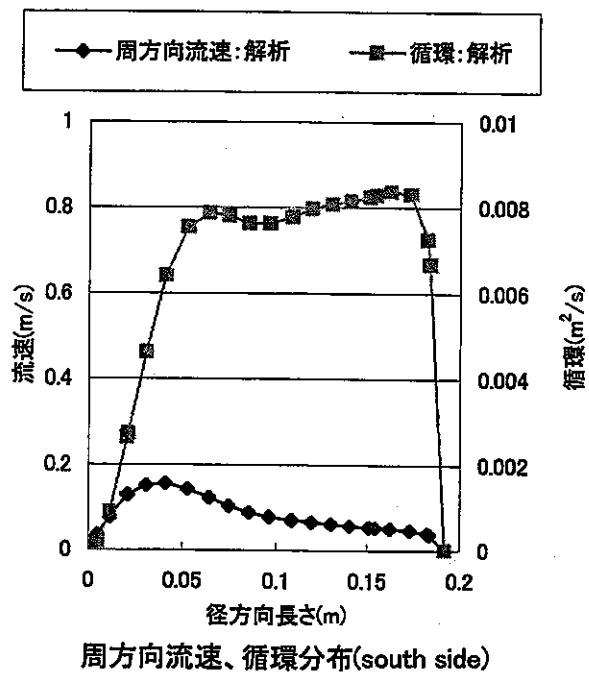
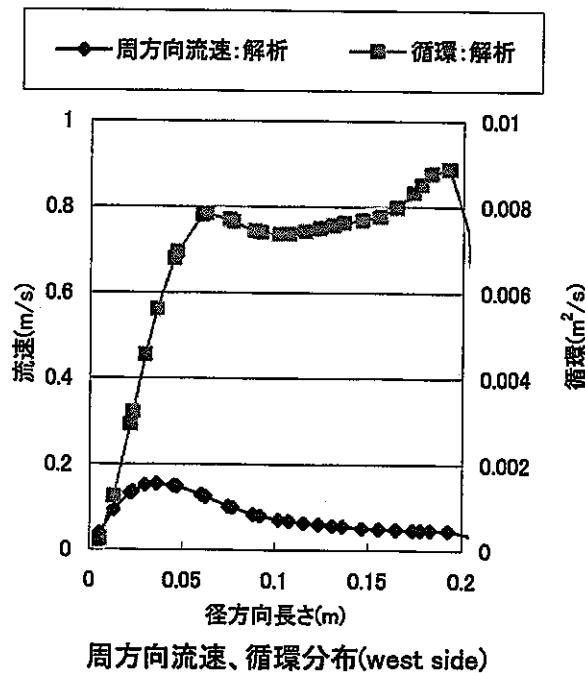
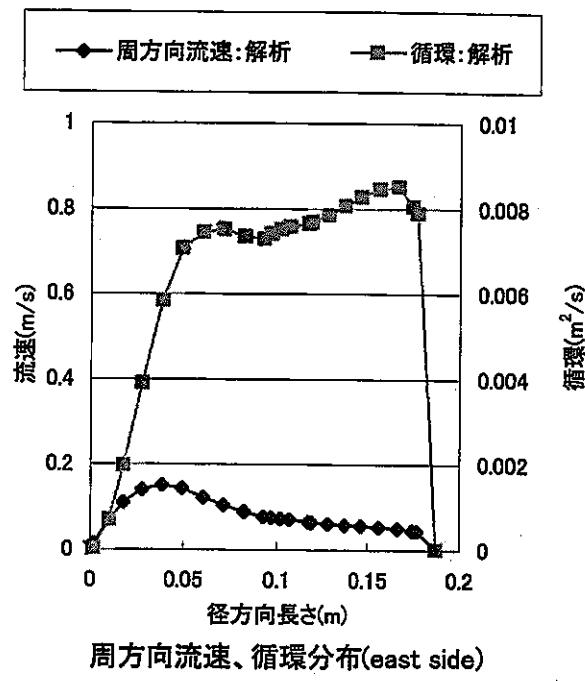


図 3.1.2-2 z=0.25m での周方向流速及び循環分布

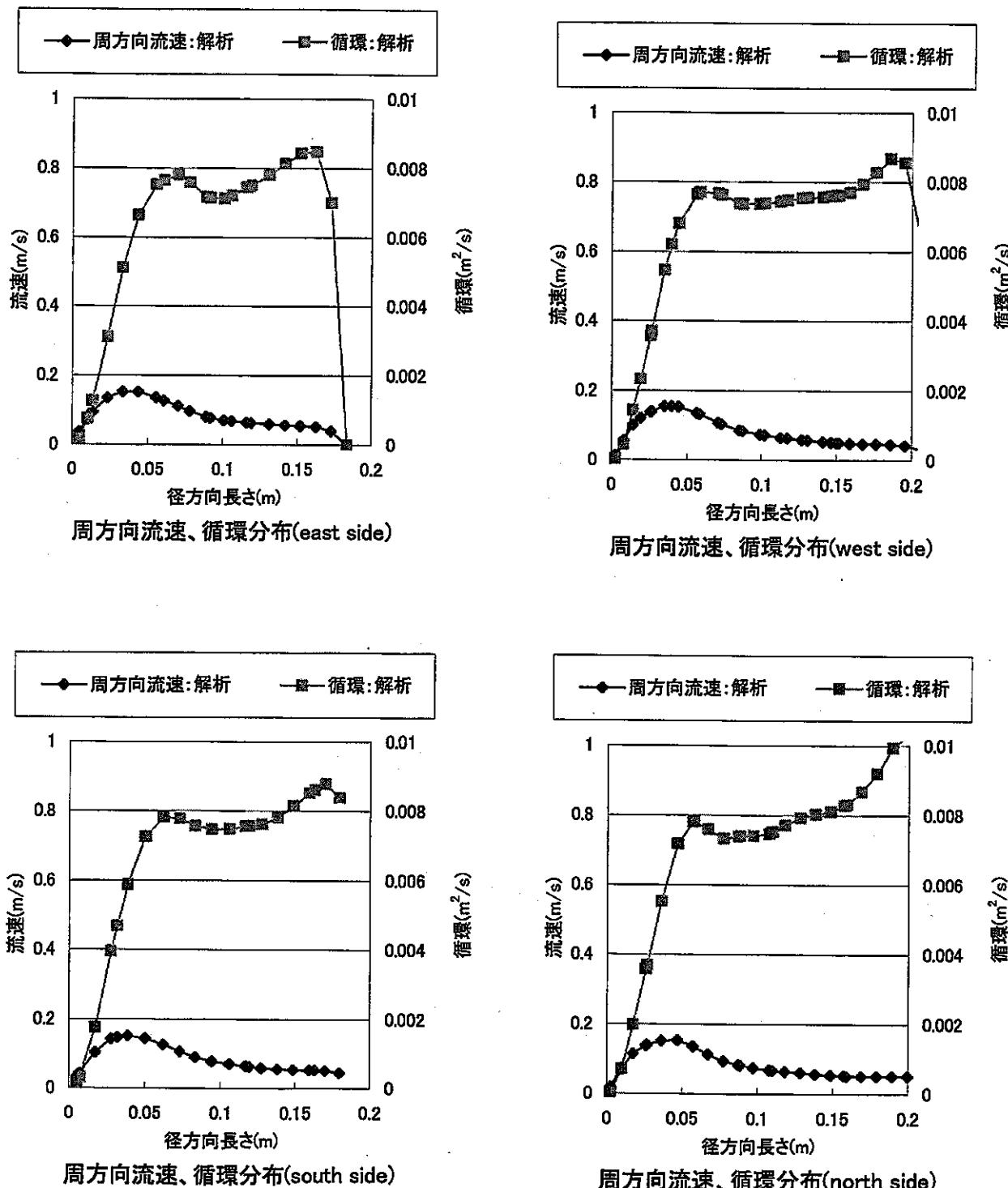


図 3.1.2-3 $z=0.35\text{m}$ での周方向流速及び循環分布

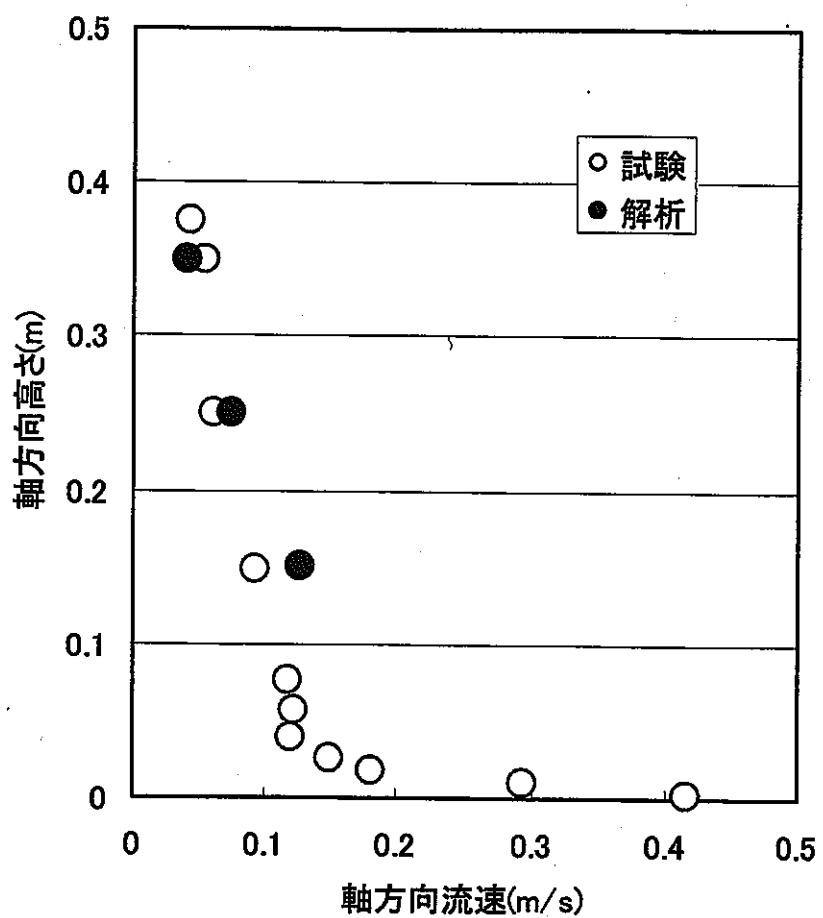


図 3.1.2-4 軸方向流速分布

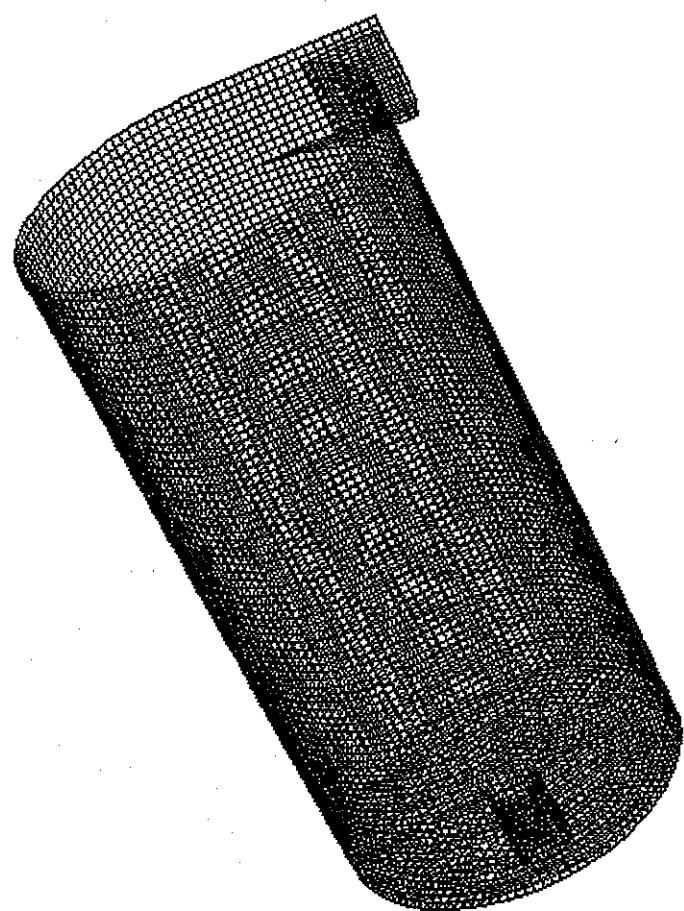


図 3.2.1 酒井体系のメッシュ分割

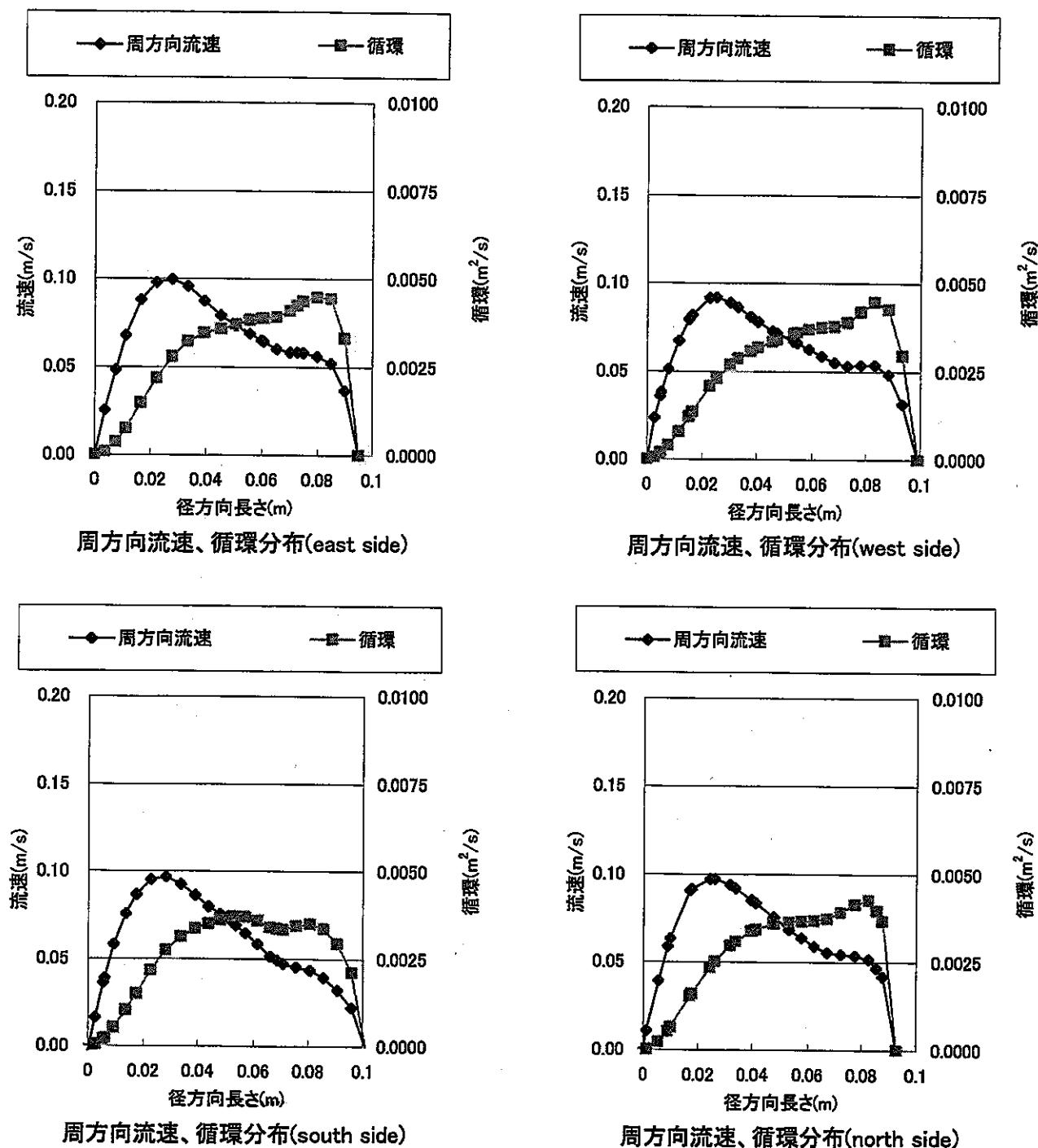
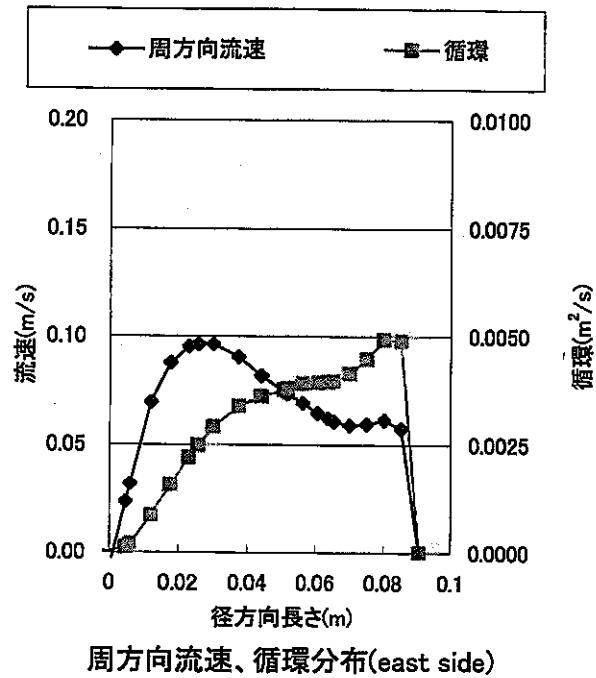
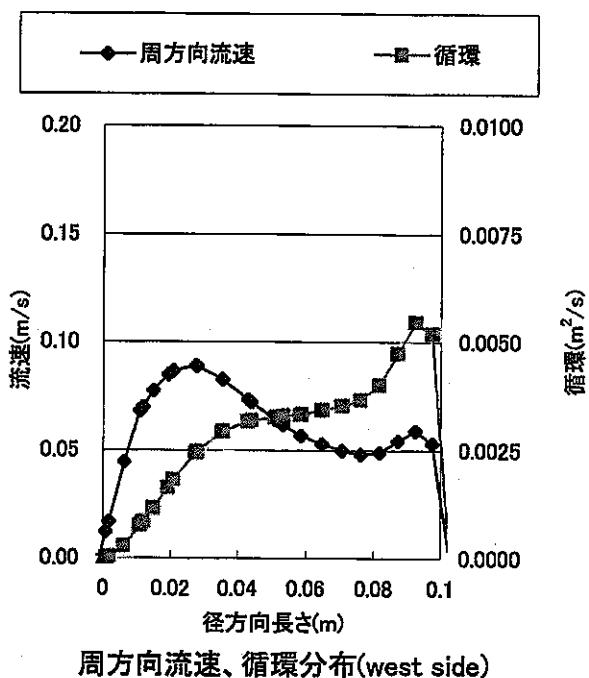


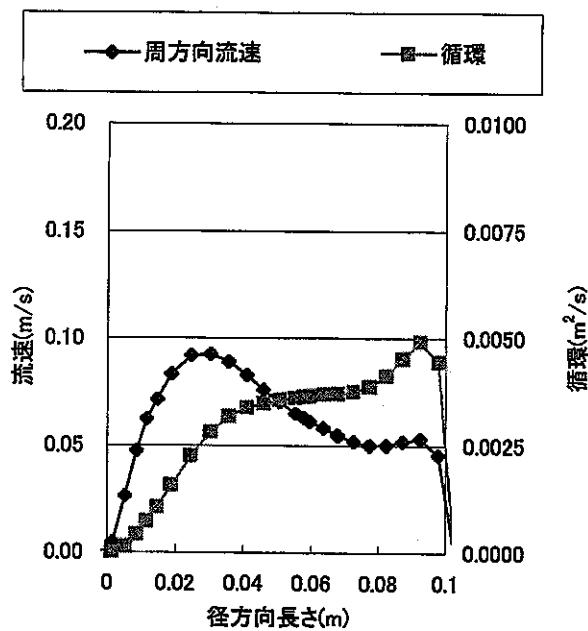
図 3.2.2-1a $d=19.8\text{mm}$ 、 $Q=5(\text{l}/\text{min})$ 、 $z=0.15\text{m}$ での流速及び循環分布



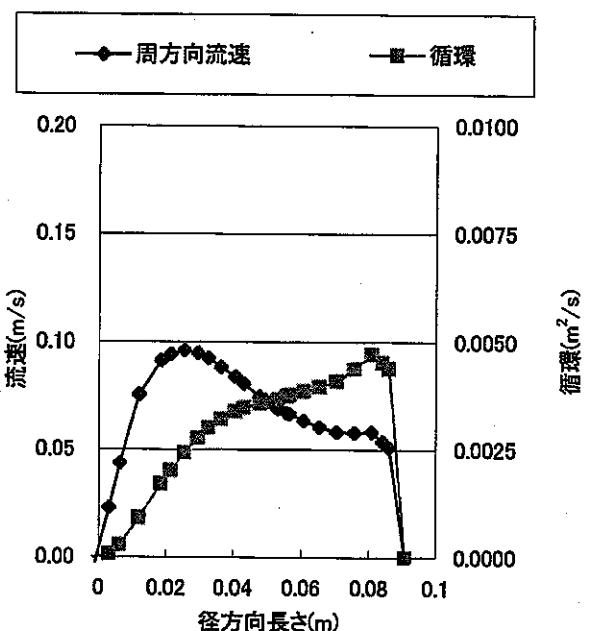
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)



周方向流速、循環分布(south side)



周方向流速、循環分布(north side)

図 3.2.2-1b $d=19.8\text{mm}$ 、 $Q=5(\text{l}/\text{min})$ 、 $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布

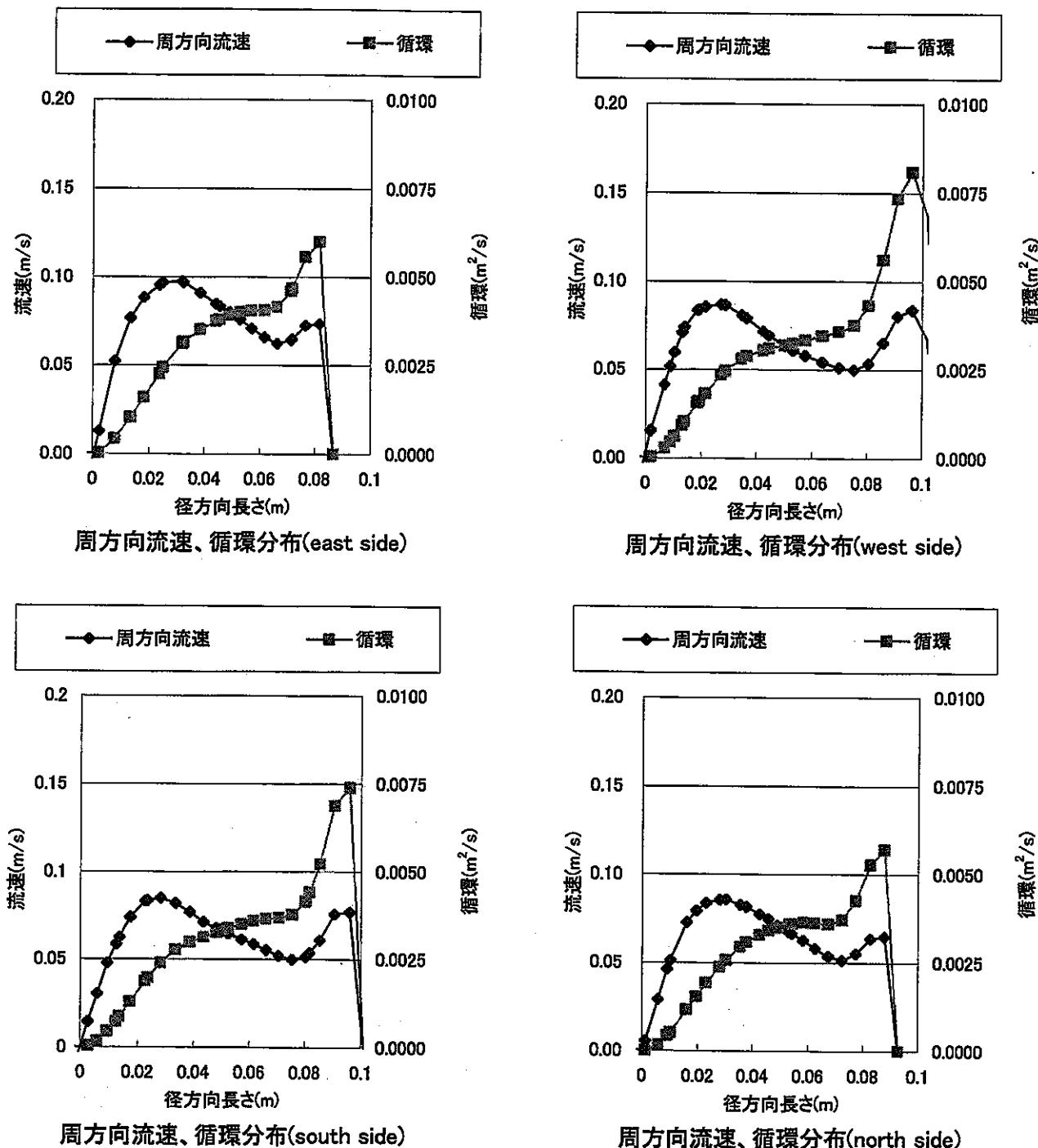


図 3.2.2-1c $d=19.8\text{mm}$ 、 $Q=5(1/\text{min})$ 、 $z=0.35\text{m}$ での流速及び循環分布

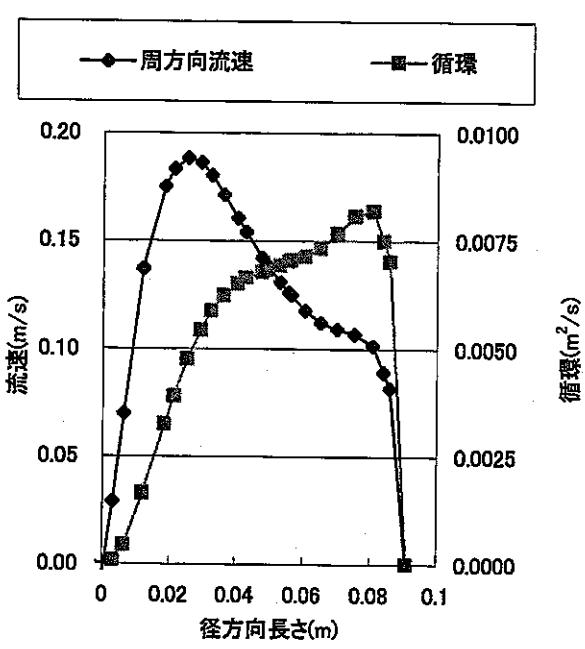
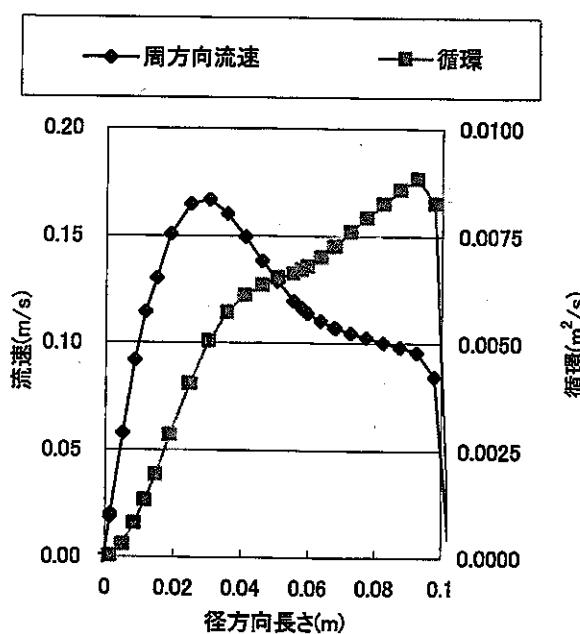
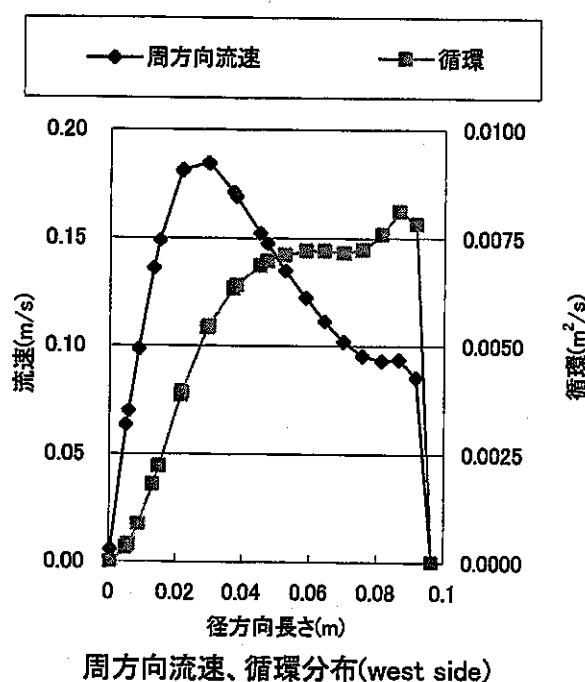
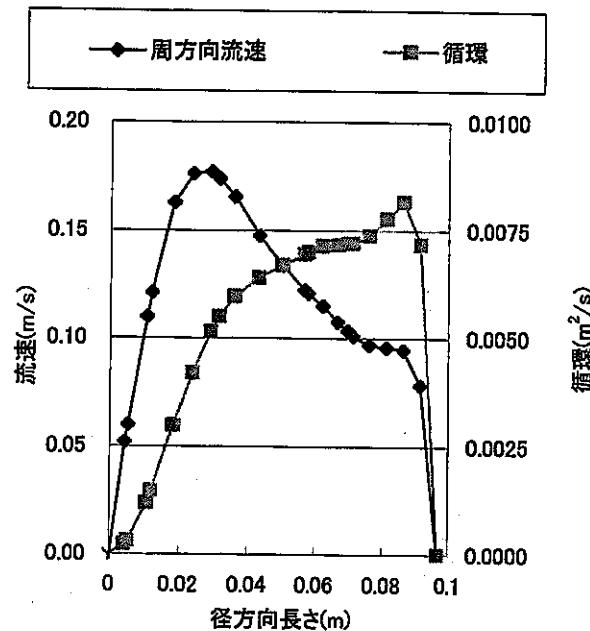
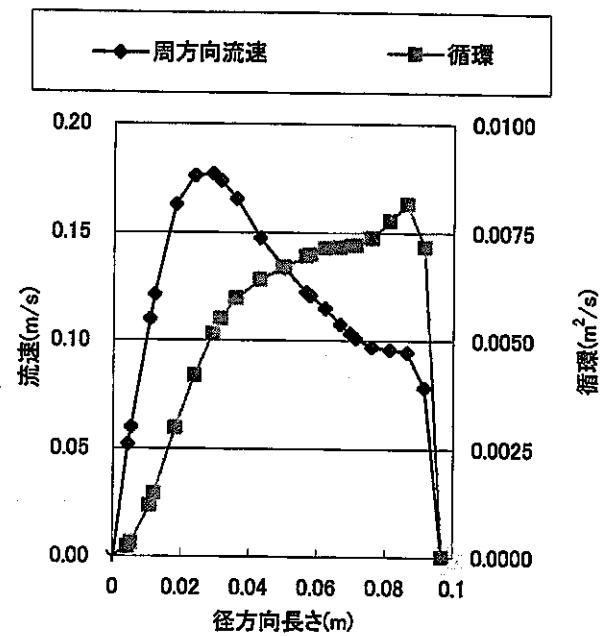
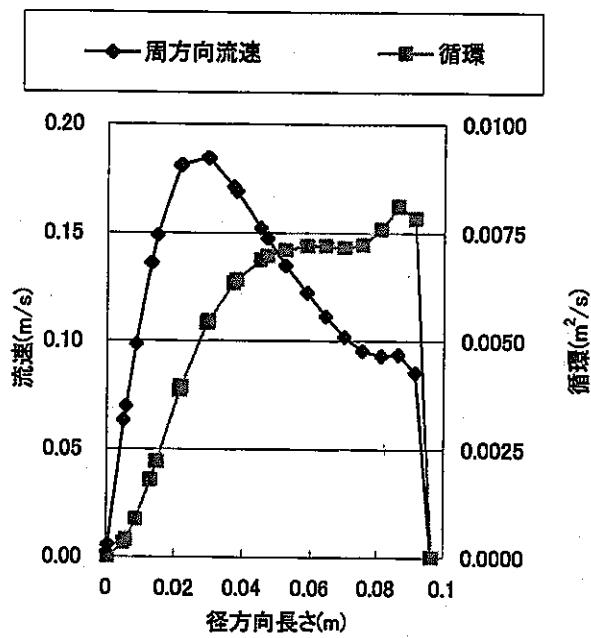


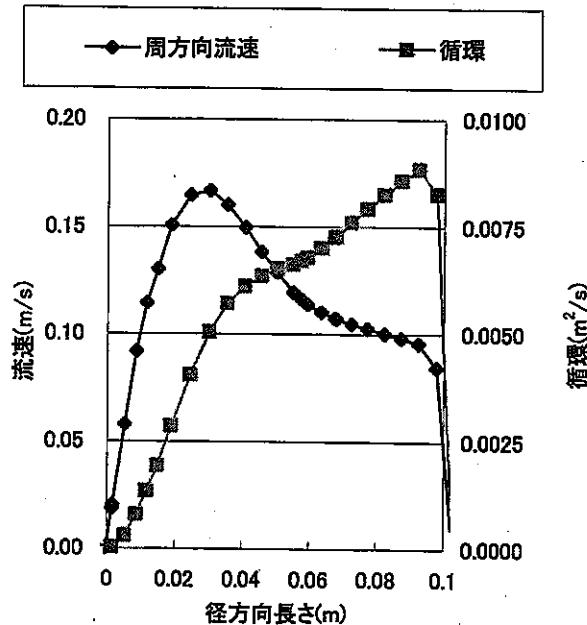
図 3.2.2-2a d=19.8mm、Q= 7(l/min)、z=0.15m での流速及び循環分布



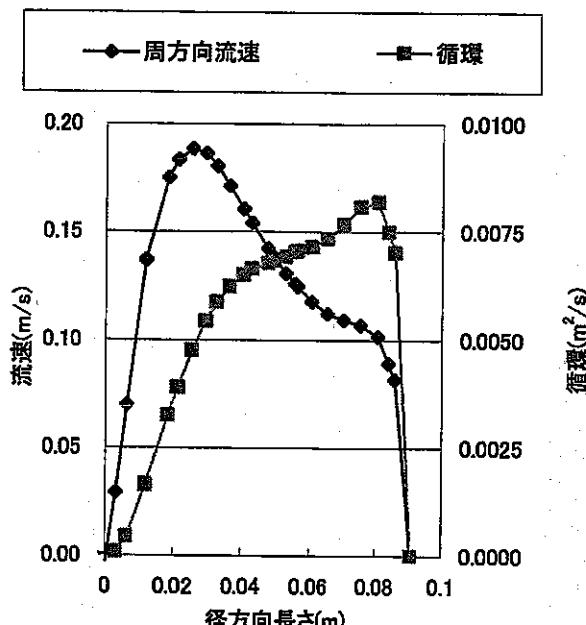
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

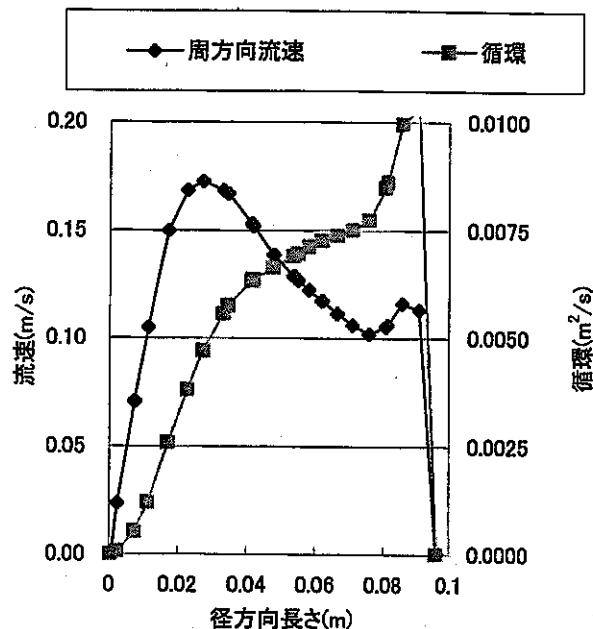


周方向流速、循環分布(south side)

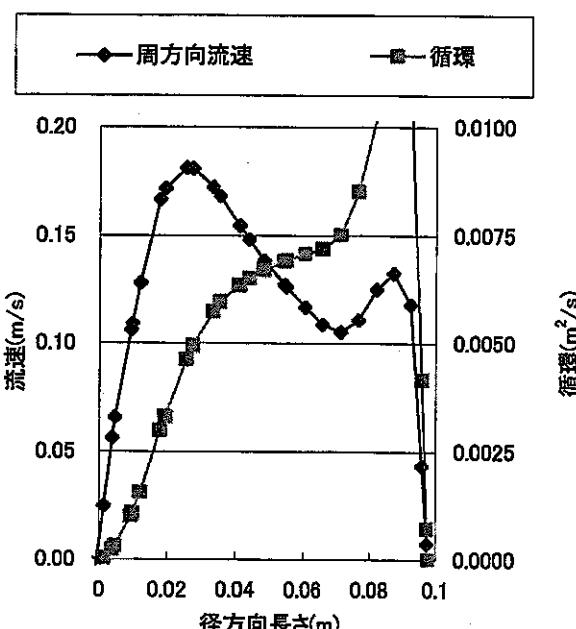


周方向流速、循環分布(north side)

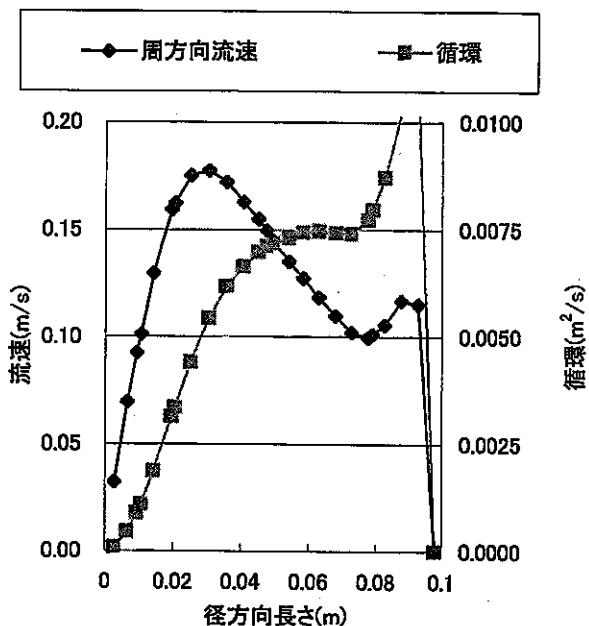
図 3.2.2-2b $d=19.8\text{mm}$ 、 $Q=7(\text{l}/\text{min})$ 、 $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布



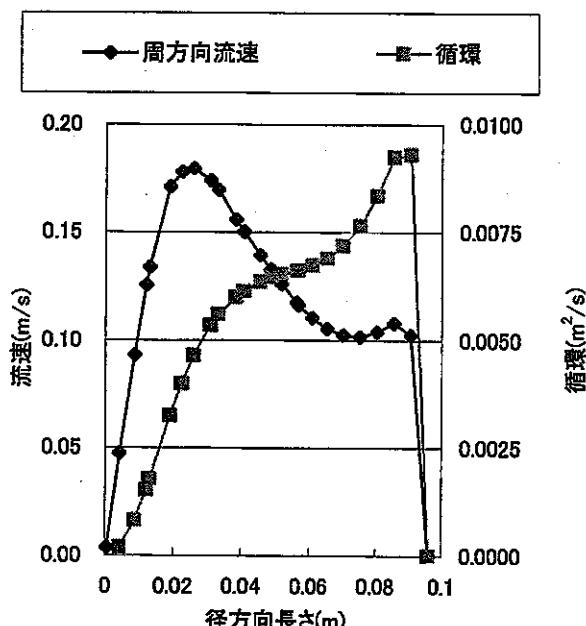
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

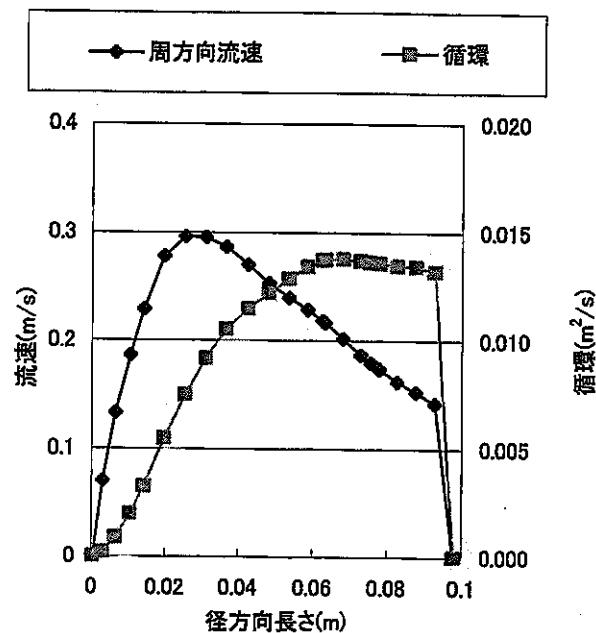


周方向流速、循環分布(south side)

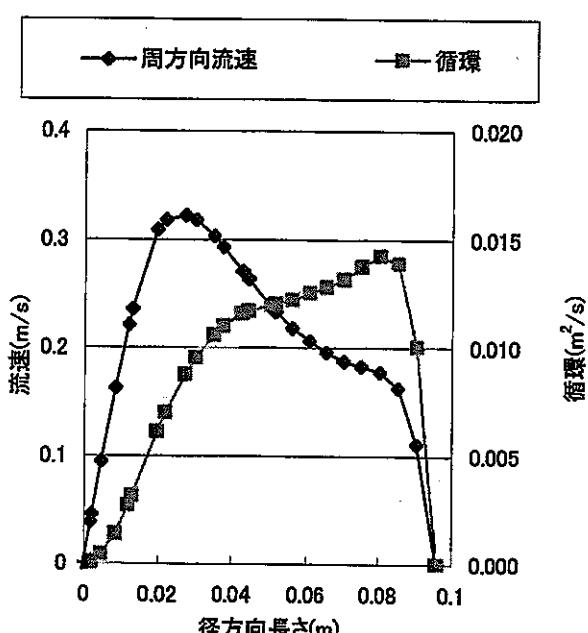


周方向流速、循環分布(north side)

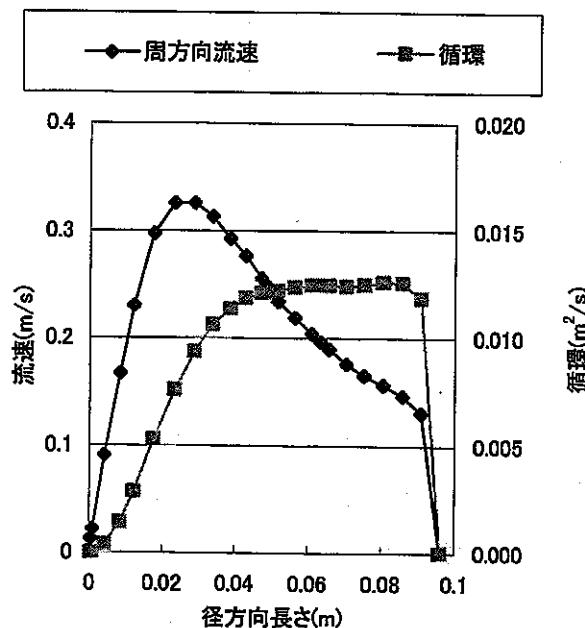
図 3.2.2-2c d=19.8mm、Q= 7(l/min)、z=0.35m での流速及び循環分布



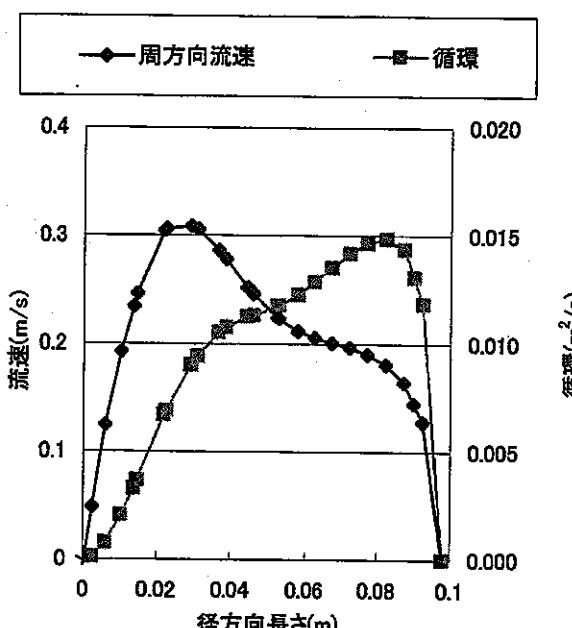
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

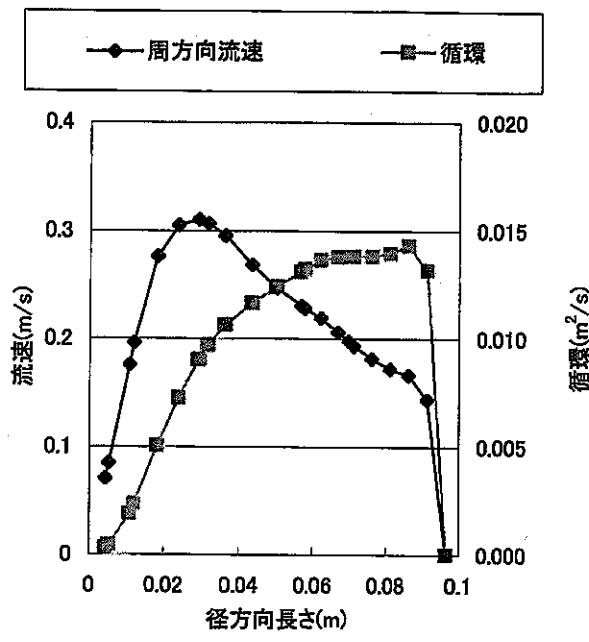


周方向流速、循環分布(south side)

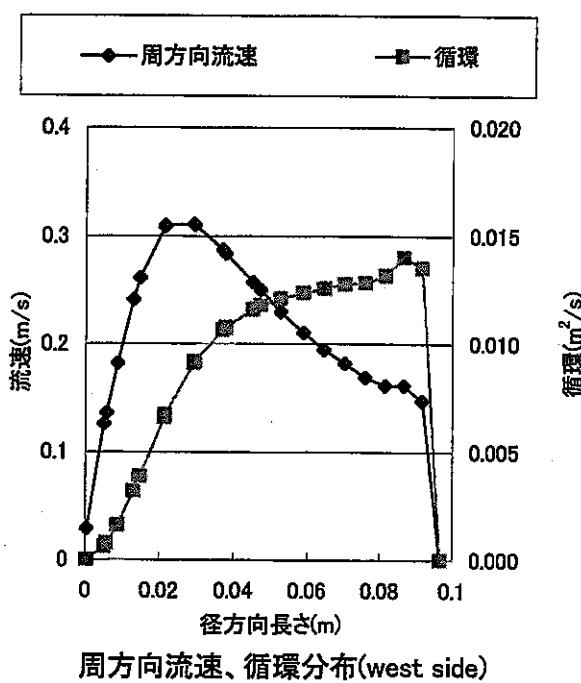


周方向流速、循環分布(north side)

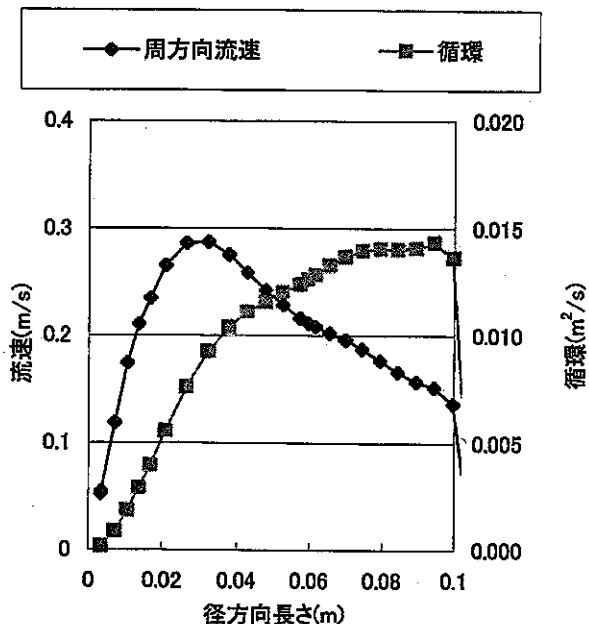
図 3.2.2-3a d=19.8mm, Q=10(l/min), z=0.15m での流速及び循環分布



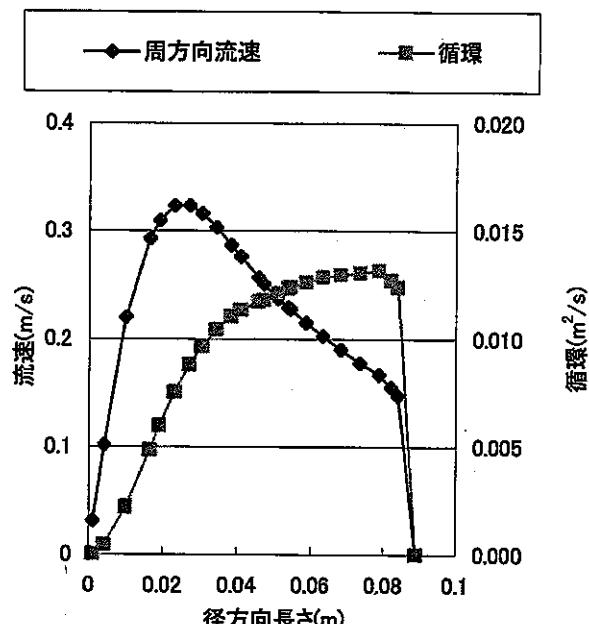
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

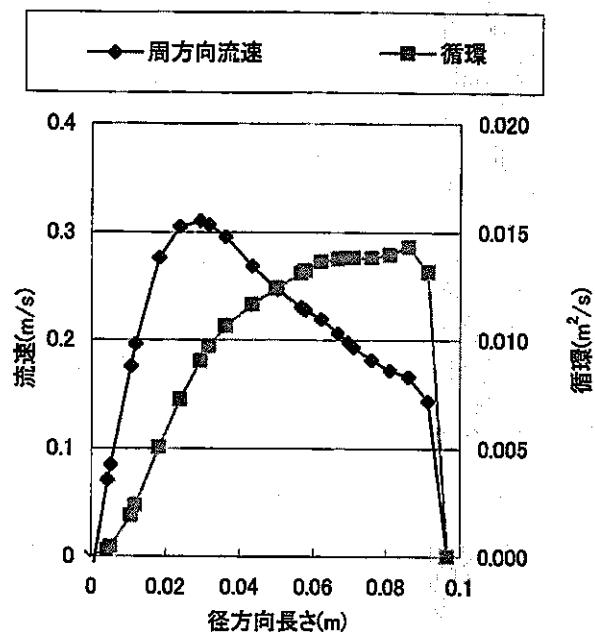


周方向流速、循環分布(south side)

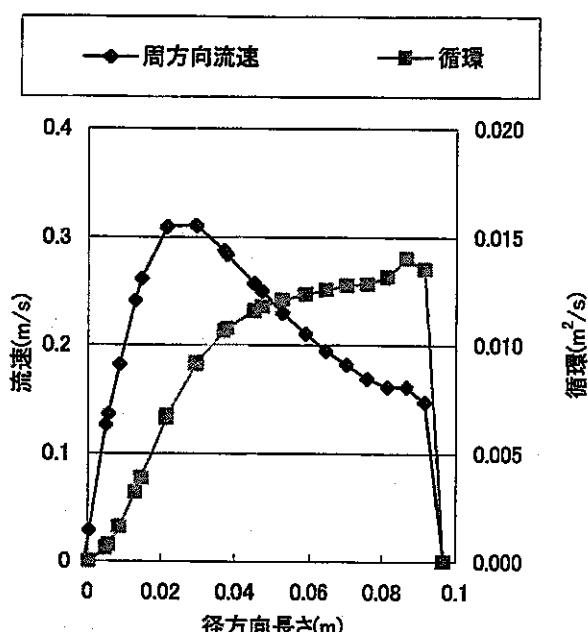


周方向流速、循環分布(north side)

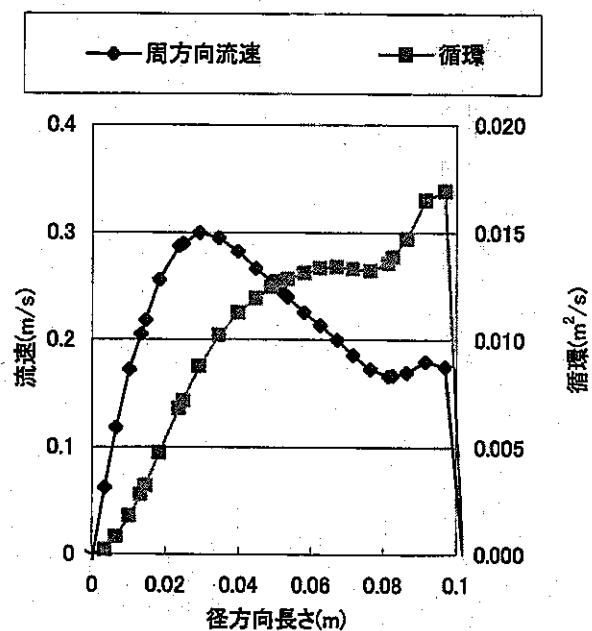
図 3.2.2-3b d=19.8mm、Q=10(l/min)、z=0.25m での流速及び循環分布



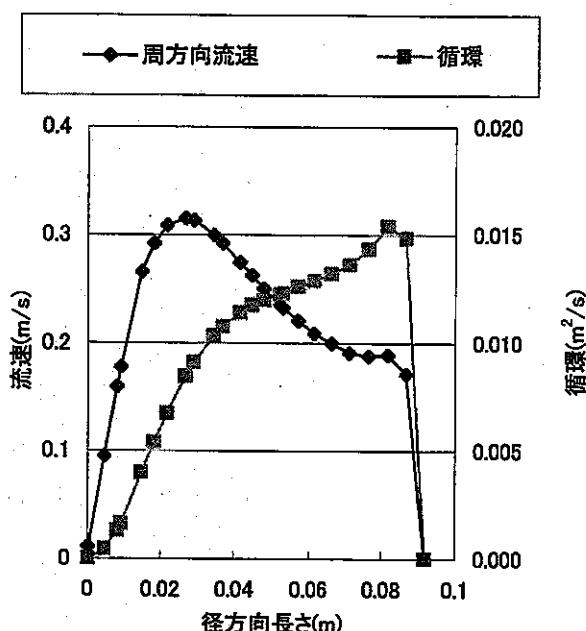
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

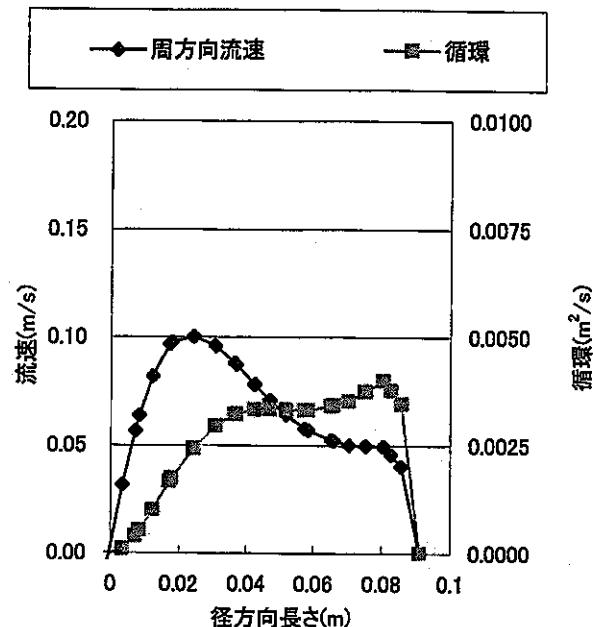


周方向流速、循環分布(south side)

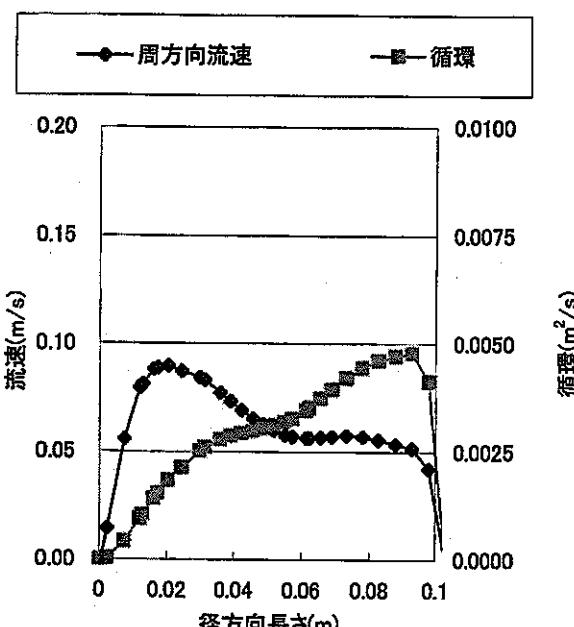


周方向流速、循環分布(north side)

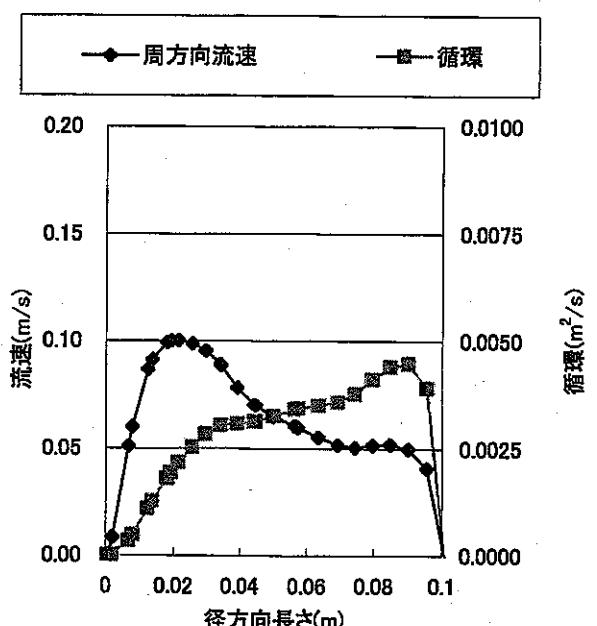
図 3.2.2-3c d=19.8mm、Q=10(l/min)、z=0.35m での流速及び循環分布



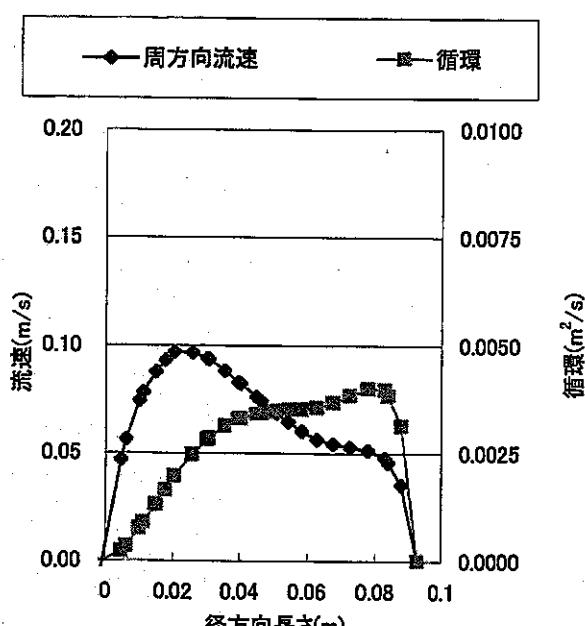
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)



周方向流速、循環分布(south side)



周方向流速、循環分布(north side)

図 3.2.2-4a d=30.0mm、Q=5(1/min)、z=0.15m での流速及び循環分布

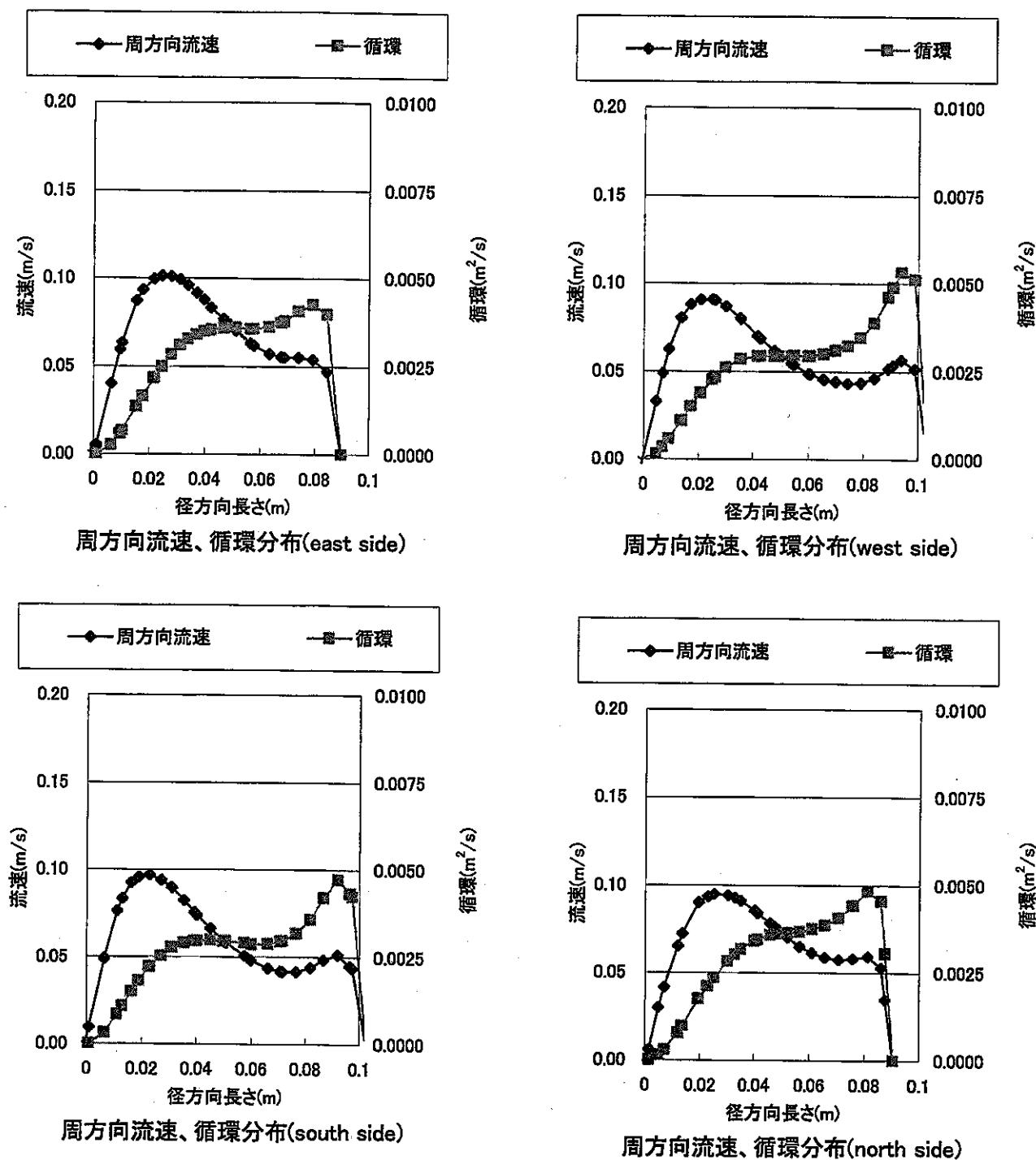


図 3.2.2-4b $d=30.0\text{mm}$ 、 $Q=5(1/\text{min})$ 、 $z=0.25\text{m}$ での流速及び循環分布

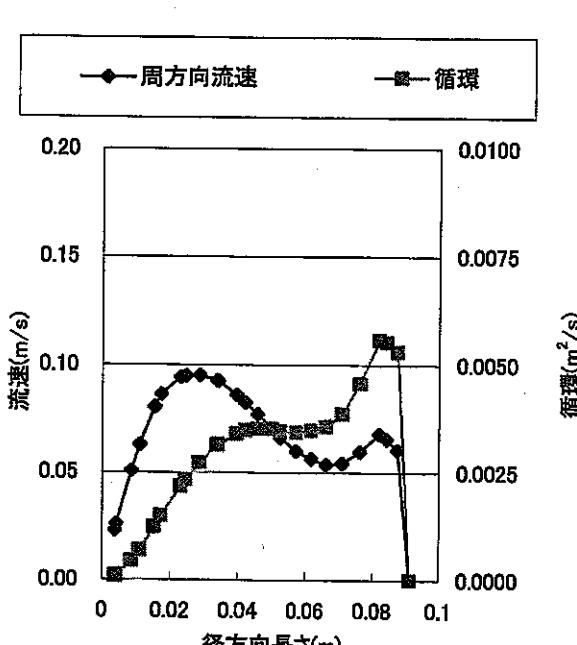
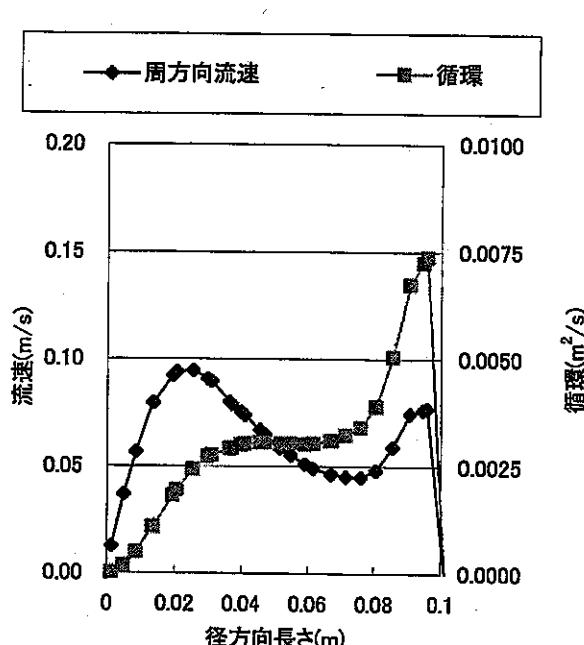
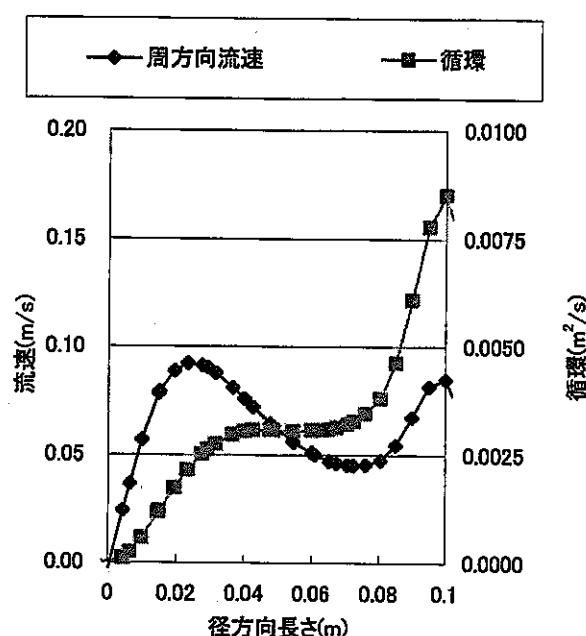
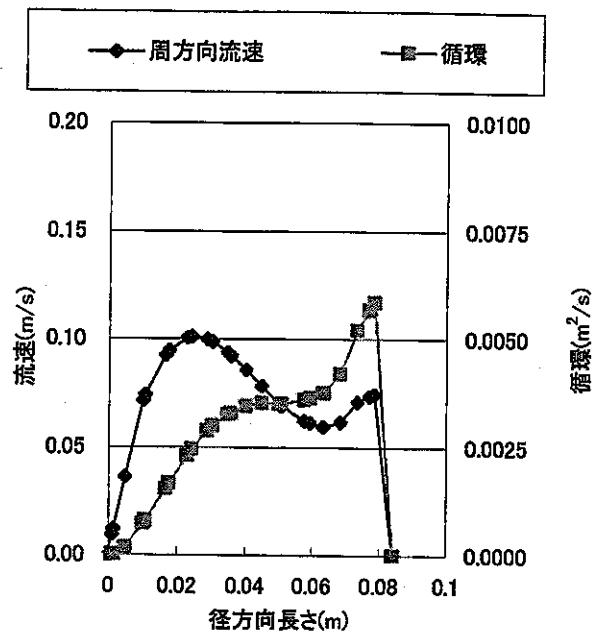
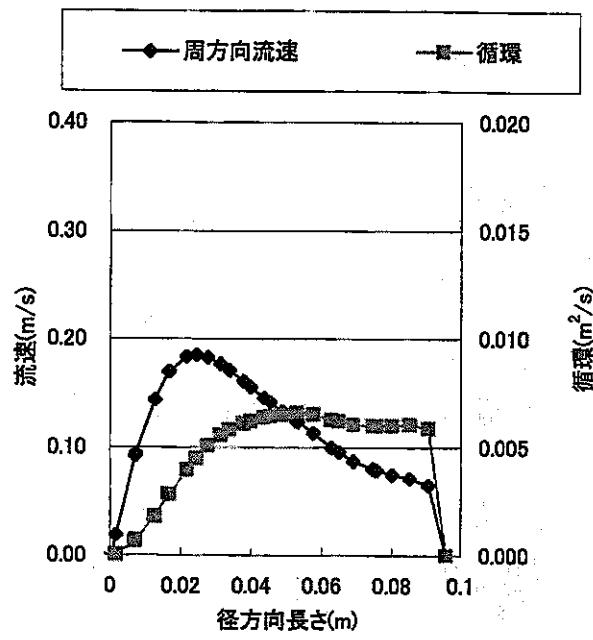
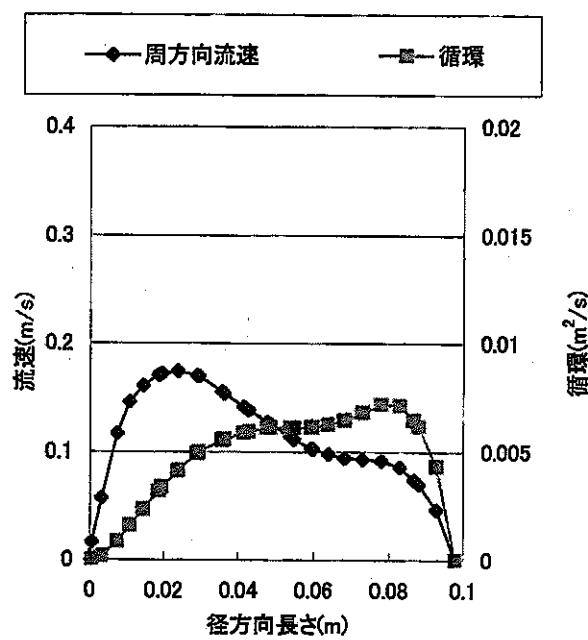


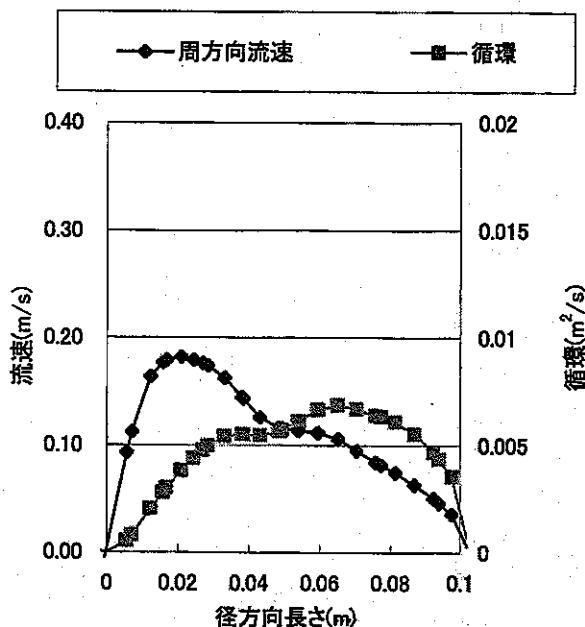
図 3.2.2-4c d=30.0mm、Q=5(l/min)、z=0.35m での流速及び循環分布



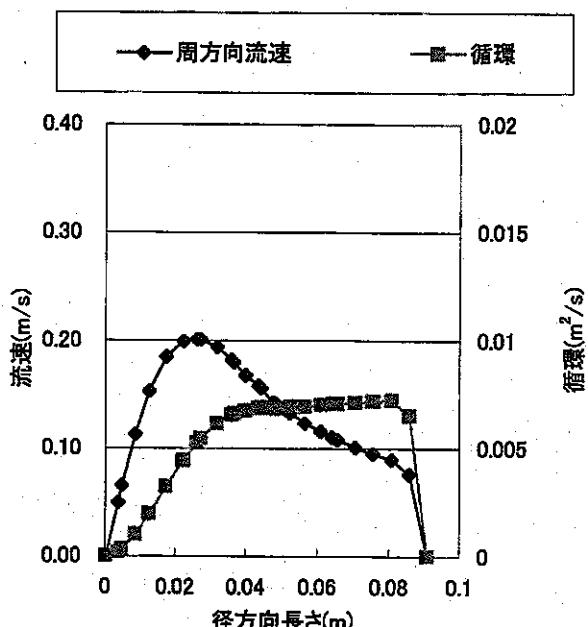
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

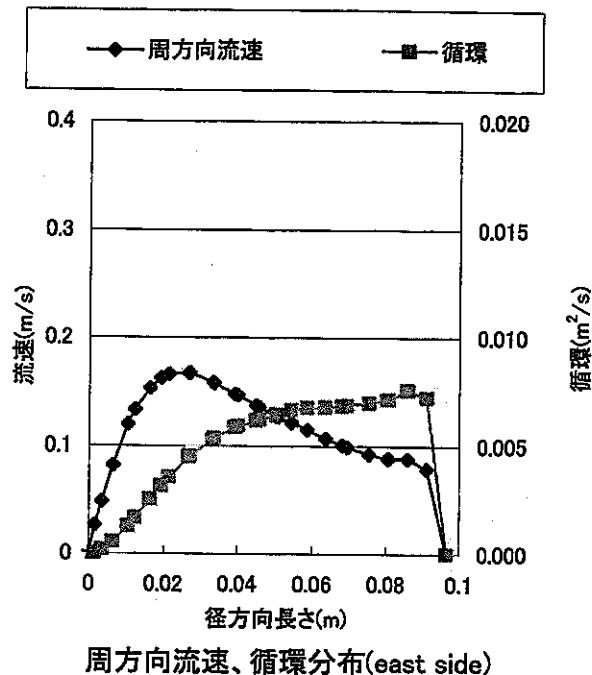


周方向流速、循環分布(south side)

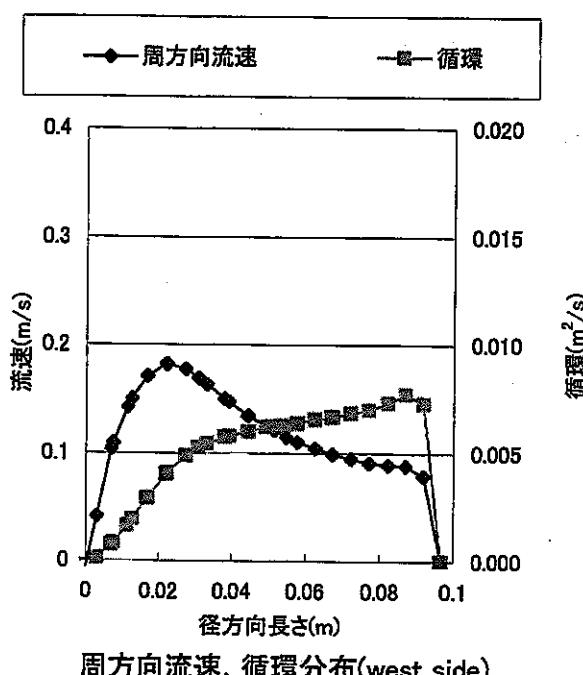


周方向流速、循環分布(north side)

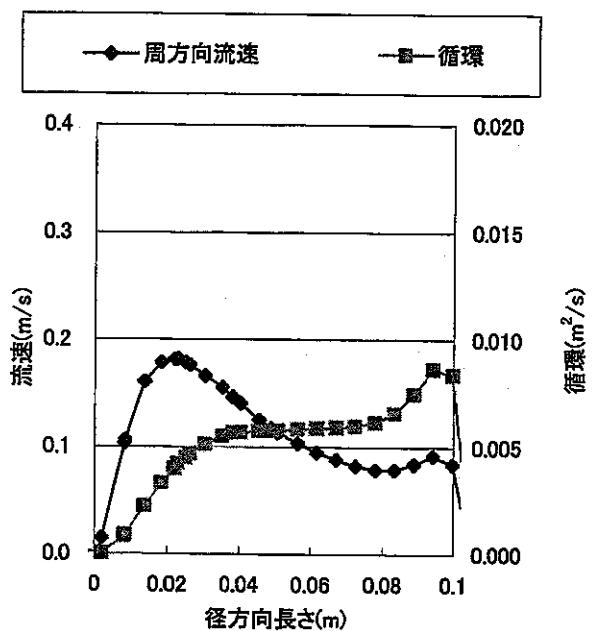
図 3.2.2-5a d=30.0mm, Q=7(l/min), z=0.15m での流速及び循環分布



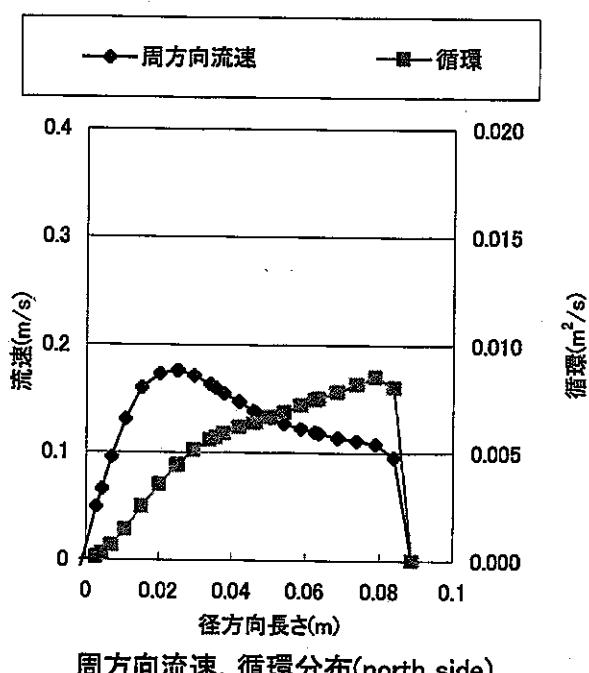
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

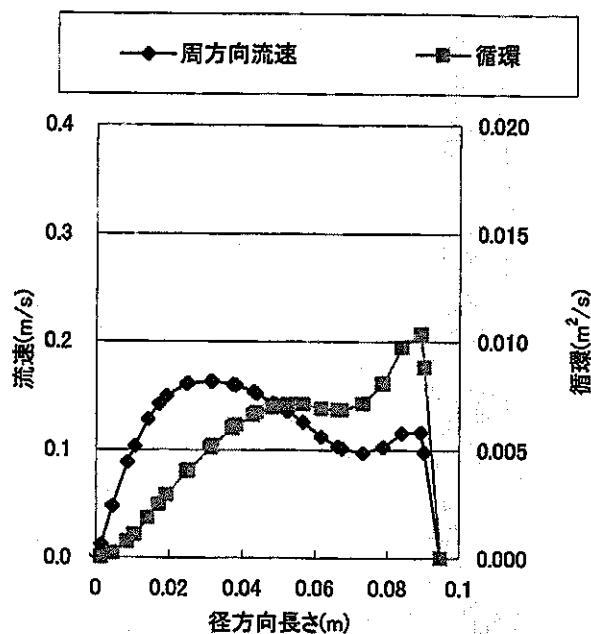


周方向流速、循環分布(south side)

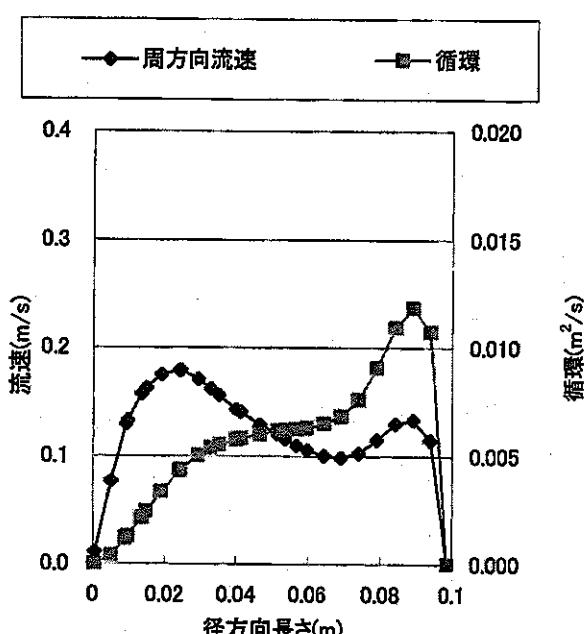


周方向流速、循環分布(north side)

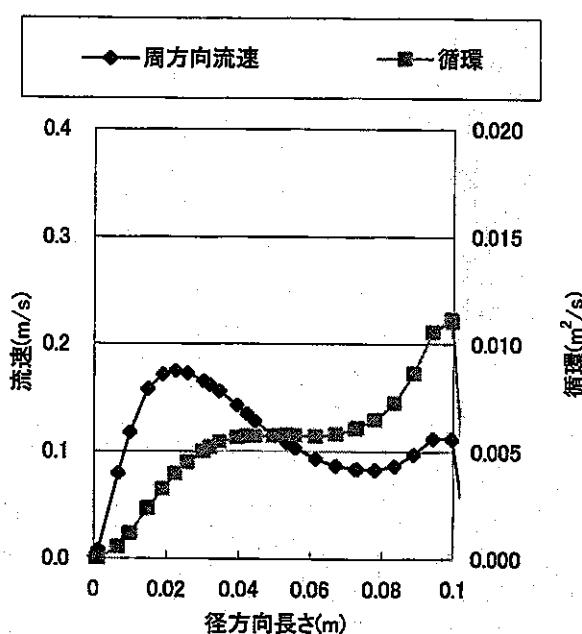
図 3.2.2-5b d=30.0mm、Q=7(l/min)、z=0.25m での流速及び循環分布



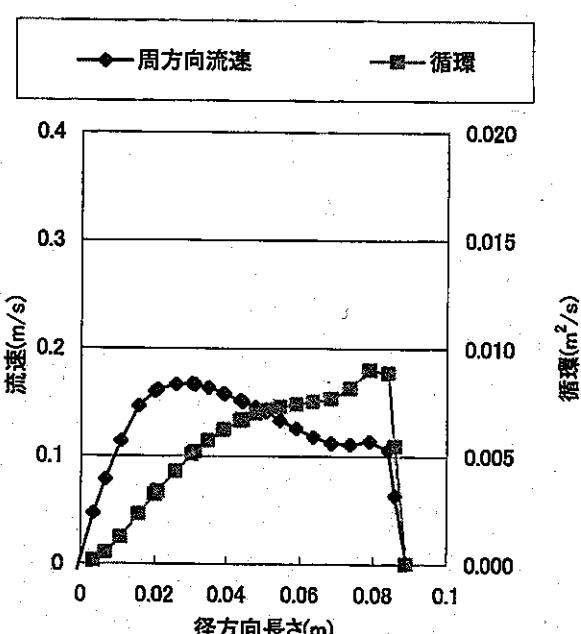
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)



周方向流速、循環分布(south side)



周方向流速、循環分布(north side)

図 3.2.2-5c d=30.0mm, Q=7(l/min), z=0.35m での流速及び循環分布

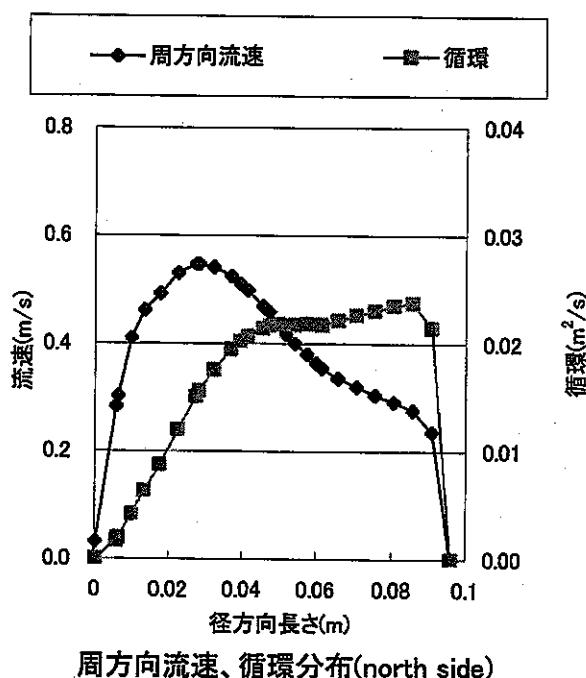
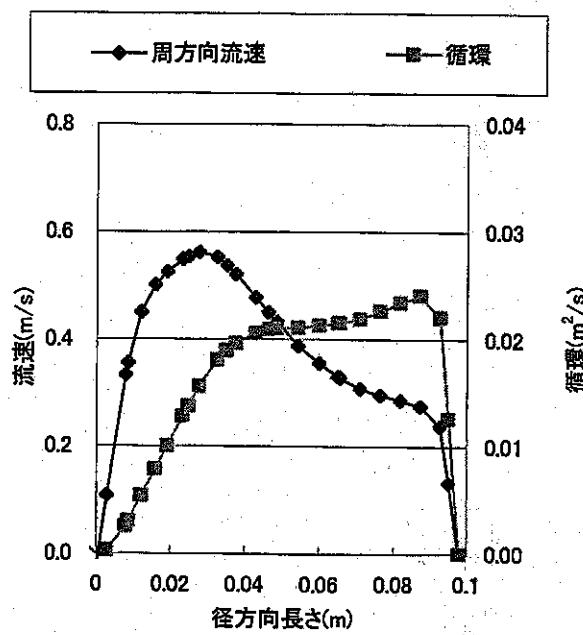
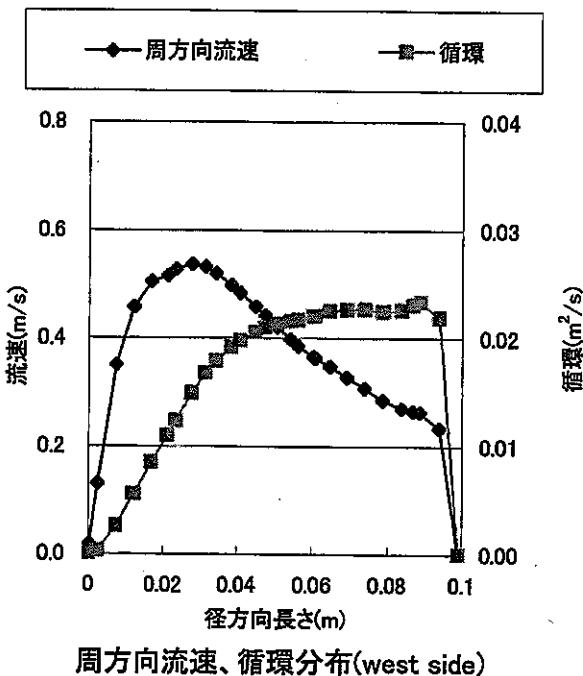
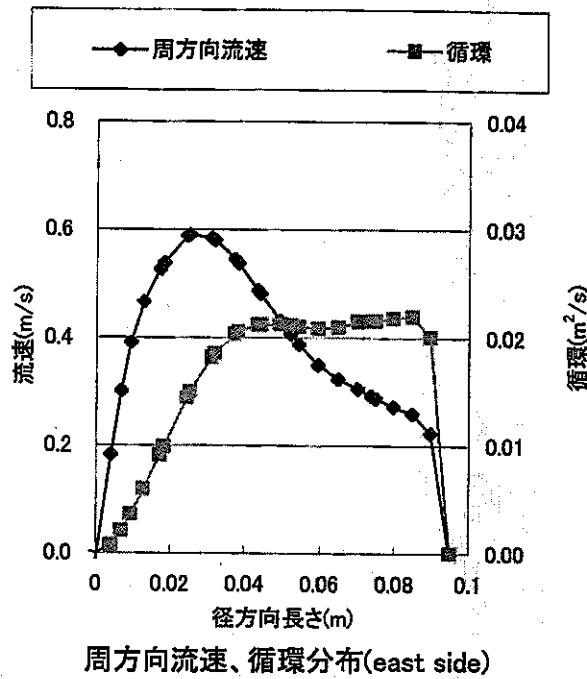
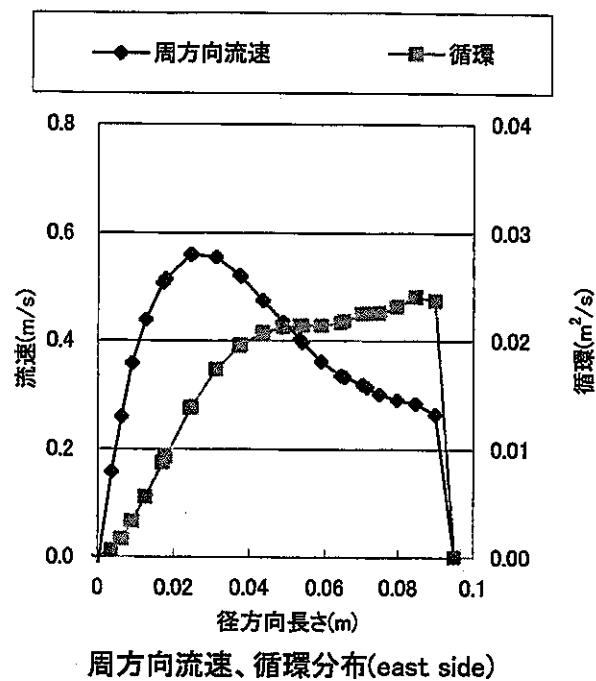
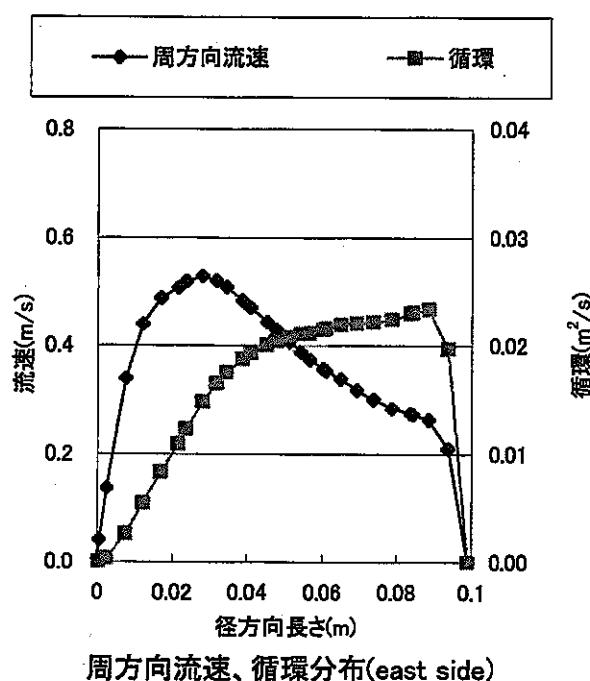


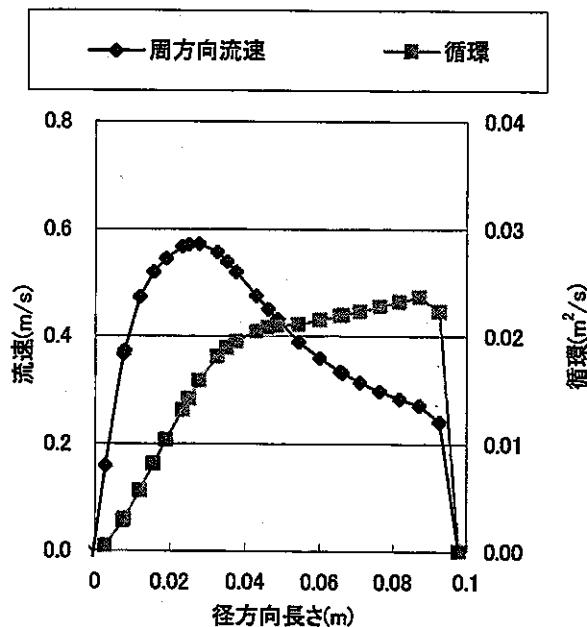
図 3.2.2-6a d=30.0mm、Q=15(l/min)、z=0.15m での流速及び循環分布



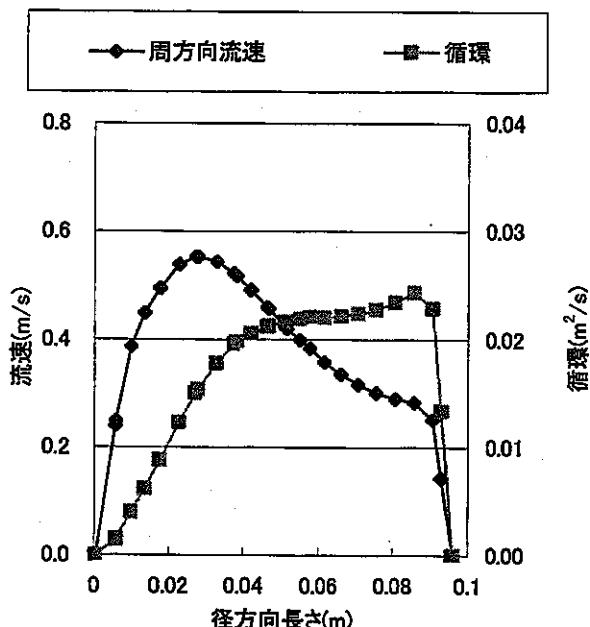
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(south side)



周方向流速、循環分布(north side)

図 3.2.2-6b d=30.0mm、Q=15(1/min)、z=0.25m での流速及び循環分布

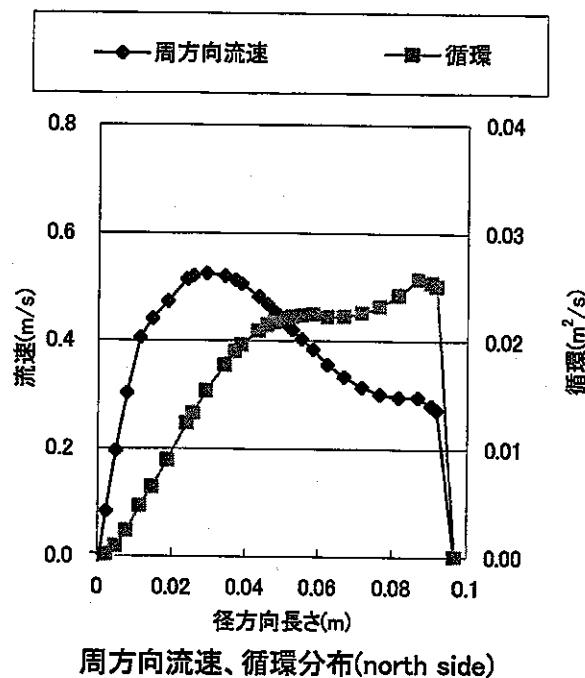
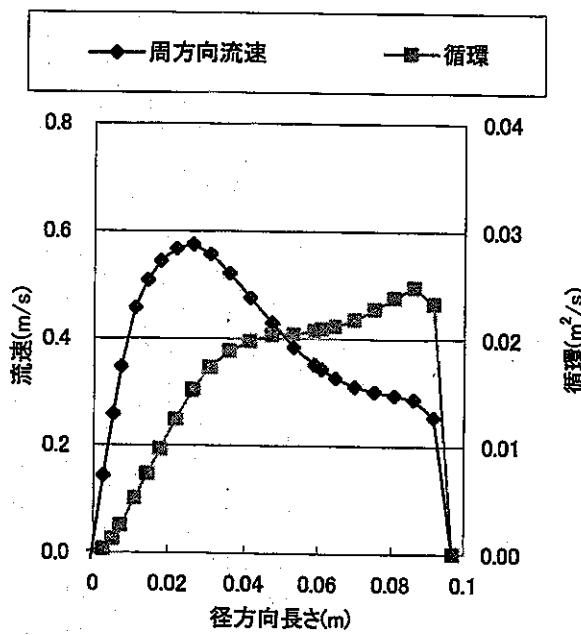
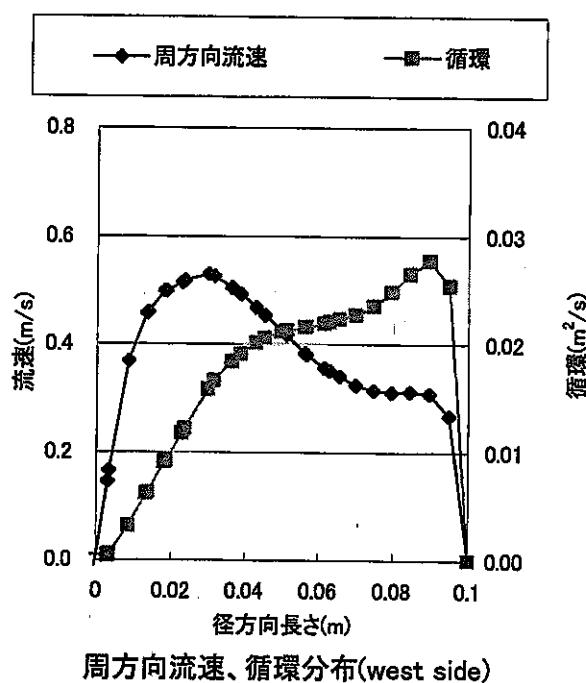
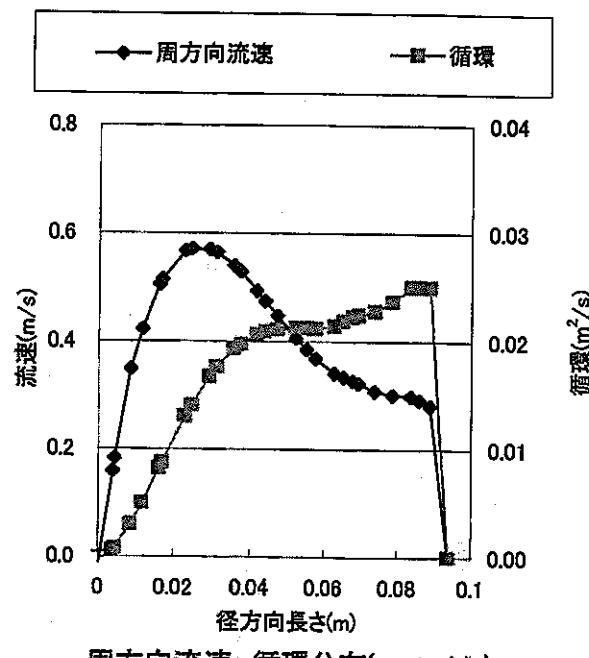
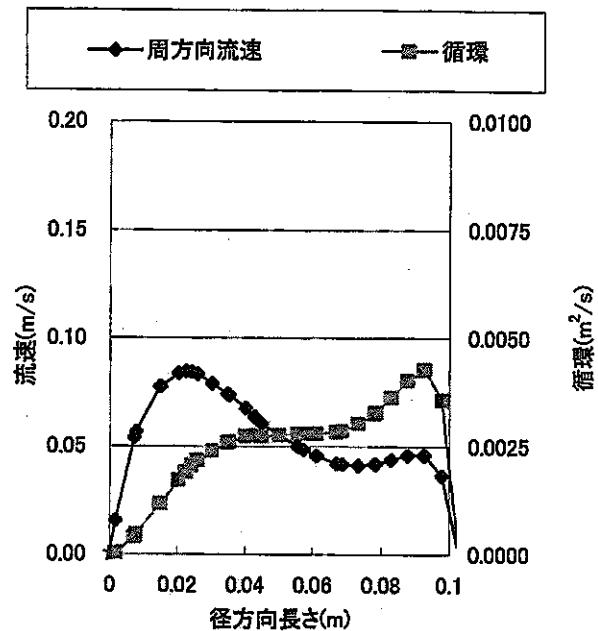
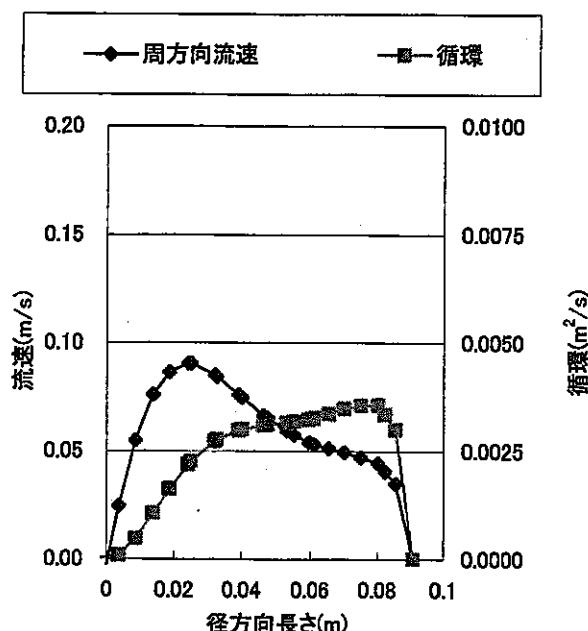


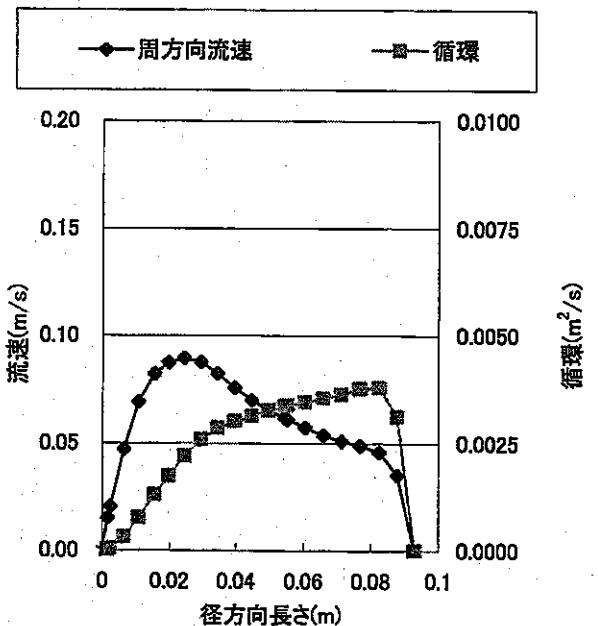
図 3.2.2-6c d=30.0mm、Q=15(l/min)、z=0.35m での流速及び循環分布



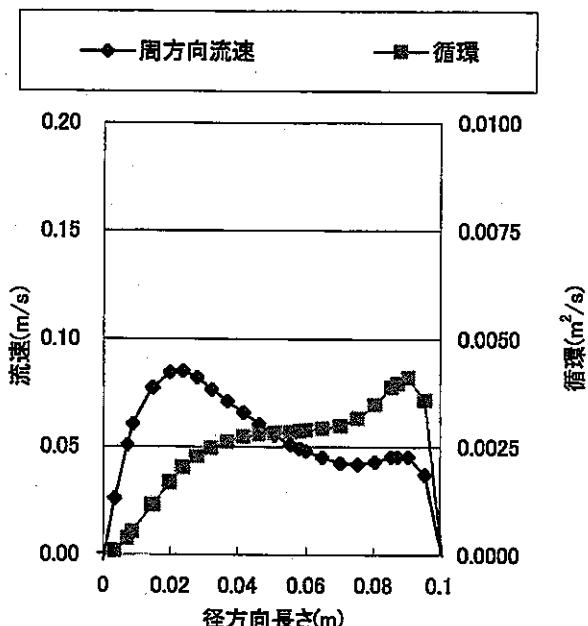
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

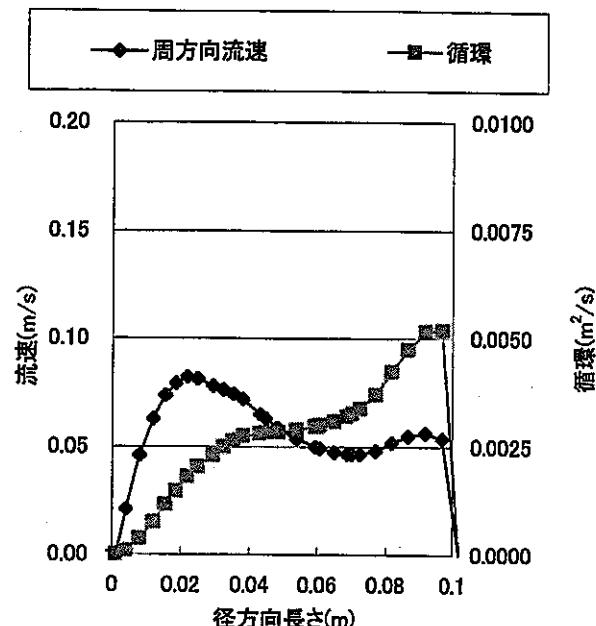


周方向流速、循環分布(south side)

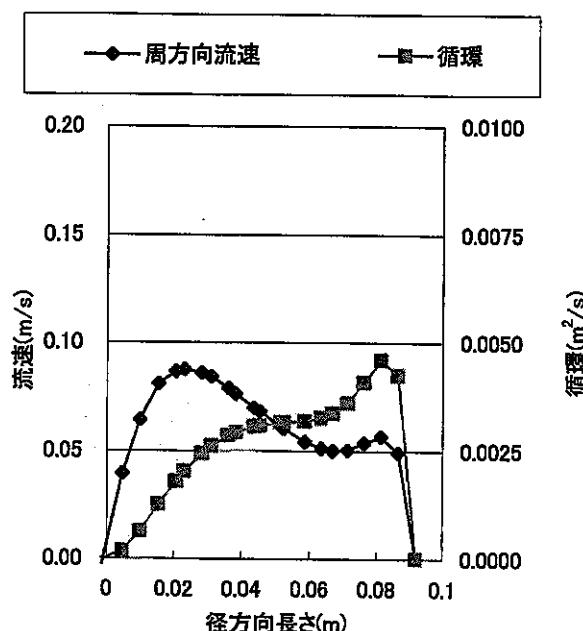


周方向流速、循環分布(north side)

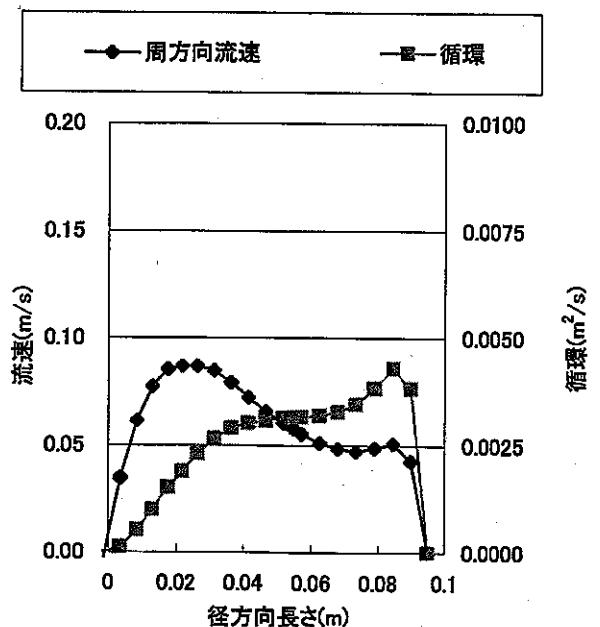
図 3.2.2-7a d=40.9mm、Q=5(1/min)、z=0.15m での流速及び循環分布



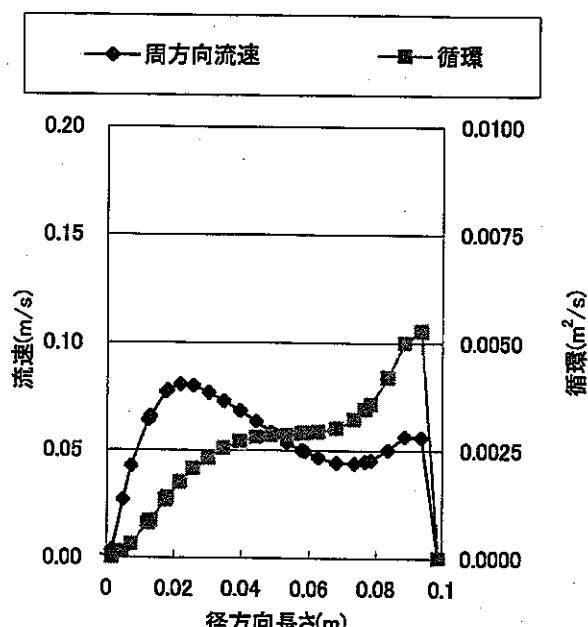
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

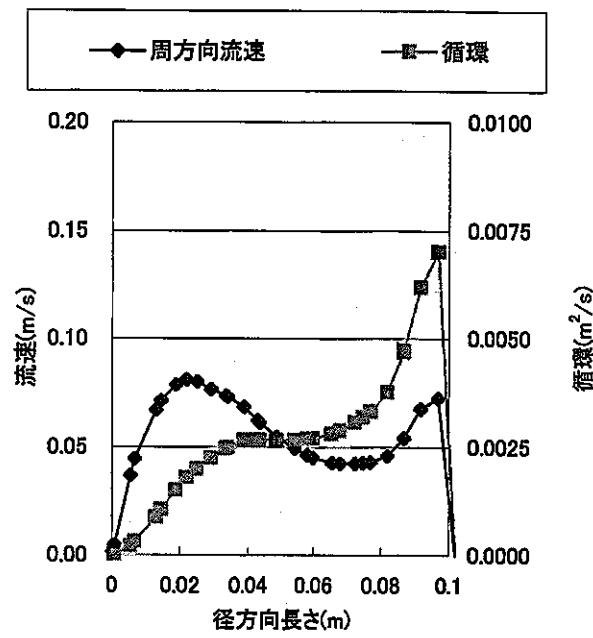


周方向流速、循環分布(south side)

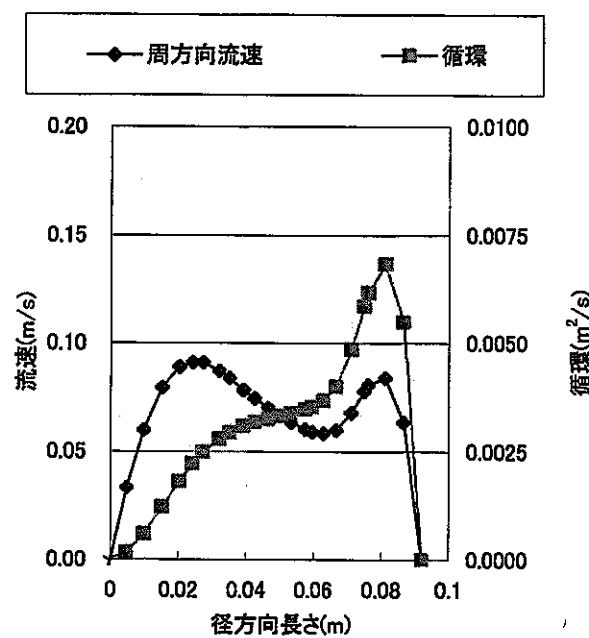


周方向流速、循環分布(north side)

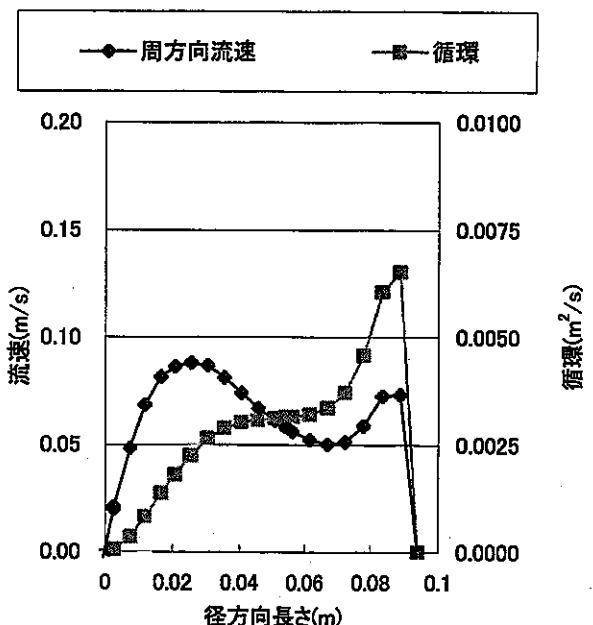
図 3. 2-7b d=40.9mm, Q=5(1/min), z=0.25m での流速及び循環分布



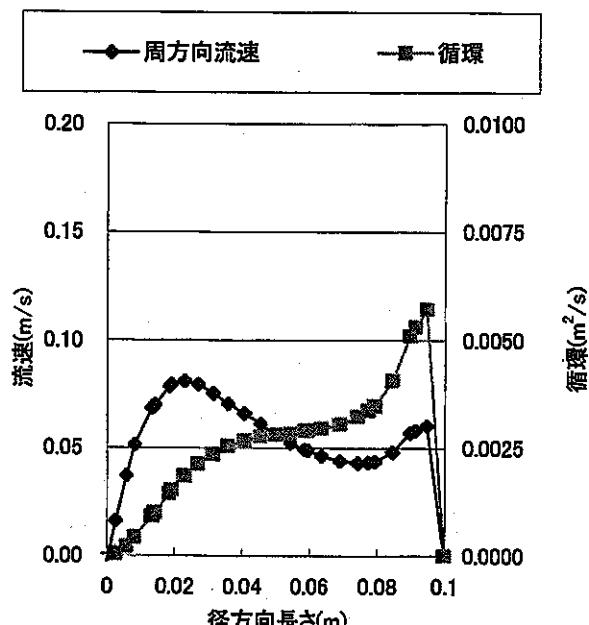
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

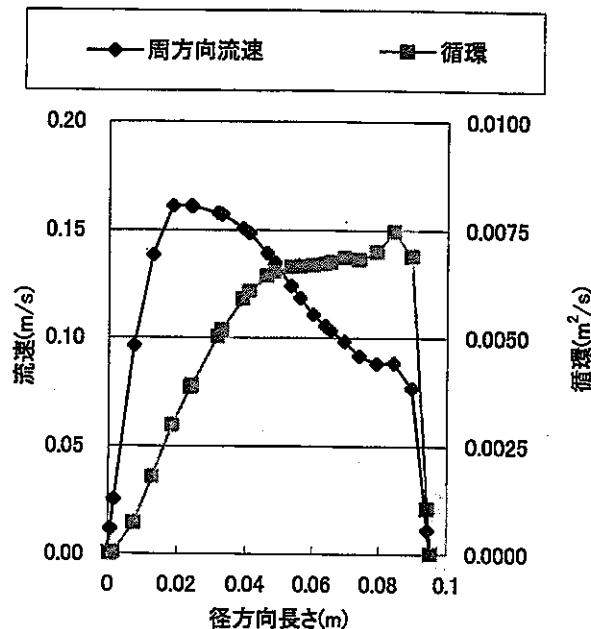


周方向流速、循環分布(south side)

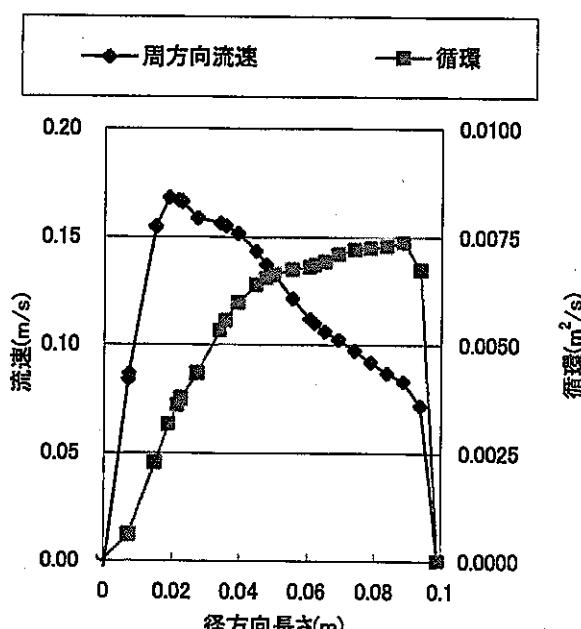


周方向流速、循環分布(north side)

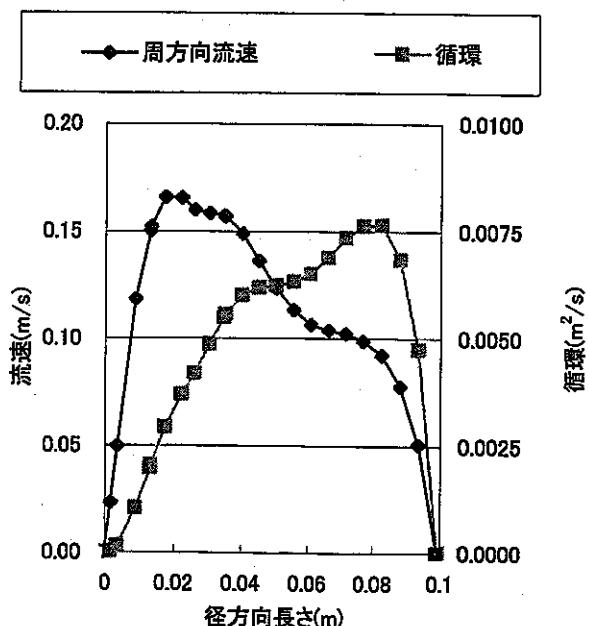
図 3.2.2-7c d=40.9mm、Q=5(1/min)、z=0.35m での流速及び循環分布



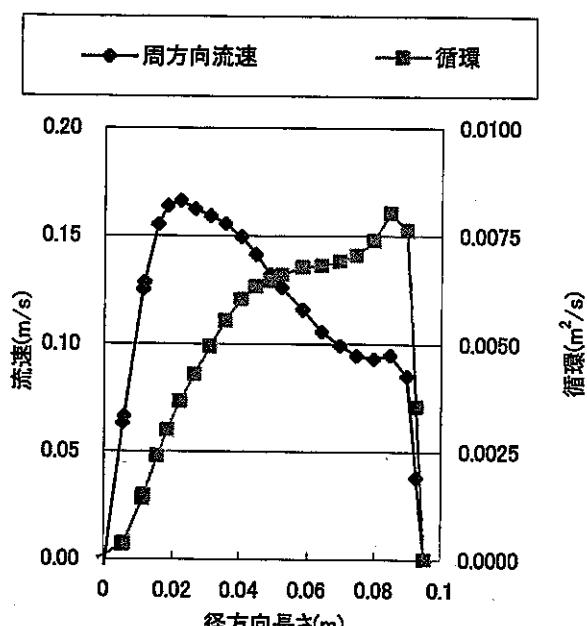
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

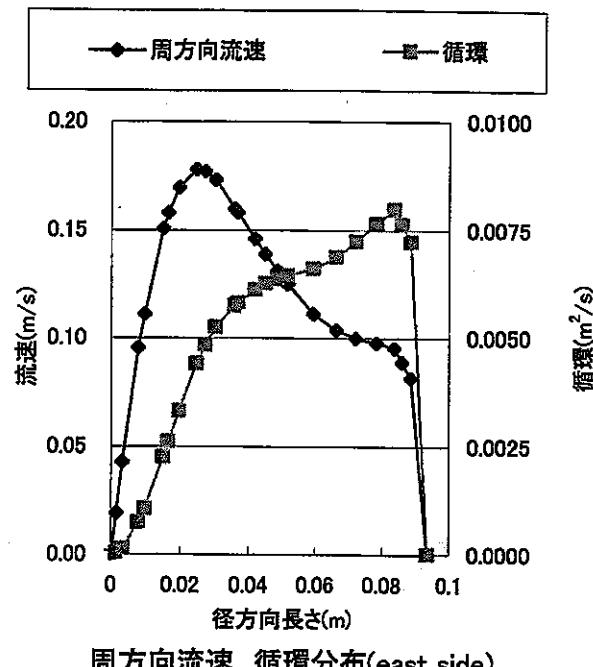


周方向流速、循環分布(south side)

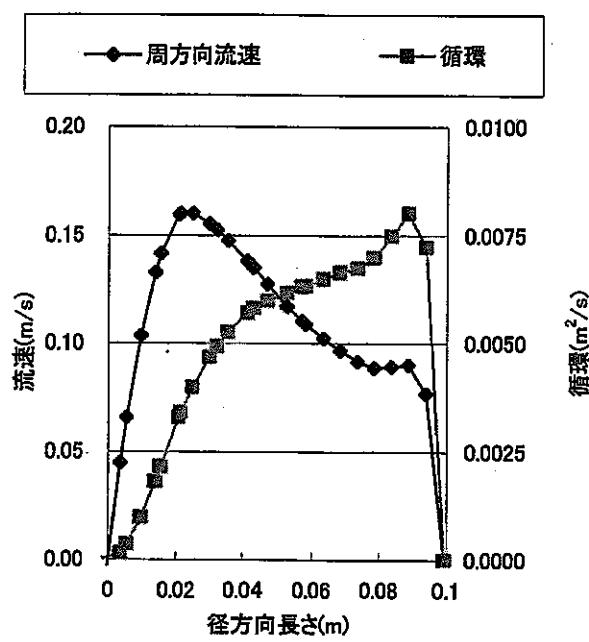


周方向流速、循環分布(north side)

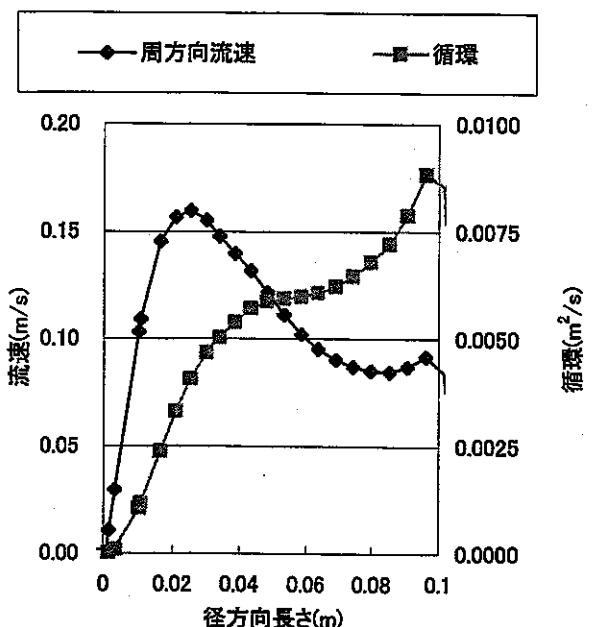
図 3.2. 2-8a d=40.9mm, Q=7(l/min), z=0.15m での流速及び循環分布



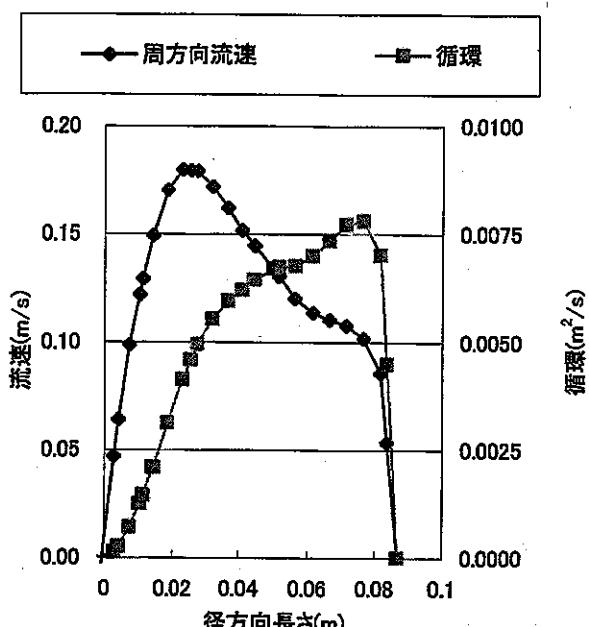
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

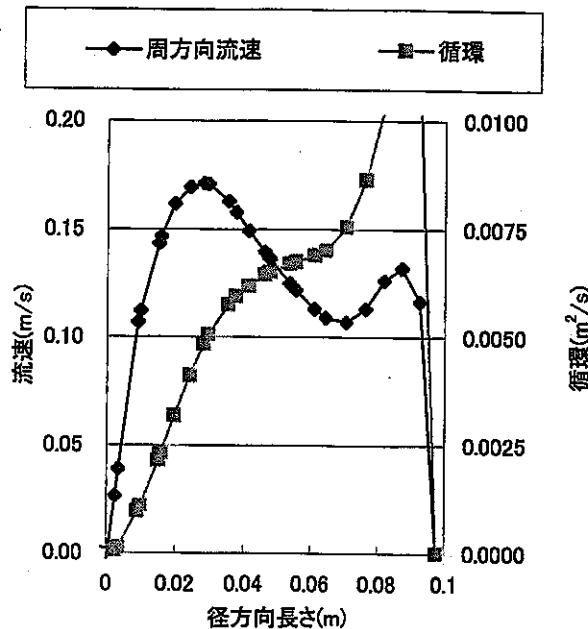


周方向流速、循環分布(south side)

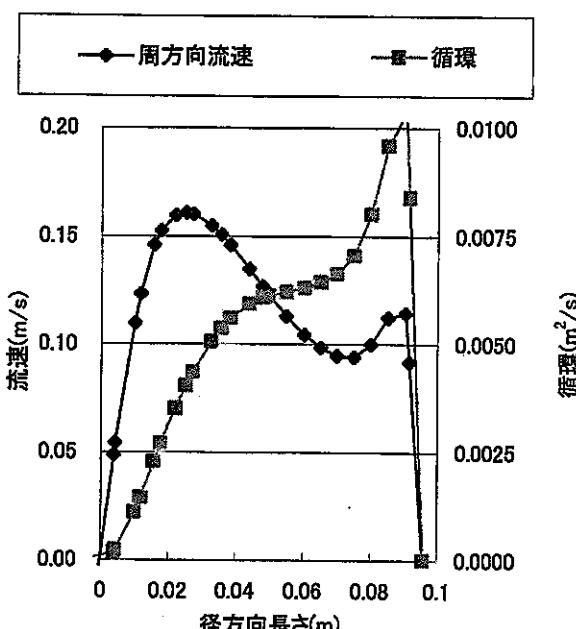


周方向流速、循環分布(north side)

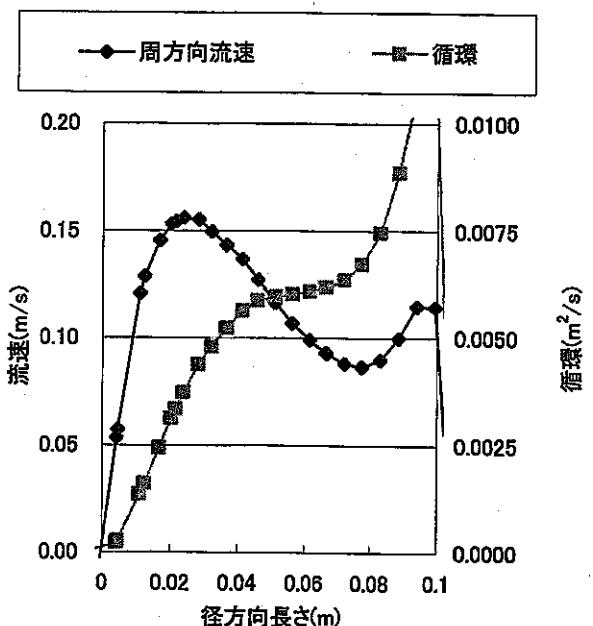
図 3.2.2-8b d=40.9mm, Q=7(l/min), z=0.25m での流速及び循環分布



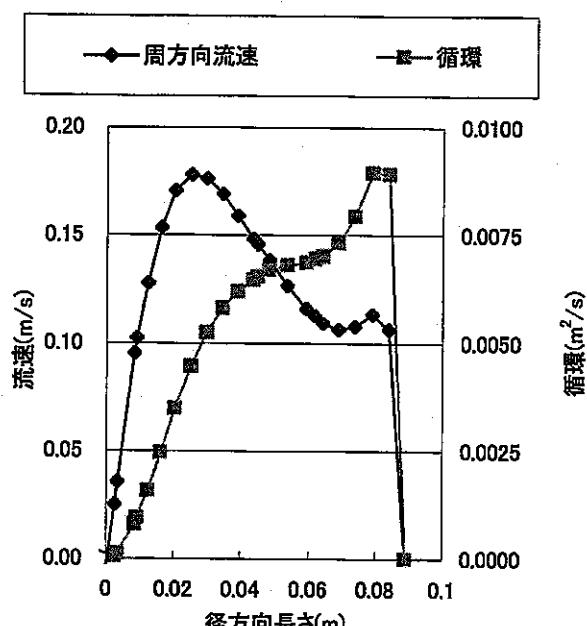
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(east side)

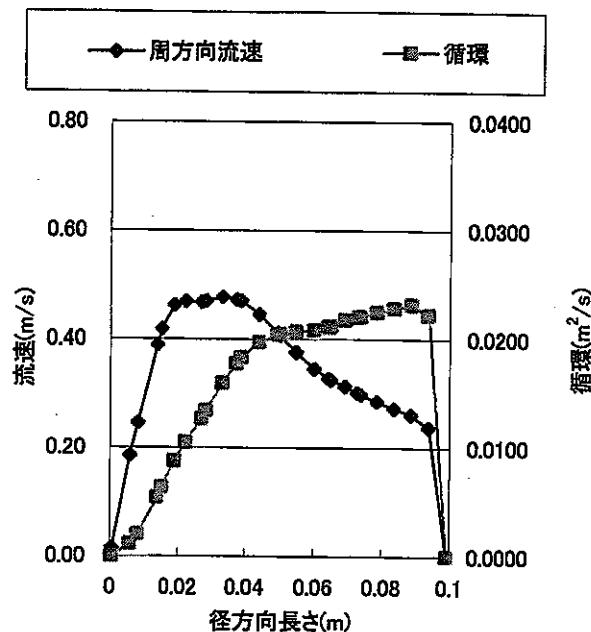


周方向流速、循環分布(south side)

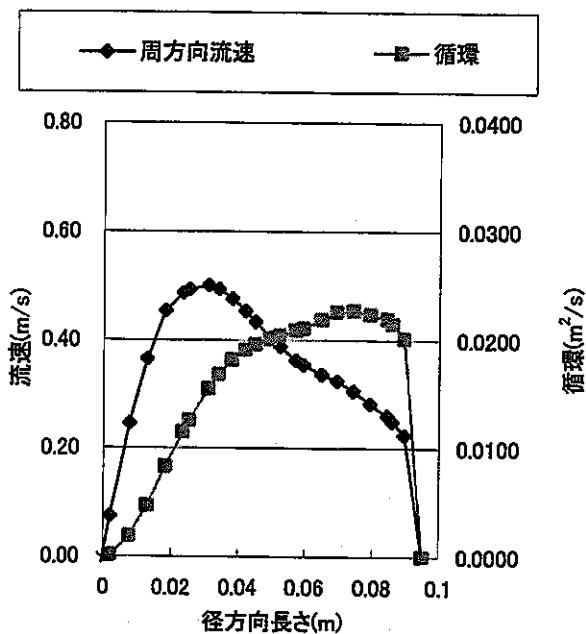


周方向流速、循環分布(north side)

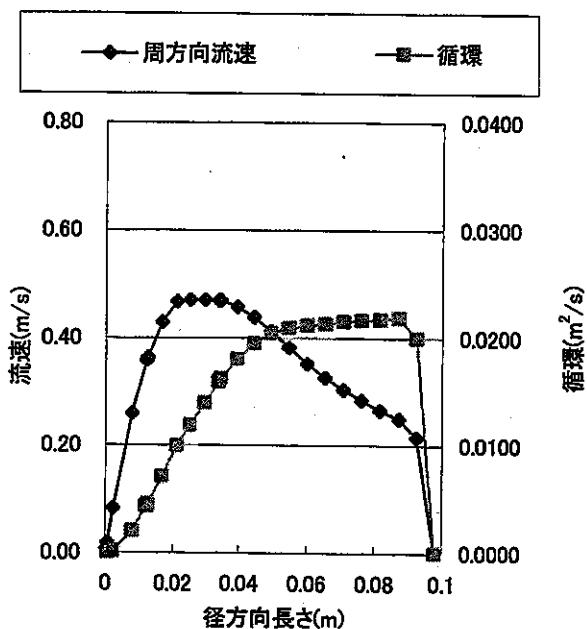
図 3. 2-8c d=40.9mm、Q=7(l/min)、z=0.35m での流速及び循環分布



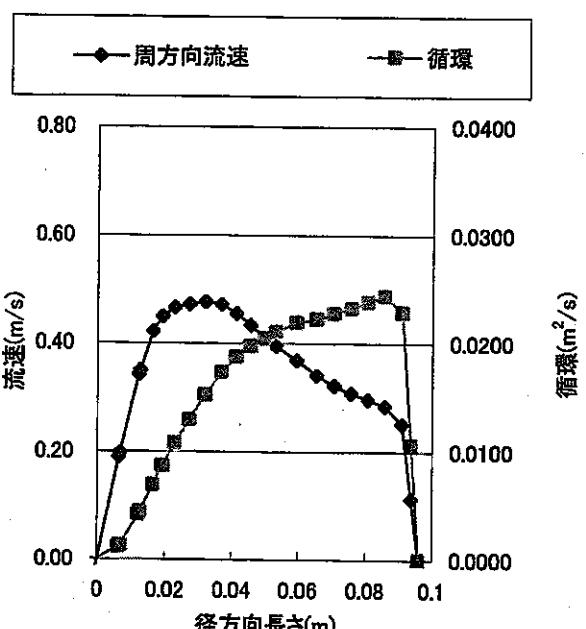
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

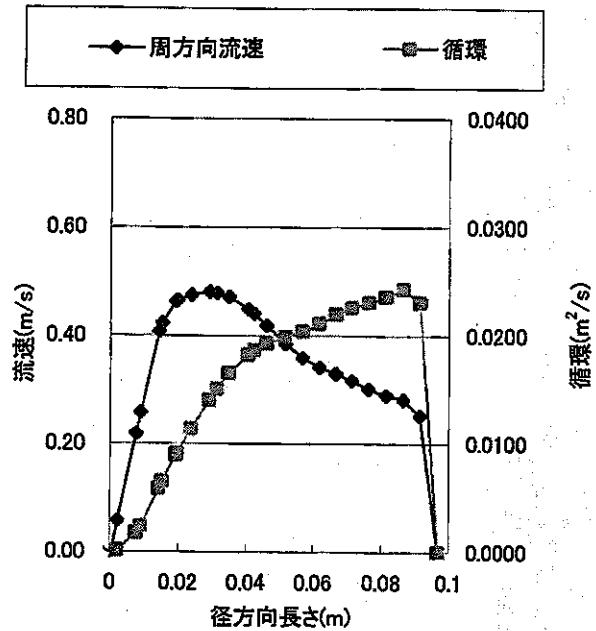


周方向流速、循環分布(south side)

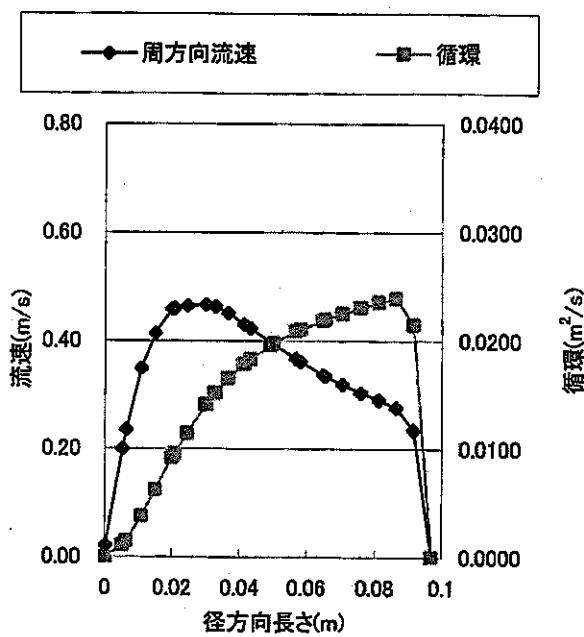


周方向流速、循環分布(north side)

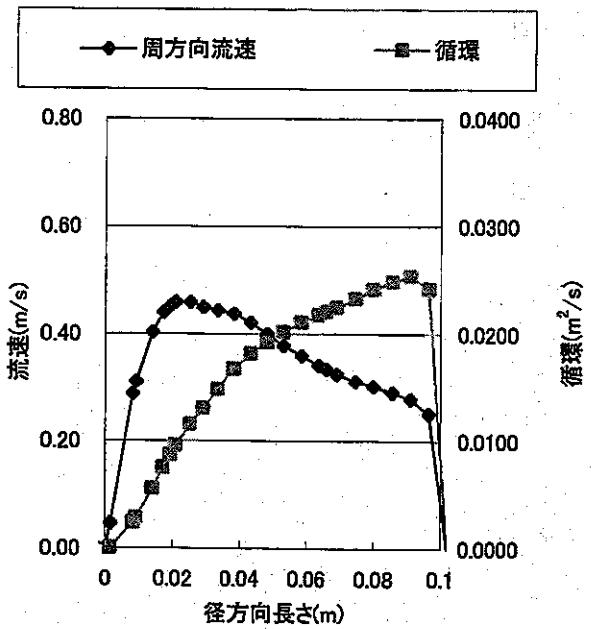
図 3.2.2-9a d=40.9mm, Q=15(l/min), z=0.15m での流速及び循環分布



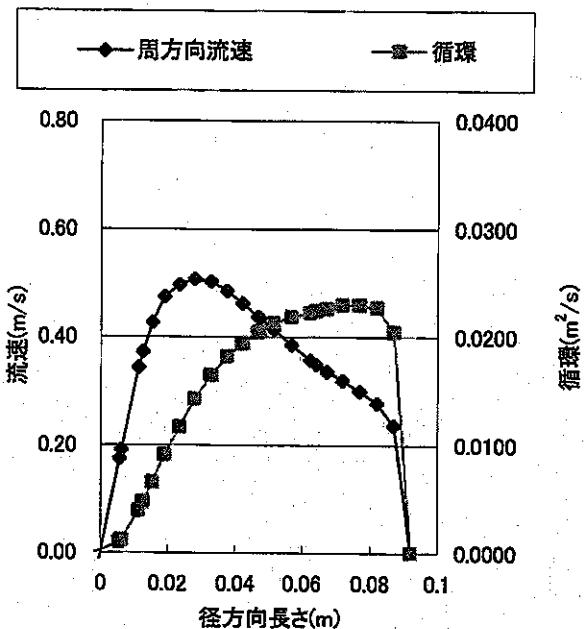
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)

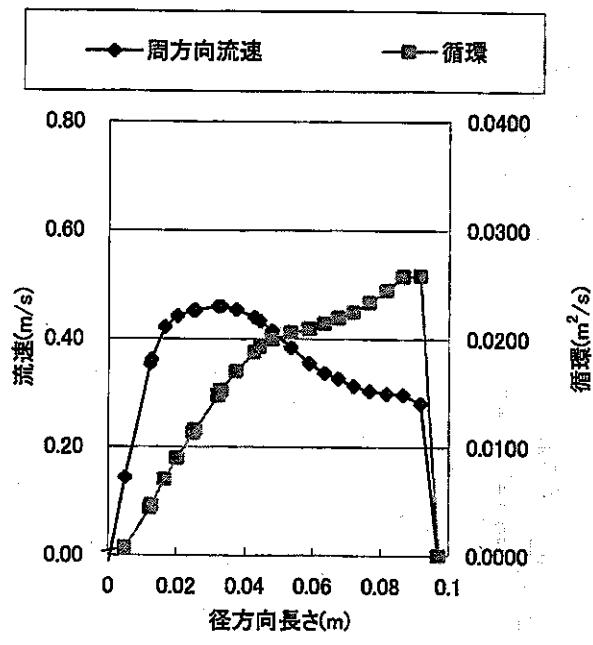


周方向流速、循環分布(south side)

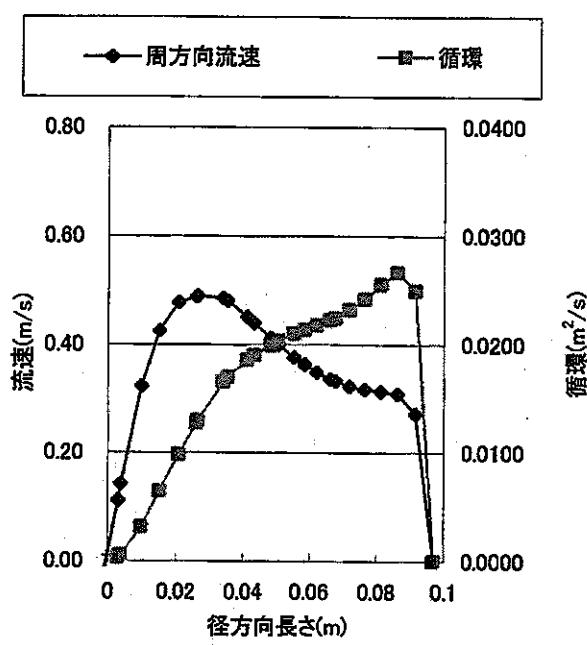


周方向流速、循環分布(north side)

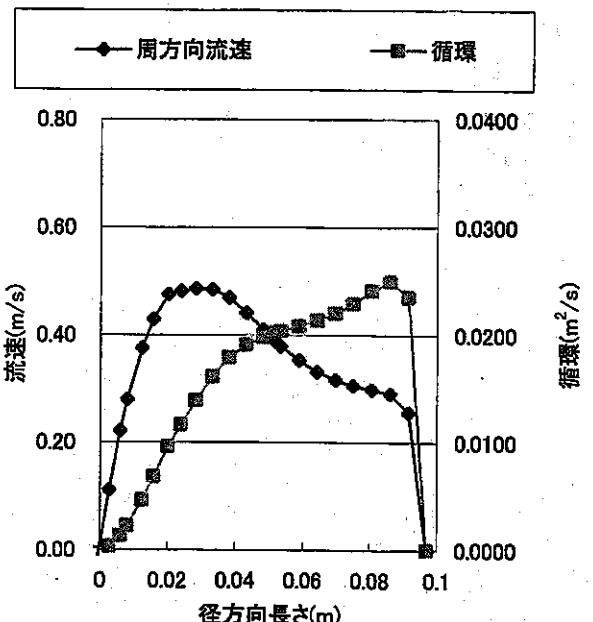
図 3.2.2-9b d=40.9mm, Q=15(l/min)、z=0.25m での流速及び循環分布



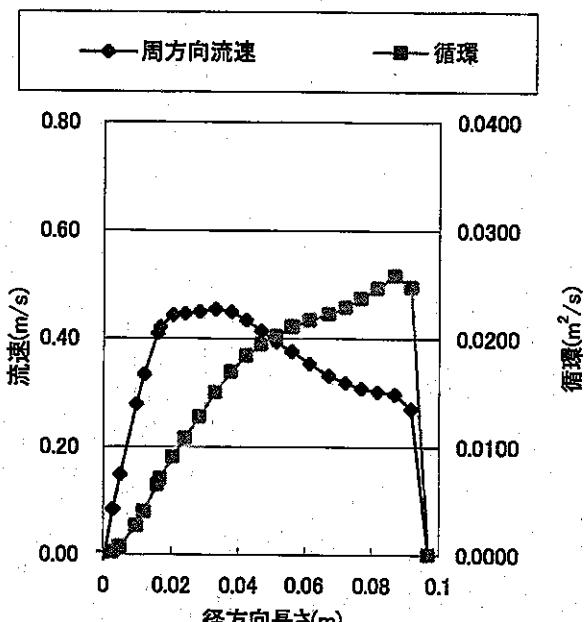
周方向流速、循環分布(east side)



周方向流速、循環分布(west side)



周方向流速、循環分布(south side)



周方向流速、循環分布(north side)

図 3.2.2-9c d=40.9mm、Q=15(l/min)、z=0.35m での流速及び循環分布

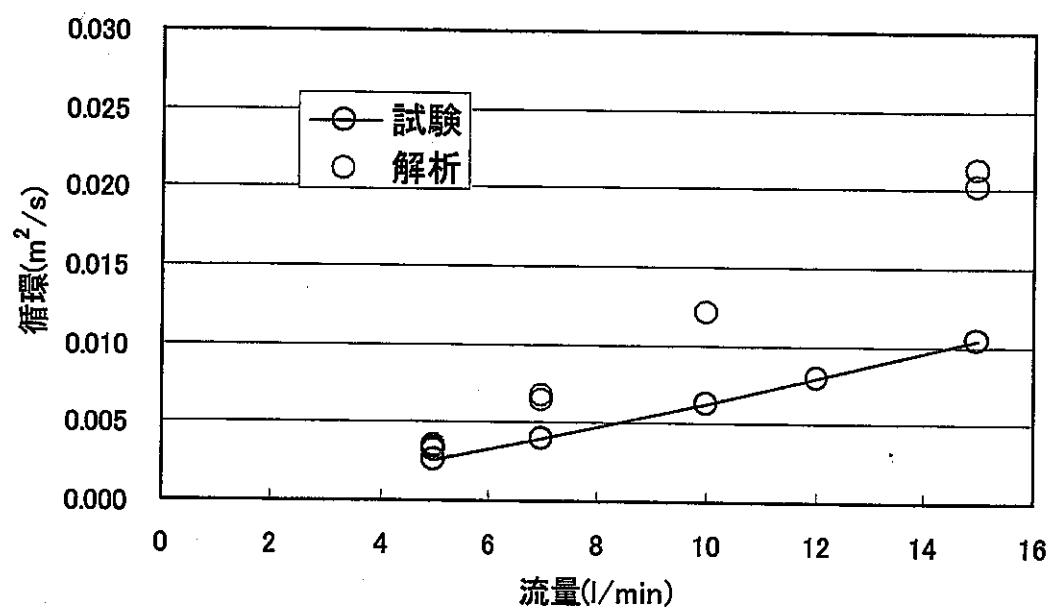
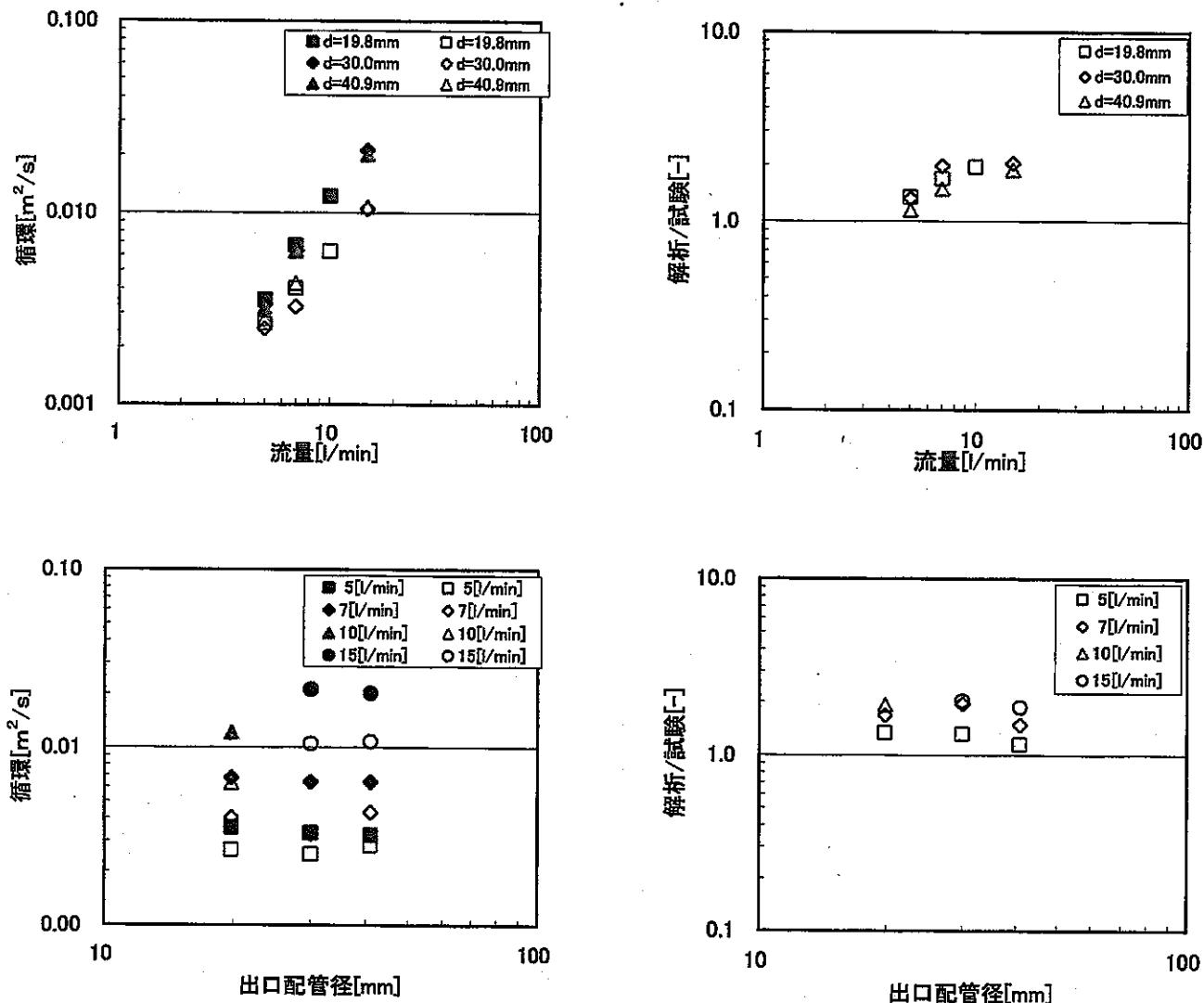


図 3.2.2-10 試験と解析の循環の比較



左図

塗りつぶし : 解析結果
白抜き : 試験結果

図 3.2.2-11 循環の精度評価

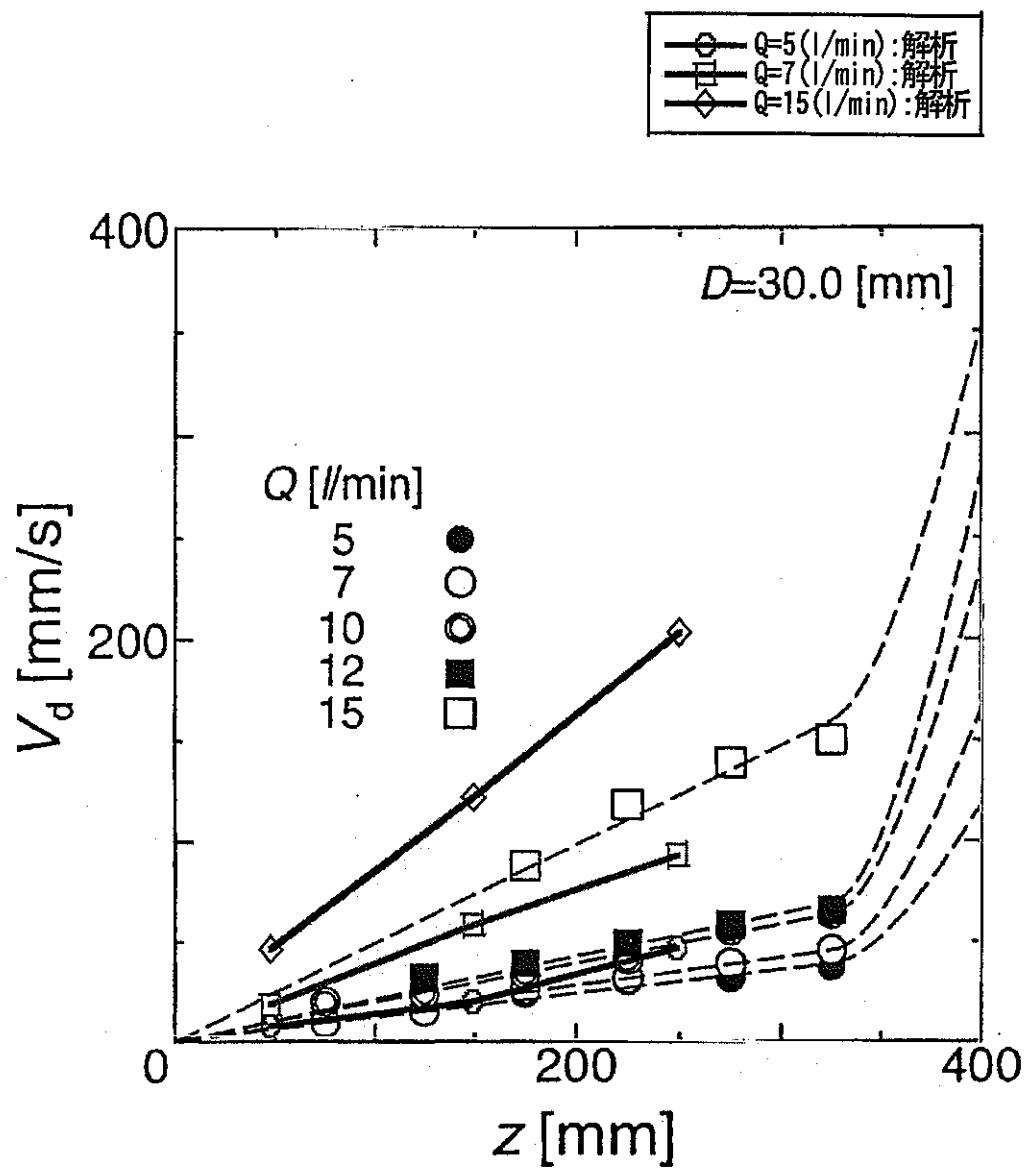
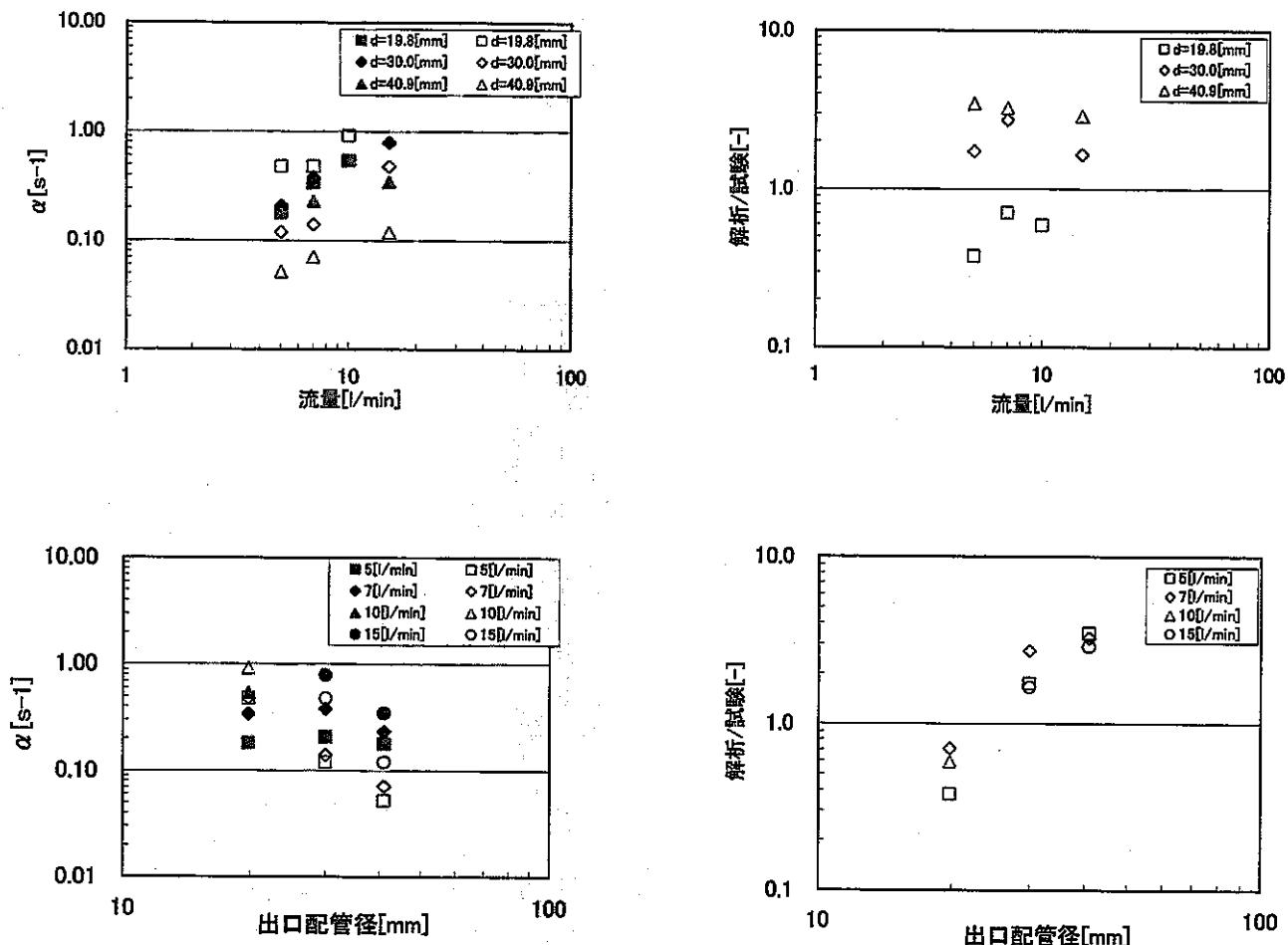


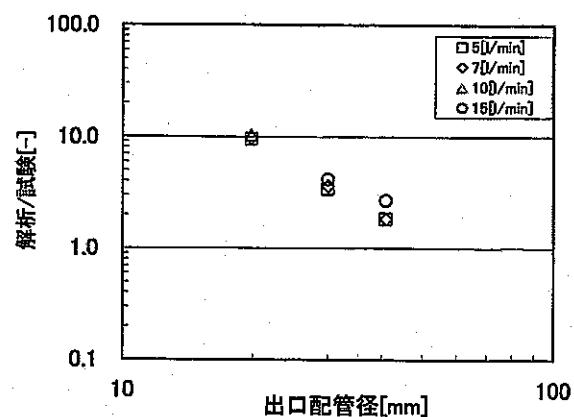
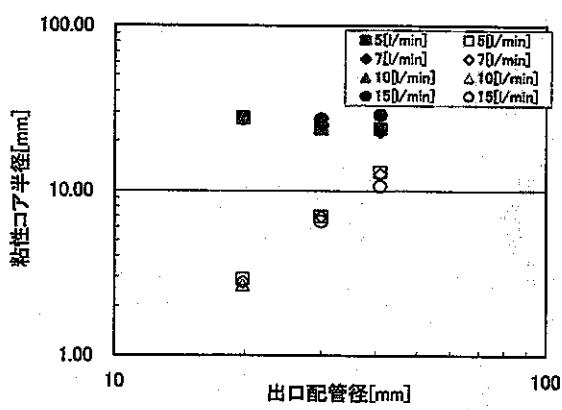
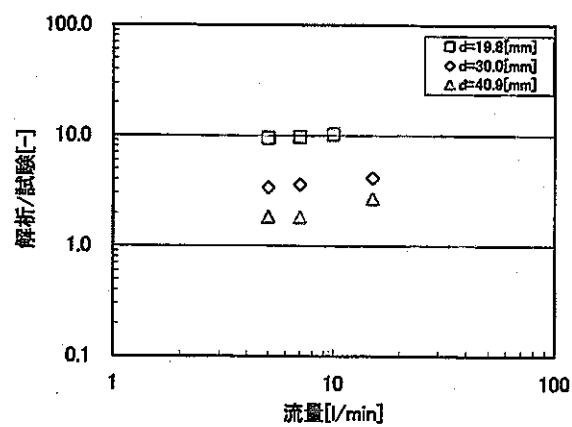
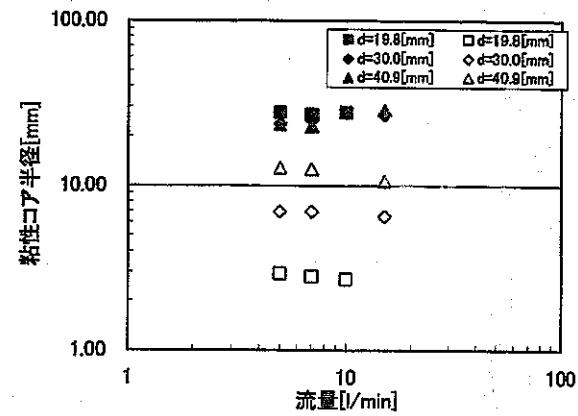
図 3.2.2-12 試験と解析の下降流速分布の比較



左図

塗りつぶし : 解析結果
白抜き : 試験結果

図 3.2.2-13 試験と解析の下降流速勾配の比較及び精度評価

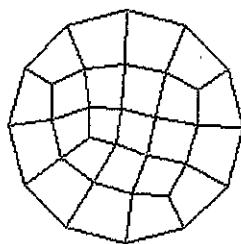


左図

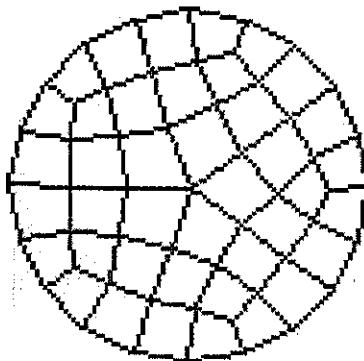
塗りつぶし : 解析結果

白抜き : 試験結果

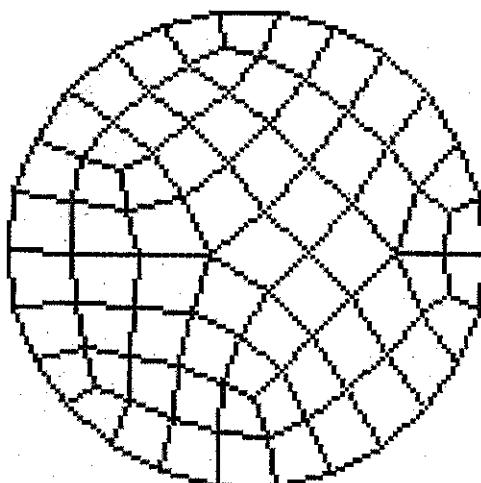
図 3.2.2-14 試験と解析の粘性コア半径の比較及び精度評価



d=19.8mm の出口配管のメッシュ分割

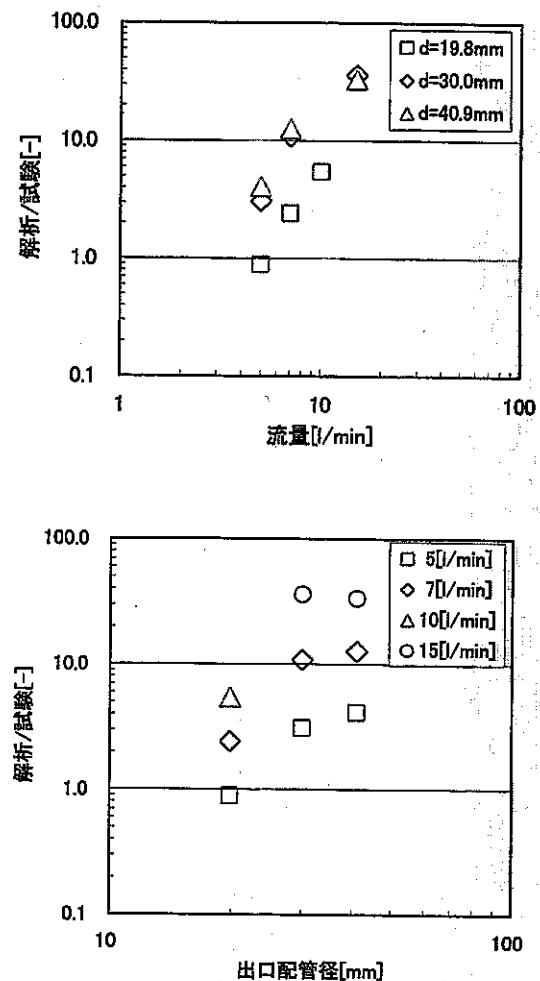


d=30.0mm の出口配管のメッシュ分割

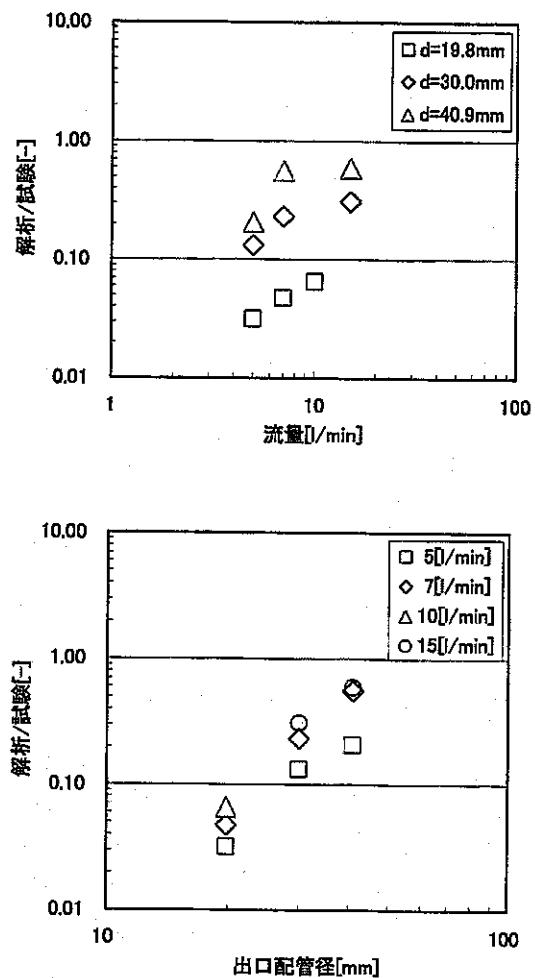


d=40.9mm の出口配管のメッシュ分割

図 3.2.2-15 出口配管のメッシュ分割



(a) 下降流速勾配よりガスコア長さを評価



(b) 粘性コア半径よりガスコア長さを評価

図 3.2.2-16 ガスコア長さの精度評価

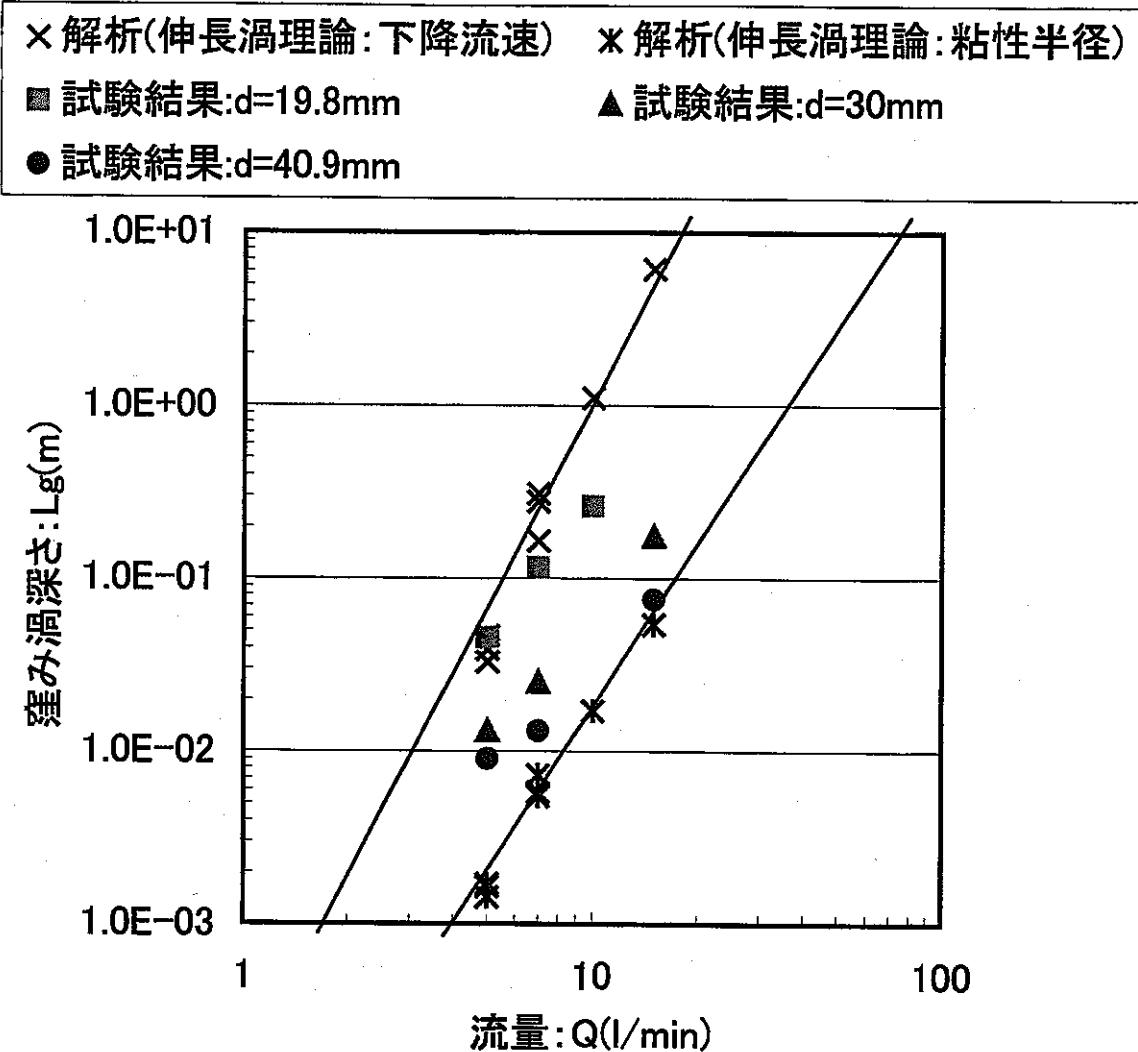
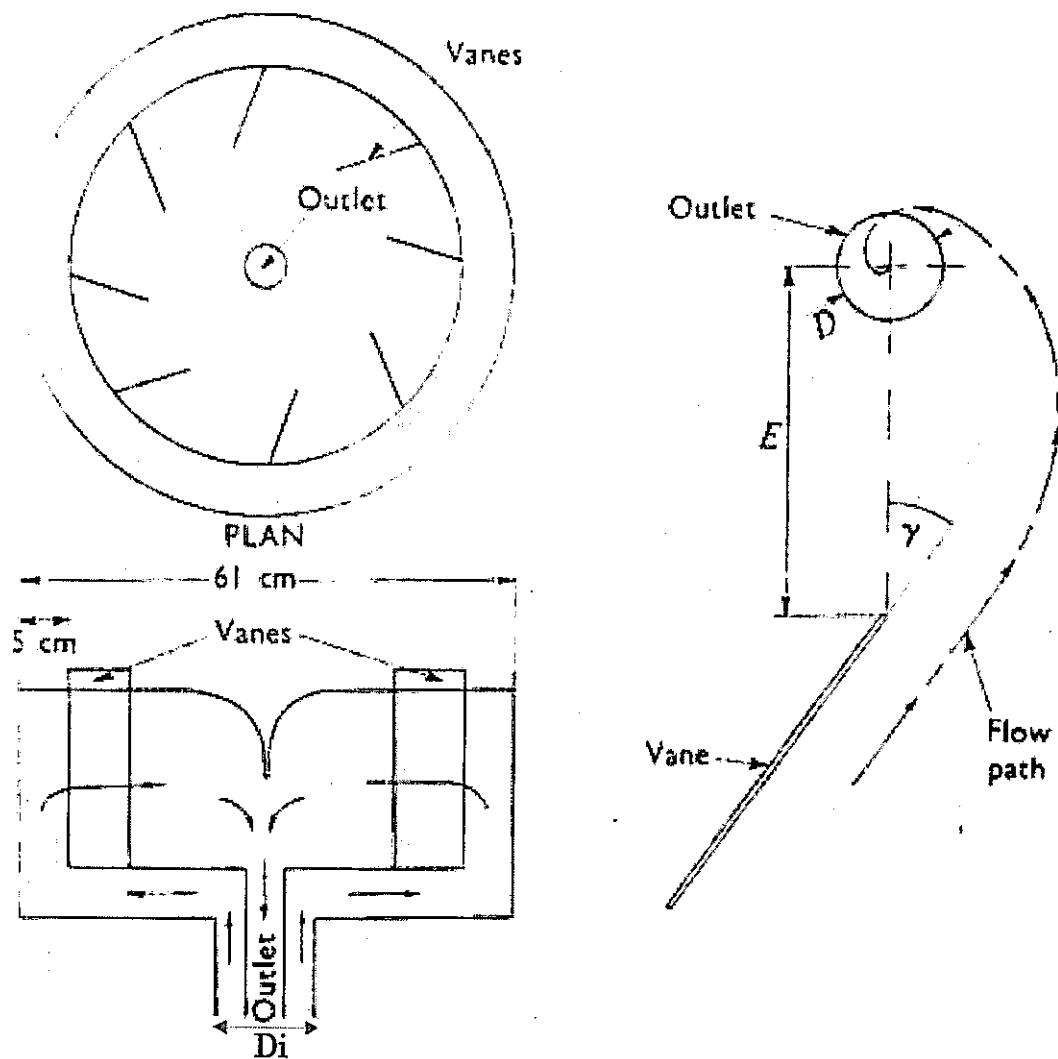


図 3.2.2-17 流量とガスコア長さの関係



$$D=0.0175\text{m}$$

$$Di=0.05\text{m}$$

$$E=0.155\text{m}$$

$$\gamma=86\text{deg}$$

図 4.1-1 Baum のガス巻込み実験装置

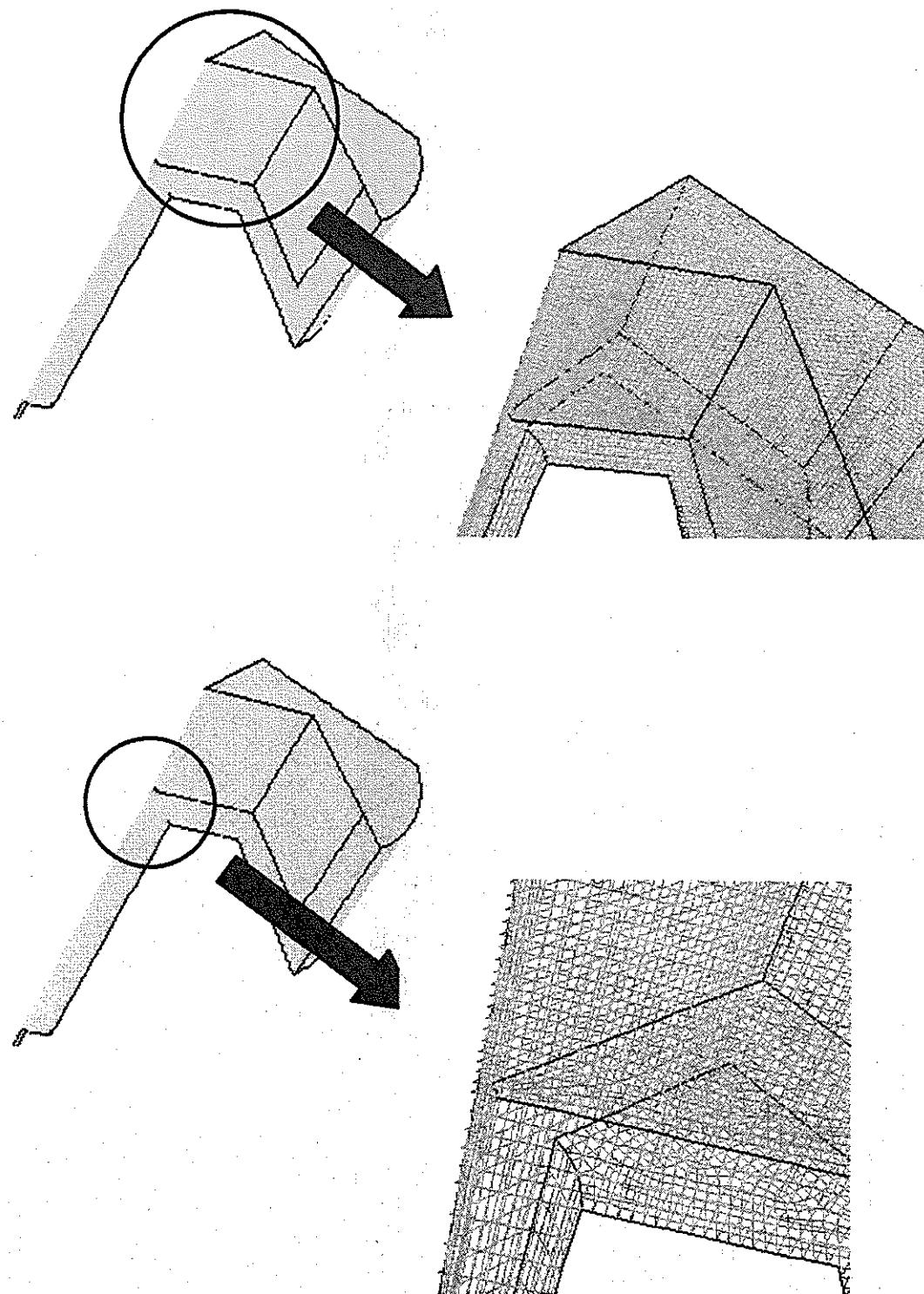


図 4.1-2 Baum の実験解析の形状とメッシュ

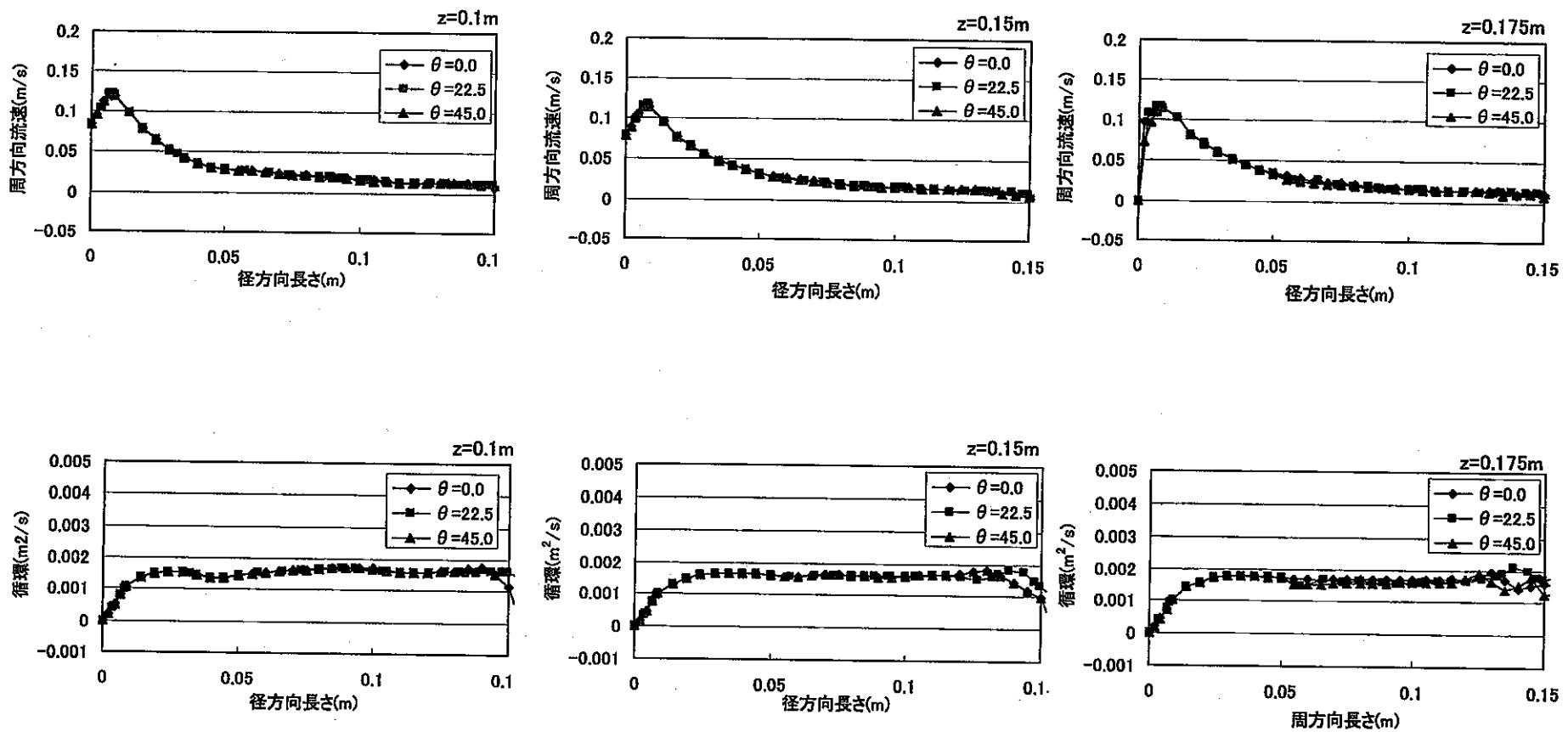


図 4.2-1 $h/D=10$ 、 $Q=332(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布

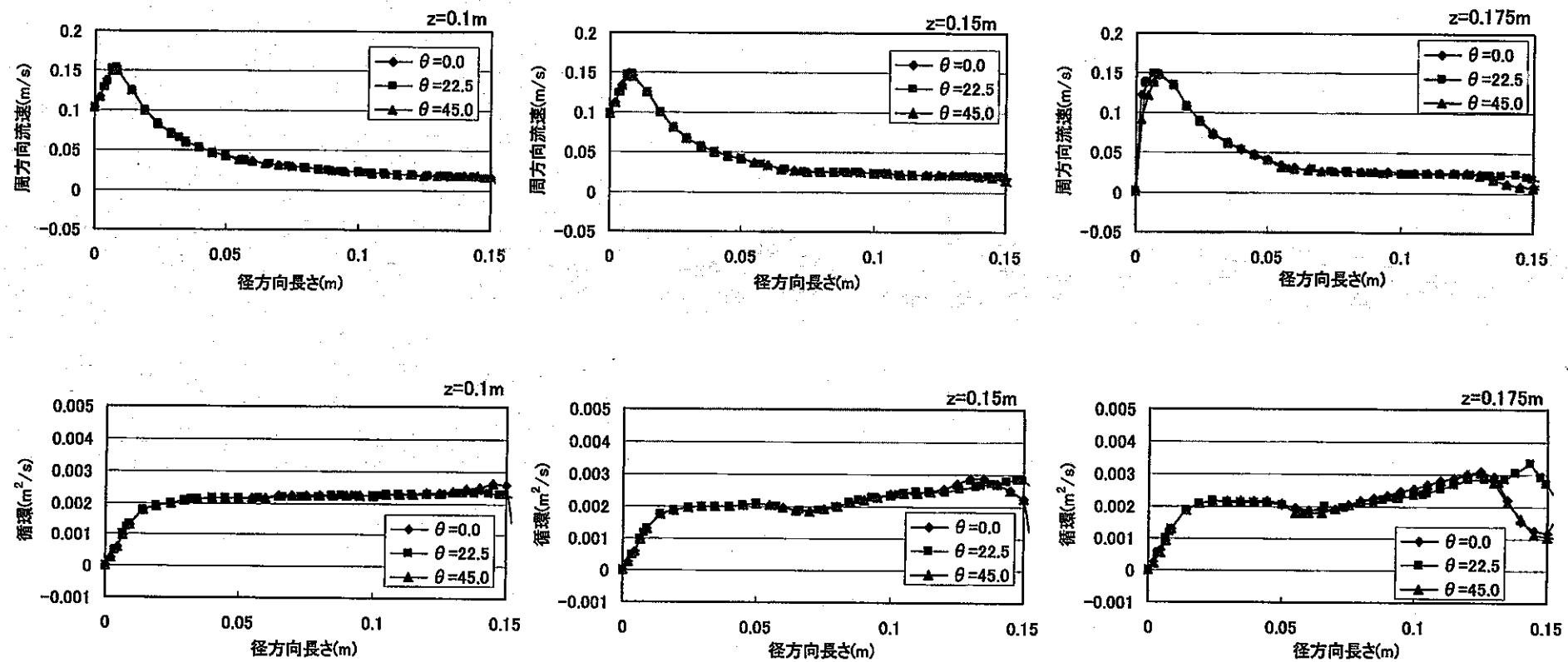


図 4.2-2 $h/D=10$ 、 $Q=415(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布

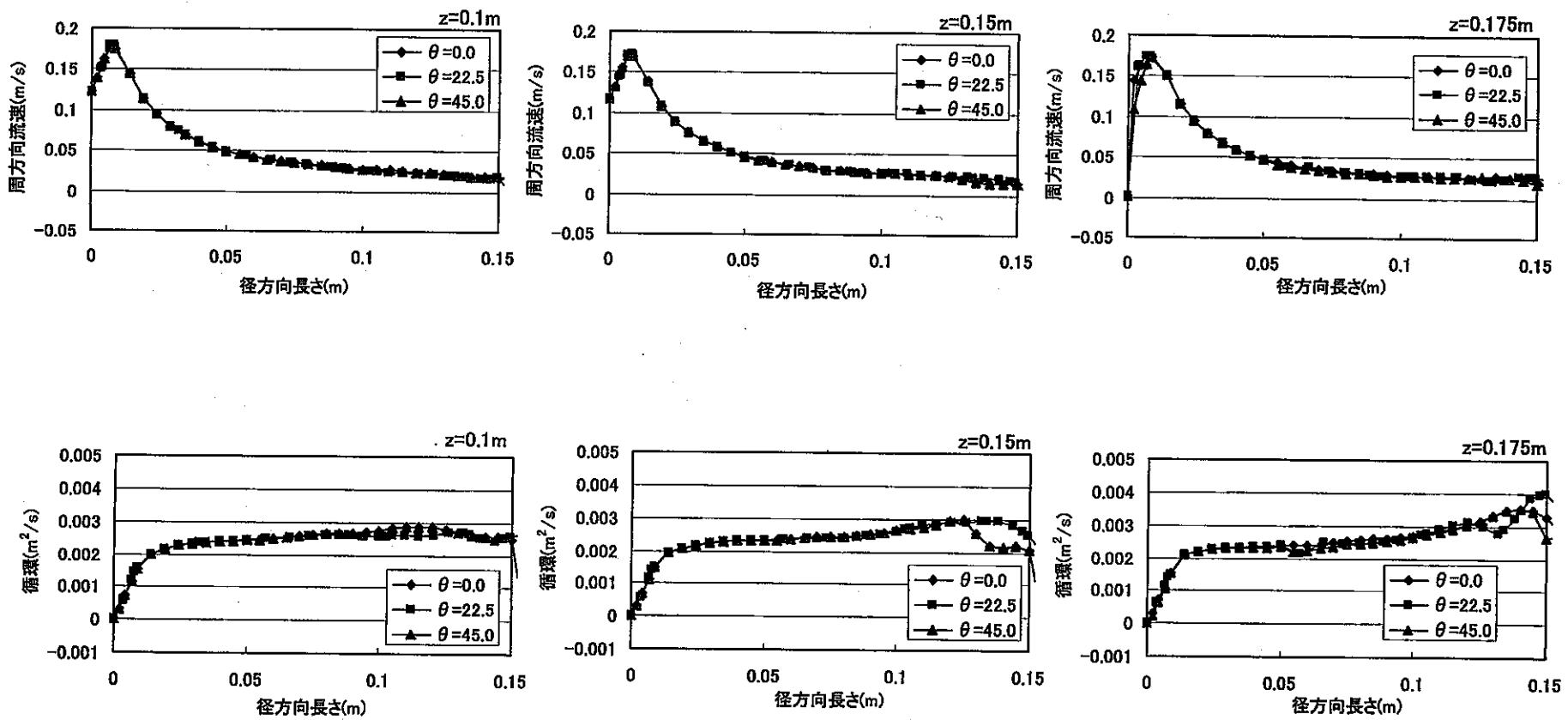


図 4.2-3 $h/D=10$ 、 $Q=498(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布

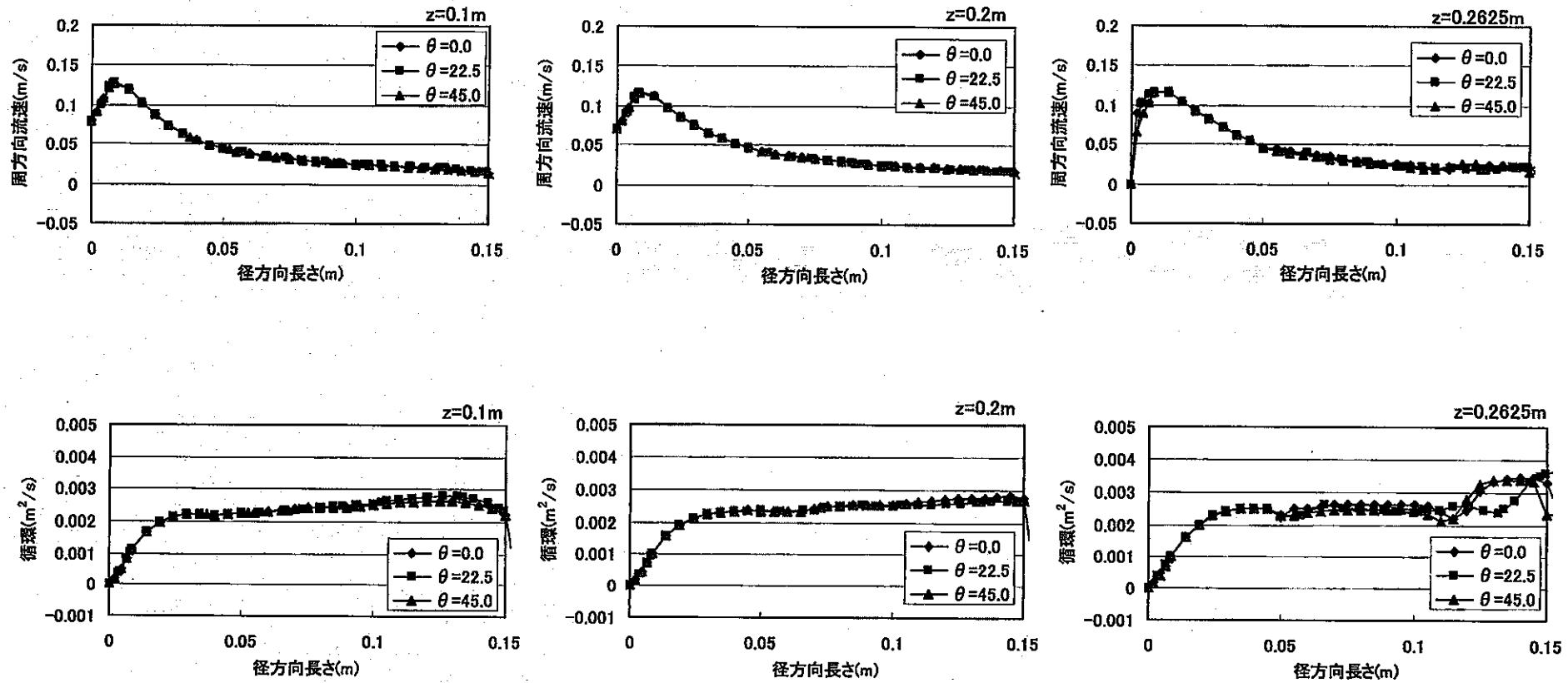


図 4.2-4 $h/D=15$ 、 $Q=498$ (cm^3/s) の流速及び循環分布

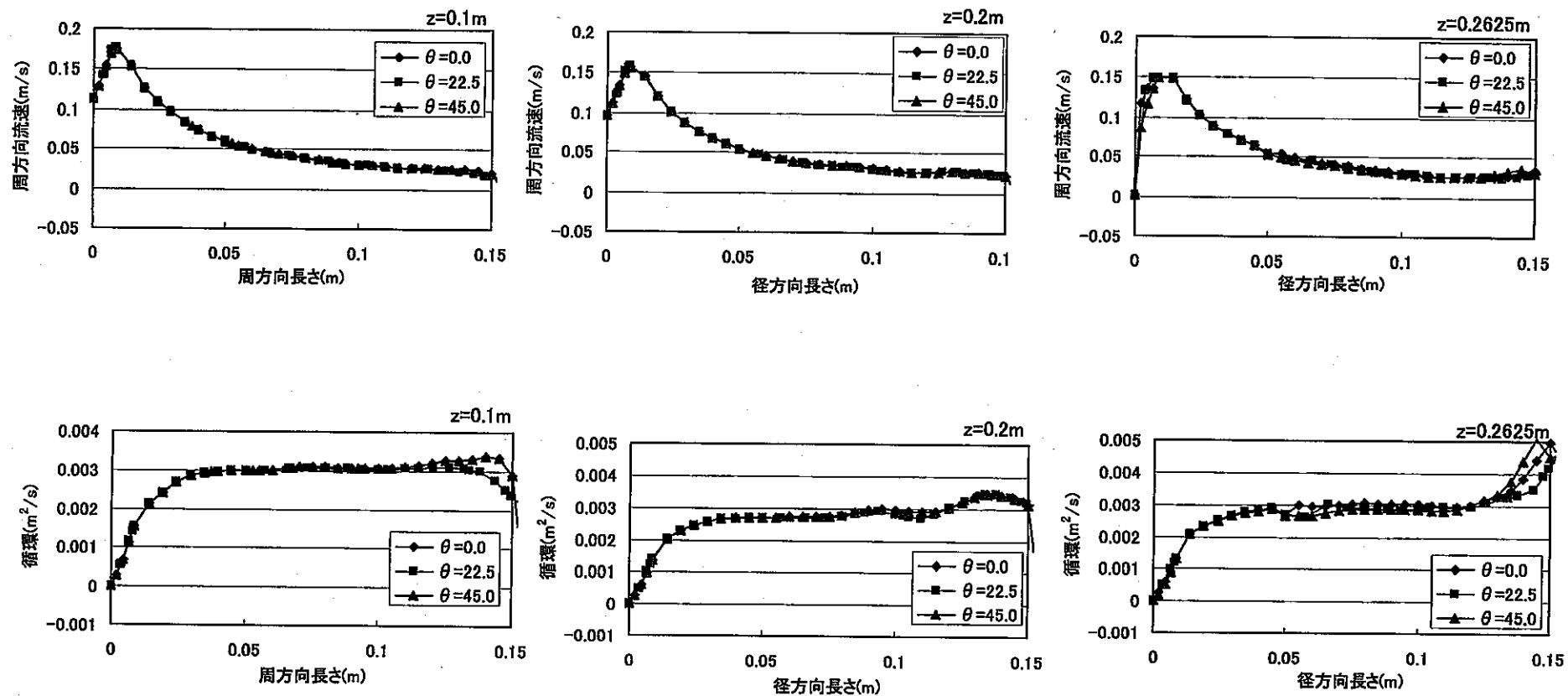


図 4.2-5 $h/D=15$ 、 $Q=623(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布

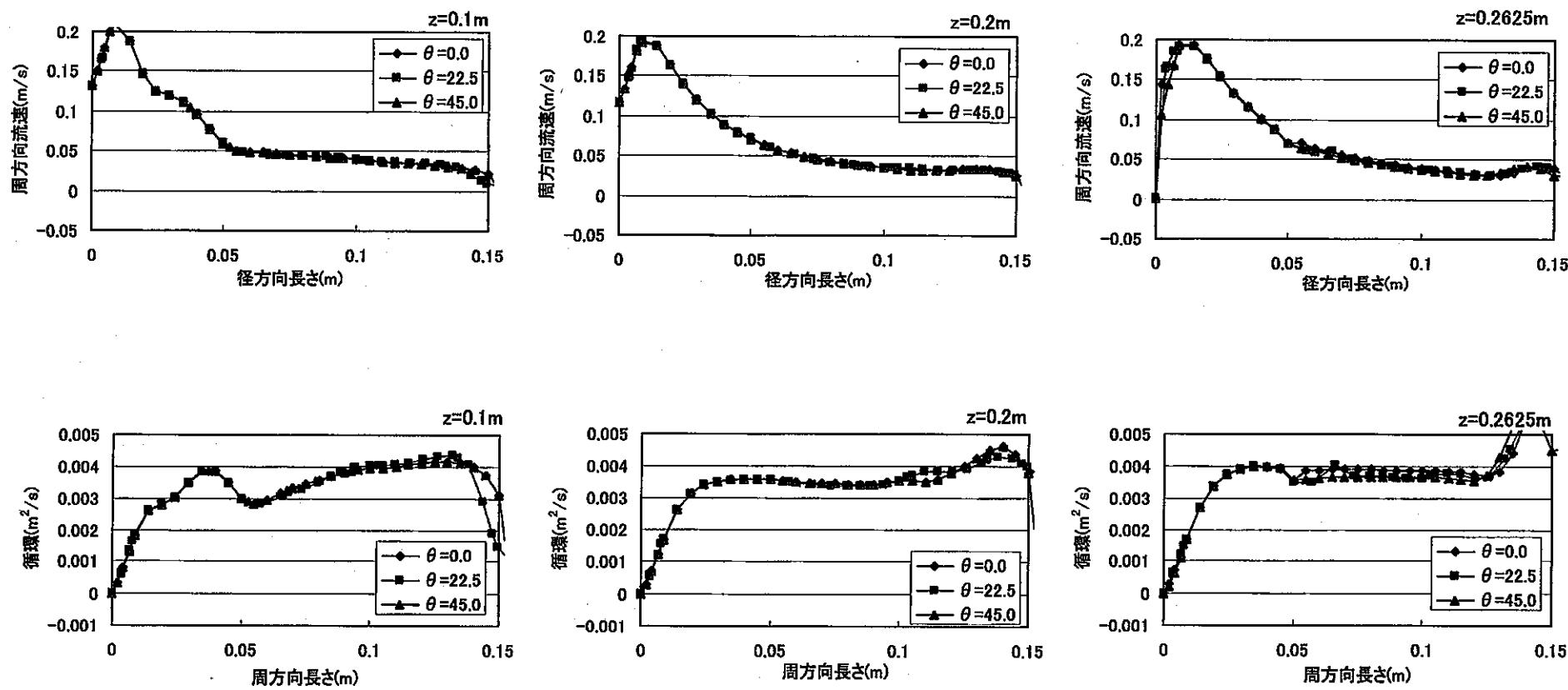


図 4.2-6 $h/D=15$ 、 $Q=747(\text{cm}^3/\text{s})$ の流速及び循環分布

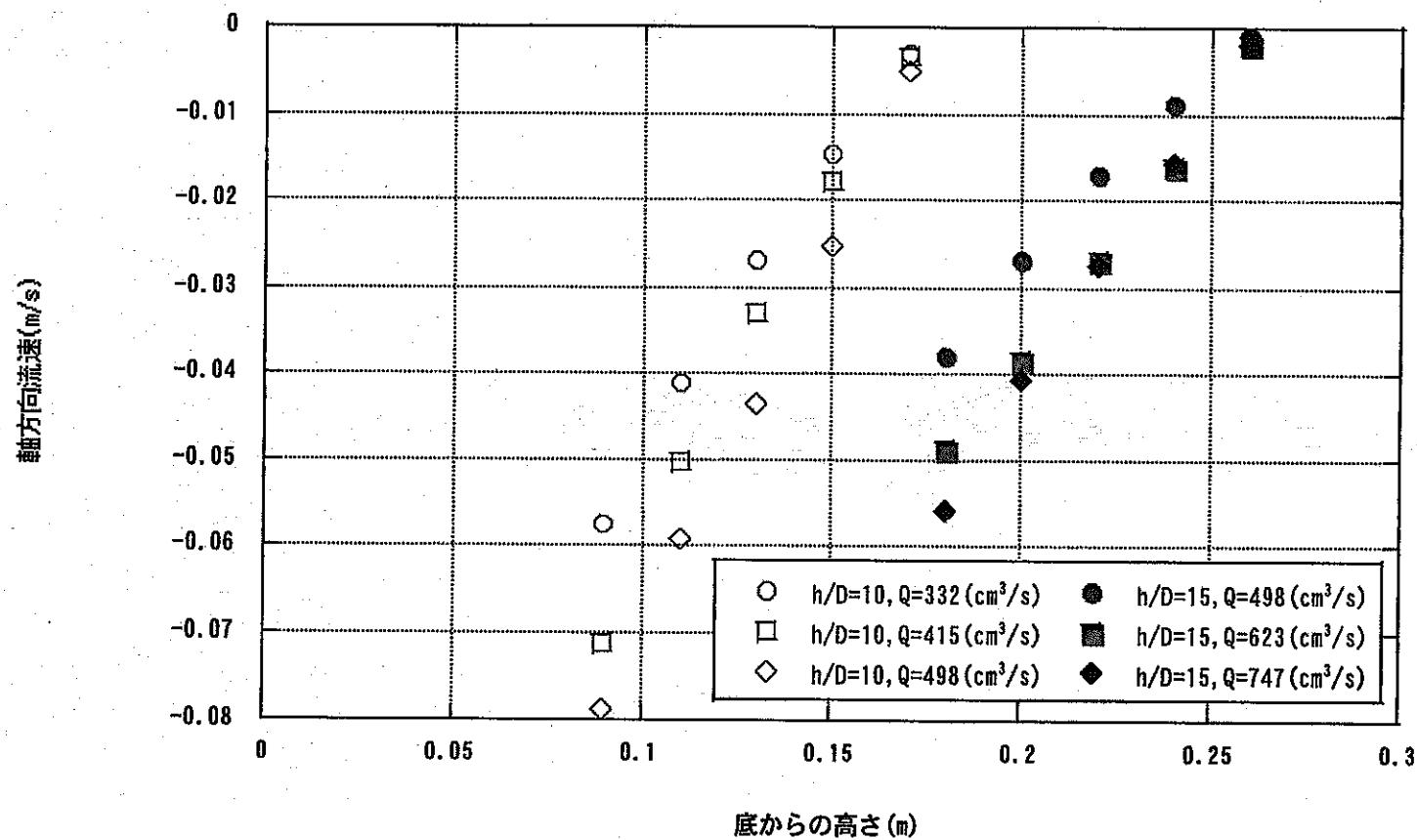


図 4.2-7 下降流速分布

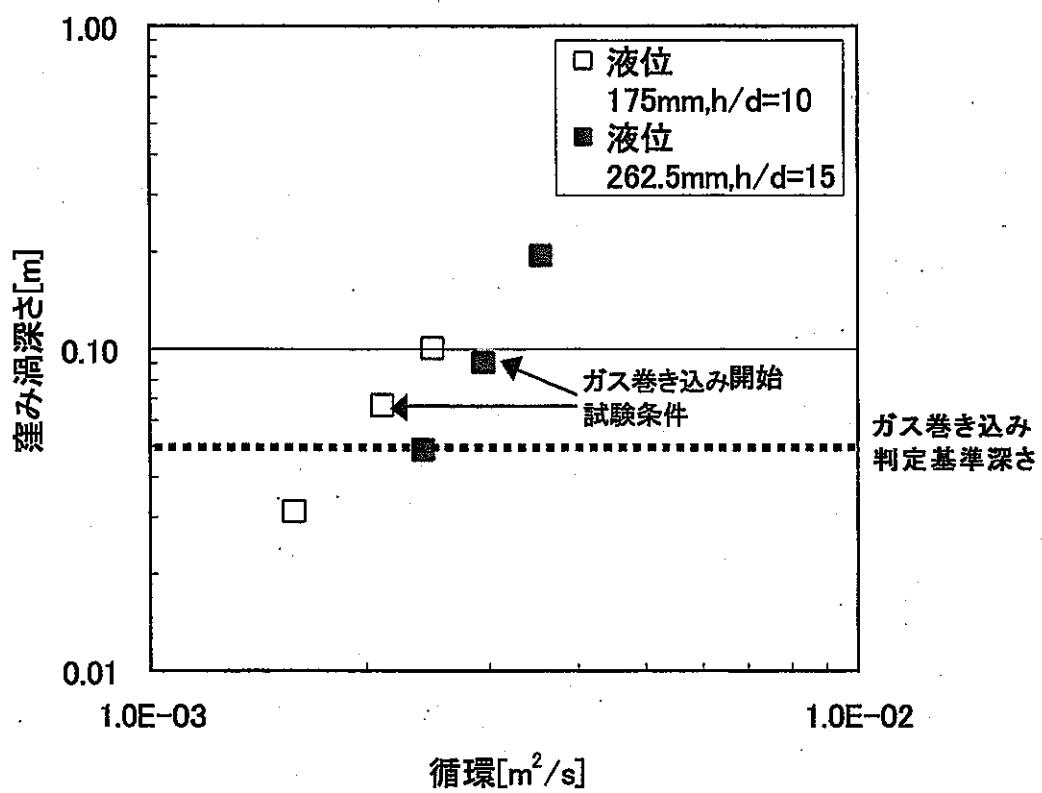


図 4.2-8 ガスコア長さの評価