

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560239

研究課題名（和文） 細長い流体管路を移動する連結物体の駆動特性とその安定性

研究課題名（英文） Stabilities of the Combination of Moving Bodies in a Fluid Tube

研究代表者

吉沢 正紹 (YOSHIZAWA MASATSUGU)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10095664

研究成果の概要：本研究では、流体管路内における単独移動物体の動的挙動ならびに周囲流体の非定常運動を、解析解ならびに数値解による理論的検討、PIVによる可視化実験により明らかにした。さらに複数連結の代表的な場合として、3 両連結の移動物体の場合についての実験を行い、連結移動物体の通過に伴う管内非定常圧力分布に及ぼすバイパスホールの影響ならびに連結部分における非定常流体運動の特徴を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：運動力学 多体系 流体関連 数値計算 実験

## 1. 研究開始当初の背景

流体関連振動の分野で発生する不安定現象の代表的な例として、細長い流体管路を用いた物体の搬送システムの基礎的研究がある。

このような搬送システムは、マイクロマシンを含む先端機械システムで重要な役割が期待され、その特徴は、管内流れが一般に低レイノルズの流れで、移動物体と管壁との隙間が狭いことである。

さらに、細長い管路内を移動する物体は通常、連結して走行するのが一般的であり、その代表的な例としては、原油輸送用パイプ

ラインの点検用に使われている、図1に示されるような検査用ピグなどが挙げられる。

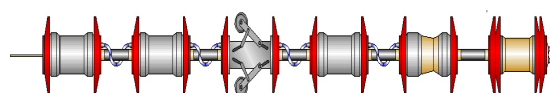


図1 連結移動物体(A Hak Industrial Services, Netherlands 提供)

このような連結移動物体の場合、流体運動と物体の運動との相互作用が物体の走行安定性に複雑な影響を与え、その解明の重要性が指摘されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、細長い流体管路を用いた単独物体・連結物体の搬送システムを取り上げた。

すなわち、搬送用流体管路は管内径 $D$ が1 mm前後の細管で、管内流はレイノルズ数 $Re = Wv_{in}/\nu$  ( $\nu$ は動粘性係数)が1000以下の低レイノルズ流れを想定する。また連結移動物体は、最も基本的な3両連結とする。各移動物体の両端に設置されたガイドと流体管路壁との隙間 $\delta$ はガイド幅に比べ十分に狭く、かつガイドには、連結移動物体に作用する管軸方向の圧力分布の調整が可能であるような穴が開いている。

最初に、管内径が50倍程度の拡大相似模型実験装置を用いて、移動する単独物体の運動と、その周囲の流体運動の可視化実験を高速ビデオカメラ・コンピュータによる画像解析を用いて行った。

次に、単独移動物体周囲の流体運動を数値シミュレーションにより解析を行った。

最後に、3両の連結移動物体の定常走行時の周囲流体の可視化と連結物体前後での圧力の時刻歴を測定した。

## 3. 研究の方法

(1) 理論解析 単独移動物体の場合について、下記に示される無次元支配方程式をMAC法による数値的に解いた。

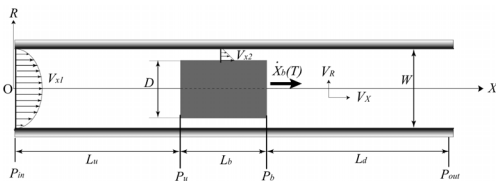


図2 解析モデル

物体の運動方程式：

$$\frac{d^2 x_b}{dt^2} = m \iint_{s1} \left\{ -p + 2 \frac{1}{Re} \frac{\partial v_x}{\partial x} \right\} ds + m \iint_{s2} \left\{ \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right\} ds$$

流体の連続の式：

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0$$

ナビヤ・ストークス方程式：

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right)$$

境界条件：

$$v_x = \dot{x}_{bter} \quad v_r = 0 \quad (\text{物体上})$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial r} = 0 \quad v_r = 0 \quad (\text{中心軸上})$$

$$v_x = -8 \left\{ r^2 - \frac{1}{4} \right\} \quad v_r = 0 \quad (\text{流入条件})$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad v_r = 0 \quad (\text{流出条件})$$

$$v_x = v_r = 0 \quad (\text{流路壁面上})$$

(2) 実験方法 図3に示されるような計測システムを用いて、流体管路内を移動する連結物体の運動とこれに伴う物体周囲の非定常流体運動の測定を行った。

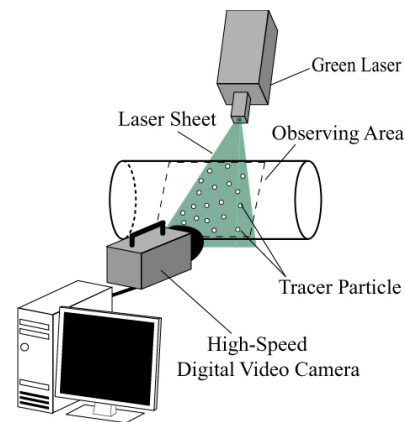


図3 実験装置と計測システム

図4に、実験に用いた3両連結の移動物体を示す。



図4 3両連結移動物体

#### 4. 研究成果

##### (1) 単独移動物体の場合



図5 単独移動物体

最初に、図5に示されるような単独移動物体の両サイドのガイドと管壁間-以下では物体内部と称する-の渦度分布の数値計算結果を図6, 7に示す。

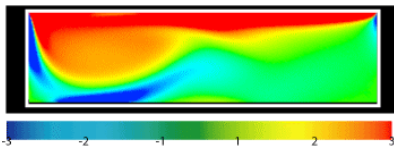


図6 物体内部の渦度分布 (Re=300, 数値計算)

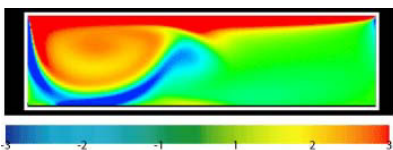


図7 物体内部の渦度分布 (Re=700, 数値計算)

これより後方ディスク付近に発生する渦は、強制渦と自然渦の組み合わせ渦となっていることが分かる。

第二に、数値計算結果に対応する、物体から見た相対座標における物体内部の流速ベクトルの実験結果を図8, 9に示す。

後方ディスク付近に渦が発生しており、Re=200~700の範囲では渦の位置と大きさはほとんど変化しない。

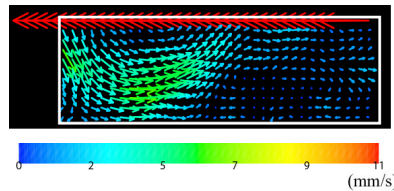


図8 物体内部の流速ベクトル線図 (Re=200, 実験)

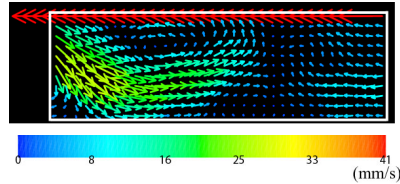


図9 物体内部の流速ベクトル線図 (Re=750, 実験)

第三に、図10に示されるような、物体中央に管軸に平行にバイパスがある場合と無い場合の単独移動物体の物体周囲の数値計算結果を示す。

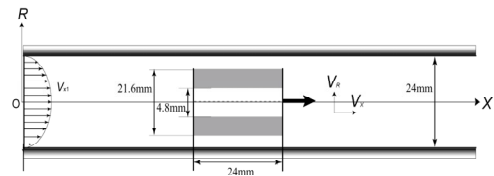


図10 バイパスがある単独移動物体

図11, 12に、物体上から見た相対座標上のベクトル線図を示す。この場合、壁が動いており、バイパスの有無にかかわらず、物体に当たった流体が壁に引きずられ逆流していることが分かる。

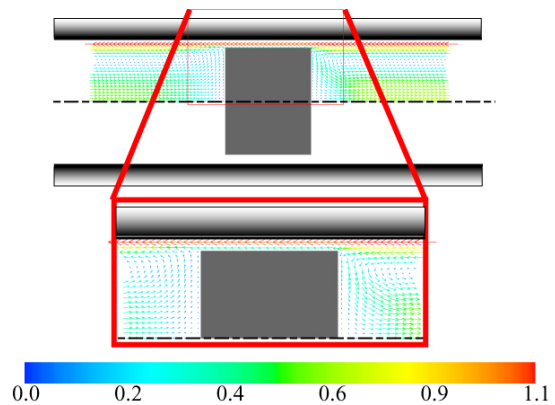


図11 流速ベクトル線図数値計算結果 (Re=100, バイパス無し)

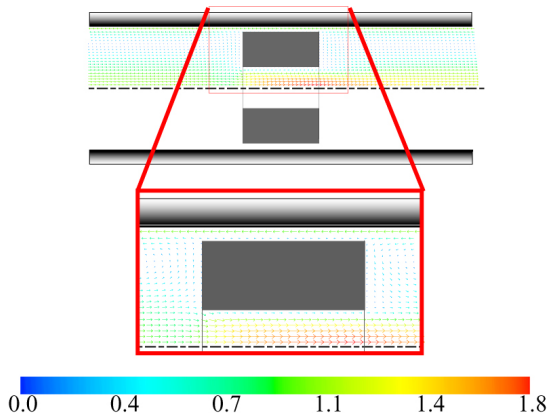


図 12 流速ベクトル線図数値計算結果 (Re=100, バイパス有)

また、当然予想されることであるが、バイパスが無い場合には物体付近で中心軸上の流速は0に近づくが、バイパスが有る場合には物体付近で中心軸上の流速は増加し穴から前方へ流体が流れ出る。実験においても同様の結果が得られた。

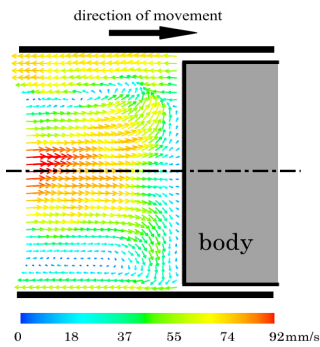


図 13 流速ベクトル線図実験結果 (Re ≈ 100, バイパス無し)

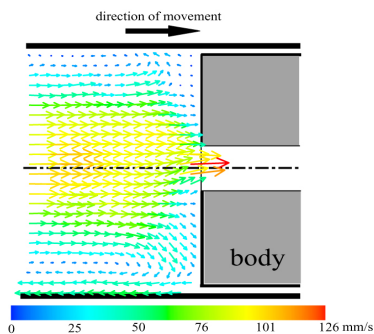


図 14 流速ベクトル線図実験結果 (Re ≈ 100, バイパス有)

最後に、3 両連結の相似模型が管内を通過時におけるディスクにかかる圧力の時刻歴を図 15, 16 に示す。バイパスホールがある場合、先頭のディスク

に全圧がかかっていることが分かり、フロントドライブ効果を確認した。

しかし、バイパスホールがない場合、圧力が各ディスクでもれていることが分かる。これよりディスクと管壁との隙間は流体潤滑であると考えられる。

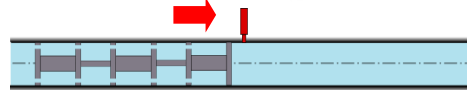
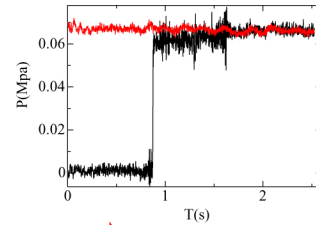


図 15 圧力の時刻歴 (バイパスホール有, Re=12000)

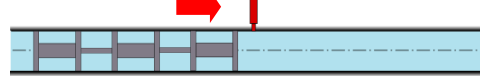
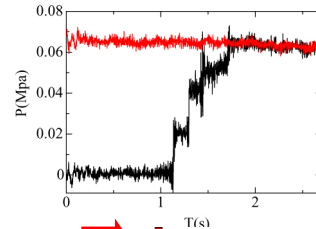


図 16 圧力の時刻歴 (バイパスホール無し, Re=12000)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

(1) Toru Maeda, Akihiro Sato, Tatsuya Otsuka, Masatsugu Yoshizawa, DYNAMICS OF A MOVING BODY WITH THE HOLE IN ITS CENTER AND CHARACTERISTICS OF FLUID FLOW IN A SMALL DIAMETER TUBE, American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 2009, Lake Buena Vista Florida USA

(2) Tatsuya Otsuka, Daichi Ishii, Toru Maeda, Masatsugu Yoshizawa, TRANSIENT MOTION OF A RIGID BODY THROUGH A NARROW TUBE AND CHARACTERISTICS OF SURROUNDING FLUID FLOW

, American Society of Mechanical Engineers  
International Mechanical Engineering  
Congress and Exposition, November 3 2008,  
Boston, Massachusetts, USA.

(3) 大塚 達也、横山 亮太、長澤 潔、吉沢 正  
紹、細管内を移動する球の運動に及ぼす管壁  
の効果、日本機械学会 **Dynamics and Design  
Conference 2008**、2008 年 9 月 5 日  
、慶應義塾大学日吉キャンパス

(4) 前田 徹、竹間 克俊、長澤 潔、吉沢 正  
紹、狭い管路内に弾性支持された円柱の渦励  
起振動(流路幅の影響)、2008 年度日本機械学  
会年次大会、2008 年 8 月 3 日、横浜国立大学

(5) 竹間 克俊、加藤 修一、前田 徹、吉沢 正  
紹、狭い管路内に弾性支持された円柱の横振  
動(流路幅が共振状態に与える影響)、日本機  
械学会第 20 回計算力学講演会、  
2007 年 11 月 27 日、同志社大学 京田辺キャン  
パス

(6) Daichi Ishii, Kohei Aratake, Tatsuya  
Otsuka, Masatsugu Yoshizawa, CHARACTER-  
ISTICS OF FLUID FLOW BETWEEN SINGLE RIGID  
BODY AND WALL OF SMALL-DIAMETER TUBE, 2007  
American Society of Mechanical Engineers  
International Mechanical Engineering  
Congress and Exposition, November 14 2007,  
Seattle, Washington, USA

(7) 石井 大地、荒武 紘平、大塚 達也、吉  
沢 正紹、細長い流体管路内を移動する物体  
周りの流れ場の基礎的検討、日本機械学会関  
東支部第 31 期総会・講演会・懇談会、2007  
年 3 月 15 日 宇都宮大学 峰キャンパス

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉沢 正紹 (YOSHIZAWA MASATSUGU)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号：10095664

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし