

“ホンダ EV PLUS”用 主動力モータの開発

Development of Propulsion Motor for 1997 Model "Honda EV PLUS"

山 本 恵 一*	坪 重 光*
Keiichi YAMAMOTO	Shigemitsu AKUTSU
瀧 澤 一 晃*	斉 藤 祐 司*
Kazuaki TAKIZAWA	Yuji SAITOH

要 旨

「ホンダ EV PLUS」の主動力モータとして、効率、出力密度に優れた「永久磁石界磁式交流同期」方式を採用したモータの開発を行い、高効率、高トルク密度、高出力密度を達成した。

これらの達成技術として

- (1)磁気回路最適化、効率のデザインインを可能とするシミュレーション技術
- (2)大トルクと高回転化を両立し、且つ高効率を可能とする制御技術
- (3)高出力・高回転を支えるロータ構造と冷却技術などを構築した。

車体システム要求への最適化と併せて、モード平均効率91%(Combined Mode)の高効率と1kW/1kgを超える出力密度(連続定格)を得、「ホンダ EV PLUS」の高効率・高性能を得る一助と成っている。

ABSTRACT

The propulsion motor for "HONDA EV PLUS" has been developed as an electric motor using the type of "DC brushless", which is known as a technology that achieves both high efficiency and high output power density.

The developed technologies include the following items.

- (1)Simulation method of magnetic circuit analysis which is capable to design-in efficiency and performance.
- (2)The control technology for a motor operation which achieves big torque and high revolution.
- (3)Construction of rotor and cooling which achieve high revolution and high output power density.

Also this propulsion motor which was designed by using these has power density more over 1kW/kg and 91% efficiency at Combined Mode achieves most suitable for "HONDA EV PLUS".

1. まえがき

自動車の環境への影響軽減が強く求められる中、米国カリフォルニア州におけるZEV規制の立法化がなされ、電気自動車(以降EV)の開発は急速に加速されてきた。

96年12月にGMがカリフォルニア州とアリゾナ州でEV1を市場に投入、ホンダにおいても97年5月よりホンダEV PLUSを市場に投入、リース販売を開始するに至りEV本格実用化への一歩が踏み出された。

本稿は、「ホンダ EV PLUS」の主動力用モータ(以降、

MCF11)の開発の経緯と開発に当たり構築したモータ特有技術について述べるものである。

2. 開発のねらい

このMCF11はEV用としては勿論のこと、自動車用の主動力原動機としての要求品質を念頭に下記の項目を主眼に開発を行った。

- ・少ないエネルギーを無駄にしない高効率の追求
- ・高出力密度、高トルク密度化による小型軽量化

*栃木研究所

・車両要求への最適出力、効率特性化

これらの項目を満足し、且つモータの技術基盤を構築するために、以下の項目を重要課題として設定した。

- (1) DCブラシレスモータの採用とともに、高出力、高トルク、高効率、小型軽量化を満足する。
- (2) エンジン同様の高い信頼性を具備する。
- (3) 磁気回路シミュレーション技術を構築、経験に頼らない仕様設定を可能とする。

3. MCF11型モータの特徴

MCF11の主要諸元と外観をFig.1に示す。MCF11はDCブラシレス(永久磁石界磁式交流同期)方式でSPM(Surface Permanent Magnet)方式のロータとスロットワインディング方式のステータを備え、密閉構造水冷モータハウジングはトランスミッションと部分的に共用化されている。

3. 1. 出力・回生・効率特性

MCF11は、0rpmから最大トルク発生可能なこと、限定された範囲で任意の出力・回生特性を設定可能なこと、正逆両転可能なこと等のモータの特徴を生かし一速固定減速機との組合せで車両の要求する「駆動力・回生力・速度・前進・後退」をモータの高トルク・高回転化・四象限運転で満足している。また効率特性も車体特性に最適な

ものとし、モード平均効率91%(FUDS)を得、且つモータの最高効率は96%(インバータ効率含む)である。

3. 1. 1. 出力・回生特性

MCF11は減速比7.45の一速固定減速機との組合せで、Fig.2の駆動力線図に示す車体の要求する駆動力を満足するため、最大トルク275Nm、最高出力49kWを発生している。トルク密度6Nm/kg・出力密度1kW/kgはモータとして最高水準にある。また、Fig.3に示す様に四象限運転と

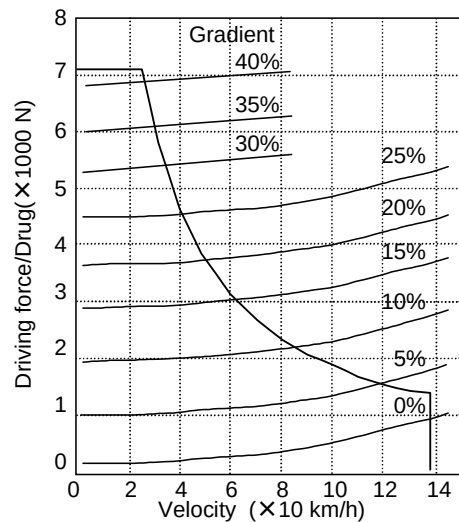


Fig.2 Driving force curve ¹⁾

Model	MCF11
Motor type	DC brushless
Cooling	Liquid
Weight	45kg(without gear box)

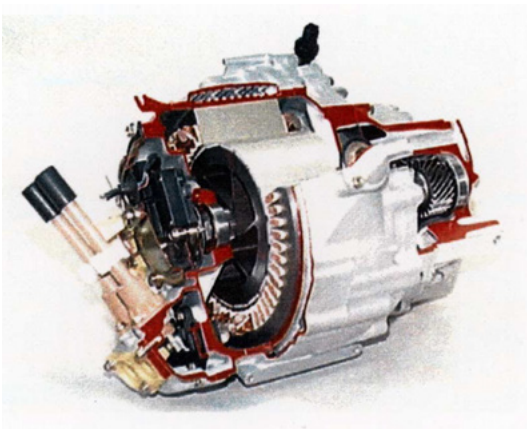


Fig.1 Section view of MCF11

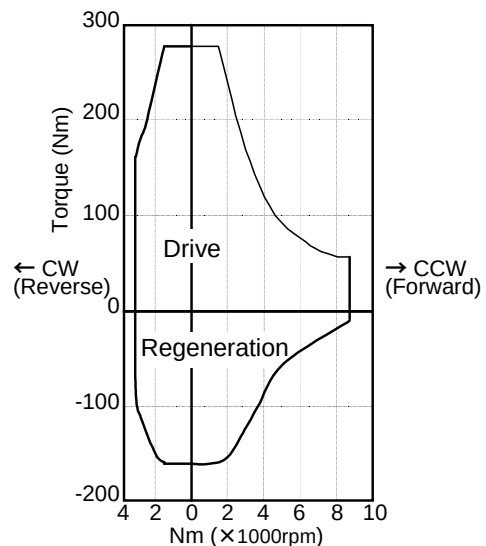


Fig.3 Motor power performance curve

し、回生による加速エネルギーの回収と後退ギヤ廃止を可能としている。

3.1.2. 効率特性

MCF11の駆動効率特性とモード走行(LA-4)、実走行(中高速登坂、急加速等を含む)の使用負荷域をFig.4のモータ効率マップ上に示す。モード走行、実走行共高効率領域を使用しているのが分かる。これは、磁気回路の最適化、車体に合わせた効率特性の最適化によるものであり、モード平均効率91%(Combined Mode)はACインダクションモータに比し、7~10%程度高い効率値を示している。

3.2. 高出力・高効率のためのシミュレーション技術

DCブラシレスモータの構成部品点数はエンジンに較べると極めて少なく、構造も簡素であり性能決定因子も少ない。

しかし、構成要素の電気的特性・磁気的特性・形状が性能・効率を左右するため、磁気回路の設計に当たっては、これら要素の特性の正確な反映が求められる。また、実運転での磁気回路内の動作の測定が困難であること、形状を決定してからの修正が困難であることもあり、正確なシミュレーション技術が不可欠である。

MCF11の磁気回路設計に当たっては、Fig.5に示すシミュレーションプロセスを構築した。磁気回路の特性評価に加えて、機械的強度評価、車体特性を想定した効率予測、必要冷却性能予測を包含したものとなっている。その内容について以下に述べる。

3.2.1. 磁気回路シミュレーション

モータの性能を決定する磁気回路設計については、「磁気回路諸元・電流・電源電圧」等の設計条件からトルク、損失、コギングトルク、トルクリップル等を算出、性能予測を行うプロセスに加えて、磁石の不可逆減磁に対する耐性、温度特性等を検証、磁気回路の基本諸元を決定するシミュレーション手法を確立した。磁場解析の一例をFig.6に示す。この例は、モータトルク・損失の算出に不可欠な磁気回路内の磁束密度分布を予測するもので、材質・形状影響の正確な予測を可能としている。

3.2.2. 構造解析

モータの構造特徴の一つに、電磁鋼板の積層構造がある。これは、磁気回路内の渦電流損失を低減するために

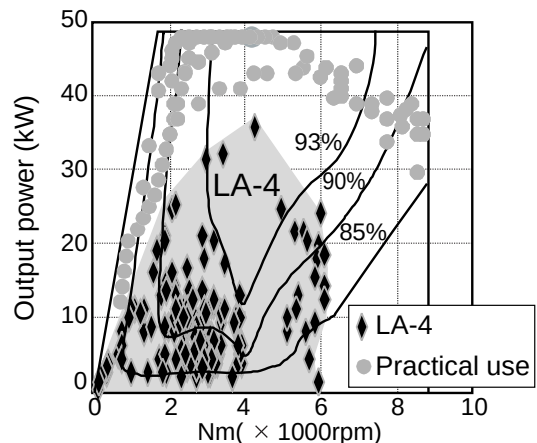


Fig.4 Motor efficiency map

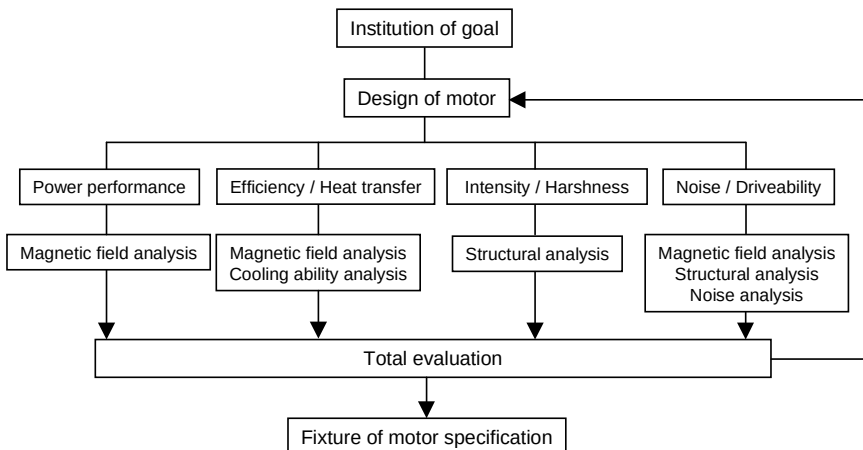


Fig.5 Simulation process of motor performance

不可欠の構造である。MCF11では、ロータ、ステータにこの構造を有しており、動力伝達部、主構造部と結合されている。特にロータは、モータ出力軸とプレス加工されたスプラインで嵌合されており、この薄板のスプラインの強度、信頼性と周辺構造への影響の検証はシミュレーションによってなされ、積層構造と一般構造部の結合を確実なものとしている。

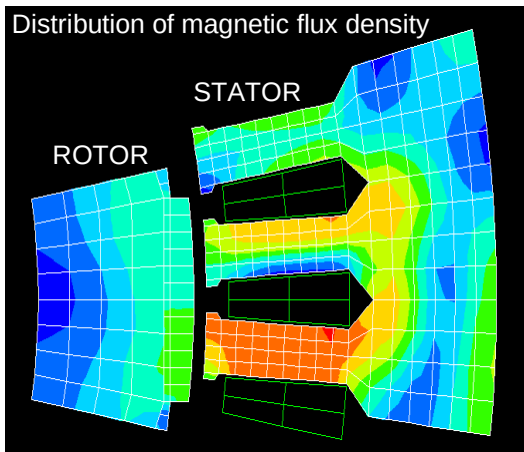


Fig.6 Simulation of magnetic circuit

3.2.3. 振動・騒音解析

モータの振動、騒音の原因には大きく、磁性材内部の磁歪によるものと、磁力による磁気回路構成部の振動によるものと二つがある。一般のモータでは、前者の影響が大きく、磁性材の最適化、磁気回路内の磁束密度低減等の対策手法が知られている。しかし、MCF11のような高トルク密度のモータでは後者の影響が大きく、その発生メカニズムはモータ固有のものとなるため、解析手法の確立が必要となった。そこで、MCF11の開発ではシミュレーションと実験のコリレーションから、この振動部位とモードをステータの径方向振動と特定し、騒音対策の方向性を明らかにした。

3.2.4. エネルギーマネジメントシミュレーション

車体諸元から使用負荷・減速エネルギーを算出、モータ効率シミュレーション結果と併せて、モード平均モータ効率・電費を算出した。また、設計時点での電費予測を可能とし、モータの車体最適化を可能とした。シミュレーションプロセスをFig.7に示す。

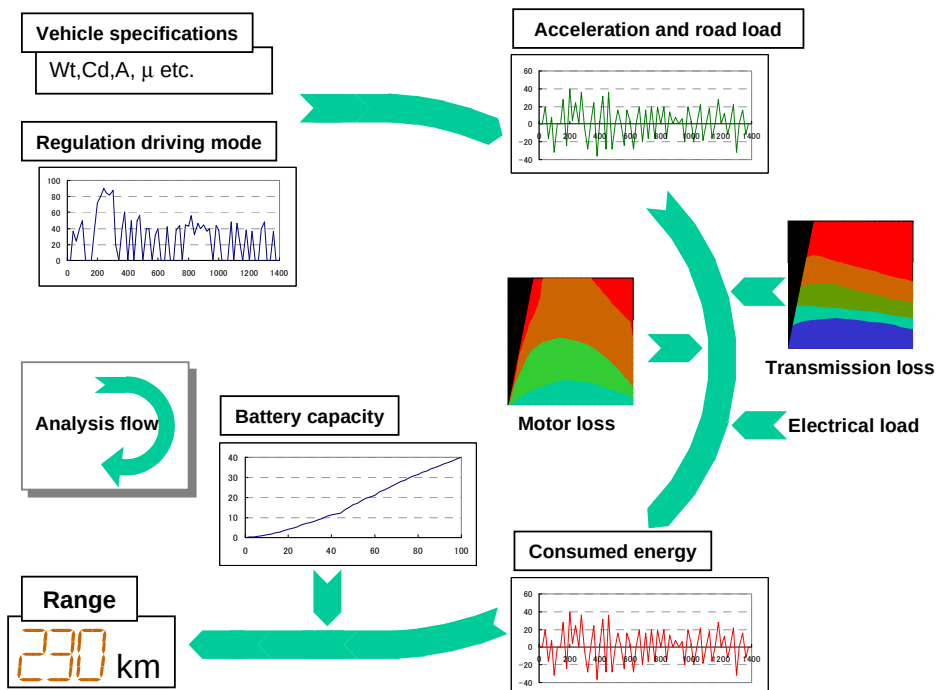


Fig.7 Simulation process of energy management

3.2.5. 冷却性能解析

モータ磁気回路諸元・モータ効率算出結果を受け、モータの必要熱交換器能力を算出、熱交換器の方式・仕様を決定した。この決定プロセスにおいても熱交換器の形状・材質要素を定量化した。冷却仕様についても設計段階での精度の高い作り込みを可能としている。また、同様にパワープラント全体にもこの手法を採用した。的確に冷却システムの要求能力を把握、各部仕様の最適化を果たし、補機損失低減化にも貢献している。

3.3. モータ制御技術

MCF11では、システムの簡素化と効率の向上、高回転運転を目的として次に述べる制御方式を採用している。

3.3.1. 入力電力フィードバック制御

モータの出力を制御するには、相電流を検出し制御することが一般的である。MCF11では、インバータ入力側の電力をコントロールすることでこれを行っている。この方式は前者に対し、制御周期を比較的遅くできシステムのローコスト化がし易い長所を持つ。しかし、前者に対しトルク制御精度が低くなる短所を持つが、極低速を除き車体挙動には影響が少なく、簡素なシステムとなっている。但し、極低速域では相電流フィードバックを部分的に使用している。システム図をFig.8に示す。

3.3.2. 矩形派スイッチング

一般に相電流は正弦波とすることが理想的とされるが、このためには相電流の瞬時値を高分解能に制御する必要があり、高分解能な磁極位置センサと高速応答なCPUが要求される。この方式は必然的にスイッチング頻度が増し、スイッチング損失の増大を招く。MCF11では効率向上とシステムの簡素化の観点から、矩形波スイッチングを採用している。

3.3.3. 弱め界磁制御

DCブラシレスモータは自らの誘起電圧により最高回転の制約を受ける。高トルクを得るにはトルク定数を高くすることが電流値を低くでき有利であるが、トルク定数は誘起電圧定数と比例関係があり、最高回転とトルク、電源電圧と相電流を両立することは難しい。

MCF11では弱め界磁制御を用い、トルク定数を高く設定

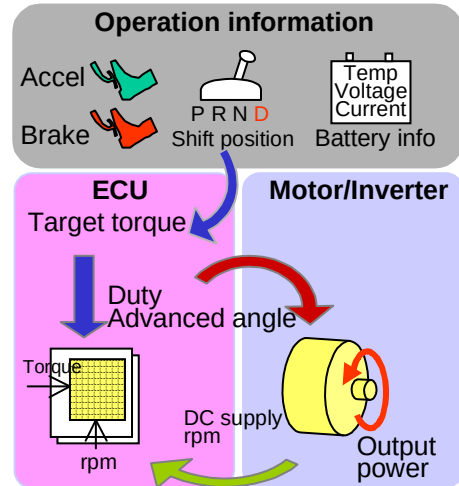


Fig.8 Motor control system

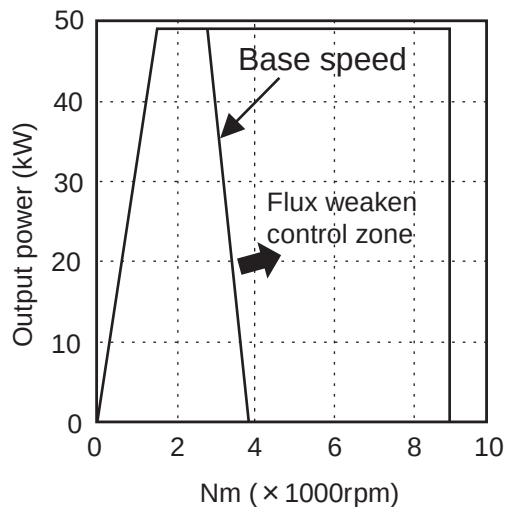


Fig.9 Effect of the flux weaken control

しながら基底回転の約三倍に及ぶ高回転運転も両立させている。基底回転領域と弱め界磁制御領域をFig.9に示す。

弱め界磁制御とは、界磁電流成分の電機子反作用による減磁作用を利用した空隙磁束の減少による誘起電圧の抑制であり、実際には進角制御と通電角制御の組合せでこれを行っている。

進角制御と通電角制御の組合せとは、誘起電圧に対する通電時期制御と、入力電力フィードバックを用いての通電電角角をある範囲で最適に制御することを併用した制御手法である。

これらによってなされる弱め界磁制御で得られる長所として

- (1)比較的高いトルク定数が設定でき相電流値が制限でき通電損失が低減できる
- (2)フィードバックループ内にて制御実施判断をしているので、電源電圧変動に対して補正可能である
- (3)スイッチングデューティは100%であるのでスイッチング損失が低減され高効率となる等があげられる。

3. 4. 高信頼性確保のための構造技術

MCF11は車載専用モータであり、エンジン同等の信頼性が求められた。特に耐熱性・耐環境性については、エンジン車同様の目標性能を設定し、以下に述べる手法でこれを達成している。

3. 4. 1. ロータ構造

SPM方式のロータを採用し、且つ高回転運転を可能とするには、磁石に発生する遠心力に耐え、磁石の浮き上がりを阻止する必要がある。MCF11では、最高回転数で磁石一個当たり5000Nを超える遠心力が発生する。このため、ロータ外周に設けた磁石保持カバーでこれに対応している。このカバーには次の条件が求められる。

- (1)磁石の遠心力を保持し浮き上がり阻止可能なプリロードを安定して与える。
- (2)磁気回路中に存在するため、非磁性である。
- (3)モータ内の高温環境に耐える。
- (4)車体寿命以上の耐久信頼性を満たす。

MCF11では、予め成形したGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)円管を初期張力を与えた状態でロータ外周に装着することでこれを満足している。これは、円管内径とロータ外径の締め代によりプリロードを磁石に与えるもので、装着のために円管液圧拡張挿入方式²⁾を用いている。

3. 4. 2. 水冷モータ・ギヤボックス一体ハウジング

MCF11は密閉構造モータハウジングとし耐水、耐塵を満足し、且つ磁石の耐熱温度向上、高性能水冷センタハウジングの採用により、耐熱性も満足している。この水冷方式は、モータを含めシステム全体に適用してある。この高性能熱交換器の採用により高い冷却能力を可能としている。この結果MCF11の連続定格出力は49kWと、非常に

高いものとなっている。また、ギヤボックスのハウジング、軸受けを一部共用化し、部品点数の削減による軽量化を図っている。

4. 性能評価

4. 1. 1. 性能評価法

モータの場合、出力性能曲線は、ある制限範囲で任意に設定可能であるため、出力、トルクといった性能指標は評価の目安にならない。それに代わり駆動効率特性、回生効率特性、停動トルク特性(コギングトルク、トルクリップル)といった性能指標が重要視される。

そこで、EVモータの性能評価フローを新たに設定した。そのフローをFig.10に示す。

4. 1. 2. 性能評価システム

モータの出力性能はエンジン同様ダイナモにて測定するが、90%を超える高い効率を有しているため、計測に当たっても高い精度が要求される。また、エンジンにはない停動トルク(0rpm時のトルク)が発生するため、特殊なダイナモ装置の導入を行った。

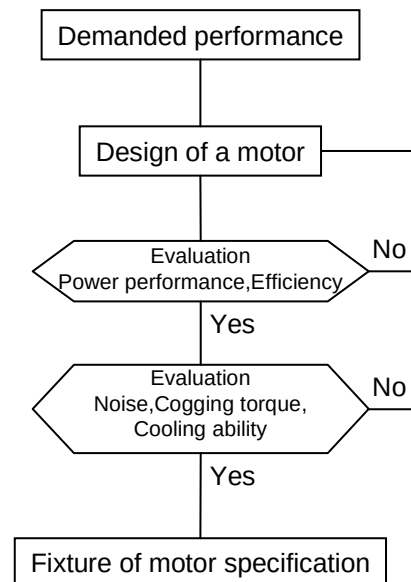


Fig.10 Evaluation process of EV motor performance

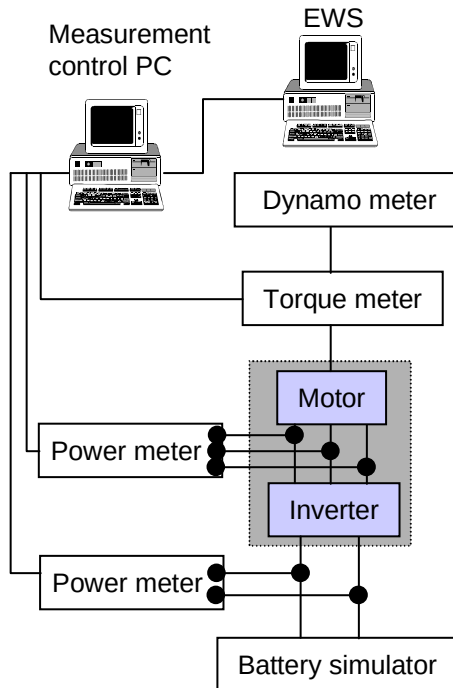


Fig.11 Measuring and analysing system of motor power performance

一つは、モータ出力性能・効率特性解析用の高精度ダイナモ装置である。本装置は、DCダイナモ、バッテリーシミュレータ、電力測定装置から成るもので、モータトルクの検出には高精度トルクメータを装備、またトルクメータとダイナモ間に減速機を設置、10000rpmを超える範囲での性能測定も可能としている。本装置の構成をFig.11に示す。

もう一つは、停動トルク試験装置である。MCF11は固定減速機を採用していることは冒頭で述べたが、当然発進クラッチは無く、モータの停動トルクを利用している。この特性を評価するために導入したのが本装置である。本装置により、モータの極低回転時のトルク挙動が評価可能となり、ドライバビリティのセッティングに効果を発揮した。本装置の構成をFig.12に示す。

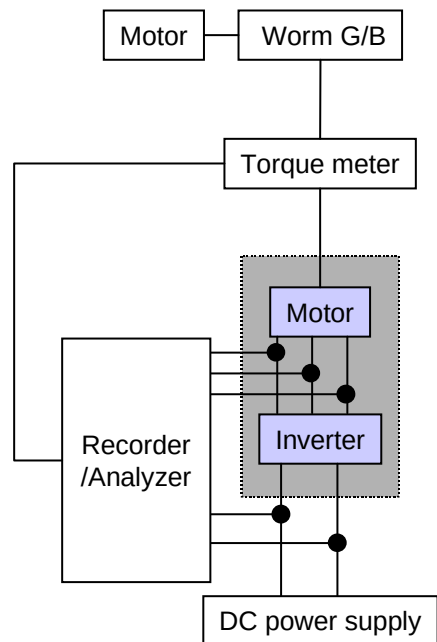


Fig.12 Measuring and analysing system of motor cogging torque

5. おわりに

自動車用主動力モータは、将来自動車の中で大きな位置付けを持つものと予想される。また、材料技術、制御技術、パワーエレクトロニクス技術の進化には目を見張るものがあり、これら技術の集大成としてのモータの進化も同様である。MCF11では、高効率、高性能という目標は達成できたが、コスト、量産性など解決すべき課題も多く、今後共研鑽が必要であると痛感している。今後はエンジン同等の生産性、コスト、信頼性を醸成しつつ、新しい価値を持ったパワープラントとして熟成に努めたい。

参考文献

- 1) 小椋 他、「電気自動車“HONDA EV PLUS”の紹介」、
HONDA R&D Technical Review, Vol.8, pp.1-10,
1996
- 2) 蜂須賀 他、「EV用モータの生産技術開発」、HONDA
ENGINEERING TECHNICAL REVIEW, Vol.5, pp.9-13,
1997

■著 者■



山 本 恵 一



坪 重 光



瀧 澤 一 晃



斉 藤 祐 司