



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-06-039

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

ISS 科学プロジェクト室研究報告書

「準安定相材料及び凝固研究に利用するガス浮遊炉の開発」

荒井 康智, 余野 建定, 増野 敦信

2007年 3 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

準安定相材料及び凝固研究に利用するガス浮遊炉の開発

荒井 康智*, 余野 建定*, 増野 敦信*

Development of an aerodynamic levitation system

By

Yasutomo ARAI*, Jianding YU*, and Atsunobu MASUNO*

Abstract: This Annual Report presents a summary of developments of an aerodynamic levitation method since 1997. That has been contributed in the area of metastable phase research. This paper describes criteria development of a separate type gas-nozzle and standard type gas-nozzle. The former nozzle was for microgravity combined with drop tube and the later are to form a ball-shaped single crystal of oxides.

Key words: 準安定相, 球状単結晶, ガス浮遊炉, ガラス

概 要

本アニュアルレポートは、JAXA の前身である NASDA から実施されていたガス浮遊炉開発成果の纏めである。この報告では、主として技術的な観点から、ガス浮遊炉作製の開発基準と構成システムについて解説する。さらに、ガス浮遊炉を利用した画期的な結晶育成手法の詳細、及び浮遊結晶試料の回転制御について得られた結果を纏める。最後に、これまでに浮遊溶解に成功した材料の一覧を示す。

第 1 章 はじめに

本報告は、最も簡易的な浮遊法であるガス浮遊法の開発結果について纏める。JAXA では、その前身の一つである NASDA の時代から静電浮遊法を中心とした浮遊技術とそれを利用した物性研究を実施している。この静電浮遊法は、上下電極円盤の間に熔融試料を浮遊させ、粘性、密度等多くの物性を計測できる優れた装置である。しかし、電圧印加のアンブや試料位置検出機構等の機器が必要になると同時に、一般的に浮遊溶解させることは容易ではない。これを補うために、シンプルな構造のガス浮遊法は過熱物性計測以外でも広く利用されている。

ガス浮遊法は、図 1 に示すノズルとガスを送る流量調整機器で組み立てられるシンプルな浮遊法で、試料はノズルの diffuser 部にトラップされレーザーなどの非接触加熱により溶解される。このガス浮遊法のメリットとデメリットについて紹介したい。この浮遊法がシンプルである最大の理由は、浮遊試料の位置を制御するフィードバック機構が不要であることである。しかし、課題もある。試料中では、ガスが吹き付けられる部分と加熱用レーザーが照射される部分の温度差が激しく、ノズル中に試料を浮かせるため、背景光を利用した試料直径の観察できない。物性計測への

* 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 ISS 科学プロジェクト室 (JAXA ISAS ISS Science Project Office)

応用から、ガス浮遊の技術的なシンプルさを維持したまま、これらのデメリットを克服するために多くの努力がなされている。温度差の問題については、上下方向からの加熱により温度均一性を確保する方法¹⁾、試料自体の回転により温度差を減少させる方法²⁾等がある。これまでの技術開発の体系は、静電浮遊法が得意とする過冷物性の精密計測を簡易に実施する事が目標であった。本開発では方向性を変えて、ガラス材料の合成や過冷状態からの準安定相合成など材料合成を目標として開発を実施した。

これまでに、材料合成に関して浮遊法が提供する技術は、1. ガラス合成³⁾、2. 過冷度を制御した金属試料をコイルから落下させ急冷⁴⁾、また音波-Aerodynamic 浮遊法では、試料をピストンで急冷⁵⁾、3. 過冷状態にある浮遊試料をニードルで刺激し凝固。4. 滴下法で試料を自由落下させる方法である。

したがって、酸化物材料を対象とした無容器実験を短時間微小重力利用へ展開するための技術課題として、2.及び4.項を進展させ、滴下法では不可能な溶融試料の過冷度を制御し静的に落下させる手法の開発を第一の目標とした。第二の目標は、無容器実験の寄与できる新たな領域開拓。第三の目標は、材料合成システムとしての完成度を高める為に、準安定相合成研究からの要請であるバルク材料の単時間合成とした。この準安定相材料の探索は、系統的に組成や元素を変える手法が有効であるが、ローラー急冷やその他の非平衡合成法では、均一状態のバルク材料を得る事は困難である。従って、極端な例として中性子構造解析のように数cc（直径2mm程度のガラス球では、5-6百個にもなる）単位 of 材料が必要な実験は、基礎的な実験項目であるが現実的ではない。これらの課題に対して無容器法が技術的解決策を見出せば、材料研究が飛躍的に発展する事が十分期待される。

ガス浮遊法は最も簡便な浮遊法であるが、システム構築は必ずしも簡単ではない。本報告が、手早くシステムを立ち上げ、材料自体の研究に一刻も早く取り掛かれる一助となれば幸いである。第2章において、既に解決した第一と第二目標の概略と開発基準について解説し、新たな実験結果と将来の課題を記す。第3章では、第三の目標のためのガス浮遊システムのデザインを解説し、第4章ではこれまでにガス浮遊溶解させた材料リストをまとめた。

第2章 自由落下用ガス浮遊炉

2-1. 分離式ガスノズルの開発²⁾

主な結果については、論文として報告している。はじめに結果を要約する。第一目標であった、過冷度を制御し且つ自由落下させる方法は、ガス浮遊ノズル中心から分割することで、試料を落下させる手法を選択した（図2）。また、温度差を解消する一手法として、試料を水平軸上に回転させ、試料の鉛直上方からレーザーで照射される部分とガスで冷却される部分の温度差を緩和する方法を提案した。これは、ガスノズルを鉛直方向から傾けることにより、試料とノズル壁との距離を非対称として気流の速度を変え、マグナス効果により試料を回転させることで達成させた。このノズルの tilt 効果による試料回転数は、試料の回転数が増加すると遠心力により溶融試料の形状が楕円形に変形するため、傾き角と変形率からその回転数を見積もった。また、固体球状試料を大気中で8000(mm)の距離を自由落下させ、直径50mmの円内に落下させることが出来た。これにより、酸化物材料の短時間微小重力実験にとって最も重要なツールが得られた。全体のシステムを図3に示す。実験結果の詳細については論文を参考にされたい。

以下は、第一目標について、論文として纏める過程で得られた知見を紹介する。目標をクリアするには、ノズル内



図1. フローコントローラーとノズル

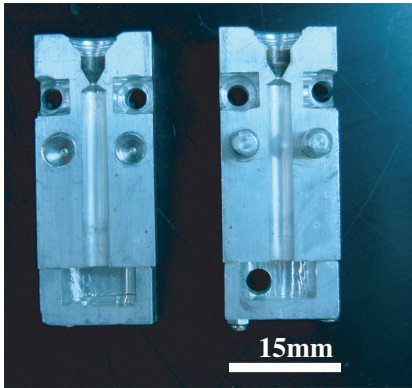


図 2. 分割式ノズル

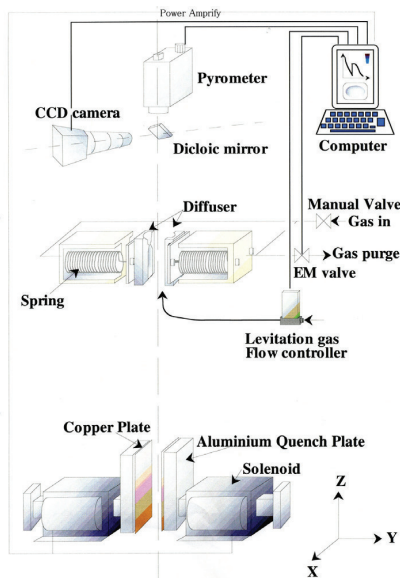


図 3. 落下システム

シリンジ配置して、これを 1.5 気圧程度に加圧して左右のばねを伸ばし、左右のノズルを密着させる。初速を決めるばねの伸びは、ばねの長さで調整した。ノズル開時に左右のノズルがずれて後退させないために、シリンジのピストン部のあそびを制御し、コーン状のピンとそれが入る穴を左右のノズルに作ってずれを防止した。この褶動初期のあそびが大きいと、落下初期の試料の軌道を変え、接触した場合には核生成を誘発する。また、長時間の溶融加熱実験中にノズルの温度が徐々に上昇し、気流を送り込むゴムホースが溶けないように、アルミノズルを水冷する機構も付加している。図 3 に示す機構は初期段階のもので、現在は電磁ソレノイドを利用して落下実験や急冷実験を実施している。しかし、ソレノイド型でも褶動初期の遊びを制御するには、銅の薄板などでピストンとソレノイドコイルの隙間を調節する必要があった。試料がノズルから浮揚している高さ、試料ノズルが開いたと同時に自由落下し始めると想定して、ピストン移動の初速と、褶動開始時の許される遊びを設定した。

分離式ノズル加工過程における基準を挙げる。第一にスロート部と diffuser 部の中心軸は、数十ミクロンずれても安定して浮遊しない。このずれは、diffuser 部の側壁にスロート部の穴を開けることになり、ここから吹き込む気流は、試料にノズル内壁を走り回らせるか斜め方向の上下運動をさせる。しかし、中心軸が一致し、半割りノズルの分割面がその軸と一致していれば、左右のノズルが 40 ミクロン程度の隙間があっても安定して浮遊した。従って、ノズルの各部位の中心軸を数十ミクロン以下の範囲で一致させることが最も重要である。また、加工傷を取るためにノズル内壁を研磨し平滑にすると、diffuser 部の対称性が悪化する場合がある。内壁の加工傷等は表面流の剥離を誘発しない程

でトラップされた浮遊溶融試料を、非接触のまま落下させる必要がある。これを実現するノズルは、2 種類考えられた。A 案は通常のノズル形状で、中央部のガス導入スロート部を通して試料を落下させる。B 案はノズルを分割開閉式にして、浮遊試料を落下させる、方法である。A 案は、スロート部の直径が標準的なノズルで 1 mm 程度であり、試料サイズをそれ以下とする必要がある。又、浮遊に失敗した原料はそのまま落下する。特に、試料サイズの制約に対して発展性を見出せなかった為、B 案を選択した。

分離式ガスノズルで解決すべき課題は、左右のノズルをピストン等に固定して開閉させた際、特にノズルが開いた瞬間に浮遊試料がノズル壁に接触しないことと、一旦開いたノズルを自動で閉じた際に、CCD カメラでは確認できない程度で元の位置に戻ることである。前者は落下中の過冷状態を維持するための必須条件であり、後者はレーザー照射位置、放射温度計の焦点、CCD カメラの観察位置、試料落下位置、急冷ローラー位置を毎回調整する手間を省き実験の再現性を確保するために必須である。特に双ローラー急冷では、対向したローラーの接触位置に試料が落ちなければ、毎回冷却プロセスが異なる危険性があり、自由落下実験でも落下管サイズを大きくせざるを得なくなる。

落下試料をノズルに接触させないためには、約 0.3 mm 上昇している直径 2 mm 試料がノズル壁に到達する前に、ノズルを 1 mm 以上真直ぐ後退させれば良いが、これに必要な初速は 1 m/s 程度である。ノズル開閉機構は、CKD 等のメーカーから販売されているフェザーハンドが一般的である。これらの製品は、把持力が数ニュートンあり非常に強く、位置決めに関する繰り返し精度は高い。しかし、最も重要な把持部の褶動初速と、左右ハンドが稼動する際のあそび等が不明であった為、初速、閉じる強さ、閉じた時の位置等を自由に調整できる空圧ピストンを自作した。概略を図 3 に示す。アルミ筐体胴体左右の引きばねでノズルを引っ張り、筐体中央部に内径 10 mm

度であれば手を加えない方がいい。また、ノズルの材質については、加工性は窒化ホウ素が優れているが、比熱が大きく熱伝導も悪いいためかノズルの温度が上昇しやすく冷めにくい。この為、一旦試料がノズル壁に接触すると良く濡れて剥がれ難い。ステンレスでも同様の傾向がみられた。従って、NASDAではノズル材料にアルミニウム合金を利用している。冗長ではあるが、ガス流量の制御は、フローコントローラーの利用を勧めたい。簡易なコンプレッサーによるガスの供給は、手軽ではあるが、流量が細かく変動していて、ノズル中でトラップされている浮遊試料も震え、試料のトラップが困難になる。

2-2. 無容器法が開く新しい材料研究⁶⁾ (本項の実験の一部は、科研費萌芽研究として実施した)

本項では、単結晶合成実験に関する成果と発展的な実験結果について報告する。まず、ガス浮遊法では球状単結晶を高速育成できる。その意義と背景および実験結果について概要を示す。ガス浮遊法のメリットは、1) 無容器処理による高融点材料合成、酸素雰囲気の利用、不純物混入抑制、凝固に際して試料自体の表面張力により直接球状試料が合成できる。2) 浮遊用ガスの冷却効果とレーザー局所加熱による試料中の大きな温度勾配 (約 1000 °C/cm, 直径 2 mm のサファイア(Al_2O_3)結晶育成実験) は、高速結晶育成と実効偏析係数が 1 に近づく事による均一組成高濃度イオン添加を可能とする。従来の無容器実験は、過冷却状態・非平衡凝固が主な研究対象で、試料中の温度均一性を技術的に達成しており、デメリットとして考えられていた温度勾配を積極的に利用し、この手法をバルク単結晶育成法として活用する試みは皆無であった。従って、本開発は分野横断的な独創的取り組みとして、光学単結晶のより容易且つ高速合成、より高濃度の不純物添加など、新しい研究を創出する可能性を十分期待させる。

実際に合成された結晶は、直径 2 mm 程度のサファイア単結晶である。結晶育成中の写真を図 4 に示す。結晶成長方向と結晶性は、背面および透過ラウエ法により、既製品の板状単結晶サファイアのラウエパターンと比較して同定を行なった結果、成長方向は c 軸であり、球状結晶は双晶もないことが分かった。なお、この試料の育成速度は 60 mm/h である。結果の詳細については、論文を参考にされたい。



図 4. 結晶育成中の写真

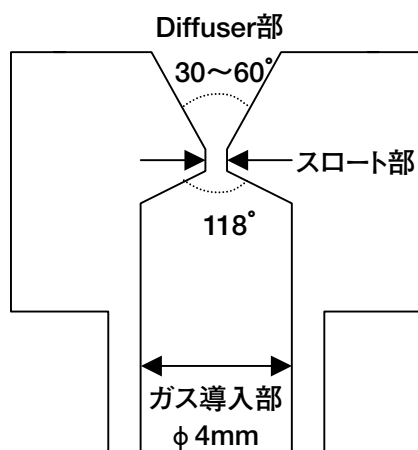


図 5. nozzle の概略

2-1.項と同様に、技術的な要点であるノズル形状や単結晶合成手順等の気付き事項、開発基準について紹介したい。まずノズル形状であるが、典型的な diffuser 部とスロート部からなるノズルを利用した。ノズルの形状は、実にさまざまであるが、加工のしやすさから考えると保守的な設計が最適と考えている。注意すべきはノズルの深さ (diffuser 部の深さ) と diffuser 部の開き角である。論文の中で紹介しているとおり、実験では図 5 に示す全角 30°の開き角のノズルを採用している。全角 60°ノズルもトラップは容易であるが、トラップ位置の遊びが少し大きくなる傾向がある。一方で、全角を絞りすぎると、試料のトラップされる位置が、温度や流量によって上下方向で変化が大きくなる。単結晶合成実験は、XY 面内で回転している試料の鉛直上方から、フォーカスしたレーザーを常に試料の回転中心部に照射し、その出力調整によって結晶を溶融育成するので、試料回転中心がぶれないように、全角は小さい角度を選択している。ノズルの深さは、深い

ほうが容易にトラップできる。典型的な試料直径 2 mm(Al_2O_3)、乾燥空気の流量 0.7 Sccm の場合は、深さが 5 mm あれば十分。この形状のノズルを固定台に設置して、結晶育成を実施した。

結晶育成の種になる試料の溶け残り部分は、試料の最下部 (ノズルのスロート部側) にあり、斜め上方に設置した CCD では観察ができない程度に小さい。この部分は毎回モニターする必要はないが、ノズルの下部からスロート部の直径 1 mm の穴を通して、実際に溶け残り部分の挙動を CCD で観察した。種のサイズは 0.5 mm 程度で、試料最下部を中心として視野内でランダムに移動する。最下部に戻るのは、固体の密度が液体より高いことや、レーザーが照射

されている上部高温部から低温部に向かう液体表面の流動等も影響していると考えている。この種部から結晶を育成する際に、試料の回転は必須ではない。回転を止めた状態で育成できれば、レーザー光軸調整もシビアでなくなるが、試料サイズや流量など条件は未確立である。完全に回転を止めて育成出来たのは数回である。通常は流量に依存して時計回りに回転する。これは、ノズルの加工精度が完全でないこと等から、気流の流れが非対称になり、試料を時計回りに回転させていると考えている。次に、この回転現象を積極的に利用した球状結晶育成方法の提案と実際の回転数計測について述べる。

結晶育成中の回転数計測方法について得られた結果を示す。図6に示すとおり、試料上部の溶融している液体部では、5百ミクロン程度の気泡を表面付近に残す事ができる。実験的には、温度を上げて泡を崩壊させるか、逆に固体

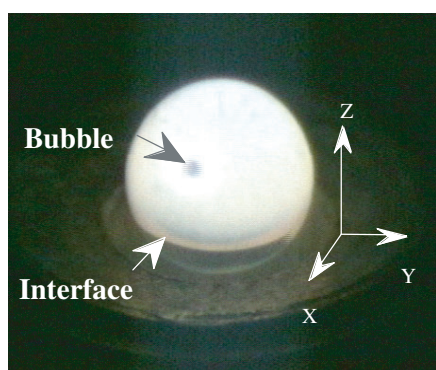


図 6. 結晶育成中試料の外観図

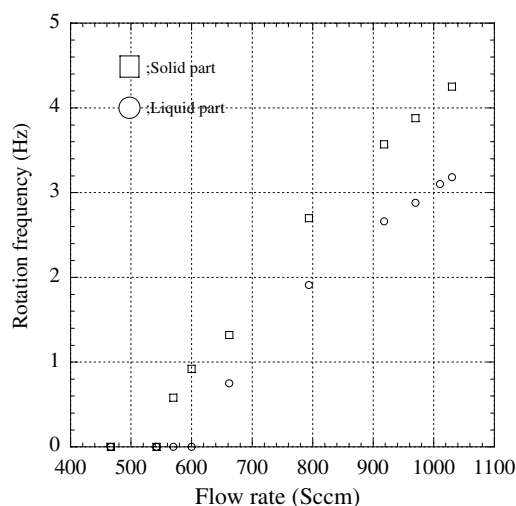


図 7. 固液部の回転数の流量依存性

にしてから再溶解することで除去できるが、この気泡の試料球の緯度方向に関する動きが、試料球表面付近の同じく経度方向への流れに依存すると考えると、試料下部の結晶部分の回転数と試料上部の液体表面付近の回転数を独立に見積もる事が可能である。レーザー出力を一定にしておけば、気泡の経度は変化しない。これは、気泡が浮力により上部へ移動する力と液体表面の低温部（試料下部）に向かう流れがバランスしている為と理解している。気泡が試料球表面を一周する周期と、固体部の回転数を計測したのが図7である。固体部の回転数が小さいと気泡の位置は動かないが、1 Hz から動き始め、固体部の回転数増加と共に、気泡の回転数も増加していく。結晶は 4.25 Hz まで、液体部は 3.18 Hz まで増加した。また、固体部と液体部の回転周期の差は、回転数増加に伴い大きくなる傾向が見られた。これは、液体中の粘性抵抗の影響と考えられる。また、ここでは詳細に述べないが、アルミナ以外の材料で、BaTiO₃ や LiNbO₃ で、結晶育成を行なう場合には、レーザーを試料に照射する方法も工夫する必要があることが解った。以上の結果から、密度差問題を完全に克服するには至っていないが、固体の密度が液体より低い材料は、水など限られており、さらに多くの材料に対して球状結晶が育成できる可能性がある。

前述の通り、この育成方法では固体密度が液体より高いことが必要である。密度差が逆の場合、結晶育成途中に試料上下（固体部と液体部）が反転し、種からの成長は不可能になる。実際に酸化イットリウム(Y₂O₃)では、育成中に固体部が上になる。我々は、球状結晶育成の適用範囲を広げる為に、この反転を防止する手法を2つ提案した。ひとつは、レーザー照射を試料上方ではなく、スロート部を通した下方から照射する方法である。この方法では、浮遊溶融試料の上部を溶け残して種とする。実際に Y₂O₃ で試みたが、技術的に下部からのレーザー照射はレーザービームの調節が難しく、種のサイズ制御までに至っていない。2つ目は、試料を積極的に回転させスピン安定性を利用することで、密度差に関係なく上方からのレーザー照射で球状結晶育成を行なう方法である。前述のように、ガス流量によ

る試料の回転数制御では、数ヘルツが限界であったため、轆轤の様にノズル自体を回転させることで、ノズル表面の気流を回転させ、間接的に試料を回転させる方法を検討した。この方法は発展的ではあるが、回転数の制御方法が未解決である。前述のノズルサイズおよび流量条件では、スロート部から吹き出される気流の速度は数十 m / 秒のオーダーである。仮にこれと同程度の速度で試料周囲のノズル壁を動かす為には、高速でノズルを回転させる必要がある。この回転数に余裕を持って対応できるモーターはなく、スピンドルやエアタービン（歯科医で歯を削る為に使う）でも一桁程度落ちる。その他の課題を洗い出す為、実際にミニ旋盤を縦に固定して、チャックに掴ませたノズルで浮遊実験を実施した結果、回転軸の芯ぶれ防止も解決すべき課題であることが解った。さらに、ノズルを高速回転させた場合、ガス導入部、スロート部、diffuser 部でどのような気流が生成されて、それが浮遊試料の安定性にどのような影響を与えるかは、明確ではない。

第3章 ガス浮遊システムデザイン

3-1. システム構成

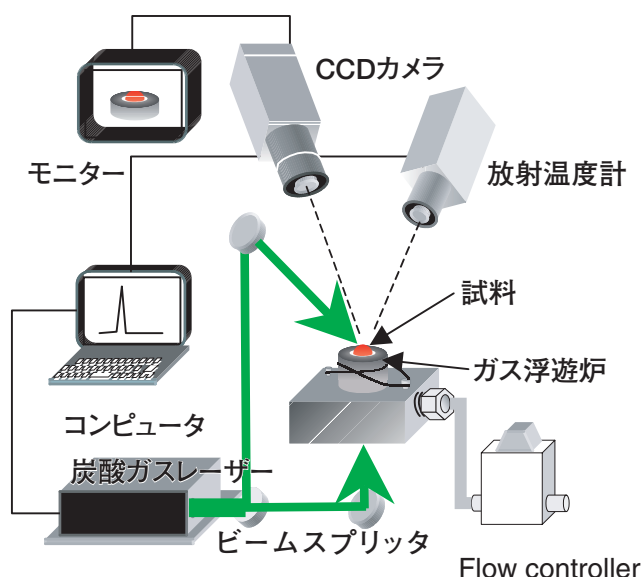


図 8. ガス浮遊システム概略

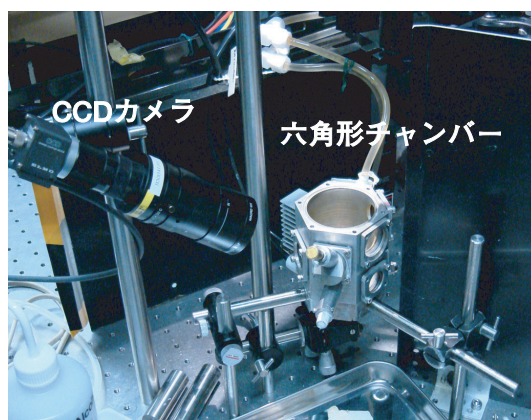


図 9. ガス浮遊システム

ここで紹介するシステム（図 8 は概略、図 9 はチャンバー写真）は、ガラス材料の合成と準安定相の合成に利用したものである。両実験とも、適当なサイズに切り分けた不定形の焼結体試料から、大気圧下 1 分 1 個程度のペースで試料が合成できた。ノズル形状は、前章までに紹介したとので、チャンバー構成について述べる。まず外形を六角形にした理由は、窓の直径（30 mm）と窓枠が 1 つの面に収まるサイズとした。八角形の場合は視野方向のバリエーションが高い反面、窓サイズを小さくするかチャンバー内径を大きくする必要がある。既存の窓材を利用した場合の観察視野の確保と、コンパクトなチャンバー設計のトレードオフで六角形とした。また、チャンバーふたは片手で容易に着脱できるサイズが便利である。なお、蓋とチャンバー内壁の間に O リングが入る隙間を設けて密閉性を確保した。チャンバーの高さは、CO₂ レーザーを試料上方 55° から照射可能な ZnSe 窓位置を取れる最低限の高さ、およびノズル調整や簡単なメンテナンスがチャンバーを分解しなくても可能になる深さで設計した。レーザー照射角が浅いと、直径が小さい（1 ミリ程度）の試料を溶融させるときにレーザーが直接試料に当たらない。試料の浮遊状態を真横から観察するため、およびチャンバー内部をハロゲンランプで照らすために、横に窓をひとつ、また試料の自動交換機構などを付加するための窓をもうひとつ設置した。チャンバー上段に窓を合計 3 つ作ったのは、レーザー窓、レーザー窓の対面には 30° の角度で CCD 用窓、これは 55° にすると、ノズル表面などで反射したレーザーによる窓の加熱を避けるためである。さらに、2 つめの 55° の窓は放射温度計用、3 つ目の 55° 窓はここでは紹介しないが、seeding 用の

needle 機構を取り付けた。全く窓がない 6 角チャンバー外壁の 2 面は、冷却フィンとチラー用である。運用後の反省点は、作業性に大きな問題はなかったが、もう少しチャンバー直径が大きい方が、試料の取り出しには便利である。この場合は、チャンバーの高さを変える必要がある。窓枠の数と高さでは不便はなかった。チャンバーの高さをさらに低くし、直径を広げた設計をする場合には、ノズル直上のチャンバーふた（通常はレーザー導入窓や観察窓があるはず）に試料から蒸発した試料粉末が蒸着、試料からの輻射熱により窓材などのパーツが加熱される。この場合は、冷却用小型ファンを窓に設置することを勧める。実際に試料浮遊位置から 50 mm 程度の高さしか確保できないチャンバーでは、試料直上の ZnSe 窓への蒸着を防ぐため、ノートパソコンに良く使われる一辺 10 mm の小型ファンをノズル斜め上に設置し窓へ送風した。ファンのノズル側はアルミ箔などで保護し、輻射熱の吸収を防いだ。

次に、チャンバーのうちノズル固定部の構成について述べる。必要な機能は、ガスの導入と排気、外部からの電源取り込みポート、ノズル下部からの CO₂ レーザー加熱用 ZnSe 窓、ノズルの固定である。ZnSe 窓は、スロート部を通過してくる溶融試料の輻射熱で過熱され、焼結原料粉末が落下してくる事もあるので、冷却と清掃に注意しないと最悪の場合、AR コートが剥げる。この為、導入ガスでノズル直下を掃くようにしている。ZnSe 窓とノズルの下には数ミリの隙間があるので、この空間からガスを導入した。結果的には想定した効果は得られた。また、溶融試料のトラップが失敗すると、ノズルに試料が引っ付く場合がある。これを剥がすためには、チャンバーを直接叩く、電動歯ブラシ等でチャンバーを連続的に打つ方法は実績がある。

試料からの蒸発を抑制するために加圧チャンバーの利用した場合は、Flow controller の設置箇所をガス導入部ではなく、ガス排気部にした。圧力ポンプのレギュレーターの 2 次圧でチャンバー内の圧力が制御できる、チャンバーからのリークは無視できる程度であれば、排気流量を調整する方法でも浮遊溶融はできた。これは、BaTi₂O₅ のガラス化実験において確認した。この Setting では、試料から蒸発した微粒子がコントローラーに入り込まないように注意することである。以上、ガス浮遊について学んだことを駆け足で紹介したが、機器構成以外の実際に浮遊溶融させる技術やその勘所は、紙面には収まらないので割愛する。

第4章 浮遊試料の実績

4-1. 浮遊試料実績

次の表に浮遊溶融させた試料のリストを示す。Typical なサイズとそのときの流量（乾燥空気）は、ノズルに依存するので、参照程度として頂きたい。微量元素の添加物や、リストアップされた試料同士の混合物の一部は省いてあります。また、N₂やArを利用する場合は、ガスの密度に反比例して流量を増減する。（* Ln=La-Lu, Y）

番号	試料	サイズ(mm)	流量(Sccm)
1	Ln ₂ O ₃	1.5	0.8
2	Al ₂ O ₃	2	0.8
3	Ga ₂ O ₃	1.5	0.7
4	Cr ₂ O ₃	1.5	0.8
5	Fe ₂ O ₃	1.5	0.6
6	Nb ₂ O ₅	1.5	1
7	Ta ₂ O ₅	1.5	1
8	TeO ₂	1.5	0.8
9	ZrO ₂	1.5	0.8
10	TiO ₂	2	0.6
11	BaTiO ₃	2	0.8
12	BaTi ₂ O ₅	2	0.8
13	SrTiO ₃	1.7	0.8
14	CaTiO ₃	1.5	0.8
15	FeTiO ₃	1.7	0.8
16	CoTiO ₃	1.7	0.6
17	CoTi ₂ O ₅	1.7	0.6
18	Ln ₂ O ₃ -TiO ₂	1.7	0.8
19	Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂	1.5	0.7

番号	試料	サイズ(mm)	流量(Sccm)
20	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	2	0.7
21	LnAlO ₃	2	0.7
22	Ln ₃ Al ₅ O ₁₂	1.5	0.7
23	Ln ₂ O ₃ -CoO	2	
24	Ln ₂ O ₃ -MnO	2	
25	La ₂ O ₃ -MoO	1.7	
26	Ln ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	2	
27	La ₂ O ₃ -Nb ₂ O ₅	1.5	0.7
28	La ₂ O ₃ -WO ₃	1.7	0.7
29	La ₂ O ₃ -SiO ₂	1.7	0.7
30	LiNbO ₃	1.4	1
31	LiTaO ₃	1.2	1
32	BaSi ₂ O ₅	2	0.8
33	BiFeO ₃	1.7	0.6
34	NdGaO ₃	2	〃
35	BaW ₃ O ₁₀	2	〃

参考文献

1. F. Millot et al., J. Am. Ceram. Soc., **85** [1], 187-92, (2002)
2. Y. Arai et al., Rev. Sci. Instrum. **74**, [2], pp. 1057-1063, (2003)
3. J.J. Wall, R. Weber, J. Kim, P.K. Liaw, H. Choo, Mat. Sci. Eng. A **445-446** (2007) 219-222
4. Bertero, G. A. ; Hofmeister, W. H. ; Robinson, M. B. ; Bayuzick, R. J., Mat. Trans. A, **22A**, 2713, (1991)
5. K. Nagashio et al., J. Mater. Res., **16**, 138 (2001)
6. Y. Arai, T. Aoyama, and S. Yoda, Rev. Sci. Instrum. **75**, Issue 7, pp. 2262-2265, (2004)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-039

発 行 平成 19 年 3 月 30 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 プリントオフィスゼロ

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

