卒業論文

<u>微小光学レンズ製造法</u>

<u>1 - 52 ページ完</u>

平成15年2月7日 提出

<u>指導教官 庄司正弘 教授</u> 丸山茂夫 助教授

10222 吉澤尚志

目次

第1	章 序論	
1.1	研究の背景	4
1.2	現在の工業的製造法とその欠点	5
1.3	さまざまな固体球生成法	6
1.4	レイリー破断の原理	7
1.5	具体的研究目的の設定	9

第2章 実験装置および実験条件

2.1	実験装置	11
2.2	測定装置	14
2.3	実験材料	15
2.4	パラメータの設定	16

第3章 実験結果

3.1	実験結果概説	
3.2	各パラメータとガラス球径の関係	20
3.3	温度の変化とひげの生成の関係	23
3.4	ガラスゴブの透明度	32

第4章 考察

4.1	溶鬲	由ガラス滴	「下のモデル	/	•••••	 	38
4.2	温度	度による表	面張力変化	の影響		 	
4.3	工業	着的製造法	としての可	「能性に関す	する考察	 	40
第5	章	結論				 	41
第6	章	今後の展	望			 	43
付録	••••			••••••	••••••	 	45
謝辞	••••			•••••	• • • • • • • • • • • • • • • •	 	50
参考	文献	<u>.</u>		•••••		 	51

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年,光通信用小型機器,液晶などの表示デバイス,小型レーザー機器などの分野 がめざましく成長し,超精密小型光学部品の需要が高まっている.中でも光学レンズ は情報の本質である光を実際に操作する部分であり,レンズの特性や形状が情報機器 の性能を大きく左右する.従来,カメラや光学機器に使われていたのは主に球面形状 のレンズで,何枚ものレンズを組み合わせて像のボケやゆがみを防いでいた.球面レ ンズは機械加工と研磨により比較的容易に量産可能であるが,レンズを複数枚使うた め光学的性能に劣り,装置の小型化もしにくいという欠点がある.これを克服したの が非球面レンズで,複雑な形状ゆえ機械加工が困難であったが,最近の精密成形とい う技術の進歩により滑らかな曲面を持った精密な型を作ることが可能になり,高温の ガラスをプレスして量産されている.

ガラスレンズ量産成型の原理は次のようになる.まずレンズが微小なため,後の組 立時における位置決めを精度よく行えるよう,ステンレス製の鏡筒と共に同時一体成 形する必要がある.図1.1 に示すように,超精密非球面研削した超硬合金またはセラ ミックス製の型を台プレートの上下にセットし,鏡筒とガラス材をその下型に置く. 赤外線加熱方式で加熱し,ガラス材が溶融した時点でプレスを行い,冷却固化させて 取り出すものである.これらの一連のプロセスを繰り返し,マイクロレンズの量産を 行う¹⁾.



図 1.1 微小ガラスレンズの成型プロセス

この方法で重要な点は原料となるガラス材である.これはゴブと呼ばれるガラス球の形で供給される.このガラスゴブをあらかじめ作っておくことで,プレスの段階ではガラスが軟化する400 程度の加熱でよく,成形型の寿命が向上する.微小レンズの製造には成形型の微細加工技術とともに,ガラスゴブの微小化が不可欠である.

本研究ではこのガラスゴブに着目し,微小ガラス球を製造する方法を開発すること を目的とする.

1.2 現在の工業的製造法とその欠点

ガラスゴブに要求される特性は,滑らかな曲面を持つ球であること,質量のばらつ きが少ないこと,および泡などの混入が少なく均質なことである.これらの条件が満 たされないと,プレスした時にレンズとしての光学的機能が失われる原因となる.こ のようなガラスゴブの特性を満たすため行われている工業的製法を以下に紹介する.

図 1.2 はミノルタによる特許 2510203「ガラスゴブの製造装置」の概念図である. この方法では溶融したガラスを滴下する液滴法を使っており,ノズル(図中の5)の 先端で表面張力により溶融ガラスが球形になることを利用している.ノズル先端との



図 1.2 特許 2510203「ガラスゴブの製造装置」概念

表面張力に球の重力が打ち勝つまで成長した後,2mほど落下させてプレス用の型で 受け止めレンズに成型する.ガラスゴブの質量はノズル先端径に依存するため,先端 チップを取替え可能にして各種サイズのガラスゴブを製造することを可能にしてい る.しかし,製造できる範囲には当然制約があり,ノズルチップの先端径で0.5~20 mmが可能範囲である.20mmより大きくなるとノズルチップ先端から流出する溶融ガ ラスが層流となりやすくガラス液滴を得ることが難しい.またノズルはガラスの着色 を防ぐため白金などで作られており,加工の困難さからチップ先端径の下限は0.5mm となる²⁾.この結果ガラス滴の重量は50~1000mg程度,ゴブ直径にすると3~9mm 程度が適用範囲となる.

一方で,前述したとおり光学部品の小型化の要求が高まっており,ゴブ直径にして 1mm以下のガラス球の需要が大きい.滴下法ではこの要望に応えられず,機械加工に よる高価な球面レンズを何枚も使用せざるを得ないのが現状である.

1.3 さまざまな固体球生成法

固体球の生成方法は各種あるが大別すると,蒸発と凝縮による方法,固体を機械的 に加工して球状とするもの,固体を一度溶融状態として微粒化し,それを固化するこ とにより固体球とする方法(固溶法)に分けられる.このうち,蒸発と凝固による方 法はサブミクロンから数ミクロンの超微細な粒子の生成に適するものであるが,ミリ メートル以上の大きなサイズの生成には向かない.機械加工法は最も標準的な生成法 であり,比較的均一な固体球が得られるが,歪のない均質で平滑な表面が要求される 光学球の生成には向かない.一方,固溶法は溶融体の流動と切断,固化などの相変化 を伴うため製造過程は複雑であり多種多様なものとなるが,高品質で滑らかな表面を 持つ固体球の生成に適している.上にあげた工業的製法である滴下法も固溶法の一種 である.

固溶法による固体球の生成においては,いかにして溶融体を均一に切断するかが問題となるが,この切断プロセスでは溶融物の流動と表面エネルギー(表面張力)の関わりが重要である.表面エネルギーの関わりは生成する球の大きさにより異なるため, 比較的大きな場合は重力による切断(滴下法)が,比較的小さな球の生成には外力(圧力印加)による切断法(気流あるいは圧送による微粒化:ウェーバー型のアトマイズ法)が用いられている.問題はこの中間領域の大きさの球生成であり,滴下法では固体面(ノズル)が介在するため接触角と濡れの問題が関係して下限寸法に適用限界があり,微粒化法では外力の乱れに伴う極度の不均一性の問題がある.

この求められる中間領域の大きさ, すなわち数百µmから2mm程度の径を持つ球体 に切断するための方法として,レイリー破断の理論がある.詳しくは次節で述べるが, レイリー破断とは,自由空間に置かれた粘性流動のない無限の長さを持つ柱状液体の 表面エネルギー最小化に関係した切断現象である.この原理を使うことにより任意の 径を持ったガラス球の生成が期待される.

1.4 レイリー破断の原理

自由空間中を流動する無限に長い柱状液体の挙動は流速によって大きく変化する. 流速が速くなると不安定な波動が生じ,液柱表面が半径方向に振動を始める(図1.3).



図 1.3 さまざまな流速におけるジェット流の概念図 3)

さらに流速が大きくなると Rayleigh jet と呼ばれるジェット流が形成される.ジェットは連続相に乱れを作り,最も不安定な波の波長でジェットがくびれて切れることにより,たくさんの霧滴がジェットから数cmのところで生成する.この範囲ではある流速で液滴径の極小値が得られ,しかも液滴はかなり均一な大きさになる⁴⁾.このときの液滴直径をd_p,液柱直径をd_j,ジェットの波長をとすると,

Volume =
$$\frac{d_p^3}{6} = \frac{d_j^2}{4} = \frac{d_j^2}{4} (4.508) d_j$$

すなわち $d_p = 1.89 d_j$

となることを Rayleigh は理論的に解析した³.

図 1.4 に理想的なレイリー破断の概念図と,実際に高速カメラで撮った水のジェットの写真を示す.



図 1.4 理想的なレイリー破断の概念図(a)と,水ジェットの実際の写真(b),(c)³⁾

1.5 具体的研究目的の設定

以上述べたように,レイリー破断はジェット噴射流状態にある細い液柱が流速の乱 れなどの小さな外乱で,球滴状に飛散することを示した理論である.この原理では柱 状液体の直径に対しおよそ2 倍の直径を持つ液滴が比較的均一にできる点が重要で ある.

本研究ではこの原理を応用し,ガラス細線をヒーターで過熱・溶融し,現在要望さ れている直径1mm以下の微小なガラス球を製造することを目標とする.しかし現段階 では実験装置としてガラス滴を自由落下させる場合だけを想定しており,溶融により 多少の流動はあるものの正確にはジェット噴流とはいえず,レイリー破断とはまた違 った現象が現れる可能性は十分にある.従って,さまざまな径のガラス細線について 実験し,加熱温度を変化させてガラス滴の生成にどのような影響があるかを考察する. また実際にレンズとして使用するためには,プレス前のガラスゴブの段階で泡などが 混入していないことや表面が滑らかなことが必要である.このような製品としての条 件を満たしているか,あるいはそれを満たすための最適加熱条件なども考察する.

第2章 実験装置 および実験条件

2.1 実験装置

実験装置は,窒素ガスを満たしたガラスパイプ内に取り付けたヒーター部分と,ガ ラス細線の上下動を手動で操作する部分とに分かれる.ヒーターは抵抗10 で,可 変直流電圧器により1200 程度までの加熱に耐えられる.図2.1 にその概要を示す.



図 2.1 実験装置概要

外径 60 mmのガラスパイプの上下に 4 本のロッドでステンレス製のフランジを取 り付け,上部に窒素ガスボンベのチューブを差し込んで少量のガスを常時流入させて いる.これはヒーターが高温になり,酸化によって破損するのを防ぐためである.図 2.2 にヒーター部の写真を示す.真中の青縞のものがヒーターである.



図 2.2 ヒーター(左),ガスボンベ(真中),ガラス細線上下動装置(右)

実験方法を模式的にあらわすと図 2.3 のようになる.ガラス棒を一定の速度でヒーター内に挿入し,溶融させる.





2.2 測定装置

温度の測定には通常の熱電対を用いる.また,ガラス球の直径は電子天秤で質量を 計測した後,比重から計算によって求める.これはガラス球が完全な真球でない可能 性があるためである.図 2.4 に電子天秤の写真を示す.



図 2.4 ガラス球質量計測用の電子天秤

2.3 実験材料

実験用のガラス細線は,住田光学ガラスの硝種 PSK-100 を用いる. 0.2 mmから 0.1 mmごとに 0.9 mmまでのものを用意した.ただし,誤差を±0.05 mm含んでいるの でマイクロメーターであらかじめ両端の直径を計っておき,その平均値をガラス細線 の径とする.図 2.5 にガラス細線の全体写真を,表 2.6 に PSK-100 の主な物性値を 示す.



図 2.5 試験管に入った各種径のガラス細線

硝種	転移点	比重
PSK-100	390	3.24

表 2.6 実験用ガラス材の主な物性値

2.4 パラメータの設定

ガラス細線をヒーターで加熱して溶かす場合,ヒーターの温度によってガラスが溶けるスピードが変わってくるため,ガラス液滴の挙動や生成されるガラス球の大きさも変化すると考えられる.また,ガラス細線の上下動のスピードも影響を与えると考えられるが,これは手動で行っているため正確に制御することが出来ない.従ってなるべく一定になるように意識して行う.

以上より,パラメータはガラス細線の直径とヒーターの温度の2つとする.ガラス 細線の径は0.2 mm,0.3 mm,0.4 mm,0.5 mm,0.6 mm,0.7 mm,0.8 mm,0.9 mm,の8 種 類を用意した.長さは100 mmで,0.2 mm径の細線のみ300 mmのものも用意した.ヒー ターの温度は1200 ,1100 ,1000 ,900 ,800 ,700 の6種類とするが, 大体その温度になるように電圧を調整し,熱電対で正確な温度を読み取る.

第3章 実験結果

3.1 実験結果概説

まず球の生成については,予想していたとおり真球度の高いガラス球が得られた. しかし大きさについては,今回の実験では直径1mm以下のガラス球を得ることは出来 なかった.図3.1の左端のものでも約1.6mmである.



図 3.1 各種径のガラス細線から作ったガラス球

また,温度が低い場合では図3.2 に示すように長いひげ状のガラスが残ったまま生成してしまった.これはガラス細線の中心部が完全に融解する前に落下してきてしまうためだと思われる.このような突起物があるとレンズ用には使用できない.

同様に,ガラスゴブの中に気泡が混入していたりしてきれいな透明でないと,レンズとしての光学的性能が落ちることになる.

以降の節で,各パラメータ値とガラスゴブ径の関係,各パラメータ値とひげ生成の 関係,およびゴブの透明度について述べる.



図 3.2 ひげ状のガラスが生成したゴブ

3.2 各パラメータとガラス球径の関係

ガラス細線の直径とヒーター温度を変えて,生成したガラス球の質量をプロットしたグラフを図 3.3 に示す.ほぼガラス棒径に比例してガラス球の質量が増えているのが分かる.



図 3.3 各温度におけるガラス棒径とガラス球質量の関係

また,縦軸・横軸とも自然対数をとってプロットしたものを図 3.4 に示す.横軸は 見やすいように 2 を足してある.近似曲線の傾きは 1.03 なので,ほとんど線形であ ることが確認できる.



図 3.4 ガラス棒径とガラス球の対数プロット

つまり,レイリー破断の理論では棒径とガラス球径が比例するはずだったが,この 実験結果では棒径とガラス球径の3乗が比例することになる.ガラス材料 PSK-100 の比重 3.24 から計算した換算直径と,レイリー破断の理論値との相違を図 3.5 に示 す.



図 3.5 測定値と理論曲線の違い

3.3 温度の変化とひげの生成の関係

ひげの生成は主に 800 以下の条件で見られた.図 3.6 に 790 , 720 , 670 で 作ったガラス球のひげ生成の度合いを示す.全体的に,温度が低くなるにつれてひげ が出来やすい傾向は見られるものの,明確な関係は読み取れない.



図 3.6 ガラス細線直径とひげ長さの測定値

図 3.7 から図 3.14 まで, ひげが生成したガラス球の写真を示す.



図 3.7 720 ,ガラス棒径 0.38 mmの条件で作ったゴブ 10 mmのひげが生成したが途中で折れてしまった



図 3.8 720 ,ガラス棒径 0.67 mmの条件で作ったゴブ 135 mmのひげが生成したが途中で折れてしまった



図 3.9 670 ,ガラス棒径 0.16 mmの条件で作ったゴブ 3 mmのひげが生成したが先端が欠けてしまった



図 3.10 670 ,ガラス棒径 0.78 mmの条件で作ったゴブ 長さ 100 mmのひげが生成した



図 3.11 670 ,ガラス棒径 0.78 mmの条件で作ったゴブ 長さ 110 mmのひげが生成したが途中で折れてしまった



図 3.12 670 ,ガラス棒径 0.85 mmの条件で作ったゴブ 長さ 20 mmのひげが生成した



図 3.13 790 , ガラス棒径 0.16 mmの条件で作ったゴブ 左下に小さな突起ができているのが分かる



図 3.14 790 ,ガラス棒径 0.87 mmの条件で作ったゴブ 0.3 mmのひげが生成した

3.4 ガラスゴブの透明度

ゴブの透明度を損なわせる原因として最も大きいのは気泡の混入である.この泡は ガラスが溶融する時に均一に流動しなかったり,ガラスが部分的に気体になったりし て発生すると考えられる.従って,温度によってガラスゴブの気泡の混入度合いが違 うと予想されるが,実際には今回の実験で温度による気泡の混入度合いに顕著な違い は見られなかった.720,900,1010,1100の場合について,ガラスゴブ中 の気泡の様子を以下に示す.気泡が判別しやすいように明るさとコントラストを変え てある.ガラス球の中の小さな白い粒が気泡である.



図 3.15 720 , ガラス棒径 0.51 mmの条件で作ったゴブ



図 3.16 900 ,ガラス棒径 0.47 mmの条件で作ったゴブ



図 3.17 1010 , ガラス棒径 0.46 mmの条件で作ったゴブ



図 3.18 1100 , ガラス棒径 0.46 mmの条件で作ったゴブ

図 3.15 から図 3.18 の中では気泡の数が多いのは 720 と 1100 の場合で,次が 900 ,そして 1010 の場合が一番きれいなように見える.しかし,他の写真を見て も温度とのはっきりした相関は見られず,気泡の多い少ないは極めて偶然性によるも のだと思われる.この原因として,ガラス球中の気泡が実はもともとのガラス細線の 中に含まれていた可能性があることが挙げられる.図 3.19 はガラス液滴が落下する 前に引き上げたガラス棒の先端であるが,ガラス棒の中にも気泡が含まれているのが 分かる.もっと正確に温度と気泡の関係を議論するには,気泡の入っていないガラス 細線を用意する必要があると思われる.



図 3.19 ガラス滴が落下する前に引き上げた 0.47 のガラス細線

第4章 考察

4.1 溶融ガラス滴下のモデル

3.2 節で述べたように,ガラス細線の太さとガラスゴブ径の関係はレイリー破断の 理論とは異なり,ガラス細線径とガラスゴブ質量が比例する.その原因として,今回 の実験装置ではヒーター部分が比較的短く内部の温度分布も均一でなかったため,ガ ラス細線全体が一気に液体になっていなかったことが挙げられる.逆に,温度の高い ヒーターの中心部でガラス細線の先端だけが溶けて滴下しているため,液体ガラスの 流動は起こらずレイリー破断しないと考えられる.

では,ガラスゴブの質量がガラス細線径に比例するのはなぜだろうか.このことは 次のような簡単なモデルを仮定すると説明できる.まず図 4.1 のようにガラス棒先端 が溶けて球状となる.ここで図中の点線を境に上が固体,下が液体に完全に分離して いると仮定する.するとガラス液滴に働く表面張力は, d_j cos となる.ただし, ガラス棒直径を d_j,ガラスの単位長さあたりの表面張力を,接触角を とする. 一方,ガラス液滴が落下する瞬間は液滴の重力が表面張力に打ち勝って離脱するので, その時の質量をmとすると,

$$mg = d_i \cos (1)$$

となり,質量がガラス細線直径に比例することが分かる.図 3.3 よりガラス球質量と ガラス細線直径の関係を

$$m = 43.3 \times d_{i}$$

(2)

とし,写真から = 50°と見積もると, = 0.21 [N/m] となる.文献値では,リン グ引き上げ法により1000 での表面張力は = 0.37 [N/m] となるので若干異なるも ののオーダーとしては合っている.



図 4.1 溶融ガラス滴下のモデル

4.2 温度による表面張力変化の影響

前節で述べたようなモデルが大まかに正しいとすると,ガラスの表面張力がガラス ゴブ質量の決定因子であることになる.ガラスの表面張力は温度が高いほど低くなる ので,式(1)より温度が高いほどゴブは小さくなるはずである.しかし図 3.3 では むしろ逆に温度が高いほどゴブ径が大きくなっているようにも見える.これを確かめ るため,図 4.2 に式(1)より求めた表面張力の値を示す.これも,温度が上がると 表面張力が小さくなるという一般の知識と逆の傾向を示している.

この原因として考えられるのは上昇気流の存在である.ヒーターの温度が高いほど 上昇気流の威力が強いので,低温の場合に比べてゴブが大きくならないと落下しない ということである.しかし具体的に上昇気流の圧力などを計測していないので,これ は推論の域を出ない.またもう一つ大きな原因として,測定の不確かさがある.ガラ ス細線の径は両端で違いその平均値を代表値としていること,およびガラス細線の上 下を手動で行っているため溶かし方に若干の違いがあるなどデータに相当の再現性 誤差が含まれている.これらの原因が微小な測定値の変化を捉えにくくしているため, 装置や実験方法の改良が必要である.



図 4.2 計算から求めた仮の表面張力

4.3 工業的製造法としての可能性に関する考察

3.1 節で述べたように,光学分野で需要の高い直径 1 mm以下のガラスゴブは作るこ とはできなかった.今後の改良が重要な課題であるが,1 mm以下がすぐに達成されな くとも,この方法には既存の工業的製造法に替わる新しい方法としての可能性が十分 にある.序論で述べたように現在の工業的製法は大掛かりな加熱装置や溶融槽を必要 とするため設備投資にたくさんの資金がかかるし,一度運転させたら簡単には止めら れないため必要な時に必要な量だけ生産するという身軽さに欠ける.一方この方法で はヒーターは小規模なものでよく,材料のガラス細線も適当な量に調節できるので, 生産が非常に楽になると思われる.問題となるのは材料であるガラス細線の値段,す なわち経済的採算性である.今回使用したガラス細線は比較的高額で,これから作ら れるガラスゴブ1個の値段も,機械加工と研磨によるボールレンズの値段と同等かむ しろ割高である.このためもっと安いガラス細線の入手が不可欠である.ただし,ガ ラス細線の需要が高まり量産されるようになればもっと安くなる可能性はある.

第5章 結論

- 今回の実験では当初の目標である 1 mm以下のガラスゴブを得ることはできなかった.これはレイリー破断の理論が適用できそうにないと分かった時点から予想できたことではあったので,今後の改良が重要である.
- ガラス細線の直径とガラスゴブの質量が比例することが確かめられた.温度による球径の変化は今回の実験の精度では認められなかった.
- ひげについては,材質にも依るが800度以上では生成しないと思われるので実際の実用化にあたっても温度を上げれば解決する問題である.
- ガラスゴブの透明度は、気泡がもともとガラス細線に含まれていることが原因と
 も考えられ、材料を変えて詳しく調べる必要がある。

第6章 今後の展望

本研究の方法で小さなガラスゴブを作る際,ゴブの直径を決めているのはガラス細線の径,および溶融ガラスの表面張力と重力の釣り合いである.このうちガラス細線の径と表面張力はこれ以上小さくできないとして,重力に相当するものを遠心力によって加えることが考えられる.例えば図 6.1 に示したように装置全体を回転させてやることによって,重力よりも大きい力をかけることができる.

試みに, r = 1m, = 85rpm としてみると,

$$r^{2} = 79 [m/s^{2}] 8 G$$

であり,ガラスゴブの体積は $\frac{1}{8}$ となる.従ってゴブ直径は半分になり 0.8 mmまで可能となる.



図 6.1

付録

温度:1180c

ラベル	棒径 (平均	沟)	球質量(g)	ひげ長さ(mm)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0	.18	7.9	0						
0.3mm	0	.25	11.1	0						
0.4mm	0	.38	15.8	0	15.8	0				
0.5mm	0	.49	20.1	0	21	0				
0.6mm	0	.57	25.8	0	26.3	0	25.4	0		
0.7mm	0	.66	28.3	0						
0.8mm	0	.79	36.5	0	36.6	0	37.3	0	37.3	0
0.9mm	0	.87	41.2	0	40.8	0	40.2	0		

温度:1100c

ラベル	棒径 (平均	沟)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm										
0.3mm										
0.4mm										
0.5mm	0	.46	20.5	0	19.2	0				
0.6mm										
0.7mm										
0.8mm										
0.9mm	0	.87	39.1	0	39.7	0	38.1	0	42.5	0

温度:1<u>040c</u>

ラベル	棒径 (平均)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0.19	8.3	0						
0.3mm									
0.4mm									
0.5mm									
0.6mm									
0.7mm									
0.8mm	0.8	37.1	0	37.1	0	36	0	34.8	0
0.9mm									

温度: 1010c

ラベル	棒径(平均)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0.21	8.1	0				
0.3mm	0.29	12.9	0	12.4	0		
0.4mm	0.39	16.1	0	15.4	0		
0.5mm	0.46	19.1	0				
0.6mm	0.6	25.5	0	24.1	0	24	0
0.7mm	0.71	29.2	0	29.3	0		
0.8mm	0.8	35.7	0	34.9	0		
0.9mm	0.845	39.4	0	37.2	0		

ラベル	棒径(平均)	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0.185	8	0
0.3mm	0.29	11.3	0
0.4mm	0.39	15.9	0
0.5mm	0.465	19	0
0.6mm	0.56	25	0
0.7mm	0.67	28.8	0
0.8mm	0.755	32.3	0
0.9mm	0.86	38.2	0
0.4mm	0.39	16.1	小さな突起あり
0.6mm	0.56	25.3	0
0.6mm	0.56	23.7	0
0.7mm	0.67	28.8	0
0.7mm	0.67	28.4	0
0.8mm	0.755	33.1	0
0.8mm	0.755	33	0
0.9mm	0.86	37.4	0
0.9mm	0.86	39.7	0
0.9mm	0.86	39.3	0
0.9mm	0.86	37.3	0

温度:950c

ラベル	棒径(平均)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm									
0.3mm									
0.4mm									
0.5mm									
0.6mm									
0.7mm									
0.8mm									
0.9mm	0.845	362	0	36.9	0	37.3	0	35.9	0

温度: 900c

ラベル	棒径(平均)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0.18	6.6	0				
0.3mm	0.31	12.4	0	13.3	0		
0.4mm	0.365	15.5	0	15.9	0		
0.5mm	0.465	18.7	0	19	0		
0.6mm	0.59	23.6	0	24.4	0	25.7	0
0.7mm	0.69	29	0	28.4	0	27.7	0
0.8mm	0.77	31.8	0	31.5	0	32	0
0.9mm	0.85	35.2	0	36.9	0		

温度:790c

ラベル	棒径(平均)	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0.155	6.4	小さな突起						
0.3mm	0.305	12.3	0	12.2	0				
0.4mm	0.375	15.7	0						
0.5mm	0.465	19	0	18.7	0				
0.6mm	0.585	24.9	0	24.9	0	24.8	0		
0.7mm	0.69	29.6	0	28.6	0	30	0	29.1	0
0.8mm	0.79	34.2	0	34.7	0	32.8	0	34.7	0
0.9mm	0.87	36.6	0	39	0.3				

温度:	720		
ラベル	棒径(平均)	球質量	ひげ長さ
0.3mm	0.31		30
0.4mm	0.378	14.7	?
	0.378	14.2	10
0.5mm	0.5095	20.8	12
	0.5095	20.5	25
	0.5095	19.3	
0.6mm	0.6165	?	115
	0.6165	22.9	10
	0.6165	24.9	
0.7mm	0.6715	27.6	135
0.8mm	0.795	32.5	

温度:	670		
ラベル	棒径 (平均)	球質量	ひげ長さ
0.2mm	0.155	6.7	3
0.3mm			
0.4mm			
0.5mm			
0.6mm			
0.7mm			
0.8mm	0.78	33.2	100
0.2mm	0.155	6.8	0.9
0.8mm	0.78	32.9	110
0.9mm	0.845	37	20
0.9mm	0.845	36.8	?
0.9mm	0.845	36.2	?
0.9mm	0.845	35.7	?
0.9mm	0.845	?	75

謝辞

まず初めに,技官の渡辺さんには実験装置から資料の準備まで何もかもやってもら い大変お世話になりました.また卒論締め切り間近にはいろいろとご迷惑をお掛けし たこととは思いますが,最後まで面倒を見ていただきありがとうございました.この 場を借りてお礼申し上げます.

庄司先生には自由にのびのびと卒論をやらせていただき,大変感謝しております. 先生の研究室でなかったら僕の卒業はありえなかったかもしれません.

先輩におかれましては同じ研究室 M1 の丹下さんに特にお世話になりました.私たちの卒論のことをいろいろ気遣って下さり,アドバイスなども頂きました.また丹下さんの研究に対する熱心さは大変励みになりました.

丸山研究室 M1 の小川さんにはいつもジョークをふりまいてもらい,楽しい研究室 ライフを送ることができました.

他にも庄司・丸山研究室の方々にはいろいろとご迷惑をお掛けし,またお世話にもなりました.この場を借りてお詫びと,お礼を申し上げます.

参考文献

- 1) 豊橋技術科学大学生産システム工学系 鈴木浩文, 超精密・マイクロガラスレン ズの成形技術と超硬合金型の精密研削技術
- 2) 特許2510203「ガラスゴブの製造装置」
- 3) Robert S. Brodkey , The phenomena of fluid motions
- 4) 化学工学協会編, 気泡·液滴工学(1969), pp28-31

<u>1 - 52 ページ完</u>

卒業論文

<u>平成 15 年 2 月 7 日 提出</u>

10222 吉澤尚志