J044095

急冷遠心鋳造法で作製した FeGaAlZrC 合金磁歪リング式トルクセンサの特性

古屋 泰文^{*1}, 熊林 和之^{*2}, 岡崎 禎子^{*1}

Characteristics of Magnetostrictive Ring-type Torque-sensor of FeGaAlZrC Alloy made by Rapid-solidification Centrifugal Casting

Y.Furuya¹, K.Kumabayashi² and T.Okazaki¹^{*1}Faculty of Science and Technology, Hirosaki University
1-bunkyocho Hirosaki-shi Aomori-ken 036-8560, Japan^{*2}Graduate Student, Faculty of Science and Technology, Hirosaki University
1-bunkyocho Hirosaki-shi Aomori-ken 036-8560, Japan**Key Words** : ,Magnetostriction, Torque sensor, Inverse magnetostriction, Galfenol, FeGa Alloy, Centrifugal casting

1. 結 言

ステア・バイ・ワイヤ(Steering-by Wire (SBW) Control System) は、Fig.1 に示すように、駆動系と操作系がメカニカルリンク無しで構成される設計コンセプトで、車体設計の自由度拡大や省エネ、安全性・快適性の向上につながる技術である。本研究では、FeGa系磁歪合金開発、磁歪リング式トルクセンサ (Fig.2 参照) での実証実験データをベースにして、自動車操作・運転駆動系の“ステア・バイ・ワイヤ用 Galfenol 力センサ”の研究開発を行う。現時点で、国内外においては、米国海軍研究所 (NOL, USA) 以外は弘前大学が拠点であり、当分野での研究開発は 2000 年、NOL での Clark らの単結晶に始まったばかりである。しかし、急冷凝固法で作製した、より実用的な多結晶 Galfenol 磁歪材料研究やそのセンサ応用に関係した特許はほとんどないため、先陣研究として有利である。現在実用化されている車載用トルクセンサは、トルク-磁場変換部が複雑であるが故に、部品点数が多く、トルクセンサ部が占有する空間も大きい。そのためステアリング周辺の設計の自由度が制限される問題点がある。我が研究室では単純構造であり、励磁機構なしでトルクを検出でき、尚且つ低コストである非励磁型磁歪リング式トルクセンサに着目し研究を進めてきた。磁歪リング式トルクセンサ材料に求められる特性として、高いトルク検出感度や、力学的過酷環境下での実装を可能とする優れた強度などが挙げられる。

我々はこれまでに加工性を有する大磁歪 Fe80Ga20[at%]系磁歪リングを金型鋳造プロセスにより作製してきた(以後金型鋳造材とする)^{1) 2) 3)}。この磁歪リングの特性とし

て 0.4[G/Nm]以上のトルク検出感度、平板材での引張強度が約 450[MPa]であった。しかし自動車用の操舵系(ステアリング)や転舵系(車輪・ブレーキ部)への導入を想定した場合には 600[MPa]以上の強度が必要であり、機

Fig.1 Steering-by-wire(SBW) control system for the automobiles by using Magnetostrictive torque sensor ring instead of the present EPDS and technical merits of SBW.

^{*1} 正員, 弘前大学 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地)

E-mail: furuya@cc.hirosaki-u.ac.jp

^{*2} 非会員, 弘前大学大学院 理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地)

械的特性の向上が課題であった。そこで、我々は、FeGa 2 元素系に延性を向上させる Al, さらには微細析出強化を促進できる Zr, C 微量元素を添加した、5 元素系 FeGaAlZrC 系を開発してトルクセンサへの利用を検討してきたが、車輪駆動・転舵系適用にはさらなる強度増加が望まれる。そこで、本研究では、この FeGaAlZrC 系磁歪リングの作製に急冷遠心鋳造法を適用し、加圧下急冷効果による結晶組織の微細化、それに伴う機械的強度への影響やトルク検出感度などの諸特性を評価する。

Fig. 2 Elements of the torque transducer and the magnetic parameters concerning with ring-type torque-sensor by using inverse-magnetostriction. (H_T =Magnetic flux density, M_r =Residual magnetization, σ =Applied stress)

2. 実験方法

2. 1 原料インゴット作製

原料素材の作製法は、純度99.99%以上の各元素を秤量後、アーク溶解法にて、合金化した。FeGaAlZrC合金、母材インゴットは、鋳造装置にて行った。原料は、アルミナの坩堝に充填され、高周波コイルにて溶解後、銅鋳型内に流し込んだ。鋳込み時の雰囲気は、真空度 3×10^{-3} Paに真空引き後、アルゴンガスにてチャンバー内を満した。鋳造の原料の作製はアーク溶解法にて行い、作製条件は合金開発時と同様に行った。

遠心鋳造法では、高速回転するCu鋳型に上部から溶湯を注入し、中心部で回転急冷凝固させながらパイプ状の磁歪サンプルが出来る。(Fig.3参照) 回転数は500rpm~3000rpm(鋳型内径(まで変化させ、急冷効果による結晶組織微細化を行った。

Fig.3. Centrifugal casting device and rapid-solidified ring sample

2. 2 特性評価

合金特性及びリングの特性評価は以下の表1に示す評価法をにて行った。合金特性評価は試験片はを指定形状に切断後行った。XRDは回折角度 $2\theta=30\sim90$ [degree]、特性X線Cu-K α 、相同定をICDDカード及び、Pearson'sハンドブックにて行った。断面観察試料は、精密研磨にて作製した。磁化・磁歪測定は、電磁石にて磁場を印加し-10kOe~+10kOeを印加した。またリングの特性評価は鋳造プロセス材、遠心鋳造プロセス材はリング形状に加工後823Kで9.0ks熱処理を施し、嵌め代20 μ mを設け冷やし嵌めによりシャフトに接合した。トルク印加特性においては錘を用いて4.95Nmまで印加した。

3. 実験結果と考察

3. 1 X線回折図形

Fig.4 に焼鈍し処理を施した各組成 (a)-(c)を示す。回折図(b)より5元素系鋳造材においては炭化物反応によるZrCが晶出していることが確認できた。不規則A2相(aFe-(Ga, Al))及びB1相(ZrC)の2相構造であった。遠心鋳造プロセス及び焼結プロセス材料(c)では不規則A2相(α -Fe-(Ga, Al))のみを正確に確認し、その他のL12相(Fe₃GaC)及び

B1相(ZrC)の析出を明確に確認することはできなかった。しかしながら、いずれも負磁歪相である規則相L12 相(Fe₃GaC)の析出は確認できなかった。

3. 2 磁化測定

磁化測定の結果、全ての製造方法で2kOe程度まで直線的に増加し、その後、4kOe付近で飽和値に収束する傾向を示した。磁化特性のパラメータについて、いずれの製造プロセスでも、160emu/g前後の飽和磁化を示した。また保磁力においては、金型 casting 材では13Oe、遠心 casting 材では14Oeであった。また、プラズマ焼結材では35～39Oeであり、金型 casting 材、遠心 casting 材に比べ約3倍程度の保磁力を示し、優れていることが確認された。高い保持力をしめしたのは、プラズマ焼結材においては焼結工程を経ることにより、結晶粒界が増加し磁壁のピン止め効果が増加したためではないかと考えられる。

3. 3 磁歪測定

Fig.5 に磁歪測定(M λ -H曲線)の結果を示す。測定条件はいずれも印加磁場は-10kOe～+10kOe、Step Bits 50Oe、Wait time 0.3secで印加して測定を行った。

最大磁歪量については casting プロセス材料が134ppmと最も優れていることが確認された。プラズマ焼結プロセスにおいてはミリング材では35ppm、ガスアトマイズ材では54.5ppmであり、遠心 casting プロセス材では43ppmであった。プラズマ焼結材においては焼結工程を経ることにより、遠心 casting プロセスにおいては遠心力により、結晶粒の微細化を引き起こしてしまったためではないかと考える。磁歪量の低下については他にも様々は要因があるものと思われるが、本研究における焼結プロセス材料の磁歪量の低下は、Fe-Ga系合金では磁歪量は結晶粒径が大きいと増加する傾向があり、結晶粒径が大きいと異方性が大きく微細化が進むにつれ異方性が無くなることなどの要因ではないかと考えられる。また本研究において作製された焼結プロセス材料において、ミリング材に比べガスアトマイズ材では約55%高い値を示した。磁歪量が増加した要因としては、ミリング材の密度約90%に比べガスアトマイズ材では99.8%と緻密化が進行したことにより、外部磁場を印加した際に、磁歪の伝達がされやすくなったためではないかと考えられる。

Fig.4 X-ray Diffraction patterns of FeGaAlZrC sample made by RS-CC method.

Fig.5 Comparison of magnetostriction of each material

3. 4 強度特性

Fig.6 に曲げ試験の結果を示す。曲げ強度の最大値は casting プロセス材で1309MPa、遠心 casting 材で1364MPa、焼結プロセス材 (アトマイズ法) では296MPaを示した。また図5の表に引張り強度を示しているがこれは、確率統計

をもとにしたワイブル係数を用いて変換した値であり、一般的に引っ張り試験より高い値が得られる。そのため、一概に従来材と比較はできないが、鑄造プロセス材で従来材にない900MPa以上の引っ張り強度を実現できている。

3. 5 熱処理によるトルク感度特性と改善

熱処理前の急冷遠心鑄造リングの磁歪は、約40ppmと小さい。熱処理を施すことにより、作製時に導入された残留応力が除去されると共に、微細な結晶粒は成長する。磁歪測定の結果から1100℃・12h保持後、550℃・2.5h保持後徐冷した試料の磁歪は、64ppmと、熱処理前の1.6倍に増加し、最適な熱処理条件である。高温の保持時間が12時間より短くても長くても、磁歪量は減少することが判った。

Fig.6 Bending strength

3. 6 急冷遠心鑄造リングの磁束密度B-磁場H ループ

Fig. 7 は、急冷遠心鑄造リング熱処理前と○熱処理後、および比較のため、同じく鑄型鑄造ロットから切り出されたリングの周方向に磁場を印加した場合の、磁束密度B-磁場H ループである。熱処理前の急冷遠心鑄造リングの残留磁束密度Brは、2,200Gaと小さい。熱処理後リングBrは5,200Gaとなり、As-castedの結果(3,600Ga)の1.4倍に増加する。図中に示す保磁力Hcは、3.1~4.4Oeと小さいが、これは、最大印加磁場が150Oeと小さいためで、振動磁力計で最大磁場10kOeを印加して測定した保磁力Hcは、熱処理前の急冷遠心鑄造リングが6Oe、熱処理後リングは8.7Oeとなり、増加する。

Fig. 7 B-H Loops of C.C and Die-casted Rings

3. 7 急冷遠心鑄造リングのトルク感度測定

Table 1 は、急冷遠心鑄造リングを最適熱処理（1100℃・12h保持後、550℃・2.5h保持後徐冷）を行った磁歪リングのトルク感度測定結果を示す。嵌め代10μmとした場合のトルク感度測定結果を示す。(a)の最大トルク感度は0.42G/Nmと(b)の最大トルク感度は0.51G/Nmとなる。これらのトルク感度は、AS-cast熱処理なしリングの最大感度0.25G/Nmの約2倍に増加した。さらに、(c)の嵌め代16μmとした場合、最大トルク感度は0.53G/Nmとなり、僅かながら増加した。回転角度に対するトルク感度は、ほぼ一定となり、合金組成のムラは、少ないことが判った。

Table 1 Torque-sensor characteristics of FeGaAlZrC Alloy Ring

FeGaAlZrC Ring (Process Method)	Die-Casted	Rapid-solidification Centrifugal casting
Torque-sensitivity [G/(N・m)]	0.33	0.53
Residual Magnetization [G]	3600	5200
Coercive Force [Oe]	13.0	4.4

4. 結 言

1. 遠心鋳造プロセスでは結晶粒径は全体的に微細化して、かつ、短時間での急冷凝固過程により不規則 A2 相 (Fe-(Ga, Al))のみを正確に確認し、その他の安定規則相である、L12 相(Fe₃GaC)及び B1 相(ZrC)の析出を明確に確認することはできなかった。
2. 熱処理前の急冷遠心鋳造リングの磁歪は、約 40 ppm と小さい。熱処理を施すことにより、作製時に導入された残留応力が除去されると共に、微細な結晶粒は成長する。
3. 急冷遠心鋳造リングを最適熱処理 (1100°C・12 h 保持後、550°C・2・5 h 保持後徐冷) を行った磁歪リングのトルクセンサの最大トルク感度は 0.42 G/Nm ~0.51 G/Nm となった。これらのトルク感度は、AS-cast 熱処理なしリングの最大感度 0.25 G/Nm の約 2 倍に増加した。
4. 急冷遠心鋳造法での磁歪リング製造は、製造後に適切な熱処理により、磁歪の増大、2 倍以上の大幅なトルク感度向上、結晶粒微細化による材料強度向上が可能であり、トルクセンサ感度の向上策として遊戯である。

5. 参考文献

1. Yasubumi FURUYA, Toshiya Takahashi, Teiko OKAZAKI, and Chihiro SAITO, Muneaki SHIMADA, “Development of New Iron-based Galfenol (Fe-Ga-X) Magnetostrictive Alloys and their Applications for Smart by-Wire Steering System for Automobile Technology”.
Proceedings of Smart '09 (IV ECOMAS THERMEC CONFERENCE, Porto) (2009) pp.461-462
2. Yasubumi Furuya, Chihiro Saito Teiko Okazaki, Kazumi Okada, Yusuke Sado, Takeo Chinen, Naoki Ogasawara, Muneaki Shimada, “Galfenol-based Sensor/Actuator Devices for Smart by-Wire Steering System for Automobile Technology”, MRS Fall Meeting Proceeding (2009.12 Boston USA, on-line Journal)
3. 島田 宗勝, 知念 タケオ, 熊林 和之, 横山 雅紀, 岡崎 禎子, 古屋 泰文 FeGaAlZrC(Galfenol)磁歪合金リング式トルクセンサへのたが応力の影響、日本金属学会誌
74巻 (2010) pp. 540-542