

## セパレータ旋回翼周りの二相流解析

### Two-Phase Flow Simulation around Swirler in a BWR Steam Separator

寺坂晴夫, 東北大流体科学研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail:Terasaka@ifs.tohoku.ac.jp  
清水泉介, 東北大流体科学研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail:Shimizu@ifs.tohoku.ac.jp  
Haruo TERASAKA, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Sendai 980-8577, Japan  
Sensuke SHIMIZU, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Sendai 980-8577, Japan

An advanced numerical method based on two-fluid model of two-phase flow has been developed to simulate the swirling gas-liquid flow and the phase separation process in a Boiling Water Reactor (BWR) separator. The goal is to correctly predict the performance of operating steam separator as well as new designs. The solution method present here is an extension of SIMPLEST scheme, a fully implicit scheme for single-phase flow analysis. It is robust and unconditionally stable, therefore enable us to use very large time step size. This feature is suitable for steady and/or slow transient flow analyses. Furthermore, it enhances numerical stability during rapid transient calculations. By employing this method, separator hydrodynamics around swirler were calculated.

#### 1. はじめに

沸騰水型原子炉 (BWR) には、炉心からの蒸気-水二相混合流を分離するために多数の気水分離器 (セパレータ、図1参照) が用いられている。セパレータは二重円筒状の比較的簡単な構造の静的機器であるにもかかわらず複雑な特性を有することが知られており<sup>(1-3)</sup>、その気水分離性能はこれまでもっぱら大規模高圧高温試験によって評価されてきた<sup>(1)</sup>。しかしこのような方法は膨大な費用と期間を要するため、様々な設計要求に即した的確な設計と最適化を行うのは極めて難しく、小規模試験と数値シミュレーションの組み合わせによる設計および最適化が望まれている。そこで本研究では、大規模な二相流計算を安定かつ効率よく計算するため多次元二流体モデルに対する完全陰解法<sup>(4)</sup>を適用した計算コードを開発し、特に分離性能および圧損に対し大きな影響を有するセパレータ旋回翼形状を正確にモデル化して、旋回翼周りの数値シミュレーションを試みた。

#### 2. 数学モデル

##### 2.1 二流体モデル

気水分離現象は、気相と液相が本質的に異なった振舞いをするので、両相に対して運動量保存式を適用する3次元二流体モデルを使用する。ただし、簡単のためここでは次のような仮定を設ける。

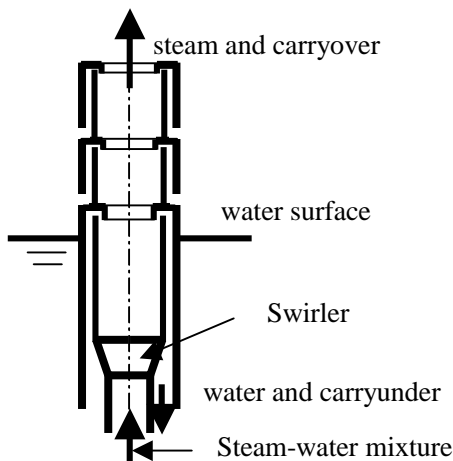


Fig.1 BWR steam separator

- (i) セパレータ内部は等温 (飽和温度) である。
- (ii) 絶対圧に対し圧力変化は小さいため、蒸発・凝縮の影響は無視できる。

このような仮定の下で、以下の式が導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \rho_k u_{k,j}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_{k,i}}{\partial t} + u_{k,j} \frac{\partial u_{k,i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\alpha_k} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \alpha_k V_{k,eff} \left( \frac{\partial u_{k,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{k,j}}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{F_{k,int}^{u_{k,i}} + F_{k,wall}^{u_{k,i}}}{\alpha_k \rho_k} + g_i \quad (2)$$

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (3)$$

ここで、添字  $k$  は気相 ( $g$ ) または液相 ( $l$ ) を表し、また  $F$  は作用する力、 $g$  は重力加速度を表す。

##### 2.2 構成方程式

ここでは壁面抵抗および相間力のみを考慮する。また、簡単のため相間力は抗力のみを考慮し、仮想質量力、揚力その他は無視する。

###### (1) 抗力モデル

強い遠心力が作用する場における抗力のモデルは知られていない。またボイド率が0から1まで変化する可能性があるため、流動様式全範囲にわたり適用できかつ連続的に変化するモデルが必要である。そこで、本研究では最も信頼性のあるモデルと考えられる気泡流と液滴流のモデルをベースにし、その中間領域では両者の補間によって表すモデルを用いることとする。すなわち、

- ・気泡流域 ( $\alpha_g \leq \alpha_{bubble}$ ) または液滴流域 ( $\alpha_g > \alpha_{droplet}$ ) に対して、

$$F_{k,int}^u = -\frac{3}{4} \frac{\alpha_d}{d_d} \rho_c C_D |u_k - u_{k'}| (u_k - u_{k'}) \quad (4)$$

とする。ただし、添字  $d$  は分散相、 $c$  は連続相を表し、抗力係数  $C_D$  は次式で与える。

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}), \quad Re_d = \frac{|u_k - u_{k'}| d_d}{\nu_c}$$

- ・中間領域 ( $\alpha_{bubble} < \alpha \leq \alpha_{droplet}$ ) に対して、

$$F_{k,int}^u = [1 - \omega(\alpha_g)] \cdot F_{k,int,bubble}^u + \omega(\alpha_g) \cdot F_{k,int,droplet}^u \quad (5)$$

とする。ここで補間関数  $\omega(\alpha_g)$  は図 2 に示すような  $\alpha_g$  の 3 次関数である。

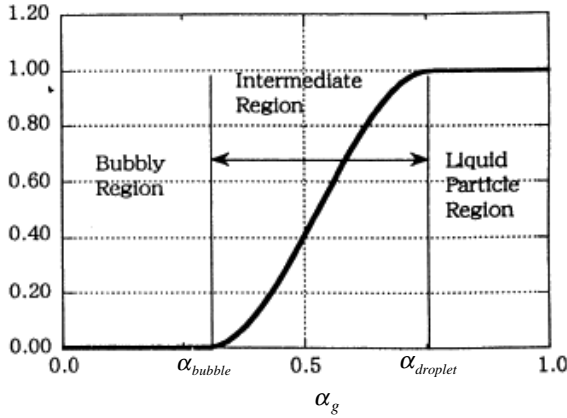


Fig.2 Interpolation function for interfacial friction force

## (2) 壁面抵抗モデル

壁面摩擦による抵抗力は、次に説明する FAVOR 法<sup>(5)</sup>の考えに従って与える。

### 2.2 形状模擬方法

複雑な物体形状を正確に表現するために、境界適合座標系(BFC)、有限要素法あるいは有限体積法などがしばしば用いられている。それぞれに長所短所があるが、本研究では計算効率の点から FAVOR 法を用いた。この方法は、直交格子上で任意の物体形状をボース値によってモデル化するので、カットセル法の一つとみなすことができる。セル内に含まれる物体の流動抵抗は、分布抵抗としてモデル化され正確に取り扱うことができ、複雑な形状を比較的簡単に取り扱うことができる点に特徴がある。

(i,j,k)番目のセルに対し、そのセルに含まれる流体の体積率を  $\gamma_{ijk}$  また x,y,z それぞれの方向の面に含まれる流体の面積率を  $\gamma_{i+1/2,jk}^x, \gamma_{ij+1/2,k}^y, \gamma_{ijk+1/2}^z$  として、物体と流体の境界の位置を体積率あるいは面積率が 0.5 となる位置と定義する。これは自由液面を扱う VOF 法において液面の位置を流体占有率  $F_{ijk}$  が 0.5 の位置と定義することと同様である。

壁面における抵抗力も FAVOR 法の考えに従ってモデル化する。例えば x 方向の抵抗は、スタガードメッシュの場合では隣接する 8 つの面の抵抗の合計として次のように与える。

$$F_{k,wall}^u = -\alpha_k \rho_k \nu_k u_{k,i+1/2,jk}^{m+1} \left( \zeta_{i+1/2,jq+q-1/2k}^y \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 f_{i+pq+q-1/2k}^y + \zeta_{i+1/2,jk+q-1/2}^z \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 f_{i+pk+q-1/2}^z \right) - \alpha_k \rho_k \nu_k u_{k,i-1/2,jk}^m \left( \zeta_{i+1/2,jq+q-1/2k}^y \sum_{q=0}^1 f_{ij+q-1/2k}^y + \zeta_{i+1/2,jk+q-1/2}^z \sum_{q=0}^1 f_{ijk+q-1/2}^z \right) - \alpha_k \rho_k \nu_k u_{k,i+3/2,jk}^m \left( \zeta_{i+1/2,jq+q-1/2k}^y \sum_{q=0}^1 f_{i+1j+q-1/2k}^y + \zeta_{i+1/2,jk+q-1/2}^z \sum_{q=0}^1 f_{i+1jk+q-1/2}^z \right) \quad (6)$$

ここで、

$$f_{i+pq+q-1/2k}^y = \frac{1}{2} C_{wall,i+pq+q-1/2k}^y (1 - \gamma_{i+pq+q-1/2k}^y) / \Delta y_j$$

$$f_{i+pk+q-1/2}^z = \frac{1}{2} C_{wall,i+pk+q-1/2}^z (1 - \gamma_{i+pk+q-1/2}^z) / \Delta z_k$$

$$\zeta_{i+1/2,jq+q-1/2k}^y = \frac{\gamma_{ij+q-1/2k}^y + \gamma_{i+1j+q-1/2k}^y}{(\gamma_{ijk}^y + \gamma_{i+1jk}^y) \Delta y_j}$$

$$\zeta_{i+1/2,jk+q-1/2}^z = \frac{\gamma_{ijk+q-1/2}^z + \gamma_{i+1jk+q-1/2}^z}{(\gamma_{ijk}^z + \gamma_{i+1jk}^z) \Delta z_k}$$

である。また係数  $C_{wall}$  は単相流の場合と同じものを用いる。

### 3. 数値解析手法

二相流の解析には陽解法や ICE などの半陰解法が良く用いられている。本研究では、大規模な問題を安定かつ効率よく計算できるようにするために、単相流解析に広く用いられている SIMPLEST 法を二相流に拡張した方法を用いる<sup>(4)</sup>。以下にこの概要を示す。

#### 3.1 離散化

両相の u-速度に対する離散式の一般形は以下のように記述することができる。

$$a_{g,p}^m u_{g,p}^{m+1} - b_{g,p}^m u_{l,p}^{m+1} = \sum_{nb} a_{g,nb}^m u_{g,nb}^{m+1} + c_{g,p}^{n,m+1} - d_{g,p}^m (p_e^{m+1} - p_p^{m+1}) \quad (7)$$

$$a_{l,p}^m u_{l,p}^{m+1} - b_{l,p}^m u_{g,p}^{m+1} = \sum_{nb} a_{l,nb}^m u_{l,nb}^{m+1} + c_{l,p}^{n,m+1} - d_{l,p}^m (p_e^{m+1} - p_p^{m+1})$$

ここで上付き添字は時間ステップを表し、下付き添字の p は今考えているコントロールボリューム内の値、nb はそれに隣接する 6 つの位置の値を表す。ここで仮の速度  $\hat{u}$  を次式のように定義する。

$$a_{g,p}^m \hat{u}_{g,p} - b_{g,p}^m \hat{u}_{l,p} = \sum_{nb} a_{g,nb}^m u_{g,nb}^m + c_{g,p}^m - d_{g,p}^m (p_e^m - p_p^m) \quad (8)$$

$$a_{l,p}^m \hat{u}_{l,p} - b_{l,p}^m \hat{u}_{g,p} = \sum_{nb} a_{l,nb}^m u_{l,nb}^m + c_{l,p}^m - d_{l,p}^m (p_e^m - p_p^m)$$

(8)式を解くと次式が得られる。

$$\hat{u}_{g,p} = \frac{1}{E^m} \left\{ a_{l,p}^m \left( \sum_{nb} a_{g,nb}^m u_{g,nb}^m + c_{g,p}^m \right) + b_{g,p}^m \left( \sum_{nb} a_{l,nb}^m u_{l,nb}^m + c_{l,p}^m \right) \right\} - \frac{1}{E^m} (a_{l,p}^m \cdot d_{g,p}^m + b_{g,p}^m \cdot d_{l,p}^m) (p_e^m - p_p^m)$$

$$\hat{u}_{l,p} = \frac{1}{E^m} \left\{ b_{l,p}^m \left( \sum_{nb} a_{g,nb}^m u_{g,nb}^m + c_{g,p}^m \right) + a_{g,p}^m \left( \sum_{nb} a_{l,nb}^m u_{l,nb}^m + c_{l,p}^m \right) \right\} - \frac{1}{E^m} (b_{l,p}^m \cdot d_{g,p}^m + a_{g,p}^m \cdot d_{l,p}^m) (p_e^m - p_p^m) \quad (9)$$

ここで、 $E^m = a_{l,p}^m \cdot a_{l,p}^m - b_{g,p}^m \cdot b_{l,p}^m$  である。速度 v および w についても同様の式が得られる。

#### 3.2 圧力補正式

速度および圧力の補正量を、

$$\begin{cases} \delta u_{g,p} = u_{g,nb}^{m+1} - \hat{u}_{g,p} \\ \delta u_{l,p} = u_{l,nb}^{m+1} - \hat{u}_{l,p} \\ \delta p_p = p^{m+1} - p^m \end{cases} \quad (10)$$

のように定義すると、(7),(8),(9)式から次式を得る。

$$\delta u_{g,p} = -\frac{1}{E^m} (a_{l,p}^m \cdot d_{g,p}^m + b_{g,p}^m \cdot d_{l,p}^m) (\delta p_e - \delta p_p) \quad (11)$$

$$\delta u_{l,p} = -\frac{1}{E^m} (b_{l,p}^m \cdot d_{g,p}^m + a_{g,p}^m \cdot d_{l,p}^m) (\delta p_e - \delta p_p)$$

これらを、2 つの質量保存式の和の式

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_g^m u_{g,j}^{m+1} + \alpha_l^m u_{l,j}^{m+1}) = 0 \quad (12)$$

に代入し整理すると圧力補正式が得られる。これを一般形で示すと次のようになる。

$$a_p^p \delta p_p + \sum_{nb} a_{nb}^p \delta p_{nb} = b_p^p \quad (13)$$

(13)式の右辺の項はマスバランスの誤差に起因するもので、 $\delta p_p$  はそれを補正する圧力補正量である。(13)式は Bi-CGSTAB あるいは Red-Black SOR 法を用いて解く。

### 3.3 ボイド率

圧力および速度の補正を行い、新しい速度が得られた後、これを用いてボイド率を求める。本研究では、液相の質量保存式から求めている。

以上の手順を反復し、それぞれの変数が十分収束したら次の時間ステップの計算を行う。これを流れ図で示すと図3のようになる。

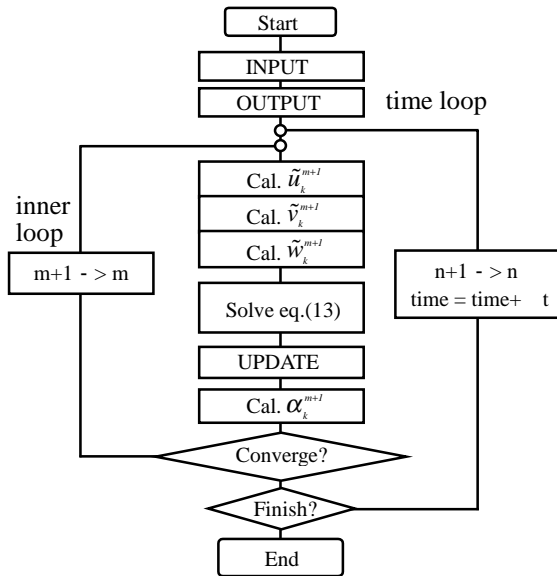


Fig.3 Flow chart

## 4. 解析

### 4.1 球周りの流れ解析 (単相流)

セパレータの解析を行う前に、形状模擬の妥当性を評価するための検証計算を行った結果を簡単に示す。デカルト座標系の上で、メッシュ分割数を  $X \times Y \times Z = 66 \times 38 \times 38$  とし、レイノルズ数を 1000 の場合の結果を図4に示す。球のメッシュ分割は  $10 \times 10 \times 10$  としている。

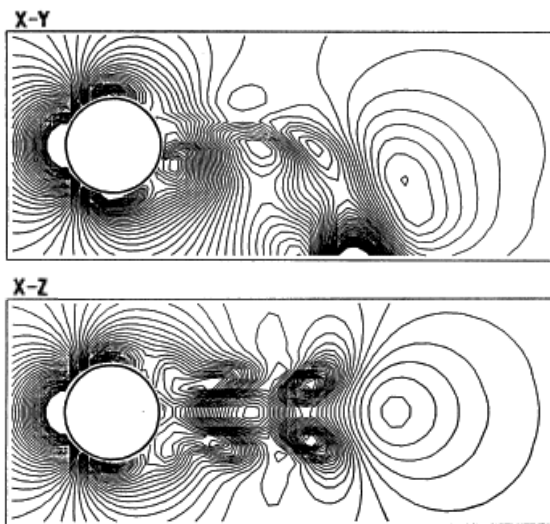


Fig.4 Pressure contour around a sphere

このような計算にしてはかなり粗いメッシュ分割ではあるが、球の後ろに形成される特徴的な渦構造が再現されていることが分かる。また、この計算から得られた抗力係数およびストローハル数の値を実験値と比較した結果を表1に示すが、これからも、ほぼ妥当な結果が得られていることが分かる。

Table 1 Comparison of  $C_D$  and  $St$

	Calculation	Experiment <sup>(6)</sup>
Drag Coef.	0.44	0.40 - 0.44
St Number	0.14 - 0.17	0.13 - 0.18

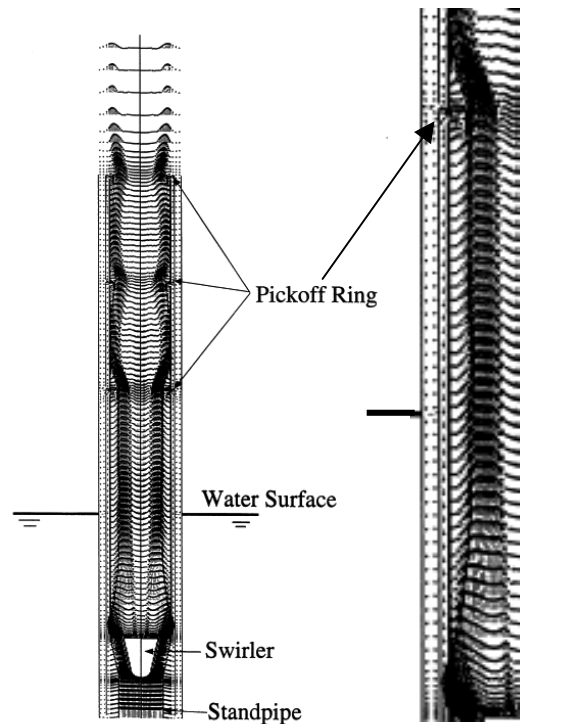
### 4.2 セパレータ旋回翼周りの解析

セパレータの性能は、圧力損失および気液分離性能によって評価され、また気液分離性能は、分離しきれずに蒸気中に混じって流出する液体の質量割合 (キャリアーオーバ) と分離された液体中に混じる蒸気の質量割合 (キャリアーアンダ) によって評価される。設計条件としていずれの量に対してもある基準値以下であることが要請される。

#### (1) 2次元解析結果

セパレータ内部では強い旋回流が形成されており、周方向はほぼ均一となっていることから、主に2次元解析で性能評価をしてきた。この結果の概要を以下に示す。

図5は標準的な流動条件における計算結果である。



(a) Global (b) Part(enlarged)

Fig.5 Velocity vectors in a BWR separator

旋回筒の内壁には厚い液膜が形成されており、また液膜表面では蒸気流によって上向きに引張りあげられている様子がわかる。図6は2次元解析の結果を実験値と比較した結果である。定性的に見てほぼ妥当な結果が得られていることが分かる。そこで次に性能に最も大きな影響を与える旋回翼の出口角度をパラメータとして圧力損失とキャリアーオーバ、キャリアーアンダを計算してみた。これを図7に示す。出口角度を小さくしていくと、予想していたように圧損は低下していくが、同時に気水分離性能も劣化していくことが分かる。特にキャリアーアンダに関する性能劣化が大きい。

#### (2) 3次元解析結果

気水分離性能を正確に評価するためには、旋回翼の出口角度だけではなく、ねじり角度、広がり角度、翼厚分布なども正確にモデル化した計算が必要である。そこで2.2節で述べた方法で代表的な翼をモデル化した結果を図8に示す。中心部にあるハブとよばれる構造物は軽量化のため中空構造

になっているが、ここでは影響が小さいとみなして中実にしている。計算時間を短縮するために、この 1/4 セクター(90°)を解析領域とし、周方向に周期境界条件を設定して計算した。メッシュ分割数は  $R_x \times \theta \times Z = 131 \times 120 \times 181$  で総メッシュ数は約 283 万である。

図9は標準的な流動条件における計算結果である。翼の内部において既に気液分離が生じており、旋回翼出口からしばらくして安定な比較的厚い液膜流が旋回筒内壁に形成されていることが認められる。この液膜流およびコア部の蒸気流はともに螺旋状に旋回しながら上昇している。次に旋回翼のハブ下端から 7cm ごとに出図した水平断面内のボイド率分布を図10に示す。ハブ下端から 14cm のところで翼の腹側および外周側に液が集積してきており、上にかかるにつれて次第に旋回翼の影響が小さくなり、出口から約 28cm 上(ハブ下端から約 44cm)の位置では周方向にほぼ均一な液膜が形成されることが分かる。

### 5. おわりに

BWR セパレータ内部の気液分離特性を調べるために、3次元二相流コードを開発し、旋回翼周りの流動解析を行った。周方向一様を仮定した2次元解析では、定性的に妥当な結果を得ることができることを確かめた。次に3次元で旋回翼形状を正確のモデル化した計算を行い、旋回翼内部での分離状況などを調べた。

### 参考文献

- (1) Wolf, S. and Moen, R.H., "Advances in Steam-Water Separators for Boiling Water Reactors," ASME 73-WA/Pwr-4 (1973).
- (2) 寺坂, "BWR セパレータの流動解析," 第3回オーガナイズド混相流フォーラム講演論文集(1999) pp.44-49.
- (3) 寺坂, 機械学会 1999 年度年次大会講演論文集(1999).
- (4) 寺坂, "二流体モデルを用いた多次元二相流に対する完全陰解法," 機論 B 編, Vol.65, No.631 (1999) pp.847-854.
- (5) Hirt, C.W. and Sicilian, J.M., "A Porosity Technique for the Definition Obstacles in Rectangular Cell Meshes," Proc. 4th Int. Conf. Ship Hydro. (1985).
- (6) 日本流体力学学会編, "流体力学ハンドブック," 丸善 (1987).

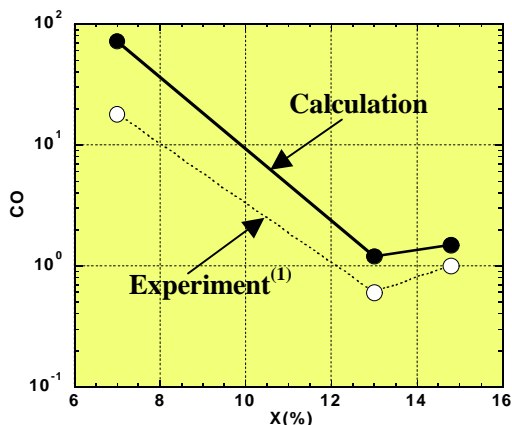
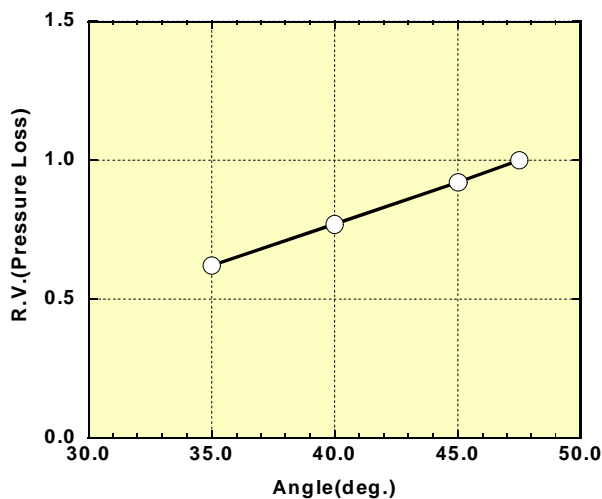
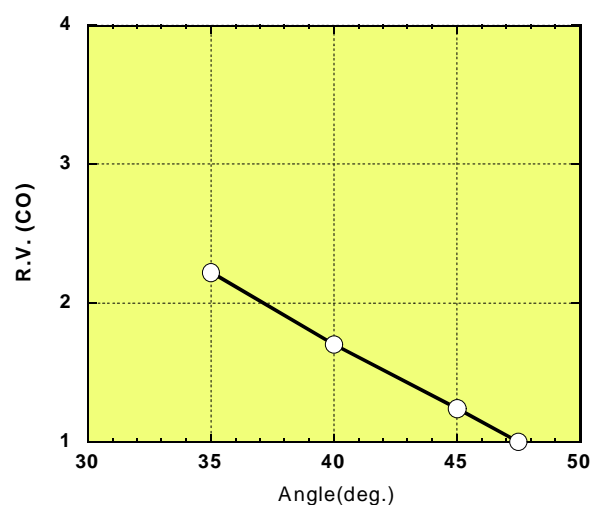


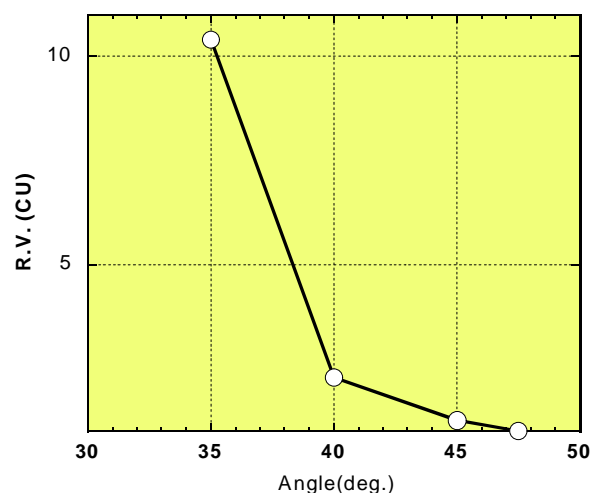
Fig.6 Comparison of Carry-Over



(a) Pressure loss



(b) Carry-Over



(c) Carry-Under

Fig.7 Relative Values v.s. Outlet angle of swirler

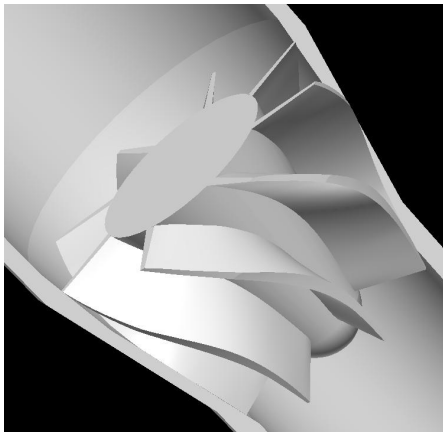
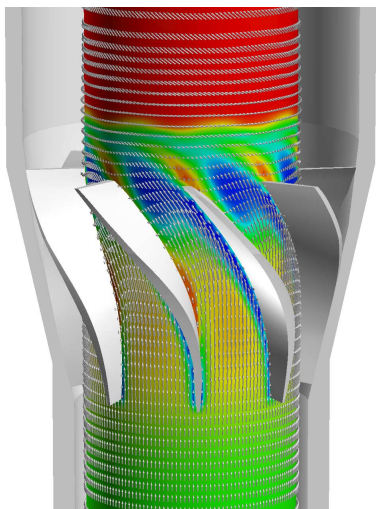
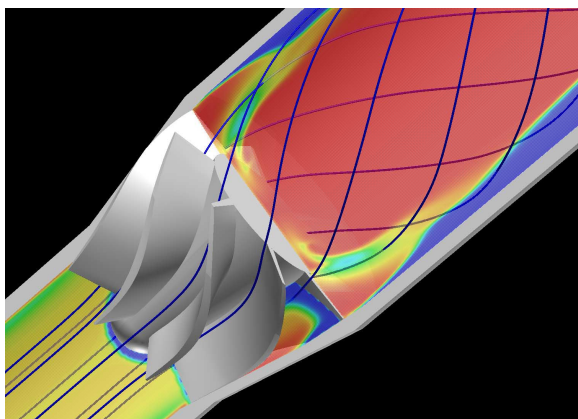


Fig.8 A swirler modeled with FAVOR method

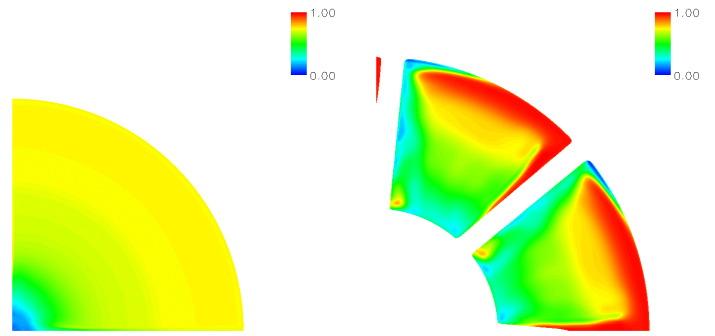


(a) Velocity vectors and void fraction



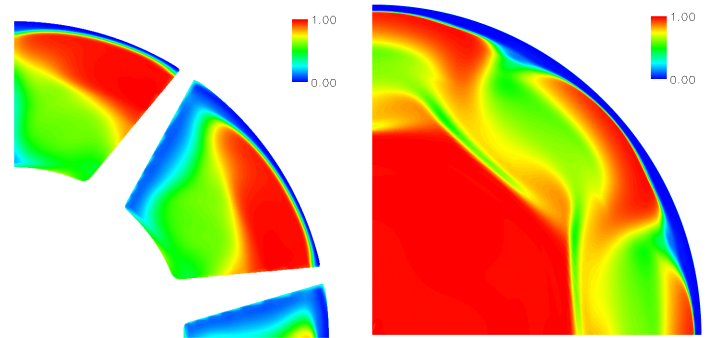
(b) Liquid phase stream lines and void fraction

Fig.9 3D calculation results around swirler



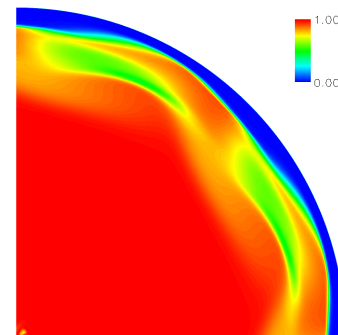
(a) hub bottom (0 cm)

(b) 7cm up

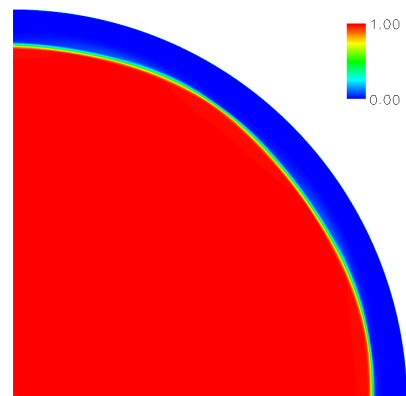


(c) 14cm up

(d) 21cm up



(e) 28cm up



(f) approx. 44cm up form the hub bottom

Fig.10 Horizontal view of void fraction distribution