

自動車エンジンの空燃比制御に関する研究

A Study on Air-Fuel Ratio Control in Automobile Engine

○齋藤友宏*, 阿部健一*
○Tomohiro Saito, Kenichi Abe

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : 空燃比 (Air-Fuel Ratio:λ), リミットサイクル (limit cycle)

連絡先 : 〒 980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学工学部 電気工学科 阿部研究室
齋藤友宏, Tel. 022-217-7074, Fax. 022-263-9289, E-mail: tomo@abe.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1967年にエンジンの点火時期制御にマイクロコンピュータがはじめて導入されて以来,自動車における電子制御技術は著しく進歩し,車両には多くのエレクトロニクス技術が取り入れられるようになった.エンジン制御では出力および燃費,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等が実現されている¹⁾.

米国のカリフォルニア州における,排気ガス公害の根本的,抜本的解決をねらったZEV規制に後押しされるように,日本においても自動車の排気ガス規制の更なる強化が2000年に実施されることが決定している.さらに,燃費向上を図った直噴やリーンバーンエンジンの開発と合間って,エンジンにおける,より高度な燃料噴射制御が要求されることは必至である.

現在の自動車における燃料噴射制御は,空気量センサや水温センサなどを用いたフィー

ドフォワード制御と,排気管に取り付けた酸素センサ又は空燃比センサを用いたフィードバック制御により構成されている.近年になって多く用いられるようになった空燃比センサは,排気ガスの空燃比(空気と燃料の比)を広い範囲にわたってリニアに検出できる.この特性を用いることにより,リーンバーンエンジンにおける臨界希薄燃焼が可能となる.しかし一方で,理論空燃比では排気エミッションが悪化することが報告されている.これは,排気ガスを浄化するのに用いられている三元触媒の転換効率が,精密な制御によって逆に低下してしまうことに原因がある.

本稿では,この問題点を解決するための制御法として,PI補償とリレーとを用いた空燃比制御法を提案する.提案法は,空燃比センサを用いたフィードバック制御系に,リミットサイクルを生じさせることで排気エミッションの向上を図るものである.計算機シミュレーションにより,提案法の性能について検討する.

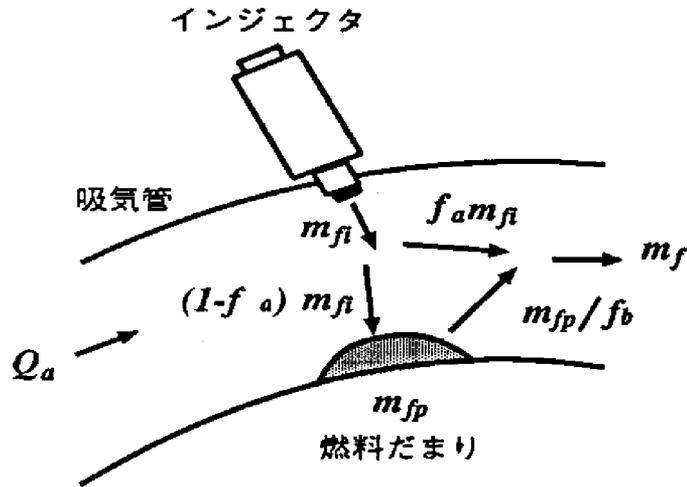


Fig. 1 Fuel puddle model.

2. 制御対象モデルと制御器

単気筒における制御対象モデルは次の3つの部分で構成されるものとする^{2),3)}.

(1) 吸気管 (燃料だまり)

吸気管のモデルとして燃料だまりを考える (Fig. 1). インジェクタから噴射された燃料がそのまま全部シリンダに入っていけばよいのだが, 噴射された燃料の一部は吸気管壁等に付着 (液化) し燃料だまり (fuel puddle) を形成する. 残りの燃料がシリンダに直接入ることになる. また, 吸気管壁に付着した燃料だまりは再蒸発してシリンダに入っていくことになる. この再蒸発は, 燃料だまりの質量 (fuel puddle mass) に比例した割合で再蒸発するものとする. 噴射燃料が直接シリンダに入る割合を f_a , 燃料だまりの再蒸発時定数を f_b (sec) とすると, 噴射燃料量 m_{fi} からシリンダに入る燃料量 m_f までの伝達関数は

$$G_p(s) = \frac{f_a f_b s + 1}{f_b s + 1}$$

となる.

(2) 輸送遅れ (ストローク, 排気輸送)

レシプロエンジンは4つのストローク (吸入, 圧縮, 燃焼, 排気) からなっているので, これに起因して吸気から排気まで (3ストローク) のストローク遅れが生じる. 回転数を N (rpm) とすると, ストローク遅れ L_s (sec) は

$$L_s = 3 \cdot \frac{30}{N} \quad (1)$$

となる. また, 空燃比センサが排気管の集合部 (排気バルブから離れた位置) に取り付けられていることにより, 排気輸送遅れが生じる. 排気輸送遅れ L_t (sec) は, 空燃比センサの位置や排気管の形状などで変化するが, ここでは吸入空気量 Q_a (g/s) にのみ依存するものとし, 実測データをもとに

$$L_t = \frac{1.674}{Q_a} \quad (2)$$

とする. $L = L_s + L_t$ (sec) とすると吸気バルブから空燃比センサまでの伝達関数は

$$G_d(s) = \frac{14.7}{Q_a} e^{-Ls}$$

となる. ここで, 理論空燃比 (空気質量: 燃料質量=14.7:1) で1となるように規格化した.

(3) 空燃比センサ

現在用いられている空燃比センサは, 空燃比によってその応答特性が変わるが, ここでは簡単に一次遅れで近似したものをを用いる. 時定数 τ (sec) とすると, 空燃比センサの伝達関数は

$$G_s(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

となる.

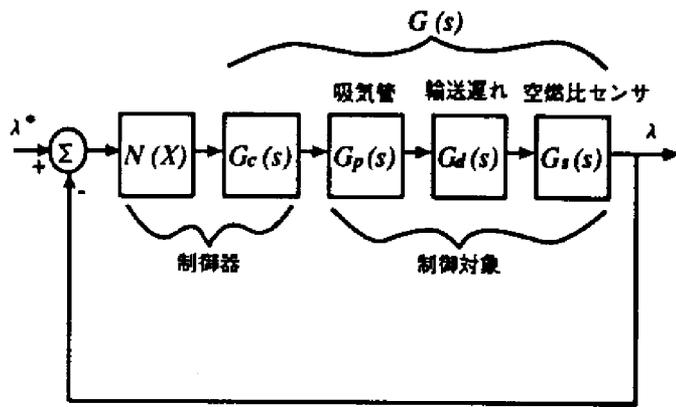


Fig. 2 Feedback control system.

制御器としては、フィードバック制御系に強制的にリミットサイクルを生じさせる手段として、リレーによるリミッタを用いたPI制御器を考える。リレーゲイン R 、比例ゲイン K_p 、積分ゲイン K_i とすると、制御器は

$$N(X) = \frac{4R}{\pi X}, \quad G_c(s) = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

で表される。ここで、目標とする安定なリミットサイクルを起こすための制御パラメータの選定が問題となる。

3. 記述関数法による制御パラメータの導出

Fig. 2の制御系に目標振幅 X^* 、目標周波数 F^* の安定なリミットサイクルを生じさせるための制御パラメータ (K_i, R) を記述関数法を使って導出する⁴⁾。

位相条件より

$$K_i = \frac{\omega K_p}{\tan\{A + \omega L\}} \quad (3)$$

振幅条件より

$$R = \frac{\pi X^* Q_a}{4B \sqrt{\omega^2 K_p^2 + K_i^2}} \quad (4)$$

ここで、 $\omega = 2\pi F^*$

$$A = \tan^{-1} f_b \omega + \tan^{-1} \tau \omega$$

$$- \tan^{-1} f_a f_b \omega - \pi/2$$

$$B = \frac{14.7}{\omega} \sqrt{\frac{\omega^2 f_a^2 f_b^2 + 1}{(f_b^2 \omega^2 + 1)(\omega^2 \tau^2 + 1)}}$$

である。

ここで、式(3)の導出において、 K_i が非負実数であるための制約条件が存在する。これは、輸送遅れの変動により、PI動作のみでは目標とする制御が不可能となることを意味する。この条件は、厳密には F^* と f_a, f_b, τ, L により定まるが、低回転数で比較的定常な運転領域においては f_a, f_b, τ は一定とみなせる。よって、 F^* と L に関する条件だけを考えればよいことになる。今、式(1)(2)において

パラメータ	範囲
回転数 (rpm)	600~1400
吸入空気量 (g/s)	40~100

とし、ある回転数で吸入空気量の全領域にわたって K_i が非負実数であるような F^* の最小値 (限界目標周波数) を用いることにする。このことは、エンジンにおける時間変化が回転数よりも空気量の方が速い、またリミットサイクルの周波数が小さいほど三元触媒の転換効率がよい、という見地からみて妥当である。

モデルのパラメータを

$$f_a = 0.8, f_b = 0.1(\text{sec}), \tau = 0.015(\text{sec})$$

としたときの限界目標周波数を Table 1 に示す。この F^* を用いて、(3)(4) により制御パラメータを導出する。

回転数 (rpm)	限界目標周波数 F^* (Hz)
600	1.3
800	1.7
1000	2.0
1200	2.2
1400	2.5

Table 1 限界目標周波数

4. シミュレーション結果

Fig. 3, Fig. 4にそれぞれ $N=600, 1400$ (rpm)のときのシミュレーション結果(4気筒)を示す。この結果から、実際のリミットサイクルの周波数は目標周波数よりも小さく、振幅は目標振幅よりも大きくなることがわかる。この誤差に関しては、記述関数法のもつ誤差や離散化による誤差などが考えられるが、周波数が小さくなることは三元触媒の転換効率にとって有利(1Hz程度が最も良い)であるし、振幅に関しては、センサ出力を監視することでリレーゲインにより周波数を変えずに(安定を保ったまま)補正できる。

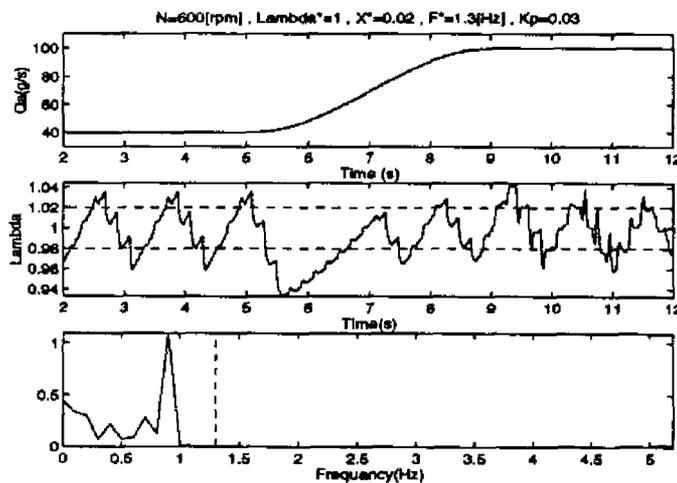


Fig. 3 Simulation result($N=600$ rpm).

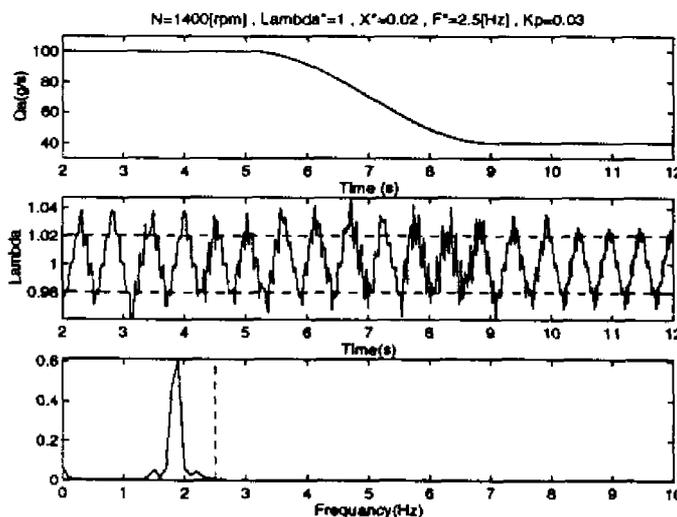


Fig. 4 Simulation result($N=1400$ rpm).

5. おわりに

本稿では、ストロークや排気輸送に起因したむだ時間を含む、エンジンの空燃比フィードバック制御系の設計法として、PI補償にリレーを付加することにより応答波形を指定する手法を提案した。今回はシミュレーションの結果のみを示したが、現在実機による検証をすすめている。また、非線形要素を用いない目標追従型の制御法である、状態フィードバックを用いた制御法⁵⁾などとの比較検討を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 兼安昌美, 北野耕司, 栗原伸夫: 自動車エンジンの点火時期制御最適化方法, 自動車技術会論文集, Vol.23, No.1, 27/32.(1992)
- 2) C.-F. Chang, N.P. Fekete, A. Amstutz, J.D. Powell: Engine Air-Fuel Ratio Control Using an Event-Based Observer, SAE Paper No.930766.(1993)
- 3) 太田 純: 自動車エンジンの空燃比制御に関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士学位論文.(1996)
- 4) 斎藤友宏: 自動車エンジンの空燃比制御に関する研究, 東北大学工学部電気工学科卒業論文.(1995)
- 5) C.-F. Chang, N.P. Fekete, A. Amstutz, J.D. Powell: Air-Fuel Ratio Control in Spark-Ignition Engines Using Estimation Theory, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Vol.3, No.1, 22/31.(1995)