

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560162

研究課題名（和文） 面積式新型ガス浮遊炉の開発

研究課題名（英文） Development of a New Type of Gas Flow Levitation Furnace

研究代表者

大島 修造（OSHIMA SHUZO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20143670

研究成果の概要：

本研究では、面積式流量計のように拡がり角を小さくして浮揚力を高めた新型ガス浮遊炉の開発を目指した。ガス浮遊炉のシミュレーションを行い、浮遊炉の側壁の拡がり角によって浮遊体に作用する抗力は大きく変化し、拡がり角が小さくなるほど抗力が大きくなることが明らかになった。拡がり角が大きい場合には抗力は小さいものの流れ場は安定しており、拡がり角を小さくしていくと流れ場が一旦非定常になり不安定になるが、さらに拡がり角を小さくしていくと、再度、流れ場が定常になり安定化することを見出した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
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・流体力学

キーワード：1)浮遊炉 2)面積式流量計 3)新素材 4)抗力 5)テーパ管 6)シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 浮遊炉の必要性

超高純度ガラスや半導体、新しい金属材料などの製造過程において、試料をるつぼ内で溶解する際、るつぼとの接触によって不純物の混入（コンタミネーション）が生じる。しかし、浮遊炉を使用し試料を浮かせレーザーなどで加熱することによって熔融後、冷却凝固させる、地上でも容易に純粋な物質や新素材を生成することができることから、宇宙実験に限らず、世界中でその開発・改良が進め

られている。浮遊炉は次の5つに大別される。各炉の特徴と現状について概説する。

## (2) 各種浮遊炉の特徴（長所・短所）

i) 超音波浮遊炉：超音波の音圧によって試料の位置制御を行う。材料を問わず様々な物質の試料を浮遊させることができる。大塚ら（2005年）は超音波により、厚さ1mm、直径5mmの水を浮遊させているが、より大きくすると液滴は音圧により飛散することが判っている。音波を使った無重力化での試料の位

置制御は 1980 年代後半から前半にかけて NASA によって行われ、日本も音波浮遊装置を開発し 1992 年毛利衛さんの初のスペースシャトル搭乗時に実験を行ったものの、残念ながら失敗したのは周知の事実である。

ii) 電磁浮遊炉：電磁力によって試料の位置制御を行なうもので、他の手法に対して浮揚力が大きく、位置制御が比較的簡単である。1997 年ドイツがスペースシャトルで浮遊実験を成功させている。近年 50kg を越える熔融金属の地上での完全浮遊が実現しており、ほぼ実用された炉である。しかし材料は金属性のものに限られ、熔融試料に与える擾乱が大きいなどの欠点がある。

iii) 静電浮遊炉：試料を紫外線などによって帯電させ、静電気力によって位置制御を行う。金属以外にもセラミックスなどの絶縁体も浮遊が可能である。常温では試料に与える擾乱が小さいことが特徴。磁場でいう吸引式リニアモーターカーのように基本的に不安定で、制御が必要である。一般に位置制御が難しく、特に試料が熔融した際に電荷が減少し制御が困難になるという欠点がある。地上での、現在の試料の大きさは直径 1～2mm 程度である。近年 JAXA が国際宇宙ステーション用のもの開発中である。

iv) 磁化力浮遊炉：磁化力によって浮遊させ位置制御を行う。浮揚力が小さく、非常に大きな磁力が必要。1992 年フランスの Beaugnon らが水、エタノールやプラスチックなどの常磁性体浮上に成功し、わが国においても茂木らガラスの浮揚・溶解・凝固に成功している。欠点は非常に強力なハイブリッド超伝導磁石を必要とすることである。

v) 従来型ガス浮遊炉：ガスを吹き付けることによって試料の位置制御を行う。材料を問わず浮遊させることができる。現在直径 1.5mm 程度のバルクガラスが合成されている(2006 年)。従来型ガス浮遊炉の欠点は、液滴を大きくするとガスにより試料が回転・変形するなど、位置制御が困難になることである。

### (3) 本研究で開発する新型ガス浮遊炉の特徴

従来型ガス浮遊炉においては、ガス噴流中に置かれた浮遊対象液滴の抗力を利用して浮遊させており浮遊重量は小さく、大きな試料は得られなかった。これに対して、本研究で開発する新型ガス浮遊炉は、面積式流量計におけるフロートのように、テーパ管内に浮遊対象液滴を挿入し、液滴挿入に伴って発生する大きな差圧を利用して浮遊させるものである。面積式流量計では、フロートに比較的大きな金属球やガラス球が用いられており、テーパ管内で安定的に浮遊することは周知の事実である。本研究では固体球ではなく、同一原理にて液滴を浮遊させるものであり、従

来型ガス浮遊炉に比べ、ガス流量による浮遊位置の制御が容易で、より大きな試料が得られるものと推測された。

## 2. 研究の目的

金属の浮遊に対して有効な電磁浮遊炉を除いて従来の浮遊炉ではセラミックスなどの非導電性の大きな熔融試料の浮遊が困難である。一方、宇宙空間では大きな新素材の開発を目指した浮遊実験が行われているがコストは高く利便性は極めて低いため、地上で実験可能な装置の開発がマテリアルプロセス分野で大きな関心を集めている。そこで本研究では大きな熔融試料の浮遊を可能にする新型ガス浮遊炉の開発めざし、テーパ角度が浮遊体の効力に及ぼす影響や浮遊体周りの流れ場に及ぼす変化など基礎的な知見を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究ではガス浮遊炉の二次元数値解析を行う上で、試料を 2 次元円柱とモデル化し変形しないものとする。円柱に働く効力や流れ場を求める。その際計算格子に時間を要せず、汎用性が高くプログラムが容易で、かつ 3 次元解析へと拡張しやすい直交格子を使用する。

そこでガス浮遊炉の壁面形状や流入噴流速度などが、流れ場や物体に働く効力や揚力にどれだけ影響を及ぼすかを考察するのが目的である本研究では、熔融物体を円柱とモデル化した。

物体周りの流れ解析に関して、カットセル法や境界埋め込み法などの手法が考えられるがカットセルおよびセル結合法では、セルと物体境界によって横切られるすべてのケースを判別することで物体境界を厳密に扱うが、境界形状や有限体積評価をするために計算コストや計算時間を要してしまう。

一方、境界埋め込み法では、境界条件を満足させるように外力を Navier-Stokes 方程式に加えているが、この外力が時間微分によって表現されているため、時間刻み幅を大きく取れないという点、および壁面ですべりなし境界条件を満足させるため、物体内部の速度定義点に内挿処理をほどこすことによって、物体境界セルでは連続の式が満たされないという点から、全体的に連続の式の誤差が大きいという欠点がある。

そこで、本研究では計算コストが小さく、またプログラミングも容易であり、汎用性が高いというメリットが特徴の、境界までの距離を含む差分スキームで解析を行った。なお圧力は Fractional Step 法により陰的に離散化し、また拡散数制限を回避するため、拡散項の中心点も陰的に取り扱った。

#### 4. 研究成果

本研究では円柱の直径を代表長さ  $L$  にとり、流入口における一様流速を代表長さ  $U$  としている。レイノルズ数  $Re$ 、および浮遊路の形状や設定に関しては既存の研究の実験値を参考に決定した。一般的にガス浮遊炉では  $Ar$  ガスや  $He$  ガス、乾燥空気が使用されており、本研究では流入口で流入させるガスとして  $Ar$  ガスを選択し、浮遊炉解析モデルおよび、 $Ar$  ガスの物性値、試料直径などの解析条件を図 1 および表 1 に示す。

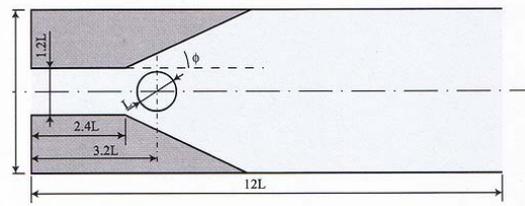


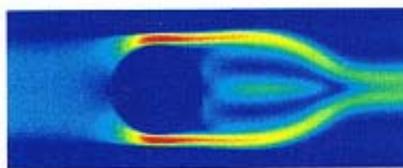
図 1 ガス浮遊炉解析モデル

表 1 解析条件

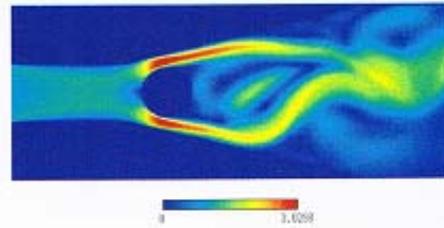
円柱直径: $L$	6.00 [mm]
流入速度: $U$	3.96 [m/s]
密度: $\rho_{Ar}$	1.78 [kg/m <sup>3</sup> ]
粘性係数: $\mu_{Ar}$	$2.12 \times 10^{-5}$ [Pa $\cdot$ s]
格子数	800 $\times$ 240
時間刻み幅: $\Delta t$	$1.50 \times 10^{-3}$
レイノルズ数: $Re$	200, 2000

##### (1) 広がり角が流れ場に及ぼす影響

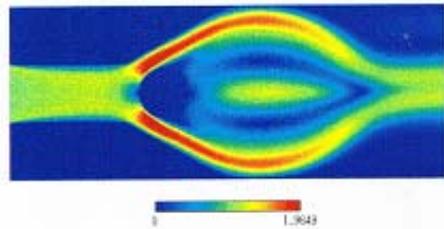
図 2 のように  $\phi = 15^\circ$  でカルマン渦列が放出されたが、 $\phi = 30^\circ$  以上になると流れがディフューザ入り口で剥離し安定した流れになるのに対し、 $\phi = 10^\circ$  では流路の閉塞に伴い境界層が薄くなることで剥離点が円柱後方に移動して、剥離した後緩やかな流路面積の変化によって、壁面に沿うような流れとなることで渦放出は見られず、安定した流れになった。このことより、面積式流量計のように、広がり角が小さな場合にも安定浮遊が実現できることが明らかになった。



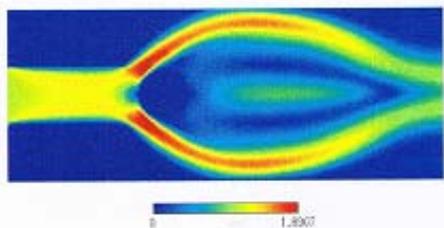
(a)  $\phi = 10^\circ$



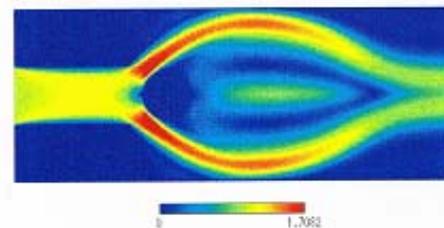
(b)  $\phi = 15^\circ$



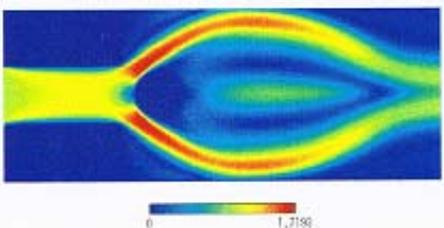
(c)  $\phi = 30^\circ$



(d)  $\phi = 45^\circ$



(e)  $\phi = 60^\circ$



(f)  $\phi = 80^\circ$

図 2 広がり角が流れ場に及ぼす影響  
 $Re = 200$

(2) 広がり角が圧力分布に及ぼす影響

図3に  $Re = 200$  の場合の円柱表面の圧力分布を示す。 $\phi = 15^\circ$  では側壁の影響を大きく受け剥離点も後方に移動し、それによって物体表面の圧力降下も大きくなっている。一方、 $15^\circ$  よりも大きな値では  $30^\circ$  で若干壁面の影響による圧力降下が見られるものの、ほとんど同じ点で流れが剥離することが明らかになった。

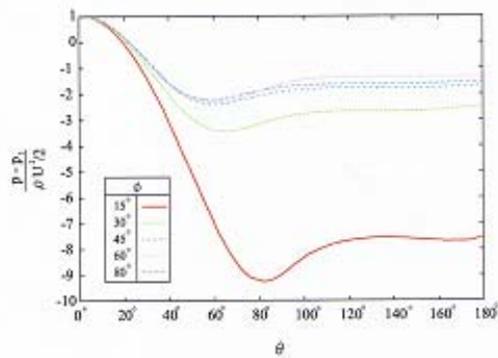


図3 物体表面の圧力分布

(3) 広がり角が抗力に及ぼす影響

図4に抗力係数の時間変化を示す。 $\phi = 10^\circ$  では側壁との距離が近いため、その値は他に比べて非常に大きくなっていることが確認できる。 $\phi = 15^\circ$  では抗力の波形が乱れているがこれは渦放出に起因している。これらより、 $\phi = 10^\circ$  以下にすると浮揚力が格段に大きくなることが明らかになった。

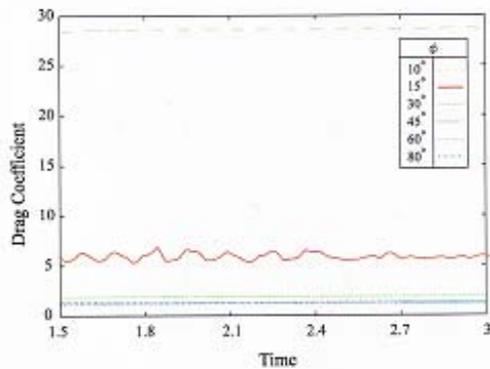
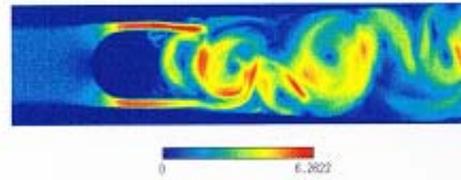


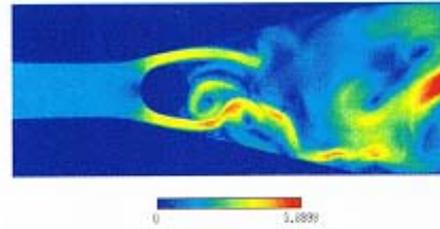
図4 抗力係数

(4) レイノルズ数の影響

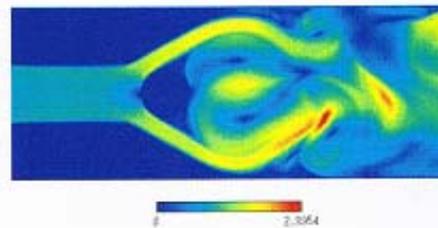
高レイノルズ数ではいずれの角度においてもディフューザ部で流れが剥離した後、さまざまな渦を形成して流れが非定常に変化している。抗力係数の時間変化を調べた結果、 $Re = 200$  の場合と同様、 $\phi = 10^\circ$  の場合に最も抗力が大きく比較的安定していることがわかった。レイノルズ数が大きくなると安定浮遊には広がり角をより小さくする必要があることが明らかになった。



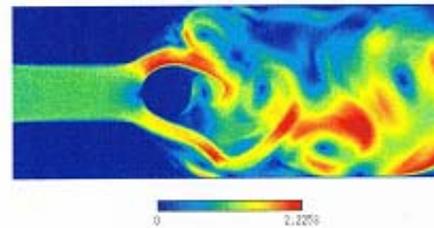
(a)  $\phi = 10^\circ$



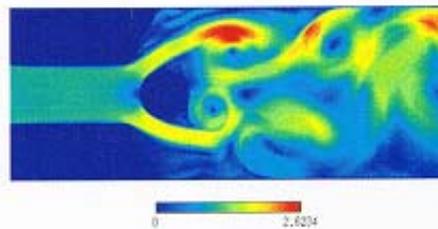
(b)  $\phi = 15^\circ$



(c)  $\phi = 30^\circ$



(d)  $\phi = 45^\circ$



(e)  $\phi = 60^\circ$

図5 広がり角が流れ場に及ぼす影響  
 $Re = 2000$

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)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

大島 修造 (OSHIMA SHUZO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20143670

(2)研究分担者

福島 直人 (HUKUSHIMA NAOTO)

東京工業大学・イノベーション研究推進体・

特任教授

研究者番号：90420299

(3)連携研究者

なし