

# エンジン空燃比のデュアルモード制御

## Air-Fuel Ratio Control in Engine Using Dual Mode Control

○小形 卯京, 竹田 宏  
Hiroshi Takeda, Ukyou Ogata

東北学院大学工学部  
Tohoku Gakuin University

キーワード: エンジン空燃比制御(engine air-fuel ratio control), PI制御(PI control),  
デュアルモード制御(dual mode control), バンプレス切換え(bumpless transfer)

連絡先: 宮城県多賀城市中央1丁目13番1号 東北学院大学 工学部 電気工学科  
竹田宏 TEL: (022)368-1115, Fax: (022)368-7070, E-mail: htakeda@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

### 1. はじめに

1970年代後半から1980年代にかけて厳しくなった排出ガス規制と燃費低減の要求がエンジン制御にマイクロコンピュータを導入するきっかけとなった。現在、自動車においてエレクトロニクスはエンジン制御始め、エアバックの制御、ABS制御(ABS: Anti lock Brake System)などあらゆる分野に利用されている。<sup>1)</sup>

エンジン制御では高出力, 低燃費, 排気ガスの浄化を目的とした、より高度な噴射量制御, 点火時期制御, ノック制御, アイドル回転数制御などが実現されている。<sup>1), 2)</sup>

エンジン空燃比制御は、大気汚染対策と燃費向上のために必要不可欠である。本論文では最

適な空燃比を得るために、まず、エアフローメータに基づくフィードフォワード制御と、空燃比センサ情報によるフィードバック制御を単独で用いた場合の応答を検討し、ついで、それらを併用したデュアルモード制御<sup>3)</sup>を提案し、その応答特性についてシミュレーションにより考察する。

### 2. 空燃比制御系モデル

Fig. 1に空燃比制御系のエンジン模式図を示す。

空燃比制御とは、エアフローメータなどにより測定される流入空気量, クランク角センサにより測定されるエンジンの回転数, 排気ガスセンサ(O<sub>2</sub>センサ, 空燃比センサ)からのフィードバック信号

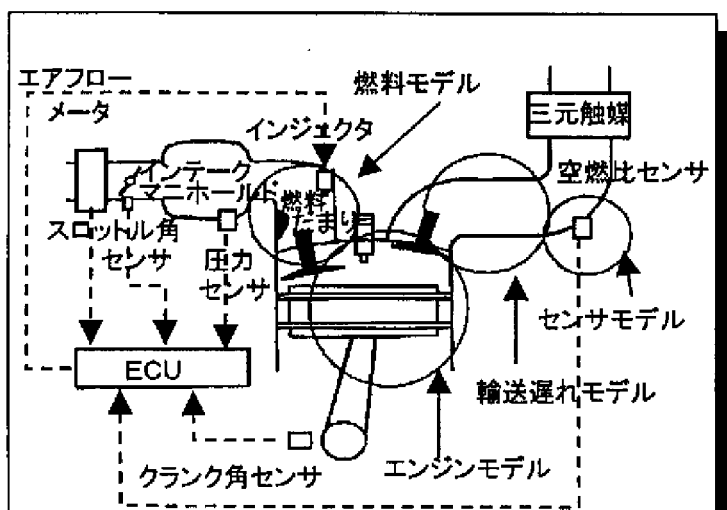


Fig. 1 空燃比制御系のエンジン模式図

など、エンジンの状態を検出する各センサの信号を基に、最適な空気燃料比になるようにECU (Electronic Control Unit)により燃料噴射量を決定し、制御するものである。

シリンダ内の空燃比を次式で定義する。

$$\lambda_c = \frac{Q_{ac}(t)}{14.7m_{fc}(t)} \quad (1)$$

[ $Q_{ac}$ (g/sec): シリンダ流入空気量]

本研究では、空燃比制御系を燃料系、ストローク遅れ、輸送遅れ、センサの4つに分けてモデル化している。

## 2.1 燃料モデル

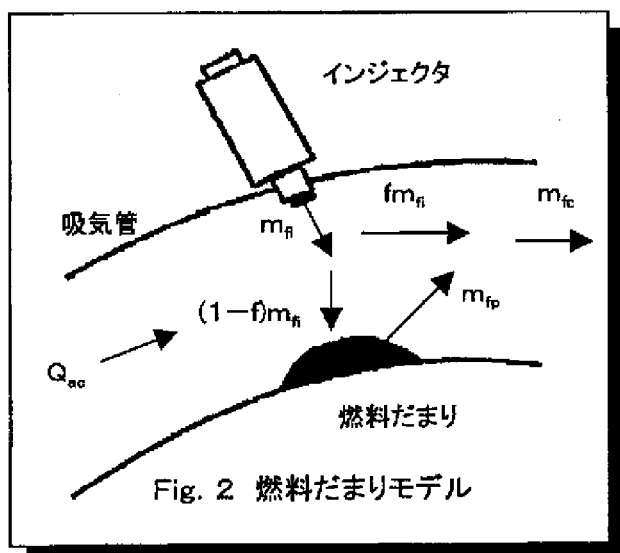


Fig. 2 燃料だまりモデル

Fig. 2に燃料だまりのモデルを示す。

噴射された燃料の一部は吸気ポート壁などに付着し燃料だまりを形成し、残りの燃料がシリンダに直接入る。また、燃料だまりの質量に比例した割合で再蒸発してシリンダに入るものとする。

燃料だまりのダイナミクスは

$$T_1 \frac{dm_{fp}(t)}{dt} = (1-f)m_{fi}(t) - \frac{1}{T_1}m_{fp}(t) \quad (2)$$

$$m_{fc}(t) = fm_{fi}(t) + m_{fp}(t) \quad (3)$$

$m_{fc}$ (g/sec): シリンダに入る燃料流量  
 $m_{fi}$ (g/sec): インジェクタから噴射される燃料流量  
 $m_{fp}$ (g/sec): 燃料だまりを通してシリンダに入る燃料流量  
 $f$ : 噴射燃料がシリンダに直接入る割合  
 $T_1$ (sec): 燃料だまりの再蒸発時定数

上式をラプラス変換すると、噴射された燃料量  $m_{fi}$  からシリンダに入る燃料量  $m_{fc}$  までの伝達関数  $G_f(s)$  は次式のようになる。

$$G_f(s) = \frac{M_{fc}(s)}{M_{fi}(s)} = \frac{fT_1s + 1}{T_1s + 1} \quad (4)$$

## 2.2 ストローク遅れモデル

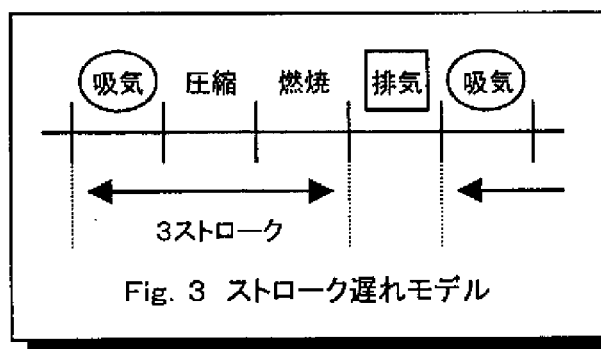


Fig. 3 ストローク遅れモデル

エンジンの1サイクルはFig. 3に示すように、吸気された混合気が排気されるまで3行程の遅れが存在する。これをストローク遅れ  $L_s$ (sec) と呼び、その値は次式で与えられる。

$$L_s = 3T_s = \frac{90}{N(t)} \quad (5)$$

$T_s(\text{sec})$ : 1ストロークの時間  
 $M(\text{rpm})$ : エンジン回転数

吸気側の空燃比を $\lambda_e$ とすると、排気側の空燃比 $\lambda_s$ はストローク遅れにより、

$$\frac{1}{\lambda_e}(t) = \frac{1}{\lambda_s}(t - L_s) \quad (6)$$

となり、 $m_{fc}$ から $\frac{1}{\lambda_e}$ までの伝達関数 $G_e$ は、

$$G_e(s) = \frac{1/\Lambda_e(s)}{M_{fc}(s)} = \frac{14.7}{Q_{ac}(t)} e^{-L_s s} \quad (7)$$

## 2.3 輸送遅れモデル

排気された混合気が排気管の集合部に取り付けられた空燃比センサ到着するまでの遅れを排気輸送遅れ $L_t(\text{sec})$ と呼ぶ。

$L_t$ は次のようにして求められる。

$$L_t(t) = \frac{d}{v_e(t)} = \frac{d\pi r^2}{Q_{ac}(t)} \cdot \frac{1293}{1 + 0.00366T_e} \cdot \frac{P_a}{760} \quad (8)$$

$d(\text{m})$ : 排気バルブから空燃比センサまでの距離  
 $v_e(\text{m/sec})$ : 排気速度  
 $r(\text{m})$ : 排気管の半径  
 $\rho=1293$ :  $T=0(^{\circ}\text{C}), P=760(\text{mmHg})$ の時の排気密度  
 $T_e(^{\circ}\text{C})$ : 排気温度  
 $P_a(\text{mmHg})$ : 大気圧

従って、空燃比センサ位置での空燃比 $\lambda_s$ は、

$$\frac{1}{\lambda_s}(t) = \frac{1}{\lambda_e}(t - L_t) \quad (9)$$

よって、 $\frac{1}{\lambda_e}$ から $\frac{1}{\lambda_s}$ までの伝達関数 $G_i(s)$ は

$$G_i(s) = \frac{1/\Lambda_s(s)}{1/\Lambda_e(s)} = e^{-L_t s} \quad (10)$$

## 2.4 センサモデル

空燃比センサの保護層[多孔質セラミック]を排気ガスが透過する過程、ジルコニア内を酸素が輸送される過程などの化学反応による遅れが存在するため、一次遅れで近似した線形モデルとする。

空燃比センサのダイナミクスは

$$\frac{d \frac{1}{\lambda}(t)}{dt} = -\frac{1}{T_2} \cdot \frac{1}{\lambda}(t) + \frac{1}{T_2} \cdot \frac{1}{\lambda_s}(t) \quad (11)$$

$T_2(\text{sec})$ : センサの時定数  
 $\frac{1}{\lambda}$ : 空燃比センサ出力

よって、空燃比センサの伝達関数 $G_s(s)$ は、

$$G_s(s) = \frac{1/\Lambda(s)}{1/\Lambda_s(s)} = \frac{1}{(T_2 s + 1)} \quad (12)$$

## 3. 空燃比制御のコントローラ

空燃比制御の目的は、混合気空燃比を、常に理論空燃比に保つこと( $\lambda^* = \lambda = 1$ )である。

理論空燃比とは、燃料が理論的に完全燃焼するときの空気と燃料の質量比(空気:燃料=14.7:1)である。

### 3.1 制御対象

空燃比制御系の制御対象の入力 $m_{fi}$ 、出力は $\frac{1}{\lambda}$ とする(Fig. 1参照)。従って、その伝達関数

$$G_p(s) \text{は、(4), (7), (10), (12)式より、}$$

$$G_p(s) = G_f(s)G_e(s)G_t(s)G_s(s)$$

$$= \frac{14.7}{Q_{ac}} \cdot \frac{fT_1s+1}{T_1s+1} \cdot \frac{1}{T_2s+1} \cdot e^{-s(L_s+L_t)} \quad (16)$$

### 3.2 フィードフォワード制御

Fig. 5にフィードフォワード制御のブロック線図を示す。

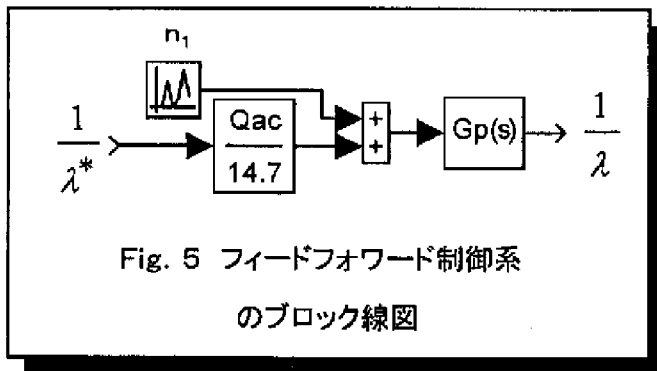


Fig. 5 フィードフォワード制御系のブロック線図

フィードフォワード制御はエアフローメータの情報に基づき理論空燃比に従って燃料噴射量を決定する。エアフローメータにノイズが存在しなければこの制御方式のみで十分であるが、実際にはノイズが存在するため、ノイズの影響を直接受けるフィードフォワード制御の単独での使用は好ましくないとされる。

### 3.3 フィードバック制御

Fig. 6にフィードバック制御のブロック線図を示す。

フィードバック制御は空燃比センサの情報を基

にPIコントローラを用いて燃料噴射量を決定する。外乱の影響を受けにくい、反省動作があるために応答速度は遅くなる。

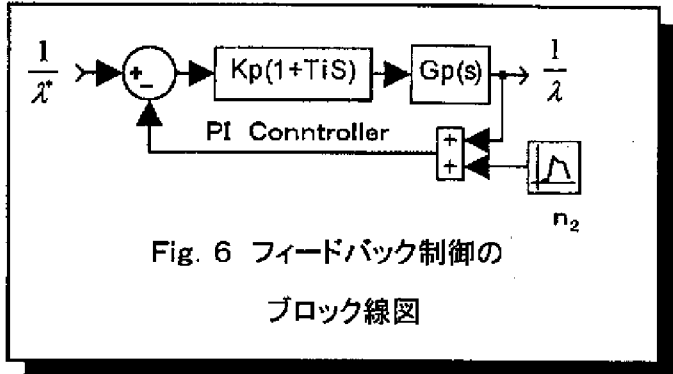


Fig. 6 フィードバック制御のブロック線図

PID コントローラのパラメータ値に関してシミュレーションによって種々検討した結果、(16)式で与えられる制御に対しては微分動作がない方がよいことが分かった。これはむだ時間の方が時定数より大きいことによると考えられる。また、参考文献4)では基準化むだ時間 $L_N (=L/T_0)$  [ここで $L$ はむだ時間、 $T_0$ は限界周期である。]の値が0.25~0.3より小さいときは微分動作を加えると速応性が増し、大きいときには微分動作を加えても速応性は変わらないと述べている。

### 3.4 デュアルモード制御

本研究で提案するデュアルモード制御は、上記の速応性に優れたフィードフォワード制御と、外乱の影響を受けにくいフィードバック制御をスイッチにより切り換え、併用することによって、両者の特長を得ようとするものである。

#### 3.4.1 デュアルモード制御の基本構成

Fig. 7にデュアルモード制御の基本構成図を示す。

デュアルモード制御は速応性を得るために

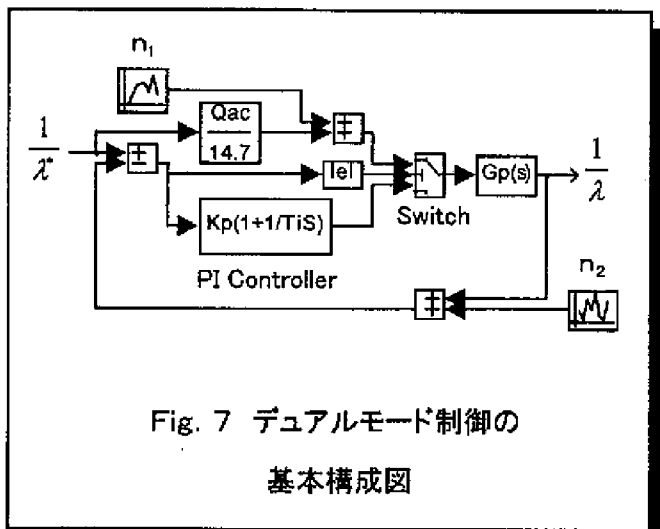


Fig. 7 デュアルモード制御の基本構成図

$\left| \frac{1}{\lambda^*} - \frac{1}{\lambda} \right| > 0.02$ のときはフィードフォワード制

御を用い、精度を確保するために  $\left| \frac{1}{\lambda^*} - \frac{1}{\lambda} \right|$

$\leq 0.02$ になったときにフィードバック制御に切り換える。なお、0.02は排ガス中の有毒ガスが高い浄化率を示す範囲、つまり、 $\lambda$ 値の許容変動範囲である。

### 3. 4. 2 応答改善の一方法

Fig. 8にバンプレス切換え<sup>5)</sup>を組み込んだデュアルモード制御のブロック線図を示す。

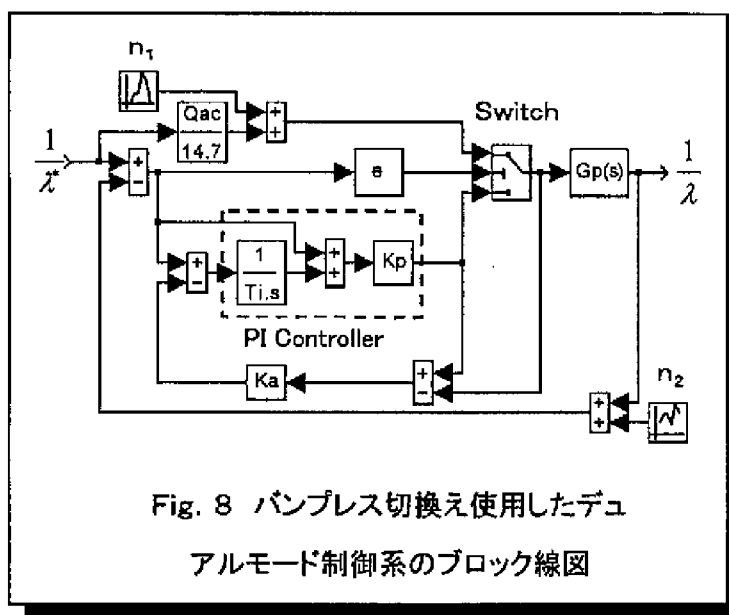


Fig. 8 バンプレス切換え使用したデュアルモード制御系のブロック線図

フィードフォワード制御とフィードバック制御をスイッチによって切換えたとき、2つの操作量が常

に一致するというわけではないので、実際に制御対象に入る操作量でステップ状の変化が起こり、応答特性に悪い影響を与える。これを防ぐためにバンプレス切換えを使用している。

## 4. シミュレーション

伝達関数のパラメータ値<sup>6)</sup>は、 $T_1=0.1(\text{sec})$ ,  $f=0.8$ ,  $T_2=0.015(\text{sec})$ ,  $L_s=0.15(\text{sec})$ ,  $L_t=0.0074(\text{sec})$ , とし、 $Q_{ac}=12(\text{g/sec})$ , エンジン回転数 $N=600(\text{rpm})$ でシミュレーションを行った。PIコントローラのパラメータは改良型限界感度法<sup>4)</sup>により求め、修正してものである。

Fig. 9, 10にエアフローメータに含まれるノイズとフィードフォワード制御系の応答を示し、Fig. 11, 12に空燃比センサに含まれるノイズとフィードバック制御系の応答を示す。エアフローメータ、空燃比センサに重畳されるノイズは互いに無相関な正規性雑音とする。 $(\sigma_{n_1}^2 = \sigma_{n_2}^2 = \sigma^2 = 0.0025)$

ノイズの帯域幅は、制御対象の時定数とフィードバック制御のボード線図から決定した。

帯域幅はエアフローメータのノイズ $n_1$ を空燃比センサのノイズ $n_2$ より広く設定した。

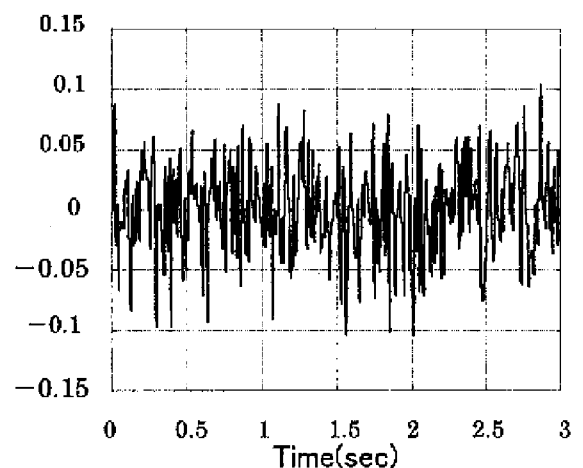


Fig. 9 エアフローメータのノイズ

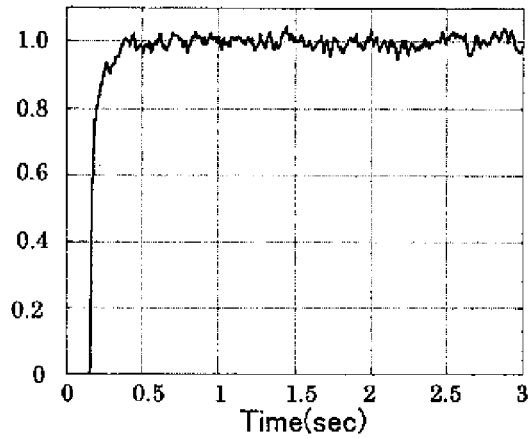


Fig. 10 フィードフォワード制御の応答

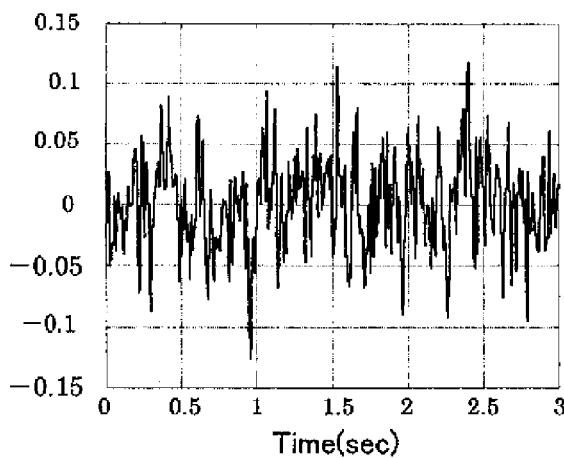


Fig. 11 空燃比センサに含まれるノイズ

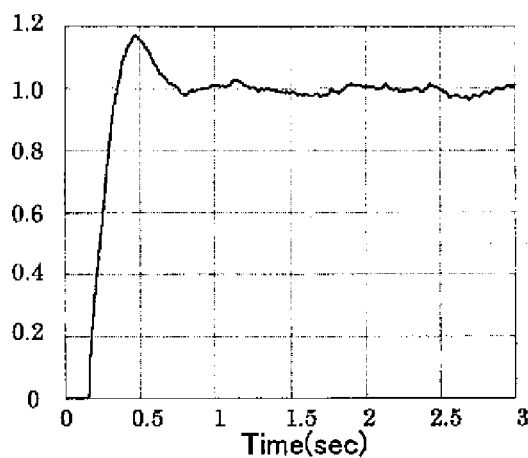


Fig. 12 フィードバック制御の応答

Fig. 13にデュアルモード制御応答を示し、Fig. 14にパンプレス切換えを組み込んだデュアルモード制御応答を示す。

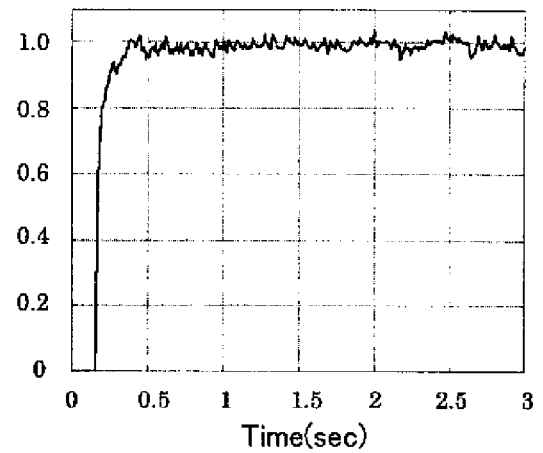


Fig. 13 デュアルモード制御の応答

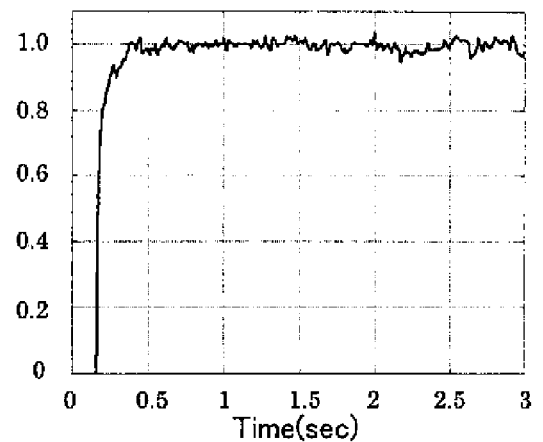


Fig. 14 パンプレス切換えを組み込んだデュアルモード制御の応答

なお、Fig. 8のブロック線図で切換えスイッチを用いず、 $Q_{ac}/14.7$ を通る信号を常に制御ループに加えるとき(加法モード)の応答をFig. 15に示す。(但し、簡単のため $n_1=n_2=0$ とする。)

Fig. 15より、オーバーシュートが非常に大きく実際には使用できない。

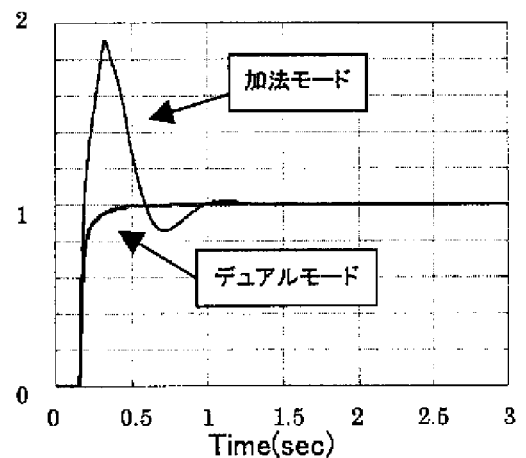


Fig. 15 加法モードとデュアルモード制御の応答比較

## 5. おわりに

本論文では、最適空燃比制御を実現するために、バンプレス切換え機能を持つデュアルモード制御を提案し、シミュレーションによりその有効性について吟味した。

今後、ノイズ $n_1$ ,  $n_2$ の特性、及びモード切換えのしきい値の制御特性への影響、そして、バンプレス切換えを加えた制御系のロバスト性について考察と行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 水谷集治, カーエレクトロニクス研究会: 新カーエレクトロニクス, 山海堂, 1992
- 2) J.David Powell, N.P.Fekete, and Chen-Fang

Chang: "Observeet-Based Air-Fuel Ratio Control", IEEE Control Systems, vol.18, no.5, pp.72-83(1998)

- 3) 竹田宏, 小形卯京, 宇佐見拓也: "エンジン空燃比のデュアルモード制御について", 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, . . .
- 4) 須田信英, システム制御情報学会編: 「システム情報ライブラリー 6 PID 制御」, 朝倉書店
- 5) Youbin Peng, Damir Vrancic, and Raymond Hanus: "Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers", IEEE Control Systems, vol.16, no.4, pp.48-57(1996)
- 6) 齋藤知宏: "エンジンの燃料噴射制御に関する研究", 東北大学大学院工学研究科修士学位論文, 1997