

4 ストローク 50cm³ スクータエンジン用マグネット カップリング式ウォーターポンプの開発

Development of Magnet Coupling Water Pump for 4-Stroke 50cm³ Scooter Engine

三宅 豊*	新納 忠*	深町 昌俊*
Yutaka MIYAKE	Tadashi NIINO	Masatoshi FUKAMACHI
鍋谷 真*	佐藤 修**	
Shin NABEYA	Osamu SATOU	

要 旨

マグネットカップリング式ウォーターポンプの開発において、インペラ停止に繋がるカップリングのプルアウト(脱調現象)が懸案であった。マグネットカップリングの挙動解析をした結果、高速回転域におけるマグネットカップリングの伝達トルク不足によるプルアウトと、インナマグネットとアウトマグネットの共振によるプルアウトの2種類があることが判った。プルアウトに影響する主な要因は、駆動側の角速度入力、従動側の慣性モーメント、マグネットカップリングの特性、冷却水によるダンパ効果である。ウォーターポンプの実機解析と挙動シミュレーションを用いて、プルアウトが発生しない条件内にマグネットカップリングの仕様を設定して駆動力伝達の信頼性を保証することができた。これにより、ウォーターポンプの小型化、軽量化とともにエンジンのフリクション低減を達成した。

ABSTRACT

In the development of a magnet-coupling type water pump, pulling out of a coupling leading to the impeller stopping had been a concern. As a result of the analysis of the magnet coupling behavior, two-types of pulling out due to the insufficient transmission torque of magnet coupling in the high speed rotation and the resonance of an inner magnet and outer magnet were found. Major factors causing pulling out are the angular velocity input to the drive side, the moment of inertia of the driven side, a characteristic of magnet coupling, and damping effect of coolant. The design specifications of the magnet coupling were set within conditions that did not allow generating pulling out by using the results of actual testing and a behavior simulation of a water pump. The reliability of the power transmission was assured. As a result, the miniaturizing and lightening of the water pump, and the decrease of engine friction was achieved.

1. はじめに

従来の内燃機関に付設されたウォーターポンプは、機械結合によりインペラを駆動しており、駆動軸にメカニカルシール、オイルシール、軸受けベアリングを設ける必要があった。それに対し、マグネットカップリング式ウォーターポンプは磁力で駆動力を伝達することにより、上記部品の廃止、構造の簡素化、小型軽量化、エンジンフリクションの低減を図ることができる。

マグネットカップリング式ポンプの弱点として、急激な回転速度変動や高速回転によって、従動側(インペラ側)が駆動側に追従できなくなる、いわゆる脱調現象(以下、プルアウトという)がある。プルアウトを起こすと、インペラが

停止し、冷却水が循環しなくなるため、エンジン冷却に支障をきたす。

マグネットカップリング式ウォーターポンプは、一般的にはモータで駆動しているのに対し、本ポンプは内燃機関のクランクシャフトに連動する軸により駆動される。したがって低速回転から高速回転まで使われ、1回転中の回転速度変動も大きい。マグネットカップリングには厳しい使用条件であり、動力伝達の信頼性を確保することが大きな課題であった。

今回、プルアウトのメカニズムを解析し、各要因の影響を確認し、適正な仕様に設定することができた。この技術を用いて4ストローク 50cm³ スクータエンジンに採用したので報告する。

* 朝霞研究所

** (株)山田製作所

2. 構造

Fig. 1 に今回開発したマグネットカップリング式ウォーターポンプの構造図を示す。以下にその特徴を述べる。

- ・ウォーターポンプのインペラ駆動を、水、オイルを分離する樹脂製ポンプケースを介して、マグネットの磁力により行うため、メカニカルシール、オイルシールを不要としている。
- ・インペラの軸受け構造を、ステンレススチール製シャフトと樹脂製ブッシュの直受けタイプのすべり軸受けとすることにより、ボールベアリングを廃止している。
- ・マグネットは割れ対策、飛散防止対策として、カム軸側(駆動側、以下、アウトマグネットという)はステンレススチール薄板でカバーし、インペラ側(従動側、以下、インナマグネットという)はインペラを一体成形した樹脂でカバーしている。
- ・カム軸駆動とし、アウトマグネットをカムスプロケットと共締めとしている。
- ・水路が完全に密封される構造であるため、シール性に関して信頼性が高く、従来は不可欠であったドレン排出構造を不要としている。

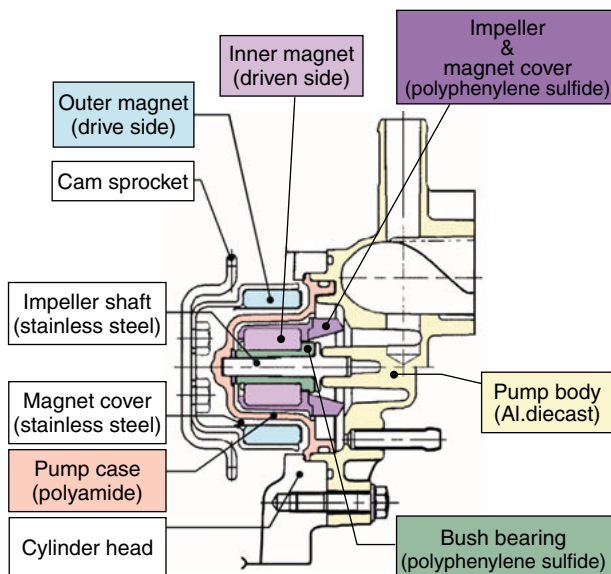


Fig. 1 Structure of magnet coupling water pump

3. プルアウトのメカニズム・要因

プルアウト現象を確認するため、マグネットカップリングのインナマグネットとアウトマグネットの挙動を確認した。挙動確認結果、高速回転域におけるプルアウトと、インナマグネットとアウトマグネットの共振によるプルアウトという2種類のプルアウト現象があることが判った。

高速回転域におけるプルアウトはウォーターポンプの回転

トルクが、マグネットカップリングの伝達トルクを上回ることにより発生する。

共振によるプルアウトは、エンジンの回転速度変動に起因するアウトマグネットの回転速度変動と、磁力により駆動力伝達されているインナマグネットの回転速度変動の共振現象により発生する。共振によりインナマグネットとアウトマグネットの磁極の相対的な角度ずれ(以下、位相差という)が大きくなり、駆動力伝達できる磁極の相対角度範囲を超えてしまうとプルアウトに至る。

インペラ挙動の運動方程式は以下のようになる⁽¹⁾。

$$I\ddot{\theta}_{in} + C\dot{\theta}_{in} - k(\theta_{in} - \theta_{out}) = 0 \quad (1)$$

- I : インナマグネットの慣性モーメント
 C : 冷却水のダンピング効果
 k : マグネットカップリングのねじりばね効果
 θ_{in} : インナマグネット変位
 θ_{out} : アウトマグネット変位

運動方程式から、プルアウトに影響すると思われる要因を検討した。その要因を Fig. 2 に示す。プルアウトに影響を及ぼす要因のなかで、影響度が大きく、本機構の核であるマグネットカップリングの伝達トルク特性について述べる。

マグネットカップリングの伝達トルクは、

- ・ 磁力
- ・ 温度
- ・ マグネット間ギャップ(ラジアル方向, スラスト方向)
- ・ 位相差
- ・ 極数

等により変化する。

磁力については、使用する磁性体の磁束密度が高いほど、伝達トルクを大きくすることができるが、本開発においては、安価で減磁に対して安定なフェライトに絞って検討した。また、マグネット寸法が大きいほうが伝達トルクも大きくできるが、慣性モーメントも増大する。マグネット寸法については、実機レイアウトのなかで、必要伝達トルクに対して、慣性モーメントが極力小さくなるものとした。

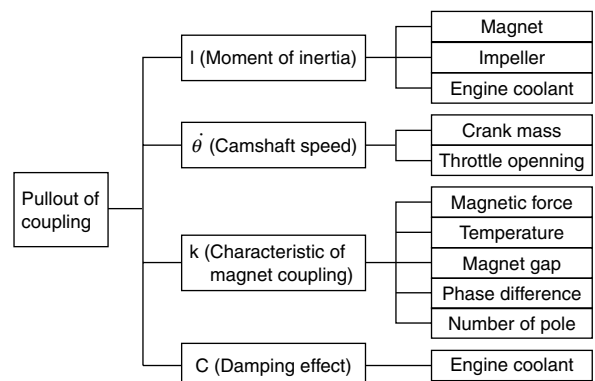


Fig. 2 Magnet coupling pullout factor analysis chart

伝達トルクと温度の関係を Fig. 3 に示す。フェライトマグネットは磁力の温度係数が大きく、温度上昇に対し、磁力が可逆的に低下する特性を持つ。内燃機関に使用する場合、使用温度範囲が広いため、温度条件による磁力変化が伝達トルクに大きく影響する。実験結果から、

$$T(t') = T(t) \cdot e^{k(t'-t)} \quad (2)$$

$T(t)$: 静的最大伝達トルク(温度 t °C時測定)

$T(t')$: 温度 t' °C時の静的最大伝達トルク

k : 可逆温度係数

の式にて表すことができる。

マグネットギャップが大きくなると磁束密度が低下するため、伝達トルクは低下する。また、アウトマグネットとインナマグネットのスラスト方向の位置ずれによっても伝達トルクは低下する。

マグネットカップリングは対向する磁極間に位相差を与えたときに発生する復元力によって動力を伝達する。この復元力は対向する磁極とそれと隣り合う磁極間に作用する吸引力

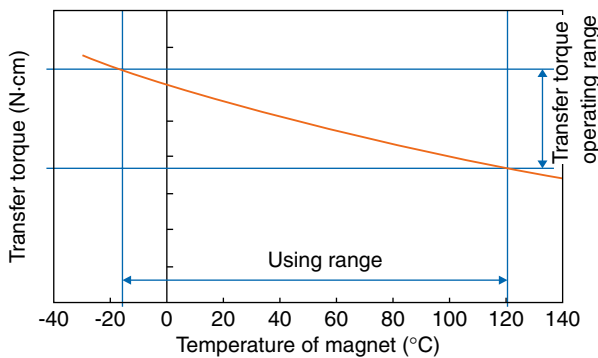


Fig. 3 Relationship between transfer torque and temperature of magnet

と反発力によるもので、それぞれの位置関係によって変化する⁽²⁾。Fig. 4 に極数違いによる位相差と伝達トルクの関係を示す。この位相差—伝達トルク特性は、空隙磁束密度分布が正弦波である条件におけるものであり、厳密には3次元解析が必要であるが、本開発においては実験結果から、

$$T = T_{max} \cdot \sin\{(P/2) \cdot \theta\} \quad (3)$$

T : 位相差 θ 時の静的伝達トルク

T_{max} : 静的伝達トルク最大値

P : マグネット極数

θ : 位相差

の式にて近似した。

Fig. 4に示すように、トルク伝達できる角度範囲(プルアウトまでの許容位相差)は極数の少ないほうが大きくなる。ただし、伝達トルクの最大値は極数により変化するため、伝

達トルクとトルク伝達できる角度範囲の両面から、最適な極数を検討する必要がある。

4. 高速回転域におけるプルアウト

伝達トルクを低く設定したマグネットカップリングにて、ウォーターポンプ単体のモータリングによるプルアウト確認を実施した。Fig. 5に実験に用いたウォーターポンプの回転トルク特性を示す。プルアウトが発生した回転速度は、テストに用いたマグネットカップリングの伝達トルクと、ポンプの回転トルクが一致するポイント(Fig. 5内のa)であった。また、実機エンジンの確認においても同様の結果が得られた。以上より、高速回転域におけるプルアウトは、ポンプ回転トルクがマグネットカップリングの伝達トルクを上回ることにより発生することがわかった。よって高速回転域のプルアウトについては、ポンプ回転トルクとマグネットカップリングの伝達トルクを、実機使用条件の考慮を加えて設定することにより回避することができる。

5. 共振によるプルアウト

まず、インナマグネットとアウトマグネットの回転速度を計測した。次に、インナマグネットとアウトマグネットの速度差を積分して、計測開始時位置からの相互の角度差として相対的挙動を求めた。計測結果の一例として Fig. 6 の

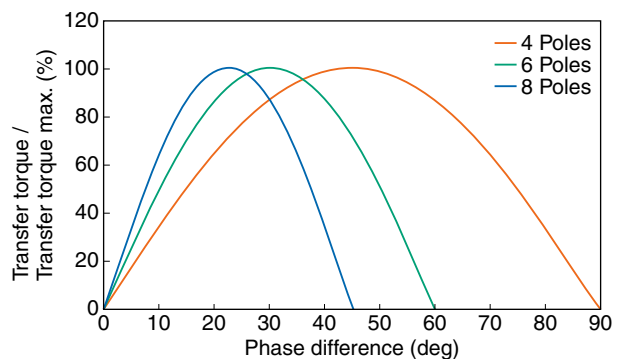


Fig. 4 Relationship between transfer torque and phase difference

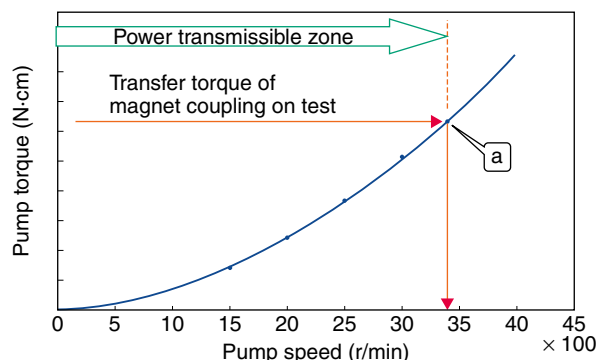


Fig. 5 Pullout point at high revolution

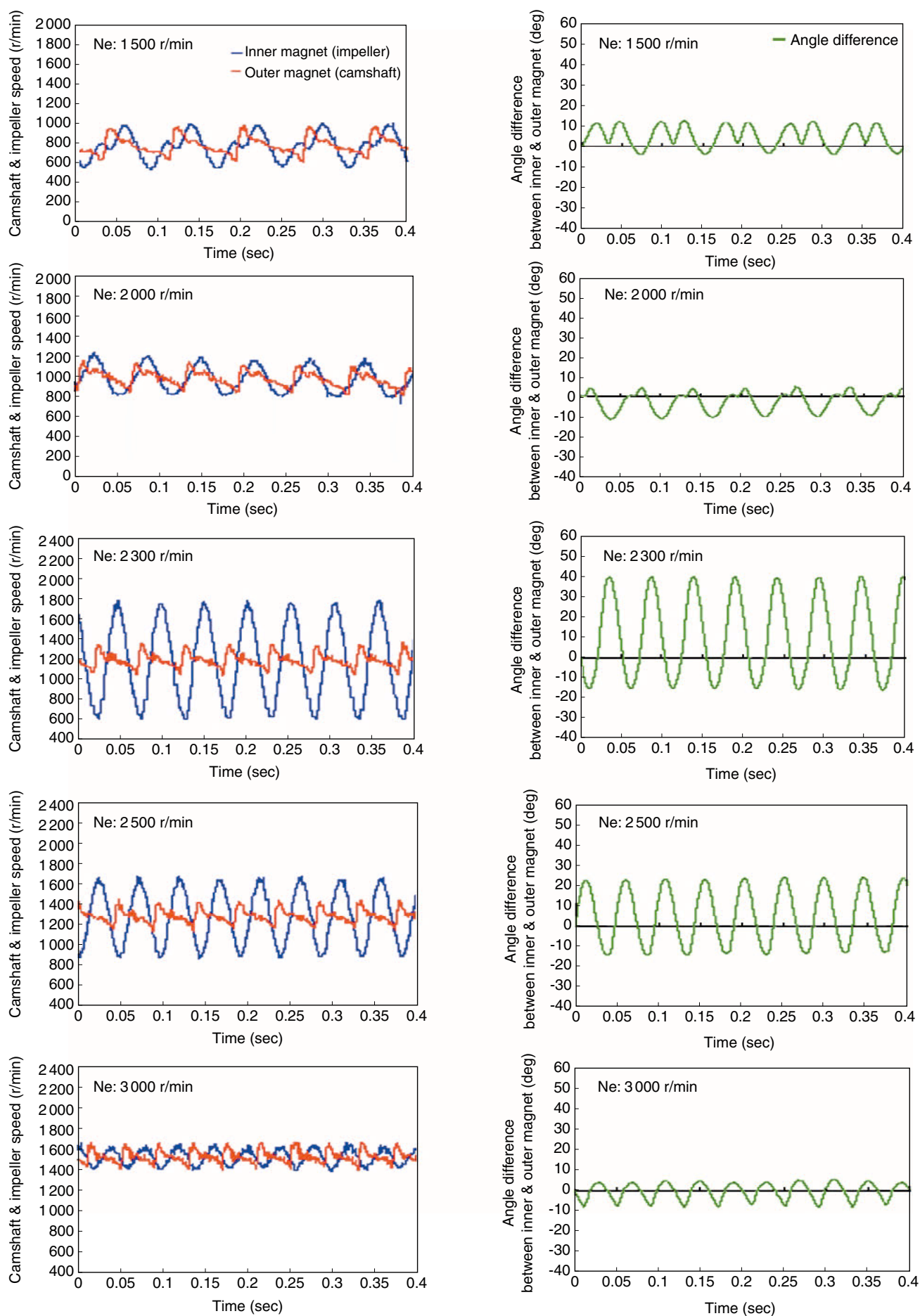


Fig. 6 Action of magnet coupling

左側にインナマグネットとアウトマグネットの回転速度を示し、Fig. 6の右側に積分結果である相対的角度差を示す。ここで求めた相対的角度差の全振幅を位相差振幅と呼ぶ。次に、各エンジン回転速度における位相差振幅の最大値を読み取り、エンジン回転速度と位相差振幅の関係で示した。Fig. 6のデータをエンジン回転速度と位相差振幅の関係で示したものが Fig. 7 の慣性モーメント 2.61×10^{-6} (kg・m²)仕様である。この位相差振幅が小さいほどプリアウトに対して余裕がある。また、位相差振幅が大きくなって、駆動力伝達できる磁極の相対角度範囲を超えてしまうと、プリアウトが発生する。このようにして、各要因のプリアウトに対する影響を比較した。

5.1. 慣性モーメントの影響

マグネット本体は変えずにダミーウェイトでインナマグネット側の慣性モーメントを変化させて3仕様を比較した。各エンジン回転速度における位相差振幅を求め、その結果を Fig. 7 に示す。慣性モーメントが大きいほど、共振回転速度域が低速回転側に寄り、位相差振幅も大きくなるという結果が得られた。慣性モーメントが小さいほうが、プリアウトに対して余裕があると言える。

5.2. マグネットカップリングへの入力の影響

スロットル開度違いによる、カップリングへの入力の影響を確認した。Fig. 8にスロットル開度違いによるエンジン回転速度変動と位相差振幅の特性を示す。スロットル開度が大きくなるに連れて、位相差振幅も大きくなり、スロットル開度が40%でほぼサチュレートしている。この傾向はエンジン回転速度変動の変化と一致している。マグネットカップリングの挙動は、回転速度変動が大きいほど、共振回転速度域が低回転側に寄り、位相差振幅も低速回転側に大きくなるという結果が得られた。また、フライホイールマス違いにより、回転速度変動を変化させた場合の結果も Fig. 9 に示すように、スロットル開度違いによる結果と同等のものとなった。マグネットカップリングへの入力は回転変動の小さいほうがプリアウトに対して余裕がある。

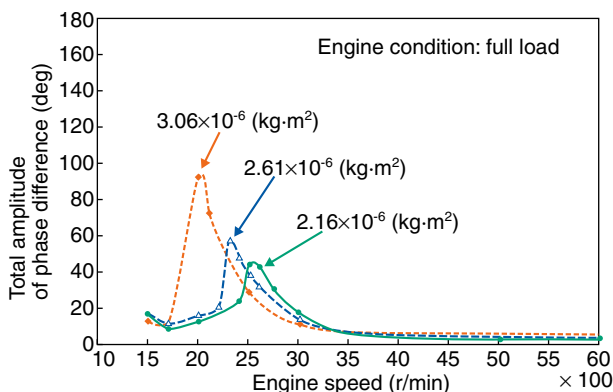


Fig. 7 Influence of moment of inertia

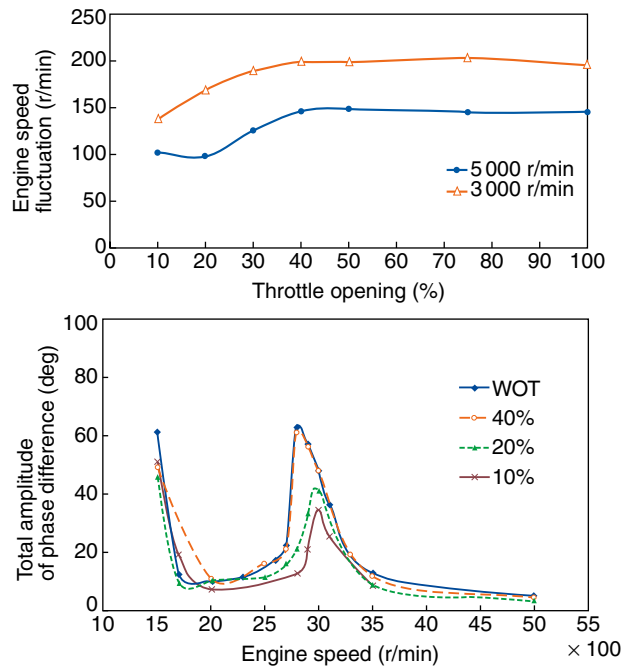


Fig. 8 Influence of throttle opening

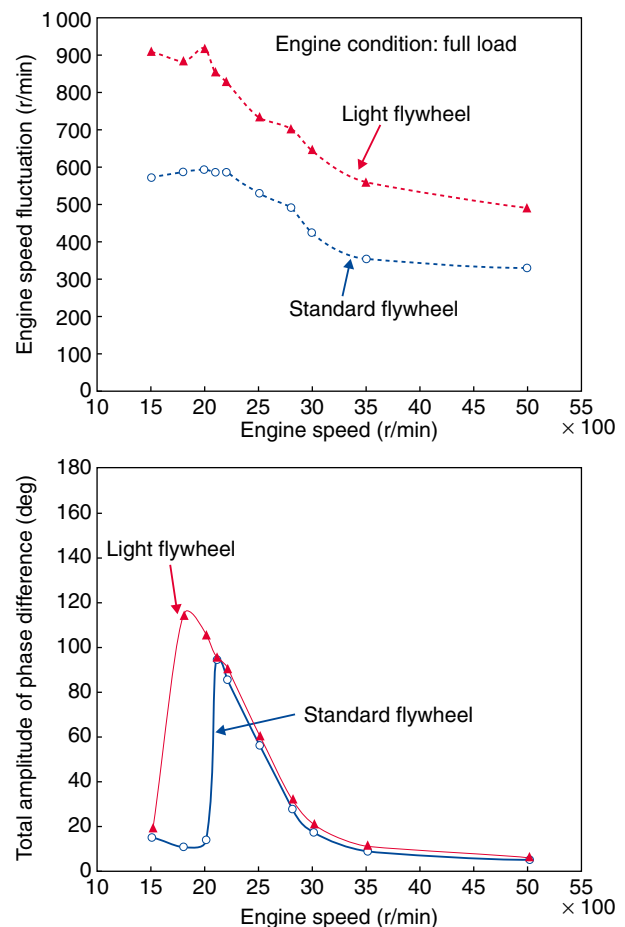


Fig. 9 Influence of flywheel inertia mass

5.3. マグネットカップリングの特性による影響

まず、マグネットカップリングの磁力、温度、ギャップの違いについて、プルーアウトに対する影響を確認した。前述したように、それぞれが伝達トルクに影響する。実機確認に供した仕様を Table 1 に示す。また、その仕様の温度特性を Fig. 10 に示す。Fig. 10 内の A～D に示すポイントで位相差振幅を確認した結果を Fig. 11 に示す。A, B, C のポイントでの測定結果、伝達トルクが小さいほど低速回転側に位相差振幅の大きい共振域が現れ、伝達トルクが大きくなるにつれて高速回転側に共振域が移り、振幅は比較的小さくなる。

Table 1 Magnet coupling specification for experiment

No.	1	2	3
Number of magnet poles	4	4	4
Driven magnet outer dia. (mm)	24	24	24
Drive magnet inner dia. (mm)	35	36	37
Gap (mm)	5.5	6	6.5

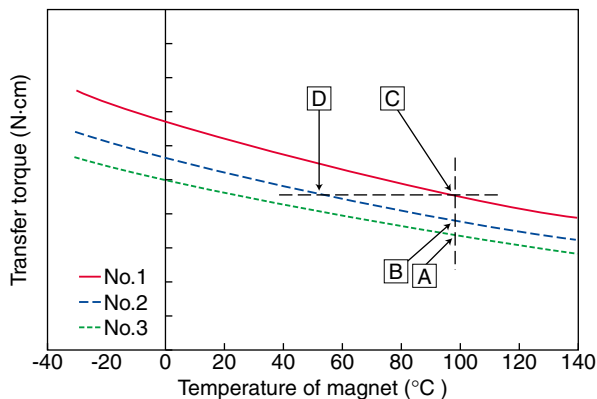


Fig. 10 Relationship between transfer torque and temperature for experiment

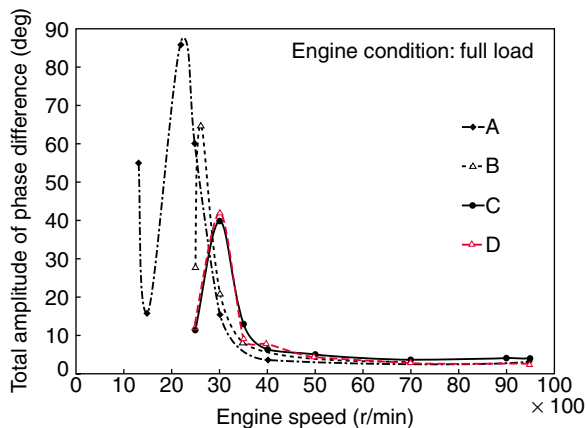


Fig. 11 Influence of magnet gap and temperature

また、CおよびDのポイントで、伝達トルクを一致させて確認した結果、共振の現れる特性が一致した。これより、磁力、温度、ギャップという要因は、伝達トルクという指標にて換算できることが判った。

次に極数の影響についての測定結果を Fig. 12 に示す。マグネット最大伝達トルクが極数によって異なることによる影響を排除するため、温度設定により伝達トルクを同一に調整し確認した。4極仕様のほうが6極仕様に対し、位相差振幅は大きいものの、プルーアウトまでの余裕角度は大きく、共振域は低速回転側に現れる。そして、4 000r/min 近辺から上の高速回転域に1次の共振域があると、2 000r/min 近辺から上の実用回転域に0.5次の共振域が現れることが判った。

5.4. 冷却水の影響

まず、サーモスタット開閉時を想定し、冷却水流量による影響を確認した。回転速度一定で、流量を変化させ、位相差振幅を求めた。測定結果を Fig. 13 に示す。流量の差違は、位相差振幅、共振回転域に有意な影響は与えないことが判った。次に冷却水濃度、温度等による粘度変化による影響を確認した。測定結果を Fig. 14 に示す。粘度の違いによっても位相差振幅、共振回転域に有意な影響はないことが判った。

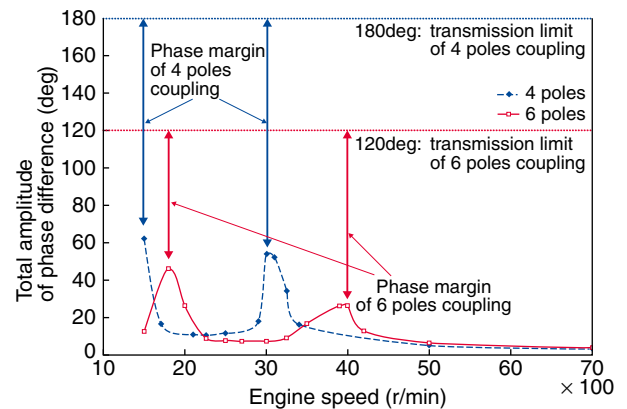


Fig. 12 Influence of number of magnet poles

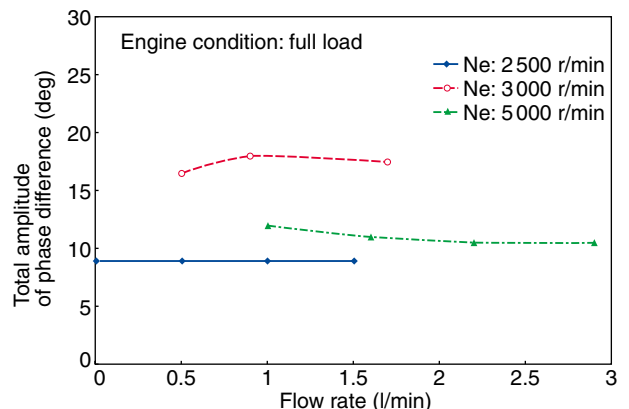


Fig. 13 Influence of flow rate

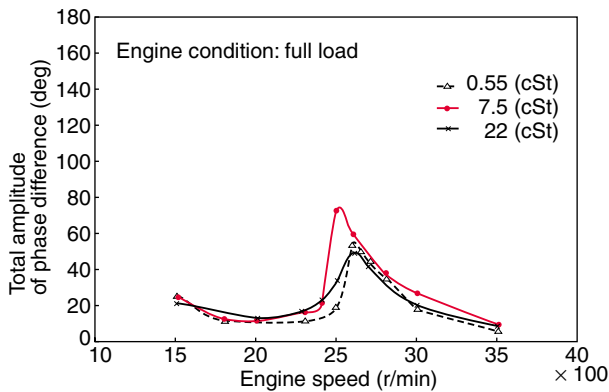


Fig. 14 Influence of viscosity

6. シミュレーション

共振によるプルアウトのメカニズムの妥当性を得るため、シミュレーションを実施した。シミュレーションモデルをFig. 15に示す。本系の特徴として、インナマグネットとアウトマグネットの間に働く磁力による荷重、すなわち、伝達トルクが変位に対し線形でないため、運動方程式は非線型となる。そこで本系の解法は、Newton-Raphson法数値積分を用いた。アウトマグネット側はインナマグネット側に対し充分大きなマスを持つことから、アウトマグネット側はモデル化せず、実測より得られた各時刻におけるアウトマグネットの角変位量を計算モデルに与えた。シミュレーションに用いた計算式を以下に示す。

$$I \ddot{\theta}_{in} + C \dot{\theta}_{in} - k(\theta_{in} - \theta_{out}) = 0 \quad (4)$$

I : インナ・マグネット側の慣性モーメント

C : 冷却水による抵抗(ポンプ回転トルク)

$$k(\theta_{in} - \theta_{out}) = T_{max} \cdot \sin\{P/2(\theta_{in} - \theta_{out})\} \quad (5)$$

k(θ_{in} - θ_{out}) : 位相差θ時の静的伝達トルク

T_{max} : 静的伝達トルク最大値

P : マグネット極数

θ_{in} : インナマグネット変位

θ_{out} : アウトマグネット変位

$$\theta_{out} = \delta \omega(t) dt \quad (6)$$

ω(t) : アウトマグネット角速度

Fig. 16に実機運転条件としてエンジン回転速度をスイープした時の、実測値とシミュレーション結果のインナマグネットの角速度を示す。両者の結果は良く一致していることより、本系の運動方程式の妥当性が確認され、実機で発生するプルアウト現象の理論的裏付けが得られた。

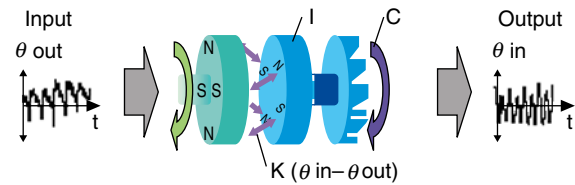


Fig. 15 Simulation model

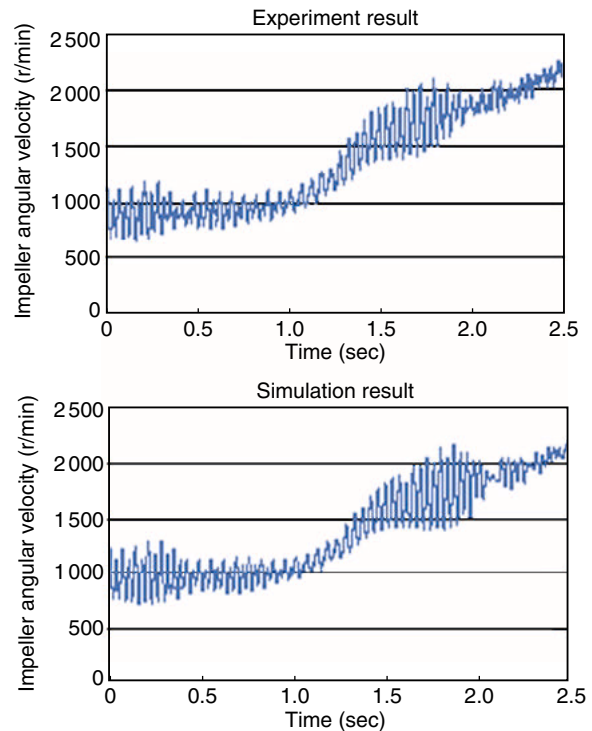


Fig. 16 Comparison between simulation and experiment

7. 仕様設定および効果

仕様設定するにあたり、適用車輛のマグネット部温度やマグネットカップリングへの入力、ポンプ回転トルクを測定、シミュレーションにて、マグネット極数、伝達トルク、慣性モーメント、入力4項目の仕様と条件を変化させて確認した。一例として、Fig. 17に4極仕様、入力固定による伝達トルクおよび慣性モーメント違いのシミュレーション結果を示す。このグラフは各仕様をシミュレーションし、それぞれのプルアウトまでの余裕角度を指標として示したものである。これらシミュレーションの結果に基づき仕様を選定した。実機による確認も含めて、多様な使用条件における駆動力伝達の信頼性を確保した。このマグネットカップリング式ウォーターポンプを採用することにより、従来の機械結合式ウォーターポンプに対し、ポンプ単体フリクションがおよそ1/5に低減(N_p=4 500r/min時)、小型軽量化、構造の簡素化を達成した。

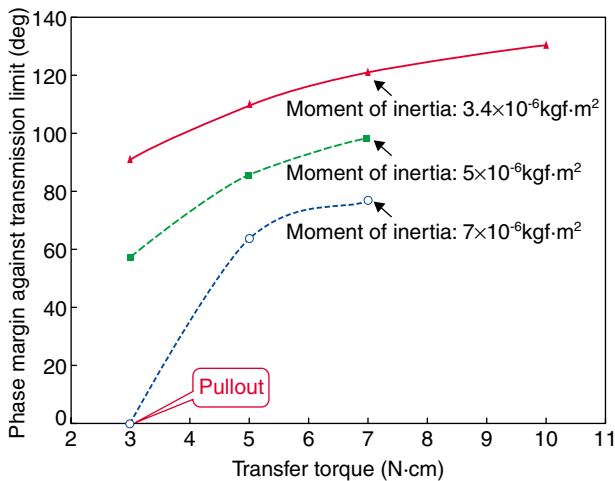


Fig. 17 Simulation result about transfer torque and inertia

8. まとめ

4ストローク 50cm³ スクータエンジン用マグネットカップリング式ウォーターポンプの開発にあたり、駆動側入力、従動側慣性モーメント、マグネットカップリングの特性、冷却水のダンパ効果に注目し、各要因の挙動シミュレーションと実機確認を行なった結果、以下の成果を得た。

- (1) プルアウトのメカニズムが明確となった。
- (2) ウォータポンプ挙動シミュレーションプログラムにより、机上での仕様検討を可能とした。
- (3) 実機確認、およびシミュレーションにより駆動力伝達の信頼性を保証した。
- (4) エンジンフリクション低減、小型軽量化、および構造の簡素化を達成した。

参考文献

- (1) 長屋幸助ほか：ロバスト性を考慮したマグネットカップリング系のフィードフォワード速度軌道制御，日本機械学会 (No.920-55) 機械力学・計測制御講演論文集，1992, B, p.96-101 (1992)
- (2) 鶴本勝夫：永久磁石を利用した磁気歯車と磁気継手，日本応用磁気学会誌，Vol.11, No.2, p.391-394 (1987)

■ 著 者 ■



三宅 豊



新納 忠



深町 昌俊



鍋谷 真



佐藤 修