

システム技術開発調査研究
20-R-11

金属ガラスの実用化 / 製品化に 関する調査研究報告書

要 旨

平成21年3月

財 団 法 人 機 械 シ ス テ ム 振 興 協 会
委託先 財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育など、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人JKAから機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムに関する調査研究など補助事業、新機械システム普及促進補助事業を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会(委員長 東京大学 名誉教授 藤正 巖氏)を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を実施しております。

この「金属ガラスの実用化/製品化に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人次世代金属・複合材料研究開発協会に委託して実施した調査研究の成果であります。今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成21年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

地球にやさしく、資源やエネルギーを浪費しないという命題は工業製品の製造及び使用にも課せられており、このための技術革新が必要となります。当協会は優れた性質を有する革新的な金属及び複合材料の研究開発並びにその成果の普及を通じて産業の振興、発展に寄与することを目指しております。

弊協会は（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より「金属ガラスの成形加工技術」プロジェクトの委託を受け、平成14年度から18年度までの5年間研究開発を実施致しました。その中では、金属ガラスの加工性を重視した材料創製技術あるいは材料特性を活かした成形加工技術などの基盤技術開発を行うと同時に直径1.5mmの世界最小ギヤードモータ、小型高感度の圧力センサー及び超高感度の流量計など、実用化を目指した研究開発を実施しております。また、東北大とメーカーとの共同開発によるチョークコイルでは、2008年度から量産が開始されております。このように、金属ガラスを使った製品化・実用化に対する事例が多く見られるようになってきましたが、潜在的な材料の持つ可能性や産業界のニーズに対しまだ十分に答えているとはいえない状況にあります。

本金属ガラスの実用化及び製品化を加速する上での課題を検討する目的で「金属ガラスの製品化/実用化に関する調査研究」を（財）機械システム振興協会より受託し、関係者とともに調査研究を実施いたしました。

本調査研究では、金属ガラスの開発者である東北大学井上明久ユニバーシティプロフェッサー（総長）を委員長とする調査研究委員会を設け、金属ガラスの基盤技術の調査及び金属ガラスを使い試作・製品化しているメーカーに実用化状況を調査いたしました。また、（財）素形材センターの協力を得て、金属系材料に関心の深い素形材業界を対象とした金属ガラスに対する要望をアンケート調査いたしました。調査研究を進めるに当たっては、経済産業省製造産業局素形材産業室には委員会にご出席いただき、取りまとめの方針などご指導賜りました。

本報告書は上述の調査研究体制のもとに、国内・外での金属ガラス最新機能・特性の情報調査、試作・実用化についての課題調査並びに企業への金属ガラスに対する要望調査を行い、金属ガラスの早期製品化に向けた提言を取りまとめたものであります。本報告書が金属ガラス部材の広範な製品への適用に向けた開発指針として役立つことを願うものであります。

最後に、ご指導いただきました経済産業省製造産業局素形材産業室、（財）機械システム振興協会及び調査研究委員会の関係各位に深甚の謝意を表します。

平成21年3月

財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会

目 次

序

はじめに

1 . 調査研究の目的	1
2 . 調査研究の実施体制	2
3 . 調査研究成果の要約	
3.1 金属ガラスの材料及び特性に関する調査	5
1.1 国内及び国外で得られた金属ガラスの材料創製	5
1.2 国内及び国外で得られた金属ガラスの材料特性	7
1.3 国内及び国外で得られた金属ガラスの成形加工	8
1.4 国内及び国外で得られた金属ガラスのナノ加工	12
3.2 金属ガラスを使った試作・製品化された部材調査	15
2.1 金属ガラス素材の試作・製品化	15
2.2 ショットピーニング材の製品化	18
2.3 金属ガラス合金製圧力センサーの実用化開発	21
2.4 マイクロギヤードモータの開発・試作・実用化	23
2.5 超低損失インダクタ材料“センチクス”(金属ガラス)と 低損失チョークコイル“MPCG シリーズ”の開発	25
2.6 磁性シートの試作・実用化	28
2.7 アモルファス変圧器の現状と金属ガラスへの期待	32
2.8 金属ガラス製回折光学素子の開発	34
3.3 金属ガラスに関心を持つユーザへのアンケート調査	37
3.1 金属ガラスデータベースユーザへのアンケート	37
3.2 金属ガラスの実用化に関する素形材センターへのアンケート	38
3.4 調査結果のまとめ	39
4.1 金属ガラスを使った試作・製品化された部材調査結果	39
4.2 金属ガラスに関心を持つユーザへのアンケート調査	40
4 . 調査研究の今後の課題及び展開	41

1. 調査研究の目的

金属ガラスは、アモルファス金属の一種で、1980年代後半に東北大学の井上明久らによって開発され、今までに鉄基、チタン基など数百種類に及ぶ合金組成が見出されている。その特性は熔融状態から急冷することにより結晶化されることなく、ガラスと同様に原子が液体状態の無秩序構造を保ったまま冷却固化した状態が得られ、極めて遅い冷却速度（100K/秒以下）でもアモルファス状態が得られる特徴がある。従来の結晶金属にない特徴として、高強度、高靱性で耐食性や磁気的特性に優れているばかりでなく、ある温度以上に加熱するとガラス転移が生じ飴状となるため極めて加工性に富んでおり、夢の新素材として大きな注目を集めている。

金属ガラスは、日本が研究開発で先行している材料の一つであり、広範囲な材料への応用・展開と各種機械製品、精密検査システム装置などへの適用が強く望まれている。我が国の強みである材料創製技術と成形加工技術の融合により、高い製造技術に立脚した省資源型部材の創出及び諸外国に先駆けた製品への活用・展開が必要である。

近年、金属ガラスを活用した実用化事例が多く見られるようになってきた。たとえば、金属ガラスの高強度、高靱性、高耐食性及び優れた磁気特性などに着目し、マイクロギヤードモータ、航空機用翼部品、輸送機器用圧力センサー、コリオリ流量計用パイプ、燃料電池用セパレータ、パソコン用チョークコイルなど、ライフサイエンス分野、環境分野、ナノテクノロジー分野、情報通信分野など非常に多種多様な産業分野での製品化検討、開発が進められている。

しかしながら、材料の持つ潜在的な可能性や産業界のニーズに対しまだ十分に応えているとは言えず、本格的な製品として市場に出たものは少ない。これは金属ガラスの実用化に関する知見がまとまった形で整理されておらず、ユーザーにとって必要な情報が十分にいきわたっていないことが一因であると考えられる。

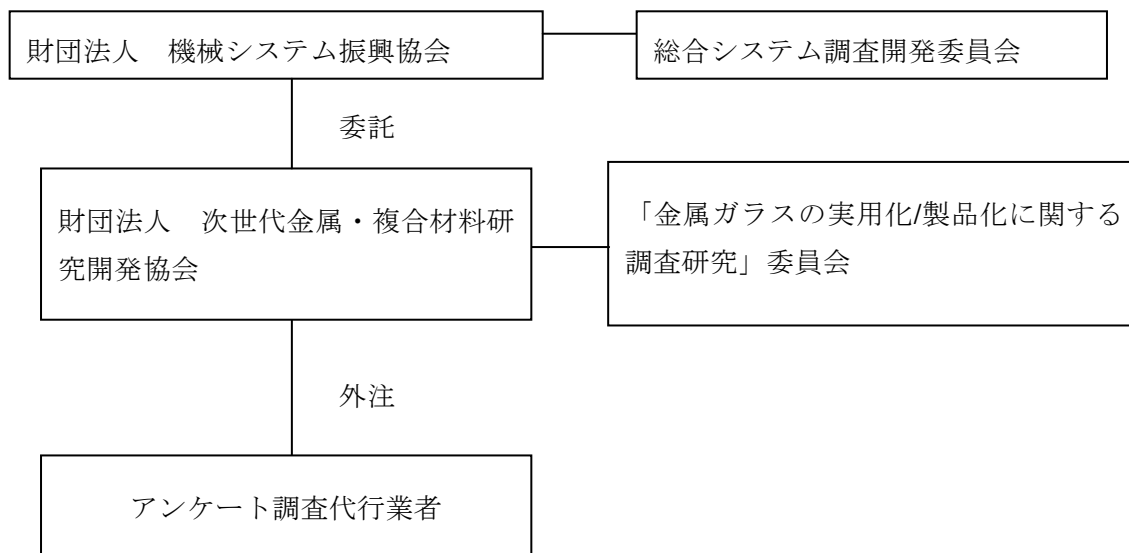
本調査研究では、今までに実施されてきた金属ガラスの実用化及び製品化研究についての状況を調査し、対象となった製品、要求される部材の特性、製品化のための成形加工技術及び実用化/製品化の課題などについてまとめるとともに、産業界の金属ガラスに対する要望について調査を行い、シーズ、ニーズの両面から情報の融合を図ることで、金属ガラスの実用化を加速するとともに、より広範な製品への適用を進め、我が国における素形材分野の国際競争力を向上させることを目的とする。

2. 実施体制

(1) 実施体制

本調査研究は、(財) 機械システム振興協会の委託を受け、(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会が実施した。本調査研究の体制は、(財) 機械システム振興協会の内に「総合システム調査開発委員会を、(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会の中に調査委員会を設置して、国内及び海外の研究動向調査・情報収集などの調査研究を行い、調査の効率化と充実化を図った。

なお、調査研究の一部、金属ガラスユーザなどへのアンケート調査は外注した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東京大学 名誉教授	藤 正 巖
委 員	埼玉大学 総合研究機構 教授	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 研究部門長	金 丸 正 剛
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター 招聘研究員	志 村 洋 文
委 員	東北大学 工学研究科 教授	中 島 一 郎
委 員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤 岡 健 彦
委 員	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授	大 和 裕 幸

金属ガラス調査研究委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東北大学	ユニバーシティプロフェッサー	井上明久
委員	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	教授	牧野彰宏
委員	東北大学金属材料研究所 附属研究施設大阪センター	教授	早乙女康典
委員	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	木村久道
委員	大阪府立大学	教授	東 健司
委員	日立金属(株)	先端エレクトロニクス研究所 所長	峯村哲郎
委員	NEC トーキン(株)	材料開発センター センター長	佐藤正一
委員	長野計器(株)	技術本部 係長	吉田直樹
委員	並木精密宝石(株)	NJC 研究所 グループマネージャー	若菜和夫
委員	福田金属箔粉工業(株)	材料開発 グループマネージャー	西田元紀
委員	新東ブレータ(株)	開発グループ 調査役	奥村 潔
委員	アルプス電気(株)	磁気デバイスグループ 主任技師	小柴寿人
委員	ナルックス(株)	技術開発部 部長	大割 寛
委員	(財)素形材センター	技術部 部長	笹谷純子
オブザーバ	経済産業省	素形材産業室 技術係長	阿部容久
事務局	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	専務理事	荻布真十郎
事務局	同上	金属材料技術部 部長	松井健治
事務局	同上	金属材料技術部 主幹研究員	嶋岡 誠

3. 調査成果の要約

金属ガラスは、日本が研究開発で先行している材料の一つであり、広範囲な材料への応用・展開と各種機械製品、精密検査システム装置などの適用が強く望まれている。

我が国の強みである材料創製技術と成形加工技術の融合により、高い製造技術に立脚した省資源型部材の創出及び諸外国に先駆けた製品への活用・展開が必要である。

近年、金属ガラスを活用した実用化事例が多く見られるようになってきた。たとえば、金属ガラスの高強度、高靱性、高耐食性及び優れた磁気特性などに着目し、マイクロギヤードモータ、航空機用翼部品、輸送機器用圧力センサー、コリオリ流量計用パイプ、燃料電池用セパレータ、ノートパソコン電源用チョークコイルなど、ライフサイエンス分野、環境分野、ナノテクノロジー分野、情報通信分野など非常に多種多様な産業分野での製品化検討、開発が進められている。

本調査研究では、まず、国内及び海外で研究開発された金属ガラスに関する材料・特性を調査し、4項目に分けて体系的にまとめた。また、今までに実施されてきた金属ガラスの実用化及び製品化研究についての状況を8件の部材・製品について調査した。

3.1 金属ガラスの材料及び特性に関する調査

1.1 国内及び国外で得られた金属ガラスの材料創製

本項では、これまでに得られた金属ガラスの材料創製に関して概説すると共に、これらを用いた応用及び応用の可能性についても概説している。

金属ガラスがアモルファス合金と異なる特徴は、(1) 昇温による結晶化前に、ニュートン粘性を示す過冷却液体域を持つこと、(2) アモルファス形成能が高く、 10^2K/s 以下の冷却速度でも作製できることなどである。この二つの特徴を利用して、金属ガラス粉末の固化成形、金属ガラス板・薄膜の微細成形加工、液体金属からのニアネットシェイプ加工、丸棒や板材のバルク金属ガラスの作製、及び歩留まり良く金属ガラス粉末の作製などができるようになった。つまり、金属ガラスがアモルファス合金に比べて、作製及び加工成形などがし易くなった。

これまでに、新しく見出された（発見された）金属ガラスの種類は、100種類以上になる。日本の金属ガラスの合金探査は、世界に比べて優位に立ち、1988年からこれまで、Zr基、Fe基、Ni基、Co基、Cu基、Ti基、貴金属基などの金属ガラスの大部分を見出している。最近では、電子機器部品として期待できる安価な優れた軟磁気特性を有するFe基金属ガラスが見出されるに至っており、今後も実用化に重要な金属ガラスが見出されていくものと考えられる。

金属ガラスを材料とした製品及び製品化可能な金属ガラスは30件程度ある。実用化された製品は、ゴルフクラブヘッド、テニスラケットフレームのスポーツ用品、ピーニング用ショット材、磁性シート、超低損失チョークコイル及び装身具装飾品である。これらを

作製する方法は粉末冶金法を始め多くの方法がある。しかしこれらは、まだ確立されているわけではなく、低コスト化に向けて現有の装置の改良や新しい作製装置の開発が望まれる。

合金探査及び実用化研究にとって重要な作製方法として、単ロール液体急冷法、双ロール液体急冷法、金型鑄造法、高圧射出成型法、高圧射出成型法、型締め鍛造法、キャップ鑄造法、ガスアトマイズ法及び水アトマイズ法などがある。単ロール液体急冷法は新しい金属ガラスの合金組成を発見するため、双ロール液体急冷法は両面平滑な金属ガラス薄帯を作製するため、金型鑄造法は単ロール液体急冷法で発見した金属ガラス合金系を用いてバルク金属ガラスの形成能を調査するため、高圧射出成型法は実用化に供される微細な部品材を作製するため、型締め鍛造法はバルク金属ガラス板材を作製するため、及びキャップ鑄造法はバルク金属ガラス丸棒材を作製するために使用できる。

ガスアトマイズ法及び水アトマイズ法は、金属ガラス粉末を作製するために使用できる。粉末そのままはピーニング用ショット材として、粉末の固化成形材はゴルフクラブフェース面として、粉末の焼結材は磁性シートや超低損失チョークコイルとして実用化されている。

金属ガラス粉末を、粘性流動が起きる過冷却液体域で押し出し成形を行うと、結晶化さえ抑えることができれば大形状のバルク金属ガラスが作製できる。ゴルフクラブフェース面が金属ガラス粉末の押し出し成形材を用いて作製されていることから、この方法は注目される。一方、放電プラズマ焼結（SPS）法は、ホットプレス法に比べて、低温で、かつ短時間で固化成形ができる特徴を持っており、金属ガラス粉末を結晶化させずに固化成形できる可能性があり、今後の研究の展開が楽しみである。

高速ガスフレーム溶射法で、金属ガラス皮膜の作製に成功したことから、金属ガラスの大面積化、各種形状をもつ部材表面の金属ガラス化ができ、実用化の範囲を広げることが期待できる。また、金属ガラスは切削加工ができることが明らかになっており、これで微細な部品やねじを作製することができ、実用化の範囲を広げることが期待できる。

Fe系アモルファス合金は、1 N HCl溶液中でもわずかな耐食性付与元素を添加してあるだけで不働態化する。Crを3%添加しただけではそれほど電流密度の上がりは大きくないが、他のMn、V、WあるいはMoを更に2%添加することで非常に大きく下がり、耐食性が格段に増大する。Fe-Ni系やFe-Co系合金はFeのみより耐食性は格段に高いことから、耐食性の高い(Fe, Co, Ni)₇₅Si₈B₁₄Mo₃金属ガラスが作製できる。この合金はピーニング用金属ガラスショット材として、新東ブレーター（株）により実用化された。濃厚塩酸中における超高耐食性アモルファス合金としては、以前にFe-Cr-Mo-P-C系合金が開発されたが、これはガラス形成能がないために実用化されることはなかった。高いガラス形成能を付与するために開発されたのがFe-Cr-Mo-P-C-B系合金である。それらのうちでも特に高いガラス形成能をもつと同時に耐食性も高いFe₄₃Cr₁₆Mo₁₆C₁₅B₁₀金属ガラスが溶射皮膜用に利用されている。

(Fe_{0.76}Si_{0.096}B_{0.096}P_{0.048})_{100-x}Cr_x金属ガラスは、直径2.5～3 mmのバルク状合金が得られる。Crを添加していない試料（x=0）では耐食性はなく、アノード側に分極すると電流密度

が対数的に増大し溶解して切断してしまう。Cr濃度を2at%から6at%へと増やすと、活性態を示した後、急激に電流密度は小さくなり、不動態化し、優れた耐食性を示すようになる。

Ni-Nb-Zr-Ti-Ta系金属ガラスは、耐硝酸用材料として開発されたNAR-310Nb鋼の2,000倍の高耐食性を示すことが明らかにされたことから、これらの合金を応用すれば従来の材料に比べ格段に腐食量が減少し、原子力燃料再処理用材料としての利用が期待できる。固体高分子形燃料電池用セパレータ（PEFC）と同じ環境に似せた沸騰中の硫酸中でのNi-Nb-Ti及びNi-Nb-Ti-Zr金属ガラスの腐食速度は、ステンレス鋼（SUS316L）に比べて小さく、優れた耐食性を示すことから、セパレータへの応用が期待できる。

Ti₄₀Zr₁₀Cu₃₆Pd₁₄金属ガラス丸棒材のハックス液中における分極曲線から、不動態域における電流密度は約 2×10^{-2} A/m²であり、純チタンの約1/5、市販Ti-6Al-4V合金の約2/5程度である。このことは、この環境ではTi基バルク金属ガラス表面には密な不動態皮膜が生成しており、耐食性は純チタンや市販Ti-6Al-4V合金より、それぞれ約5倍及び2.5倍ほど高いことを示している。これらTi系金属ガラスは有毒なNiを含まないため、生体材料としての広い応用が期待できる。

金属ガラスの触媒特性に関する研究者は少ない状況にあるが、Cu-Zr-Pt金属ガラスが高機能なメタノール水蒸気改質反応活性を示すことから、興味ある分野である。

金属ガラスを用いた燃料電池用水素透過膜・セパレータに関する開発研究では、金属ガラス（含 アモルファス合金）水素透過膜の水素透過係数は、商用のPd-Ag合金のそれと同等か上回ること、あるいは金属ガラスセパレータの電池特性は、ステンレス鋼（SUS316L）よりも優れていることが明らかにされている。

金属ガラスは、水素を吸蔵すると電気抵抗が大きくなり、排出するとほぼ元に戻る、これが繰り返し起きることから水素センサとしての実用化が期待できる。

金属ガラスは非磁性でエリンバー特性を示し、低熱膨張係数を示すことから、磁場の影響を受けない各種の精密機器や計測機器などへの応用が期待される。

1.2 国内及び国外で得られた金属ガラスの材料特性

金属ガラスの降伏応力はヤング率の2%程度であり、同程度のヤング率をもつ他の結晶金属材料と比較して、より理論破壊強度値に近い値を持つ。現在開発されている最も高強度のバルク金属ガラスは[(Co_{0.535}Fe_{0.1}Ta_{0.055}B_{0.31})_{0.98}Mo_{0.02}]₉₉Si₁でその降伏強度は5545MPaである。塑性変形能については、剪断弾性率 **G** と体積弾性率 **B** の比やポアソン比 **v** によって破壊靱性との関係が調査され、**G/B** で 0.41 以下、または、**v** で 0.32 以上の値を示す金属ガラスは顕著な塑性ひずみを示す。また、微細な結晶相をガラス相に分散させた複合材も開発されており、応力の多軸化を利用した塑性変形の発現が確認されている。一部の Zr 基、Ti 基及び Cu 金属ガラスは、工具鋼などの高強度実用結晶合金と比べて遜色のない高疲労限度と、実用上十分な破壊靱性を有している。低温における機械的性質では、自由体積が収縮凍結され、その易動度が低下することに起因し、シアバンドの伝播が抑制され、その発生サイトが増加して塑性ひずみが増大することが報告されている。

軟磁性金属ガラスは結晶磁気異方性を持たず優れた軟磁性を示すが、ガラス遷移を示す金属ガラスは急冷アモルファス合金と比較し、その構造の均質性が高く、より優れた軟磁性を示す。現在までに報告されている軟磁性金属ガラスで最大のガラス形成能（GFA）を有する合金は $[(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{0.75}\text{Si}_5\text{B}_{20}]_{96}\text{Nb}_4$ （直径 7.7mm）であるが、高 GFA を得るために非磁性元素の添加が必須であり、この代償として飽和磁化が著しく減少している。近年見出された Fe-Si-B-P(C)合金系は Fe 以外の金属元素を含まないため、金属ガラスにおいてトップクラスの約 1.5T を有し、 H_c も極めて低い。この優れた軟磁気特性に加えて、直径 2.5~3.0mm のガラス丸棒材が作製可能とする高 GFA、更に原料コストが安価であること、大気中製造が可能であることなどから、実用材料として有望である。

電気的性質については、金属ガラスはアモルファス合金と同様に、伝導電子にとって散乱中心であるイオンが極めて乱れた配列をしているため、電気抵抗のような電子-イオン間の衝突・散乱が関与する電子輸送は、結晶金属とは異なる挙動を示す。そのため、金属ガラスの電気抵抗は対応する結晶状態に比べて著しく高い値を示す。

$\text{Zr}_{60-x}\text{Cu}_{20}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Nb}_x$ ($x=0, 15, 20\text{at}\%$)金属ガラスなどで耐食性の研究が行われており、高い耐食性が報告されている。ただし、合金設計には耐食性と同時に高 GFA と金属ガラスの優れた特徴（高機械強度、良好な流動加工性など）の両立が要求されるが、GFA と耐食性にトレードオフの関係が成り立つ場合があり、合金組成には制約がある。

Cu-Zr-Pt 及び Cu-Zr-Rh 金属ガラスにおいて、触媒材料としての研究が報告されている。メタノール反応試験では、過冷却液体領域が (ΔT_x) 大きくなると反応速度定数も増加する傾向が得られており、触媒性能には本ガラス合金そのもののガラス形成能 ΔT_x が深く関わっていることが示唆される。

金属ガラスは一般に Zr、Ti、Pd など水素と親和性の高い元素で構成されているため、水素を多量に吸蔵することができる。金属ガラスの最大水素吸蔵量は、結晶合金のように特定の水素化物を作らないため、合金中の水素化物形成元素量に単純に依存し、合金系によっては、同一組成の結晶合金よりも多量の水素を吸蔵する。また、ガラス合金固有の ΔT_x では粘性が著しく低下するため、水素の拡散が速くなる。

1.3 国内及び国外で得られた金属ガラスの成形加工

最近の基礎研究の結果、金属ガラスが弾性ひずみのみならず、圧縮変形下で塑性ひずみを示すことが分かってきた。ここでは、室温における変形特性、特に強度（ここでは、2% ひずみにおける強度として定義した）及び塑性ひずみに及ぼす合金組成、ひずみ速度、試験片形状などの諸因子の影響を体系的に調査した結果を報告する。また、引張り変形下での変形挙動についても報告する。まず、国内及び国外の文献（190 編）で報告されている圧縮変形下及び引張り変形下での基本的変形特性である応力-ひずみ線図をデータベースとしてまとめた。

これらの応力-ひずみ線図に関するデータベースから、各合金の組成、2%強度、塑性ひずみ、ひずみ速度、試験片形状を定量的に収集し、それらの数値データを合金ごとに整理した。

本調査研究では、合金組成としては、Zr 基、Cu 基、Fe 基、Ni 基、Mg 基、Ti 基、La 基、Pd 基、Co 基、Nb 基、Pt 基、Ca 基、Hf 基、Ce 基の 14 種類とした。

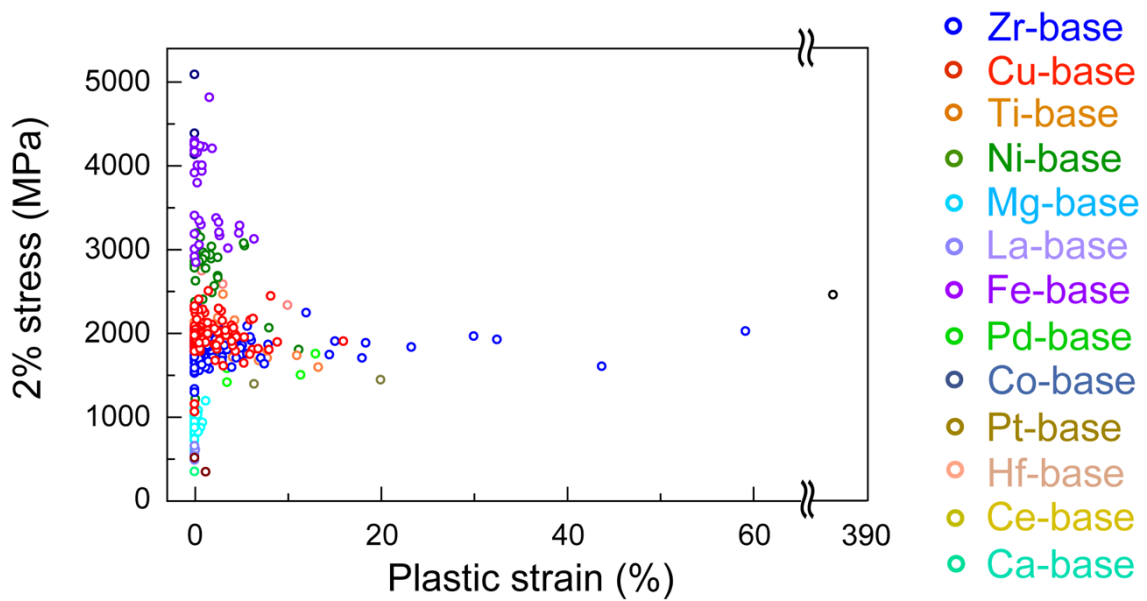
圧縮変形下における 2%強度と塑性ひずみの関係を 14 種類の各基金属ガラスごとに整理した。以下にその特徴を列記する。

- ① Zr 基金属ガラスでは、塑性ひずみ量は基本的には小さいが、10%ひずみまで変形できるものが多数存在する。また、10%以上の塑性ひずみを示すものが 10 個程度存在する。Ze 基金属ガラスにおいては、通常観察される強度と延性のトレードオフ関係は明瞭には観察されない。2000MPa 以上の強度の高い合金でも 10%程度の大きな塑性ひずみを示している。
- ② Cu 基金属ガラスにおいては、10%程度の塑性ひずみ量が観察されるが、15%以上の塑性ひずみ量を示すものも存在する。また、強度と延性のトレードオフ関係は観察されない。2500MPa 程度の高強度材でも 8%程度の塑性ひずみを示している。
- ③ Fe 基金属ガラスでは、すべての合金が数%以下の塑性ひずみしか示さない。全体的には、強度と延性のトレードオフ関係が観察されるが、5000MPa の高強度を示す合金でも 2%程度の塑性ひずみが観察されている。
- ④ Ni 基金属ガラスでは、そのほとんどが 3%以下の塑性ひずみを示しているが、4 点ほど 5%以上の塑性ひずみを示している。1000MPa 付近のデータを除けば、強度と延性のトレードオフ関係が見られる。3000MPa の高強度材にて 5%の塑性ひずみが観察されている。
- ⑤ Mg 基金属ガラスにおいては、すべての合金で 2%以下の塑性ひずみが観察され、数%以上の大きな塑性ひずみは観察されていない。最大塑性ひずみは 2%で、かつその合金において最大強度 1200MPa が観察されている。
- ⑥ Ti 基金属ガラスにおいては、明瞭な強度と延性のトレードオフ関係が観察される。10%以上の塑性ひずみが観察されるが、強度は低下する傾向を明らかに示している。最大塑性ひずみ 3%程度と最大強度 2500MPa が同時に達成されている。
- ⑦ La 基金属ガラスにおいては、調査した報告内では、塑性ひずみは観察されていない。
- ⑧ Pd 基金属ガラスでは、データは少ないものの、同程度の強度を示す場合でも、比較的塑性ひずみが安定して観察される。
- ⑨ Co 基金属ガラスでは塑性ひずみが観察されていないが、5000MPa 以上の非常に大きな強度が得られている。
- ⑩ Nb 基金属ガラスにおいては、データ点は 2 点しかなく、その報告内では、強度と延性の関係はトレードオフである。
- ⑪ Pt 基金属ガラスのデータ点は、2 点報告されており、2 点とも塑性ひずみを示している。その値は、5%及び 20%程度である。
- ⑫ Ca 基金属ガラスのデータ点は 2 点あるが、塑性ひずみは得られていない。
- ⑬ Hf 基金属ガラスのデータ点は少ないが、強度と延性はトレードオフ関係を示している。
- ⑭ Ce 基金属ガラスのデータ点は少なく、塑性ひずみは観察されていない。

報告された金属ガラスの2%強度と塑性ひずみの関係を図 1.3-1 にまとめて示す。ここでは、圧縮変形下における 14 種類の各基の金属ガラスの全データを上図に、また、引張り試験が実施されている Zr 基、Cu 基、Pd 基、Ti 基の 4 種類の金属ガラスのデータを下図に示している。

20%以上の大きな塑性ひずみを示す結果が、390%程度の非常に大きな塑性ひずみの値を除いても、数点程度報告されている。また、10%程度あるいは10%以上の塑性ひずみを示すデータはかなり存在しており、概して、金属ガラスの圧縮変形下における塑性変形能が低いと判断することはできない。これら大きな塑性ひずみが得られたメカニズム解明は今後の課題である。圧縮変形された 14 種類の異なる基の金属ガラスにおいて、比較的良好的な圧縮塑性ひずみを示す金属ガラスは、Zr 基、Cu 基、Pd 基、Ti 基、Pt 基である。これらの金属ガラスは、引張り試験が行われている金属ガラスとよく一致しており、その理由は定かではないが、興味深い。

4 種類の金属ガラスの引張り変形下における強度と塑性ひずみの関係から明らかなように、引張り変形下において塑性ひずみが得られたデータは、Zr 基金属ガラスにおいて報告された3点(0.1、0.2、5.8%)のみであり、それ意外のすべての報告では、塑性ひずみは得られていない。金属ガラスの引張り変形下では、塑性変形はほとんどおこらないと推察されるが、金属ガラスが本質的に引張り変形下で塑性変形しないかどうかは、引張り試験での実施例それ自体が少ないことにも起因していると考えられる。金属ガラスのバルク化が進むことで、引張り試験による特性評価が一般化すれば、この点も明らかになるものと期待できる。



Zr, Cu, Pd and Ti-based BMG (Tension)

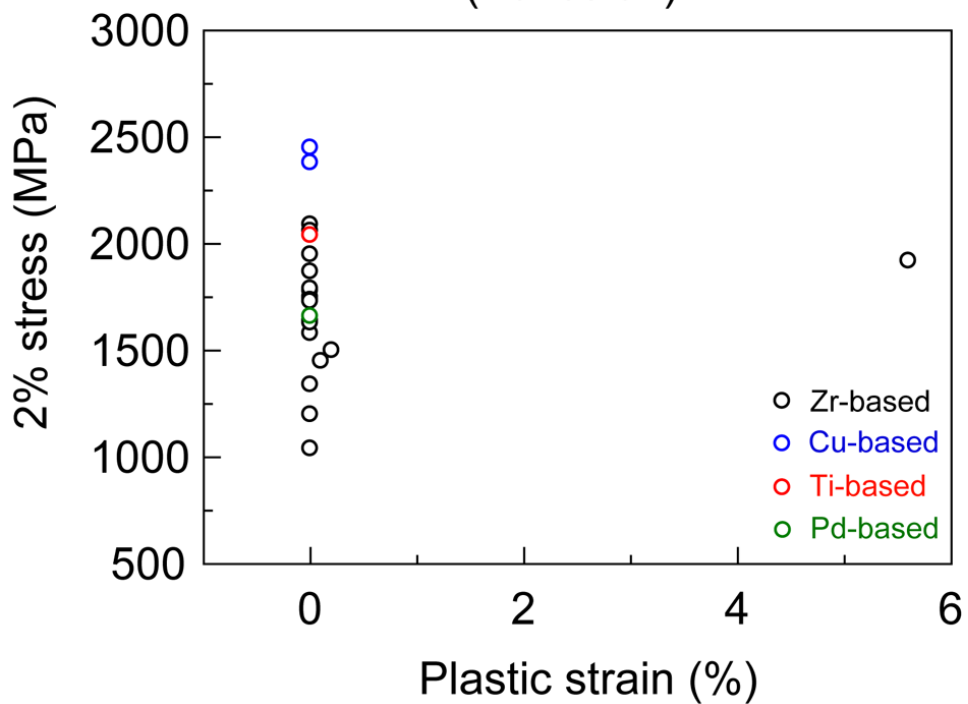


図 1.3-1 過去に報告された金属ガラスの 2%強度と塑性ひずみの関係
 (上図) 圧縮変形下で得られた 14 種類の金属ガラスのデータ
 (下図) 引張り変形下で得られた 4 種類の金属ガラスのデータ

1.4 国内及び国外で得られた金属ガラスのナノ加工

1.4.1 金属ガラスの粘性流動とナノ加工特性

金属ガラスは機械的強度に優れた構造材料として、また耐食性や電磁特性などの機能材料としても優れた特性を有しているが、更に、ナノメートルオーダーの超精密微細成形特性を有するところに特徴がある。材料は形を与えられてその材料特性が発揮されるが、創成されたナノ表面形状によっても新たな機能が発揮される。金属ガラスは、ナノインプリントなどの成形加工によって容易にナノ形状が得られることから、マイクロマシンやナノデバイス創成用高性能材料として、ナノテクノロジー時代に最も期待される材料である。

さて、材料の加工は、切削、研削などの除去加工、塑性加工などの変形加工、そして溶接などの付加加工に大別され、従来、超精密加工には切削加工が、量産加工には変形加工が主に用いられてきた。金属材料の変形加工には上述の塑性加工のほか、鑄造のように材料の粘性を利用した成形が用いられているが、前者では多結晶構造における結晶のすべり変形機構が、後者では熔融状態から結晶質固体への相変化に伴う体積収縮が、精密成形加工の阻害要因であった。金属ガラスは基本的に非結晶材料であり、非晶性ポリマーと共通した性質を有している。そこで、金属ガラスの成形加工を(1)熔融状態からの冷却過程での成形、(2)室温からガラス遷移点以上温度に加熱した場合の成形に大別し、そのナノ加工特性について述べた。

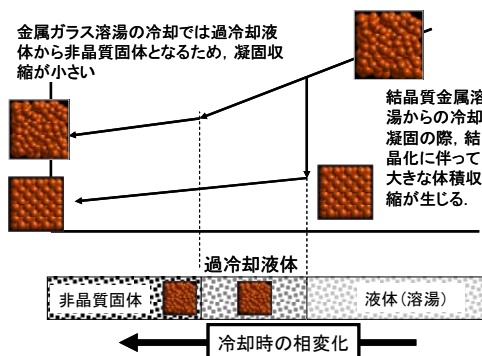


図 1.4.1-1 結晶質金属と金属ガラスにおける熔融状態からの冷却過程における相変化とそれに伴う体積変化

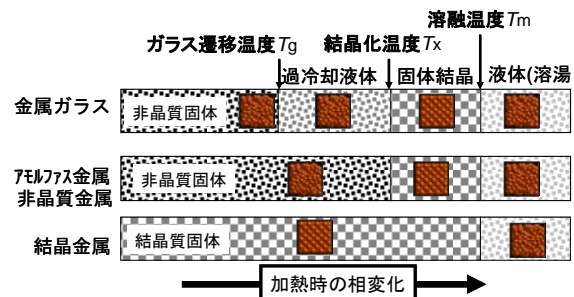


図 1.4.1-2 結晶質金属、非晶質金属（アモルファス金属）、金属ガラスを室温から加熱した場合の相変化

(1) 金属ガラス溶湯からの精密鑄造加工

図 1.4.1-1 に、熔融金属からの冷却過程における相変化を示した。結晶質金属では、凝固・結晶化に伴う大きな体積変化により、鑄巣などの鑄造欠陥が生ずる。一方、金属ガラスの場合には連続的に粘性が増大し、過冷却液体温度域を経てアモルファス固体となる。非晶性ポリマーと同様、体積変化が小さく精密微細加工が可能である。また、アモルファス構造を得るための臨界冷却速度が小さく、それゆえ超急冷を要する従来のアモルファス合金では実現が困難であったバルク形状の射出成形が可能となった。

(2) 温間での超塑性を利用したナノ加工の原理と特性

図 1.4.1-2 に金属材料を加熱した場合の相変化について示した。金属ガラスの場合には、温度 T_g にてガラス遷移現象を示し、粘性が低下する。さらなる加熱によっては、温度 T_x

にて結晶化が起こり、温度 T_m にて溶融する。すなわち、金属ガラスの場合には、温度 T_g から温度 T_x までの間に粘性状態にあり、これを過冷却液体と呼んでいる。図 1.4.1-3 には、各種金属ガラスの過冷却液体温度域における粘性係数を示した。

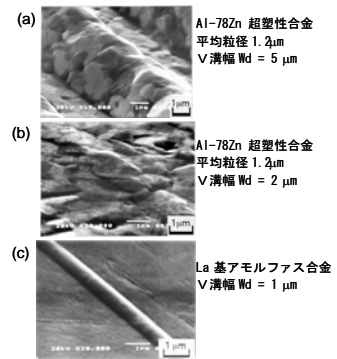
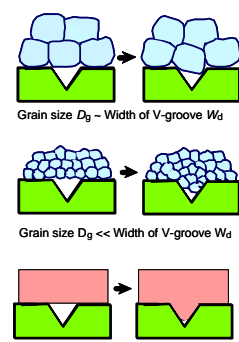
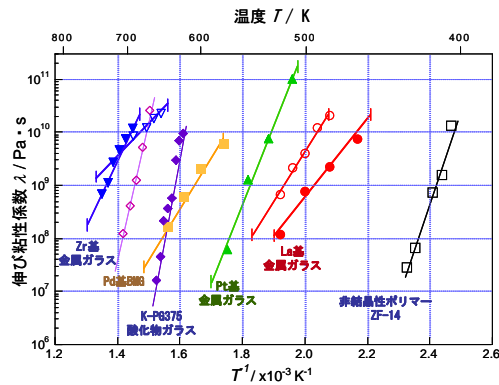


図 1.4.1-3 金属ガラス、酸化ガラス、晶性ポリマーの粘性係数と温度の関係
図 1.4.1-4 微細結晶粒超塑性合金と金属ガラスの変形機構とマイクロ・ナノ成形特性

金属ガラスのナノ成形特性について、(100)Si 製の微細 V 溝形状金型をマスター形状とした形状転写性試験を行い、金属ガラスの微細成形性を評価した。図 1.4.1-4 には、成形後の各試験片表面の走査電子顕微鏡観察像を示した。図 1.4.1-4(a)、(b)は、平均結晶粒径 $Dg = 1.2 \mu m$ の Al-78Zn 微細結晶粒超塑性合金の成形結果で、その微細成形限界は粒径に依存するといえる。一方、図 1.4.1-4(c)は La 基金属ガラスを用いて幅 $w = 1 \mu m$ の V 溝金型への成形加工を行った試験片形状で、極めて良好な微細成形が得られることが分かる。以上のことから、金属ガラスは、基本的に結晶などの長範囲規則性を持たない等方・均質の非晶質合金で、したがって原理的に原子オーダーのナノ成形加工が可能である。

1.4.2 ナノ成形加工法

(1) 鍛造加工

鍛造加工は塊状の材料の成形加工法で、金型と金型の間で材料に圧縮加工を与え、目的の形状を得る加工法であり、複雑な微細形状の成形が可能である。

(2) 押し出し加工

押し出し加工はコンテナと呼ばれる窪みないし穴の中に挿入された材料を加圧して、工具に設けた隙間から材料を流出させ、一定断面を有する長い製品や素材を作る加工法である。

(3) ナノインプリント

金属ガラスはナノインプリントの可能な唯一の金属材料であり、ナノインプリントにより創製される表面機能性ばかりでなく、マイクロマシン (MEMS)、ナノマシン (NEMS) などの 3 次元微細形状創成用材料として期待される。

1.4.3 ナノ成形加工の応用

(1) マイクロマシン、MEMS への応用

金属ガラスは、高性能構造材料、優れた機能材料として期待されるばかりでなく、ナノメートルオーダーでの等方均質性、精密成形性を有することから、マイクロマシン用材料として有望である。

(2)マイクロ機能素子への応用

ポリイミド金型を用いて成形されたマイクロインダクタの例を示した。(図 1.4.1-5)

(3)光学素子への応用

金属ガラスの等方均質性とナノ成形加工特性を利用すると、鏡面、グレーティング、ホログラム、無反射面などの回折光学素子をナノインプリントにより量産加工することができる。金属ガラスを用いることにより、高精度、高信頼性、耐水性、耐薬品性を備えた回折光学素子の創製が可能になった。(図 1.4.1-6、図 1.4.1-7、図 1.4.1-8)

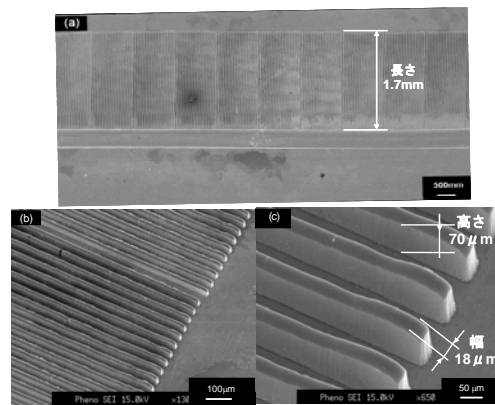


図 1.4.1-5 Pt 基金属ガラスマイクロカンチレバー、幅 18µm、高さ 70µm、長さ 1.7mm、ピッチ 40µm

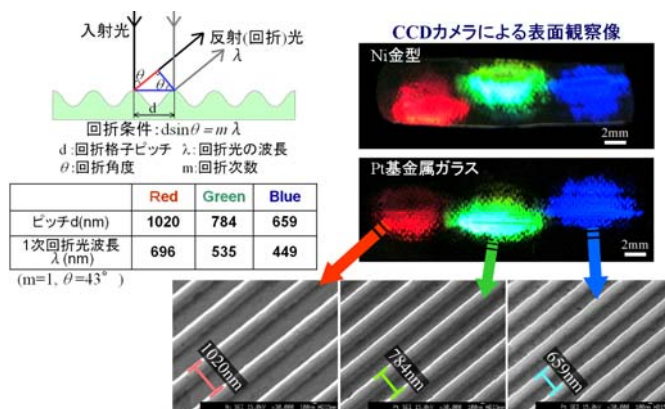


図 1.4.1-6 ナノインプリントによる金属ガラス製RGB分光素子

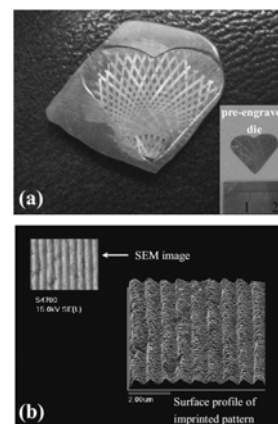


図 1.4.1-7 金属ガラス製ホログラムホログラム

(4)情報媒体への応用

情報媒体として高密度 CD-ROM パターン及び射出成形用金型、ナノドット構造のパターンメディアなどの量産方法として期待される。

1.4.4 まとめ

以上のナノ成形加工特性は、他の金属材料では見ることのできないユニークな特性であり、金属ガラスはマイクロ・ナノデバイスの量産加工を可能とする機能材料、構造材料として 21 世紀に最も期待されるナノ材料である。

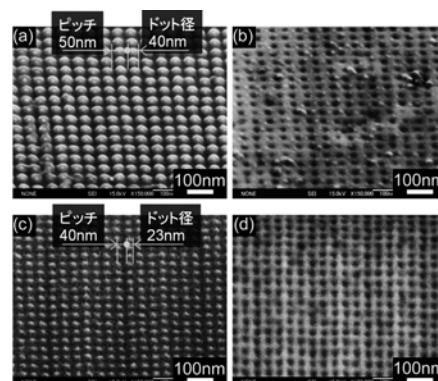


図 1.4.1-8 (a,c)SiO₂/Si 金型 (b,d) 成形後 Pt 基金属ガラス

3.2 金属ガラスを使った試作・製品化された部材調査

2.1 金属ガラス素材の試作・製品化

金属ガラスの製造プロセスは、従来からの結晶金属のプロセスとは異なり、結晶金属が最終製品になるまでに成形加工と熱処理などの繰り返しにより組織が何度も変えられて行われるが、金属ガラスは基本的に素材の非晶質組織を最終製品まで変えることなく行われる。このことは、省エネルギーの面から金属ガラスが従来からの結晶金属に比べて優れておりエコ材料として期待される。一方、結晶金属は、塑性変形能があり、圧延、伸線、プレス加工により製品形状に加工し熱処理により性能向上を行うが、金属ガラスは、常温での塑性変形は困難であるため、過冷却液体温度領域での成形加工が必要となり、この温度領域を用いた成形加工技術の発展が更に期待される。

金属ガラス素材は、原料地金から母合金を作製しさまざまな製法で薄帯・板材、粉末、線材などに加工される。一般的には、液体急冷法により、熔融状態の金属を色々な方法で冷却して凝固し、非晶質状態の組織を持つ素材を作製する。この製法は、溶解して直接金属ガラス素材を作製するため大量生産が可能である。表 2.1-1 に金属ガラス素材の形状別に製造方法などをまとめた。

表 2.1-1 金属ガラス素材の製造技術

製造方法	金属ガラス素材
ロール成形	薄帯・板材
回転紡糸・回転円盤	線状材
アトマイズ	粉末
水焼入れ、射出成形、粉末冶金他	バルク
中空成形	パイプ
発泡方、含浸法、中空粒子法 粉末冶金法	ポーラス

2.1.1 薄帯・板材

(1) 単ロール液体急冷法

金属ガラスの薄帯を作製する方法として単ロール液体急冷法が一般的である。この方法は、大気又は雰囲気中で高速回転している銅などの金属製ロール面上に高周波溶解により溶解した液体金属をルツボ下のスリット状ノズルから噴出させロール面上で急速凝固して薄帯を作製する。

(2) 双ロール液体急冷法

双ロール液体急冷法は、単ロール液体急冷法では作製が困難な 100 μ m 以上の薄板の作製への展開も期待される。

2.1.2 線状材

(1) 回転液中紡糸法

回転液中紡糸法は、冷却媒体には水が使用され、合金系によっては水との反応で使用できないものもあるが、Fe 基、Co 基、Ni 基の金属ガラス合金では作製可能である。線材の

サイズは線径 50～300 μm であるが、大量生産が可能な生産方法と考えられる。

(2) 回転ディスク法

回転ディスク法は、溝が彫ってある回転ディスクの表面にノズル先端のオリフィスから熔融金属を流しこみ、液中紡糸法に比べて太い線材を作製する。線材の線径は、1～3mm が可能で、金属ガラス形成能の高い合金に使用されている。

2.1.3 粉末・ビーズ

金属ガラス粉末の製造方法としてアトマイズ法は、大量生産が可能で粉末冶金用原料や溶射材料として製造されている。

(1) ガスアトマイズ法

ガスアトマイズ法による金属粉末の製造方法は、ルツボ底部のオリフィスから流出した熔融金属を窒素、アルゴン、ヘリウム、空気などの高圧ガスで噴霧し、その運動エネルギーで分裂、凝固する。凝固する際の冷却速度が比較的遅いため分裂した熔融粒子が凝固するまでに表面張力で球状化する。そこで球状粉末の大量生産には、最も適した方法である。

(2) 水アトマイズ法

水アトマイズ法による金属粉末の製造は、前述のガスアトマイズ法における噴霧ガスの代わりに高圧の水を用いるものである。水アトマイズ法は、ガスアトマイズ法に比べ冷却速度が速く、分裂した熔融粒子が表面張力で球状化する前に凝固するため粉末は不規則形状となる。そのため粉末同士の絡みが良く、粉末を圧縮成形して部品を製造する粉末冶金では、広く使用されている。金属ガラス粉末では、Fe 基の磁性材料が生産され、磁気コアなどに実用化されている。

(3) 回転ディスク法

回転ディスク法は、遠心力を利用し急冷粉末の作製方法として実施されている。

(4) 多段粉砕アトマイズ法

多段粉砕アトマイズ法は、ガスアトマイズ法で熔融金属を一次分裂し、分裂した粒子をその下段に設置された高速回転円盤に衝突させ再び二次分裂させて微細化する。

(5) プラズマ回転電極法

プラズマ回転電極法は、所定の合金組成の電極棒を高速で回転させ、その前面にプラズマアークを当てて熔融部分を遠心力で微細な液滴化し粉末を作製する方法である。この方法は、ルツボを用いないため Ti や Zr、希土類などの活性な金属の粉末作製が可能で高融点金属にも適用でき純度の高い粉末が作製できる。

(6) ビーズ作製方法

単分散粒子作製法は、パルス圧力付加オリフィス噴射法 (Pulsed Orifice Ejection Method : POEM) を用いている。この方法で作製した Fe-Co-B-Si-Nb 系金属ガラスの単分散ビーズを示すが、粒径の揃った真球度の高いものとなっている。

均一液滴噴霧法は、熔融した金属流ジェットに規則的な振動を与えることで均一な液滴のみからなるスプレーを造り均一液滴を制御的に凝固させる金属球状粒子の製造方法である。

(7) メカニカルアロイング

メカニカルアロイング (MA) は、金属を溶かさないうで固相状態における合金化法として振動ミルや媒体拡販式のボールミルを用いて行われる。MA は、通常合金化し難い材料や融点差が大きな元素の合金作製など行われ、粉砕加工による強歪み加工によるアモルファス相とすることも可能である。MA により作製された非平衡粉末の成形には、プラズマ放電焼結法が用いられ、バルク材を作製することが可能である。

粉末を用いた方法以外の強ひずみ加工による非平衡材料の作製方法として ECAP(Equal Channel Angular Pressing)法があり、この方法は、バルク MA とも言われている。

(8) 粉末冶金法によるバルク材作製

金属ガラス粉末の成形法として①ホットプレス法、②SPS (プラズマ放電焼結) 法、③押出法などで行われる。これらの成形法では、金属ガラス単体がけの成形のほか、他種金属などを加えて混合、成形することで複合化金属ガラスを作製する研究開発が進められている。

2.1.4 パイプ

金属ガラスパイプ作製装置は、負圧吸引法と呼ばれ、チャンバー内を真空排気し、不活性ガスでチャンバー内を満たした後、高周波誘導溶解によりルツボ内インゴットを溶解する。このルツボへ柱状中空部を持つ鑄型をルツボ内へ差し込み柱状中空部内部を瞬時に負圧にして熔融金属を吸引し、中空部内面にて急速に冷却、凝固させて金属ガラスパイプを作製する。また最近では、金属ガラスパイプの肉厚をより薄くするために射出成形法による金属ガラスパイプの作製も可能となり、今後医療用カテーテルや高耐食性が要求されるパイプなどへの用途展開が期待される。

2.1.5 バルク

金属ガラスは、急冷を必要とせずに通常の溶解凝固法の鑄造法でバルク材を得ることができる。金型鑄造法は、高周波加熱により熔融した金属をルツボをガス加圧し、下部のノズルから金型へ射出することでバルク材を作製する方法である冷却速度として 100K/s の比較的大きな冷却速度が得られ、金型の形状をさまざまな製品形状とすることで鑄造成形することが可能である。アーク溶解鑄造法は、アーク溶解により水冷銅ハース上の合金を溶解し、溶解終了後水冷銅ハースからの抜熱により冷却、固化する方法である。この方法の発展した製法として吸引鑄造法や型締め鑄造法があり、傾角鑄造法は、アーク溶解された合金は、銅ハースを傾けて別にある鑄型に傾注される。その際、溶融合金が鑄型に傾注される直前までアーク放電加熱を行う、結晶化を防止し、良好な材料を作製することが可能である。また所望の形状の別鑄型に傾注することもできる。

2.1.6 ポーラス材

ポーラス金属ガラスの作製方法として発泡法、含侵法、中空粒子法、粉末冶金法、液相分離法などがある。ポーラスバルク金属ガラスの構造と熱的性質は、バルク金属ガラスと同等であったが、機械的な特性は、特異な性質を示した。ポアのない通常のバルク金属ガラスは、塑性変形を起こすことなく破断する。一方ポーラスバルク金属ガラスでは、明確な塑性変形が見られ、ポアが多くなると通常の条件での破断が生じなくなる。この原因

については、種々検討されているが、今後、この特異な特性を生かした人工関節などの生体材料への展開が期待される。

2.2 ショットピーニング材の製品化

ショットピーニングの最も重要な用途の一つとして、自動車用ギヤ並びにバネの疲労強度向上がある。近年この分野では、省エネルギーの観点から部品の軽量化、高強度化に対する要求が益々高まってきており、各種浸炭焼き入れ、窒化処理などの表面処理による部材の高硬度化が図られている。このため、ショットピーニングに用いられる投射材もより高硬度のものが求められている。その一例として、超合金製ショットを自動車用弁バネのショットピーニングに適用した事例が報告されている。

しかしながら、従来の結晶材料系の投射材では高硬度化に伴い急速に靱性が低下し消費量が増大するだけでなく安定した処理ができないという欠点があった。

これに対処するために高硬度で且つ靱性の向上が期待される金属ガラスの投射材への適用を試みた。図 2.2-1 に従来からの結晶材料で製造された投射材の硬さと寿命及び開発の狙いである金属ガラス投射材の位置づけを示す。

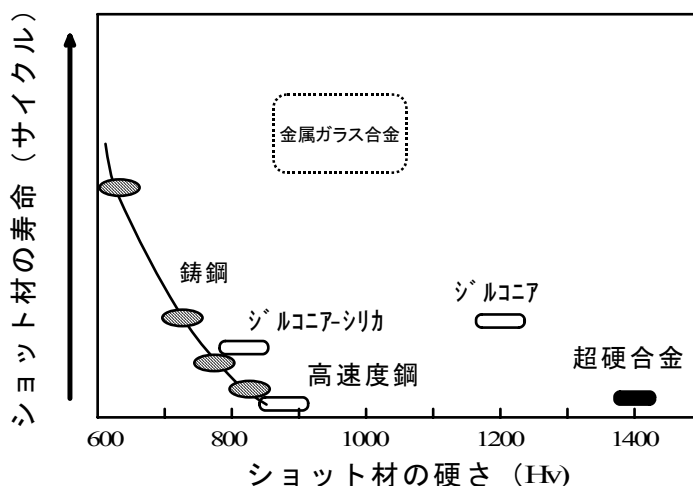


図 2.2-1 商用結晶合金投射材の特性と開発を目指した金属ガラス投射材の位置づけ

(a) 開発の内容

金属ガラスは高強度であるにもかかわらず、結晶系材料の約 $1/3$ のヤング率であり大きなたわみ性を持つ。しかしながら、従来のアモルファス合金は急速に冷却しないと生成することができないため、バルク化が困難であった。しかし、東北大学金属材料研究所の井上教授らのグループによりアモルファス形成能の大きな金属ガラス合金が次々と見出され、その総括として合金設計の 3 経験則が示された。今回、東北大学金属材料研究所の木村准教授のご指導を受け、前述の合金設計の指針に従い、期待される強度と靱性並びに経済性の観点より、鉄系金属ガラスに着目して合金開発を進めた。

その結果、鉄系をベースとした合金系でこの特性を示す材料の開発に成功した。その結

果を従来の結晶材料と比較して図 2.2-2 に示す。当初の予測どおり、高強度かつ低ヤング率である。この合金系を用いれば、高強度かつ高硬度で靱性に優れた投射材を得ることができると期待される。

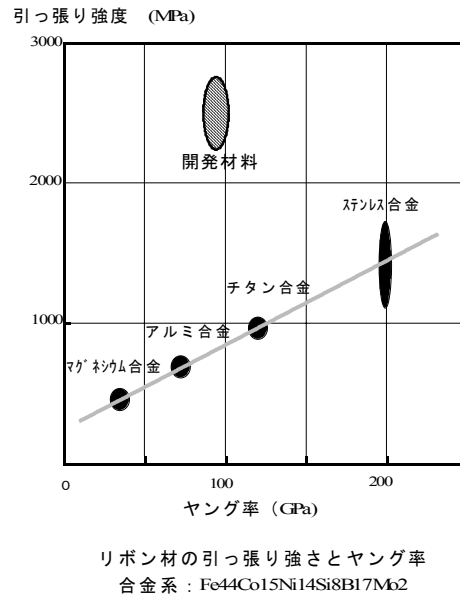


図 2.2-2 開発した鉄基金属ガラス合金の機械的性質と汎用材との比較

開発した鉄系金属ガラス合金によるアモルファス粒子量産技術を確立し、「アモビーズ」として商品化した。その断面の組織を図 2.2-3 に示す。結晶相がなく均一なことが分かる。また、アモビーズの特性を確認した結果を図 2.2-4 と図 2.2-5 に示す。

アモビーズの硬さは 900~950Hv であり、従来品の硬さを上回っており、かつその硬さのバラツキは小さい。これはその均一な構造に由来している。また、寿命は従来の汎用投射材に比較し 4~10 倍もの長い寿命を持つことを示している。これらのことから、投射材の消耗量も少なく、環境負荷が小さいだけでなく安定した処理が可能となる。

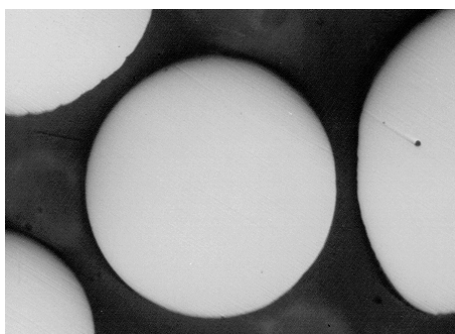


図 2.2-3 アモビーズの断面の顕微鏡写真

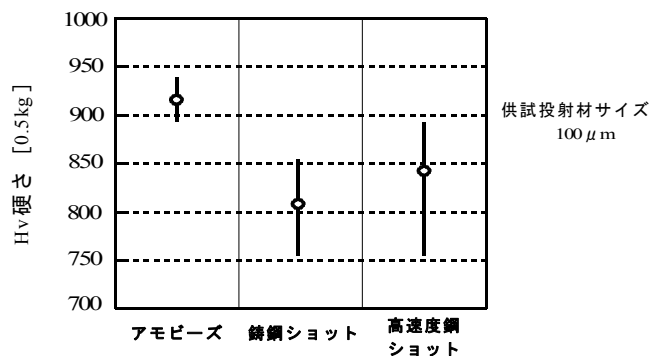


図 2.2-4 高硬度投射材の硬さ比較

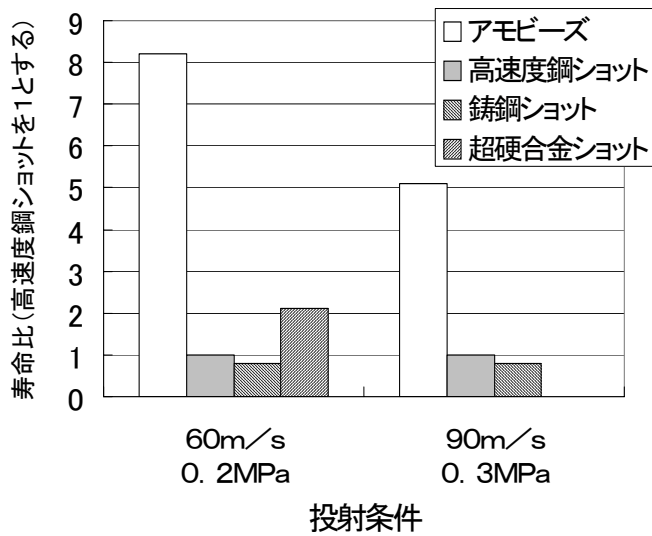


図 2.2-5 高硬度投射材の寿命比較

(b) 開発の成果

自動車の変速機に用いられる歯車への応用を試みた。この成果は、新東工業㈱並びに大同特殊鋼㈱よりDASPプロセスとして発表されている。

大同特殊鋼㈱の真空浸炭用鋼と真空浸炭処理技術の活用で材料表面硬度をHV750以上とし、これにアモビーズを投射することでHV1000以上の表面高硬度化と圧縮残留応力1800~2000MPaを付与することが可能となり、曲げ疲労強度が80%程度向上される。

結果、部品を最大45%小型軽量化できることが確認された。DASPプロセスの特徴を図2.2-6に示す。

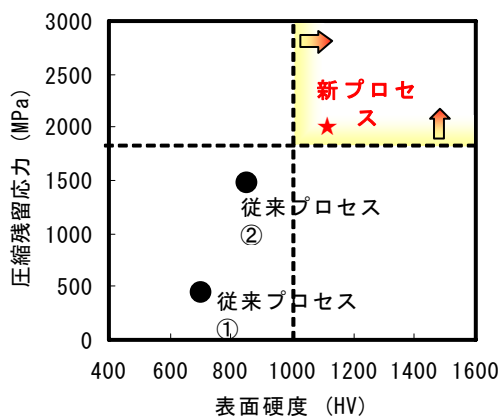


図 2.2-6 DASP プロセスの特徴

2.3 金属ガラス合金製圧力センサーの実用化開発

3.1 市場動向（国内・外他社動向）

圧力は物理量として極めて重要なパラメータであり、高精度・高信頼性・低コストの圧力センサーの普及は産業分野での効率化を通じて、さまざまな形で環境に対する負荷を低減させ、今後のエネルギー開発分野や地球環境問題に対する取り組みに大きく貢献できるものとする。

3.2 部材・材料の特性

高強度かつ低ヤング率で優れた成形性（型転写性）などの特性を有する金属ガラスをダイアフラムに用いることにより、高感度・高精度圧力センサーを低コストで実現することが期待できる。以下に金属ガラス製ダイアフラム及び同ダイアフラムを用いた圧力センサーの開発目標、表 3.2-1 に材料物性を示す。

- ・引張強度 2000 MPa 以上
- ・ヤング率 100 GPa 以下
- ・耐熱性(結晶化温度) 823K 以上
- ・成形性 工程数従来比 1/3
- ・加工面粗さ 0.5 μ m Ry 以下
- ・センサー感度 従来比 3 倍以上

表 3.2-1 ダイアフラム材料物性

	Zr 基 BMG	Ni 基 BMG	Fe 基 BMG	SUS630
引張り強度	1800MPa	2700MPa	2780MPa	1040MPa
ヤング率	100GPa	135GPa	135GPa	196GPa
結晶化温度	753K	902K	902K	-

探索対象合金系は安価で一般的な Fe を主成分とした合金組成について探索した。ガラス形成能や脆さなどの課題があった。

そこで、主構成元素を Fe のみに限定せず、よりダイアフラム創製に好適な機械的性質を有する材料成分という観点から、従来から報告されている Ni-Nb-Ti-Zr-Co-Cu（以下、Ni 基と称する）系及び Zr-Cu-Al-Ni（以下、Zr 基と称する）を選定し、ガラス形成能及び機械的性質などの基礎的物性を調査し、試作評価を行った。

3.3 試作の技術ポイント及び課題

金属ガラス合金製圧力センサーの試作における技術ポイントは、大きく分けて次の 3 つである。

3.4 「圧力容器としての強度設計」

圧力センサー素子はセンサーである以前に圧力容器としての安全性が求められる。この

信頼性のある圧力容器としての設計の範囲で圧力センサーとして高感度・高精度を実現できるような最適化設計を行うため、正確な材料物性値及びガラス形成能の把握とともに、部材強度を低下させる外乱要因をできる限り低減させる必要がある。

3.5 「歪ゲージの蒸着技術」

結晶化温度の制約のある金属ガラス合金では、歪ゲージ蒸着温度が大きな課題であった。これを解決するために耐熱性とその他の物性が両立する合金探索の一方、蒸着温度の低温化にも取り組んだ。

3.6 「センサー素子の接合技術」

異種材質との溶接が難しい金属ガラス合金製圧力センサー素子において、接合技術は要素技術の一つとして不可欠なものであり、その解決策として精密塑性結合法に取り組んだ。

3.7 試作評価

選定した2種類の金属ガラス合金 ($\text{Ni}_{153}\text{Nb}_{20}\text{Ti}_{10}\text{Zr}_8\text{Co}_6\text{Cu}_3$ 、 $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$) について、ダイアフラムを成形し、評価を行った。また一方、射出成形法によるダイアフラム部材成形は、寸法・形状については期待どおりのニアネットシェイプ性を示し、従来のステンレス材の機械加工では極めて困難であった、 $\phi 2.5$ ダイアフラム部材成形も実現することができた。しかしながら射出成形法全体の課題としては、部材内部には不純物や結晶欠陥、更には微少なボイド上の鑄造欠陥が存在していたことから、成形条件の最適化を進めている。

3.8 センサー素子の試作

金属ガラス製センサー素子の機能サンプルを試作し、特性評価を行った。 Zr 基金属ガラス製センサー素子の感度は、従来の SUS630 圧力センサー素子の4倍（ヤング率2倍×アニール効果2倍）を示し、金属ガラスの優位性が改めて確認できた。

3.9 信頼性・安全性

ダイアフラム部材の鑄造欠陥が与える影響について示す。圧力センサーは静的な圧力印加状態だけでなく、脈動の様な繰り返し状態（動圧）で印加される場合も多い。このため従来のステンレス材では疲労限を考慮して、 10^7 回以上の動圧耐久性が要求されている。成形品質を改善したサンプルにおいては、おおむね 10^7 回をクリアできるようになってきた。

3.10 センサー素子の製造プロセスと耐久性

ダイアフラム部材の成形品質が向上し、結晶欠陥や鑄造欠陥などによる影響が少なくなり、そのなかで改めて材料強度に対するプロセス温度影響が浮かび上がってきた。歪ゲージの低温形成技術の確立により、結晶化温度 (T_x) はもとより、ガラス転移温度 (T_g) 以下の温度領域で処理したサンプルにおいて、圧縮試験による破壊モードが異なることが分かっ

た。

3.11 今後の試作・製品化予定、課題及び展開

現在金属ガラス合金製圧力センサーの量産化を目指し、品質の確保と製品化企画・設計を進めている。これまでの研究開発の結果から、ダイヤフラム部材の成形品質を向上させ、量産レベルにおいてもそれが維持・管理できる手法の確立が重要である。

一方、歪ゲージの低温形成技術においても、構造緩和などによる強度劣化を最小限に抑えるため、更なる低温化に取り組む必要がある。

3.12 金属ガラス製圧力センサーの製品化構想

これまでの研究開発の結果、金属ガラスを用いた圧力センサーの有効性及び実現可能性が確認できた。製品化の構想としては、金属ガラス製圧力センサーに関わる各要素技術のレベルアップを図り、市場ニーズにマッチした製品企画・設計が重要である。これらに基づき、数多くの市場ニーズがある中で、現在 SUS630 製圧力センサーで十分な対応ができない分野に対する製品投入が最も有効であり、また早期の製品化を目指すものである。

2.4 マイクロギヤードモータの開発・試作・実用化

マイクロモータの市場については、直径 12mm、7mm、4mm、2.4mm と小径化していく中で、スイス社製の直径 1.9mm のギヤードモータが最小であったが、このギヤードモータの歯車は、樹脂で構成されているため、寿命が短く、高負荷に耐えることができないという問題があった。そこで並木精密宝石(株) (以下「並木」という)においては、直径 1.5mm のギヤードモータを目標に設定し、新規に設計をし直して、開発に着手した。ギヤヘッドにおける減速構造は、プラネタリー型の遊星歯車機構を採用することにより、高減速比が得られる反面、ギヤヘッド入力側の高回転数と、出力側の高回転トルクという状態にあるため、各ギヤ部品は摩擦力、ねじれ、局所的な発熱が絶えず発生し、摩擦、欠落、カジリなどにより回転停止故障の一因となる。またこの構造については、従来の太陽キャリアにおいてプレートのそれぞれの面において、3本のピンと太陽歯車が必要になるため、ピン及び太陽歯車は機械加工の上、キャリアプレート上に垂直・高位置精度に圧入・カシメ組立工程が必要となるため、工程数の増加となっていた。

超精密微細歯車では $1\mu\text{mR}_y$ 以下の表面粗さが必要とされる。しかし、これらの一般的な結晶質ダイカスト合金は結晶粒界が存在するために、 $5\mu\text{mR}_y$ 以下の表面粗さを達成することが極めて難しい。このため、精密機械加工により表面粗さ $1\mu\text{mR}_y$ 以下とする方法をとらざるを得ないのが実情である。更に、高融点結晶質合金であることから、凝固収縮による寸法精度の劣化も懸念される。

そのため金属ガラスを超微細精密歯車に適用することで、これらの諸問題が全て解決可能と考えた。すなわち、金属ガラスのサブミクロンオーダーでの金型転写性、本質的に結晶化による凝固収縮を伴わないことによる良好な寸法精度、及び比較的低融点でありながら高強度・高靱性をもつことから、従来の精密機械加工歯車の強度 (1500 MPa 程度) と

表面粗さ ($1\ \mu\text{mR}_y$) を維持しながらもダイカスト法による複雑形状の精密部品の作製が可能と考えられる。この結果、従来歯車と同等もしくはそれ以上の特性を有した複雑形状の超微細精密歯車が一体成形されることで低コスト生産が可能となる。

また金属ガラスは転写性の優れた材料であるため、金属ガラスのサブミクロンオーダーでの金型転写性が実現できた。歯車などの機械的構造部品で精密成形に適する金属ガラスとしては、Zr 基、Cu 基、Ni 基、Fe 基合金が挙げられ、金属射出成形法により実証してきた。Zr 基は、Cu 基、Ni 基、Fe 基に比較して、バルク状の部品として、ガラス化しやすさ、すなわちガラス形成能に優れているため、これら合金を中心として、各種検証した。金属ガラスの耐摩耗特性については、例えば Ni 基金属ガラスの場合、結晶金属である S K 材と比較して、すべり摩耗試験における耐摩耗特性は良好でない結果となっている。これは Ni 基金属ガラスにおける摺動面の塑性流動に起因した摩耗があると考察されている。一方、転がり摩耗試験においては、S K 材と比較して耐摩耗特性が良いという結果となっている。これは転がり面が塑性流動により平坦化し、応力緩和しているためと考察されている。また、歯車については転がり面とすべり面を有する摺動形態が複合化されたものであり、従来の S K 材が 8 時間で停止したのに比べ、Zr 基合金では 215 時間、Ni 基合金では 2500 時間、継続回転したというデータも得られている。

金属ガラスを使用した直径 1.5mm ギヤードモータの特性は、直径 2.4mm のモータと比較すると、小径化した分だけ起動トルクが減少しており、その分ギヤヘッドの設計変更により、ギヤードモータのトルクとしては、それより大きな特性値にすることができた。4 段形のマイクロギヤードモータのトルクは、携帯電話に使用される直径 4mm の振動モータに比べ、約 80 倍に相当し、このサイズとしては実用上問題のないトルクとなっている。

金属ガラスを用いた超精密歯車は金型転写性に優れ高強度であるという利点をもっていることから、従来不可能であった直径 0.5mm 以下の超微小な精密歯車が製造できる利点がある。マイクロギヤードモータに用いられるギヤヘッドの組立作業は、従来ピンセットや専用治工具を用いて、作業者が顕微鏡を通して手作業によって行われていた。この作業には職人的な熟練した技量を要するため、作業者は限られていた。しかしながら直径 1.5mm 以下のギヤヘッドにおいては、手作業のみの組立作業の実質的な限界サイズであり、組立工程の機械化の必要性に迫られていた。そのため、並木では金属ガラスの超精密歯車の超小型ギヤヘッドの組み立ての機械化ということで、マイクロマニピュレータを導入し、それを更に改造して、組立機械化の実証機として、各種実験を行った。本装置は一度ポジション記憶させることにより、その後はシーケンス制御が可能である。この結果、マイクロギヤヘッドの組立作業においては、ハウジング内に各ギヤ部品の挿入、組み付け、回転可動テストの操作が確認でき、この装置を元に、今後ギヤヘッドの組立の量産化の目処を立てていく。

現在検討しているこれらマイクロギヤードモータの市場については、微小径を生かした分野として、医療機器、精密光学機器、マイクロロボットなど、マイクロファクトリーが考えられる。中でも現在積極的にアプローチしているのが、医療機器分野である。特に、血管内に挿入することにより、血管内の付着物を切削する切削器、血液循環を補助するポ

ンプ、カテーテル内視鏡先端に装着する各種検査機器、その他内視鏡、マイクロポンプなどを目標として国内、欧米のメーカ、大学、研究所などを訪問し、直径 1.5mm のギヤードモータのサンプルを提供し、実装設計を依頼しているところである。ここで重要なことは、顧客は、金属ガラス製の歯車で構成されたギヤードモータに価値を見出すのではなく、ギヤードモータとして強度・寿命・小型化などに価値を見出す。メーカ側としては金属ガラスでなければならない必然性、特徴がどこにあるかを常に意識する必要がある。今後並木としては、金属ガラスの特性を生かした製品を、ギヤードモータは元より、その他に応用したオンリーワンの商品に結びつけることを目指している。

各サンプルを提供している中で、医療機器搭載における問題点としては、滅菌対応であり、内視鏡などで再度使用する場合、装置全体をオートクレーブ処理し、高温・高圧滅菌するため、耐熱性に優れている必要がある。生体適合性としては、体内で臓器・血管に直接接触する場合に、Ni 金属のアレルギー、ギア間の潤滑剤の浸出、モータ自体の発熱対策、シール構造などさまざまな検討が必要である。また新規医療機器として、医療法の認可を得るためのハードルは高く、多くの時間を要する。

金属ガラスを使用したマイクロギヤードモータについては、現在直径 1.5mm を製品化に向けた検討を行っており、これらは並木製品としてすでに製品化している 2.4mm、4mm、……などと共に、並木のマイクロモータのラインアップを目指す。製品化の目標としており、医療機器用とを中心として展開を図っている。しかしながら顧客の中では、更に小径化のモータの要求もあり、金属ガラスはそのような微細な部品においては、十分な性能を発揮できるものとして考えている。そのため、現在その他の条件、例えば耐熱性、生体適合性、耐食性などを完全に検証し、更に大きな問題であるモータとしての市場要求コストと、部品コストについての整合性を今後解決していく必要がある。特にディスプレイの医療機器においては、低コスト化の要求は更に厳しいと予想され、顧客要求に見合ったコストを実現できるよう検討を進めていく。

2.5 超低損失インダクタ材料“センチクス（金属ガラス）”と低損失チョークコイル“MPCG シリーズ”の開発

5.1 要旨

ユビキタス化が著しい進展をみせる中、ノート PC を始めとする情報機器におけるアプリケーションの充実がめざましいものがある。それに伴い電源回路周りにおいては、高速で高品質なエネルギー供給と消費電力の抑制が大きな課題になっており、高い電源効率の実現が最重要課題となっている。その課題を実現するために従来のフェライト材料ではなく、鉄を主成分とした金属ガラスに着目し開発を進め、まったく新しい超低損失インダクタ材料“センチクス（金属ガラス）”を実現した。また、それをコア材とする大電流対応の低損失チョークコイルを開発、実現したので報告する。

従来のインダクタ材料としては、所望の電流平滑性や定電圧化を実現するために、飽和磁束密度の大きい鉄粉あるいは Fe-Si 粉末などの結晶質金属ダストやアモルファス金属ダストを樹脂と共に一体成形した金属圧粉磁心が用いられる。しかしながらこれら鉄系の結

晶質金属ダストは、鉄を主成分とすることから高い飽和磁束密度を有する反面、結晶構造に由来する結晶磁気異方性や磁気歪みによる磁気損失(ヒステリシス損失)が大きいいため、これら材料をインダクタ用コア材に用いた場合、電源回路における電源効率低下因子として無視できない。このように現在、結晶質金属ダスト、アモルファス金属ダストが使用されていたが、高飽和磁束密度と低ヒステリシス損失を両方満足することはできず、高い電源効率を実現するには至らなかった。

そこで NEC トーキンでは、飽和磁束密度が大きくかつヒステリシス損失(特に結晶磁気異方性)が極めて小さい鉄系金属ガラスダスト“センチクス”と、それをコア材とした新しい低損失チョークコイル「MPCG シリーズ」の実用化を目指し開発を行ってきた。

試作は金属ガラスの高形性能領域を狙い、鉄を主構成元素として P、B、Nb を適量添加した合金系を選び、高周波溶解をして水アトマイズ法により作製した。その後粉末は図 2.5-1 SEM 観察、図 2.5-2 XRD 分析、図 2.5-3 DSC 分析を行った。次金属ガラス粉末をバインダ混合、造粒を行い、最適プレス圧でトロイダルコア、実装タイプのチョークコイルを作製し、図 2.5-4 コアロスと実装効率評価を行った。

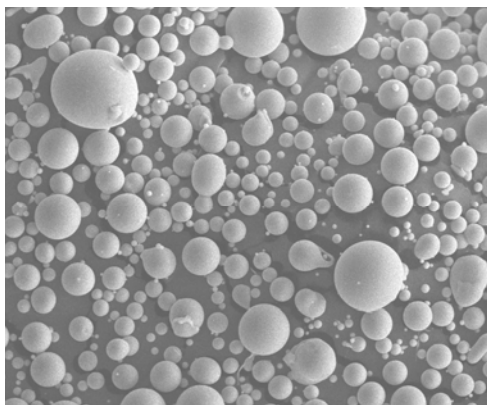


図 2.5-1 金属ガラス SEM 観察写真

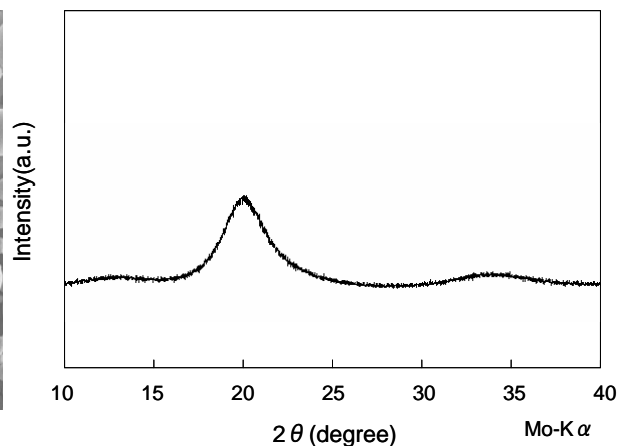
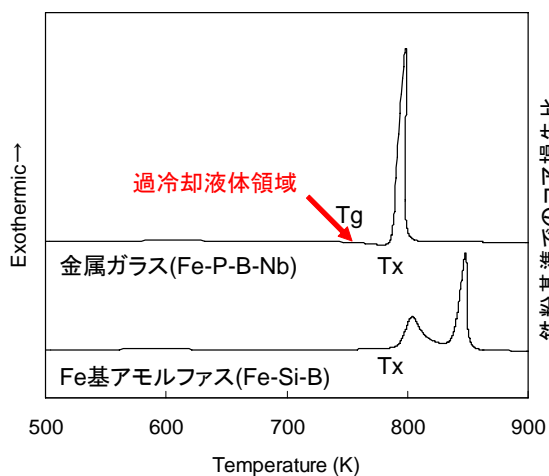


図 2.5-2 金属ガラス XRD 分析



開発粉末および市販Fe基アモルファス粉末のDSC曲線

図 2.5-3 DSC 分析

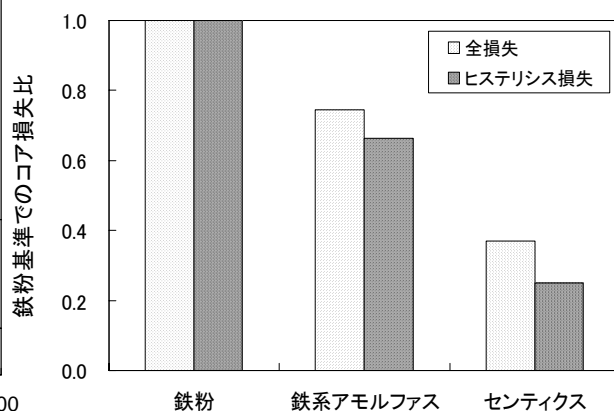


図 2.5-4 コア損失比較

表 2.5-1 センティクスの電磁気特性

材料特性 材 質	飽和磁束密度 B_s [T]	比透磁率 μ 100kHz	保磁力 H_c [A/m]	電気抵抗率 ρ [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]
センティクス	1.3	6000	2.0	130
純 鉄	2.2	200以下	64	10
6.5%Si-Fe	1.8	1600	20	80
鉄アモルファス	1.5	2900	3.0	115

“センティクス”は微細球状化粉末であり、表 2.5-1 に示すように、大電流通電に十分対応可能な飽和磁束密度 $B_s=1.3\text{T}$ を有するとともに、比透磁率も $\mu=6000$ を実現しており、高飽和磁束密度と高透磁率を両立する軟磁性材料である。加えて非晶質性に優れ結晶磁気異方性の小さい組成であるために、保磁力 H_c が低く、その結果として、図 2.5-5 に示すように、ヒステリシス損失が小さいので、大電力用インダクタに極めて適した軟磁性材料である。

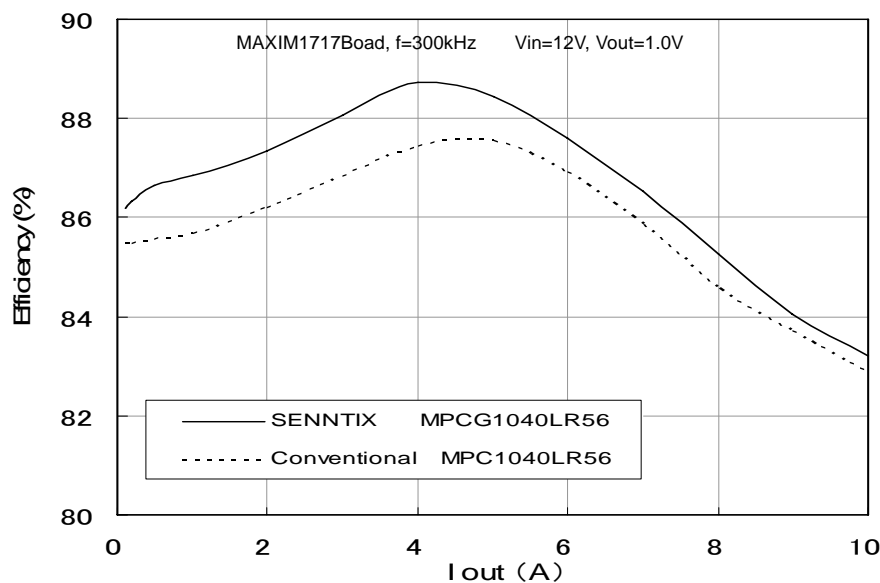


図 2.5-5 電源負荷効率特性

NEC トーキンのメタルコンポジット型チョークコイル (MPC1040LR56) のコア材として“センティクス”を適用したときの電源効率の改善を示す。“センティクス”を適用したことにより、0.1A から 10A までの負荷電流全域において実効効率が向上している。特にヒステリシス損失の占める割合が大きい 5A 以下の低電流域においては 1.5%以上の高効率化が実現できていることから、低損失チョークコイル「MPCG」シリーズをノート PC などに適用することで待機時間向上などの効果が期待できる

5.2 まとめ

情報化社会を牽引するモバイル電子機器のエネルギー効率を改善するために、金属ガラスである超低損失インダクタ材料“センチクス”とそれをコア材とする低損失チョークコイル“MPCG シリーズ”を開発、実用化し、顧客への最適ソリューションを提供できた。

現在ノート PC を始めとする情報機器の電源回路に多数使用されており、今後は安定した非晶質構造を有する微細球状化金属ガラス粉末の開発と、チョークコイルの特性を十分に引き出すための成形加工性をも考慮した材料、コイル構造設計を行い、材料特性とデバイス特性を向上させるべく開発を行っていく。

2.6 磁性シート

2.6.1 市場動向

昨今、携帯電話、デジタルカメラをはじめとする電子機器の進化は目覚しく、小型で高性能、高性能を兼ね備えた新製品が続々と商品化されている。これを実現するためには機器を構成する電子部品の高密度実装、駆動周波数の高速化が不可欠であり、電子機器の筐体内部から発生する不要電磁波(Electro-Magnetic Compatibility : EMC)の問題、即ち機器の誤動作や人体に及ぼす影響が懸念されるようになってきた。

このような EMC 対策の部品として、90 年代後半よりノイズ源や伝送線路に設置することでノイズを吸収し伝播を抑制するシート状の部品が各社より発表されている。

また、最近 13.56MHz の電磁波を利用した通信方法(Radio frequency identification : RFID)による電子決済機能を備えた電子機器が増えてきている。ここで用いられるアンテナは各種部品が高密度に実装された端末内の僅かなスペースに配置されるため、近接するシールド筐体などの導体によって通信距離が著しく妨害されてしまう。これを解決する手段としてアンテナと導体間に磁性シートを装着する方法が用いられている。13.56MHz での特性を最適化した磁性シートが実用化されている。

2.6.2 背景

前述の市場動向に見られるように、電子機器の小型化、高性能化は今後も進展することが予想され、磁性シートには MHz から GHz 帯においてノイズを効果的に抑制、または RFID 機能を安定的に確保することが求められている。これらの磁性シートの特性は、軟磁性金属粉末の特性により大きく影響をうけることが知られている。

そこで、アルプス電気(株)では表 2.6-1 に示す優れた軟磁気特性に加え、高いガラス形成能を有する金属ガラスに着目し、磁性シートへの応用を図っている。本項では、この Fe 基金属ガラス(商品名:リカロイ™)をノイズ抑制シート及び RFID 機器に実用化した例について紹介する。

2.6.3 試作

(1) 部材・材料の特性

表 2.6-1 にリカロイ™ (Fe-Cr-P-C-B-Si)の磁気特性、及び電気抵抗率を示す。併せて、磁性シートに一般的に用いられる結晶質軟磁性合金の特性も示す。リカロイ™は結晶質の軟磁性合金と比較して、飽和磁化、最大透磁率、固有抵抗値が高い値を有しているのが特

徴である。

表 2.6-1 リカロイ™と代表的な結晶質軟磁性合金の特性.

	I_s (T)	H_c (A/m)	μ_{\max}	ρ ($\mu \Omega \text{cm}$)	λ_s (10^{-6})
Fe-Al-Si	1.10	1.6	116,000	80	≈ 0
Ni-Fe	1.08	4.0	100,000	16	≈ 0
リカロイ™	1.29	1.9	186,000	153	17

(2) 試作評価

リカロイ™を用いた磁性シートの試作事例について示す。初めに、所定の組成となるように Fe-Cr-P-C-B-Si 原料を秤量し、これを高周波溶解炉により熔融、水アトマイズし、図 2.6-1 に示す概球形の平均粒径約 $20 \mu\text{m}$ のガラス単相粉末が作製できる。これらはアトライターにより、平均粒径約 $50 \mu\text{m}$ の扁平粉末に加工することができる。

得られた扁平粉末は所定の混合割合でマトリックス樹脂と混合し、ドクターブレード法により $0.02 \sim 0.1 \text{mm}^t$ 厚さのシート形状に成形できる。図 2.6-2 にノイズ抑制シート及び RFID 用アンテナ補助シートの外観を示す。

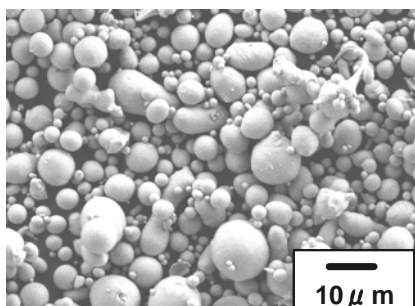


図 2.6-1 リカロイ™粉末の外観写真

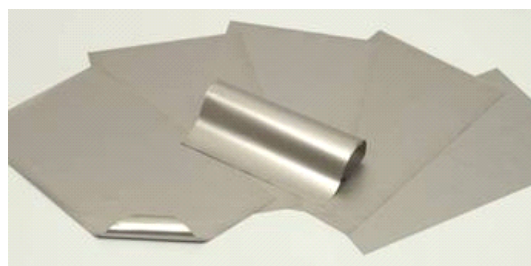


図 2.6-2 リカロイ™のシートの外観写真

(a) ノイズ抑制シート

ノイズ抑制シートは、信号ライン上や各種ノイズ発生源と見られる部品に直接設置されるために、表面を高電気抵抗化し、取り込んだノイズを効率良く熱に変え消費するため、虚部透磁率成分 μ'' を高める手法が一般的に用いられる。

図 2.6-3 にリカロイ™磁性シートと Fe-Al-Si 合金を用いた磁性シートの μ'' の周波数依存性を示す。リカロイ™シートでは、 $20 \text{MHz} \sim 2 \text{GHz}$ の比較的広い周波数範囲で $\mu'' > 20$ の高い値を保持し、特に 300MHz 以上の高周波領域において、Fe-Al-Si シートより高い値を保持している。

図 2.6-4 にデジタルスチールカメラ (DSC) に磁性シートを装着したときのノイズの低減効果を示す。図中太線で示したのは VCCI (Voluntary Control Council for Information technology Equipment) の規格であり、情報処理装置 (ITE) ではこの規格を満足しなければ出荷できない。図よりシートなしでは規格を満たさないが、リカロイ™シートの設置により規格をクリアし、且つ Fe-Al-Si シートより規格に対してマージンがとれることが分かる。リカロイ™シートの優れた磁気特性が高いノイズ抑制効果を引き出しているといえる。

(b)RFID アンテナ補助シート

昨今、クレジットカードなど磁気式のカードに代わり、小型の IC チップとアンテナで構成されている、いわゆる 13.56MHz 帯を使用した非接触式 IC カード (RFID カード) システムが多用されるようになってきた。しかし、この機能を携帯電話のような機器内部に取り込んだ場合には、シールド筐体やプリント基板などの導体のために RFID 通信機能が阻害されることが問題とされている。磁性シートはアンテナ部と導体間に貼り付けることにより、磁気ヨークとして磁束を引き込み、通信を安定化する効果を有している。搬送周波数である 13.56MHz において、高い μ' と低い μ'' 、即ち高い性能係数 Q を実現するものが良好な磁性シートであるといえる。

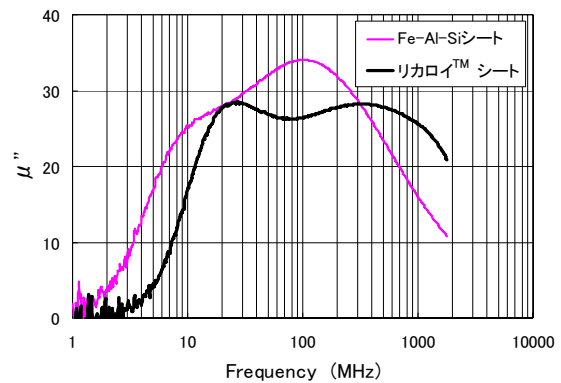


図 2.6-3 リカロイ™シート及び Fe-Al-Si シートの μ'' の周波数依存性

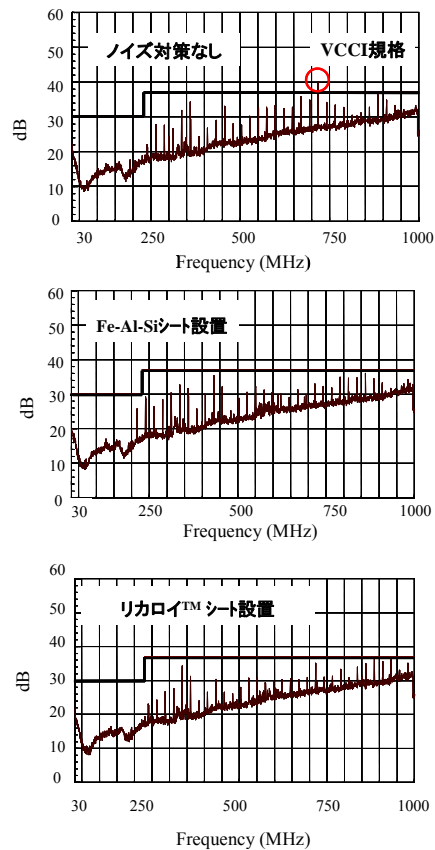


図 2.6-4 DSC に磁性シートを装着した際のノイズの低減効果

表 2.6-2 13.56MHz におけるリカロイ™シート及び Fe-Al-Si シートの磁気特性

	μ'	μ''	Q	$1/(\mu Q)$
リカロイ™シート	34.0	0.33	103.0	0.0003
Fe-Al-Siシート	33.4	0.93	35.9	0.0008

表 2.6-2 に RFID 用リカロイ™シート及び Fe-Al-Si シートの 13.56MHz の μ' , μ'' , Q, $1/\mu Q$ を示す。リカロイ™シートは Fe-Al-Si シートと同等の μ' 特性を示すが、 μ'' が低く、その結果、Q が著しく高い値を示す。上述のとおり、高い Q を有する磁性シートはより多くの信号の磁束を収束することが可能となり、RFID 通信においては有利であるといえる。これは、リカロイ™が Fe-Al-Si の約 2 倍の高い電気抵抗を有していること、強度が高く製造工程内の加圧・圧縮で変形しにくいことから、個々の粉末がマトリックス樹脂により完全に絶縁されていることでシートが高電気抵抗を示すためと考えられる。

図 2.6-5 にアンテナ側の金属板、磁性シートの有無と RFID 通信距離との関係を示す。金属板のない場合には、10cm を超える通信距離を確保することが可能であるシステムにおいても、アンテナ背面に金属板が設置された場合には通信不可となる。この状態で、金属板とアンテナ間に磁性シートを装着することにより通信は回復する。リカロイ™シートを設置した場合には、Fe-Al-Si シートを装着した場合に比べ、20%程度大きな回復効果が得られる。即ち、リカロイ™シートでは、薄くても Fe-Al-Si シートと同等の通信距離を確保することができ、通信機器の小型薄型化できることを示している。

2.6.4 今後の予定

今後の磁性シートの展開としては、これまでのノイズ抑制効果の向上、RFID 通信感度の向上に加え、高熱伝導化、ノンハロゲン化、また数 μm 厚さでの上記機能の達成など種々の展開を検討している。これは、マトリックス樹脂の機能に依存する部分もあるが、基本的には磁気性能を担うリカロイ™の更なる改善・改良が重要である。

2.6.5 まとめ

リカロイ™シートは、Fe 基金属ガラスであるリカロイ™の有する良好な軟磁気特性、高電気抵抗に依存し、数十 MHz～数 GHz の広い周波数領域で良好なノイズ抑制効果を発揮する。特に 500MHz 以上のより高い周波数においてその効果は顕著である。13.56MHz においては高い μ' と低い μ'' を実現し、この結果著しく高い Q を有することから、RFID アンテナの感度を向上させるのに適している。電子機器の進展に伴い、薄型化、高周波化の市場ニーズは益々高まると考えられ、リカロイ™の持つ特性が更に活きるものと考えられる。金属ガラスの更なる特性改善、実用化研究により、新たな電子デバイスへの応用展開が期待される。

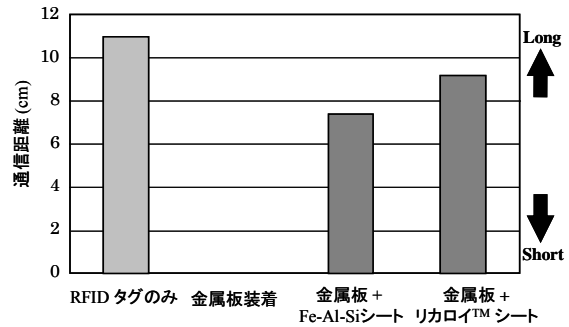


図 2.6-5 RFID アンテナへの金属板、磁性シートの有無と通信距離の関係

2.7 アモルファス変圧器の現状と金属ガラスへの期待

近年の地球温暖化防止に向けての二酸化炭素排出量削減の取り組みが強まる中、アモルファス金属を鉄心とした変圧器（アモルファス変圧器）は、その低損失の特長が見直され、配電用途で大きな市場が開けつつある。しかし、現在のところ金属ガラスはこの分野での応用が進んでいない。そこで、本項ではアモルファス変圧器とこれを担うアモルファス金属の特性の現状を示すとともに、この分野での応用に向けた金属ガラスへの期待を述べる。

1990年以降に地球環境保全が全世界規模での環境課題としてクローズアップされ、特に地球温暖化防止に向けての二酸化炭素排出量削減を目指した省エネルギー化の要求が高まる中、回転機や変圧器の損失を抑制することが大きな技術課題となっている。2003年4月に施工された省エネルギー法の改正により、高圧受配電用変圧器が特定機器と定められ、旧JIS品に比べ約30%損失を低減したエネルギー消費効率の基準値が設定された。この基準値により、油入り変圧器に対しては2005年から、モールド変圧器に対しては2006年から、トッランナー方式が施工されている。

一方、1970年代に発明されたアモルファス金属は、その低損失特性及び励磁特性に着目して、配電変圧器への応用研究が世界中で活発になされた。1981年にはアモルファス金属薄帯が商品化されたことにより、アモルファス変圧器がはじめて実用化された。現在アモルファス変圧器に採用されている Metglas2605SA1®（SA1材）の材料特性を代表的な方性珪素鋼板と比較すると、まず保磁力が小さいため、鉄心に磁束が通る際に発生するヒステリシス損失が小さくなるので、エネルギー変換効率において有利である。また、アモルファス SA1材の固有電気抵抗率は、方向性珪素鋼板と比較して3倍強大きいため、交番磁束が鉄心を鎖交する際に発生する渦電流損失の抑制に対しても珪素鋼板に比較して有利である。これらのアモルファス金属の特長を活かして、特に電力搬送の配電系で使用される配電用変圧器にFe基アモルファス合金を鉄心材として適用することにより、電力損失を大幅に削減することができ、トッランナー基準の高効率珪素鋼板変圧器より更に低損失な変圧器設計が可能となる。

アモルファス変圧器の課題は、体格、重量及び騒音である。体格が大きく重量が重いのは、Fe基アモルファス合金であるSA1材の飽和磁束密度が珪素鋼板の約2Tに対して約20%小さいことに起因する。アモルファス合金では、アモルファス形成能を向上させるため、Feの一部をBやSi、C、Pなどの非金属元素で置換する必要がある、これが高い飽和磁束密度を得るための制約となる。Fe基アモルファス合金を配電用鉄心として使用する場合、このような制約により最大動作磁束密度は1.3～1.35Tで設計される。このため、より高い1.65T程度の動作磁束密度で設計可能な珪素鋼板変圧器と比較し、鉄心重量や鉄心体積が大きくなることがアモルファス変圧器のさらなる普及拡大の課題の一つとなっている。また、騒音の原因の一つとして、アモルファス金属の磁歪による鉄心の振動が挙げられる。一般的には、アモルファス金属の磁歪の絶対値が珪素鋼板に比較して大きいため、珪素鋼板変圧器に比べて騒音に対して不利とされている。こうした飽和磁束密度と磁歪特性に課題はあるが、その抜群の低損失特性を省エネ変圧器に積極的に応用し

ていく動きが変圧器メーカーにおいて急速に高まっている。

変圧器全体に占めるアモルファス変圧器の比率は、統計資料がないため正確な数字は把握できないが、アモルファス金属の生産、出荷重量などから換算し、およそ5%前後と推定される。アモルファス薄帯の形状(最大幅)に現在制約があるため、50kVA以下の標準変圧器や2,000kVA以下の中型非標準受電用途に適用されている。トッランナー新規格に対応する産業用超効率変圧器として、国内では「Super アモルファス変圧器」なる名称で商品化されている。アモルファス変圧器による省エネ効果を、変圧器寿命が30年で平均負荷率50%として、三相1,000kVA級の産業用変圧器について試算すると、トッランナー基準珪素鋼板変圧器対比、約242MWhの省エネ効果が期待できる。アモルファス変圧器の総損失(30年間)は、負荷率40%でトッランナー基準珪素鋼板変圧器の半分以下と小さく、省エネルギー効果が極めて大きい。上記の省エネルギーに対する要求が高まる中で、今後アモルファス変圧器の世界需要は確実に増加すると考えられ、近年経済の急速な発展によるインフラ整備が進んでいるアジア圏、特に中国、インドなどでの伸びが著しい。

その高い省エネ効果により注目されているアモルファス変圧器に対し、変圧器メーカーより材料の高飽和磁束密度化の要求が強い。こうしたメーカーからの材料性能向上の要請に応えるべく、SA1材と同等の損失特性を維持し、かつ飽和磁束密度を10%近く改良した高飽和磁束密度の材料が開発された。この新材料を3相変圧器に適用することにより、設計磁束密度を従来材の1.35Tから0.1T上げた1.45Tで設計することが可能となり、SA1材を使用した場合と比較して、据付面積で約10%、総重量で約5%の小型軽量化が可能となる。また、開発材はBH曲線の角型性に優れるため、低騒音設計も可能となった。本開発材を用いることにより、従来のアモルファス変圧器で課題となっていた小型化と低騒音化が実現でき、アモルファス変圧器の設計自由度が大幅に広がり、その普及が更に促進されることが期待されている。

変圧器メーカーからの要請に応じて新たな高Bsアモルファス金属が開発されたが、Fe基アモルファス合金のさらなる高性能化は、かなり難しい開発課題になりつつある。一方、変圧器用アモルファス材開発のもう一つの焦点は生産性の向上にある。すなわち、実用化されているアモルファス金属の薄帯幅を更に広げることや、平均板厚を現状よりも1 μ mでも厚くすることが求められている。平均板厚を厚くすることは、生産性だけではなく鉄心の占積率を上げて相対的に鉄心磁束密度を向上させるという効果がある。こうした課題解決のため、新材料としての金属ガラスに対する期待が高まっている。

金属ガラスは原子配列に規則性がないアモルファス状態をバルクで実現できることが特長であり、アモルファス形成能が極めて高い材料といえる。このことは、軟磁性材料として有用なアモルファス状態の粉末や薄帯を、アモルファス金属に比べて容易かつ安定に作製できることを示唆している。現在、こうした観点から磁気シートやチョークコイルの軟磁性応用分野での金属ガラス粉末の実用化が始まっている。

変圧器用鉄心材料として金属ガラスの特長を考えた場合、アモルファス形成能に極めて優れることは、本質的に薄帯の広幅、厚肉化に適する材料であると期待される。従来のア

モルファス金属ではアモルファス状態形成に必要な臨界冷却速が大きく、製造装置においてこうした超冷却速度を安定かつ均一に実現することが難しい。また、Fe基アモルファス合金の鉄損特性は、板厚が厚くなると、薄帯表面の結晶化更に薄帯全体の結晶化が進行してアモルファスとしての軟磁性特性を消失し、ヒステリシス損失が急速に増加する。一方、アモルファス形成能に極めて優れる金属ガラスは、本質的に広幅化や厚肉化に適する材料であるとともに、厚肉化しても珪素鋼板やアモルファス金属よりも小さい損失になることが予測される。このような鉄損特性を持つ広幅の金属ガラスが薄帯形状で実用化されれば、現在の珪素鋼板変圧器の製造ラインを適用した高効率の変圧器製造が可能となることも期待できる。以上の観点から、変圧器用途に適する軟磁性特性を有するFe基金属ガラス薄帯の開発が現状のアモルファス金属を超える低損失な変圧器の実現に重要であると考えられる。

2.8 金属ガラス製回折光学素子の開発

8.1 はじめに

本調査研究では、金属ガラス製回折格子を開発することを目的とする。特長として金属ガラスの有する粘性流動をいかしたナノメートル精度形状転写性能、プラスチックに比べると熱膨張係数が小さく、剛性が2桁大きいことなどにより、従来の回折格子、並びにプラスチック製回折格子と比較して光学的高性能素子が実現できること。また、耐吸湿性、耐熱性などの耐環境性に優れた回折格子を実現することができる。本研究成果として、将来的には金属ガラスのナノインプリントによる製法により、低コスト、量産加工を目指す。

8.2 目的

本調査研究の対象とする回折格子は、その表面にナノメートルオーダー間隔の凹凸周期構造を有する反射板で、照射光の特定の波長成分のみを抽出することに利用される。これにより、各種分析機器をはじめ、光通信、バイオ、メディカル機器などの広い分野で用いられている。この回折格子は、超精密工作機械（ルーリングエンジン）を用いた切削加工により作製されてきたが、近年ではその量産化のために金型成形による方法が用いられ、材料にはプラスチックが用いられている。しかしながら、プラスチックは金属材料に比べて熱膨張係数が大きいこと、機械的強度と弾性係数が小さく剛性が低いことから、一般にガラス基材に接着した状態で成形加工が行われ、その後表面にアルミなどの反射膜をコーティングして用いている。本調査研究では、以上の回折格子に対して、金属ガラス製回折格子を開発することを目的とし、市場に評価して頂ける金属ガラス製回折格子の試作品（プロトタイプ）を作成することである。

8.3 内容

金属ガラス製回折格子の優位性として、現用品の回折格子（Grating）では、ガラス基

板 (blank) 上に樹脂材料の回折格子溝が形成されている。その溝はマスター金型より樹脂成形され、その表面にアルミなどの反射膜がコーティングされている。回折格子溝が樹脂で形成されているため、高温・高湿下、水中、酸化雰囲気中での使用が難しい。これに対し、金属ガラス製回折格子では、200～400℃の高温下での使用、水中、酸化雰囲気中での使用が可能である。関連する製作方法を表 1 に説明する。

表-2.8-1

製作方法	具体的内容
1.超精密切削加工	現用品の格子溝はレーザーの2光束干渉法を利用したホログラフィック露光法とイオンビームエッチング法、更に電鋳法によりマスター金型を作製しているが、金属ガラスを直接切削加工することにより、回折効率の高いモデル形状を得る。課題は金属ガラスへの超精密切削加工技術開発である。
2.金型製作方法	マスター形状から電鋳により金型形状を作製しているが、金属ガラスの成形加工により、マスター形状の反転金型を高効率生産する。これにより、金型製作期間の短縮とコスト低減化を図ることができる。
3.回折格子のナノインプリント成形加工	金属ガラスのナノインプリントにより回折格子の超精密成形加工を行う。金属ガラスの有するアモルファス構造に起因するナノメートルオーダーの等方、均質性に加えて、ガラス遷移温度付近の温度で示すニュートン粘性流動を利用した成形加工によってはナノメートルオーダーの微細精密加工が可能である。

本研究では、金属ガラスを用いたナノインプリントによる製作法により、低コスト、量産加工回折格子を開発することを目的として実施した内容について報告する。

8.4 試験実施工程

- a)光学設計 : 装置の小型化や高機能が目的であり、並列した異なる光源から出た光線はスリットを通過し、軸外し放物面鏡によって平行光とした光線を回折格子によって反射させ、回折格子の分散機能を利用し光線を重ね合わせ、更に軸外し放物面によって折り返し一点に集光させるツェルニターナ光学系を採用した。
- b)超精密加工 : 表-2.8-1 の 3.に示す、金属ガラスへのナノインプリントを行うため、マスターとなる金型の製作が必要である。設計に適合したマスター金型、光学設計を満たすナノメートル精度の工具設計製作・ナノメートル精度の運動性能を有する超精密加工機と±0.025℃レベルの環境精度化においてマスター金型加工を実施した。
- c)成形プレス装置 : 本調査研究に用いた成形機は、極小微細成形の試作成形を目的とし、真空雰囲気内で型締と原料熔融、加圧機構をもつ。加圧温度はガラス転移点である 250℃以下で制御し、最大加圧は 1200kgf で成形後にアルゴンガスを注入し冷却する。
- d)金属ガラス : 単ロール法にて製作された金属ガラスを圧延及び研磨処理を行い金属ガラスの厚みの均一性と平坦度を出しておくが限界がある。そこで、実際に成形機を用い更なる厚みの均一性と鏡面性を得るために、カーボン基盤に金属ガラス片を挟み、プレスし平行度・平坦度を向上させる。今回使用した金属ガラスは、Pt 系金属ガラスを用いた。金属ガラス組成比 (at%) は Pt 48.75, Pd 9.75, Cu 19.5, P 22 である。
- e)成形プレス加工 : 事前実験により、金属ガラスが機能性に優れていること、アモルフ

アス構造に起因するナノメートルオーダーの等方均質性を有することが、ナノメートルレベルの転写性で確認できた。回折格子転写試験では、3種類のφ30mm 無電解 NiP メッキ製マスター金型（格子なし、一部格子あり、全面格子あり）を用いて段階的に検証を行った。

8.5 結果

転写性試験により以下に示すような結果が得られた。

- ・ ナノメートル領域において、表面粗さ、うねり、コーナーRなどが、マスター金型と同様の数値を示す転写性が得られた。表-2.8-2 に代表的な値を示す。表面粗さがやや低下している原因としては、金属ガラス試験片表面の清浄度が影響している。
- ・ 格子形状に関しては、設計値と角度・深さ・ピッチにおいて若干誤差はあるが、マスター金型の補正により 10nm 以下の精度実現は十分可能である。表-2.8-3 に格子形状の設計値と金属ガラス片の結果を示す。
- ・ 格子のない平坦形状の場合では、ナノメートル以下の転写精度が得られることが分かった。

表-2.8-2 金属ガラスへの転写結果

マスター金型仕様	マスター表面粗さ	金属ガラス片の粗さ(転写後)
① φ 30mm (無電解 NiP メッキ)	Ra 8.57nm	Ra 9.73nm
② φ 30mm (無電解 NiP メッキ)	Ra 5.33nm	Ra 5.16nm
③ 10mm 角 (無電解 NiP メッキ)	Ra 4.65nm	Ra 3.55nm
④ 10mm 角 (カーボン基板)	Ra 1nm	Ra 2.18nm

表-2.8-3 格子形状の設計値と金属ガラス片の結果

	角度 (°)	深さ (nm)	ピッチ (nm)
設計値	16.0	294	1111
実測値	16.7	273	1156

8.6 まとめ

全面に回折格子の加工を施したマスター金型を用い、最終の成形転写実験を実施した。光学性能にあたる分光特性を評価した結果、全体的に各波長域において、マスター金型より 10%程度反射率は低下する傾向となった。格子なしマスター金型においてはλ=700nm 付近で 60%前後の反射率であるが、金属ガラス転写試験片は全面に転写されていないことが原因で低い値を示している。回折格子方向の相違に関しては、反射方向の違いによるものと仮定でき、各波長において同じ傾向を示していることから更なる転写率の向上とともにマスター金型と同様の反射率が得られることが予想できる。今後は、本調査研究で得られた技術を用い、仕様用途に応じ、金属ガラスを用いた金型製作を行い、射出成形用金型技術確立を計画する。これによりプラスチック回折格子の製品化を行うことで製品コスト

1/2 を目指し市場への普及を目指す。更に金属ガラスへの直接加工により、特性をいかした新たな市場が広がることを期待する。今回、完全な試作品を得ることができなかったが、金属ガラスの特長である、ナノメートルオーダーの転写性の確認ができた。また、製法上の改善点も明らかになった。光学素子への普及と市場性において若干課題は残すが、商品化の可能性がある、他の用途への展開が期待できる。

3.3 金属ガラスに関心を持つユーザへのアンケート調査

3.1 金属ガラスデータベースユーザへのアンケート

1.1 背景

本調査研究では、金属ガラス部材を使った材料創製に関する情報及び実用化／製品化に関する情報を収集するとともに、産業界の金属ガラスに対する要望について調査を行い、実用化に関する知見を得ると同時に他の材料等と比較した製品適用上のポイントや課題及びユーザニーズの動向等を明確にすることを狙いとしており、産業界の金属ガラスに対する要望調査として、金属ガラスデータベースのアクセスユーザへのアンケートで調査した。

1.2 データベースユーザへのアンケート調査方法

まず、アンケートする項目とその項目に対し予想される回答群を作成した。アンケートする項目の構成は、(1) 回答ユーザの担当職種、(2) 金属ガラスデータベースでの主な検索項目、(3) 金属ガラスの基本特性での詳細な検索項目、(4) 金属ガラス材料の要望、(5) 今後の金属ガラスの製品展開、の5項目で、全体の質問数は27問となる。

次に、調査キーワードを基に調査票を作成し、外注業者に依頼して特定のサーバ上 URL からアンケート調査できるアンケート画面に移植した。回答ユーザがアンケート画面に回答すると、そのデータが収集され調査結果が一覧できる。

1.3 アンケート調査結果

2週間のアンケート期間中に得られた回答は、34件に上った。アンケート依頼のメール送付は約90名であり、その内送信エラーを除きアンケート回収率は約40%となり、非常に高い回答率を得ることができた。

アンケートした項目は、大別して(1) 回答ユーザの担当職種、(2) 金属ガラスデータベースでの主な検索項目、(3) 金属ガラスの基本特性での詳細な検索項目、(4) 金属ガラス材料の要望、(5) 今後の金属ガラスの製品展開、の5項目である。

1.4 データベースユーザへのアンケート調査のまとめ

「金属ガラスの成形加工技術」プロジェクトで金属ガラスデータベースを作成し、一般公開した結果アクセス頂いたユーザに対し、金属ガラスの製品適用上のポイントや課題及びユーザニーズの動向を把握すること、あるいは産業界の金属ガラスに対する要望を調査するため、アンケート調査を行った。得られたアンケート結果を要約すると、下記のように

である。

- (1) 回答ユーザの事業は、材料、電気・電子、機械の分野にほぼ均等に分布し、大半が研究・開発ユーザであった。
- (2) データベース検索の主な項目は、基礎物性、機械的性質が中心で、その次に加工性であった。検索で重要度の高い順の順位付けでは、機械的性質、基礎物性、加工性の順であった。
- (3) 今後金属ガラスの製品展開として検討したい分野は、精密機械部品、金型、構造材料、ばね材料の順であり、板材を使用し切削加工、プレス加工、射出成形等により製造したいとの要望であり、今後の課題としては、製造技術、加工技術及び信頼性データ蓄積の回答であった。

3.2 金属ガラスの実用化に関する素形材センターへのアンケート

(1) アンケートの趣旨と方法

(a) アンケートの趣旨

金属ガラスの実用化の方向を探るために、前項の金属ガラス・データベースの利用者とは別に、(財)素形材センターの協力を得て、金属系材料に関心の深い素形材業界を対象にした簡易なアンケートを実施した。

(b) アンケートの方法と対象

アンケートの手法は、前項のアンケートと同様、ウェブアンケートとし、その旨の案内を、素形材センターのメールマガジン等で案内した(メールの案内は、合計 1,586 通)。実施期間は、2009 年 1 月 21 日から 2 月 3 日までの約 2 週間、有効回答は、55 件。

(2) アンケート調査項目 (調査票の設問数は 6 問)

(a) 回答者の業種 (Q1) 計 12 業種の区分から選択。

(b) 回答者の関心のある物性項目の組合せ (Q2 に第 1、Q4 に第 2)

金属ガラスの特徴的な物性値から 13 項目の物性をピックアップし、チャンピオンデータ的な物性値を例示して、回答者の製品開発上の課題から見て関心のある物性項目(の組合せ)を回答してもらった。製品開発上の課題がいくつかある場合を想定して、第 2 の課題について、Q4 として同様の設問を設けた。

(c) 物性値の組合せで想定した製品分野(自由記入) (Q3 に第 1、Q5 に第 2)

Q2、Q4 で回答した物性の組合せで想定されている製品分野を任意で自由記入。

(d) 感想、コメント(自由記入) (Q6)

(3) アンケート結果とその分析

(a) 回答者の業種分布

回答者計 55 件の業種別分布は、鑄造業等の素形材産業とは異なった「その他の製造業」が 31%と多い。これは自動車等の組立機械産業等と見られる。

(b) 関心の深い物性項目

第 1 組合せ、第 2 組合せを含めた回答

計 107 件について、関心の深い物性項目を分析した。

耐摩耗性(51.0%)、引張強度(46.9%)、耐食性(39.6%)、疲労限(38.5%)への関心が高い。更に、各業種別に関心の高い物性項目(比率が40%以上)は、次のとおりである。

「鋳造ダイカスト」業では、「引張強度」、「疲労限」、「耐摩耗性」、「高弾性限」、「衝撃値」と5項目への関心が高い。「鍛造・プレス等」では、「引張強度」、「耐摩耗性」、「曲げ強度」の3項目、「機械工業等」では、「耐摩耗性」、「疲労限」、「耐食性」の3項目、「大学研究機関等」では、「耐摩耗性」、「耐食性」の2項目への関心が高い。

(d) 想定製品分野と関心物性

アンケートでは、関心物性項目の組合せに対し、任意で、「想定される製品分野」を記載してもらった。86件で製品分野の記載があった。製品分野欄の記述ぶりはそれぞれであるので、分析整理のため、当方で「製品分野区分」を設け、8区分で分析した。

(e) 感想コメント

①任意で記載してもらった「感想コメント」欄には、55回答中、30社からの記入があった。半数以上からの記載は、金属ガラスへの関心が高いことを示している。②例示として挙げた金属ガラスの物性値には、「優れている」(金型。回答者の業種、以下同じ)、「超金属の出現との印象、特性が素晴らしい」(その他製造業)(その他製造業)などとの感想が見られる。「どのような状態で試作提供が可能なのか」(鍛造)など、具体的に入手したいとの関心も見られる(他1件)。③コスト面での問題や製法、品質安定性の問題を指摘する声は多い。「問題は製法とコスト」(金型)など多数。④物性値の例としては示さなかったが、耐熱性に関する懸念や情報を知りたいとの声は多い(計5件)。

3.4 調査結果のまとめ

4.1 金属ガラスを使った試作・製品化された部材調査結果

金属ガラスを用いた実用化状況での課題を表3.2-1にまとめた。

この表の上段には、試作・製品化を行う上での材料比較を示す。金属ガラスの優れた特性を見出し試作検討した状況を示す。中段には、それぞれの試作・製品化を行う上での課題事項の一例を示している。この課題は、その製品固有の問題もあれば、金属ガラスの実用化を図る上での共通の課題でもある。今回の調査範囲での共通の課題としては、①製造法、②品質、③加工性、があげられる。

表 3.2-1 金属ガラスを用いた実用化調査結果

	ショット ピーニング グ	圧力セ ンサー	ギヤー ドモータ	チョーク コイル	磁性 シート	変圧器	回折光 学素子
材料比較	高速度鋼は高硬度化で韌性が低下する。	SUS630センサー材の4倍感度がある。	SK材が8時間で回転停止に対し2500時間回転した。	鉄粉、Fe-Si粉に比べ磁気損失が小さい。	Fe-Al-Si、Ni-Feと比べ飽和磁化等が高い。	珪素鋼板と比べヒステリシス損失が小さい。	樹脂製に比べ膨張係数が小さく耐熱性が良い。
金属ガラスの課題	球状粒子の中に結晶相を含む場合があり均質性が必要である。	10 ⁷ 回の動圧耐久性が必要である。	製造コストが高価である。	小型化し発熱の少ない構造とする。	粒径50μmの扁平粉体が必要である。	従来のアモルファス合金より厚板化が必要である。	マスター金型がそのままナノインプリントされる。
製品化状況	高寿命の「アモビース」を商品化した。	品質の確保を推進中である。	医療用にサンプル提供し評価中である。	低損失チョークコイル「センテックス」を商品化した。	ノイズ抑制シートを実用化した。	アモルファス形成能に優れた薄帯を検討中である。	10nm以下の精度実現は可能である。

4.2 金属ガラスに関心を持つユーザへのアンケート調査

金属ガラスの製品適用上のポイントや課題及びユーザニーズの動向を把握することあるいは産業界の金属ガラスに対する要望を調査するため、金属ガラスデータベースユーザ及び素形材業界に関係する企業に対しアンケート調査を行った。

その結果、

- (1) 金属ガラスの製品展開として検討したい分野は、精密機械部品、金型、構造材料、ばね材料の順であり、板材を使用し切削加工、プレス加工、射出成形等により製造したいとの要望があり、今後の課題としては、製造技術、加工技術及び信頼性データ蓄積などであることが分かった。
- (2) 素形材業界では、金属ガラス材に対し、耐摩耗性、引張強度、耐食性、疲労限への関心が高く、製造コスト、品質安定性に対する要望が高いことが分かった。

4. 調査研究の今後の課題及び展開

(1) 金属ガラスは、日本が研究開発で先行している材料の一つであり、広範囲な材料への応用・展開と各種機械製品、精密検査システム装置などの適用が強く望まれている。我が国の強みである材料創製技術と成形加工技術の融合により、高い製造技術に立脚した省資源型部材の創出及び諸外国に先駆けた製品への活用・展開が必要である。

本調査研究では、金属ガラスの実用化及び製品化について、8件の状況を調査し、試作上の課題について、どのように対応し、解決する上での手法、プロセスなど実際に対処した方法に重点を置き調査した。その結果、今回の調査範囲での課題としては、①製造法、②品質、③加工性、であることが分かってきた。

一方、産業界の金属ガラスに対する要望を調査するため、金属ガラスデータベースユーザ及び素形材業界に関係する企業に対しアンケート調査を行った。その結果、金属ガラスの製品展開として検討したい分野は、精密機械部品、金型、構造材料、ばね材料であり、これらを行う上での課題は、製造技術、加工技術及び信頼性データ蓄積であることが分かった。

(2) 本調査研究では、ショットピーニング、チョークコイル、磁性シートが商品化できた。これら製品は、いずれも粉体あるいは微細粒子を使った製品である。一方、ギヤードモータあるいは圧力センサーは、ギヤあるいはダイアフラム部品（ブロック状構造材）を組み込み製品化しようとするものである。

すでに、3.1 1.1 項 金属ガラスの材料創製 で示したように、金属ガラスは従来のアモルファス合金に比較して、遅い冷却速度で材料を作ることのできる優れた特長を持っている。3.3 項 アンケート調査の結果、今後の製品展開として精密機械部品への展開が高いことが示されている。特に、精密機械部品を実現するためには、品質の安定性、加工性、成形性などが大きな課題となることはすでに明らかにしたところであり、今後の展開として、これら課題をクリアーすることにより、金属ガラスの構造材への実用化が加速できるものと考えられる。

— 禁無断転載 —

システム技術開発調査研究 20-R-11

金属ガラスの実用化／製品化に
関する調査研究報告書
(要旨)

平成21年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先名 財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会
東京都港区虎ノ門三丁目25番2号
ブリヂストン虎ノ門ビル3F
TEL 03-3459-6900