

電動ポンプ式油圧パワーステアリングシステムの技術動向

Technical Trends of Hydraulic-Electric Power Steering Systems

城ノ口秀樹 H. Jounokuchi 浜崎善明 Y. Hamasaki 吉原愛仁 Y. Yoshihara

Hydraulic-electric power steering system is in the spotlight as an energy saving system having both features of high output power and better steering comfort. It has been developed for vehicles such as recreational vehicles (RV) and small trucks providing the maximum axial tension of 13 000N at battery voltage of 12V, which was technologically unable to be covered by ordinary electric power steering systems.

Key Words: energy saving, hydraulic power steering system, power pack, high efficiency motor

1. はじめに

昨年、当社電動ポンプ式油圧パワーステアリング(以下H-EPSと称す)システム(図1)が、日本市場で一般乗用車向けに初めて量産採用された。これを機にH-EPSシステムの開発の歴史、技術動向を中心に今後の発展性について述べる。



図1 H-EPSシステム構成

Systemic structure of H-EPS

2. 開発の歴史

H-EPSシステムは、省エネ性と搭載性の観点から、1980年代に欧州を中心にその需要が拡大し、次世代省エネステアリングシステムとして多くの車両に適用されてきた。Koyoグループの参入は、欧州H社が1989年に第一世代として産業用のパワーバックを初めて車両に適用したことに始まる。

その後、パワーバックの改良を重ね、大量生産性と低コスト化を実現させた自動車用第二世代パ

ワーバックを開発した。第二世代パワーバックが量産化された1990年代は、H-EPSシステムに対する省エネ化への要求が一層強くなり、別体のコントローラ(以下ECUと称す)を用いてモータ回転速度を制御させるシステムが初めて採用された。これにより、ハンドル非操舵時の流量を低減させた、いわゆるスタンバイ制御によって、無駄なエネルギー消費を抑えることが可能となった。

1990年代後半、国内大手自動車メーカーより世界初の量産ハイブリッド車が発売され、省エネに対する関心はますます大きなものとなった。これに合わせて第三世代パワーバックの開発がKoyoグループで進められた。ECU一体型のブラシレスモータを新たに開発し、モータの高効率化を図ると共に操舵角速度や車速に応じた高密度なモータ制御を可能とし、省エネ効果は格段に向上した。また、フィーリング面では、低速走行時は軽く、高速走行時は重くといった、操舵特性のきめ細やかなチューニングが可能となった。また、ブラシレスモータの採用によって耐久信頼性は飛躍的に向上した。

油圧ポンプ部の改良にも取り組み、性能改善や、さらなる部品点数の削減が実施され、小型軽量化が進んでいる。

このように、世の中、特に欧州のニーズに合わせて着実に進化を遂げたH-EPSシステムであったが、日本国内においてはミッドシップスポーツカーや電気自動車、欧州自動車メーカーのOEM車など一部の車両への採用に限られていた。その理由として、日本では軽自動車を中心に油圧を使わない電動パワーステアリング(以下EPSと称す)化が進められたことや、ガソリン車にエンジン駆動式ポンプ搭載レイアウト上の制約が少なかったことなどが挙げられる。

3. 需要拡大

パワーステアリングシステムのグローバル需要動向(当社予想)を図2に示す(図中HPSとは、エンジン駆動式油圧パワーステアリングの略称。また、ここで示したH-EPSシステムの需要動向は、次項にて紹介するスーパーハイパワーモータ仕様を含まず)。図2より、EPSシステムの需要が顕著に伸びているのに対して、H-EPSシステムの需要は若干増加傾向にはあるものの400万台付近を推移していることが分かる。

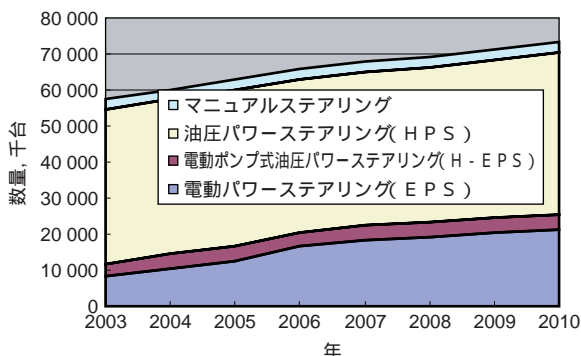


図2 パワーステアリングシステム需要動向
Trend of demand on power steering systems

次に各種パワーステアリングシステムの特徴を図3に示す(図中C-EPSはコラムタイプ、P-EPSはピニオンタイプ、RD-EPSはラック同軸タイプ、RC-EPSはラッククロスタイプのEPSの略称)。なお、本図は当社設計技術者の考えをイメージとしてプロットしたものである。

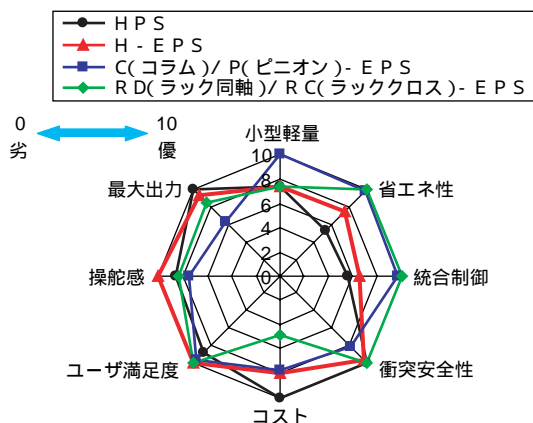


図3 パワーステアリングシステムの特徴
Features of power steering systems

図3よりH-EPSシステムは操舵感と最大出力において非常に評価が高いことがわかる。とりわけ操舵感に関しては、EPSシステムはもとよりHPSシステムと比較しても高い評価となって

いる。これは、H-EPSシステムが油圧システムでありながら、作動油量を操舵状況に応じて精密に制御できることにある。我々ドライバーは、HPSシステムが世に登場して以来数十年間、油圧ステアリングシステムの操舵感に慣れ親しんできた。ハンドルとタイヤの間を油圧というファジーな媒体を介すことで、自然で快適な操舵感を実現させることができた。さらにH-EPSシステムでは、車速と操舵角速度に応じて作動油量を制御させることで、自然な操舵感を残しつつドライバーの運転状況に応じたシステムチューニングが可能となり、これが、HPSシステムをも上回る評価に結びついたものと考えられる。

次に最大出力において、自動車メーカーがステアリングシステムを決定する際、そのシステムがどのような車格にまで適応できるかは、コストに並んで最も重要な要因の一つである。図3より、H-EPSシステムを含めたEPSシステムが8項目中ほとんどの項目でHPSより評価が高いにもかかわらず、HPSシステムの需要域に大きく食い込めない原因の一つとして最大出力に対する制約が挙げられる。H-EPSシステムを含めたEPSシステムは、12V、数十Aという限られた入力エネルギーしか供給を受けることができないため、最大出力が大きく制約される。

現在量産、および開発中の各種EPSシステムの最大出力検討結果の一例(検討時の諸条件により結果は若干異なる)を図4に示す。

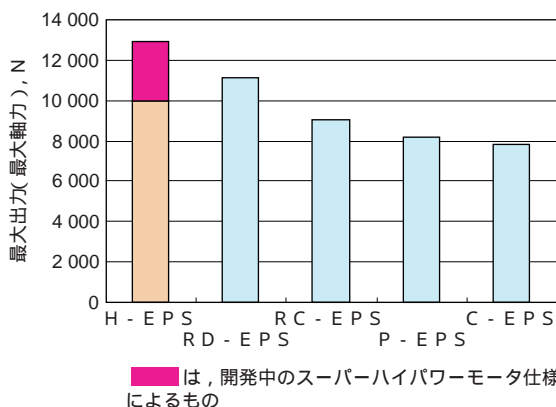


図4 パワーステアリングシステム最大出力
Maximum output of power steering systems

図4の中で、C-EPSやP-EPSの最大出力が約8,000Nに留まる理由は、構造上からくる機械強度の限界によるものである。

この機械強度による制約を構造面から改良したシステムがRD-EPSやRC-EPSであるが、これらのEPSシステムにおいても、H-EPSシステムの最大出力には及ばないことが分か

る．入力エネルギーは同じであるにもかかわらず，H - E P Sシステムの出力が大きい理由は，システムを構成する要素の変換効率の高さにあり，その効率の差は，とりわけモータに因るところが大きい．H - E P SシステムとE P Sシステムでは，基本的にモータの使われ方が異なり，H - E P Sシステムのモータは構造上高効率設計が可能となる．H - E P Sシステムを含めたE P Sシステムでは，いかに効率の良いシステムを開発するかが重要となる．

4．H - E P Sシステムシリーズ

図5に現在量産，および開発中の第三世代パワーパックについてその製品群を示す．ここではステアリングギア諸元としてストロークレシオは50mm/rev，受圧面積は当社標準品(車格により設定)にて検討した．モータ出力にて大きく4つに分類し，小型乗用車向けのノーマルパワー(NP)タイプ，小型～中型乗用車向けのハイパワー(HP)，ブーストハイパワー(BHP)タイプ．現在さらなる需要の拡大をめざし，モータ効率を極限まで高めた大型乗用車向けのスーパーハイパワーモータ(SHP)を2006年量産に向けて開発中である．

| 最大出力(最大軸力), kN | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|-----------|----|-----------|----|----|--|
| NP(ノーマルパワー) 量産中 | ■ | | | | | | 最大電流: 70A | | | | | |
| HP(ハイパワー) 量産中 | | | | ■ | | | 最大電流: 80A | | | | | |
| BHP(ブーストハイパワー) 量産中 | | | | | ■ | | | | 最大電流: 85A | | | |
| SHP(スーパーハイパワー) 開発中 | | | | | ■ | | | | 最大電流: 95A | | | |

図5 H - E P Sシステムシリーズ
H-EPS system series

5．次世代H - E P Sシステムの要素技術

本項では，H - E P Sシステムの需要掘り起こしを目的に現在取り組んでいる最新技術内容の一部を紹介する．特に，高出力H - E P Sシステム開発のねらいは，現行H - E P S(NP, HP, BHP)システムおよびE P Sシステムのアシスト性能に関し軸力 - 操舵応答性を20～30%アップできるモータを開発することである．

5.1 モータの高効率化

高出力対応のSHPモータでは出力30%アップを目標とした．一方，車両側からはバッテリー電流の制約があり，最大電流は95A(従来の85Aに対

し約10%アップ)として開発を進めている．ブラシレスモータのエネルギー・フローを図6 - (a)に，モータの損失を図6 - (b)に示す．モータの高効率化は，損失との戦いであり，SHPモータでは次の3つの技術を取り入れている．

- 1) 通電角・通電位相制御
- 2) ECU内部抵抗低減
- 3) モータ高密度巻線

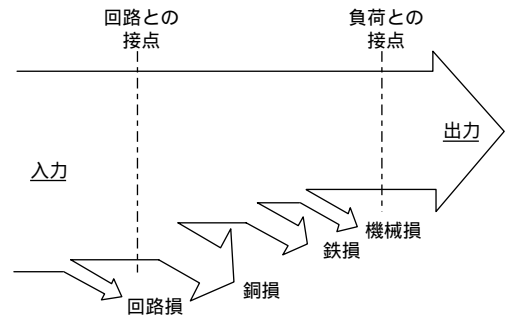


図6 - (a) ブラシレスモータエネルギーフロー
Energy flow of brushless motor

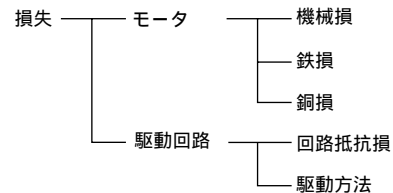


図6 - (b) モータ& ECUの損失
Energy loss of motor and ECU

5.1.1 通電角・通電位相制御

一般的にブラシレスモータは120°通電で駆動され，H - E P SシステムのNP, HPモータシリーズにも適用されている．BHPモータでは初めて180°通電が適用され出力アップが図られた(図7 - (a))．通常の120°通電に加え，より大きな出力が必要とされる場合に，進み角60°(固定)のパルスが付加し，そのパルス幅全体をPWM制御するものである．しかし，PWM制御によりスイッチング損失が増加するという課題があった．SHPモータでは，必要なモータ出力に応じて通電角を0～60°で調整，進み角パルス幅として付加する方式(通電角・通電位相制御)を用いている(図7 - (b))．例えば，最大定格出力時に通電角は150～160°，進み角(通電開始位相)は30～40°でモータ効率は最大，すなわちバッテリー電流は最低となる．通電角，通電開始位相とモータ効率を等高線として図8に示す．最大出力1028W(3N・m, 3265min⁻¹)にて進み角45°，通電角160°にてモータ効率83%が得られ，バッテリー電流は91.5Aとなる．

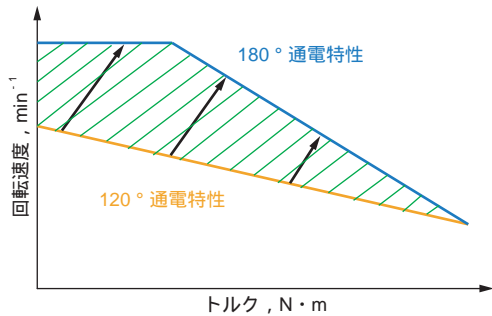


図7 - (a) 180° 通電による出力向上
Higher output realized by 180° conductivity method

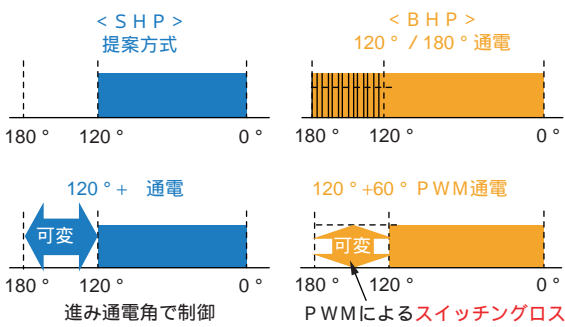


図7 - (b) BHPモータとSHPモータの通電方法
Conductivity method for BHP motor and SHP motor

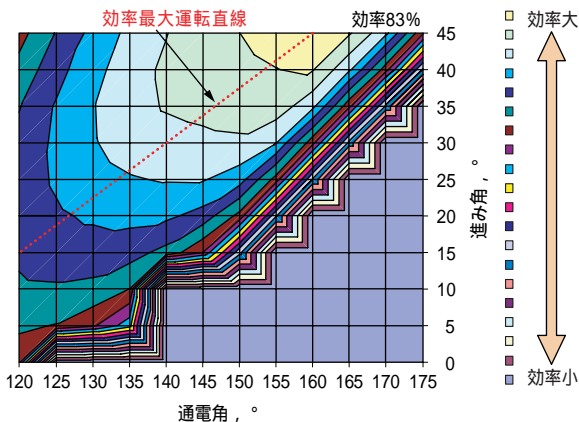


図8 SHPモータ効率等高線
SHP motor efficiency contour line

通電角・通電位相制御は、EMI(電磁波障害)に対して有利な方式と言える。従来より用いられているPWM制御におけるEMIは、モータ最大出力点(電流最大)で最も大きくなり、EMIフィルターはこの点で設計され、大型化を避けられない。通電角・通電位相制御では、モータ最大出力点でPWM制御が施されずフィルター定数を小さくできる。その結果、バッテリー供給ラインにフェライトコアのような磁気コアを挿入するだけで、従来の直列コイル挿入タイプと同等のEMI対策が可能となる(図9 - (a), (b))。

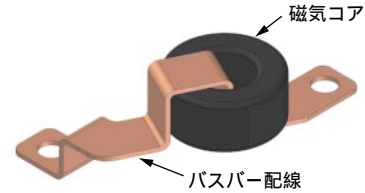


図9 - (a) 磁気コアによるEMIノイズフィルター
EMI noise filter by magnetic core

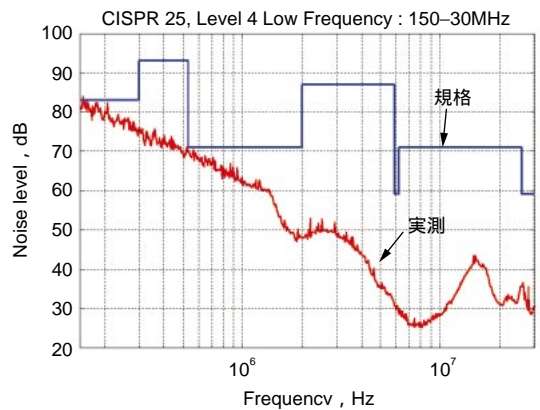


図9 - (b) EMIノイズフィルターの効果
Effect of EMI noise filter

5.1.2 ECU内部抵抗低減

SHP(低電圧大電流型ブラシレス)モータの駆動(モータコイルへの電流切替え)回路にはMOS-FETを用いたインバータが用いられる(図10 - (a))。ECU内の抵抗は銅損($i^2 \times R$)となるので駆動回路を含むモータの効率を上げるためには、その抵抗値を低減しなければならない。SHPモータのECU抵抗値は、MOS-FET自体の抵抗値低減といバスバー配線の改良により、6.4mΩまで低減させた(図10 - (b))。例えば、バッテリーから供給される電流は最大100A程度となり、損失は60W程度に達する。BHPモータ用ECUの抵抗は15mΩであり、その損失は約150Wになる。したがって、仮に従来のBHPモータ用ECUを用いた場合、損失増加は90Wとなり、バッテリー電流換算で約7A(損失差90W(13.5V, 7A))増加することになる。

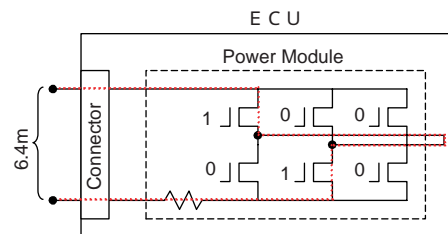


図10 - (a) 低電圧大電流型ブラシレスモータの駆動回路

Driving circuit of low-voltage & large-current type brushless motor

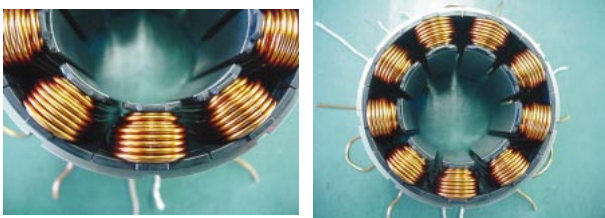
| | 電流, A | EC(抵抗値), m |
|-----|-------|------------|
| BHP | 85 | 15 |
| SHP | 95 | 6.4 |

図10 - (b) ECU内部抵抗
ECU internal resistance

5.1.3 モータ高密度巻線

12V系EPS用ブラシレスモータは低電圧、大電流モータとなり、銅損を小さくするため一般的にモータ・ステータ構造としてストレートコア(分割コア)が用いられる。しかしながら、H-EPSシステム用モータ、とりわけSHPモータは高速回転で運転されるため、銅損に加え鉄損に対する配慮も必要となる。鉄損の増加を抑えるため、低鉄損材(シリコン含有量を調整、ヒステリシス損を低減した電磁鋼板)を用い、従来のリングコア構造による高密度巻線を採用、モータコイル抵抗値を低減した(図11)。

[SHPモータ巻線]



[従来巻線]

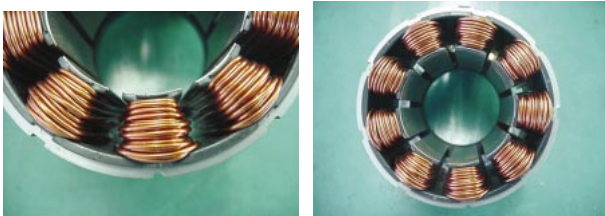


図11 SHPモータ高密度巻線
High-density windings for SHP motor

SHPモータ特性をBHPモータとの比較で図12に示す。入力(バッテリー)電流10Aアップにてモータ出力30%向上が得られている。

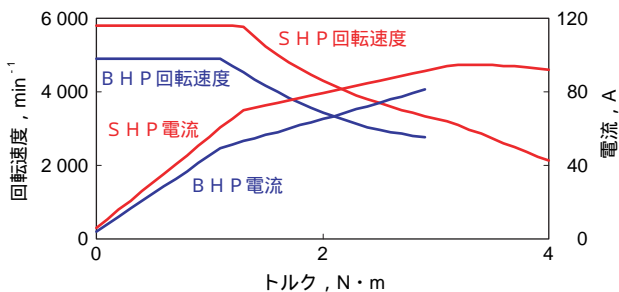


図12 モータ特性比較
Comparison of motor characteristics

5.2 油圧ポンプ

5.2.1 高性能軸受の開発

H-EPSに採用される軸受の使用環境は厳しく、油温 - 40 ~ 120 °C、回転速度1000 ~ 6000min⁻¹、最大負荷12MPa程度での使用に対する耐久性を要求される。このような過酷な条件下で耐久性を向上させるべく、最適油膜形成を考慮した軸受設計や低μ軸受材、耐コンタミネーション軸受材、環境に優しい鉛フリー軸受材などの開発を進めている。

5.2.2 低騒音化

他のEPSシステムを含め、設計上最も配慮すべき点はシステムの異音(ノイズ)対策である。H-EPSシステムの場合、ハンドル非操舵時でもポンプが低速で回転し、さらに操舵時には回転速度が増すため、常にポンプ作動音を伴う。ポンプ作動音は回転速度に依存し、回転速度が高くなればなるほど大きくなる。また、モータ制御によるポンプ回転速度の変化が音色の変化となって現れる。このような問題を解決するために、現在ポンプ基本吐出量の大容量化(同一モジュール)と高トルク型モータを組み合わせたトルク型パワーパックの開発に取り組んでいる。

基本吐出量の大容量化により、同じ作動油量を確保するための回転速度を低減させることができるだけでなく、最小回転速度と最大回転速度の変化幅を小さくすることができ、回転速度変化による音色の変化を改善することができる。効果確認のために基本吐出量1.50cm³/revポンプと2.00cm³/revポンプで測定したパワーパック作動音データを図13に示す(両ポンプ共に同一流量とし、オーバーオール値にて比較)。回転速度の大小2水準にて測定しているが、いずれにおいても2.00cm³/revポンプの方が音に対して有利であることが分かる。

5.3 まとめ

1)通電角・通電位相制御、2)ECU内部抵抗減、3)モータ高密度巻線(低鉄損材の適用)により、入力電流95A(従来から10A向上)で出力は30%向上する。この適用領域(推力-応答性)は、EPSでは対応困難であり、ここ数年H-EPS(SHPシリーズ)の優位性が続くと考えられる。また、H-EPSシステムの高出力化は、特に、大型車や高級車に求められており、低騒音化も重要なポイントとなる。これに対応する技術もポンプとの組合せで開発を完了しており、顧客ニーズの応えられるものと考えている。

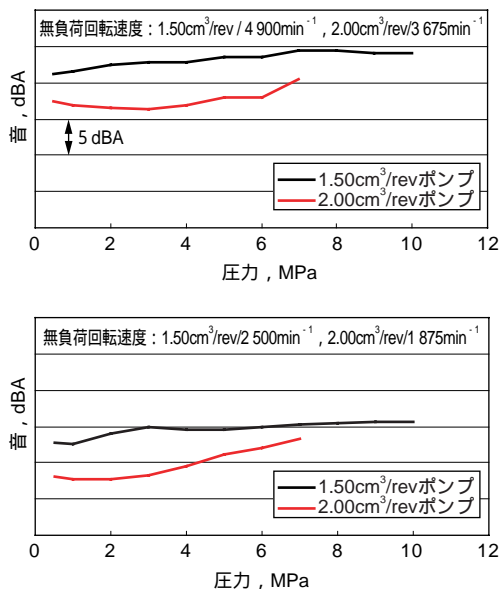


図13 音測定データ(オーバーオール値)
Noise data

6. おわりに

SHPモータを使用したH-EPSシステムの高出力化が認知されつつあり、欧州はもとより日本国内においても重量車を中心とした問合せが増えている。環境保全が大きく取りざたされる今、RV車や小型トラックを含めた重量車の省エネ化を急ピッチで進める必要があり、これら車両をも視野に入れた製品開発が必要不可欠となる。

SHPモータ仕様の実力を重視し、重量車や小型トラック市場を考慮した場合、図2に示すH-EPS需要動向に対して、2010年には最大で約30%の需要増加を予測している。

本需要予測を達成させるためには長所をさらに伸ばすだけでなく、短所を克服することも重要である。図3からもわかるように、とりわけ省エネ性と統合制御においてはH-EPSシステムが他のEPSシステムと比較して評価の劣る部分であり、開発に力を入れていきたい。

国内初のH-EPSシステム量産化を実現させた今、我々の期待を込めた需要予測を実現させるべく、積極的な開発を今後も進めていきたい。

参考文献

- 1) 小幡佳史, 寺前宜則, 山本和弘: Koyo Engineering Journal no. 160 (2001) 56.
- 2) 井尻和一郎, 筒井高志: Koyo Engineering Journal no. 162 (2002) 28.
- 3) 森山正和: Koyo Engineering Journal no. 165 (2004) 8.
- 4) 川島由浩: 自動車技術, Vo. 58, no. 1 (2004)

筆者



城ノ口秀樹*

H. JOUNOKUCHI



浜崎善明**

Y. HAMASAKI



吉原愛仁***

Y. YOSHIHARA

* 株式会社ファーベス 電子技術部

** ステアリング事業本部 試作部

*** 株式会社ファーベス 第一システム技術部