

ターボチャージャー過回転検知用回転速センサーへのGMR-IC適用検討

GMR-IC Application to Rotational Speed Sensor for Turbocharger Over-Rotation Detection

鬼本 隆*
Takashi Onimoto

河野 圭*
Kei Kawano

* 日立金属株式会社
機能部材事業本部
Advanced Components and Materials
Division, Hitachi Metals, Ltd.

自動車用ターボチャージャーの過回転検知用に GMR-IC を用いた安価な回転速センサーを開発した。コンプレッサー側の羽根固定用ナットを磁石にし、GMR-IC を用いてその回転を検知する構成としたが、ナットをシャフトに取り付けると減磁してしまうことから GMR 素子に届く磁束密度が不足し回転速検知ができないことが分かった。そこで、ナットの着磁方法を検討し、シャフトに取り付けた後に着磁することで、減磁の影響を無くし、GMR 素子で回転速が検知可能となることを見出した。開発したセンサーにより、ターボチャージャーを限界まで使用することが可能となり、自動車の燃費向上に寄与できる見通しが得られた。

Authors have developed a low-cost rotation-speed sensor using GMR-IC for over-rotation detection in vehicle turbochargers. In this design, the nut that secures the blade on the compressor side is magnetized, and GMR-IC is used to detect the rotation speed. However, when the nut is attached to the shaft, the magnetic flux density that reaches the GMR probe is insufficient and the rotation speed cannot be detected. Therefore, authors reexamined the magnetization method for the nut, and magnetized it only after it was attached to the shaft, thereby eliminating the influence of demagnetization. This allowed the rotation speed to be detected by the GMR probe. Using the developed sensor, it is possible to expand the turbocharger performance to the limit, which will contribute to improved automotive fuel efficiency.

● Key Words : 回転速センサー, ナット, 磁石
● R&D Stage : Prototype

1. 緒言

CO₂ 排出規制に伴い車のさらなる燃費向上が求められている中、ガソリン車から EV (Electric Vehicle)¹⁾ や FCV (Fuel Cell Vehicle), PHV (Plug in Hybrid Vehicle) への移行が世界的に進められてきている¹⁾。しかし 2022 年の時点で EV 車は全車両生産の 10% 程度にとどまると予想され²⁾、当面エンジン搭載車が主力を担うこととなる。そのためエンジン搭載車による燃費向上が必要とされており、そのひとつの方策として、エンジンの排気量を下げ、ターボチャージャー (以下、ターボ) でパワーを補うダウンサイジングターボが普及している。ターボは低速域からの過給が必要なことから小型にし、そのターボを高速域まで対応させるため小型ターボを限界まで回転させる必要性が出てきている。ターボを限界まで回転させると破損の危険性があるため、破損しないよう過回転検知用に回転速センサーが搭載され始めている。回転速センサーには主に渦電流方式³⁾ が用いられており、コンプレッサー側のハウジングを貫通させアルミの羽根 1 枚 1 枚の回転を測定している (図 1)。センサーと羽根との距離は

1 mm 程度と近距離での検知となっており距離を広げると検知することができない。

またセンサー搭載部は、コンプレッサーの羽根により圧縮された空気に曝され 200℃ にも達するため、センシ

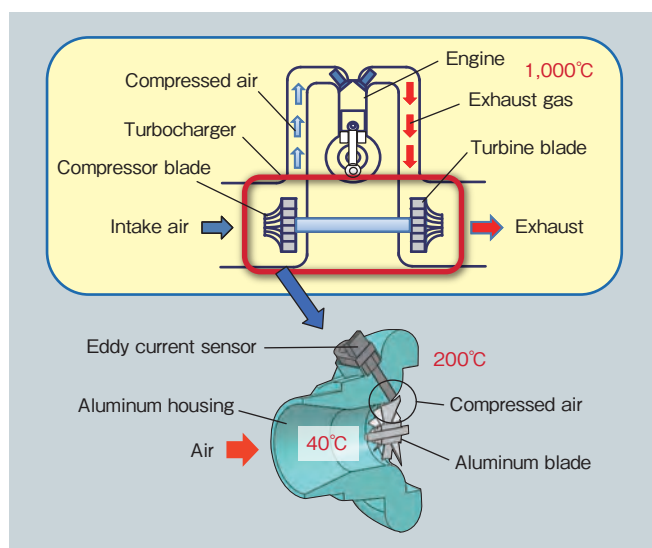


図 1 渦電流式センサーの取り付け状態
Fig. 1 Schematic illustrating attached eddy current sensor

グ部には 200℃でも耐えられるフェライトとコイルのみ搭載している。信号処理回路は 200℃に耐えられないため、高耐熱シールドケーブルを介しセンシング部から離れた位置に搭載している。2020 年時点で同用途に実用化されている回転速センサーは上記のような渦電流式であり、構造が複雑で高価なことから広く普及するには至っていない。

回転速センサーを普及させるためには、効果に見合う低価格なセンサーが求められており、安価に実現できる構造にする必要がある。日立金属では以前より GMR⁴⁾-IC (Giant Magneto Resistive effect - Integrated Circuit) を用いた車載用の回転速センサーを量産している。構造がシンプルにできることから、本方式を適用することでコストダウンが可能となる。GMR-IC をターボ回転速検知に用いるには、検出可能な磁石との距離に限界があること、また 200℃もの高温に耐えることは困難なことなどから検知方法やセンサー搭載位置に課題がある。一方で GMR-IC は 1 Hz から検出可能なことから、ごく低速域での回転計測ができ、エンジン始動時のターボラグを抑制するための VGT (Variable Geometry Turbo)⁵⁾ の制御に有効と考えられる。そこで本報では GMR-IC を用いたターボ回転速センサーの実現性を検討したので報告する。

2. GMR-IC 式検知原理

2.1 GMR-IC 式センサーの取り付け状態

GMR-IC 式センサーの取り付け状態を図 2 に示す。IC の耐熱温度は 150℃であり渦電流式と同じ位置 (200℃) でターボの回転を検知すると圧縮した空気の熱で壊れるため、センサーの搭載位置を見直す必要がある。また、GMR-IC の測定可能周波数は上限が 10 kHz のため、測定する回転速は低いほうが望ましい。そこでアルミ製の羽根固定用のナットを磁石にし、その回転を GMR-IC で検知する方法を検討した。IC は 1 ~ 10 kHz の回転計測が

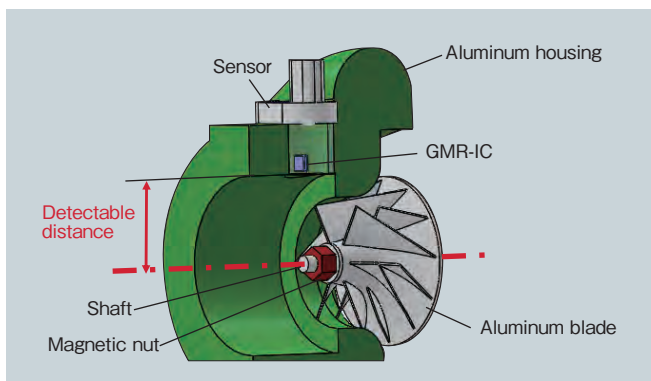


図 2 GMR-IC 式センサーの取り付け状態
Fig. 2 Schematic illustrating attached GMR-IC sensor

可能なものを選定し、磁石は 2 極の着磁を行うことでターボの回転 1 回転で 1 パルス出力するようにし、30 万 rpm 計測時でも 5 kHz と、IC で検出可能な周波数にすることができる。

センサーの IC 搭載部は車両動作時、吸入エアにさらされ 40℃程度 (車両停止時は 150℃ (瞬時)) と IC が動作可能な温度となっている。回転速センサーは吸入エアの流れを妨げないように吸入口の外側に配置することから、磁石から GMR-IC までの検知距離を従来の自動車用回転速センサーに比べ、広くする必要がある。車の排気量が大きくなると、圧縮した空気をより多くエンジンに送るため、ターボの吸入口を広げる必要もある。吸入口を広げるとセンサーとナットの距離が遠くなるため、距離を広げても検出できるようにすることが重要なポイントとなる。

2.2 GMR-IC の検知

自動車はさまざまな電波や磁界の影響の中を走行しており、その影響を受けても GMR-IC は正常な信号を出力しなければならない。GMR-IC には 1 素子で検知する方法と 2 素子で検知する方法がある。GMR 素子が 1 素子の場合、周囲の磁束を検知するためナットの磁束密度をそのまま検出できるが、それ以外の余計な外部磁界も検知してしまう。GMR 素子が 2 個の場合、2 個の素子の差動を取り検知を行うため外部磁界の影響をキャンセルできる。2 素子の場合それぞれの素子間隔は数 mm 離れているため、受ける磁束密度に位相差が生じる。差動を取るとナットと GMR-IC との距離により検知距離が 1 素子より広くとれたり狭くなったりする。下記に簡単に IC の検出方法について説明する。

まず GMR 素子 1 つの時の検知について図 3 に示す。GMR 素子で図 3 (a) に示すようにナットの回転方向の磁束を検知すると GMR 素子の内部電圧は正弦波となる。外部磁界を受けると図 3 (b) のように正弦波の上に重畳された波形となり、IC のしきい値を超えるような大きい外部磁界を受けてしまうと IC は間違ったパルスを出力してしまう。そこで周囲の磁界の影響をシールドできない場合、自動車用の GMR-IC は GMR 素子を 2 個使用し、この外部磁界の影響を受けても誤パルスが出ないようにしている。

図 4 に GMR 素子 2 個を用い外部磁界の影響を排除する方法を示す。回転に対し GMR-IC 内の GMR 素子を並べる方向に配置したときの検知を図 4 (a) に示す。図 4 (b) に示すようにナットの回転方向の磁束を検知すると GMR 素子 (a) (b) の内部電圧はそれぞれ正弦波となり、GMR 素子 (a) と (b) は 1 ~ 3 mm 程度の間隔があるため位相差が発生

する。外部磁界を受けると図4 (b)のように正弦波の上に外部磁界が重畳される。GMR 素子①と②の間隔が狭いことから外部磁界は両 GMR 素子に同時に重畳されるため、GMR 素子①と②の差分を取ることによってこの外部磁界の影響を消している。

GMR-IC はこの差分で出来る差動波形を用い信号処理を行うこととなり、図4 (c)に示すように差動波形がしきい値を超えると出力が出る。本センサーでは外部磁界の影響を考慮し GMR 素子を2個使用したICを選定した。

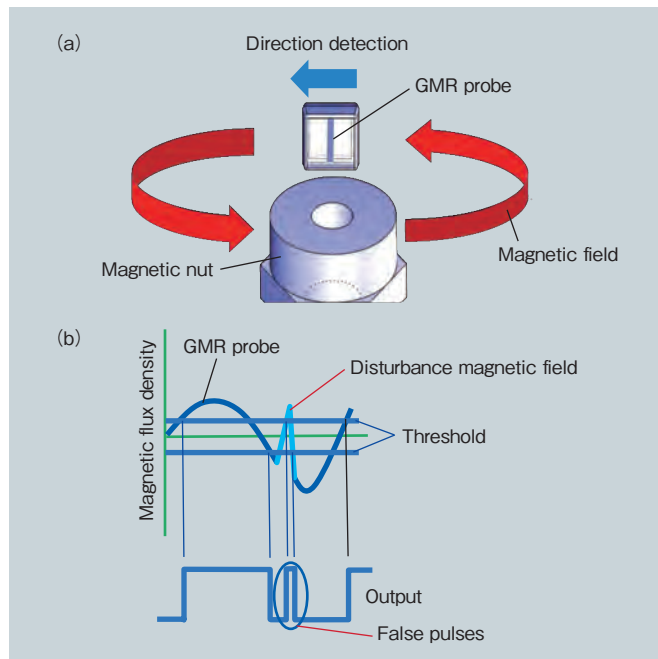


図3 GMR-IC の検知 (GMR 素子1個) (a) 検出方法 (b) 出力原理
Fig.3 GMR-IC detection (1 GMR probe)
(a) detection method, (b) output waveform

2.3 GMR-IC の配置

GMR-IC の使用方法として磁石ナットの回転を検知するには、2.2項でも述べたが、図5 (a)に示すように回転に対し GMR-IC 内の GMR 素子を並べる方向に配置する方法と、図5 (c)に示すようにナットの回転に対し垂直なラジアル方向に GMR 素子を並べる方向に配置 (以下、ラジアル方向) する方法が考えられる。

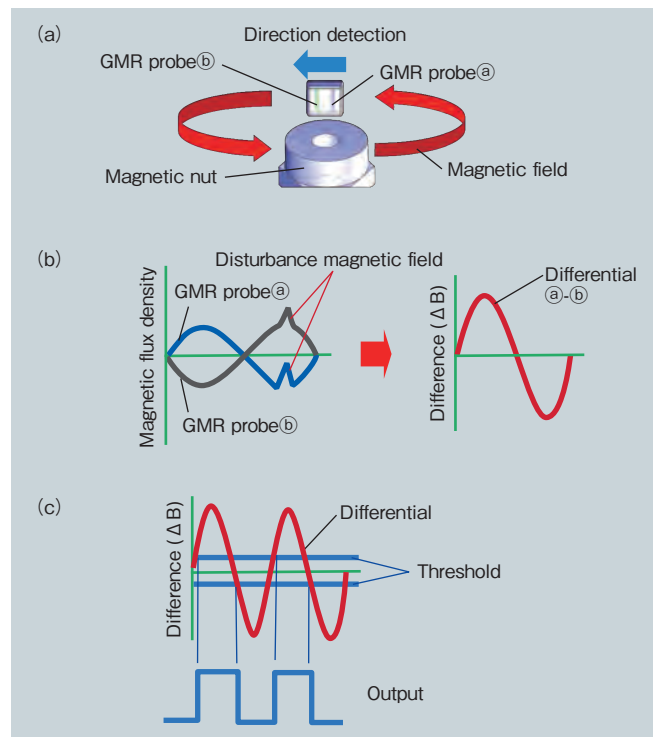


図4 GMR-IC の動作原理 (GMR 素子2個) (a) 検出方法 (b) 差動検知 (c) 出力原理
Fig.4 GMR-IC operating principle (2 GMR probes) (a) detection method, (b) differential detection, and (c) output waveform

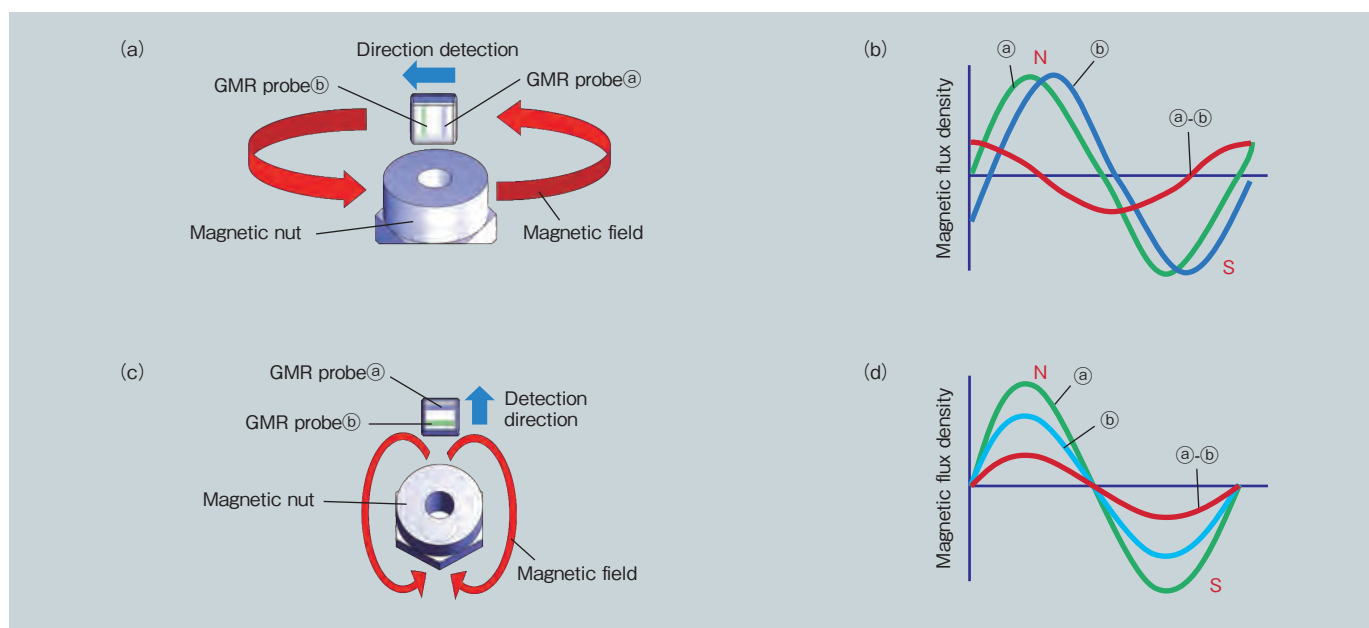


図5 IC 検知方向による差動磁束密度 (a) 検出方法 (回転方向) (b) 内部波形 (回転方向) (c) 検出方法 (ラジアル方向) (d) 内部波形 (ラジアル方向)
Fig.5 Differential magnetic flux density according to IC detection direction (a) detection method (direction of rotation), (b) internal waveform (direction of rotation), (c) detection method (radial direction), and (d) internal waveform (radial direction)

まず図 5 (a) の回転方向検知について説明する。先ほども述べたが GMR 素子①②は青色で示す回転方向の磁束密度を検知する。回転方向検知の場合 GMR 素子①②の間隔の分位相差が発生し、差分を取ると図 5 (b) に示すような差動波形となる。検知をするうえで、この差動波形の振幅を大きくすることが重要となる。回転方向の検知において GMR 素子①と②との位相差が 180° の場合最大の振幅が得られるが、位相差が小さくなると差動の振幅も小さくなる。

次にラジアル方向検知について図 5 (c) に示す。GMR 素子①②は青色で示す垂直の磁束密度を検知する。GMR 素子①②で受ける磁束密度は図 5 (d) に示すような同位相の内部波形となる。GMR 素子①②が受ける磁束密度の差がそのまま差動波形となることから、差動の振幅を大きくするには磁石の磁束密度を強くすることで可能となる。

そこで、この 2 つの方法のどちらを採用するか磁気シミュレーションによる検討の上、検証実験を行った。

2.4 磁石について

磁石ナットの形状を図 6 に示す。

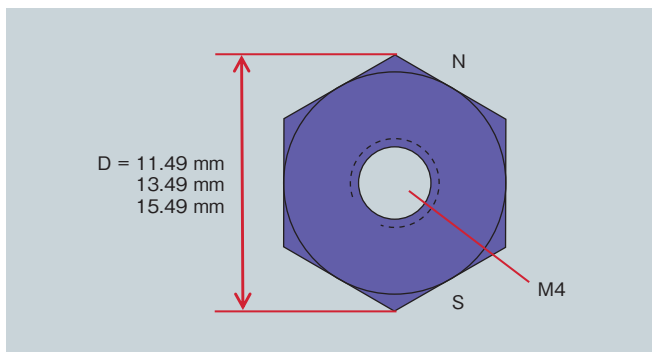


図 6 磁石ナット
Fig. 6 Magnetic nut

ターボが大きくなるとナット寸法も大きくなるため 3 形状で評価を行い、着磁は径方向 2 極で実施した。磁石の材料選定については表 1 に示す。ナット形状の成立性の面からネオジムやフェライトでは困難なため Fe-Cr-Co を選定した。Fe-Cr-Co は鉄系の磁石となっており加工性に優れナット製作の実績もある。また残留磁束密度 B_r が

表 1 磁石材料の選定
Table 1 Selection of magnet material

	Nut form	Residual magnetic flux density B_r (T)	Post magnetization	Coercive force (kA/m)
FeCrCo	○	1.3~1.44	○	42 ~ 54
Neodymium	×	1.12 ~ 1.48	△	835 ~ 1,122
Ferrite	×	0.38 ~ 0.48	○	262 ~ 382

○: Excellent △: Limited ×: Poor

大きく温度安定性も優れている。しかし他の材料より保磁力が弱いため取り扱いの上で減磁しないよう注意が必要である。

2.5 センサー形状

センサー形状を図 7 に示す。GMR-IC 搭載寸法を考慮しセンサー径は $\phi 12$ mm とし、小型ターボでも搭載できるよう全体の寸法を小さくした。

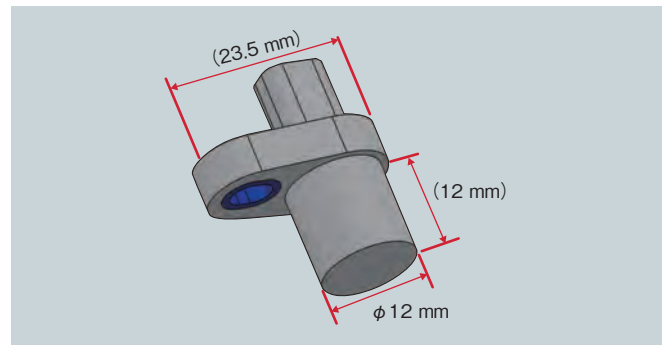


図 7 センサー形状
Fig. 7 Sensor shape

3. GMR-IC 式センサー開発

3.1 開発目標

開発目標は顧客の要求などをもとに下記とした。

- ① 測定回転速: 30 万 rpm 以上
- ② 検知距離: 35 mm 以上 (シャフトの中心からセンサーまでの距離)

3.2 GMR-IC の配置検討

まず磁気シミュレーションを行い検知可否の判断を行った。シミュレーションツールは JMAG を使用し、有限要素法を用いた反復計算により解析を行った。シミュレーションの条件は下記とし GMR-IC を回転方向にしたときとラジアル方向にしたときの検知距離の比較を行った。

- ① GMR-IC は 2.2 項で選んだ IC を解析の対象とした。GMR-IC の感度 (しきい値) は小さい磁束密度の変化も検知できるよう改良を行い、0.065 mTp-p (ピーク-ピーク値)。
- ② センサー周囲は空気
- ③ シャフト-センサー先端までの距離を 35 mm とする。その時の GMR 素子位置 (図 5 (c)) は GMR probe ②が 36.6 mm, GMR probe ①と②との距離は 1.75 mm として検討。

3.2.1 シミュレーション結果（回転方向）

回転方向に GMR-IC を搭載させたときのシミュレーション結果を図 8 に示す。シャフトの中心からセンサーが 35 mm 離れた位置における GMR 素子部の差動磁束密度は 0.036 mTp-p。本検知方式では IC の感度 0.065 mTp-p よりも差動磁束密度が小さいため検知できない。

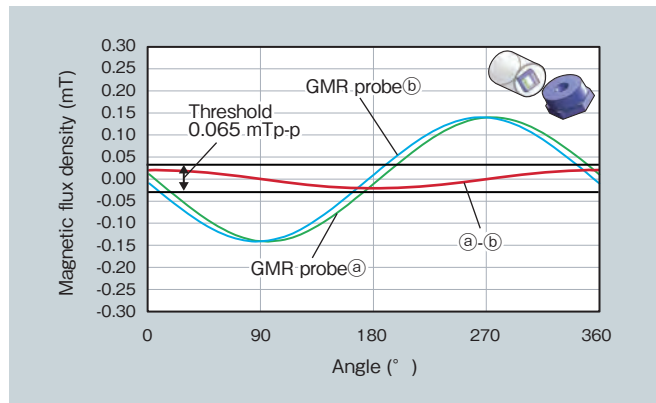


図 8 磁気シミュレーション（回転方向）
Fig. 8 Magnetic simulation (direction of rotation)

3.2.2 シミュレーション結果（ラジアル方向）

ラジアル方向に GMR-IC を搭載させたときのシミュレーション結果を図 9 に示す。シャフトの中心からセンサーが 35 mm 離れた位置における差動磁束密度は 0.067 mTp-p。IC の感度 0.065 mTp-p を超えており検知可能となる。回転方向より検知距離が取れ、目標の検知距離をクリアできる見込みがあるため本方式にて検討を進めることとした。しかし試験を実施したところ、35 mm の距離で検知できなかった。

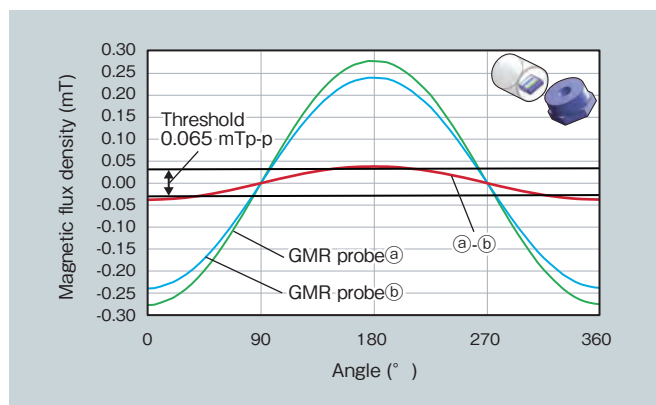


図 9 磁気シミュレーション（ラジアル方向）
Fig. 9 Magnetic simulation (radial direction)

3.3 原因と対策

シミュレーションの結果から差動磁束密度が大きく取れるラジアル方向検知に決めたが 35 mm の検知距離では回転計測ができないことが分かった。その原因を調査し

たところ磁石の磁束密度が下がっていることが分かった。

選定した Fe-Cr-Co 磁石は保磁力が小さいため金属シャフトに取り付けると減磁することが分かった。そこでシャフトにナットを取り付けた時の磁束密度への影響を調査した。ナット単体・シャフトを取り付けた状態での磁束密度の測定結果を図 10 に示す。縦軸はナットの磁束密度を示す。ナットをシャフトに取り付けるとナット単体の 1/2 以下の磁束密度になってしまう。着磁後磁性体に接触させることが減磁の原因となっていることから、磁性体にナットを接触させた後、全体を着磁すれば減磁が抑えられるのではないかと考えた。そこでナットをシャフトに取り付けた後に着磁し磁束密度を測定した。

結果を図 10 に示す。ナット単体に対し磁束密度は小さくなるが約 8 割程度の磁束密度が得られることが分かった。

そこで、後着磁の磁束密度のデータを用い実際の取り付け状態を模擬するためアルミハウジングに取り付けた状態で磁気シミュレーションを実施した。また追加条件としてコネクタ挿入時のターボへの干渉を防ぐため、センサーは垂直ではなく 10° 傾けることとなったためその条件を盛り込んだ。図 11 に結果を示す。縦軸はセンサーの検出可能な距離（ナットのセンターからセンサー先端）を

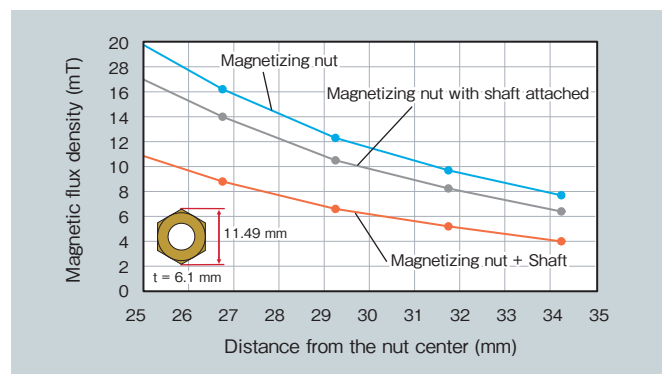


図 10 シャフト取り付けによる磁束密度
Fig. 10 Demagnetization due to shaft installation

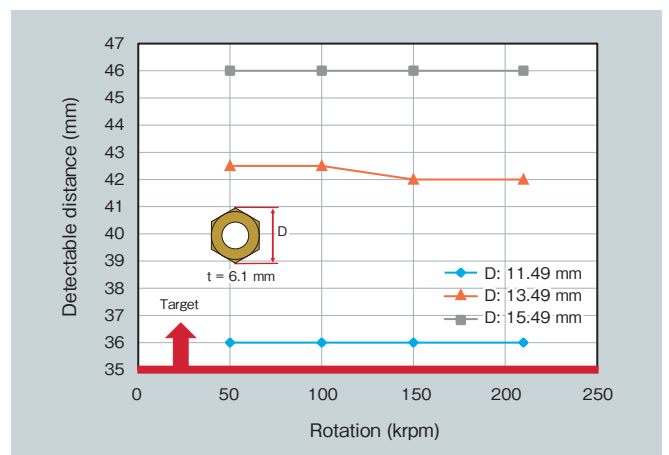


図 11 シミュレーション結果
Fig. 11 Simulation results

示す。11.49 mm のナットでも目標検知距離を達成できていることが分かった。

3.4 試験結果

図 12 に磁石を後着磁したときの測定結果を示す。

- ① 30 万 rpm に対し社内で測定可能な回転速 21 万 rpm まで試験を実施し目標を満足していることを確認した。
- ② ナットの大きさを大きくしていくことで検知距離を広げられることが確認できた。

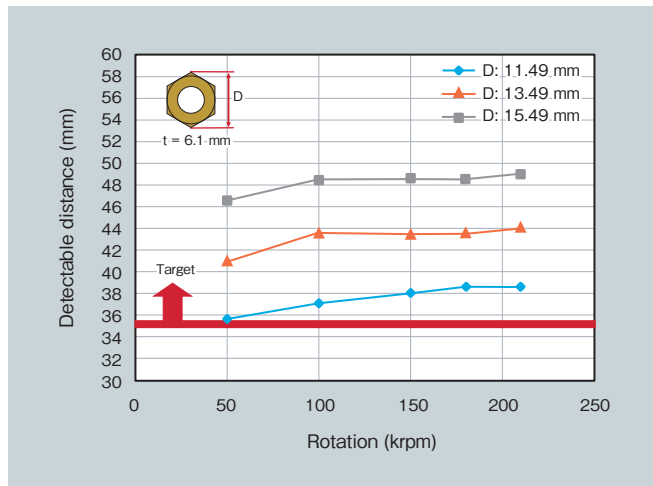


図 12 試験結果
Fig. 12 Test results

4. 結言

GMR-IC を用いたターボ用回転速センサーの開発を行い以下の結果を得た。

- ① GMR-IC を用いた回転速センサーにより回転計測の実現性が見えた。
- ② コンプレッサー側のアルミの羽根固定用ナットを 2 極磁石にし、その回転を GMR-IC で検知することで回転速 21 万 rpm で検知距離 35 mm 以上の回転計測が可能となっている。

また、シミュレーション上、回転速 30 万 rpm で検知距離 35 mm 以上の回転計測が可能である。

- ③ GMR-IC で回転検知できることで、渦電流式に対し小型で安価な構造にすることができ、小型ターボ車から大型ターボ車まで搭載が可能となる。

今回の開発品は、センサーと磁石の距離を広げても検知可能なことから、ターボ以外のレイアウト困難な場所の回転検知にも応用することが可能である。

引用文献

- 1) 御堀直嗣:車はなぜ走るのか, 日経 BP, (2009), p.282-284, p.308-312, p.317-318
- 2) 石井敦:ターボの市場動向について, IHS AUTOMOTIVE (2015), p.11-25.
- 3) 生司和一, 他:渦電流センサ及びそれを用いたターボチャージャー回転検出装置, 特許第 5645207 号, (2014) .
- 4) 毛利佳年雄:磁気センサ理工学(増補), コロナ社, (2016), p.59-61
- 5) 畑村耕一:自動車エンジン技術がわかる本, ナツメ社, (2009), p.124



鬼本 隆

Takashi Onimoto
日立金属株式会社
機能部材事業本部
自動車部品統括部



河野 圭

Kei Kawano
日立金属株式会社
機能部材事業本部
自動車部品統括部