

試料のガス浮遊実験

宇宙開発事業団
日本電気株式会社

吉富 進 名木 稔 蛟島浩人
町田恒雄 田中清志
中村 新 石川佳寿子

大阪工業技術試験所

早川 惇二

1. 緒言

近年、材料実験やライフサイエンス実験など宇宙環境を利用したさまざまな実験が計画されているが、その中でも材料実験に関するテーマは多く、材料製造の研究・結晶成長に関する研究など多岐にわたっている。

試料を容器内で溶融・凝固させた場合、地上では容器から不純物が混入し高純度な物質が製造できない。そこで、微小重力環境下における浮遊効果を利用することにより、非接触で試料の溶融・凝固を行うことが試みられている。このような「無容器処理技術」は材料実験に欠かせない分野であり、これまでに静電浮遊、音波浮遊といった浮遊装置の開発が進められている。

本実験はHeガスを用いて気流による浮遊機構を開発し、無容器処理の実現性を確認することを目的としている。特徴としては、試料が導電性のものに限られる静電浮遊と異なり、この方法では対象とする試料がガラスやセラミックスなどの絶縁体である場合にも適用できる。また、音波浮遊に比べて装置自体が簡単で取り扱いやすいことなどが挙げられる。

また、本実験は、宇宙ステーション時代における宇宙環境利用技術基盤整備の一貫として開発された小型ロケット (TR-I A) 搭載用高温加熱装置の要素試作試験であり、航空機実験に先立ち、基礎データ取得のために地上実験による事前の条件設定を行い、1991年3月、航空機による微小重力実験を実施した。

本稿では、この航空機における試料のガス浮遊実験結果について述べる。

2. 実験方法

2. 1 実験項目

本実験では、マイクロコンピュータによりHeガス流速を調節して、試料の浮遊状態を観察した。実験に当たっては、以下の2つの項目を検討した。

- ① Heガス吹き出し口形状
- ② Heガスの流量

2. 2 試料の仕様

小型ロケットでの実験においては、試料としてガラス ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CoO}$) を使用する。今回の実験では、ロケットでの微小重力環境下における試料の比重を、航空機で得られる微小重力環境下における比重に揃えるため、発砲スチロール (直径10mmの球で内側がくり抜いてある。重さ0.05g) を用いた。

2. 3 実験条件

実験条件を以下に示す。

- ① 試料部 / 温度 : 常温
- ② Heガス 純度 : 99.999 %
流量 : 0.1 ~ 5.0 l/min
圧力 : 1.0 ~ 1.2 kg/cm²g
- ③ 吹き出し口形状 : 6パターン (3.2項参照)

3. 実験装置

3.1 実験装置の構成

本実験装置の系統図を図1に示す。

実験装置は (1) 試料部、(2) Heガス供給部、(3) 観察記録系に分けられる。

(1) 試料部

試料部の構成図を図2に示す。

試料部は、高温加熱装置内のイメージ炉への搭載を想定した構造になっており、石英管内の上下にHeガスを吹き出すノズルを設け、試料を浮遊させる構造になっている。

(2) Heガス供給部

Heガスは3.4リットルのボンベから供給され、流量をマスフローコントローラにより制御し、試料部に供給される。

(3) 観察記録系

試料の浮遊状況はCCDカメラで2方向から観察され、ビデオに記録される。また、実験装置の後方からスチルカメラにより静止画が収録される。Heガス圧及び試料部温度についてはマイクロプロセッサにより測定、記録される。

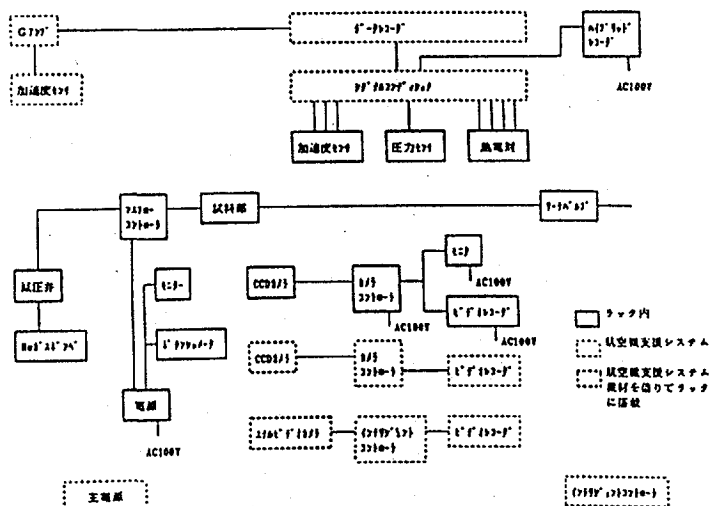


図1 実験装置系統図

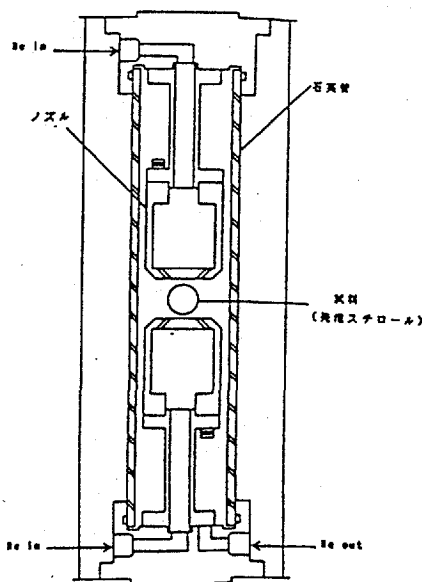
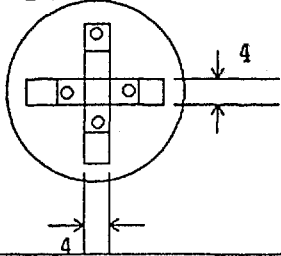
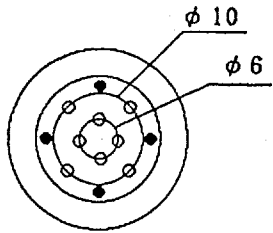
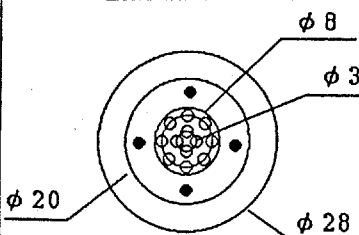
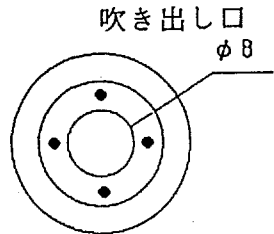
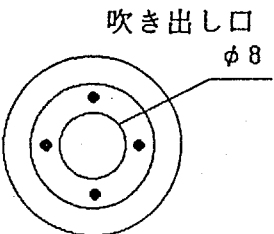
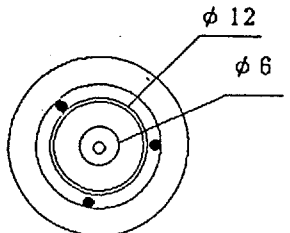


図2 試料部構成図

3.2 ノズルの形状

ノズルの形状及び特徴を図3に示す。

ノズル番号	吹き出し口形状	特徴
1		上下各4方向から試料の中心を狙ってガスを吹き付けるタイプである。
2		上下各4つの穴から試料の中心を狙うとともに外側の8つ穴で吹き上げるタイプである。
3		間接的に試料を包み込むようにガスを吹き付けるタイプで内側の4つ穴が試料の表面に向かって、さらに外側の8つ穴が垂直に空けてある。
4 A		試料の直径よりやや小さい径の単一孔を空け、直接ガスを吹きつけるタイプで上下のノズルの間隔が16mmである。
4 B		ノズルの形状は4 Aと同タイプで、上下のノズルの間隔が9mmである。
5		単一孔からのガス流を平行にするリングを取り付けたタイプである。

○ 吹き出し口 (φ 1)

● 支持棒

図3 ノズルの形状及び特徴

4. 実験結果

航空機実験は、MU-300型の航空機において6フライト行われ、それぞれ9回～10回のパラボリックフライトが実施された。本実験では、その1フライトに対して1つのノズルを割り当て、Heガス流速を変えて、試料の浮遊状態を観察した。

実験結果をノズル番号順に表1に示す。また、図4に航空機実験重力環境（Gレベル）の経時変化、図5～7にノズル2、ノズル4B、ノズル5それぞれの場合における試料の浮遊状態を示す。

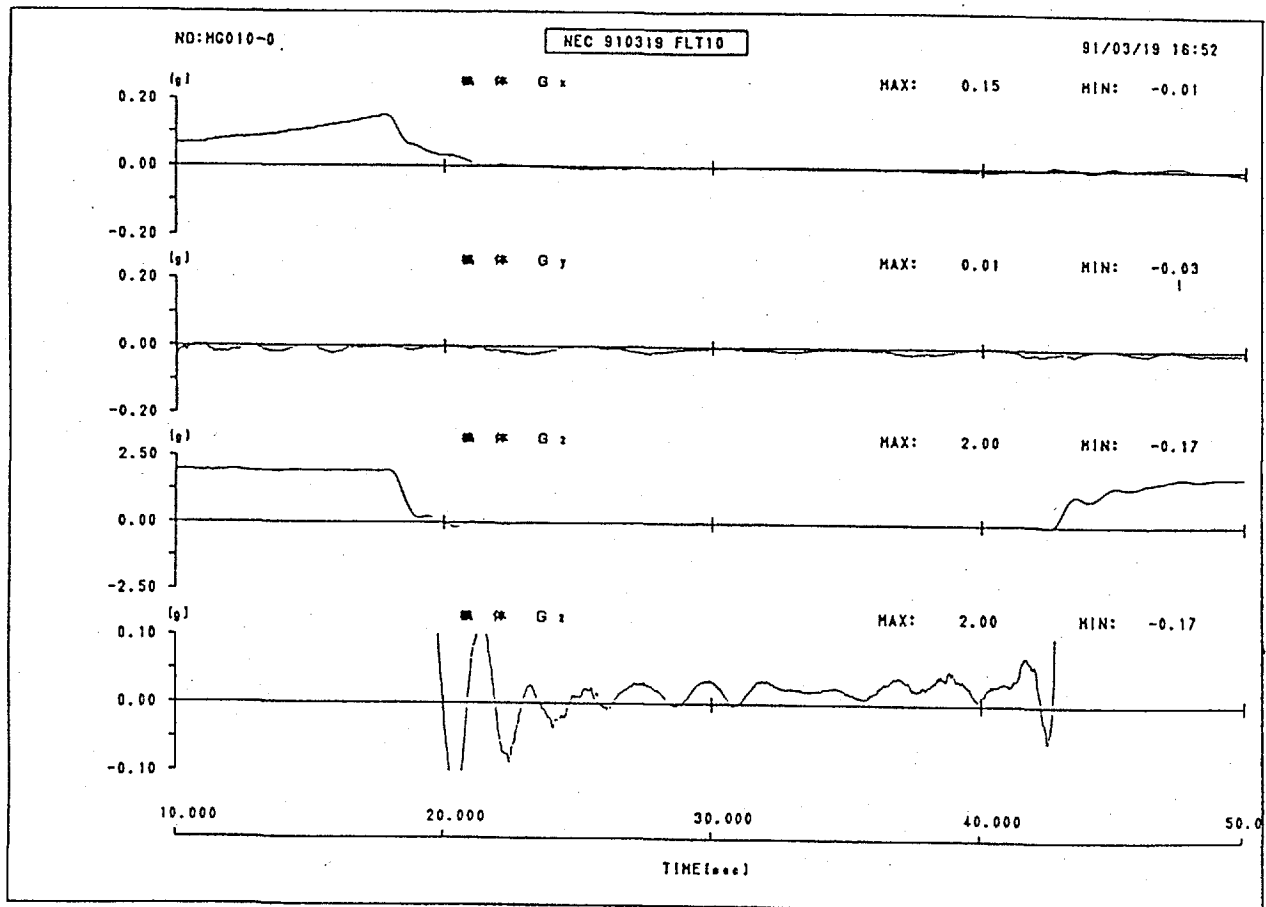


図4 Gレベルの経時変化

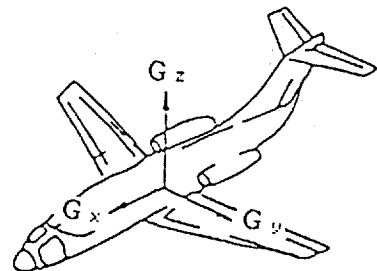
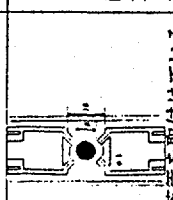
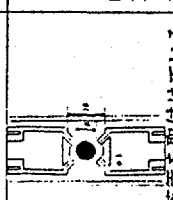
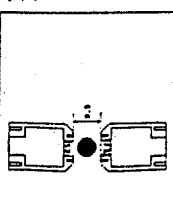
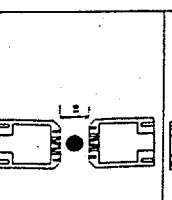
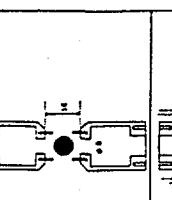
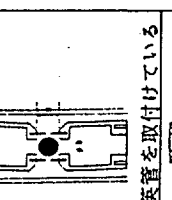
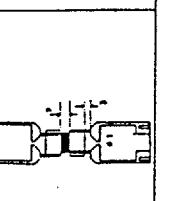


表1 ノズル別浮遊状況

番号	吹き出し口形状 	試料 発泡 スチロール 直径 10mm 重量 0.05g ※内側が 空洞になっ ている。	Heガス圧力 (Kg/cm ²) 試料部内 温度 (°C)	試料の浮遊状態							機体G値		
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	Max. Gx Min.
1			0.92 20	動かない									
				ノズルに触れながら浮遊									
				-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
2			0.92 18	ノズルに触れながら浮遊									
				ノズルに触れながら浮遊									
				-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3			0.89 15	浮遊しない							浮遊するがノズルに接触		
				浮遊しない							浮遊するがノズルに接触		
				0.03	-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01
4A			0.93 18	上下のノズルに交互に接触しながら浮遊									
				上下のノズルに交互に接触しながら浮遊									
				-0.01	-0.01	-0.02	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
4B			0.90 21	Gの変化に影響される							Gの変化に影響されない		
				上下のノズルに接触しながら片側に寄って浮遊							上下のノズルに接触しながら片側に寄って浮遊		
				-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.01	-0.01
5			0.92 19	浮遊しない							リングに触れたまま浮遊		
				浮遊しない							リングに触れたまま浮遊		
				-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01

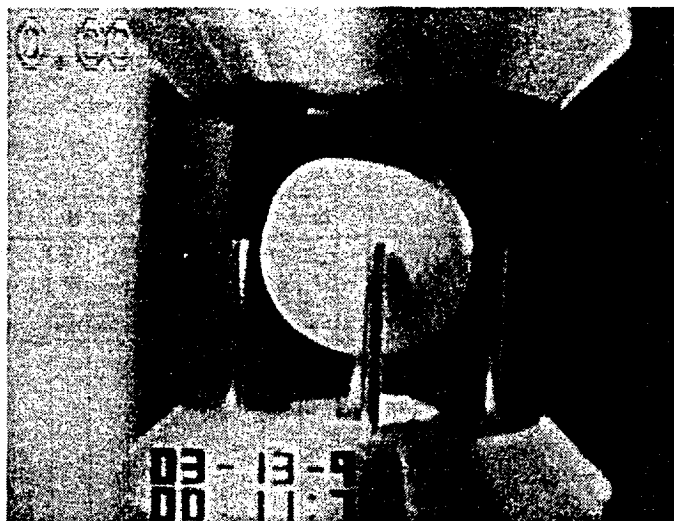


図5 試料の浮遊状態（ノズル2、Heガス流量:2.0 l/minの場合）

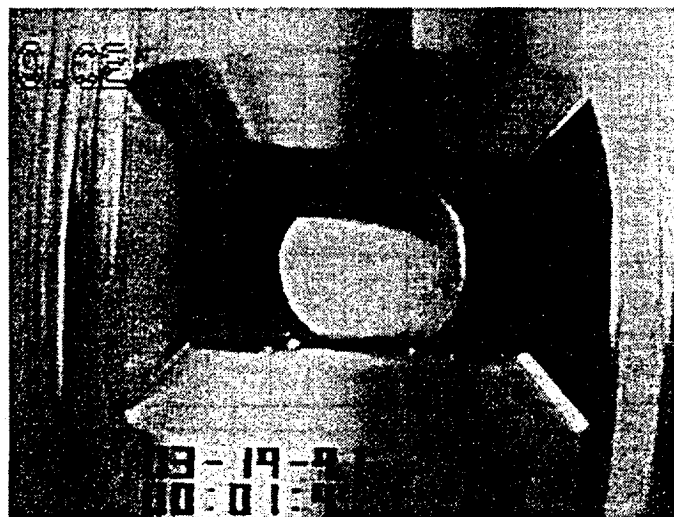


図6 試料の浮遊状態（ノズル4 B、Heガス流量:0.5 l/minの場合）

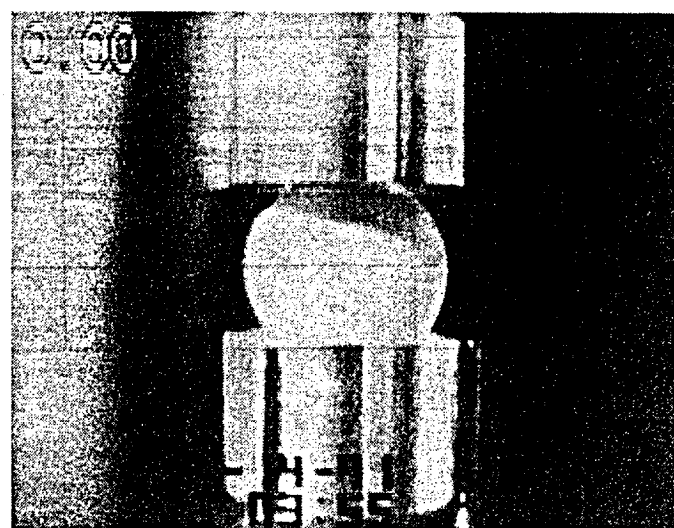


図7 試料の浮遊状態（ノズル5、Heガス流量:3.0 l/minの場合）

5. 考察

地上実験においては、ノズル2とノズル3を用いた場合が比較的低流量から試料を浮かすことができた。この傾向は航空機実験の結果にも現れており、それらのノズルが比較的低流量で試料を浮遊させることができています。これまで、浮遊の予測流量については、ノズル1及びノズル5が低いと予想していたが、結果は必ずしもそうはならなかった。

以下、それぞれのノズルについて浮遊状況を示す。

ノズル1においては浮遊が得られなかったが、これは上下部ノズルから吹き出される加圧ガスの圧力が、試料の浮遊位置において、ちょうどバランスを保つように設計されているが、このバランスがくずれると浮遊させることができなくなるためと考えられる。

ノズル2の場合は、試料の中心に向かって直接ガス流を吹き付けるタイプである。また、ノズル3の場合は、間接的に試料を包み込む様にガス流を吹き付けるタイプである。実験結果は、直接ガスを吹き付けるノズル2の方が低流量から浮遊できている。また、安定度においてもノズル2の方がよかった。

ノズル4 A・Bは、同じ形状で上下ノズルの間隔を変えて実験したが、両者とも比較的低流量から浮遊した。浮遊前、試料はノズルの吹き出し口をふさいだ状態となっている。このため、ガスが吹き出すまでは試料に作用する力が大きく、微小重力環境では、この力が浮遊を起こすきっかけになると考えられる。

ノズル4 Aの場合には、上下のノズルの間隔が大きく、このため試料は安定な位置を見つけれずに、上下のノズル間を往復運動した。この間隔を小さくしたノズル4 Bの場合には、上下ノズルからのHeガスに強制的に押されるので接触しながらも浮遊できたと考えられる。接触しながら浮遊している点では、ノズル2及びノズル5の場合と結果は似ているが、ノズル4 Bの場合の方がより低流量で浮遊させることができる。

ノズル5は、1gの環境下で試料を浮遊させることができるノズルだった。このノズルは単一孔からのガス流を平行にするリングが取り付けられている。このリングが試料よりわずかに大きいため、リングに落ち込んだ状態で位置を保って浮遊させることが可能であった。しかし、微小重力環境では、試料が上下リングに接触して安定な位置に留まってしまった。これは、航空機のX、Y方向の加速度によりリングに触れてしまう結果になったと考えられる。

本実験結果から、ノズル2及び4の形状が浮遊に関しては良好と思われる。

一方、試料の溶融・凝固のプロセスという観点からはガス流量の最小化が必要である。地上試験での試料の溶融においては、空気による自然対流冷却が起こり、溶融が抑制される。ガス浮遊においても同様に、ガスによる強制対流が発生し溶融が大きく抑制されるため、Heガス流量を最小化することにより、冷却量を地上での値以下にしておく必要がある。

そこで、もっとも低流量で浮遊できるノズル4 Bの場合について試料溶融の可能性を検討する。地上において試料の浮遊が達成できる最低流量を0.5～1.0 l/min とすると、ガラス球をロケットの微小重力環境下で浮遊させるためのノズル付近のHeガス流速は、0.2～0.3 m/s と計算される。

このときの空冷量およびHeガスによる冷却量の検討を以下に示す。

①自然対流による空冷量の検討

自然対流による伝熱係数 h は

$$h = k (GrPr)^n \quad (*)$$

で表される。ここで、 Gr はグラスホフ数、 Pr はプラントル数を表す。

さらに、グラスホフ数とプラントル数の積は

$$GrPr = \rho^2 \beta C_p g \Delta T L^3 / (\mu k)$$

と表され、 ρ は密度、 β は体膨張係数、 C_p は比熱、 g は重力加速度、 ΔT は温度差、 L は流れの長さ、 μ は粘度、 k は熱伝導率を表す。

また、1気圧、20℃のときの空気の物性値は、

$$\begin{aligned} \rho &= 1.20 \text{ kg/m}^3 & \beta &= 1/T_\infty = 1/293 \text{ K}^{-1} \\ C_p &= 1.00 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} & \mu &= 18.17 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s} \\ k &= 25.63 \times 10^{-3} \text{ W/m}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

である。

そこで、流れの長さを直径10mmのガラス球の半周 $L = 10 \times 10^{-3} \pi / 2 \text{ m}$ 、ガラス球の温度を1000℃とすると、

$$GrPr = 397.50$$

となる。

このとき、式(*)は

$$h = C \cdot k' (GrPr)^{1/4} / L$$

となり、 C は系の幾何から0.63となる。

また、 k' は $(293 + 1273) / 2$ ℃での値をとるので、

$k' = 39.51 \times 10^{-3} \text{ W/m}\cdot\text{K}$ を上式に代入すると、

$$h = 39.79 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

したがって、空冷量 Q は

$$Q = h A \Delta T = 12.25 \text{ W}$$

と求まる。

②Heガスによる冷却量の検討

Heガスによる対流の伝熱係数 h は

$$h = C_p U_\infty \rho_\infty \left(\frac{2.2}{Re} + \frac{0.48}{Re^{0.5}} \right)$$

で表される。ここで、 Re はレイノルズ数で

$$Re = U_\infty \rho D / \mu$$

と表される。

そこで、 $U_\infty = 0.3 \text{ m/s}$ のとき、Heガス吹き出し口直径を $D = 8 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、 $C_p = 5.19 \times 10^3 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$ 、 $\mu = 19.93 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ とすると

$$Re = 21.3$$

$$h = 57.1$$

となる。したがって、Heガスによる冷却量は

$$Q = 8.79 \text{ W}$$

と求まり、自然対流による冷却量より小さくなることから、安定した浮遊状態において試料の溶融は可能であることが予想される。

6. 結言

Heガスを用いた浮遊装置を試作し、航空機による微小重力環境下において、試料の無容器処理の実現性を確認した。

今回の航空機実験では、ノズル形状が4番目(図3参照)のものが、上下のノズルに衝突し振動しながらも、比較的低流量から試料を浮遊させることが確認できた。

今後、実験の目的である位置を制御し、非接触浮遊を実現させるためには以下の点をさらに検討する必要がある。

(1) 今回は上下2方向から気流によって位置を制御したが、横方向(G_x 、 G_y 方向)の外力に対しては弱い方式となっている。それに加えて、航空機の横方向(G_x 、 G_y 方向)の外力が大きいので、より詳細な検討のためには落下塔等のGレベルの良い環境において検証する必要がある。

(2) 上下のノズルの対称性に関しても精度が要求されるため、非対称ノズルを含めたより詳細な検討が必要である。

上記検証のためには新ノズルの検討及び落下塔等での実験を今後行っていくが必要があると考えられる。

参考文献

1. Robert R. McMurchy, Robert G. Payne, Robert L. Dotts,
THERMAL NETWORK MODELING HANDBOOK, January 1972