

特集 | サスペンション制御アクチュエータの開発*

Development of Actuator for Suspension Control

吉田 博彦

Hirohiko YOSHIDA

丹下 健治

Kenji TANGE

森川 賢二

Kenji MORIKAWA

Recent suspension control system adopts stepping motor to achieve fine control of the shock absorber. In this stepping motor, expensive rare earth magnet, which has high maximum energy product, is used to keep directed damping force of the shock absorber without electric supply. To replace the magnet to cheap ferrite magnet, we developed auxiliary poles technology by finding generating mechanism of detent torque of stepping motor through three-dimensional magnetic field analysis using finite element method. This technology makes detent torque of stepping motor increase and allows stepping motor for suspension control use ferrite magnet instead of rare earth magnet.

Key Words : Suspension system, Actuator, Shock absorber, FEM, Stepping motor, Detent torque

1. 緒言

サスペンション制御には、「操縦安定性の確保」と「乗り心地の向上」という相反する要求を高い次元で両立させることが求められており、これを達成するために、近年、「スカイフック制御理論 (Fig. 1) や車両挙動に合わせ、より木目細やかな制御を可能にする多段の「ステッピングモータ式アクチュエータ」が採用されてきている。

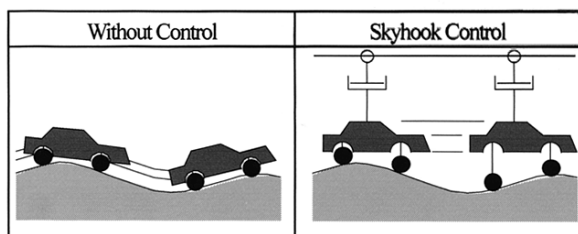


Fig. 1 Skyhook control

しかしながら、従来のステッピングモータ式アクチュエータでは、無通電時のディテントトルクを確保するために、材料単価の高い希土類磁石を用いており、アクチュエータの低コスト化のためには、この希土類磁石を安価なフェライト磁石に置き換えることが、最大の課題であった。

今回、次期型アクチュエータ開発にあたり、ステッピングモータ内の磁気回路を3次元磁場解析により明らかにし、保持トルクの発生メカニズムを突き止めることができた。さらに、磁場解析により、磁気回路を変化させ、ディテントトルクのチューニングが容易に行える補助極技術を考案した。この補助極技術により、

* (社)自動車技術会の了解を得て、JSAE Review 20(1999.10)より和訳し、一部加筆して転載

フェライト磁石においても、アクチュエータ無通電時のディテントトルクを確保することができ、アクチュエータの大幅な低コスト化を行ったので、その技術内容を紹介します。

2. ステッピングモータの作動原理

今回、アクチュエータとして採用したステッピングモータは、PM (Permanent Magnet) 型であり、Fig. 2 に示すように、円周方向にN極とS極が交互に多極着磁されたマグネットロータとコイル及びコアから成り立っている。このステッピングモータは、コイルにより励磁されたコアとマグネットとの間に吸引力を発生させ、A相およびB相の通電を順次切り替えることによりロータを回転させ、トルクを発生している。この通電によるトルクをプルイントルクと呼ぶ。

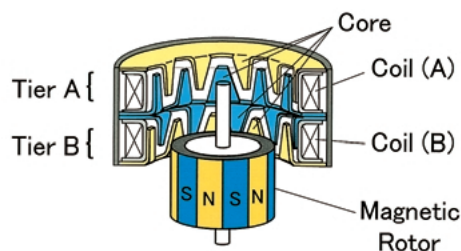


Fig. 2 Structure of stepping motor

一方、無通電時には、マグネットの磁力によりコアが磁化され、マグネットとコアの間に吸引力が発生し、ロータを安定点へ引き込む。ロータが安定点からずれると、ロータを安定点に戻すトルクが発生する。このトルクを保持トルクと呼び、ロータの回転角との関係は、Fig. 3のように表され、保持トルクの最大値をデ

ディテントトルクと呼ぶ。

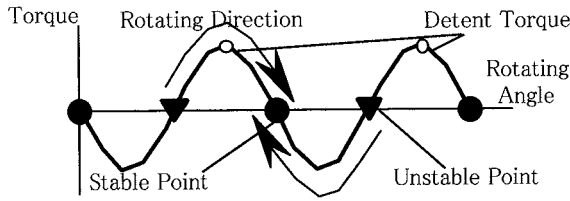


Fig. 3 Detent torque

3. アクチュエータへの要求仕様

減衰力切替え用アクチュエータは、ショックアブソーバ上部に位置し(Fig. 4), その機能は、ECUからの信号(通電)により、ショックアブソーバ内の、オリフィスが設けられたロータリーバルブを回転させることにより、オリフィス開口面積を変え、減衰力を変化させることと、ECUからの信号が無い時に、減衰力を変化しないように、その位置を保持することの2点である。

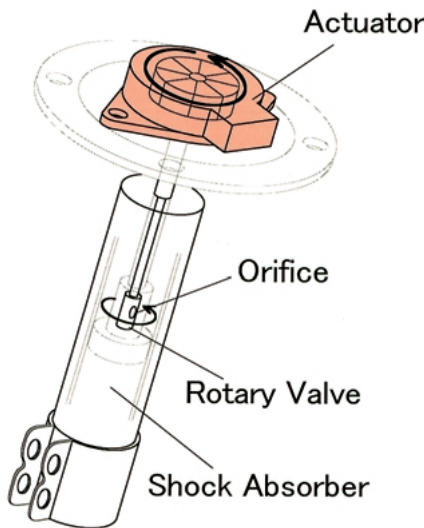


Fig. 4 Structure of shock absorber and actuator

従って、アクチュエータへのトルクに関する要求仕様は、ロータリーバルブに働く流体力や流体固着力あるいは摩擦力などの負荷を超えてロータリーバルブを回転させるプルイントルクと、流体力により、ロータリーバルブが回らないように、位置を保持するためのディテントトルクの確保である。

4. 開発目標と課題

従来のアクチュエータにおいては、ディテントトルクを確保するために、表面磁束密度の高い、高価な希土類マグネットを使用しており、部品費に占めるロータの割合が極端に高い。コストを大幅に下げるために

は、フェライトマグネットにすることが必要と考えた。

しかしながら、フェライトマグネットは、希土類マグネットに比べ、表面磁束密度が1/3程度に低下するため、トルク低下が予想される。これに対し、トルク特性に寄与する要因を明確にし(Fig. 5), 実験計画法を用いて、ディテントトルクアップを検討したが、要求値を満足することができなかった(Fig. 6)。これより、従来技術によるステッピングモータの最適設計だけでは目標ディテントトルクを達成することができず、新しい技術開発が必要となった。

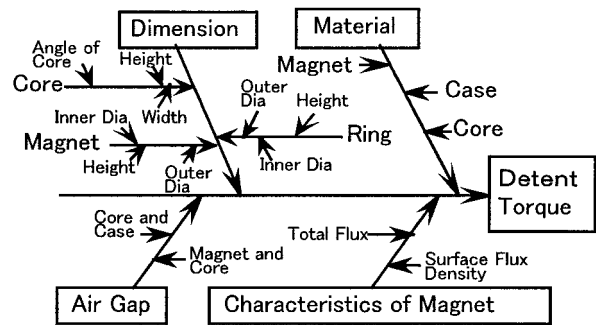


Fig. 5 Factor for torque characteristics

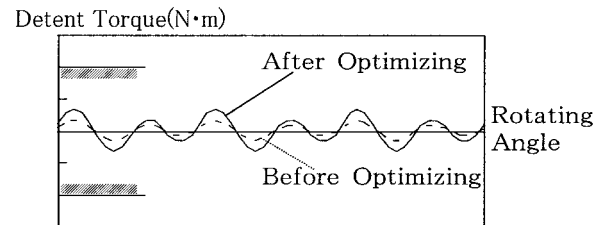


Fig. 6 Result of optimizing stepping motor torque

5. 保持トルク発生原理の推定

ディテントトルクアップ技術を開発するに当たり、まず、保持トルクの発生原理を解明する必要があると考えた。ステッピングモータの構造がA相、B相の2層構造であることから、それぞれの相での保持トルクがどのようなになっているかを調査した。その結果、Fig. 7に示すような、各相ごとの保持トルク波形が得られた。これら2つの相の保持トルクの合成により、ステッピングモータの保持トルクが発生していると推定し、この2相の波形の重ね合わせを行ったが、Fig. 7に示すように、実際のステッピングモータの保持トルクと差異が生じていることが分かる。

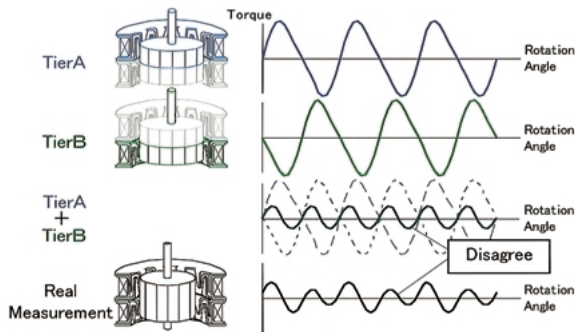


Fig. 7 Detent torque of stepping motor

このことより、ステッピングモータの保持トルクは、前述のような、A相とB相の単純な重ね合わせではなく、A相とB相とこれ以外のトルクの合成により発生しているものと推定される。しかしながら、従来、これを明確にした設計例がなく、保持トルク発生原理を知るためには、ステッピングモータの磁気回路を明確にする必要があると考え、今回、3次元磁場解析を実施した。

6.3 次元磁場解析

磁場解析は、ステッピングモータの幾何学的対称性より、1/12対称モデルにより実施した(Fig. 8)。

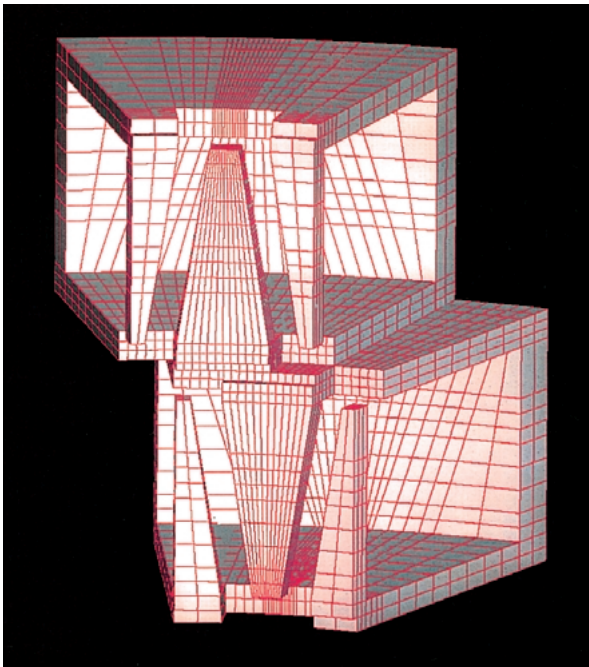


Fig. 8 Analysis model

磁気回路を明確にするために、磁束流れの可視化を行い、検証のためにトルク計算を行い、実測値との比較を行った。

Fig. 9はロータ安定点でのコア内の磁束の流れであり、A相とB相で独立している流れがみられる。ところが、A相のB相側のコアとB相のA相側のコアとが接触しているF部において、A相のコアからB相のコアにぬける磁束の流れ(第3の磁気回路)(Fig. 10)が発生していることが分かった。

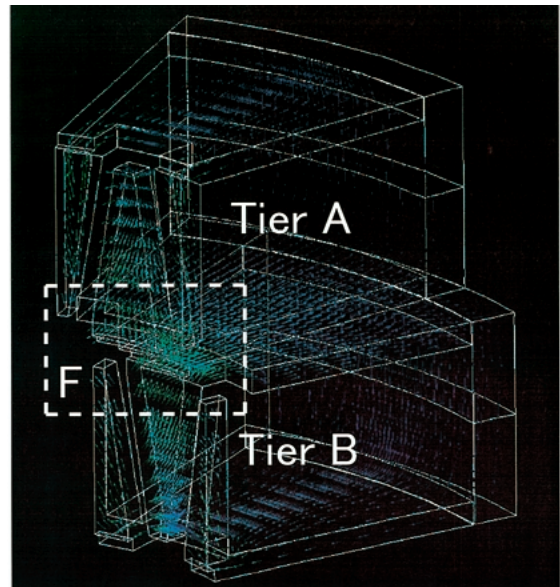


Fig. 9 Magnetic flux in core

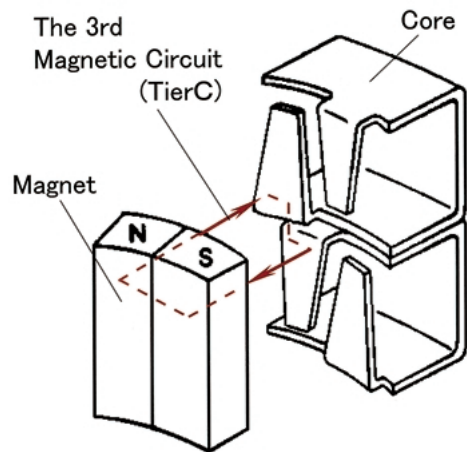


Fig. 10 The 3rd magnetic circuit

この第3の磁気回路による保持トルクを計算し、A相およびB相の保持トルクと重ね合わせることで、保持トルク波形の実測値を再現することができ(Fig. 11)、これら3つの磁気回路により、ステッピングモータの保持トルクが発生しているものと考えられる。

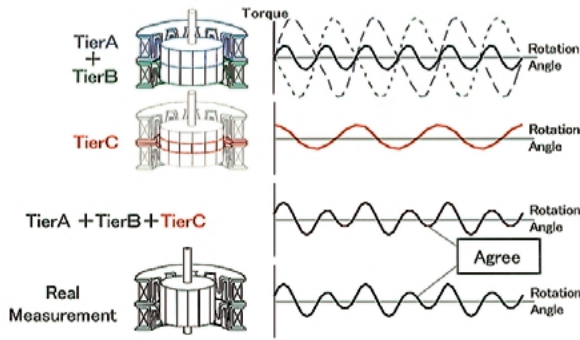


Fig. 11 Result of calculated detent torque

7. ディテントトルクアップの検討

以上の磁場解析により、ステッピングモータの磁気回路は、A相、B相、第3の磁気回路(C相)から成り立っていることがわかった。ここで、Fig. 7より、A相およびB相の各ディテントトルクは大きいにもかかわらず、両者を重ね合わせたステッピングモータのディテントトルクが小さくなっていることが分かる。これは、2つの保持トルクが合成によって相殺されるためと考え、相殺を起こさせないようにすることによって、ステッピングモータのディテントトルクを上げられると考え、Table 1のような検討を行った。

この検討において、B相のみを下げる方法(Fig. 12)、および、A相とB相の位相をずらす方法(Fig. 13)は、いずれも、プルイントルクに影響し、プルイントルクの低下(Fig. 14)やプルイントルク脈動の発生(Fig. 15)などの問題が発生した。

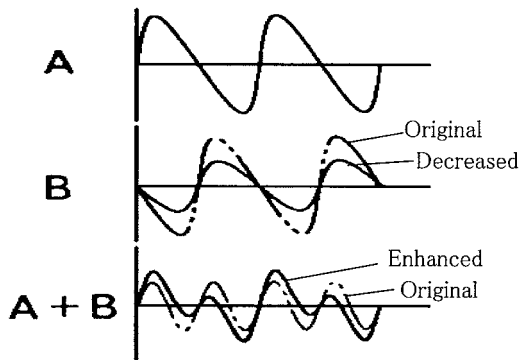


Fig. 12 Increase detent torque by decreasing detent torque of tier B

Table 1 Methods for detent torque increase

Idea	Method	Demerits
Decrease Detent Torque of Tier B (Fig.14)	Decrease the Thickness of Core of Tier B	Decrease Pull-in torque (Fig.16)
Shift Tier B (Fig.15)	Shift Core of Tier B from Original Position	Vibration of Actuator Increases due to Torque Deviation (Fig.17)
Strengthen Tier C	Add Part to Form Magnetic Circuit of Same Phase to Tier C	Number of Parts Increases

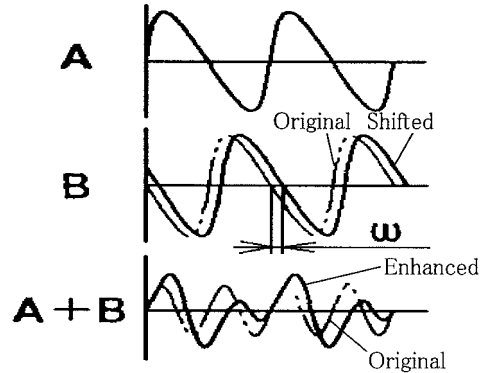


Fig. 13 Increase detent torque by shifting detent torque of tier B

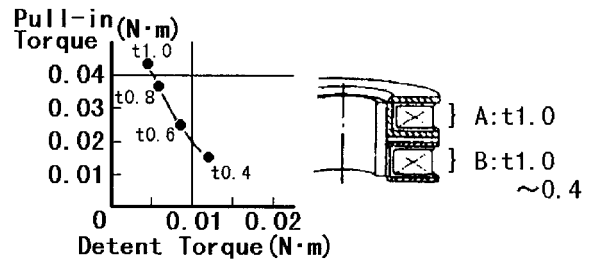


Fig. 14 Demerit of decreasing detent torque of tier B

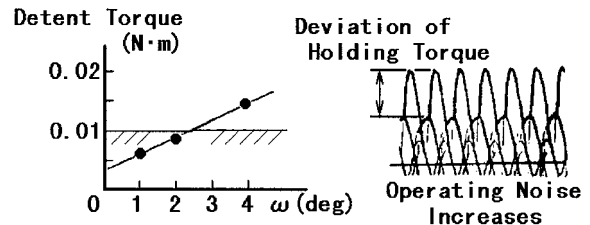


Fig. 15 Demerit of shifting detent torque of tier B

そこで、今回、通電トルクに影響を及ぼさないC相の磁気回路を強化する方法を検討した。

8. 補助極プレートの開発

C相は、Fig. 10に示すような磁気回路を形成しており、Fig. 16、Fig. 17およびFig. 18は、ステッピングモータ軸方向より見た場合の磁気回路を示している。

Fig. 17より、ロータが安定点にある場合、ほとんどの磁束ベクトルが半径方向に並び、赤矢印で示した磁束ベクトルのみが接線方向に傾斜しているが、全体としてバランスすることにより、保持トルクを発生していない。

これに対し、Fig. 18に示すように、ロータが安定点からずれた場合、接線方向に傾いている磁束ベクトルが、Fig. 17に示す安定点の場合より増加し、アンバランスが生じている。このアンバランスにより、保持トルクが発生している。しかしながら、この場合においても、マグネットの磁極中心の最大磁束ベクトルが半径方向に向いており、ディテントトルクに寄与していない。

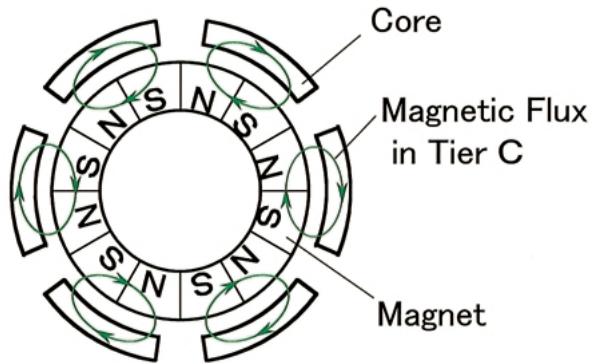


Fig. 16 The 3rd magnetic circuit by axial viewing

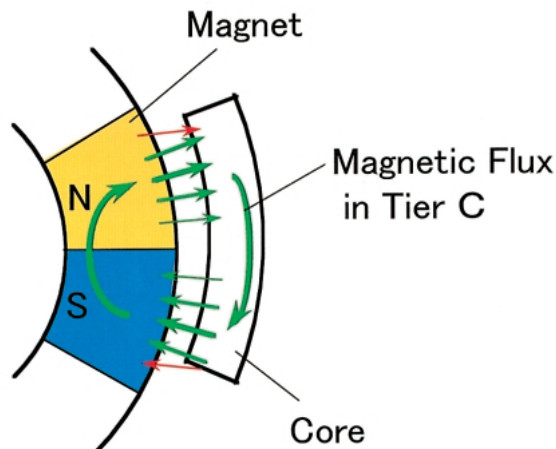


Fig. 17 Detail of the 3rd magnetic circuit at stable point

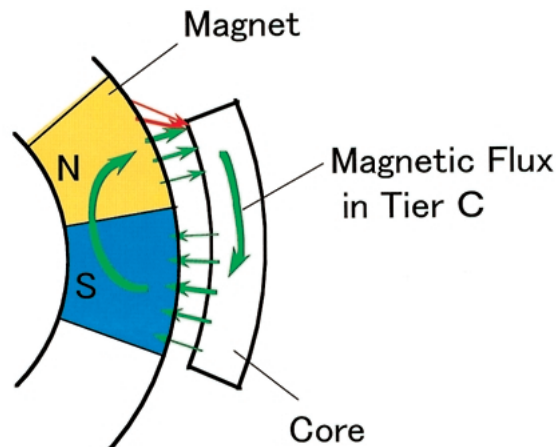


Fig. 18 The 3rd magnetic circuit at unstable point

このことより、ディテントトルクを増加させるためには、マグネットの磁極中心の磁束ベクトルを接線方向に傾斜させることが必要であると考え、Fig. 19に示す補助極を考案した。

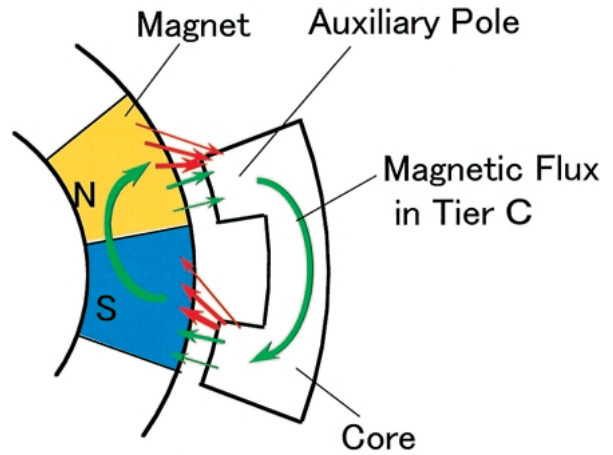


Fig. 19 The 3rd magnetic circuit at unstable point with auxiliary poles

具体的には、A相下側コアとB相上側コアの間に、磁性材料からなるプレートを追加し、このプレート上で、C相の磁気回路が通過する部分に補助極を設けることによりFig. 20)達成されたと考え、Fig. 21に示すモデルにより、磁場解析を行い、保持トルクを求めた。

その結果、ディテントトルクが大幅に向上することが確認されたので、試作品でディテントトルクを測定したところ、プルイントルクを低下させることなく、磁場解析通り、ディテントトルクが向上し、目標値を満足することができた。

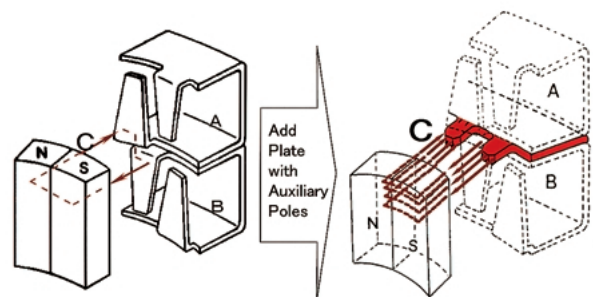


Fig. 20 Methods for detent torque increase

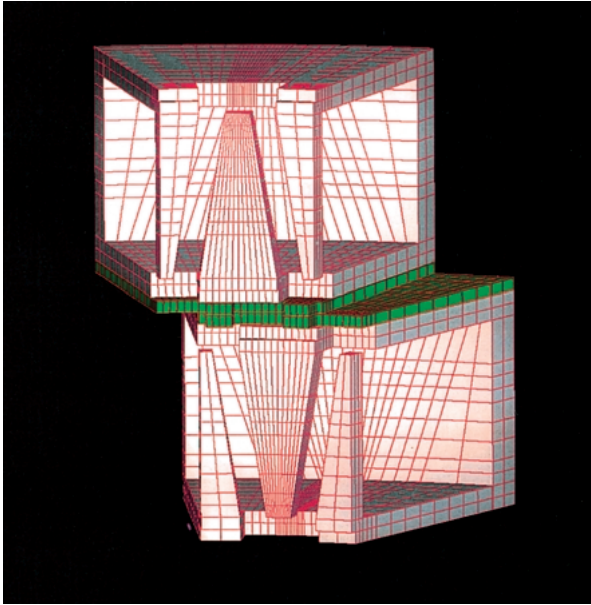


Fig. 21 Analysis model with auxiliary poles

以上のように、補助極プレートの採用によりディテントトルクの目標値を達成することができ、サスペンション制御用のアクチュエータに、フェライトマグネット採用の目処がたった。しかし、補助極プレートの採用により、コスト及びアクチュエータ体格が増加するため、実用化にあたり、更なる改良を行った。

9. 補助極プレートのコアへの一体化

補助極プレートを新設せずに補助極の機能をもたせる手段として、補助極歯をコアへ一体化することを考えた。Fig. 21のコアと補助極歯配置を2次元に展開し模式的に表すと、Fig. 22のように表される。

Fig. 22にて補助極歯C1、C3、C5はA相下側コアの極歯のない部分に、補助極歯C2、C4、C6はB相上側コアの極歯のない部分に作り込めると考え(Fig. 23)、Fig. 24のようなモデルで磁場解析を行い、ディテントトルクの比較を行った。

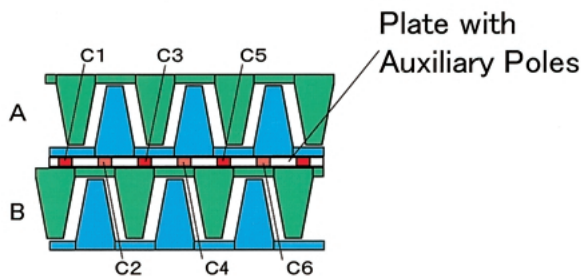


Fig. 22 Relation between cores and plate with auxiliary poles

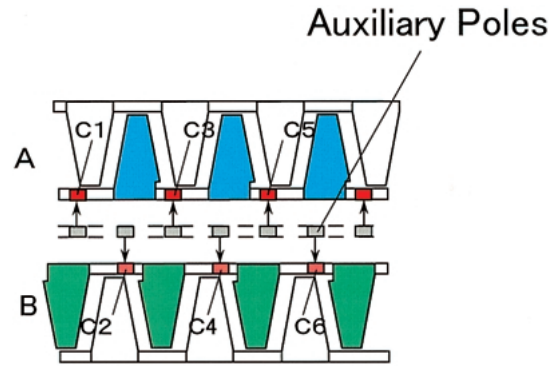


Fig. 23 Divide auxiliary poles into two cores

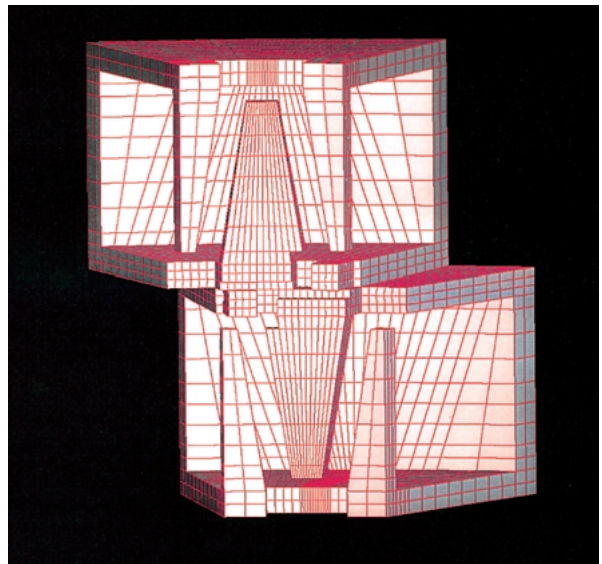


Fig. 24 Analysis model with auxiliary poles integrated core

その結果、補助極プレートを入れた場合のディテントトルクと同等のディテントトルクが得られた。

さらに、Fig. 25のような補助極歯一体化コアの試作品においても、補助極プレートを入れた場合と同等のディテントトルクを得ることができた。

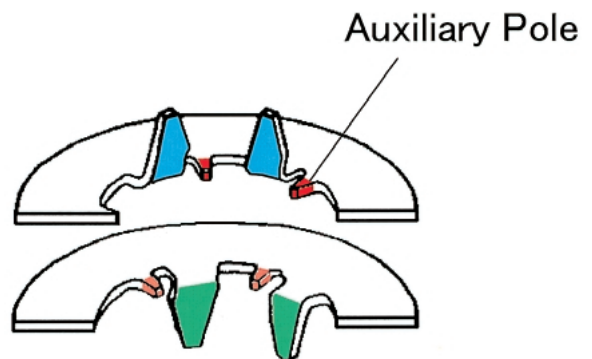


Fig. 25 Integration of auxiliary poles into core

10. 結言

- (1) ステッピングモータの3次元磁場解析を行い、磁気回路を可視化することで、保持トルクを発生させる、第3の磁気回路を発見した。
- (2) 第3の磁気回路を強化する補助極を考案し、フェライトマグネットで希土類マグネット相当のディテントトルクを確保し、マグネットの置き換えを行った。

< 著 者 >



吉田 博彦
(よしだ ひろひこ)

安全走行技術2部
走行安全関連製品の開発・設計に
従事.



丹下 健治
(たんげ けんじ)

安全走行技術2部
走行安全関連製品の開発・設計に
従事.



森川 賢二
(もりかわ けんじ)

安全走行技術2部
走行安全関連製品の開発・設計に
従事.