

旋回空気流の解析的研究

大塚裕俊・後藤幸臣・重光和夫・船田 昌
機械電子部

Prediction Analysis of a Swirling Air Flow

Hirotoishi OHTSUKA, Yukiomi GOTO, Kazuo SHIGEMITU, Masashi FUNADA
Mechanics & Electronics Division

要旨

旋回空気流を利用した機器の合理的な設計技術の確立を目標として、容器内部の空気旋回流の把握を数値計算による予測により行う研究を実施した。そのためまず空気流実験装置を試作してその観測を行い、得られた結果と数値計算（数種の乱流モデルを利用）による結果との比較等の作業をとおして、空気旋回流について数値計算による予測がどの程度適切であるかを確認した。そしてその応用として新しく製作されたゴム材など弾性材製品の搬送・計数装置の容器内部の空気旋回流についてこれを適用し、新しい改良型の装置の開発に役立てることを試みた。

1. はじめに

自動化技術で用いられる製品の搬送技術は、一般機械部品のような材質的に固い製品を対象としたものが主であり、振動を利用したパーツフィーダ等が利用されることが多く、ゴム材などからなる弾性材製品ではこれら機器の適用は必ずしも適当でない場合が多い。そこで旋回空気流を利用した新しい搬送技術の利用などが求められている。

旋回空気流は燃焼器内部の流れやミストセパレータなど産業上の機器でよく見られるが、方向性が強く速度勾配が大きいなどの特徴を有する流れであり、その特性は容器内部形状などに依存するため、機器の設計上の不確定要因が多くなっている。そのため設計段階で旋回流の予測が可能となれば、機器設計プロセスの合理化が可能となると思われる。

本研究ではまず容器内部の空気流の様子を正確に観測する必要から、空気流実験装置を試作してその観測を行った。同時に、得られた結果と数値計算（数種の乱流モデルを利用）による結果との比較等の作業をとおして、容器内部の空気旋回流について数値計算による予測が適切であるかを確認した上で、応用技術として新しく製作された弾性材製品の搬送・計数装置の容器内部の空気旋回流についてこれを適用することを試みた。

2. 研究内容

製作した空気流実験装置では、空気流の観測のため微小発泡スチロール粒をトレーサとして使う手法を用いた。発泡スチロール粒の粒径は平均で約1.4mm、重量は

約0.08mgであった。本体流路部の外壁はアクリル材により透明とし、容器内部の空気旋回流を発生させるための空気流入口と、大気への開放端とした空気流出口の2ヶ所を設けた。本体流路部は流路部を間に挟んだ3層構造となっているため面に垂直な方向から観測することで容器内部を2次元の流路形状として観測することが出来る。2次元の流路形状としては最も単純な形状である円形をモデルとし、空気流入口と空気流出口はその接線方向に配設した。

この実験装置では発泡スチロール粒を空気流に効果的に混合させるメカニズムがポイントであるが、粒子と気体との混合部での流路狭窄部の詰まり現象等が発生しないように混合流を安定して発生させる特殊な粉体送り用のノズルを利用した。Fig.1に製作した空気流実験装置の全体概要を示す。

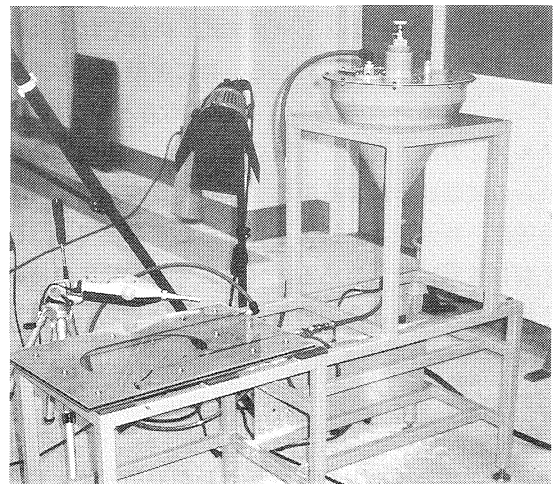


Fig.1 空気流実験装置

2.1 数値計算について

2.1.1 乱流モデル

実験的・経験的な研究が主流であった気体の流れの把握にも、近年では数値計算手法が多く取り入れられるようになった。

一般に乱流のモデル化では、速度など物理量の時間平均則（時間変動量の平均値）を利用した仮定をおくことにより、方程式を解ける形にして経験則で補足して計算するのがこれまでの常道となっている。工学的な計算では例えばこのような時間平均値による流れの把握でも十分な場合が多く、数値計算による気体流れの予測は、乱流モデルなど数値計算手法の向上などに伴い今後ますます利用されるようになると思われる。

本研究では乱流モデルとして、これまで多く利用されてきた(1)k-εモデル(2)レイノルズ応力モデルに加え、新しい(3)RNGk-εモデルの3種を用いた。

一般に、流体の挙動をあらわす物理的な方程式は質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式の3つである。いずれも流体の微小体積中での各々の物理量の保存（つりあい）から導出される。（エネルギー保存式は本数値計算ではオフである。）

これらの方程式は非線形項を多く含むため、一般的に流れはレイノルズ数（Re）の増大により流体の粘性による効果よりも慣性による効果が大きくなり、大小スケールの渦を伴う乱流へと移行し限られたメッシュ数やコンピュータ資源では到底コスト的に実用的でない数値計算となってしまふ。

そこで乱流を取り扱うため、乱流変動のある流れでの物理量を時間的平均値と変動成分の和として表現するアプローチ（レイノルズ平均操作）を用いる。

今、速度 u_i を時間平均値 u_i と変動成分 u'_i によって $u_i = u_i + u'_i$ とし、これを微小体積中での保存式に代入すると、質量やエネルギーなどのスカラー保存式及び運動量保存式（ナビエストックス式）にはそれぞれ変動成分による u'_i 項があらわれる。特に運動量保存式では $\rho u'_i u'_j$ なる形となりレイノルズ応力と呼ばれる。レイノルズ応力は3次元では独立の6成分（変数）となり、これらの変動成分による項を主流の変数成分（平均流の特性速度、特性長さ）によってあらわすことで、方程式系を解ける形に持ち込める。（なお変動成分に直接結びつく乱流量の特性速度や特性長さは、本来これら主流の変数とは独立の量である。）

(1)k-εモデル（以下k-εと略す）

乱流量の特性速度Vや特性長さLを間接的に表現するため、乱流エネルギーkとその散逸率εを導入する。（2

方程式乱流モデル）そして乱流粘性 μ_t が（乱流速度スケールV）×（乱流長さスケールL）に比例する（Prandtl-Kolmogoroffの乱流粘性仮説）として乱流粘性 μ_t を以下のように定式化する。なお乱流場では実効粘性 μ_{eff} は通常の分子粘性 μ と乱流粘性 μ_t の和となる。

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad C_u \text{は実験による定数}$$

またレイノルズ応力は、Boussinesq近似として知られる手法で平均流の値と結びつけられる。

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \cdot \delta_{ij}$$

（uは主流の平均速度、u'は変動成分）

またk、εそれぞれについて各々スカラー保存則式（輸送方程式）をたてて上記のスカラー保存式、運動量保存式とともに方程式系を閉じる。あらわれる諸係数の値はすべて実験的に求められる。

(2)レイノルズ応力モデル

(Reynolds stress model)（以下RSMと略す）

k-εの限界は μ_t が空間的に等方的であるということである。これは乱流量の特性速度Vや特性長さLが全ての方向で等しいことを意味しており、旋回流などの複雑な流れではそれらの量は方向によって変わりうると考えられる。RSMは個々のレイノルズ応力を個別に計算することが出来るため、非等方性の流れにも対応できる。

具体的には個々のレイノルズ応力 $u'_i u'_j$ （3次元では独立に6個）について輸送方程式を構成し、同様にモデル化によって方程式系を閉じる。諸係数の値はすべて実験的に求められる。

(3)RNGk-εモデル

(Renormalization Group k-ε)（以下RNGと略す）

本モデルはk-εをベースとした2方程式乱流モデルの枠組みのものであるが、RNG法と呼ばれる数学的技法によって流体の流れを支配する運動量保存式（ナビエストックス式）等より導出される。RNG法はモデル構築における一般的な枠組みであり、それを使うことで物理問題での複雑な運動現象が、長い時間スケールと大きな長さスケールを支配するいわゆる”粗い”（COARSE-GRAINED）運動方程式によって記述される。

乱流について言えば、非静的な諸変動を通してそれ自身の生成原因となる外部の初期条件や力とは独立に、小さなスケールの渦についての効果を記述できるということである。

具体的には、粘性の限界による最も小さいレンジの渦の項を、大きいレンジの渦の項によって表して除去していく (scale elimination procedure) という手法を取る。この除去により残された渦モードによってナビエ-ストークス方程式など支配方程式が変換され、この除去プロセスが繰り返されることで比較的粗い計算格子でも、高いレイノルズ数の乱流が小スケールの渦の効果まで場所場所で反映された流れとして計算可能となる。

RNGでの諸係数はこれまでの $k-\varepsilon$ など経験的なモデルと異なり、実験でなく理論によって求められるため汎用性がありいろいろな流れに広く適用できるという特徴がある。

2.2 旋回流の観測方法

旋回流の観測にはハイスピードカメラ (500画像/sec) を用い、流れの平均流が定常状態に達した状態で約2.5sec間撮影した。そして2msec毎に得られた画像データ群より中途の20msec間隔の10枚を抜き出し、サンプルの抽出を行った。抽出の方法は選ばれた画像の2msec後の画像との差分画像を取るという方法により、トレーサの2msec間の飛跡を画面上でプロット抽出した。トレーサは円形領域中の任意点を飛んでいるため、2msec間の飛跡により近似的な速度ベクトル v を構成すれば、その周速度成分 v_θ も計算できて、トレーサ1点の情報により $S(r, \theta, v_\theta)$ が得られる。 r, θ はトレーサの位置である。今回はこれを約800点サンプリングしたうえで、各位相 (θ) に分配し測定値とした。

3. 結果

実験に使用した流路板の形状、ハイスピードカメラによる撮影画像の例、及び微小時間後の画像との差分処理後の同画像について図に示す。(Fig.2~Fig.4)

また数値計算で用いたメッシュと計算結果の代表的な例として速度ベクトル図を示す。(Fig.5~Fig.6)

観測の結果 (Fig.7) によれば周速度の測定値は、円領域の各位相において乱流変動その他の要因による不規則なばらつきを示すと同時に、半径の小さい部分ではトレーサの存在確率が小さくなるため (主流がおもに壁面付近を通過する理由による) 半径方向に極端なデータ数の偏りがある、などの問題も示しているが、速度勾配の大きい $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ などの結果を見れば測定値データ群の中央値については乱流モデルによる計算結果と定性的には壁面付近での値について一致する傾向にある。

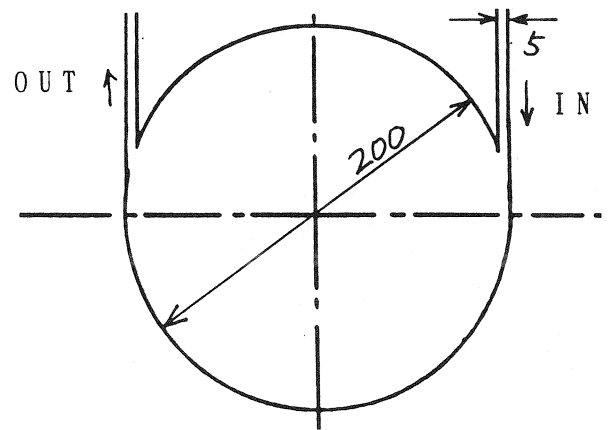


Fig. 2 使用した流路板の形状

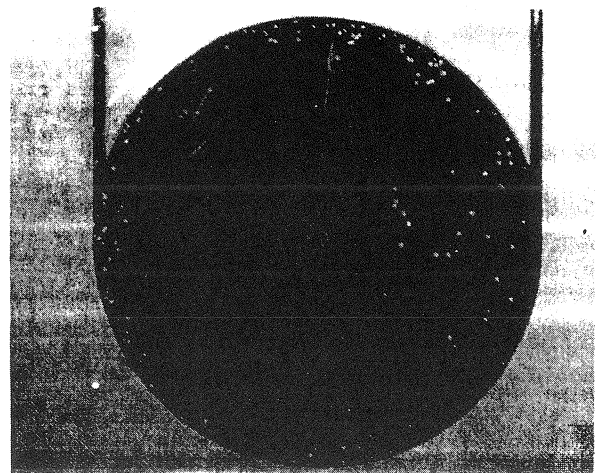


Fig. 3 撮影画像の例 (白い粒がトレーサ)

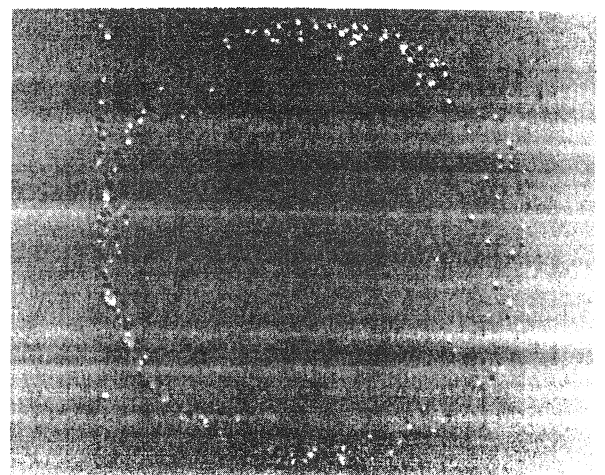


Fig. 4 差分処理後の上図画像 (微小時間後)

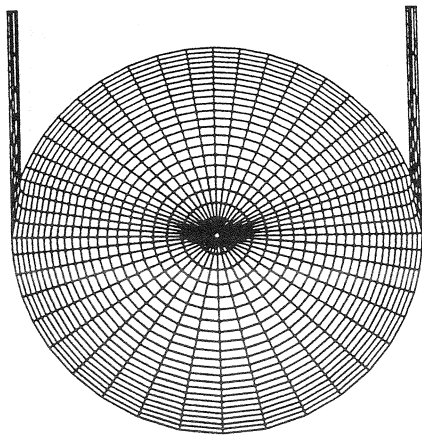


Fig. 5 数値計算に用いたメッシュ

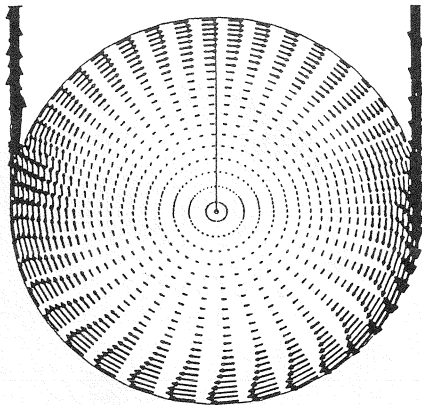
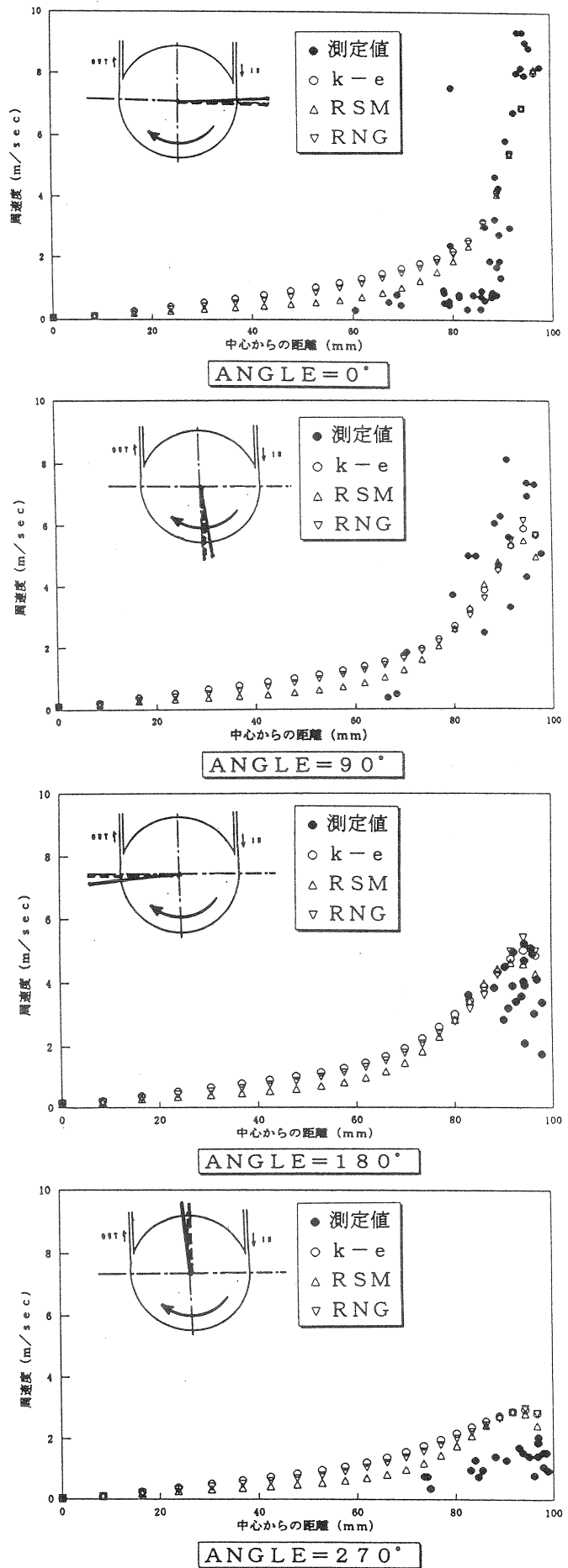


Fig. 6 速度ベクトル図 (計算結果)

Fig. 7 半径方向の速度分布の測定値と計算値



速度勾配の一番大きい $\theta = 0^\circ$ での結果を見れば、3種の乱流モデルのうちレイノルズ応力を直接計算するRSMが最も測定値の中央値へと接近したカーブを示す結果となっている。本研究で対象とする空気旋回流など空間上の乱流に非等方性を考慮しなければならないケースでは、RSMが有利であるとの予想を裏づける結果ではないかと考えられるが、他の位相での結果では有意な差は出ていない。

また計算結果間の比較では、RNGは若干RSMの結果に近づいているとはいえ $k-\varepsilon$ とあまり異ならぬ結果となっている。

以上の結果から今回の観測結果は、乱流変動その他の要因によるばらつきやデータ数の偏りなど不完全な点を含むとはいえ、数値計算による予測による結果を定性的に裏づけることが出来たと考える。また乱流モデルの中では、本研究で対象とするような空気旋回流の挙動の予測についてRSMが他モデルに比較して有効である可能性が示された。

4. 応用事例

そこで次にこのような数値計算による旋回流の予測の応用として、新しく製作された弾性材製品の搬送・計数装置の容器（長円形）内部の空気旋回流の予測についてこれを適用した結果を以下に示す。

この装置は下部の空気流入口より空気を噴入させ、内部に旋回流を生じさせて内部の弾性材製品を上方向へ攪拌・搬送し、上部に設けられた出口より1個ずつ製品を取り出す仕組みである。（試作機の外観はFig.8）

RSMによる数値計算結果により、容器内部形状の一部に微小な物体（回転ローラ）が付加される前後の空気流速の比較を行った。この結果、製品（空気）出口付近後方での空気流速の著しい減少と速度分布の変化が確認され、現実の回転ローラ設置後の同領域での製品の滞留現象（製品が壁面にとどまって流れなくなる）を説明することができた。用いたメッシュをFig.9に、周速度分布の計算結果の比較をFig.10に示す。

この後、容器内部形状の円形への変更、回転ローラ設置位置の変更などの改良設計が行われ、新しい改良型の弾性材製品の搬送・計数装置が製作されるための基礎データを提供することが可能となった。

5. まとめ

(1)空気旋回流の数値計算による予測を行った結果、定性的には観測結果を裏づける結果が得られた。またこの場合、乱流モデルではレイノルズ応力モデル（RSM）が有力である可能性が示された。

(2)弾性材製品の搬送・計数装置の容器内部の空気旋回

流の予測について数値計算を適用した結果、実際の装置不調の現象を裏づけるデータが得られたので、改良設計にこれを役立てることが出来た。

(3)今後の課題としては、今回用いたトレーサ法による観測方法の全般的改良（旋回流の観測データの密度向上含む）、モデルの精密化（3次元化含む）など数値計算上の効率向上、及び平均流や乱れ強度の再現性の確認など多岐にわたると思われる。

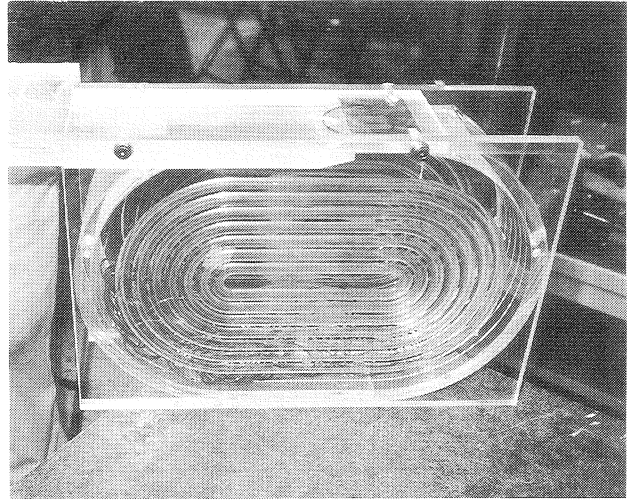


Fig.8 弾性材製品の搬送・計数装置
試作機の外観

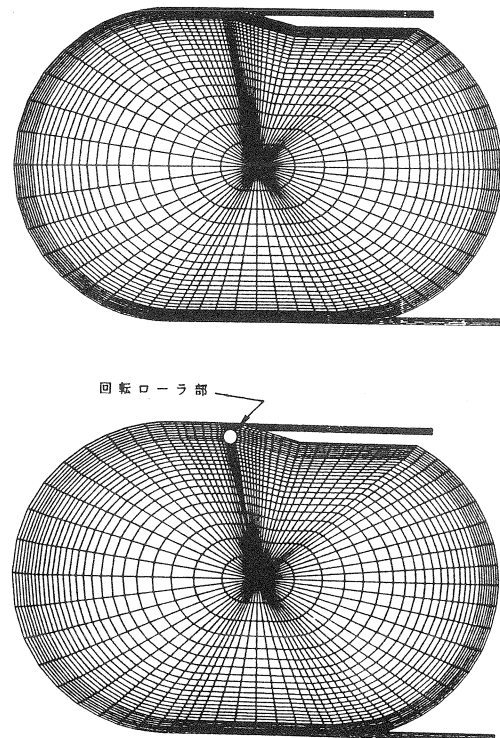
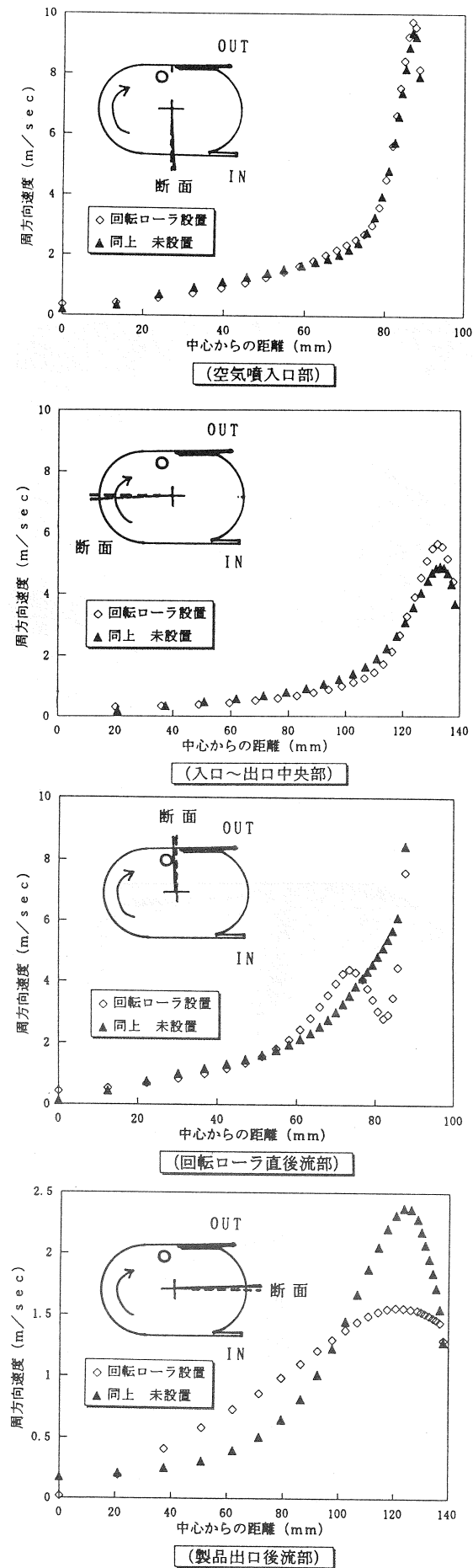


Fig.9 数値計算に用いたメッシュ



本研究は地域人材不足対策技術開発事業での要素技術研究の一環として行われた。

また本研究に一部利用した熱・流体解析システム、マシニングセンタ及び高速度ビデオシステムは、日本自動車振興会の補助を受けて設置したものである。

文献

- 1) C. G. Speziale and S. Thangam, "Analysis Of an RNG Based Turbulence Model for Separated Flows", ICASE Report, 3, 1992
- 2) Fluent. Inc, FLUENT User's Guide, Fluent. Inc, 1993

Fig.10 試作機器の内部周速度