高強度 Ni 基金属ガラスギヤを用いた世界最小の高トルクマイクロギヤードモータの開発

石田 央* 清水 幸春** 西山 信行***
早乙女康典**** 井上 明久*****

1. はじめに

近年、自動車、情報・IT 機器、先端医療機器等に用いられるデバイスの小型化・高機能化の進展が著しい。これに伴い、これらデバイスを構築する機械要素部品にも高強度化、高耐久化、精密化に加えて低コスト化が強く要求されている。マイクロマシンや MEMS の作製にはネットシェイプ成形により高精度部材が得られる Si プロセスやポリマー成形が用いられるが、強度や耐久性の点では金属材料には遠く及ばない。このような状況の中、結晶質合金にはない高強度、耐摩耗性、高耐食性、優れた表面平滑性ととも、ポリマーと同等のネットシェイプ成形性をも具備した新素材「バルク金属ガラス」が注目されている。

我々は、3 GPa にもおよぶ高強度とナノメートルオーダーの型転写性・表面平滑性を発現する Ni 基バルク金属ガラス⁽¹⁾に、新たに開発した射出成形技術⁽²⁾および金型創製技術を組み合わせることで、機械要素の基本となるマイクロギヤの作製技術を確立した。さらに、このマイクロギヤの高精度や高耐久性を活かすことで、減速機構(ギヤヘッド)を搭載したギヤードモータ⁽³⁾を開発した。本報では、マイクロマシンや MEMS の駆動源として広範な応用展開が期待される世界最小かつ高トルク性能を持った直径 1.5 mm マイクロギヤードモータの開発経過と特徴および展望について述べる。

2. 射出成形法による金属ガラスギヤの作製

高強度で高耐摩耗性が必要とされる超精密ギヤ用素材として金属ガラスの適用を検討した。金属ガラス⁽⁴⁾の低ヤング率特性はギヤ歯面に加わる応力を緩和するため、高負荷設計が可能となる。また、表面平滑性に優れる⁽²⁾ことから動力伝達損失を軽減する効果も期待できる。本開発ではこれまでに数多く見出されている金属ガラス⁽⁴⁾の中でも、高強度、高耐食性、低融点かつ比較的高いガラス形成能を有する Ni 基金属ガラス⁽¹⁾を選定した。本金属ガラス(MG)および従来ギヤ素材である炭素工具鋼の代表的な特性を表 1 にまとめた。

従来材である炭素工具鋼も 480 という高いビッカース硬さと 1640 MPa の高い引張強さを示すことから商用化されているが、Ni 基金属ガラスの機械的性質は炭素工具鋼を大きく凌駕していることから、卓越した耐摩耗性を示すことが予想される。また、炭素工具鋼の融点は 1803 K と高いため、ギヤ部材は機械加工した部材を組み上げることで作製されてきたが、Ni 基金属ガラス合金の融点は 1320 K と低いことから、铸造により溶湯から直接、複雑形状のギヤ部品が作製できる。ギヤ部品の作製は、Ni 基合金の低融点特性を活用できる射出成形法⁽²⁾により行った。図 1 に新たに金属ガラス用に開発した射出成形機の外観および射出機構の模式図を示す。射出成形機は、合金溶湯の表面張力に抗しながら金型表面を精密に転写させること、および射出完了途中での合金溶湯の固化を防ぐ観点から、30 MPa の射出圧力および 4 m/s の射出速度を発揮できる構成となっている。実際の射出は、予め組成調製された母合金をスリーブ内部で高周波加熱溶解

* YKK 株式会社研究開発センター主事

** 並木精密宝石株式会社 NJC 研究所室長

*** 財次世代金属・複合材料研究開発協会研究開発グループ長
群馬大学大学院工学研究科教授

**** 東北大学金属材料研究所所長

Development of world-smallest geared-motor using micro-gears made of Ni-based metallic glass; Mamoru Ishida*, Yukiharu Shimizu**, Nobuyuki Nishiyama***, Yasunori Saotome****, Akihisa Inoue*****(*YKK Corp. **Namiki Precision Jewel Co., LTD. ***R & D Institute of Metals and Composites for Future Industries. ****Dept. of Nano-Material Systems, Gunma Univ. *****Institute for Materials Research, Tohoku Univ.)
2005年10月28日受理

表 1 Ni 基金属ガラスおよび炭素工具鋼の代表的な特性.

	融点 (K)	ガラス化 臨界直径 (mm)	硬さ (Hv)	引張強さ (MPa)	ヤング率 (GPa)
炭素工具鋼	1803	—	480	1640	210
Ni ₅₃ Nb ₂₀ Ti ₁₀ Zr ₈ Co ₆ Cu ₃ -MG	1320	3.0 ⁽¹⁾	760	2700 ⁽¹⁾	140 ⁽¹⁾

図1 射出成形機の(a)外観および(b)射出機構模式図。

図2 Ni 基金属ガラス製(a)太陽キャリア、(b)遊星歯車および(c)出力軸キャリアの外観 SEM 像。

した後、プランジャを上方へ移動させて金型内に合金溶湯を加圧充填・固化させることで行う。精密なギヤ部品を鋳造するため、超精密金型の作製方法も周辺技術として確立できた。

図2に、射出成形法により作製したNi 基金属ガラス製の(a)太陽キャリア、(b)遊星歯車および(c)出力軸キャリアの外観を示す。特に、太陽キャリアは直径1.04 mmのキャリアプレートの上端中心に歯先円直径0.288 mm、歯数9、モジュール25 μm の太陽歯車、下面に遊星歯車の回転軸となる直径0.25 mmの遊星シャフト3本が一体化された複雑形状のギヤ部品である。金属ガラスの低融点の特徴と、我々が確立した射出成形技術および金型創製技術を組み合わせることによりこのような微小三次元形状を有するマイクロギヤが、わずか一工程で作製できるようになった。作製した各ギヤ部品は全て、ギヤードモータを構成するために必要な寸法公差を十分に満たしている。

3. 金属ガラスギヤを用いた世界最小ギヤードモータ

冒頭で述べたように、ギヤードモータは小型であることに加えて、高トルクで長寿命であることが要求される。一般に、電磁モータの体積が小さくなると、それに比例して回転トルクが小さくなる。上記の要求を満たすため、Ni 基金属ガラス製ギヤの優れた機械的性質を活かすことで、高減速比のギヤヘッド開発を行った。

図3に(a)開発した直径1.5 mm、全長9.9 mmの世界最小マイクロギヤードモータの外観および(b)内部構造の模式図を示す。新たに開発した直径1.5 mm、長さ7.0 mmのDCブラシレスモータの先端に、直径1.5 mm、長さ3.8 mmのギヤヘッドを直結した。ギヤヘッドには、太陽キャリアと遊星歯車および内歯車をもったケーシングで構成される遊星歯車減速機構を採用し、太陽歯車と遊星歯車の組み合わせを3

図3 世界最小ギヤードモータの(a)外観および(b)内部構造模式図。

表2 各種マイクロギヤードモータの諸特性。

サイズ (mm)	ギヤ部品	モータ 回転トルク ($\mu\text{N}\cdot\text{m}$)	減速比	出力軸 回転トルク ($\mu\text{N}\cdot\text{m}$)
直径2.4 mm	炭素工具鋼	7.0 ⁽⁷⁾	79 : 1 ⁽⁷⁾	200 ⁽⁷⁾
直径1.9 mm	樹脂	7.5 ⁽⁶⁾	47 : 1 ⁽⁶⁾	150 ⁽⁶⁾
直径1.5 mm (開発品)	Ni 基金属 ガラス	4.9	254 : 1	439

段スタック構成とすることで、減速比を254 : 1(従来79 : 1)と高く設計した。本減速比から見積もられる最大歯面ヘルツ応力⁽⁵⁾は約1000 MPaであり、従来のギヤ素材である樹脂や炭素工具鋼では長寿命が期待できないものの、Ni 基金属ガラス製ギヤでは十分弾性変形域内のため長寿命が期待できる。

表2に、炭素工具鋼製ギヤ部品を用いた直径2.4 mm⁽⁷⁾、樹脂製ギヤ部品を用いた直径1.9 mm⁽⁶⁾、およびNi 基金属ガラス製ギヤ部品を用いて新たに開発した直径1.5 mmマイクロギヤードモータの諸特性をまとめた。これまでの最小サイズは直径1.9 mmであったが、全てのギヤが強度の低い樹脂製ギヤにより構成されているため、表2に示すように減速比が低く、出力軸における回転トルクも小さい。これに対して、Ni 基金属ガラス製ギヤの機械的性質を考慮して254 : 1の高減速比設計とした結果、開発した直径1.5 mmのギヤードモータでは最も大きい出力軸回転トルクが得られる。本マイクロギヤードモータの発生する回転トルク439 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ は、携帯電話のバイブレータ駆動用モータ(直径4.0 mm)の20倍にも相当する高トルクであることから、小型でしかも高負荷に対応していることが証明された。

さらに、量産体制についても問題解決がなされている。このような小型かつ精密なマイクロギヤードモータ量産の最も大きな障壁はギヤヘッドの組付けである。従来は、顕微鏡を用いて一品々手組みすることで生産されてきた。このような低生産性を解消するため、半自動で組付け可能なマニピュレータを新たに設計・製作した。図4に、その外観を示す。一度、手動操作により移動シーケンスを記憶させることにより、その後は、マニピュレータが自動で部品組付けを行うものである。このマニピュレータ開発によりマイクロギヤードモータの量産に目処を付けた。

4. マイクロギヤードモータの寿命特性

精密機械加工の限界から、従来の炭素工具鋼で直径1.5

図4 半自動組付用マニピュレータの外観。

mmのマイクロギヤードモータを構成するギヤ部品の作製はできない。従来材製と金属ガラス製ギヤ部品で構成するギヤードモータの寿命を比較するため、敢えて直径2.4 mmのギヤードモータを用いた寿命試験から着手した。

図5に、100 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ の負荷トルクを加えて回転停止まで行った寿命試験後の炭素工具鋼製ギヤとNi基金属ガラス製ギヤの外観を示す⁽⁸⁾。8時間(2.6×10^6 回転)で停止した炭素工具鋼製ギヤは、歯が残らないほど摩耗が進行していることが分かる。一方、2500時間(8.1×10^8 回転)で停止したNi基金属ガラス製ギヤは、健全な歯が維持されており殆ど摩耗が進行していない。この高い耐摩耗性発現のメカニズムは既に学術誌⁽⁸⁾に報告してあるので参照されたい。ここで着目すべきことは、摩耗が殆ど認められないNi基金属ガラス製ギヤで構成されたギヤードモータにおいても回転が停止した事実である。この回転停止の原因は、Ni基金属ガラス製ギヤ以外の構成部品にあると容易に推察されるが、少なくとも金属ガラス製ギヤで構成されるギヤードモータは、従来ギヤのそれと比べて300倍以上の長寿命特性をもっているといえる。事実、本ギヤードモータを分解調査した結果、樹脂製内歯車および焼結合金軸受に著しい損耗が認められた。これらの損耗部品を、金属ガラス製ギヤの寿命に見合った材質に改善することで、寿命が大幅に向上することも確認している。

さらに、新たに開発した直径1.5 mmマイクロギヤードモータの駆動試験も実施した。図6に試験中のモータ負荷電流の経時変化を示した。比較のために、炭素工具鋼製とZr基金属ガラス製のギヤ部品を混在して構成したギヤードモータのデータも併せて示してある。Ni基金属ガラス製ギヤを用いたギヤードモータの寿命は約1000時間(3.9×10^7 回転)であり、回転停止が負荷電流値の急激な上昇として現れている。しかしながら、急上昇に至るまでの電流値は安定していることから、寿命までの回転が安定していることを示唆している。開発したギヤードモータの寿命1000時間は、実用上、十分な駆動寿命であり、市場での幅広い適用が見込まれる。一方、混在構成ギヤードモータは僅か2.4時間(9.4×10^4 回転)で回転停止し、停止に至るまでの電流値も変動が大きい。このことより、従来の炭素工具鋼製ギヤ部品を一部にでも用いれば、寿命が極めて短く、寿命に至るまでの性能も安定しないといえる。言い換えれば、高負荷対応設計を施した直径1.5 mmのマイクロギヤードモータを構成するギヤ部品にNi基金属ガラスは必要不可欠であると結論できる。

5. 実用化状況と今後の展開

Ni基金属ガラスマイクロギヤを用いた「世界最小マイク

図5 駆動試験後の(a)炭素工具鋼製ギヤおよび(b) Ni基金属ガラス製ギヤの外観 SEM 像。

図6 駆動試験中のモータ負荷電流の経時変化。

ロギヤードモータ」は、要求される過酷な負荷状況においても飛躍的な寿命向上とともに、一体射出成形と自動組付けによる省工程化を既に達成している。現在は、高負荷対応、長寿命等の特性を維持しつつ製品コストダウンおよび品質管理体制の確立を継続しており、既にユーザに製品サンプルを供給している段階にある。今後、先端医療機器、MEMS、マイクロマシン等の駆動源としての適用拡大が見込まれており、更なる販路の拡大を伴った実用化の進展を期待している。なお、本研究は(独)新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の「革新的部材産業創出プログラム」公募研究で行われた「金属ガラスの成形加工技術」プロジェクトで行われたものであることを付記し、厚く御礼申し上げます。

6. 特 許

本開発技術は、合金組成特許として特開2000-345309号、マイクロギヤ製造法特許として特願2003-310153号およびギヤードモータ構造特許として特願2004-126910号を含め、国内外に計7件の出願を行っている。

文 献

- (1) T. Zhang and A. Inoue: Mater. Trans., **43**(2002), 708-711.
- (2) M. Ishida, H. Takeda, D. Watanabe, K. Amiya, N. Nishiyama, K. Kita, Y. Saotome and A. Inoue: Mater. Trans., **45**(2004), 1239-1244.
- (3) 石田 央, 竹田英樹, 西山信行, 網谷健児, 喜多和彦, 清水幸春, 渡邉大智, 福島絵理, 早乙女康典, 井上明久, まてりあ, **44**(2005), 431-433.
- (4) A. Inoue: Acta Mater., **48**(2000), 279-306.
- (5) 日本歯車工業会規格(平歯車およびはすば歯車の歯面強さ計算式): JGMA 402-01.
- (6) <http://www.faulhaber-group.com/n108527/n.html>
- (7) <http://www.namiki.net/index-j.htm>
- (8) M. Ishida, H. Takeda, N. Nishiyama, K. Kita, Y. Shimizu, Y. Saotome and A. Inoue: Mater. Sci. and Eng. A, in press.