

# 管路内旋回流れの可視化と可触化

柏原慎太郎

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

田中 豊

法政大学工学部機械工学科

鈴木 隆司

(株)オーパスシステム

計算科学の分野では膨大なデータをわかりやすく人間に伝えることが重要な課題である。しかし、シミュレーション等により求められる複雑な数値データを、一覧表や図だけで直感的に理解することは困難である。本研究では、直感的に理解することの難しいとされる流体の流れ場に対して、体感的な手法を導入したデータの可視化と可触化を行った。流れ場に仮想的な粒子を配置する視覚的效果に加えて、数値解析の結果求められる速度や圧力分布データから、流体の流れ場におかれた点にかかる抵抗力を計算し、流れに擬似的に触ることにより流れ場を体感する接触感覚的效果により、複雑な流れ場の直感的把握を実現した。

## 1. はじめに

計算科学技術分野では、解析結果などの多種多様なデータの表す意味をいかにわかりやすく人に伝えるかという問題が重要な課題である。最近では、計算機の高性能化と大容量化により解析可能な複雑な現象を、図や表、グラフだけでわかりやすい形で読み取ることが困難になりつつある。そこで最近では、視覚的な情報に加えて接触感覚を提示することにより、より直感的にデータを把握理解する試みが始められている<sup>[1][2]</sup>。

著者らはこれまで、バーチャルリアリティ技術の応用として、計算機内の仮想世界の現象に擬似的に触れられる機械式触覚インターフェースにより、地形データや流れ場のデータを元にして構成された仮想空間に触れることのできる可触化システムを開発した<sup>[5][6]</sup>。

本研究では、この触覚インターフェースを用いて、通常、直感的に理解することの難しいとされる流体の流れ場の数値解析結果を表現する一手法として、体感的な手法を導入したデータの可視化と可触化を行う。管路内の旋回流れ場を数値解析し、数値解析結果から得られるデータを元に、管内流れの流れ場を表す視覚的效果（可視化）に加えて、速度や圧力分布データから求められる流体の抵抗感覚や管内流れの流れ場を仮想的に移動する粒子に触れる接触感覚的效果（可触化）を用いることにより、直感的に理解しやすい流れ場の提示を実現する。

## 2. 三次元分布データ

速度や圧力ベクトルなど空間に分布して定義されるデータを三次元分布データと呼ぶ。三次元分布データの可触化に必要な処理は、位置座標を三次元分布データ座標系に変換する機能（座標変換）と、その位置での三次元分布データを検索する機能（検索と補間）、三次元分布データより触覚情報を計算する機能（触覚情報変換）の3つがある<sup>[6]</sup>。

また三次元分布データの構造には、空間に離散的にデータを定義しておく離散型分布データと、位置の関数としてデータを定義する関数型分布データの2種類がある。本研究では、数値解析の結果を直接用いる離散型分布

データと、解析結果より近似関数を求める関数型分布データの両者を用いた。本報ではこのうち、離散型分布データによる結果について述べる。

## 3. 対象とする流れ場

本研究では従来から詳細な検討が進められている気泡除去装置内旋回流れの数値解析結果<sup>[3][7]</sup>を対象に、三次元離散型分布データの流れ場を作成した。

Fig.1 に CFD による解析結果の一例を示す。流入口よりテーバ管路内に導かれた流れは、旋回流を形成しながら、軸方向下流へと流れる。本研究ではこのテーバ管路部を中心に三次元離散型分布データの流れ場を作成した。

Fig.2 は可触化に用いた座標系の横断面である。横断面（ $X$ - $Y$ 平面）については $X$ 方向、 $Y$ 方向ともに格子状に7分割、軸方向（ $Z$ 方向）には格子状に14分割して、各格子点の速度ベクトルと圧力ベクトルをCFDの解析結果から座標変換し、離散データとして各格子点に定義した。データの定義されていない場所については近傍のデータから補間して求めた。

三次元分布データを触覚情報に変換するにあたり、速度ベクトルや圧力ベクトルを力ベクトルに変換する必要がある。本研究では、速度ベクトルから力ベクトルへの

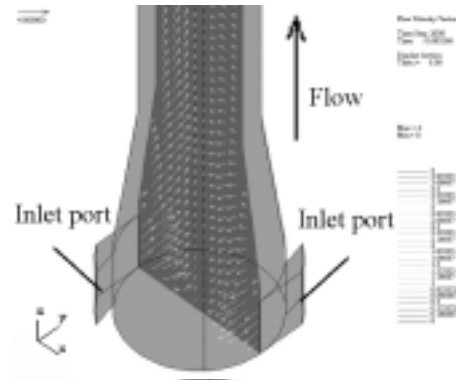


Fig.1 Numerical analysis for swirling flow

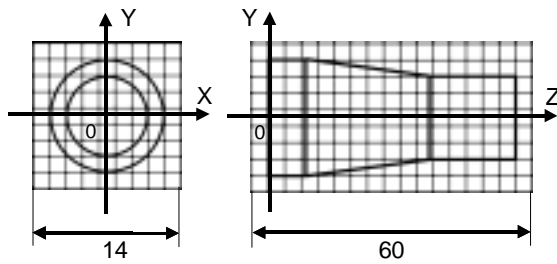


Fig.2 Frame of reference for haptization

変換は、流体の中にある物体が受ける抗力を表す式を用いて次式で定義した。

$$\mathbf{D} = C \frac{\rho}{2} \frac{\|\mathbf{v}\|^2}{\|\mathbf{v}\|} \mathbf{v}$$

ここで、 $\mathbf{v}$  は流体の速度ベクトル、 $\rho$  は流体の密度、 $C$  は抗力係数、 $\mathbf{D}$  は流れにより生じる力ベクトルである。 $C$  は普通、物体の形や物体の流れの向きに依存した係数で、本研究の場合、人間の体感性能などにより決まる速度から力への変換係数と考えることができる。

また、圧力から力への変換は、流れにともなう圧力場に半径  $r$  の仮想球体粒子を配置し、各軸方向ごとの粒子面上の圧力差にこの粒子の平面投影面積を乗じることで、各軸方向に対して以下の式を用いて定義した。

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= (f_X, f_Y, f_Z) \\ f_X &= (P_{1X} - P_{2X})\pi r^2 \\ f_Y &= (P_{1Y} - P_{2Y})\pi r^2 \\ f_Z &= (P_{1Z} - P_{2Z})\pi r^2 \end{aligned}$$

ここで、 $P_1, P_2$  は粒子中心から各軸の正負方向にそれぞれ  $r$  だけ離れた点の圧力、 $\mathbf{F}$  は圧力の不均衡により生じる力ベクトルで、各軸方向の成分は  $f_x, f_y, f_z$  である。

#### 4. システム構成

Fig.3 は本研究で構築した視覚・触覚情報を操作者に提示するための可視化・可触化システムの構成図である。システムは、パーソナルコンピュータ(PC)と触覚インターフェイスデバイス(PHANToM<sup>(4)</sup>)から構成されている。PHANToM は 6 自由度を持つ接続機械式のフィードバックアームで構成され、各アームは 3 個のエンコーダ付き制御モータに直結されている。操作者は PHANToM のアームの先端に取り付けられたプローブの先端に指先を挿入し操作する。

流れ場を仮想空間としてコンピュータ上に表現するために、視覚情報は OpenGL を使用し作成し、触覚情報は、PHANToM の制御により実現した。操作者が PHANToM を操作すると、その指先の位置データが PC に送られ、PC はその位置における流体の流れ場の三次元分布データ（速度や圧力）を検索し、その位置で指先にかかる力を計算する。そして、その結果を反力データとして PHANToM へ返し、プローブ先端に反力を提示する。本システムを用いることにより、操作者は実際には触れる

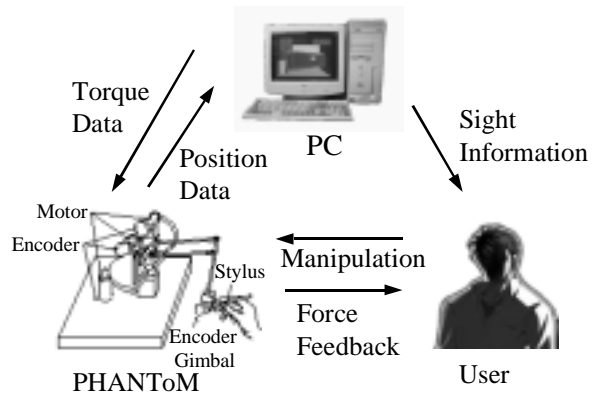


Fig.3 System configuration for haptization

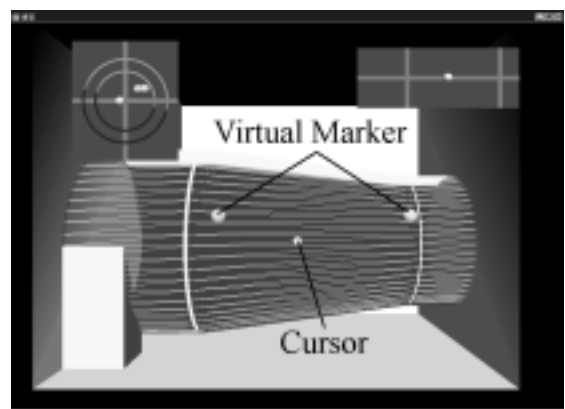


Fig.4 Visual display for flow field

ことのできない流体の流れ場をあたかも自分の指で触れているかのような感覚を得ることができる。ただし指の挿入にともなう流れの乱れは無いものとする。

Fig.4 に速度データを用いた流れ場の視覚提示の様子を示す。仮想的な流れの中で指先位置を示したカーソルが指先の動きに応じて移動する。また流れの認識を高めるため、流体と一緒に移動する仮想マーカーを流れの中に送出す。仮想マーカーは装置の流入口に当たる部分から、旋回軌道を描きながら下流に向かい移動していく。このマーカーが流れの中を移動することにより、操作者の視覚的理解を大幅に助けることができる。また遠近感を把握しやすくするため、正面と側面の座標軸表示を設けた。また外管を全て覆ってしまうと、中の物体や指先位置を表すカーソルが見難くなるため、ユーザー側の前方半分はフレームでのみ表示した。

Fig.5 に圧力データを用いた流れ場の視覚提示の様子を示す。中心部付近にある仮想マーカーには、仮想的な半径と密度を持つ球体が想定されている。この仮想マーカーは圧力差により移動し、圧力の極小値付近に停留する。

#### 5. 感覚提示性能の評価

##### 5.1 速度データ

触覚感覚提示装置 PHANToM から、操作者の指先に旋

回流にともなう抵抗感覚を与えることに加え、仮想マーカーが流れの中を旋回流とともに移動することにより、操作者は流れ場への理解が大幅に助けられる。

Fig.6は操作者に与えられる中心軸上Z方向成分の提示力  $d_z$  である。Z方向の力は、テーバ部で流れが加速されるのにもなって連続的に増加する。また Fig.7は  $Z=0$  の流入口断面におけるX軸上のY方向成分の提示力  $d_y$  とY軸上のX方向成分の提示力  $d_x$  である。これらの方向の力は原点を中心に対称な形をしており、旋回流にともな

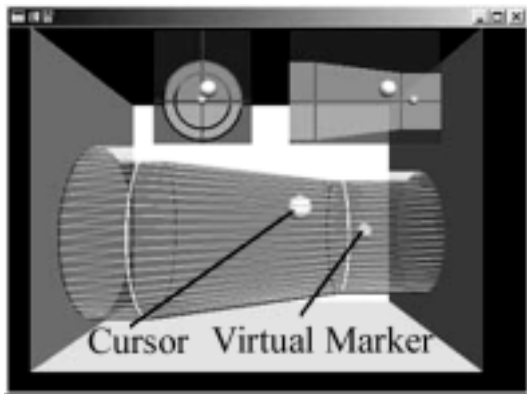


Fig.5 Visual display for pressure field

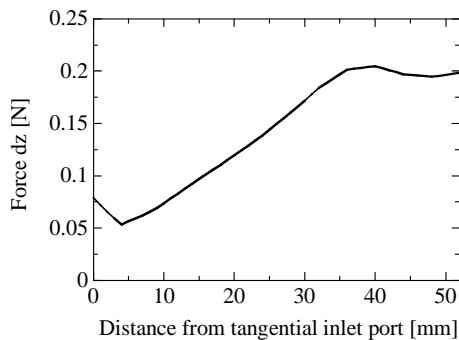


Fig.6 Flow force of Z-direction

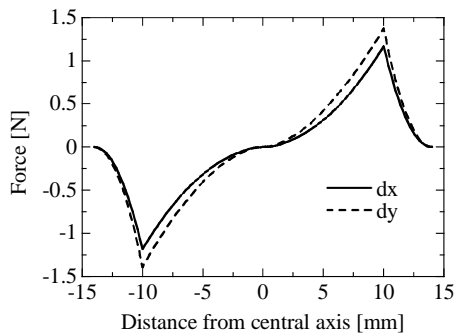


Fig.7 Flow force of X- and Y-direction

う提示力が原点を中心に回転している様子がわかる。またこの断面では、中心軸から半径 10mm 付近の円周方向の力が最も大きい。

### 5.2 圧力データ

Fig.8は中心軸上の圧力分布の解析結果である。テーバ管路部終わり付近に圧力の極小値が存在する。この流れにともなう圧力場に仮想的な球体である仮想マーカーを配置することにより、低い圧力となる場所を視覚的に特定することが出来る。またこの仮想マーカーに触れることにより、その圧力により生ずる力の強さを体感することができる。Fig.9はFig.8の圧力分布解析結果から計算したZ軸方向の提示力  $f_z$  である。正の値は下流方向への力、負の値は上流方向への力を表している。テーバ管路部の終わり 40mm 付近に、下流から上流へ仮想粒子を押し戻そうとする力が働いていることがわかる。

### 5.3 接触範囲の拘束

微小厚さを持つ平面を仮定して接触できる範囲を絞り、指先の動きを二次元平面内に拘束することにより、管路形状の違いなどによる流れ場の比較の理解がより助けられる。また、微小面積を持つ線分を仮定して接触できる範囲を絞り、指先の動きを一次元線分に拘束することにより、圧力分布のグラフや表などによる表示出力との比較検討にも用いることができる。例えば、速度データを極薄い厚さを持つ平面で切り取った場合、通常、断面図として用いているグラフ表現を可触化すると同じ効果がある。今回の解析結果の場合、Z軸方向の任意のX-Y

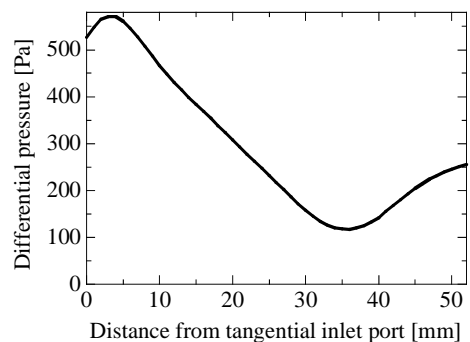


Fig.8 Pressure distribution along central axis

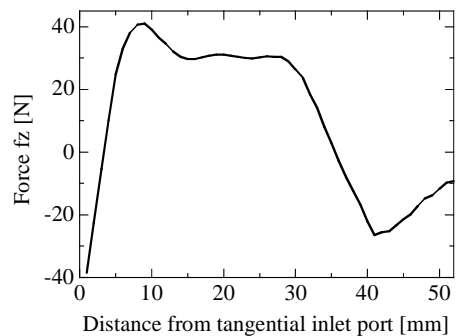


Fig.9 Force depending on pressure on central axis

断面で切り取られた平面内の流れ場で、明確な渦を巻く流れを感じることができた。また微小体積を持つ Z 軸に平行な線分で切り取られた線上の圧力場で、指先が上流や下流方向にのみ動くように拘束され、Fig.8 のような圧力分布データとの比較やその分布状況に対する理解を助けてくれるのに役立つ。

## 6. 結論

本研究では管路内流れを把握する際に、三次元分布データを用いて構築した仮想的な流体の流れ場の視覚情報と触覚情報を重ね合わせて提示するシステムを構築した。本システムを用いることにより、オペレータは実際には触れることのできない流体の流れ場をあたかも自分の指で触れているかのような疑似体験感覚を得ることができた。解析結果から速度や圧力分布データを求め、力ベクトルに変換し、触覚という方法でユーザーに空間内の力分布を提示することにより、今まで分かり難かった三次元的な繋がりでのデータ群をより明確に理解できることが確かめられた。また、指先の動きを一次元や二次元に拘束することにより、通常用いられる図表の理解を大いに助けてくれる。本研究で構築した可視化・可触化システムは、計算科学データの直感的な理解に役立つものと確信している。

## 参考文献

- [1] 矢野, 空間分布データの可触化, 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演論文集( ) ,pp.254-255 ,1998 .
- [2] 廣瀬, 岩田, 池井, 小木, 広田, 矢野, 筧, 触覚用共通ソフトウェア (HIP) の開発, 日本バーチャルリアリティー学会論文集, Vol.3, No.3, pp.111-119, 1998.
- [3] Yutaka Tanaka, R. Suzuki, Kazuyoshi Arai, K. Iwamoto, K. Kawazura, “Visualization of Flow Fields in a Bubble Eliminator”, Journal of Visualization, Vol.4, No.1, 2001, pp.81-90.
- [4] Thomas H. Massie, Initial Haptic Explorations with the Phantom Virtual Touch Through Point Interaction, (1996), Masters Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology .
- [5] 青野, 田中, 三次元分布データの可触化, 法政大学計算科学研究センター研究報告, 第 12 号, pp.7-12,1999.
- [6] 川面, 田中, 三次元分布データの可触化による流れ場の表現, 法政大学計算科学研究センター研究報告, 第 13 号, pp.7-13, 2000.
- [7] 山本, 田中, 新井, 鈴木, 気泡除去装置内旋回流れの数値解析, 法政大学計算科学研究センター研究報告, 第 12 号, pp.1-5, 1999.

キーワード.

可視化、可触化、気泡除去装置、旋回流れ、人工現実感

.....

Summary.

**Visualization and Haptization for Swirling Flow in a Pipe**

Shintarou KASHIWABARA, Yutaka TANAKA

Department of Mechanical Engineering, Hosei University, Tokyo Japan

Ryushi SUZUKI

Opus System Inc., Tokyo Japan

It has been important problem to communicate comprehensibly to the science and technology data. With the advance on recent computer technology, it is possible that computer graphics displays spatial distribution data for physical phenomena in a real environment. On comprehension of the spatial distribution data, however, conventional visual displaying techniques have not provided realistic image and interactive sensation for presentation of the data. In this study, a prototype of haptic system for scientific visualization using virtual reality technology has been developed. A pattern of the swirling flow in a bubble elimination device is applied to investigate the visualization and haptization of the flow fields.

Keywords.

Visualization, Haptization, Bubble Eliminator, Swirl Flow, Virtual Reality