

- 卒業論文 -

油圧アクチュエータと電気モータの  
協調制御による新しいABSの提案

平成13年2月14日提出

指導教官: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

90475 岡野 隆宏

## 内容梗概

電気モータの最大の特長は、その高速かつ正確なトルク応答である。ところで、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータの用途は、低速度領域における駆動力源と制動時におけるエネルギー回生装置として用いられているのみである。このように、電気モータを利用することでハイブリッド自動車の燃費は非常に優れたものになっている。しかし、ハイブリッド自動車は電気モータの潜在能力を十分に活かしているとは言いがたい。

そこで本論文では、電気モータの”高速かつ正確なトルク応答”という特長を活かすべく、ABSへの電気モータを適用を検討する。一般にハイブリッド自動車に搭載されている電気モータは小容量である。よって、単独で制動トルクを出力することは不可能である。そのため、油圧アクチュエータと電気モータを組み合わせ、それぞれの作動領域を周波数によって分離する協調制御系を提案する。

まず、2段アクチュエータ型のハードディスクの位置決め制御手法として提案されている、PQ-methodを用いて油圧アクチュエータと電気モータによる協調制御系を設計する。次に、フィルタにより周波数分離を実現し、それを基に油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系を設計する。

最後に、提案手法の有効性を検証するために製作した新実験車両-東大三月号II-の概要と、制御実験へ向けての課題を示す。

# 目次

第 1 章	序論	2
1.1	研究の背景	2
1.2	研究の目的	3
第 2 章	車体の運動と ABS の現状について	4
2.1	車体の前後方向の運動について	4
2.1.1	車体の前後方向運動の定式化	4
2.1.2	制動時におけるタイヤと路面間の粘着特性	5
2.1.3	制動距離の測定のためのモデルの作成	5
2.2	油圧アクチュエータを用いた従来型 ABS の仕組み	6
2.3	従来型 ABS に望まれる改善点	7
第 3 章	電気モータのみの制御による従来型 ABS の制動力改善	8
3.1	油圧アクチュエータの制御則を変更せずに行った事例	8
3.2	シミュレーション結果と考察	10
第 4 章	油圧 ABS と電気モータを協調させた新しい ABS の提案	11
4.1	油圧 ABS と電気モータを協調制御する必要性	11
4.1.1	車両の前後方向運動の線形化	11
4.1.2	電気モータを用いたスリップ率制御の設計	12
4.2	PQ-method を用いて協調制御を行う ABS の提案	14
4.2.1	2 段アクチュエータ型のハードディスクの制御方式の概要	14
4.2.2	2 段アクチュエータ型のハードディスクにおける PQ-method について	14
4.2.3	ABS への PQ-method の適用	16
4.2.4	シミュレーション結果と考察	18
4.3	フィルタによる周波数分離を用いて協調制御を行った ABS の設計	19
4.3.1	フィルタによる周波数分離を用いた協調制御系の設計	19
4.3.2	シミュレーション結果と考察	21
第 5 章	新実験車両-東大三月号 II-の製作	23
5.1	実験の必要性	23
5.2	-東大三月号 II-の製作	23
5.3	提案手法の検証実験へ向けての今後の課題	25
第 6 章	結言	26
	謝辞	27
	参考文献	29
	発表文献	30

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

近年、内燃機関自動車に変わる新しい駆動源をもった自動車の開発の必要性が盛んに叫ばれている。一昔前まではモーターショーや展示会のみでしか目にすることがなく遠い未来の夢物語にさえ思っていた電気自動車 (EV) や燃料電池車と言った新しい形の自動車の普及も近くなってきている。

その背景として、近年の環境、エネルギー問題に関する企業の意識の高まりが挙げられる。企業の問題意識を高めた直接の契機は、1990年にアメリカ合州国のカルフォルニア州で制定された ZEV (Zero Emission Vehicle) 法 [8] である。この法律は内燃機関自動車の排出ガスに含まれる二酸化窒素や浮遊粉塵が人体に悪影響を及ぼすレベルにまで大気が汚染されたことに対して州当局が設定した法律である。主な内容は下記の通りである。

- 各自動車メーカーは 1998 年に同州で販売される自動車台数の 2 %、2003 年までに 10 % を環境汚染物質を全く (ほとんど) 排出しない自動車にしなければならない。
- 目標数値を達成できなかった場合は販売台数に応じて罰金を払わなければならない。

この ZEV 法が各自動車メーカーに及ぼした影響は大きく、アメリカ国内の他の州もこれに追従した。自動車メーカーは電気自動車に代表される環境に優しい車づくりに乗り出した。しかし、充電池の容量の問題や電気自動車を取りまくインフラの整備がなされておらず、またインフラの整備には莫大なコストが必要であったため、電気自動車の実用レベルでの開発の進捗状況は芳しくなかった。

ところが近年、税制上の差別化や消費者の意識の向上により、低環境負荷型の自動車が市場において強い力を持つようになった。トヨタ自動車の”プリウス” [10] は、このような状況下で発表された。”プリウス”以前の電気自動車は非常に高価であり、性能面でも内燃機関自動車の後塵を拝していた。そのため販売台数は極めて少なく、購入元も官公庁や公的機関に限られていた。それに対して”プリウス”は、量産を前提として開発された初めての低環境負荷型の自動車である。その価格には、企業イメージの向上などといったファクターが含まれていた。製品に投入された技術を考え合わせると非常に低価格に設定されたと言えよう。しかし、同じ車格の他車種と比較すると燃費などの面では圧倒的な優位性はなかった。そのような状況下であっても一般のユーザーに受け入れられたということは、低環境負荷型の自動車がある種の”ステータス”として受け入れられたことを示したものといえる。

”プリウス”の成功後、他の自動車メーカーもビジネスとして低環境負荷型の自動車を捉える流れに追随した。低環境負荷型の自動車は、市場において十分な競争力を持つに至ったのである。先に述べた”プリウス”は先日モデルチェンジされ、本田技研工業の”インサイト”、日産自動車の”ティーノ EV”、”ハイパーミニ”など他のメーカーから相次いで低環境負荷型の自動車が発売された。

低環境負荷型自動車という枠組の中で、ともすればハイブリッド自動車は純電池自動車、燃料電池自動車が実用化されるまでのつなぎ的な自動車であると、思われがちである。

しかし、ハイブリッド自動車は、“well-to-wheel” という燃費の石油換算値において、純電池自動車よりも優れている [9]。その比較表を図 1.1 に示す。

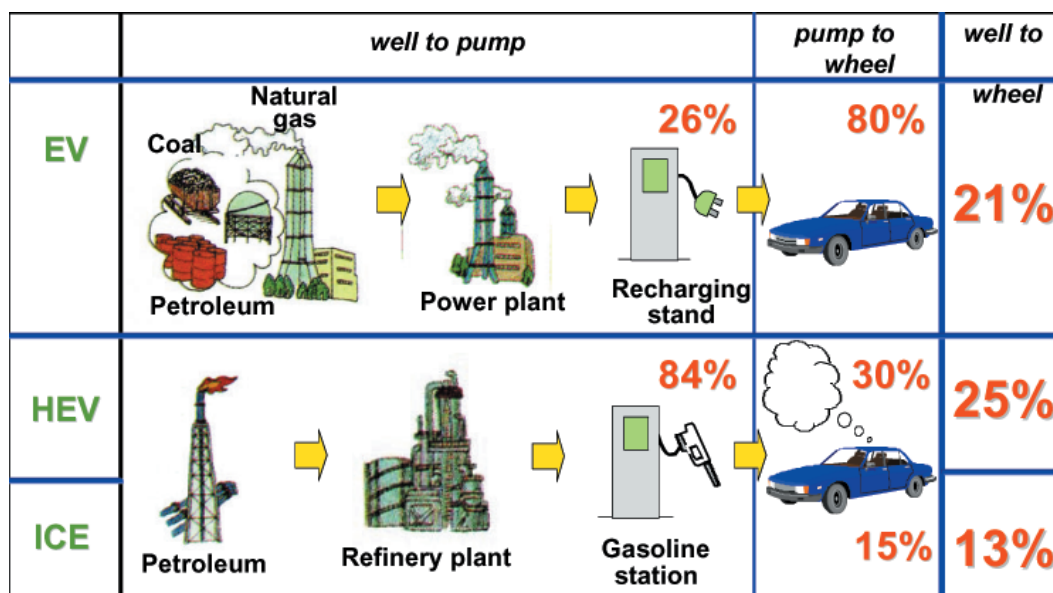


図 1.1: EV-HEV Energy Comparison [9]

## 1.2 研究の目的

最近の自動車は TCS(Traction Control System),ABS(Anti-lock Braking System) などに代表される車両運動制御装置が高級車のみならず、いわゆる大衆車にも搭載されている。TCS は、駆動時の車輪の空転を防止するなどのシステムであり、エンジンのスロットル開度や点火時期、燃料噴射量により駆動力の制御を行なっている。ABS は、制動時の車輪のロックを回避する装置であり、油圧システムをソレノイドバルブによって切り替えることでブレーキトルクを制御している [11]。内燃機関自動車に搭載されたこれらの装置は制駆動時の空転防止のみならず、車両姿勢制御装置としても有効であるためハイブリッド自動車などにも搭載されている。

ところで、ハイブリッド自動車には電気モータが搭載されている。電気モータは低速領域での駆動力用に用いられ、制動時はエネルギー回生装置として運動エネルギーを電力として貯蓄することに使われている。この結果、燃費は飛躍的に向上する。しかし、電気モータの潜在能力を十分に引き出しているとは言い難い。電気モータの特長は、“トルク応答が高速かつ正確である”ということである。ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータを TCS、ABS などに適用することで、更なる性能向上が期待される。

しかし ABS の機能を実現するにあたり、ハイブリッド車に搭載されている電気モータは容量が小さいことから、電気モータ単独では十分な制動トルクを出力することができない。そのため、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータは、低速度走行領域と制動時のエネルギー回生のみ用いられており、モータトルクを空転防止を目的として利用することはなされていない。電気モータ単独での ABS 機能を実現することは、容量不足のため不可能である。しかし、従来型の ABS に用いられている油圧アクチュエータと協調させることで、電気モータの容量不足を補うことは、可能である。そこで本研究では、油圧アクチュエータ、電気モータ固有の応答特性を十分に活かすべく、油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系を提案する。

# 第2章 車体の運動とABSの現状について

## 2.1 車体の前後方向の運動について

本研究では、ハイブリッド自動車の走行中に急激な制動を行なった場合の制動力の変化をシミュレーションを用いて検討を行なう。そこで、シミュレーションを行なうにあたり、車体の運動についての説明をする。

### 2.1.1 車体の前後方向運動の定式化

車体にはたらく力は、転がり抵抗と空気抵抗が十分に小さいと仮定することにより、車体の前後方向運動を図 2.1 の様にモデル化できる。

図 2.1 から導かれる車体の運動方程式は式 (2.1)-(2.3) であたえられる [12]。

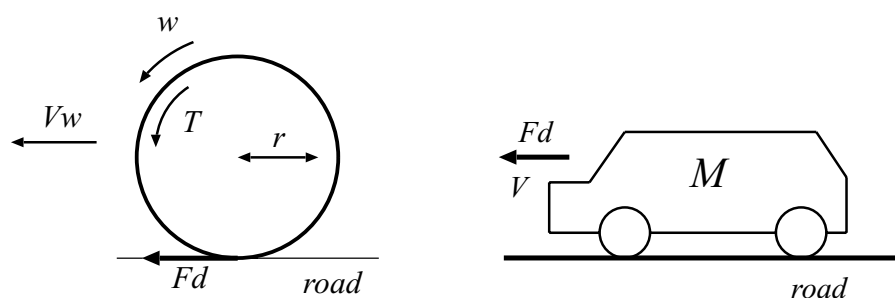


図 2.1: 車体の前後方向運動の一輪モデル

$$\omega = \frac{1}{J_s}(T - rF_d) \quad (2.1)$$

$$V = \frac{1}{M_s}F_d \quad (2.2)$$

$$V_w = r\omega \quad (2.3)$$

式中の各変数は車輪回転角速度  $\omega$ 、車輪半径  $r$ 、車輪イナーシャ  $J$ 、車体速度  $V$ 、車輪速度  $V_w$ 、駆動力  $F_d$ 、トルク  $T$ 、ラプラス演算子  $s$ 、車体質量  $M$  である。

## 2.1.2 制動時におけるタイヤと路面間の粘着特性

制動時のタイヤと路面間の粘着特性はスリップ率  $\lambda$  をもちいて表現する。スリップ率  $\lambda$  は車体速度  $V$  と車輪速度  $V_w$  を用いて式 (2.4) で定義される。

$$\lambda = \frac{V_w - V}{\max(V, V_w)} \quad (2.4)$$

このスリップ率  $\lambda$  を用いることで、タイヤと路面間の摩擦係数  $\mu$  が表現できる。スリップ率  $\lambda$  と摩擦係数  $\mu$  の関係は Magic Formula をはじめとしていくつかのモデルがある。本研究では式 (2.5)、(2.6) を採用する。式中の  $k$  は路面状態によって決まる定数である。たとえば乾燥したアスファルトでは  $k = 1$  となり、雪道では  $k = 0.2$  となる。

$$\mu = 1.1k(\exp(35\lambda) - \exp(0.35\lambda)) \quad (2.5)$$

$$\mu = -1.05k(\exp(-45\lambda) - \exp(-0.45\lambda)) \quad (2.6)$$

$\mu$  と  $\lambda$  は図 2.2 のように  $\mu - \lambda$  曲線であらわされる。スリップ率  $\lambda$  と  $\mu - \lambda$  曲線から得ら

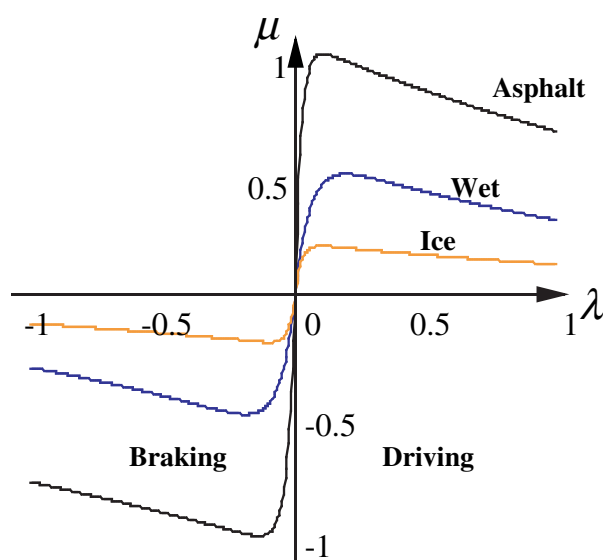


図 2.2:  $\mu - \lambda$  曲線

れた摩擦係数  $\mu$  を式 (2.7) に代入することで駆動力  $F_d$  が得られる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad (2.7)$$

ここで  $N$  は、タイヤにかかる垂直抗力である。

## 2.1.3 制動距離の測定のためのモデルの作成

式 (2.1)-(2.7) を考慮した、車体の一輪モデルのブロック線図を図 2.3 に示す。

ハイブリッド自動車のスリップ率  $\lambda$  を制御する際の、制動シミュレーションモデルを図 2.3 に示す。油圧アクチュエータ、電気モータによる協調制御系を設計する際の概念図を、図 2.4 に示す。油圧アクチュエータのトルク指令値  $F_{abs}^*$  と、電気モータのトルク指令

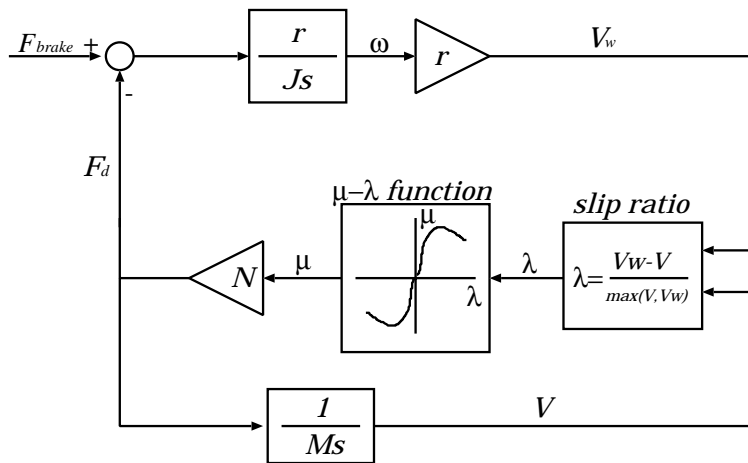


図 2.3: 車体の一輪モデル

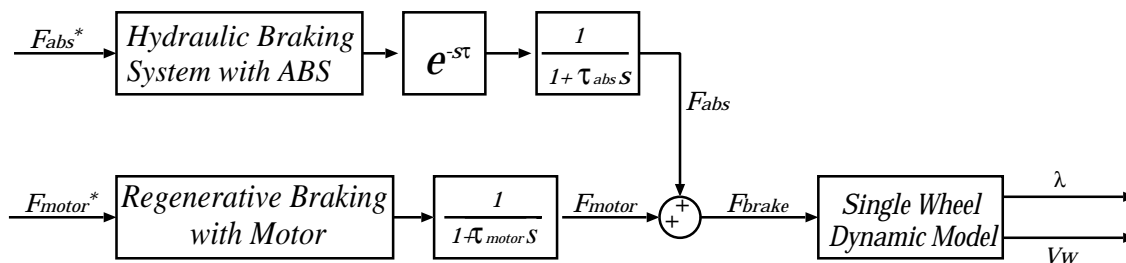


図 2.4: 油圧アクチュエータと電気モータの協調の概念図

値  $F_{motor}^*$  がそれぞれのアクチュエータに依存した応答特性を持って伝達される。電気モータの制御一次遅れ  $\tau_{motor}$  は、油圧アクチュエータの制御一次遅れ  $\tau_{abs}$  と比較すると  $1/50$  程である。また電気モータの制御むだ時間は、油圧アクチュエータの制御むだ時間  $\tau$  と比較すると非常に小さいので無視できる。また、車輪の一輪モデルに入力されるブレーキトルク  $F_{brake}$  は、 $F_{abs}$  と  $F_{motor}$  の和である。

## 2.2 油圧アクチュエータを用いた従来型 ABS の仕組み

油圧アクチュエータを用いた従来型 ABS は、空転発生時に油圧系統の切り替えを自動的に行なうことで、素早くブレーキトルクを調節している。

油圧系統の切り替えに際して、通常はソレノイドバルブが用いられる [11]。ABS は、車輪の空転検出時にソレノイドバルブを駆動することにより、油圧系統が「つなぎ変わり」、油圧の調節が可能となる。油圧系統にはおおまかに分類すると「増圧」、「圧力保持」、「減圧」の三種の系統構成がある。油圧系統のつなぎ替えは、スリップ率  $\lambda$  を測定することで空転状態であると判断された時に行われる。ソレノイドバルブを用いた油圧系統のつなぎかえの問題点は、油圧を減圧する際に、減圧速度が制御できないということである。つまり、片方向かつ非連続な制御のみに限定されているのである。先日発表された新型「プリウス」は、ソレノイドバルブと油圧アクチュエータの組み合わせを用いず、リニア油圧制御バルブ



を用いている。これにより、加減圧両方向の制御が可能である。

次に複数の油圧系統の組合せについて述べる。初期の ABS に搭載された空転検出センサーは、数が少なく、ABS は 4 輪または 2 輪ごとに同じ動作をしていた。しかし最新の ABS は、4 輪全てに空転検出センサーが搭載され、油圧アクチュエータの動作も 4 輪に個別の動作をさせることが可能であり、より効果的に制動力を発揮することができる。また DYC(Direct Yaw Control) など二次元運動の制御も同時に行なっている。

## 2.3 従来型 ABS に望まれる改善点

前節で従来型 ABS の仕組みについて述べた。最新型 ABS では、4 輪独立で空転防止制御をかけており、車種ごとの特性に合わせてサスペンションのチューニングなどを行なっている。その結果、空転検出後に ABS が作動した後は、最大摩擦力の約 95 % を使って制動することができる。このことを考慮すると、従来型 ABS の完成度は高いと述べても過言ではない。しかしいくつかの問題もある。

1. ABS 作動時の音、振動の問題。
2. 油圧アクチュエータを用いた ABS の装置は大型であるため、車体内でのレイアウトが困難である。
3. 滑りはじめの空転防止制御がなされていない。

ABS が作動する状況は緊急事態であるため、ABS 作動時の騒音、振動抑制問題の重要性は比較的低いと考えられる。

油圧アクチュエータを用いた従来型 ABS が占めるスペースを削減することは、各メーカーの関心も高い。仮に油圧アクチュエータの代替として、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータを利用するシステムが確立されたとすれば、かなりのスペースが不要になる。その結果、自動車の設計の自由度を向上させることができる。

最後の問題は、滑りはじめの空転防止制御がなされていないことである。車輪が空転を開始した後、油圧アクチュエータの応答特性が十分に速いものとは言えないため、油圧アクチュエータが作動するまでの間に、車体は滑走し続ける。この傾向は、特に低  $\mu$  路において顕著である。低  $\mu$  路では、車輪がロックして空転状態に至った時の油圧アクチュエータ内の圧力が、路面の  $\mu_{peak}$  が大きい時よりも低い。よって車輪の空転検出後に、油圧アクチュエータの油圧を減圧しても、減圧速度が遅いために車輪速の復帰が遅くなる。その結果、車体は滑走を続ける。電気モータを ABS に適用することで、その高速な応答特性により車体の滑走持続時間を短縮することが期待される。また油圧アクチュエータは、そのアクチュエータ内を減圧することにより、車輪速の復帰を実現していた。しかし、電気モータを用いることで、空転検出時に前方向にトルクをかけることも可能となり、より俊敏に空転状態から復帰させることが可能である。この電気モータを適用した際の利点を最大限に生かすために、油圧アクチュエータと電気モータの協調制御を検討する必要がある。

# 第3章 電気モータのみの制御による従来型ABSの制動力改善

## 3.1 油圧アクチュエータの制御則を変更せずに行った事例

従来型ABSに電気モータを協調させる際に、従来の油圧アクチュエータを用いたABSの制御則を変更することなく、電気回生ブレーキの制御則を付加することで制動力の向上を図ることが考えられる。この方針に基づいて、東京大学の坂井らが発表[2]している。その提案手法のブロック線図を図3.1に示す。坂井らは、車輪の空転状態と粘着状態を車

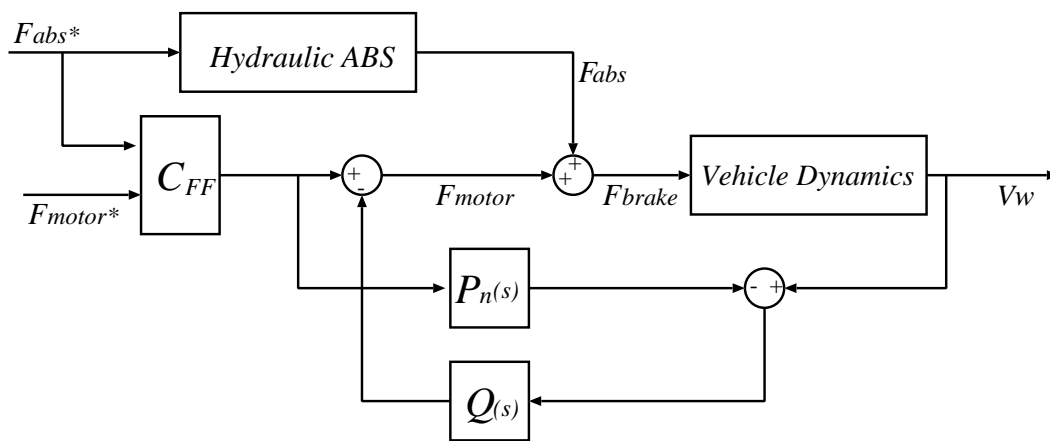


図 3.1: 坂井らの提案手法のブロック線図

輪の慣性の変動として扱い、ブレーキトルク  $F_{brake}$  から車輪速度  $V_w$  までの伝達関数  $P(s)$  を式 (3.1) のように表した。

$$\begin{aligned}
 P_{adh}(s) &= \frac{1}{(M + M_w)s} : \text{粘着時} \\
 P_{skid}(s) &= \frac{1}{M_w s} : \text{空転時}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

ここで  $M_w, M$  はそれぞれ車輪イナーシャ  $J_r$  の質量換算値、車体の質量である。図3.1の坂井氏の提案手法において、油圧アクチュエータによるブレーキトルク  $F_{abs}$ 、電気モータによるブレーキトルク指令値  $F_{motor}^*$  から車輪速度  $V_w$  までの伝達関数は、式 (3.2) となる。

$$\begin{aligned}
 V_w &= \frac{1}{1 + P(s)Q(s)} P(s) F_{abs} + \frac{1 + P_n(s)Q(s)}{1 + P(s)Q(s)} P(s) F_{motor}^* \\
 &= H(s) P(s) F_{abs} + G(s) P(s) F_{motor}^*
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

車輪が空転状態に移行することにより、車輪の伝達関数は式 (3.1) に示される様に、 $P_{adh}$  から  $P_{skid}$  へと移行する。この際に、車輪の伝達関数が変化することを防ぐために、車輪の

空転発生時にこの変化分を補償するような制御を行う。直感的には”車輪が重く見えるような”制御を行い、車輪速の急激な変動を防いでいる。これを実現するためには、空転発生時に式 (3.3) で示される  $H(s)$  が実現できればよい。

$$H(s) = \frac{P_{adh}}{P_{skid}} = \frac{M_w}{M + M_w} \quad (3.3)$$

すなわち  $Q(s)$  として式 (3.4) を採用することにより式 (3.3) を実現する。

$$Q(s) = P_{skid}(s) \frac{M}{M_w} = Ms \simeq Ms \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.4)$$

このような  $Q(s)$  を適用した場合、粘着状態における伝達関数は、 $P(s) = P_{adh}(s)$  より、

$$H(s) = \frac{\tau s + 1}{\tau s + 1 + \frac{M}{M + M_w}} \quad (3.5)$$

となる。

次に、電気モータのトルク指令値  $F_{motor}^*$  に対する応答を考える。ここで、通常制動時に  $G(s) = 1$  となるように設計する。これは、

$$P_n(s) = P_{adh}(s) = \frac{1}{(M + M_w)s} \quad (3.6)$$

とすることで実現できる。図 3.2 に、設計した  $Q(s)$ ,  $P_n(s)$  を適用した際の  $F_{abs}, F_{motor}^*$  から実際にタイヤに入力されるブレーキ力  $F_{brake}$  までの伝達特性を示す。これより空転時に、ゲインが低下するような特性であることが分かる。図 3.3 は、車輪速度までの伝達特性を示す。空転発生時において、車輪慣性が重く見える制御であることがわかる。

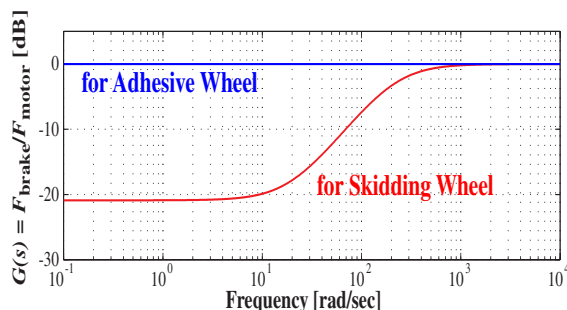
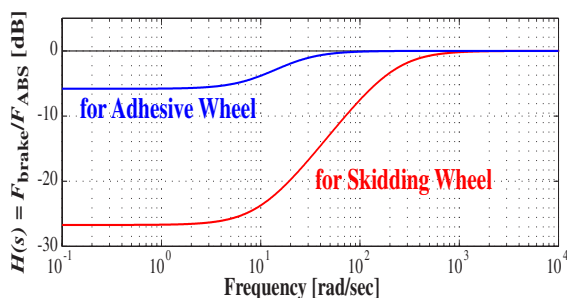


図 3.2: Bode diagram of  $H(s), G(s)$

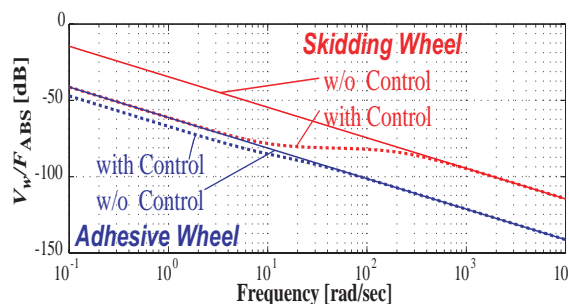


図 3.3: Bode diagram of  $H(s)P(s)$

## 3.2 シミュレーション結果と考察

前節で述べた、坂井らの提案した制御手法を適用した結果のシミュレーション結果を図3.4に示す。坂井らの提案手法を適用することで車体の制動距離は2割程度短縮された。またこの提案手法は、電気モータへのフィードバック信号は車輪速のみを用いておりスリップ率 $\lambda$ や油圧アクチュエータを用いたABSの情報を用いていない。よってスリップ率 $\lambda$ を検出にあたり、車速推定の難しさやそのむだ時間を考慮する必要がないことから、非常に実用的な制御手法であると言える。しかし、電気モータが油圧アクチュエータ側の動作状況を考慮せず独立に動作しているという状態は、実現が簡単ではあるが更なる改善の余地があると考えられる。そこで次章において、更に踏み込み油圧アクチュエータの制御則の再設計を視野に入れ、油圧アクチュエータと電気モータ固有の応答特性を十分に活かした、協調制御系を提案する。

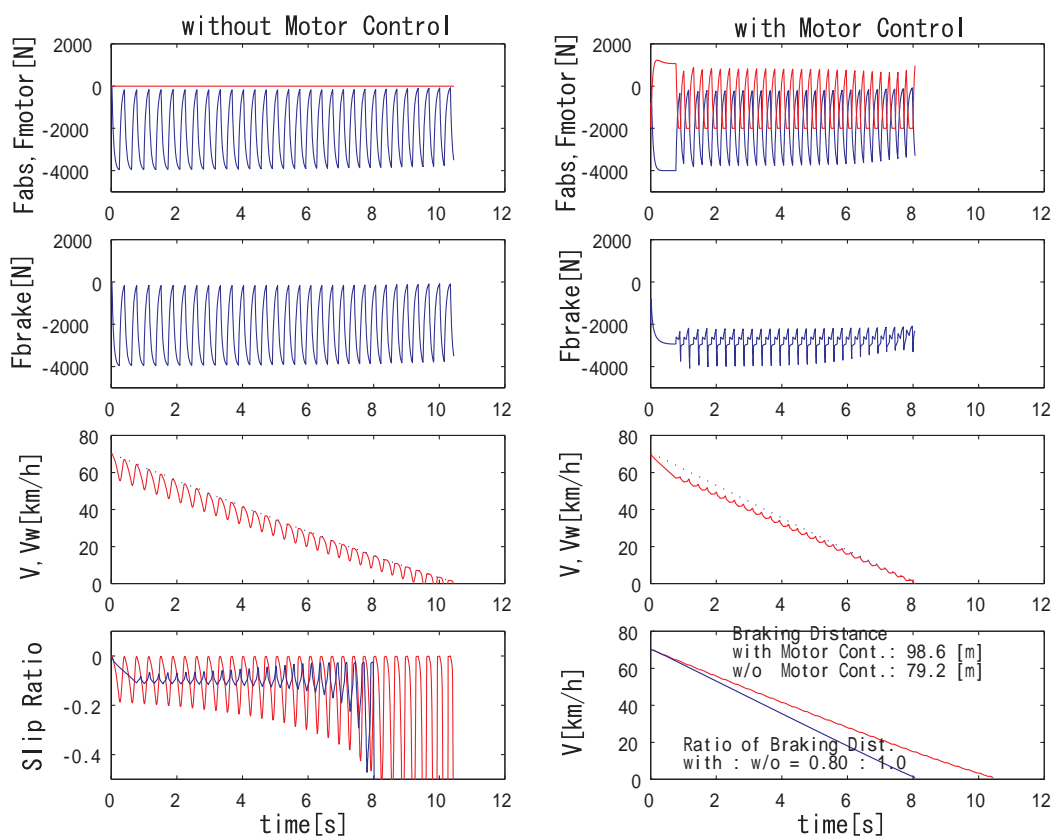


図 3.4: 坂井らの提案手法によるシミュレーション結果

# 第4章 油圧ABSと電気モータを協調させた新しいABSの提案

## 4.1 油圧ABSと電気モータを協調制御する必要性

### 4.1.1 車両の前後方向運動の線形化

第2章では、車体の前後方向運動に対する一般的なモデリングに関して述べた。このモデルはタイヤ表面における力学平衡のダイナミクスなどを無視した、ある程度簡略化されたものであった。しかしタイヤの空転現象を数学的な理解の為には、非線形な方程式である点でやや複雑なものである。

そこで、本節において制動時における空転現象に対する線形モデルを展開する。求めるのは、モータトルクからスリップ率への伝達関数である。制動時の車輪のスリップ率は、式(2.4)より、

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V} \quad (4.1)$$

である。式(4.1)の全微分をとって線形化すると、

$$\begin{aligned} d\lambda &= \frac{\partial \lambda}{\partial V_w} dV_w + \frac{\partial \lambda}{\partial V} dV \\ &= \frac{1}{V_0} dV_w - \frac{V_{w0}}{V_0^2} dV \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで  $V_0$ 、 $V_{w0}$  はそれぞれ駆動輪速度、車体速度の動作点である。 $\mu - \lambda$  曲線における動作点近傍の傾きを  $a$  とすると式(4.3)のとおり表される。

$$a = \frac{d\mu}{d\lambda} \quad (4.3)$$

次に、車体の運動方程式について考える。車体の運動方程式、式(4.4),(4.5)を線形化する。

$$(F_m - F_d) \frac{1}{M_w s} = V_w \quad (4.4)$$

$$F_d \frac{1}{M_s} = V \quad (4.5)$$

線形化した結果は式(4.6)(4.7)のとおりである。

$$(dF_m - dF_d) \frac{1}{M_w s} = dV_w \quad (4.6)$$

$$dF_d \frac{1}{M_s} = dV \quad (4.7)$$

求めるのは、 $\frac{d\lambda}{dF_m}$  であるから式 (4.2)-(4.7) を整理して  $dV, dV_w$  を消去すると、

$$\frac{d\lambda}{dF_m} = \frac{\frac{1}{V_0} \frac{1}{M_w s}}{1 + \frac{aN}{V_0} \frac{1}{M_w s} + \frac{V_{w0}}{V_0^2} \frac{aN}{Ms}} \quad (4.8)$$

となる。式 (4.1) より、

$$\frac{V_{w0}}{V_0} = 1 + \lambda_0 \quad (4.9)$$

であるから、式 (4.9) を用いて式 (4.8) から  $V$  を消去する。

$$\frac{d\lambda}{dF_m} = \frac{1}{aN_e} \frac{1}{1 + \frac{M_w V_{w0}}{a(1+\lambda_0)} \frac{1}{N_e} s} \quad (4.10)$$

ここで、

$$\frac{1}{N_e} = \frac{1}{N} \frac{1}{1 + (1 + \lambda_0) P_w} \quad (4.11)$$

$$P_w = \frac{M_w}{M} \quad (4.12)$$

とする。これにより  $F_m$  から  $\lambda$  までの伝達関数は、駆動輪速度  $V_{w0}$  に比例する一次遅れの形となる。時定数を  $\tau_r$  とすると、

$$\tau_r = \frac{M_w V_{w0}}{a(1 + \lambda_0) N_e} \quad (4.13)$$

である。

#### 4.1.2 電気モータを用いたスリップ率制御の設計

前節における議論より、車両の制動時における動特性は、

$$\frac{d\lambda}{dF_{brake}} = \frac{1}{aN_e} \frac{1}{1 + \tau_r} \quad (4.14)$$

$$\tau_r = \frac{M_w V_{w0}}{a(1 + \lambda_0) N_e} \quad (4.15)$$

である。本節では、スリップ率制御器を駆動輪速度  $V_{w0}$  に比例する可変ゲインの PI 制御器によって設計する。この制御器の伝達関数を、 $C(s)$  とすると

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (4.16)$$

となる。この時、 $\lambda^*$  から  $\lambda$  までの伝達関数は、

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{\lambda^*} &= \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \\ &= \frac{\frac{K_P}{aN_e \tau_r} s + \frac{K_I}{aN_e \tau_r}}{s^2 + \left(\frac{K_P}{aN_e \tau_r} + \frac{1}{\tau_r}\right)s + \frac{K_I}{aN_e \tau_r}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

となる。ここで、制御系の極を  $s_0$  とすると、PI 制御器  $C(s)$  のパラメータは、

$$K_I = \frac{s_0^2 M_w V_w}{1 + \lambda^*} \quad (4.18)$$

$$K_P = -aN_e - \frac{2s_0 M_w V_w}{1 + \lambda^*} \quad (4.19)$$

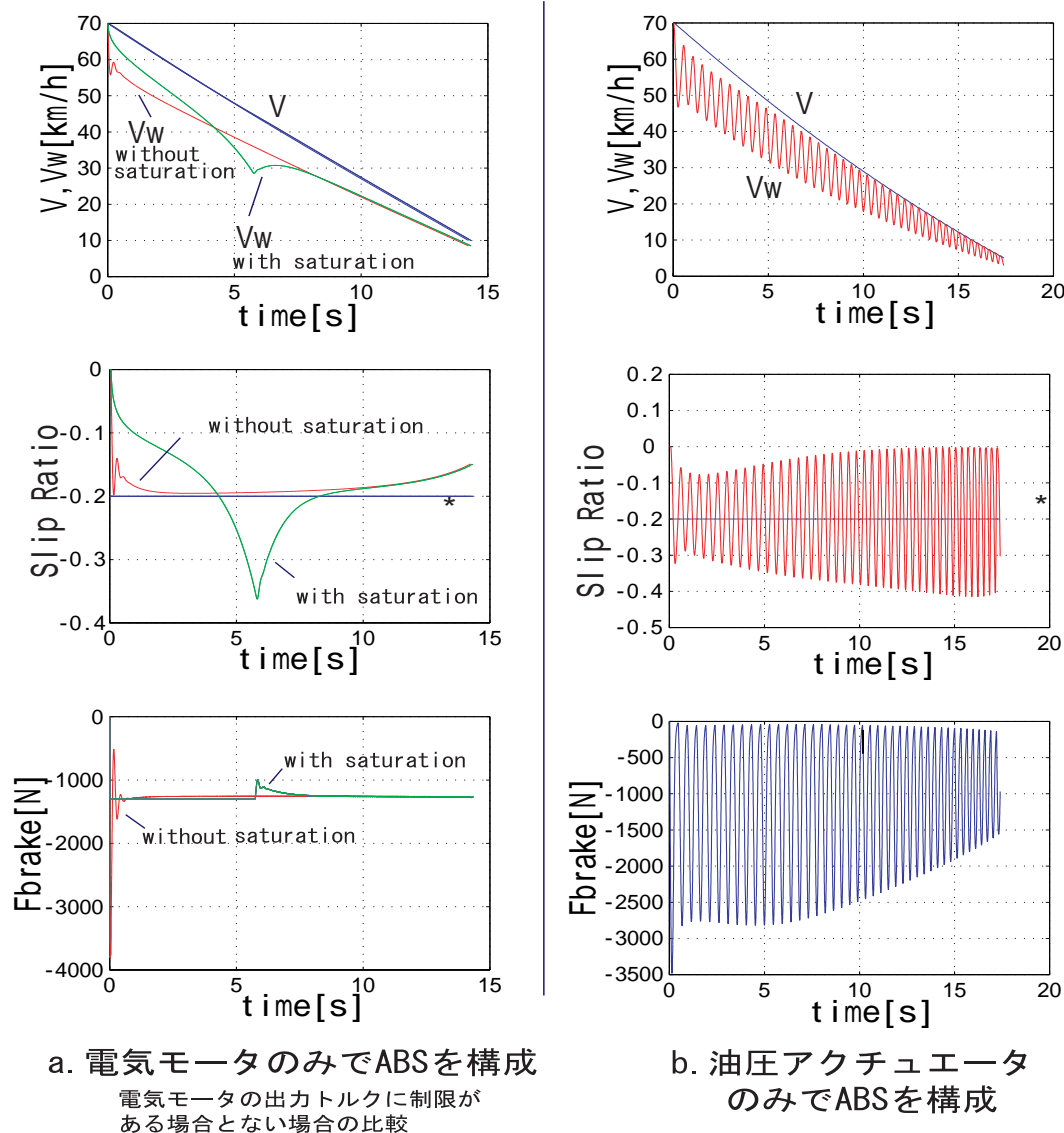


図 4.1: 単独のアクチュエータでスリップ率制御を行ったシミュレーション結果

となる。このスリップ率制御器の有効性は、文献 [3] において実証されている。しかし、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータは小容量である為、十分な制動トルクを発揮できない場合や、出力飽和によるワインドアップ現象を生じ、不安定状態に陥ることがある。その様子を図 4.1.a に示す。また油圧アクチュエータの応答特性を、時定数  $\tau_{abs} = 50[\text{ms}]$  の一次遅れと近似した上で、油圧アクチュエータのみでスリップ率制御を行った場合のシミュレーション結果を、図 4.1.b に示す。図 4.1.b より、油圧アクチュエータのみでスリップ率制御を行う ABS はスリップ率  $\lambda$  が振動的になることがわかる。現行の ABS は基本的に、タイヤの空転検出を検知し油圧アクチュエータ入力の on/off を切り替える、という bang-bang 制御を行っている。よってその応答特性は、一次遅れの他に無駄時間なども含まれていると考えられる。つまり現行の ABS の制御性は、図 4.1.b におけるシミュレーションと比較して、更に低いものであるといえる。

ところで、2段アクチュエータ型のハードディスクは、ボイスコイルモータと圧電素子による微動アクチュエータによって構成されている。この構成は、ハイブリッド自動車における油圧アクチュエータと電気モータと類似している。そこで次節以降、2段アクチュ

エータ型のハードディスクの位置決め制御を参考に、単独では優れた制動性能が得られない2種類のアクチュエータによる協調制御系を検討する。

## 4.2 PQ-method を用いて協調制御を行う ABS の提案

### 4.2.1 2段アクチュエータ型のハードディスクの制御方式の概要

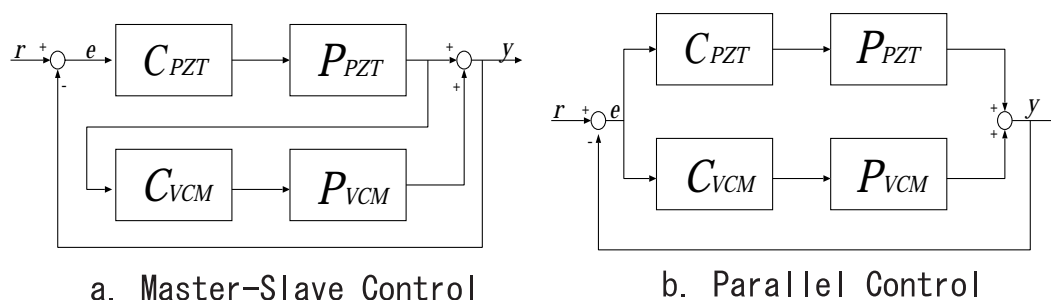


図 4.2: 2段アクチュエータシステム

ハードディスクでは、高密度に記録された情報へ高速でアクセスするために、アクチュエータによって駆動される磁気ヘッドを目的のトラックへ高速に移動させ、目的のトラック中心に高精度に追従させる高度な応答能力が要求される。こういった要求を満たすために、通常のボイスコイルモータを用いたアクチュエータの先端に、圧電素子による微動アクチュエータを取り付け、2段アクチュエータの機構制御問題として問題を捉えるアプローチがなされている。

2段アクチュエータ型のハードディスクの位置決め制御には、Master-Slave Control (図 4.2.a)、Parallel Control(図 4.2.b) など様々な制御系の形が提案されており、それぞれ位置決め精度が向上することが実験によって検証、報告されている [4][5][6][7]。Parallel Control 型の制御系の設計手法として PQ-method と呼ばれる手法の提案がなされている [7]。

### 4.2.2 2段アクチュエータ型のハードディスクにおける PQ-method について

PQ-method とは Parallel Control 型の制御系を設計する際に、2種類のアクチュエータの干渉性を考慮しつつ、それぞれのアクチュエータの制御器を決定する手法である。ここでは、 $C_1G_1$  を圧電素子を用いた微動ステージ系、 $C_2G_2$  をボイスコイルモータを用いた粗動ステージ系とする。

制御器の設計にあたり、まず図 4.3 における  $G_{SISO}$  を決定する。 $G_{SISO}$  は、式 (4.20) で表される。

$$G_{SISO} = C_1G_1 + C_2G_2 \quad (4.20)$$



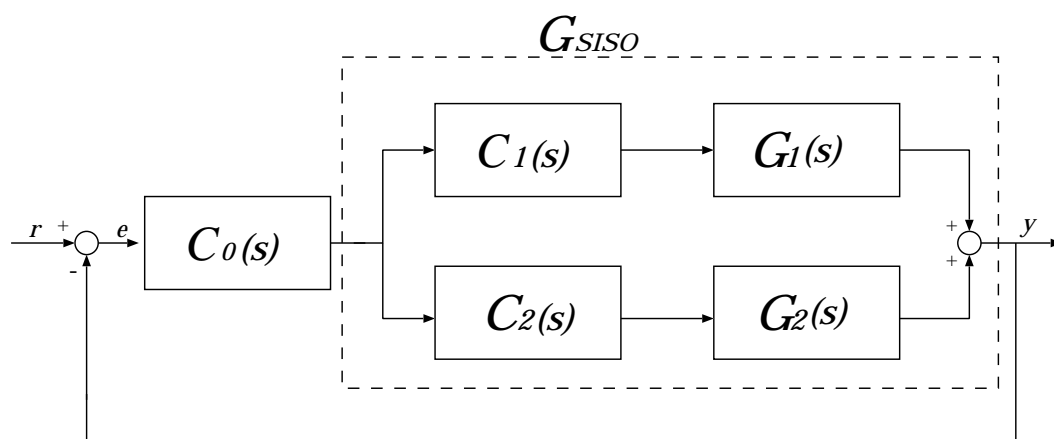


図 4.3: HD に PQ-method を適用する際のブロック図

$G_{SISO}$  を決定するにあたり P、Q を式 (4.21)-(4.23) のとおりに定義する。

$$\frac{G_2 C_2}{G_1 C_1} = PQ \quad (4.21)$$

$$P = \frac{G_2}{G_1} \quad (4.22)$$

$$Q = \frac{C_2}{C_1} \quad (4.23)$$

$G_{SISO}$  の開ループにおける安定性は、式 (4.24) の根を考慮することで補償される。

$$1 + \frac{G_2 C_2}{G_1 C_1} = 1 + PQ = 0 \quad (4.24)$$

また式 (4.24) は、図 4.4 の特性方程式と等しいため、図 4.4 の系の安定性を補償することで  $G_{SISO}$  の開ループにおける安定性を確保する。

ここで PQ のゲインは、以下の式 (4.25)-(4.27) のとおりになるべきである。

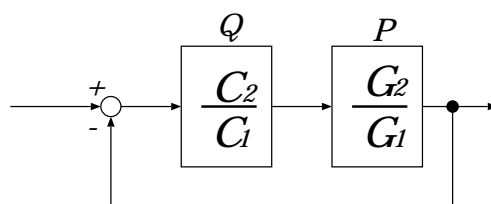


図 4.4: PQ Feedback system

$$|PQ| \ll 1 \quad (\text{高周波数帯：電気モータが主として動作}) \quad (4.25)$$

$$= 1 \quad (\text{中間周波数帯：2種類のアクチュエータが同程度動作}) \quad (4.26)$$

$$\gg 1 \quad (\text{低周波数帯：油圧アクチュエータが主として動作}) \quad (4.27)$$

式 (4.25)-(4.27) のようにすることで、2種類のアクチュエータの作動周波数帯を分離することが可能となる。また  $|PQ| = 1$  すなわち 2種類のアクチュエータのゲインが等しくなる

周波数帯においては、2種類のアクチュエータの位相が甚だしく異なるという状況は好ましくない。この状況下においては、2種類のアクチュエータは有害な干渉をする。そのためには、PQの位相余裕が  $60^\circ$  以上確保されれば問題ない。

以上のことを考慮してP、Qを決定する。Pはプラントに依存し既知である。 $Q = C_2/C_1$  であるためQを  $C_1, C_2$  に分割する。実現可能であれば  $C_1=1$  とする。以上のようにPQ、すなわち  $G_{SISO}$  を決定する。最後に  $G_{SISO}$  に対して制御器  $C_0$  を設計して、2段アクチュエータの位置決め制御系とする。

### 4.2.3 ABS への PQ-method の適用

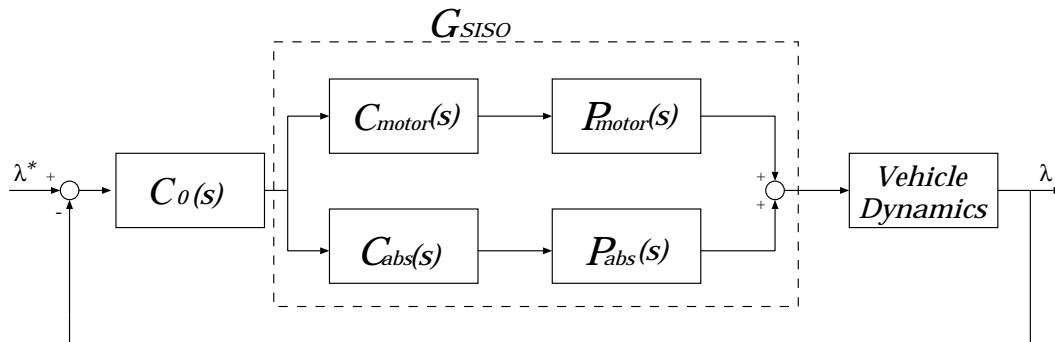


図 4.5: ABS に PQ-method を適用する際のブロック図

前節で述べた2段アクチュエータ型ハードディスクに適用したPQ-methodのABSへの適用を検討する。最初に制御系を設計しやすくするために、油圧アクチュエータの伝達関数を一次遅れと近似する。よってPは、式(4.28)となる。

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{G_{abs}}{G_{motor}} \\
 &= \frac{\left(\frac{1}{1+\tau_{abs}s}\right)}{\left(\frac{1}{1+\tau_{motor}s}\right)} \\
 &= \frac{1+\tau_{motor}s}{1+\tau_{abs}s}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

このPに対して、Qの検討を行う。Qは比例制御と位相遅れ補償によって実現する。

$$Q = K_P \frac{1+Ts}{1+\alpha Ts} \tag{4.29}$$

このQに対して  $C_{motor}, C_{abs}$  を式(4.30),(4.31)のとおり分割する。

$$C_{motor} = 1 \tag{4.30}$$

$$C_{abs} = K_P \frac{1+Ts}{1+\alpha Ts} \tag{4.31}$$

以上のとおりに設計した  $G_{SISO}$  のボーン線図は、図4.6のとおりである。

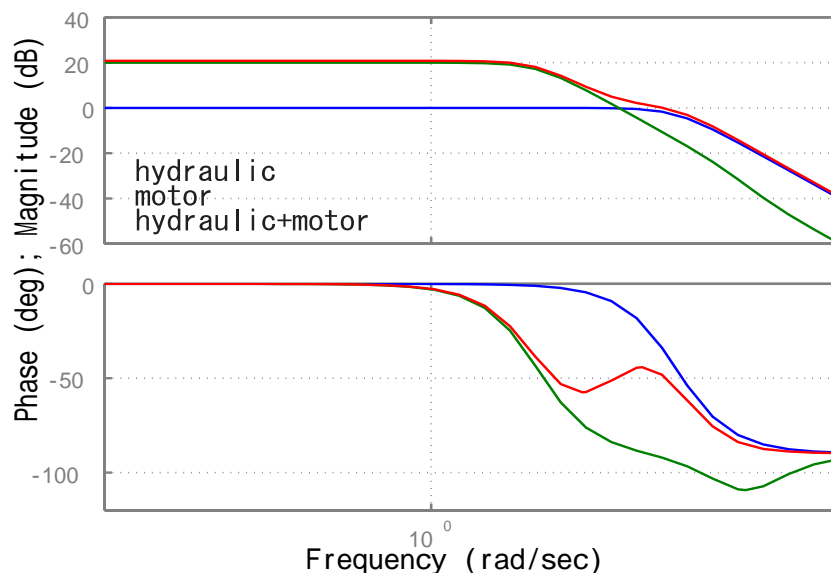


図 4.6: 油圧 ABS とモータのボーデ線図

前節における 2 段アクチュエータ型ハードディスクにおいては、 $G_{SISO}$  の出力がディスクヘッドの位置となるため制御系の設計は終了する。しかし、ABS においては図 4.5 のとおり、車体のダイナミクスを考慮した上で  $C_0$  を設計する必要がある。また車体の伝達関数  $P(s)$  は式 (4.8) の近似式を用いる。図 4.7 における  $G_{SISO}P(s)$  の低周波数域のゲインを稼ぐべく  $C_0(s)$  を設計する。 $C_0(s)$  は PI 制御器を適用する。

$$C_0(s) = \left( K_{P2} + \frac{K_I}{s} \right) \tag{4.32}$$

$C_0(s)$  を適用した結果、制御系全体のボーデ線図は図 4.7 のとおりとなる。

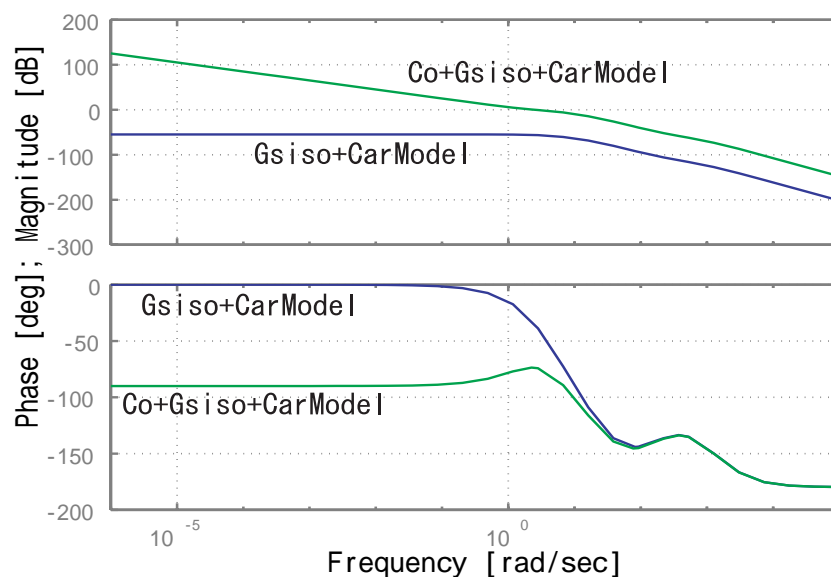


図 4.7:  $C_0(s)G_{SISO}(s)P(s)$  のボーデ線図

## 4.2.4 シミュレーション結果と考察

PQ-method を用いて設計した制御器  $C_0G_{SISO}$  の有効性の検討を、シミュレーションにより行った。ただし、シミュレーション開始後 3 秒間経過した時点において、路面状態  $\mu_{peak}$  を 0.5 → 0.2 と変化させた。その結果を図 4.8 に示す。スリップ率  $\lambda$  の目標値追従性は良好である。2 種類のアクチュエータ間における有害な干渉も見られない。また、路面状態の変化後も不安定状態に陥ることなく動作している。

ところで、油圧系統において最終的に制動トルクをホイールへ与えるのはブレーキパッドである。このパッド表面の状態などによって、油圧系統より伝達されるブレーキトルクには不確かさが生じる。その影響をここで示す。不確かさが生じるのは油圧系統からのトルクのみである。そこで、油圧アクチュエータのトルク指令値の 1.2 倍のトルクがホイールに与えられたとして、シミュレーションを行った。その結果を図 4.9 に示す。油圧アクチュエータ側の出力誤差の影響は見受けられず、不安定状態には陥らない。よって油圧系統の不確かさは、提案する ABS の制動性能にはほとんど影響しない。

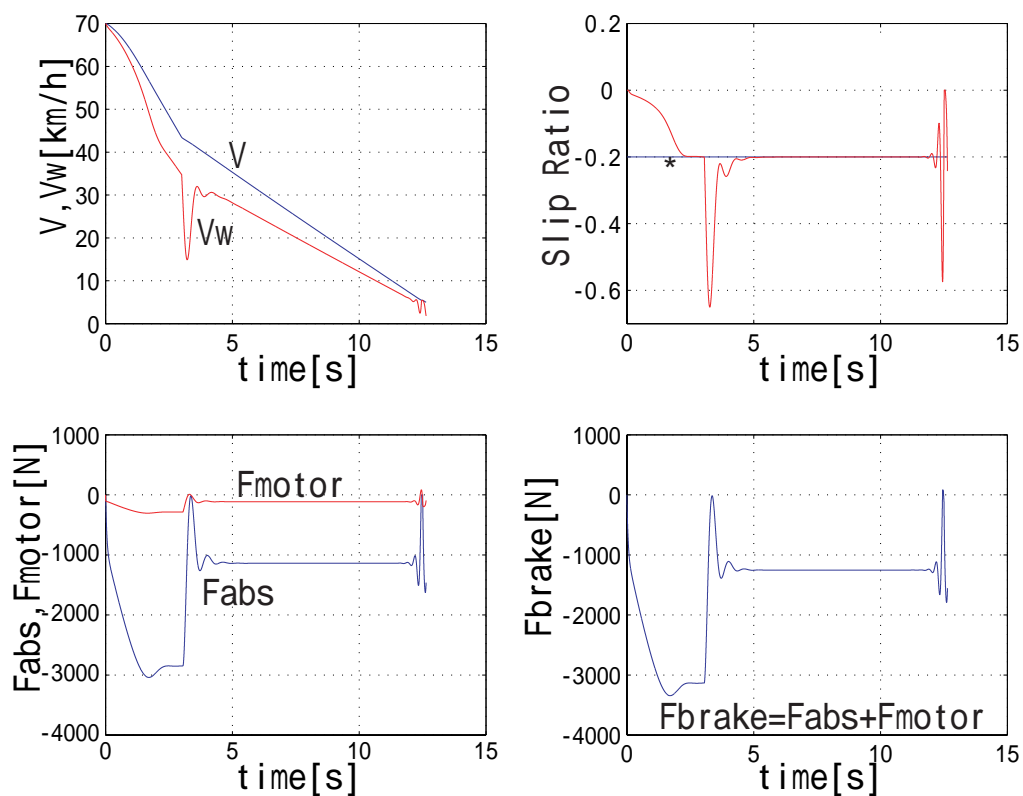


図 4.8: PQ-method を用いた協調制御系のシミュレーション結果

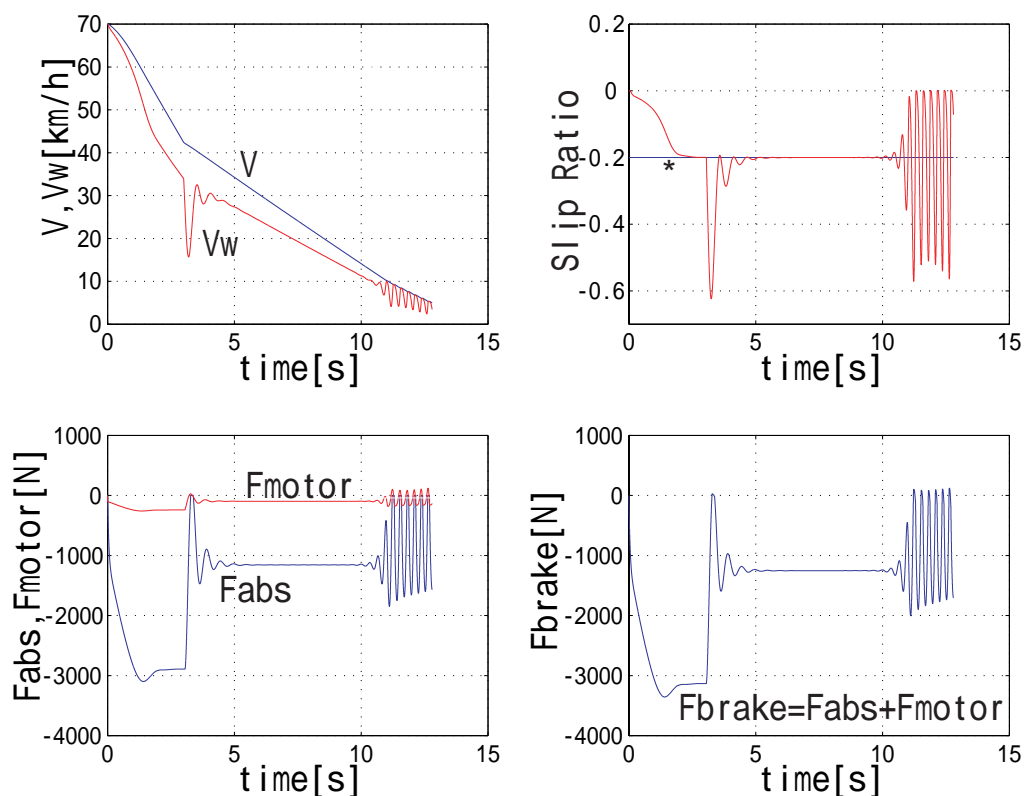


図 4.9: 油圧式系統の不確かさを考慮したシミュレーション結果

### 4.3 フィルタによる周波数分離を用いて協調制御を行った ABS の設計

前節では、PQ-method を適用することで油圧アクチュエータと電気モータのゲインが等しい中間周波数帯におけるそれぞれの位相が大きく異なることがない協調制御系を提案した。その結果、2種類のアクチュエータの干渉性を考慮した協調制御系となった。しかし、中間周波数帯における干渉性を考慮するための制御を施したために制御系の他の部分に無理が生じている可能性がある。また協調制御系の設計がやや複雑であるために、さらに上位の設計を行う際に困難が伴うと思われる。

そこで本節において、中間周波数帯における位相が大きく異なることによる相互干渉を許すかわりに、更に簡単な協調制御系の設計法を提案する。

#### 4.3.1 フィルタによる周波数分離を用いた協調制御系の設計

本提案手法では、まず2種類のアクチュエータの伝達特性を、

$$P_{motor} = P_{abs} = 1 \quad (4.33)$$

と仮定する。その上で、2種類のアクチュエータ固有の制御器の関係を、

$$C_{motor} + C_{abs} = 1 \quad (4.34)$$

とする。油圧アクチュエータの伝達特性を、1と仮定するのは強引である。しかし、 $C_{abs}$ を油圧アクチュエータが低周波数帯のみで動作するように設定することで、不安定になる

ことを防ぐ。このように設計した  $C_{motor}, C_{ABS}$  は、式 (4.35), (4.36) のとおりである。

$$C_{motor} = \frac{s}{s + \omega} \quad (4.35)$$

$$C_{abs} = \frac{1}{s + \omega} \quad (4.36)$$

しかし式 (4.35), (4.36) をそのまま採用すると、電気モータは低周波帯において全くトルクの負担をしない。電気モータの出力トルクに上限があるという側面はあるが、エネルギー回生の観点から好ましいことではない。そこで低周波帯においても電気モータにトルクを負担させるべく  $C_{motor}$  を、

$$C_{motor} = \frac{s + 0.1}{s + \omega} \quad (4.37)$$

とする。このように  $C_{motor}$  で低周波帯域でのゲインを調節することで制動によるエネルギー回生効率を容易に設定することができる。式 (4.37) を採用し、エネルギー回生効率を 10 % とした場合の  $G_{SISO}$  のボート線図を図 4.10 に示す。ただし、 $\omega = 1$  とする。このと

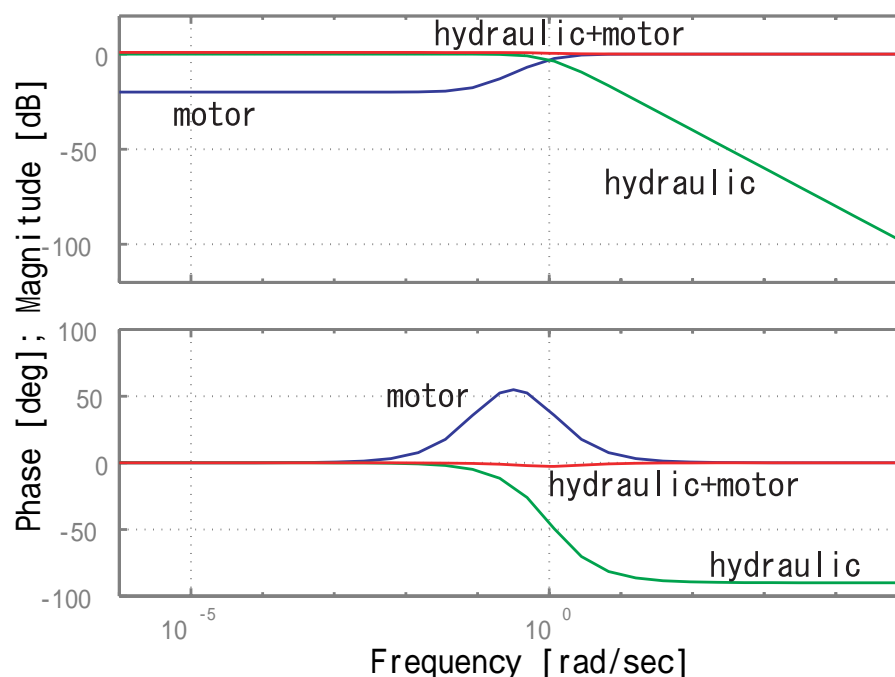


図 4.10: エネルギー回生効率を 10 % とした場合のボート線図

き、 $G_{SISO} = 1$  となるので  $C_0$  は車体のダイナミクス  $P(s)$  にみに対して設計すればよい。これは 4.2 で検討した条件と同じなので、 $C_0$  は式 (4.16)-(4.19) で用いた駆動輪速度  $V_w$  に比例する可変ゲインの PI 制御器を用ればよい。

## 4.3.2 シミュレーション結果と考察

フィルタによって、周波数分離を実現した協調制御系の有効性の検討を、シミュレーションにより行った。PQ-method の際と同じく、シミュレーション開始後 3 秒経過した時点で路面状態  $\mu_{peak}$  を 0.5 → 0.2 と変化させた。その結果を図 4.11 に示す。PQ-method を用いた制御系のシミュレーション結果、図 4.8 と比較して、電気モータが微動アクチュエータとして動作し、油圧アクチュエータが粗動アクチュエータとしてゆっくりと大きな出力をするという役割分担が明確である。路面状態の変化後は電気モータが正方向へトルクを出力し、空転状態からの素早い脱出を実現している。正方向へトルクを出力することは、油圧アクチュエータには不可能である。また、油圧アクチュエータの動作指令の低速化が実現されているため、指令通りに実際の油圧アクチュエータに動作させることが容易である。

また前節と同じく、油圧システムにより伝達されるブレーキトルクの不確かさの影響を調べるために、油圧アクチュエータのトルク指令値の 1.2 倍のトルクがホイールに与えられたとして、シミュレーションを行った。その結果を図 4.12 に示す。PQ-method を用いた提案手法と同じく、油圧アクチュエータ側の出力誤差の影響は現れず、不安定状態には陥らない。よって油圧システムの不確かさは、提案する ABS の制動性能にはほとんど影響しない。

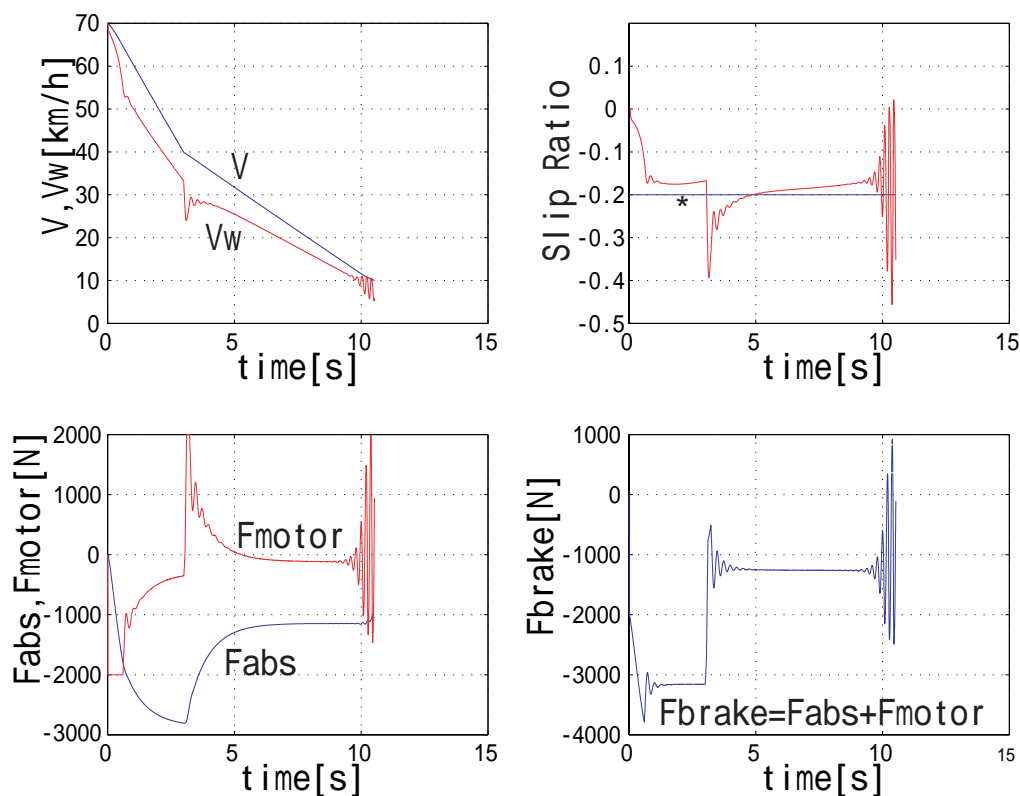


図 4.11: フィルタを用いた協調制御系のシミュレーション結果

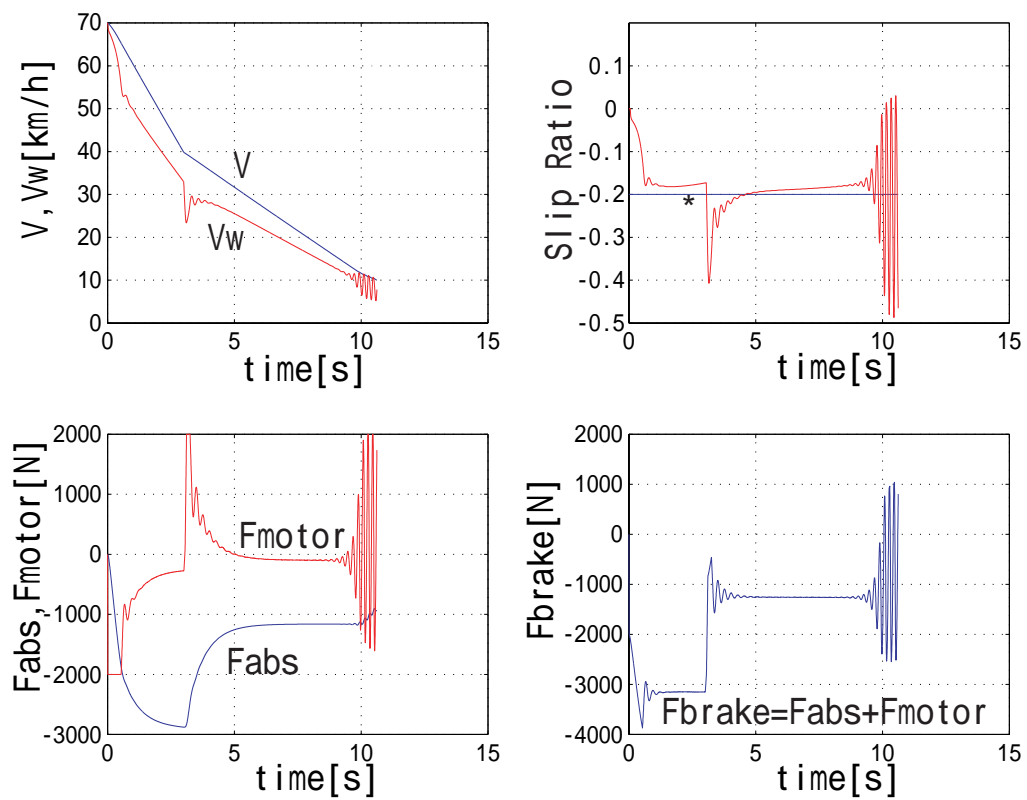


図 4.12: 油圧システムの不確かさを考慮したシミュレーション結果



# 第5章 新実験車両-東大三月号II-の製作

## 5.1 実験の必要性

前章において、油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系を提案し、その有効性を検証するべくシミュレーションを行った。しかし、シミュレーションモデルは制動時における車両の荷重変動、車体の振動、車軸のねじれ等を考慮していない。タイヤと路面間の粘着特性も現実とシミュレーションではかなり異なると思われる。また、車輪速や車速などに代表される車両状態信号を伝達する際の、ノイズの影響も検証しなければならない。

しかし、実験を行うにあたり我々が所有している実験車両-東大三月号I-は、搭載しているモータの出力、電池電圧の制約から高速度領域における実験が不可能である。またモータが直流直巻モータであり、これを1象限チョッパでコントロールしているため、モータによる制動や回生ブレーキが実現できない。よって、本研究における提案手法の実験的検証は、東大三月号Iでは不可能である。そこで我々は、新実験車両-東大三月号II-を製作した。

## 5.2 -東大三月号II-の製作

東大三月号IIは、日産マーチ(平成9年式,E-K11)をベースとした改造車であるが、その最大の特徴は、駆動源として4基のインホイールモータを採用したことである。このモータは永久磁石型の同期モータで、一般にブラシレスモータと呼ばれている。モータに加えて、減速ギヤ(減速比5),ドラムブレーキ,エンコーダなどが内蔵され、ユニット化されている。その外観を図5.2に示す。

なお、ブレーキに関してであるが、通常油圧系統のブレーキは装備されているもの、通常時には動作しない仕様となっている。これは、旧実験車両-東大三月号I-では不可能であったモータによる純電気ブレーキを想定しているためである。

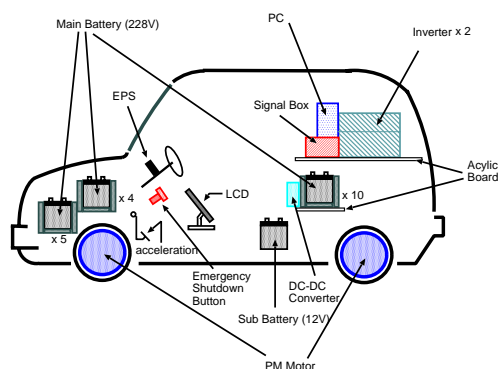


図 5.1: 『東大三月号II』の構成概要



図 5.2: インホイールモータ

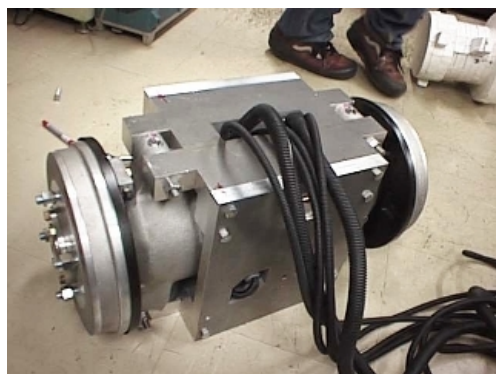


図 5.3: 前輪用モータマウント



図 5.4: 後輪用モータマウント

車両製作上の最大の難点は、図 5.2 のインホイールモータの車体への取り付けである。通常のホイールとはサスペンションへの取り付け位置が異なり、また非常に大きな力がモータ保持部に作用するため、留意する必要がある。特に前輪に関しては、ステアリング操作にともないホイール部が回転するため、タイヤ部付近のボディとインホイールモータの干渉が問題となる。様々な検討を行った結果、前輪のインホイール化を断念し図 5.3 に示すユニットを組み、エンジンルーム内に設置した。

後輪に関しては、前輪のようにステアリング動作に留意する必要がないため、サスペンション部を改造してインホイールモータをそのまま取り付けた。まず、モータマウントを製作してモータ 2 基をユニット化し、これを車体へ取り付ける構造とした。図 5.4 に、完成した後輪用のモータマウントを示す。

次に、モータをコントロールするためのインバータ (明電舎製) を図 5.5 に示す。このインバータは PWM 型であり、1 ユニットで 2 基のモータを独立にドライブできる構成である。そのため 2 基のインバータユニットを搭載した。車体後部へ 2 基のインバータユニットを固定した様子を図 5.5 に示す。

主電源となる電池として、松下電池工業株式会社製のシール型鉛蓄電池を採用した。この電池の容量は、12[V],38[Ah] である。主電源として 19 個使用することで、228[V] の入力電圧をとした。この値は、東大三月号 I (主電源電圧 120[V]) と比較しておおよそ二倍である。これにより、東大三月号 II は高速度走行時における実験も可能となる。また、DC/DC コンバータを用いて車内において 228[V] を 12[V] に変換し、これを補助電源 (12[V]) の充電に用いた。さて、ここで問題となるのが主電源用の電池 (合計 19 個) の配置である。電池箱の模型を用いた試行錯誤の結果、図 5.1 ボンネット内に 9 個、車内後部に 10 個の電池を搭載することができた。

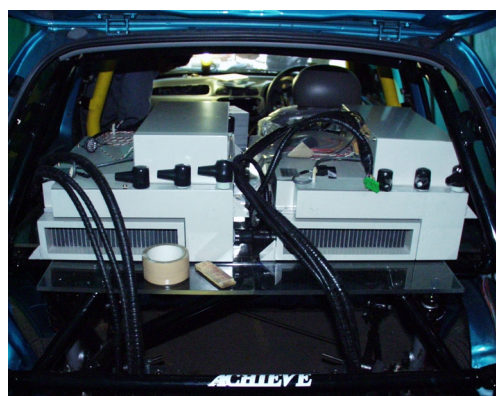


図 5.5: 車体後部から見たインバータ



図 5.6: 車体客室内の電池箱

また東大三月号 II は、旋回実験を視野にいたした上で製作を進めていたため、電池箱の設計は車両旋回時に電池箱に作用する遠心力を考慮することが必要であった。そこで、電池箱の材料をアルミ合金とすることで、強度の向上を図った。アルミ合金を用いて製作した後輪電池箱を、図 5.6 に示す。

昼夜を問わず、製作に没頭した結果 (図 5.7) ようやく完成に至った。完成した東大三月号 II の安全性を検証するために、メーカーのテストコースを利用してテスト走行を行った。図 5.8 に東大三月号 II の走行時の写真を掲載する。テスト走行の結果は、ステアリングの”遊び”が大きかった点以外は、おおむね良好であった。

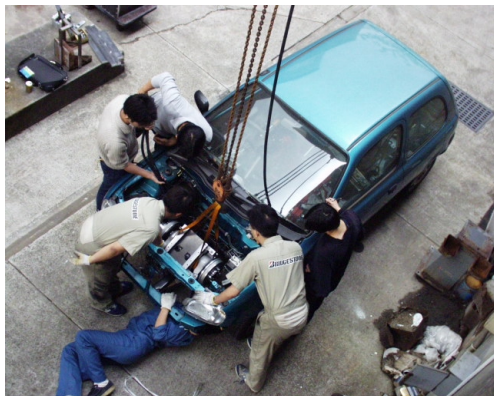


図 5.7: 東大三月号 II 製作風景



図 5.8: テスト走行中の東大三月号 II

### 5.3 提案手法の検証実験へ向けての今後の課題

前節で述べたとおり、新実験車両-東大三月号 II-は完成した。しかし、制御実験を行うために手を加えなければならない点が多い。例えば、本研究の提案手法の検証実験は、 $\mu_{peak}$  が小さい路面において行わなければならない。一般にテストコースにおいて  $\mu_{peak}$  が小さい路面は、タイルの表面上に水を張ることによって実現されている。東大三月号 II は、後輪モータマウントを実装するために、ボディの一部を切り取っているため、 $\mu_{peak}$  が小さい路面において実験を行うには、防水対策をする必要がある。また、車速や車輪速などの、様々な信号の伝達、処理を可能にする必要もある。

ところで、本研究では油圧アクチュエータと電気モータを協調制御した ABS を提案した。しかし東大三月号 II は、油圧アクチュエータは装備しているが、それを制御することは不可能である。つまり、ABS として東大三月号 II の油圧アクチュエータを用いることはできない。そこで本研究の提案手法の検証実験は、油圧アクチュエータへの制御入力を PC 内で仮想的に計算させ、電気モータを疑似的に油圧アクチュエータに見立てる。よって電気モータは、本来の電気モータへの指令トルクを含めて出力することになる。

$$F_{brake} = F_{abs} + F_{motor} \quad (5.1)$$

つまり検証実験では、式 (5.1) の  $F_{brake}$  を電気モータの指令トルクとして、実験を行う。

## 第6章 結言

本研究では、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータの潜在能力をいかに高く発揮させるべく、油圧アクチュエータと電気モータを協調制御することによる、高性能ABSの実現を検討した。

ハイブリッド自動車に搭載されている、電気モータをABSのアクチュエータとして適用する研究はあまり行われていないが、東京大学の坂井らは、現行の油圧アクチュエータを用いたABSの制御則を変更することなく、電気モータの制御則を付加することで制動性能の向上を図っている [2]。それに対して本論文では、更に踏み込み油圧アクチュエータ側の制御則の再設計を含めて実行することで、電気モータ固有の応答特性を十分に活かした、油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系を提案した。

まず、2段アクチュエータ型のハードディスクの位置決め制御に用いられる、PQ-methodを油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系へ適用することを検討した。PQ-methodとは、2種類の応答特性の異なるアクチュエータの相互干渉性を考慮した制御器を設計する手法である。具体的には、2種類のアクチュエータのゲインが等しい周波数領域において、それぞれのアクチュエータの位相が反転しないようにする手法である。こういった相互干渉性を考慮することで、無駄な動きが少ない協調制御系の設計が可能である。PQ-methodをハイブリッド自動車のABSへ適用したところ、油圧アクチュエータ単独のABSと比較して、高性能なABSが実現できた。路面状態の変化や、現行のABSの弱点である低 $\mu$ 路においても不安定な挙動は示さない。

次に、上位車両姿勢制御系を設計する際のことを考慮し、より簡素な協調制御系の検討を行った。2種類のアクチュエータの伝達特性を  $P_{motor} = P_{abs} = 1$  と近似し、更に  $G_{SISO} = 1$  となるようにそれぞれのアクチュエータのコントローラをフィルタによって設計した。これにより、2種類のアクチュエータの動作領域を明確に分離することが可能となった。また、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータの本来の目的であるエネルギー回生の回生効率を比較的容易にセッティングすることが可能である。このフィルタによる周波数分離を用いて設計した、ABS協調制御系のシミュレーション結果も、PQ-methodを適用したABS協調制御系同様に良好であった。

今後は、完成した東大三月号IIによる実験的検討を行う予定である。

# 謝 辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々から御指導、御助言をいただきました。堀洋一教授には、ご多忙にも関わらず私の研究を暖かく見守っていただいたこと、終始懇切丁寧な御指導をいただいたこと、工学者としての心構えを教えていただいたこと、ここに深く感謝の意を表します。

豊田中央研究所の梅野孝治氏には、研究の初期段階において貴重なアドバイスをいただきました。また、実際にお会いさせていただいた際には激励の言葉をいただきました。研究を進めていく上で、自分の進もうとしている道に確信を持つことが出来ました。厚く御礼申し上げます。

渋谷武夫助手には、東大三月号IIの製作にあたり工作機器の使い方を丁寧に教えていただきました。一人では何も出来なかった自分が、どうにか金属加工が出来るようになったのは渋谷氏の御指導の賜です。ここに改めて深謝します。

技術官の内田利之さんには、東大三月号IIの製作にあたり、工作機器の使い方から物作りの心構えまで様々なことを教えていただきました。東大三月号II製作中の鬼気迫る形相は忘れられません。また、幅広い趣味から生まれる発想豊かなお話で、いつも楽しませていただきました。心から感謝の意を表します。

研究員の坂井真一郎さんには、本研究の方針をはじめとして本論文の全編にわたって親身な御指導をいただきました。また、約4年間の製作期間を要した東大三月号IIの完成の場に立ち合わせていただき感動しました。雨の日も雪の日も、震えながらテントのなかで共に作業をさせていただいた日々は忘れられません。心から感謝しています。

研究員のミン タ カオさん、チャクラボラティ チャンダンさん、宋 申民さん、研究生のチャン ビョン フンさんには研究室打ち合せや昼食などの際によくご一緒させていただき、研究の内容や故郷のことなど、様々な興味深いお話を拝聴させていただきました。

博士課程3年の鈴木文泰さん、藤本博志さんには制御工学を基礎から教えていただきました。研究分野こそ違いましたが、いつも自分の研究を気にかけていただき、打ち合せのときのみならず折にふれて御指導いただきました。また、私の研究がうまく進んだ際には、自分のことのように喜んでいただきました。誠に感謝しております。

博士課程2年の及部七郎齋さんには、研究室での勉強会で本当に丁寧に面倒を見ていただきました。いつも笑顔で研究室を和ませていただき、また後輩である私達を思いやっていただきました。本当にありがとうございました。

博士課程1年の呉世訓さん、関弘和さんには研究内容のみならず発表資料の作成方法まで御指導いただきました。またお二人とは、趣味でも相通ずるところがあり、楽しくお話をさせていただきました。ここに感謝申し上げます。

修士課程の原哲さん、片岡寛暁さん、畠直輝さん、坂東信尚さんには研究に関する基礎知識から論文の書き方まで御指導いただきました。また、年齢も近いこともありとても親しくしていただきました。研究室の雰囲気になんまり溶けこめられたのも先輩方が気を配って下さったおかげです。ありがとうございました。また原哲さんには、東大三月号II製作

の折に渋谷氏のもとで共に金属加工をさせていただきました。未熟な私を、いつも心配そうに見守っていただきました。ありがとうございました。

卒論生の猿田訓彦君、タイ チェン ファ君、谷理範君は研究内容こそ違いましたが、お互いに切磋琢磨しながら共に苦楽をわかちあい、大学生活の最後の一年を共に過ごせたこと、とても嬉しく思っています。

秘書の木村麻里子さんには、おいしいコーヒーをいれていただきました。研究室全体の雰囲気気を使っていたいただいたおかげで、とても快適に研究室生活を送ることができました。

最後に、1年間お世話になった皆様の今後の御発展と御多幸を祈念して、謝辞とさせていただきます。

# 参考文献

- [1] Shin-ichiro Sakai and Yoichi. Hori, “Advanced vehicle motion control of electric vehicle based on the fast motor torque response”,in Proc. 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), pp.729-736, Michigan, USA, 2000.
- [2] 坂井 真一郎,堀 洋一 “油圧 ABS と協調した回生ブレーキ制御による空転防止効果の改善”,平成 12 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 1, pp. 557-560, 2000.
- [3] 鶴岡 慶雅,豊田 靖,堀 洋一, “電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究”,電気学会論文誌 D, vol.118-D, No.1, pp.45-50, 1998.
- [4] 大槻 治明,森 健次,宗本 隆幸,赤城 協 “磁気ディスク装置 2 ステージアクセスサーボ系のトラック追従制御”,電子情報通信学会論文誌 C-2, Vol .J75-C-2 No. 11 pp. 653-662, 1992.
- [5] Ding J., Numasato H., Tomizuka M., “Single/Dual-rate Digital Controller Design for Dual Stage Track Following in Hard Disk Drives”, AMC2000-NAGOYA, pp. 80-85, 2000.
- [6] L.-S. Fan, H. H .Otesen, T. C. Reiley, R. W. Wood, “Magnetic recording head positioning at very high track densities using a microactuator-based, two-stage servo system”, 42, 3, pp. 222-233, 2000.
- [7] Steven J.Schroeck.,William C.Messner., “On Controller Design For Linear Time-Invariant Dual-Input Single-Output Systems”, AACCC1999, pp. 4122-4126, 1999.
- [8] David Ashuckian, “A status report on the implementation of California’s memoranda of agreement and emission benefits of electric vehicles”, In EVS14, Oralnd, USA, 1997.
- [9] Hiroyuki Watanabe, “The Keyword of for the 21st Century -Hybrid-”, The opening session of EVS17, 2000.
- [10] トヨタ自動車. Toyota internet drive[online].<http://www.toyota.co.jp>,2001.
- [11] 松田 俊郎, “ABS の最新実用知識”,自動車工学, vol.11, pp.30-67, 1990
- [12] 安部 正人, “自動車の運動と制御”,山海堂, 1992.
- [13] 清水 浩, “電気自動車のすべて”,日刊工業新聞社, 1992.
- [14] 清水 浩, “こうして生まれた 高性能電気自動車 ルシオール”,日刊工業新聞社, 1999

# 発表文献

[1] 岡野隆宏, 堀洋一: HEVにおける油圧アクチュエータと電気モータの協調制御による新しいABSの提案, 電気学会産業計測制御研究会 IIC-01-8, 2001(発表予定).