

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「マイクロデバイス実装における極微量塗布ポンプ用
ローター鑄造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1―1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1―2 研究体制（研究組織、管理体制、研究者名、協力者）	5
1―3 成果概要	8
1―4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2―1 高精度微細ローターを鋳造するための合金選定と試作鋳造方法	10
2―1―1 合金の選定	10
2―1―2 ニアネットシェイプ成形のための溶湯加圧熱サイクル制御鋳造法の開発	13
2―1―3 転造仕上げ加工法の開発	15
2―2 微細ローターの仕上げ加工技術の確立、信頼性評価の実施	17
2―2―1 溶湯加圧条件の適正化	17
2―2―2 転造加工条件の決定	20
2―3 試作ローターの形状物性評価とディスペンサー性能の評価	21
2―3―1 試作ローターの形状、強度の評価	21
2―3―2 ポンプの設計	23
2―3―3 流量特性、塗布試験の評価	23
第3章 全体総括	26
3―1 成果の総括	26
3―2 今後の課題と事業化予定	27

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 背景と研究目的

高機能端末やスマートフォンなどの急速な普及により、実装基板の小型・高密度集積化のニーズが高まっており、それに伴い図 1.1 に示すような導電性ペーストなど高粘性流体の極微量塗布装置が求められている。大手情報家電メーカーからは、塗布仕様として粘性液を線幅 0.06mm、ドット径 0.30mm まで微細描画できる塗布装置の要求がある。この塗布装置としては、従来のスクリーン印刷方式や空気圧式塗布ポンプでは精度確保が困難なため、「一軸偏心ねじポンプ式」が最も有望であり、そのキー部品であるローター製造法を確立するために必要な金属ガラスとその新しい鑄造技術を開発する。

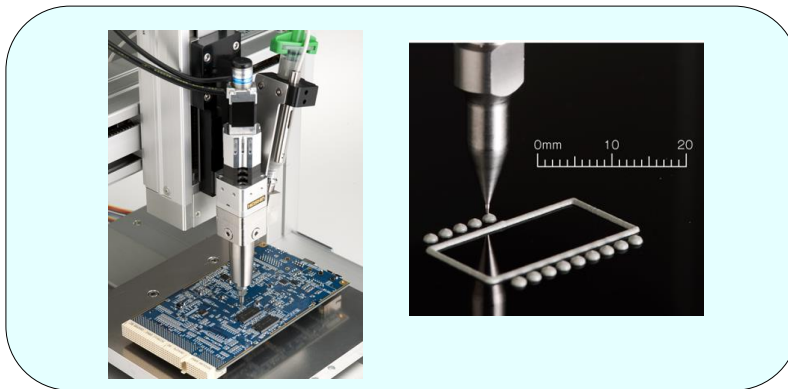


図1.1 極微量塗布ポンプ（ディスペンサー）

(2) 研究の概要と目標

情報家電の分野では、マイクロデバイス実装の高集積化のニーズが高く、基板実装用のはんだペースト、UV 樹脂、接着剤など高粘性流体を微量で定量塗布するポンプが求められている。この極微量塗布ポンプ（業界ではディスペンサーと称す）を実現するにあたっては、従来のスクリーン印刷方式や空気圧式塗布ポンプでは精度確保が困難で適用できない。その理由は空気圧式では固液混相流体や、温度により粘性が変化する高粘性液体の塗布量が不安定となるためである。これに対し一軸偏心ねじポンプ式は、定量かつ流量制御し易い構造でかつ強い真空吸引力による高速塗布が可能であるため、極微量塗布ポンプを実現する上で最も有力な方式である。ポンプの小型高精細化を図るためには以下の事項が必要である。一つはノズル、ステーター、ローターの微細化と回転制御性の高精度化である。このうち、ノズルおよびステーターの技術は既に確立もしくは一部改良で対応できるのに対し、ローターについては図 1.2 に示すような高精度かつ微細技術の実現が課題となっている。また他の必要事項として、偏心ねじ構造のローターをサーボモータで駆動するための、現用のユニバーサルジョイント（偏心軸

継手)の機構を無くすことである。これを実現すれば機構の簡素化による部品点数の削減にも大きく貢献できる。ただ同機構を無くすためには、ローター材料の高強度、高弾性ひずみ特性、回転曲げ疲労強度、耐摩耗性、耐蝕性が求められるとともに、微細精密かつ複雑形状加工が可能であることが必須である。

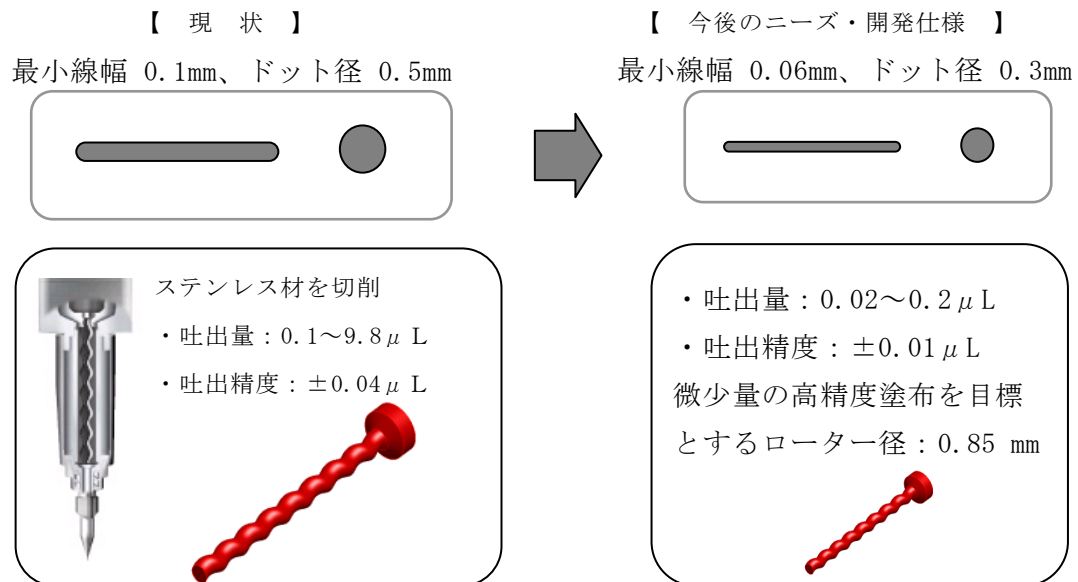


図1.2 細線化目標仕様と技術的課題

こうした必要事項を満足する材料として、本実施計画で取り挙げる新素材・金属ガラス（アモルファス合金）を利用して、世界に先駆けて日本で研究が進んでいる「金属ガラス」の優れたガラス形成能と新しい鑄造法により、複雑形状を一体かつ高精度に量産する技術を開発する。具体的には、金属ガラス材料の過冷却状態にある材料伸び変形性の適正域を見い出し、さらに材料の結晶化状態を計測しながら加圧条件を決定することにより、図 1.3 に示すような粘性流動加工条件の最適領域を見い出し、高信頼性の精密部品を成形する鑄造技術を開発することを目的とする。

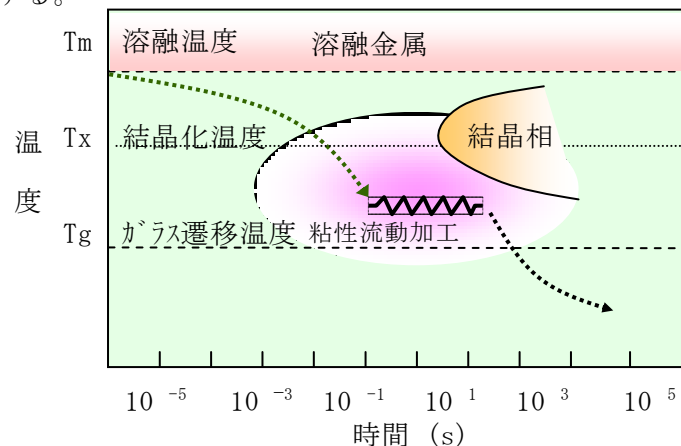


図1.3 連続冷却変態線図における金属ガラスの粘性流動加工特性

(3) 実施内容と結果

【1】高精度微細ローターを鋳造するための合金選定と試作鋳造方法

【1-1】量産化用合金の選定

量産可能な引張強度と耐食性のある適正な金属組成の検討、及び将来性をも考慮しコスト面で有望な合金も含め調査して適正な材料を選定した。その選定した合金のペレット作製方法として、定量性のある滴下式製造装置の検討を行い、その装置化を実施した。合金を溶解した後、適量をシリンダストロークを制御しながら押し出して精密に滴下させる。これにより、成型に必要な合金量のペレット質量を任意に調整できることになった。

【1-2】ニアネットシェイプ成形のための溶湯加圧熱サイクル制御鋳造法の開発

内部欠陥を少なくし1.0mm以下のローターの金型鋳造方法の開発を行うことを実現するために、以下の溶湯加圧熱サイクル制御鋳造装置および金型を製作して検討した。

① 溶湯加圧熱サイクル制御鋳造技術の開発

成形に用いる溶湯加圧熱サイクル制御鋳造装置を設計し、結晶化度が5%以下のローターを成形するための鋳造法を開発した。溶融した金属を差圧吸引によって金型内へ引き込む差圧鋳造法と、高周波誘導加熱によりガラス転移点付近まで温度を再度上昇させた後、内部の欠陥であるポアを加圧する加工法をシーケンシャルに行える鋳造装置を設計した。特に、溶湯注入時の湯流れの改善と、ガス加圧時に発生するポアについて改善を図るため、合金の溶解部と鋳造金型部を同軸上に配置することにより、湯の流れ抵抗を低減した。また押し込み用のシリンダを設け、溶湯を金型内へ注入する際の速度と圧力を自在に制御することにより、鋳造時の湯暴れによるガスの巻き込みを無くし、ポアの発生を抑制する構造とした。

② 微細ローター試作用金型の開発

複雑かつ高精度な成形を必要とするローターは、上記の溶湯加圧熱サイクル制御鋳造装置で成形する。そこで用いる金型は成形したワークを取り出すため、割型構造とした。

【1-3】転造仕上げ加工法の開発

鋳造後のローターは、パーティングラインを完全に消失させることは出来ないため、この部位を転造加工にて表面段差を修正し、微細ローターの形状精度を高めるための手法を開発した。

【2】微細ローターの仕上げ加工技術の確立、信頼性評価の実施

【2-1】溶湯加圧条件の適性化

内部欠陥の少ないローターの金型鑄造方法を目標に検討した。目標とする形状を達成するために必要な結晶化度と、疲労性を考慮した溶湯加圧条件を決定するものである。成形パラメータの最適化に向けては、溶湯工程で結晶化を起こさない鑄造条件である温度や加圧する圧力、注入速度を明らかにし、内部欠陥（ポア）を押さえられるようにした。

検証方法としては、自社所有のマイクロフォーカスX線CTシステムを使用してポアの有無、およびその大きさを確認した。また、試作品のアモルファス化状況を表面観察又は結晶化度熱分析装置（DSC）で評価しながら、適正条件を導出した。

【2-2】転造加工条件の決定

室温における加工を前提に転造加工条件の最適化を行った。金型継ぎ目であるパーティングラインの段差を 0.005mm 以下にし、要求寸法精度に仕上げることを目的に、転造加工装置の加工条件パラメータとなる、加圧軸の制御位置、スライド軸の移動速度や繰り返しの転造回数などを変化させながら、適正な加圧の条件を模索し、目標を達成することができた。

【3】試作ローターの形状物性評価と、ディスペンサー性能の評価

【3-1】試作ローターの形状、強度の評価

成形した微細ローターおよび丸棒に対して形状、疲労強度等の機械的強度の評価を行った。成形された微細ローターの径、真円度の測定をレーザー式非接触輪郭形状測定機を用いて形状評価を行うと共に、鑄造面は走査型電子顕微鏡（SEM）による表面観察を行い組織の観察を実施した。また、一軸偏心ねじポンプ用のローター疲労強度を評価するため、疲労試験機を製作し、疲労回数 10^7 回の回転曲げにおいて破損が生じないことを検証した。

【3-2】ポンプの設計

目標値である最小線幅 0.06mm、ドット径 0.3mm を目指し、ポンプ容積 $1.0 \mu\text{L/rev}$ 以下の極微量塗布ポンプの設計開発を行った。

試作ポンプにおいて開発ローターの相手部材となる雌ねじ形状を有するゴム製ステーターの設計を行い、液状ゴム射出成形用金型を製作し、これを用いてフッ素ゴムの超微小ステーターを試作し、精度検証を行った。

極微量塗布ポンプは、上記の超微小ステーターと、開発する金属ガラスで鑄造した微細ローターを組み合わせ、超小型の AC サーボモータを

駆動源として用いることにより完成させた。また、これらを制御して、塗布量や逆転吸込量を精密にコントロールするための制御器についても新たに製作した。

【3-3】ポンプの流量特性の評価

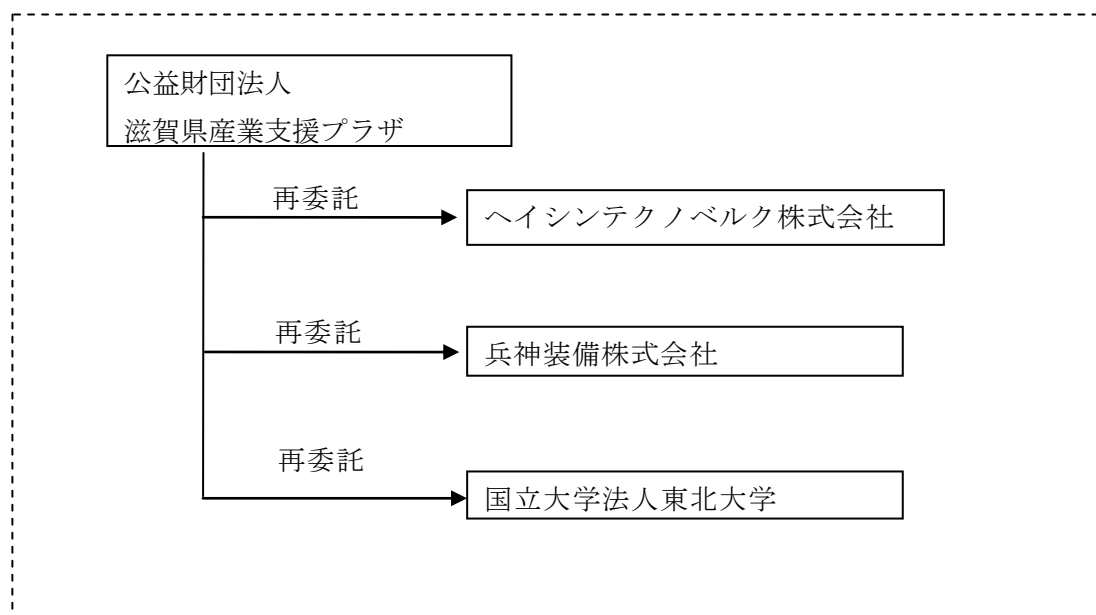
ポンプ連続運転時の流量特性を $\text{nL}(10^{-3}\text{mm}^3)$ レベルで計測するため、流量計、圧力計、配管、フィッティング、バルブ類をユニット化した精密流量計測システムを構築した。これにより、一回転当たりの流量の把握および回転数と吐出流量の関係を明らかにし、極微量塗布ポンプの吐出性能線図を作成した。また、線、ドット径の描画試験を実施し、その目標精度を満足する結果を得ることができた。

【4】プロジェクトの管理・運営

本プロジェクト事業が適切かつ効果的に運営され、所期の目的が達せされように、また適切な経費の執行がなされるように、推進会議を3年間で合計10回開催し、適正な推進を図った。

1-2 研究体制（研究組織、管理体制、研究者名、協力者）

（1） 研究組織



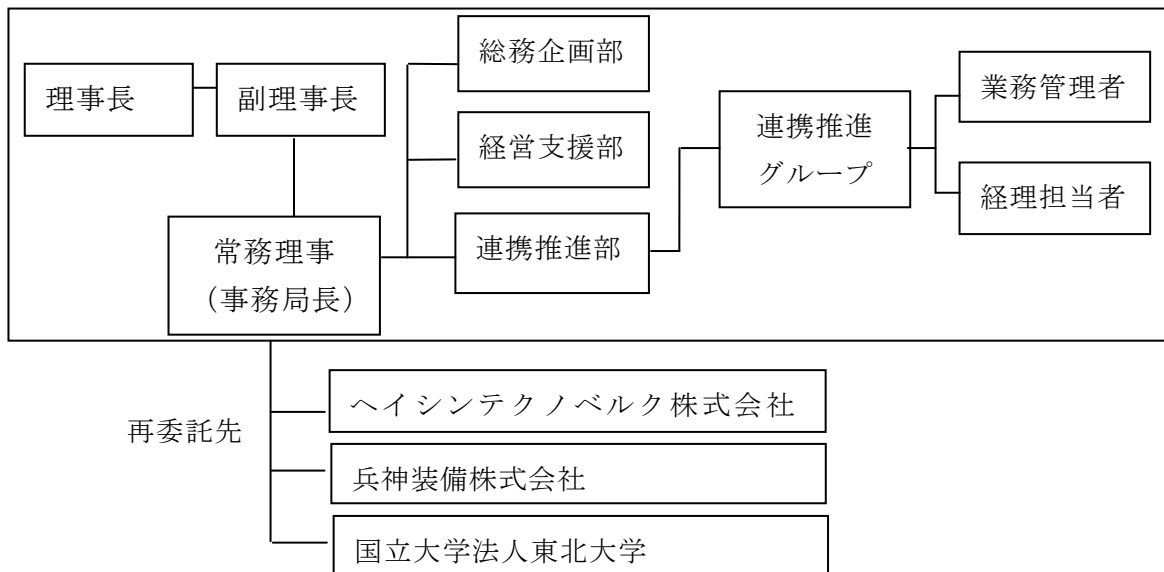
総括研究代表者（PL）
ヘイシンテクノベルク株式会社
研究開発グループ
部長
井上陽一

副総括研究代表者（SL）
国立大学法人東北大学
金属材料研究所
附属研究施設関西センター
教授
早乙女康典

(2) 管理体制

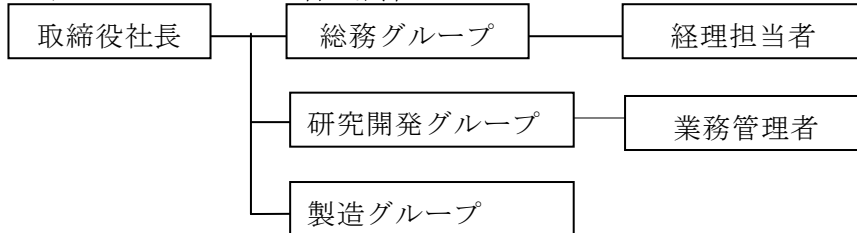
①事業管理機関

【公益財団法人滋賀県産業支援プラザ】

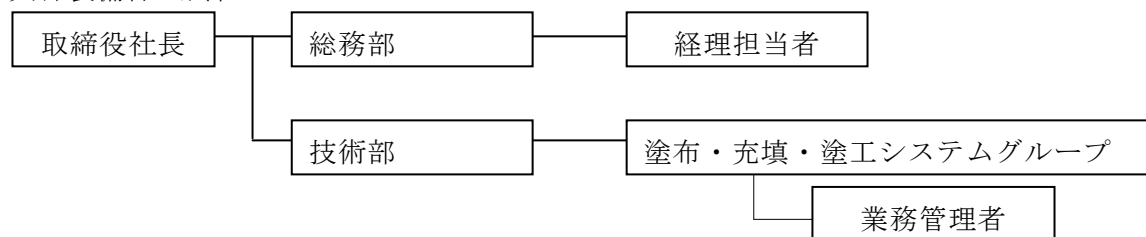


②（再委託先）

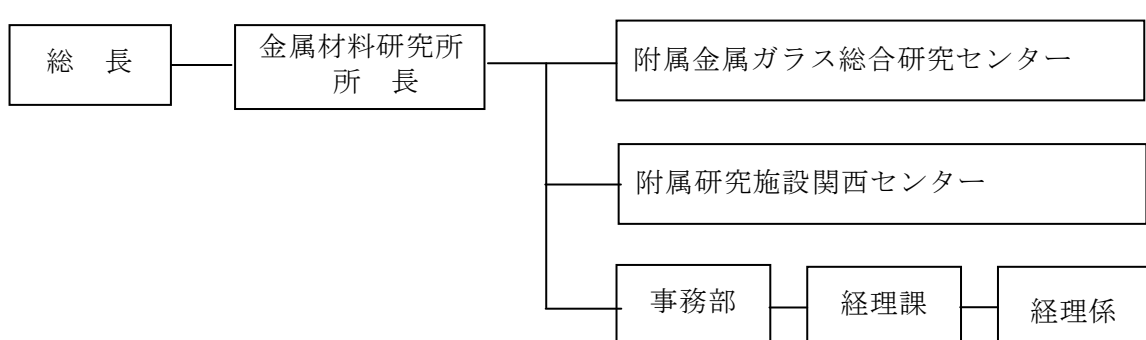
ヘイシンテクノベルク株式会社



兵神装備株式会社



国立大学法人東北大学



(3) 研究者氏名及び協力者

氏 名	所属・役職	備考
井上陽一	ヘイシンテクノベルク株式会社 研究開発グループ 部長	P L
橋間 隆	ヘイシンテクノベルク株式会社 研究開発グループ 課長	
川橋達也	ヘイシンテクノベルク株式会社 研究開発グループ 主任	
榊原教晃	兵神装備株式会社 技術部 課長	
早乙女康典	国立大学法人東北大学 金属材料研究所附属研究施設関西センター 教授	S L
網谷健児	国立大学法人東北大学 金属材料研究所附属研究施設関西センター 准教授	
福田泰行	国立大学法人東北大学 金属材料研究所 教育研究支援者	
久保愛三	公益財団法人応用化学研究所 常務理事	アドバイザー
山中 茂	株式会社丸エム製作所 製品開発部理事	アドバイザー
馬場 昇	株式会社日立製作所 日立研究所 環境材料プロセス研究部 主管研究員	アドバイザー
木村久道	公益財団法人電磁材料研究所 特任研究員 (元・国立大学法人東北大学 金属材料研究所 附属金属ガラス総合研究センター 准教授)	アドバイザー
所 敏夫	滋賀県工業技術総合センター 機能材料担当 専門員	アドバイザー
今田琢巳	滋賀県東北部工業技術センター 機械・金属材料担当 主任	アドバイザー
安田吉伸	滋賀県東北部工業技術センター 機械・金属材料担当 主任技師	アドバイザー

1－3 成果概要

電子基板等への塗布型微小ポンプ市場ニーズの高まりを受け、そこに適用する極微細ローターの実現を目指して、本支援事業を平成23から25年まで研究開発に取り組んできた。金属ガラスの微細成形技術として、その鑄造条件の探索とその成形仕上げ技術の確立、及び新たに極微小量ポンプを開発し、それに前記ローター成形品を適用し、各種塗布条件下において線や点塗布試験を実施し、諸性能特性を検証した。各サブテーマ毎の取り組み事項と成果について、以下に記す。

(1) 高精度微細ローターを鑄造するための合金選定と試作鑄造方法

本プロジェクトで開発する一軸偏心ねじポンプ式偏心ねじローター部品に求められる大きな弾性限界ひずみ、引張強度と耐食性を有する金属ガラスとして、ガラス形成能に優れた Pd 基 4 元系合金を選定し、開発に用いた。別途、将来の低コスト生産性を考慮した代替材としては、NiCrPBNb 合金が望ましいことも示した。

一方、量産化のための鑄造用合金ペレットの作製方法として、アルゴン雰囲気中でシリンダ内の合金を溶解した後、適量をシリンダ底のノズル穴よりピストンで溶湯を押し出す滴下式ペレット製造装置を開発した。また、ペレット製造装置や鑄造装置に用いられる材料のぬれ特性を明らかにし、溶湯液の流動特性制御のための基礎データを構築した。

(2) 微細ローターの仕上げ加工技術の確立、信頼性評価の実施

鑄造装置の課題である成形体内部に発生するポア抑制を図るため、流動抵抗を低減できるように改善した水平横置き、直線型の新しい溶湯加圧熱サイクル制御鑄造装置を開発した。これに用いる金型についても、離型性、熱伝導性、熱変形を考慮した材質の適正選定を行い、装置を完成させた。

次に、溶解温度、金型温度、射出速度、加工力、金型材質等の鑄造時の操作パラメーターによって、鑄造時の溶湯流動性、成形物の離型性、表面平滑性やパーティングライン（金型の合わせ目）、及び成形物のアモルファス状態、ポア欠陥の大きさと数がどうなるか等詳細検討を実施した。

種々の検討結果より、無欠陥までには至らなかったが目的とするアモルファス金属の微細ローターを成形する条件を見出すことができた。この鑄造成形物のパーティングラインを消失させるために、試作した転造加工装置を用いて適正条件で処理することにより、突起物の除去と流動変形による形状修正（仕上げ処理）ができることを確認した。

(3) 試作ローターの形状物性評価と、ディスペンサー性能の評価

成形した金属ガラス製ローターの実動下での信頼性を確保するため、今回ねじり型の回転曲げ疲労試験機を開発した。

本開発の目的となる極微量ポンプ(ディスペンサー)の基本設計に基づき、従来製品の長さの約 1/2 となる試作機を製作した。また、吐出流量を高精度で計測できる精密流量計測システムも構築した。

鑄造成形した金属ガラス製の試作ローターを搭載した極微量ポンプ（ディスペンサー）に組み込み、ポンプ性能と、線及び点描き試験を実施した。吐出性能線図は、 $1\sim 90\text{min}^{-1}$ の超低速域においても回転速度に比例した吐出性能を示した。回転当たりの吐出量は $0.58\mu\text{L/rev}$ となり、目標値であるポンプ容積 $1.0\mu\text{L/rev}$ を満足する事を確認した。

さらに、卓上型ロボット塗布システムと組み合わせて、線塗布試験を実施した結果、約 0.053mm 幅のきれいな線を引くことができた。当初の目標値である塗布線幅 0.06mm を達成した。また、繰り返し点書き描画においても、塗布されたドット径を測定したところ直径が約 0.30mm であり、目標値を達成することができた。

1—4 当該研究開発の連絡窓口

当該研究開発の連絡窓口は、事業者である下記の者が勤める。

井 上 陽 一

ヘイシンテクノベルク株式会社

〒529-0261 滋賀県長浜市高月町東物部1020

E-mail : Yoichi_Inoue@mohno-pump.co.jp

TEL : 050-7102-5371

FAX : 0749-85-4579

第2章 本 論

2-1 高精度微細ローターを鋳造するための合金選定と試作鋳造方法

2-1-1 合金の選定

一軸偏心ねじポンプのローター部品に求められる材料特性は、微細精密かつ複雑形状への加工が可能、回転曲げ疲労強度、耐摩耗性、耐食性が十分な信頼性を維持できることになる。微細なローターを NC 機械による加工では、切削抵抗による軸のたわみ変形が生じるため、目標の精度を実現するためには樹脂の射出成形のような特性が要求される。非晶質の樹脂では溶融固化時の体積変化が結晶性樹脂と比べると小さいので、結晶による異方性がなく、ナノメートルオーダーでの等方均質性が得られ、精密成型が可能である。一方、金属材料の鋳造においても、樹脂成形と同様の精密鋳造を可能にする材料が金属ガラスである。図 2.1 に示されるように、溶融時における構成原子のランダムな構造（アモルファス）が過冷却液体温度領域を通過して冷却・固化されるため、体積変化が小さく、鋳造欠陥が生じ難い。しかし、樹脂に比べると金属の溶融温度が高いものの、図 2.2 に示されるようにダイカストにおける上限温度 1100℃以下の合金がほとんどであり、このことも金属ガラスを用いた溶融固化成形法が有利な点である。金属ガラスの疲労試験では、データのばらつきが大きいのが特徴であり、その原因は鋳造欠陥であるボイドやポア、金型内で攪拌された半凝固の溶湯同士によって形成された不連続界面である。したがって、金属ガラスを鋳造のまま使用するには、鋳造時の欠陥を皆無にするか、ボイドおよび半凝固による不完全界面を二次加工にて除去する必要がある。そのためには、①溶湯加圧鋳造法あるいは、②成形後に再度加熱し、ガラス遷移以上の温度での過冷却液体域で超塑性変形を与えることが有効であると考えられる。①の方法では、金属ガラスの冷却過程において、粘性の低い状態で溶湯を加圧するプロセスが必要である。アモルファス合金を得るためには、臨界冷却速度の小さな金属ガラスを選択する必要がある、結果として大きな塊としての合金が作成される。

(1) 合金組成と物性値との関連

従来の研究^{1) 2) 3)} から、最大直径 10mm 以上の主な金属ガラスと、その熱的性質を表 1 に示す。Zr 基金属ガラス、Pd 基金属ガラス、Pt 基金属ガラス、等があり¹⁾、Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀²⁾ において最大直径 80mm 以上が得られている。

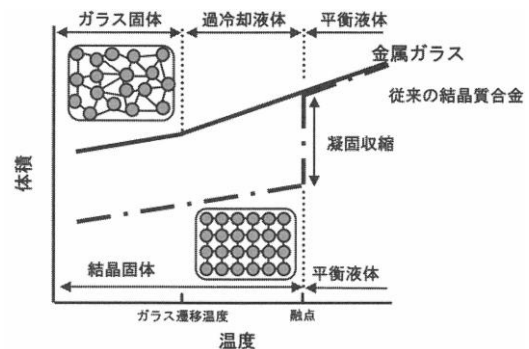


図 2.1 金属鋳造時の相変化に伴う体積変化

この Pd 基合金は、臨界冷却速度が小さく、融点も 848K (575℃) と低く、石英ガラスとの反応もないことから、選定することにした。

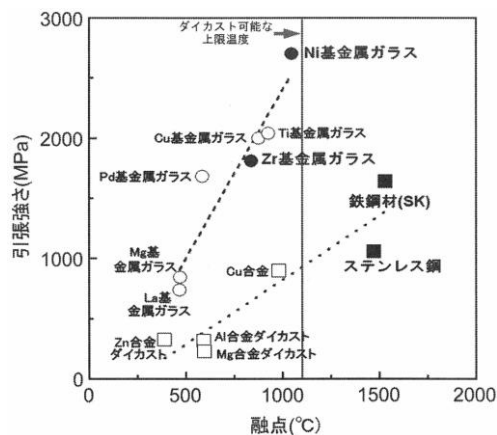


図2.2 従来金属と金属ガラスのダイカストにおける各合金の溶融温度とその引張り強度

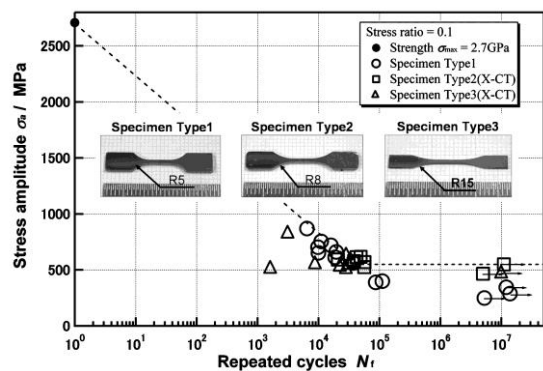


図2.3 $\text{Ni}_{53}\text{Nb}_{20}\text{Ti}_{10}\text{Zr}_8\text{Co}_6\text{Cu}_3$ 金属ガラスの疲労試験に及ぼす試験片形状と作成法

表1 最大直径 20mm 以上の主な金属ガラスの熱的性質

合金組成 (原子%)	作製方法	T_g/K	T_x/K	T_m/K	$\Delta T_x/\text{K}$	D_c/mm
$\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5\text{Cu}_{30}$	吸引 casting 法	690	780	1100	90	30
$\text{Zr}_{55}\text{Ti}_{10}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Be}_{22.5}$	銅鑄型 casting 法	625	705	937	80	50
$\text{Zr}_{48}\text{Cu}_{36}\text{Ag}_8\text{Al}_{18}$	銅鑄型 casting 法	685	786	1143	101	25
$\text{Zr}_{46}\text{Cu}_{30.14}\text{Ag}_{8.36}\text{Al}_8\text{Be}_{7.5}$	銅鑄型 casting 法	705	811	1103	106	73
$\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$	水焼入れ法	576	678	—	102	25
$\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$	水焼入れ法	572	663	848	91	>80
$\text{Pt}_{42.5}\text{Cu}_{27}\text{Ni}_{9.5}\text{P}_{21}$	水焼入れ法	515	589	873	74	20

T_g : ガラス遷移温度、 T_x : 結晶化温度、 T_m : 融点、 ΔT_x : 過冷却液体温度幅

D_c : アモルファス構造の得られる最大直径

(2) 铸造用ペレット合金量産化に向けた滴下式合金ペレット製造装置の開発

ローターの铸造に用いる合金選定に基づき、高品質なペレットの安定的な製造法の確立が必要と考え、そのための製造装置を開発することにした。従来は母合金をアーク溶解法によって得ることが多く不純物の混入が避けられず、また手間も要した。これを解決する方法として、図 2.4 に示す溶湯の滴下法を検討した。本手法は球形単分散金属ガラスの製造方法として知られており²⁾、アーク溶解における秤量と溶解プロセスを一つの工程に短縮することが可能な

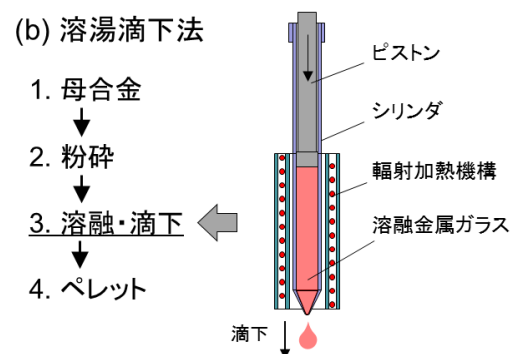


図 2.4 溶湯の滴下法

ため高効率化が期待される。また、滴下量をシリンダの変位制御によって調整することが可能なため、ペレットの重量を自在に調整できることが特徴である。

図 2.5 に開発した装置の外観写真を示す。溶融合金の酸化を防ぐために、チャンバー内はアルゴン雰囲気である。図 2.5 (b) に示したシリンダは溶融合金との化学的な反応を防ぐ必要があるため石英ガラス製とした。同様の理由でピストンも石英ガラス及びジルコニア (ZrO_2) 製とした。滴下時のノズル内における金属ガラスの流動が十分

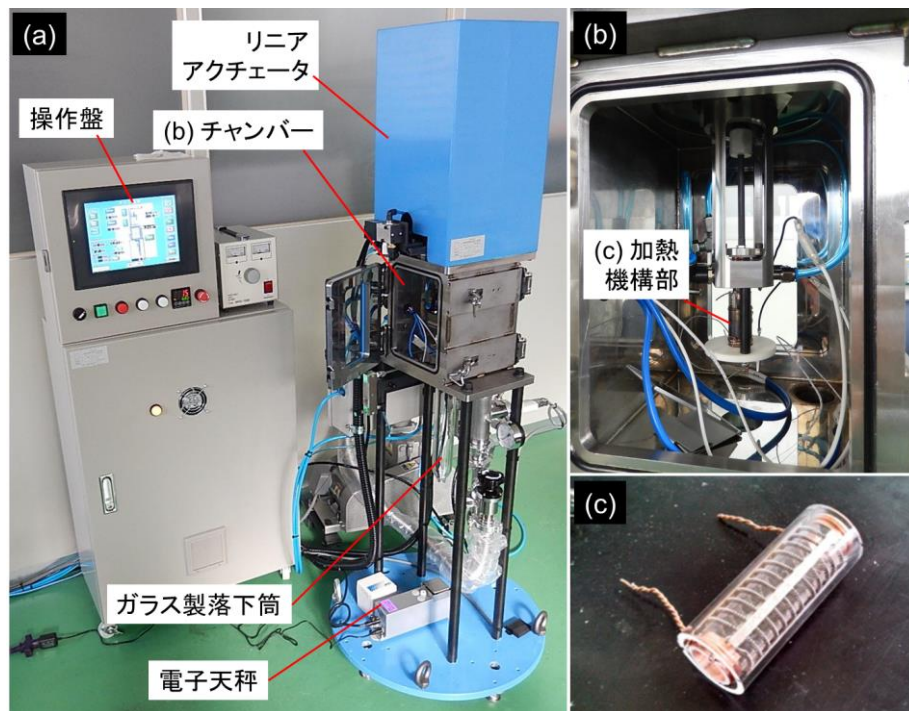


図 2.5 滴下式ペレット製造装置の(a)全体、(b)チャンバー内部、及び(c)輻射加熱機構の外観写真

に確保できる粘性係数が $\eta = 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 程度と想定すると、溶解温度は $700 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度となる³⁾。本材料系では 1000°C 以下で比較的低温域であるため、加熱機構はカンタル製の細線を二重螺旋状に巻いて石英管内に設置した。輻射熱によって内部に投入された合金を溶解し、リニアアクチュエータによってピストンを押し込み、溶湯がノズル先端から滴下する。この液滴はアルゴン雰囲気で冷却されながら電子天秤上に設置された冷却水に着水して凝固する。図 2.6 には溶解温度 $T = 700^\circ\text{C}$ 、ノズル穴径 0.51 mm 、ピストンを 0.1 mm/s の一定速度で駆動した場合に連続的に滴下され、冷却水中に落下した Pd 基金属ガラスのペレット（重量は $W = 0.028 \text{ g}$ ）外観を示す。



図 2.6 試作したペレットの外観写真

参考文献

- 1) 井上 明久 , 張 偉, “センチメートル級の直径をもつバルク金属ガラスの開発と応用”, 未来材料 6-9(2006), pp.10-17.
- 2) N.Nishiyama and A.Inoue, “Flux treated PdCuNiP amorphous alloy having low critical cooling rate”, Materials Trans, JIM, 38-5(1977), pp.464-472.
- 3) H.B.Lou, X.D.Wang, F.Xu, et al., “73 mm-diameter bulk metallic glass rod by copper mould casting”, Appl. Phys. Lett. 99(2011), 051910.

2-1-2 ニアネットシェイプ成形のための溶湯加圧熱サイクル制御鑄造法の開発

Pd 基金属ガラスの連続冷却曲線を図 2.7 の左上に示した。加熱された溶湯が融点 T_m 点以下の温度に冷却された場合、およそ 10^6K/s 以上の冷却速度で冷却することによって、アモルファス個体を得ることができる。この臨界冷却速度を R_c として図中には破線で示してある。この冷却曲線が図中のノーズ実線と交差すると結晶化してしまう。このノーズ位置は、P 基金属ガラスの場合には、およそ 10^3s の位置にあり、準平衡加熱下で計測された $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ 金属ガラスの融点 $T_m=848\text{K}(575^\circ\text{C})$ 、結晶化温度 $T_x=663\text{K}(390^\circ\text{C})$ で平均冷却速度を求めると、およそ 0.1K/s となる。結晶化温度よりガラス遷移温度 $T_g=572\text{K}(299^\circ\text{C})$ まで冷却を行うことにより、熱的に安定な金属ガラスが得られる。そこで、図 2.7 右には、金属ガラスの溶湯加圧鑄造方式の原理とプロセスを示した。まず、(A) 金属ガラスを部材の容積に相当するように計量されたプリフォームを準備し、石英管ノズル内で加熱、溶融させる。温度 $(T_m+100)\text{K}$ での粘性は 10^0Pas 程度であり、(B) 金型内に差圧鑄造にて射出・充填を行う。次に (C) 溶湯を金型内で加圧し、ポアを消失させる。その際、高速応答性に優れるリニアモータを使用している点に本装置の特徴があり、Pd 基金属ガラスよりもガラス形成能の小さな金属ガラス合金にも適用できる構造を設計した。その後 (D) 金型内の冷却用流路に水あるいはミストを流し、ガラス遷移温度 T_g 以下の温度まで急冷し、アモルファス構造体を得る。(E) では、2 分割金型構造から鑄造部品を取り出す。

最初に製作装置では、(A)溶湯の到達距離が短い、成形体内部にポアが発生する等の課題があったので、加圧方式をリニアアクチュエータによるピストンで加圧するピストン加圧方式へ変更した。加圧ピストンを駆動しているリニアサーボアクチュエータを射出加圧軸として流用でき、真空チャンバーの改造も最少で済むことから横型方式を採用した。ポアが発生する原因としては、射出加圧に使用している Ar ガス自体の影響もあることにより、上述の通りピストン加圧だけで射出することにした。図 2.8 に改造した溶湯加圧熱サイクル制御鑄造装置の真空チャンバー内の模式図を示す。溶湯を金型内へ射出する加圧軸とキャビティの長手軸を同軸上に配置する。左側の溶湯加圧ピストンは従来よりもピストン長を長くし、ピストンをあらかじめキャビティ内へ挿入しておき、射出ピストンの動き（溶湯の注入）と同期して所定の位置まで後退させることにより、キャビティ内での湯暴れを防止することができる。

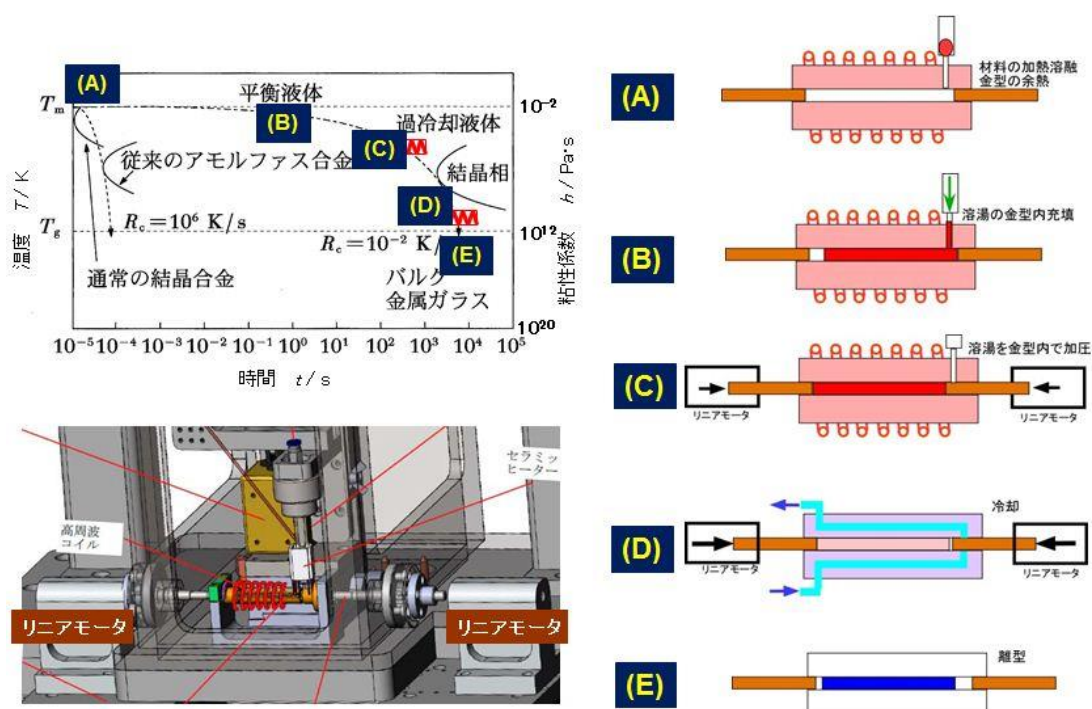


図2.7 金属ガラスの溶湯加圧 casting 方式の原理とプロセス、装置

ノズルに関してはこれまで破損頻度の高かったノズル先端部を別部品とし先端部のみ容易に交換できる構造にした。実際に改造した溶湯加圧熱サイクル制御 casting 装置のチャンバー内とその全景の写真を図 2.9 と図 2.10 に示す。

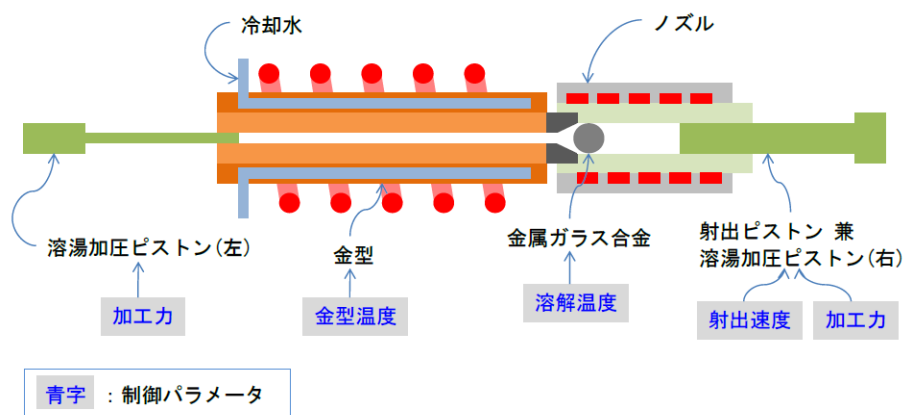


図 2.8 改造する溶湯加圧熱サイクル制御 casting 装置の模式図

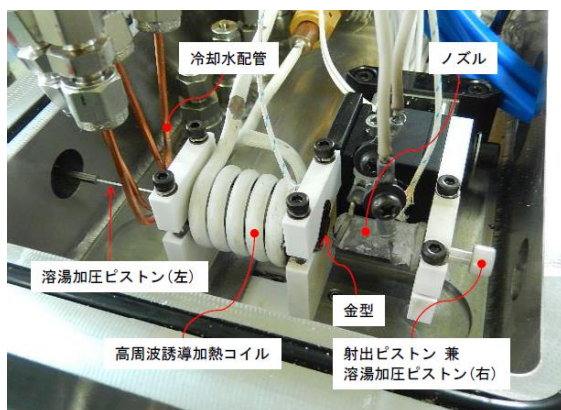


図 2.9 溶湯加圧熱サイクル制御鋳造装置
のチャンバー内写真



図 2.10 溶湯加圧熱サイクル制御鋳造
装置の全景

次に、この鋳造装置に用いる金型について示す。本鋳造装置に用いた微細ローター用の金型を製作した、構造は2つ割構造で それらを合わすことによりらせん状の柱状ローターを鋳造できるものである（図 2.11）。

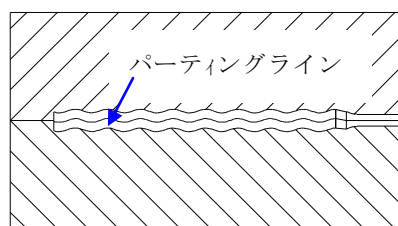
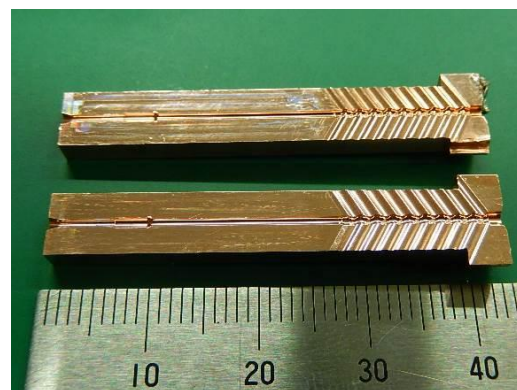


図 2.11 微細ローターのパーティング
ラインの関係と作製金型



2-1-3 転造仕上げ加工法の開発

割型で成形された溶湯加圧鋳造後のローターは、分割合わせ部となるパーティングラインを完全に消失させることが難しい。そこで、この部位を転造加工によって塑性変形を加えることで、微細ローターの目標とする形状精度を実現するための転造装置の設計と開発を行った。動作原理は図 2.12 に示すように、転造ダイスに鋳造した微細ローターをセットし、XA 軸および Y 軸を駆動させ、XB 軸は固定した状態で転造加工を行った。また、XA 軸を駆動している間、Y 軸は固定した。転造ダイスを図 2.13 に、装置全体を図 2.14 に示す。

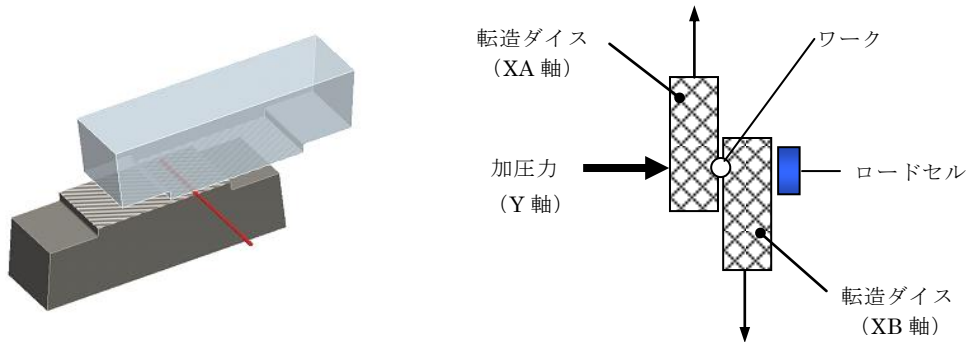


図 2.12 転造ダイスの動作モード原理図

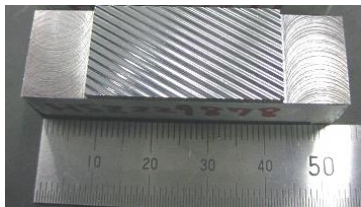


図 2.13 微細ローター用ダイス



図 2.14 転造加工装置

2-2 微細ローターの仕上げ加工技術の確立、信頼性評価の実施

2-2-1 溶湯加圧条件の適性化

(1) 溶湯注入時の金型内の流動解析

金属ガラスの注入時の流動状況を円管内のポアズイユ流れを仮定して、注入圧力と注入完了時間（平均径 0.8mm の流路を 48mm 流動する時間）の関係を求める。

円管内のポアズイユ流れの平均流速 w [m/s] は、

$$w = \left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{R^2}{8\mu}$$

p : 圧力 [Pa]、 x : 流路方向座標 [m]、 R : 円管半径 [m]、 μ : 粘性係数 [Pa·s] で表されるので、ある流入位置 x までの圧力勾配（流入先端部圧力=0、成形品内圧力=規定加圧）から上記式より平均流速 w 算出し、その流速で微小時間内に流入する距離を求めた。またその位置での圧力勾配を修正し、次微小時間内の平均流速を算出した。

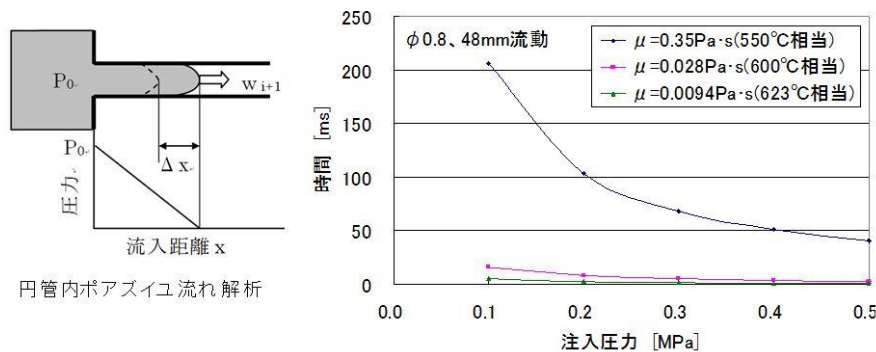


図 2.15 金属ガラスと金型が同一温度と仮定した場合の溶湯の流入挙動

金属ガラスと金型は同一温度に保たれているとして、注入時間を見積った結果を図 2.15 に示した。この結果より、もし金型の温度の影響を受け難い 100ms 以内で、かつ 0.3MPa 程度の注入圧力で注入する場合には、550℃以上に溶湯を保持しなければならないことがわかる。

(2) 金属ガラスの粘性係数の温度変化を考慮したモデルでの円管内流動の解析

金属ガラスの外表面を金型温度に規定した場合の金属ガラスの平均温度の履歴を図 2.16(a)に示す。また、この平均温度の履歴を用いて算出した金属ガラスの注入時の流動挙動を図 2.16(b)に示す。注入圧力 0.1MPa でも 10ms 間に注入が終わるため、初期温度条件が重要になるものと予想される。

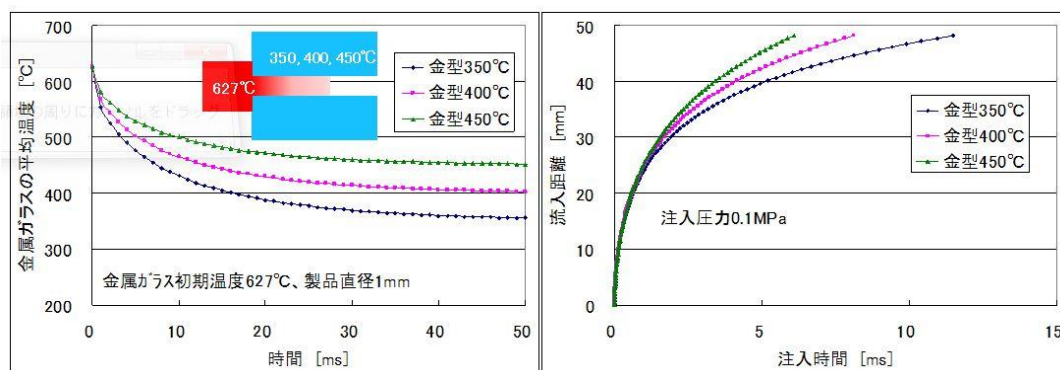


図 2.16 (a)各金型温度へ注入した場合の平均温度 (b)平均温度で算定した溶湯の流入挙動

(3) 溶湯内の温度分布について

予め所定温度に加熱された金型内に、金属ガラスが瞬時に充填されたと仮定した後の金型および金属ガラスの冷却挙動を解析した。金型外面を断熱とし、円筒断面内の2次元非定常伝熱解析を行った結果を図 2.17 に示した。金属ガラスと金型の境界面、金型外表面の温度履歴を示すと、何れの場合においても、金型温度は金属ガラスの保有熱のため 20K 程度上昇しているが、金属ガラスの中心温度は 100ms 後には金型温度と同じになる。したがって、金属ガラスの温度は、非常に短時間内に金型温度とほぼ同じ温度に低下してしまうため、初期設定温度が重要と推測される。

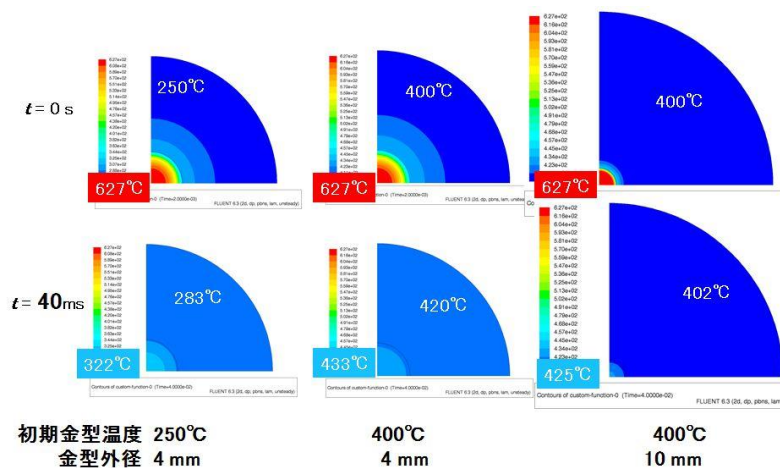


図 2.17 金型内に充填された溶湯の温度解析

(4) 溶湯加圧熱サイクル制御 casting 装置を用いた casting 条件の検討

溶湯加圧熱サイクル制御 casting 装置を用いた加工において最も重要なことは、製作される金属ガラス製ローター部品全体がアモルファス構造となるような適正な冷却過程が得られることと、ローター部品内部に欠陥（ポア）を作らないように過冷却液体状態での加圧サイクルを適正化することである。具体的には結晶化度が 5 パーセント以下、内部欠陥が 0.1mm 以下となるような成形加工条件を導き出すことを目標とし、微細ローターの casting を実施した。

改造後の溶湯加圧熱サイクル制御鑄造装置の模式図と本装置において設定できる主なパラメータは図 2.8 に示したとおりである。本鑄造法は以下のようなステップで鑄造を行う。

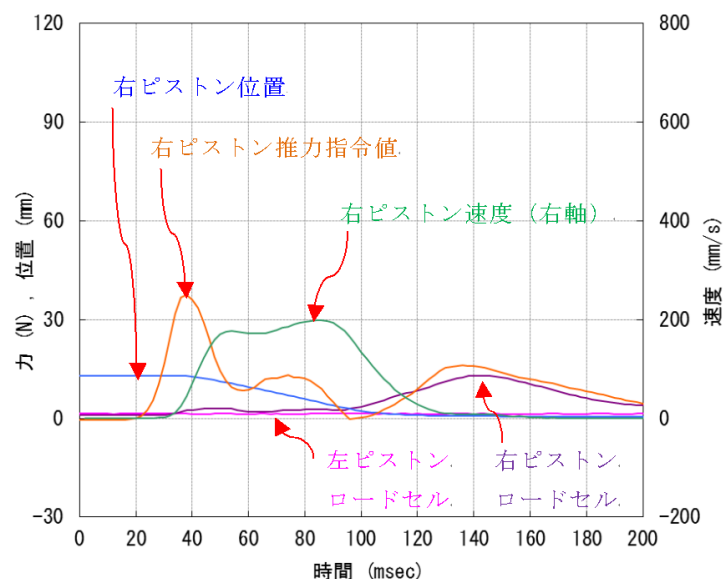
- a) 金属ガラス合金を試料溶解ノズル内に投入する
- b) チャンバー内を真空引きする
- c) 金属ガラス合金を抵抗加熱により溶解する
- d) c)と同時に金型を高周波誘導で加熱する
- e) ノズルを金型注入口に押し当てる（ノズルタッチ）
- f) 金型が所定温度になった後、射出ピストンをリニアサーボアクチュエータにより駆動し溶湯を金型内へ射出する
- g) 溶湯加圧ピストン（左右）を制御し、過冷却液体状態の金属ガラスを加圧加工する
- h) 金型を冷却する
- i) チャンバー内を大気圧に戻し、金属ガラス成形品を取り出す

なお、射出ピストンと右側溶湯加圧ピストンを一つのピストンで兼用している。f)の射出工程は、リニアサーボアクチュエータを位置・速度制御で駆動し、注入完了と同時に推力制御に切り替え g)加圧加工を行っている。

溶解温度、金型温度、射出速度、加工力などを種々変化させて、その際の実時間応答を計測させつつ、成形された鑄造品の形状や X 線 CT による評価を実施した。鑄造時の計測例を図 2.18 に示す。

金型の温度を室温から上げていったときの成形品の X 線 CT による撮影した結果を図 2.19 に示す。金型温度が低いとポアが多くあるが、温度上昇に伴い減少していき、同じ温度でも若干のばらつきは見える。諸因子の最適化を実施した結果を図 2.20 に示す。

図 2.18 鑄造時における
加圧ピストンの位置、
加工力の測定例



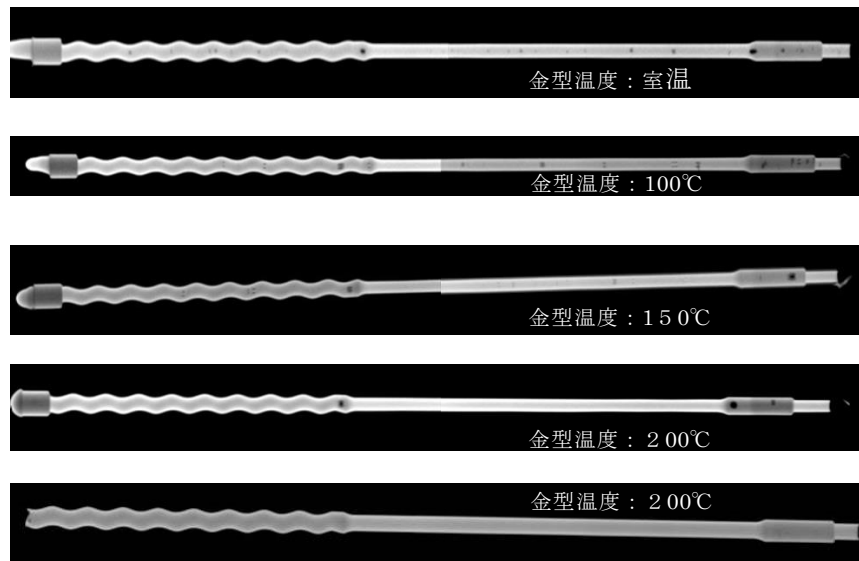


図 2.19 ローター鑄造成形品の X 線 CT 撮影例



図 2.20 極微量塗布ポンプ用ローター試作品

2-2-2 転造加工条件の決定

溶湯加圧熱サイクル制御鑄造法により成形された微細ローターは金型分割面にパーティングラインが出る。これを今回製作した転造加工装置で加工することにより、パーティングラインの段差を 0.005mm 以下に抑えることができた。また、鑄造時の上下金型の芯ずれによる真円形状からのずれについても転造加工により改善できた。図 2.21 に転造加工前(a)と転造加工後(b)の断面輪郭形状測定結果を示す。(a)を見るとパーティングラインに加え、上下金型の芯ずれにより断面形状が真円になっていない様子が確認できる。これを転造加工すると、真円度 0.02mm まで改善でき、またパーティングラインの段差は約 0.005mm とすることができた (図 2.22)。

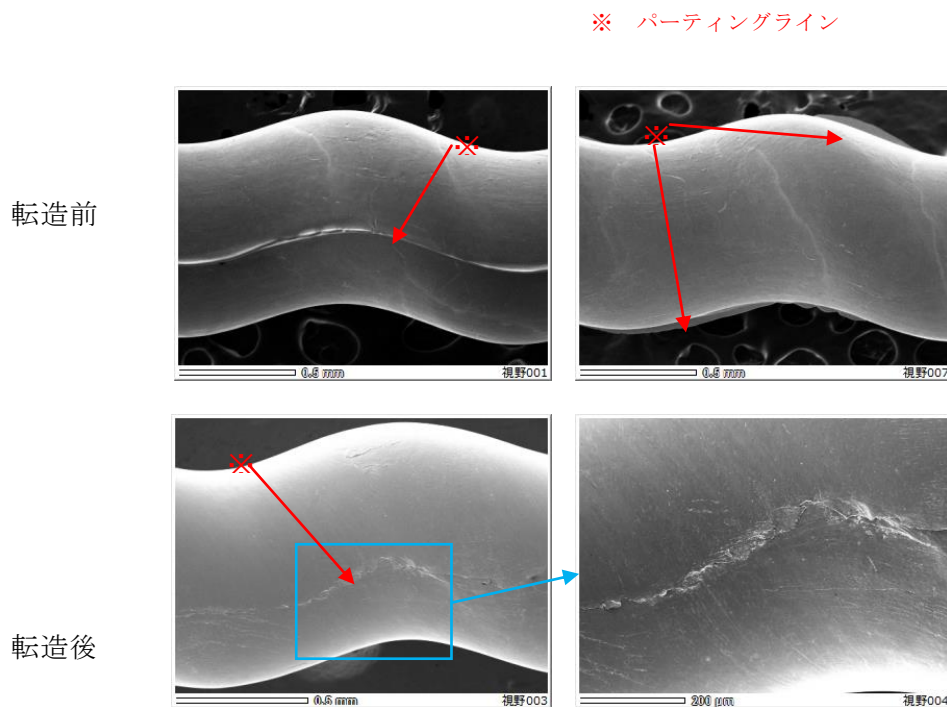


図 2.21 微細ローターのパーティングラインの SEM 写真

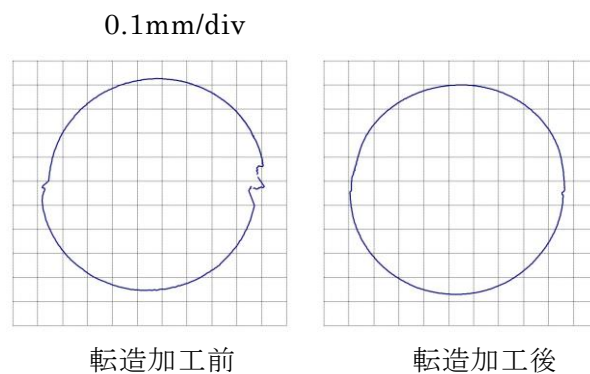


図 2.22 微細ローターの断面輪郭形状

2-3 試作ローターの形状物性評価とディスペンサー性能の評価

2-3-1 試作ローターの形状、強度の評価

溶湯加圧熱サイクル制御鋳造法により成形した微細ローターおよび丸棒の疲労特性を評価するための試験機を製作した。回転曲げ疲労試験機の概要を図 2.23 に示す。ポンプ運転時のローターの負荷状態を再現できるように、鋳造した試験片を使用し、スライド部を介して一軸偏心ねじポンプの偏心量を設定し、駆動機による回転させて繰り返し荷重を与える。

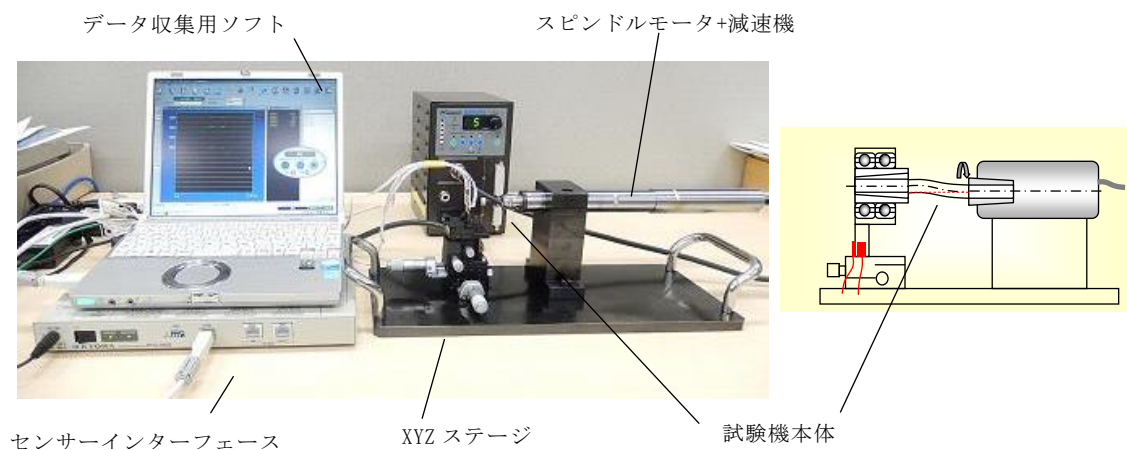


図 2.23 回転曲げ疲労試験機

成形した丸棒から直径 1mm、長さ 34mm の試験片を切り出し回転疲労曲げ試験を実施した。試験前の X 線画像を図 2.24(a) に示す。中央付近には成形時に発生したと見られる少し大きめのポアが 4 個ある試験片を用いて試験を実施した。

試験片に与える偏心量は、極微量塗布ポンプのローターシャフト部が偏心回転時に受ける曲げ荷重（約 46MPa）を参考とし、回転速度 1000min^{-1} で実施した。回転疲労曲げ試験の結果、疲労回数 10^7 回の回転曲げにおいて、図 2.24(b) に示すように鋳造した $\phi 1\text{mm}$ の丸棒材に表面亀裂は無く、破損が生じないことを確認した。これにより、ポアを含んだ鋳造品でも、ローター強度に問題はなく使用が可能なことを確認した。



図 2.24(a) 疲労曲げ疲労試験に使用した試験片

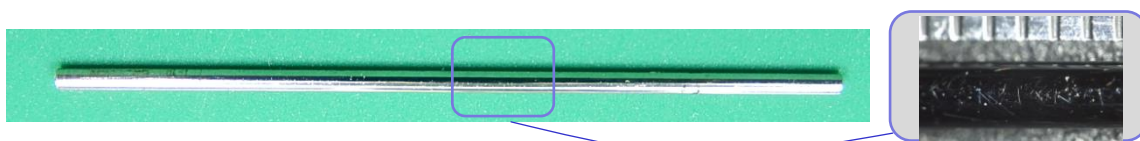


図 2.24(b) 疲労試験 10^7 回後の試験片表面

2-3-2 ポンプの設計

目標値である最小線幅 0.06mm、ドット径 0.3mm を目指し、ポンプ容積 1.0 μ L/rev 以下の極微量塗布ポンプの設計開発を行い、その製作を行った。ポンプの主要構成部品となる、液状ゴム射出成形により製作したフッ素ゴム製のステーターと、金属ガラスで鋳造した微細ローターを組み合わせ、超小型 AC サーボモータを駆動源として用いた極微量塗布ポンプを完成させた。また、これを使用して線塗布や点塗布を行うため、塗布量や逆転吸込量を精密に制御するためのコントローラを新たに製作し装置として完成させた。

今回開発した極微量塗布ポンプは、駆動部から吐出側ニードル先端までを含めたポンプ全長は 97.5mm となり、現行製品の最小サイズである (3HD010 型) 188.6mm に比べ 48% のコンパクト化を実現した。極微量塗布ポンプの完成写真をそれぞれ図 2.25 に示す。

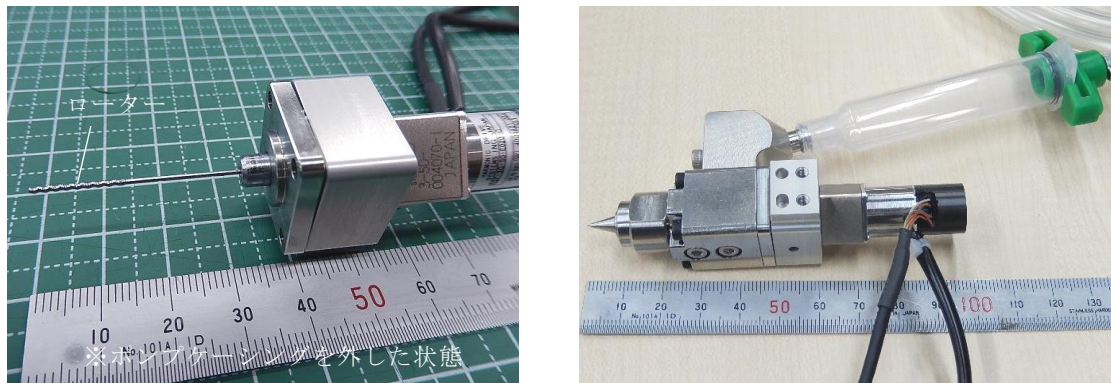


図 2.25 極微量塗布ポンプの完成写真

次に、最小線幅 0.06mm を実現するための極細ニードルを設計、製作した。ニードルの孔径の仕様は、目標とする塗布線幅に等しい直径 0.06mm とし機械加工で製作した結果、当初の狙いどおり直径 0.06~0.07mm に仕上げる事ができた。

2-3-3 流量特性、塗布試験の評価

ポンプ連続運転時の流量特性を nL (10^{-3} mm³) レベルで計測するため、流量計、圧力計、配管、フィッティング、バルブ類をユニット化した精密流量計測システムを構築した。これにより、ポンプの回転数と吐出流量の関係を示す吐出性能を計測した。精密流量評価システムの概要を図 2.26、図 2.27 に示す。

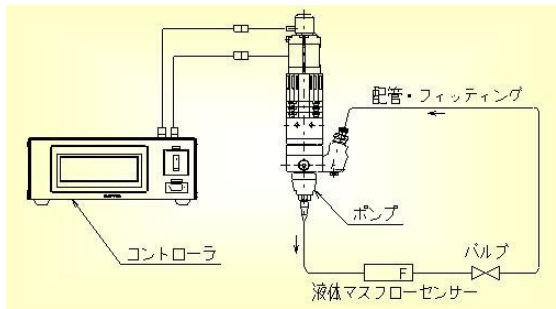


図 2.26 精密流量計測システムの概要



図 2.27 精密流量計測システム

試験液として超純水を使用し、流量は液体マスフローセンサーで 1ms 毎にサンプリングして測定した平均値を、さらに精密天秤による測定も併用して吐出流量をプロットした。極微量塗布ポンプの瞬間流量波形および吐出性能線図を図 2.28 に示す。1～5 min⁻¹ の超低速域において測定した吐出性能線図は、液体マスフローセンサーと天秤では 4%程度の差異は見られたが、回転速度に比例した一直線のきれいな吐出性能を示した。これより、1回転当たりのポンプ容積を求めると、ポンプの容積は 0.58 μL/rev となり目標値であるポンプ容積 1.0 μL/rev を満足することを確認した。

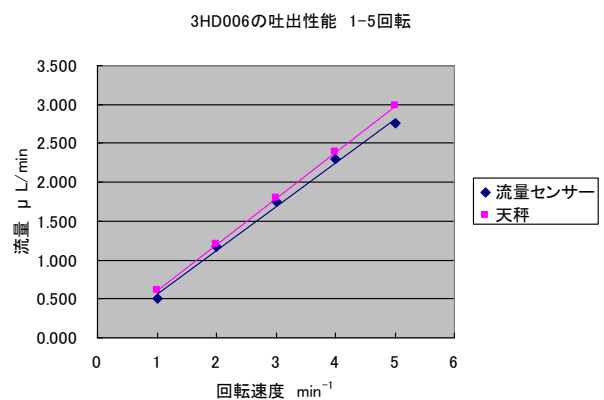


図 2.28 極微量塗布ポンプの吐出性能線図

次に、極微量塗布ポンプを 3 軸卓上ロボットに搭載し、極細ニードルを用いて線塗布・点塗布の 2 種類の塗布試験を実施した。ポンプコントローラを外部接続した卓上型ロボット塗布システムを製作した様子を、図 2.29 に示す。塗布試験はポンプローターを連続で回転させて一定幅の線を描く線塗布と、パルス制御でローターを微小回転（1 パルス 0.1°）させてドットを作る点塗布の 2 種類を実施した。試験液は木工用ボンドを食紅で赤に着色して使用し、ニードルは 0.06mm を用いワーククリアランス 0.05mm に調整した。



図 2.29 卓上型ロボット塗布システム

まず最初に行った線塗布試験では、回転速度を 2.5min^{-1} に固定してロボット移動速度時の線塗布試験の結果を図 2.30 に示す。

次に、上記のニードルにしロボット移動速度を 50mm/sec に上げて塗布を行った。その結果、約 0.053 mm 幅のきれいな線を引くことができ、目標値である塗布線幅 0.06mm を達成することができた。

【線塗布条件】

ポンプ回転速度： 2.5min^{-1} 、逆転吸込： $10\text{min}^{-1}\times 0.1\text{sec}$ 、ロボット塗布速度： 50mm/sec

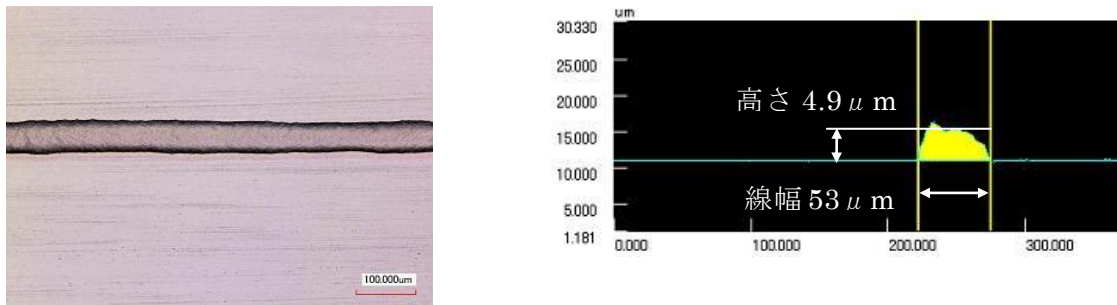


図 2.30 0.06mm ニードルを用いた塗布線と断面形状（レーザ顕微鏡画像）

点塗布の試験においては、超微量を塗布するためにパルス制御を用いてポンプローターの回転量を 200 パルス (20°) に設定し、クリアランスは 0.1mm にし、1 サイクルで 15 点を連続して点塗布した結果を図 2.31 に示す。液切れ時の流れによって若干の乱れは見られたもののほぼ満足の行くドット形状が得られ、ドット径は 0.30 mm であり目標値を達成することができた。

【点塗布条件】

ポンプ回転速度： 20min^{-1} 、回転量：200pls (20°)、逆転吸込： $30\text{min}^{-1}\times 0.1\text{s}$



図 2.31 0.06mm ニードルを用いた点塗布と断面形状

第3章 全体総括

3-1 成果の総括

電子基板へのペースト塗布等の微小ポンプ市場ニーズ等の高まりを受け、そこに適用する極微細ローターの実現を目指して、本支援事業を平成23年度から平成25年度までの3年間、この研究開発に取り組んできた。ローターの微細成形技術として、金属ガラスの casting 条件の探索とその成形仕上げ技術の確立、及び新たに極微量ポンプを開発し、そこへ上記ローター成形品を適用し、各種塗布条件下において線や点塗布試験を実施し、諸性能特性を検証した。実施した各サブテーマ毎の取り組み事項と成果について、以下に示す。

(1) 高精度微細ローターを casting するための合金選定と試作 casting 方法

小型の一軸偏心ねじポンプのローター部品に求められる大きな弾性限界ひずみ、引張強度と耐食性を有する金属ガラスとして、ガラス形成能に優れた Pd 基 4 元系合金を選定し、開発に供した。また将来の低コスト生産性を考慮した代替材としては、NiCrPBNb 合金が望ましいことを示した。

一方、量産化のための casting 用合金ペレットの作製方法として、アルゴン雰囲気中でシリンダ内の合金を溶解した後、適量をシリンダ底のノズル穴よりピストンで溶湯を押し出す滴下式ペレット製造装置を開発した。また、装置に用いる材料と熔融金属ガラスとの接触角や表面張力に代表される界面特性を明らかにし、滴下重量の制御やローター casting における流動特性制御のための基礎データを構築した。

(2) 微細ローターの仕上げ加工技術の確立、信頼性評価の実施

casting において課題となる溶湯の到達距離、ポアの抑制を改善するため各種検討した結果、流動抵抗を低減できるようにした水平横置き、直線型の新しい溶湯加圧熱サイクル制御 casting 装置を開発した。これに用いる金型についても、離型性、熱伝導性、熱変形を考慮した材質の適正選定を行った。casting 時の溶解温度、金型温度、射出速度、加工圧、金型材質等の適正化により、欠陥の殆どないアモルファス状態の微細ローターを成形する条件を見出すことができた。

次に、cast 成形物には金型の合わせ目となるパーティングができ、これを消失させるために、3 軸制御型の転造装置を設計製作した。この転造加工装置を用いて、適正条件で処理することにより突起物の除去と流動変形により形状修正ができることを確認した。本開発ローターとあわせて運転する超微小のゴム製ステーターについても液状ゴム成形技術を適用して試作し、目標精度を達成した。

(3) 試作ローターの形状物性評価と極微量塗布ポンプ性能の評価

成形した金属ガラス製ローターの実動下での信頼性を確保するため、新しく

ねじり型の回転曲げ疲労試験機を開発した。

本研究開発の目的となる極微量塗布ポンプ（ディスペンサー）の基本設計に基づき、従来製品長さの 48%となる試作機を製作した。また、吐出流量を高精度に計測できる精密流量計測システムも構築した。鋳造成形した金属ガラス製の試作ローターを搭載した極微量塗布ポンプに組み込み、ポンプ性能と、線及び点描き試験を実施した。吐出性能線図は、 $1\sim 90\text{min}^{-1}$ の超低速域においても回転速度に比例した一直線の理想的な吐出性能を示した。回転当たりの吐出量は $0.58\mu\text{L/rev}$ となり、目標値であるポンプ容積 $1.0\mu\text{L/rev}$ を満足することを確認した。

さらに、卓上型ロボット塗布システムと組み合わせて、線塗布試験を実施した結果、約 0.053mm 幅の均一な線を引くことができた。当初の目標値である塗布線幅 0.06mm を達成した。また繰り返し点書き描画においても、塗布されたドット径を測定した結果、直径が 0.30mm であり目標を達成することができた。

3-2 今後の課題と事業化予定

(1) 今後の課題

今回の開発で実施した金属ガラスの試作ローターにおいて、Pd 基合金に含まれる残存酸素による結晶化度が促進される現象もあり、定量的に詰めていく必要がある。また鋳造成形物に残る材料欠陥（ポア）を低減することはできたものの完全に消滅させたわけではない。

この残存欠陥の大きさと数が、ねじれ疲労特性にどのような関係となるかを今後明らかにし、製造許容値を見極め、ばらつき公差を設定していく必要がある。

また、今回用いる Pd 基合金量は少なく、製品システム全体価格に占める割合は小さいので現実に適用することは可能な範囲と考えている。しかし安価とは言いがたく、大量生産に活用するとなるとより価格の低い材料の代替化は必須であり、Ni 基合金の方が望ましく考えられる。今後は、この材料での鋳造試作検討も実施したく考えている。

(2) 事業化予定

目標仕様を満足する試作機性能を確認することができた。今後は上記の課題である製造条件や製品公差に対する信頼性範囲の見極めをし、安定した量産計画に向け煮詰めていく必要がある。

一方、変化していく市場ニーズの詳細も見極めながら、顧客の要望に応えられる製品仕様を決め直し、2～3 年かけ商品化を推進していく予定である。

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成１１年法律第４２号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。」