

ファジー推論を用いたエンジン制御

—アイドル回転数制御への応用—

Engine Control System Using Fussy Theory

伊藤 亨⁽¹⁾ 東田 博文⁽²⁾ 八木 潔⁽³⁾
Akira Ito Hirofumi Higashida Kiyoshi Yagi

得津 昌宏⁽⁴⁾
Masahiro Tokutsu

要 旨

近年、特に家電製品において「ファジー制御」という言葉がよく聞かれるように、その応用技術はかなり広い範囲に展開されつつある。

一方、自動車における排ガス浄化性、低燃費、安全性に対する要求はとどまる所を知らない。最近のマイコンを用いた制御はその複雑さからメモリ容量は増える一方であり、コストとの兼ね合いからメモリ容量を多く必要としない制御方法の開発が、重要な課題になっている。

そこでこの問題を解決する手段として、前述の「ファジー制御」を用いたエンジン制御（特に今回はISC：アイドル回転数制御）の開発を行い、非常に効果的な結果を得られた。

本稿では、その制御構成、評価方法とその結果について紹介していく。

Recently in consumer electronics, "Fussy control system based on Fuzzy theory" has been popular and its applied technologies have extended over wide area.

In the meanwhile, demands for the reduction of exhaust emission, fuel economy and safety of the car are increasing unlimitedly.

Since the recent system needs a large memory capacity of micro-computer controlled systems because of the complexity of control system, it has been an important subject to develop a control system using less memory capacity from view point of cost.

To solve the problem, using "Fussy control", we have developed the engine control and got effective results.

This paper introduces the configurations of control system, evaluation methods and their results.

1. はじめに

1970年代後半の排出ガス規制の対策を機に飛躍的な発展を遂げた自動車制御であるが、中でもエンジン制御は排ガスの浄化性、低燃費、快適性、安全性とさまざまな方面からの要求は留まる事を知らず、各メーカ共新しい制御の開発に力を注いでいる。

そのような背景の中で当社は、最近著しく応用され始めた「ファジー制御」をエンジン制御の中の、アイドル回転数制御（ISC: Idle Speed Control）に用いる事を検討した。

ISCとは、アイドル状態におけるエンジン回転数を、予めマイコンのメモリ内に記憶されている目標回転数になるように制御することで、その目的は、① 経時変化によるアイドル回転数のずれや、負荷による回転変動等を検出し、理想の目標回転数に制御する事によって、メンテナンスフリーを図る事、② 目標回転数を低く設定することで、燃費の向上が実現できる事、である。

これらの事を実現させる従来の方法は、目標回転数と実際のエンジン回転数の偏差の大きさによって吸入空気量を決定する積分制御が主流であったが、この方法はそれぞれの車両やエンジンに対応するマッチング工数が多いことや、エンジン回転数の安定性を重要視するという考えから制御定数のゲインを小さめに設定してあるため、回転数の収束が遅いという問題があった。

そこで、先に述べた「ファジー制御」を応用して、これらの問題の解決と、制御性能の向上を検討した結果、良好な成果が得られたので、その概要について報告する。

2. アイドル回転数制御（ISC）

2. 1 従来のISC制御の概要

ISC制御全体のシステム構成図を図-1に示す。また、ISCのブロックダイアグラムを図-2に、各センサの機能を表-1に示す。

エンジンコントロールコンピュータは、各センサからの信号により、その時の最適な目標エンジン回転数を算出し、ISC-VALVEに対してその回転数になるように、バルブに開度信号を出力し、バイパスを通過する空気量を制御する。そして、その制御方法はエンジン状態によって異なり、ECUは最も適した方法を選択する必要がある。

以下にその一部を紹介する。

1) 始動、暖機時制御

エンジン始動時、および始動後一定時間、吸入空気量を多めに設定し、始動性の向上と始動後の安定性を図る。

また、エンジン暖機時にはエンジン冷却水温に応じて空気量を変え、暖機促進を図る。

2) 見込み制御

オートマチック（A/T）車において、シフトレバーを、Nレンジ→Dレンジ、Dレンジ→Nレンジに切り替えたときや、エアコンスイッチを入れたり切ったりした時、エンジンにかかる負荷が変化し、エンジン回転数は落ち込んだりオーバーシュートしたりする。特に、エンジンに対する負荷が急激に大きくなった時にはエンストを起こす可能性がある。

そこで、これらの状態を信号変化によって検出した場合には、今から変化するであろう負荷の分だけバルブ開度を見込み変化させ、回転数変動を抑える。

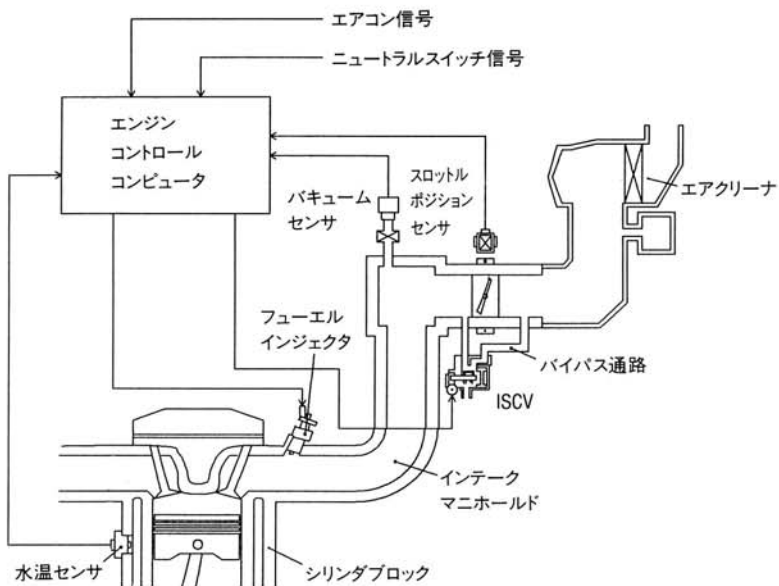


図-1 ISC制御システム構成図
Fig.1 ISC system configuration

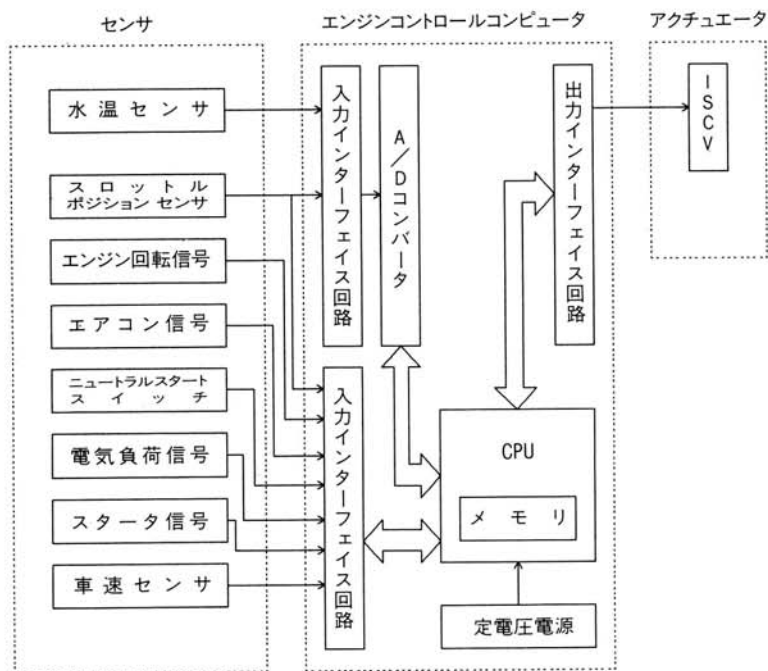


図-2 ISCのブロックダイアグラム
Fig.2 ISC block diagram

表1 I S Cに用いる周辺機器とその機能

装 置 名		機 能
セ ン サ	エンジン回転センサ	エンジン回転数を検出する
	スロットルポジションセンサ	スロットルが全閉状態であることを検出する
	水温センサ	エンジン冷却水温を検出する
	スタータ信号	スタータ作動中であることを検出する
	エアコンスイッチ	エアコンの作動状態を検出する
	車速センサ	車速を検出する
	ニュートラルスタートスイッチ (A/T車)	ミッションのシフト位置を検出する
	電気負荷信号	電気負荷を検出する
アクチュエータ		スロットルバルブをバイパスして流れる空気量を制御する
エンジンコントロールコンピュータ		各センサからの信号により目標回転数を決定し、エンジン回転数に応じた制御信号をI S C Vへ送り、アイドル回転を目標回転数に保つ

3) 回転数フィードバック制御

スロットルバルブ全閉時のエンジン回転数と目標回転数との間に偏差が生じると、その偏差に応じてI S C Vの開度を変化させ、アイドル回転数を目標回転数に近づける。目標回転数は、シフト位置 (A/T車)、エアコンスイッチのON、OFF等により変わる。目標回転数の一例を表-2に示す。

2. 2 従来のI S Cの問題点

上で述べた項目の内、回転数フィードバックの従来の制御ブロック図を図-3に示す。

表2 目標回転数 (NT) の例

トランス ミッション& レンジ エアコン	M/T		A/T	
	OFF	ON	OFF	ON
電気負荷OFF	650	900	700	900
電気負荷ON	750	900	750	900

NTは目標回転数、NEはエンジン回転数、Eは目標回転数とエンジン回転数との偏差で、式(1)で表される。

$$E = NT - NE \cdots \cdots (1)$$

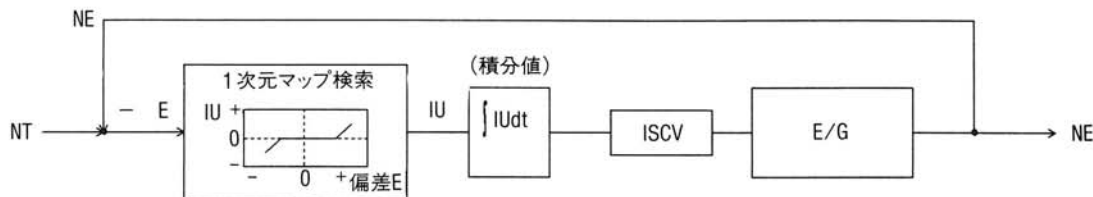


図-3 従来の回転数フィードバック制御 (従来I S C) の制御ブロック図

Fig.3 Control block diagram of conventional I S C

また、IUはISC Vの制御量（積分値）である。このフィードバック制御は、1入力1出力の制御系であり、入力偏差E、出力はISC Vの制御量IUであり、IUを求めるため入力の偏差Eを計算して、1次元のマップから検索して求めている。

ところがこの方法によると、様々なエンジンの種類や状態に対して、すべてを満足する様な制御定数のマッチングは難しく、エンジン回転数の安定性を重要視する意味で、フィードバック定数のゲインを小さく抑え、またフィードバックをさせる領域も限定している。そのために以下の様な問題点がある。

①車両やエンジンの種類が変わるたびに制御定数を適合させる必要があり、マッチング工数が多い。

②上で述べたフィードバック制御は、PI制御（比例積分制御）であるため、エンジン状態の様々な変化に対して常に安定させる（即ちエンジン回転数をハンチングさせない）ためには、制御定数のゲインを下げざるを得ないため、エンジン状態が変化した時、目標回転数に対する実際のエンジン回転数の収束性（追従性）が悪い。

2. 3 ファジー制御の応用

そこでこれらの問題点を解決するために、車両やエンジンの種類が異なっても汎用性があり、エンジン状態の変化にも柔軟に対応できるファジー制御を回転数フィードバック制御に応用することを検討した。

「ファジー制御」という言葉は最近よく巷で耳にする言葉である。簡単に言えば、人間の操作方法や制御知識に基づく言語的な制御ルールによりその時々システム状態や目的に応じ、いわゆる「あいまい」な制御（しかし実際には、きめ細かな制御）を可能にする制御方式である。

3. ファジーISC

3. 1 ファジーISCの概要

図-4に、ファジー制御を応用した回転数フィードバック制御（ファジーISC）の制御ブロック図を示す。

NTは目標回転数、NEはエンジン回転数、Eは目標回転数NTとエンジン回転数NEとの偏差DEはエンジン回転数NEの時間的变化を表し、DEは式(2)で求められる。

$$DE = [NE(i) - NE(i-1)] / \Delta T \quad \dots\dots\dots(2)$$

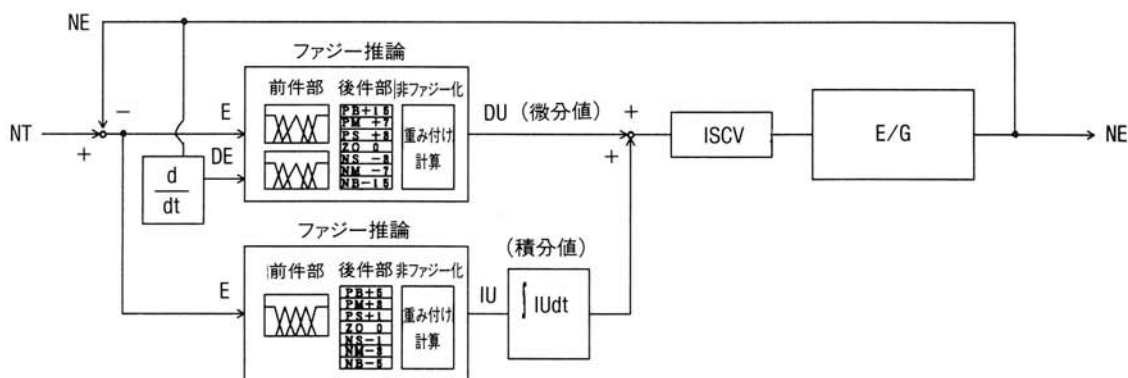


図-4 ファジー制御を応用した回転数フィードバック制御（ファジーISC）の制御ブロック図

Fig.4 Control block diagram of fussy ISC

またDUはISCVの制御量の内の微分値を、IUは同じく積分値を表す。そしてこの回転数フィードバック制御の方法は、

- (1) 1入力(偏差E) 1出力(積分値IU)と、
- (2) 2入力(偏差E、NEの時間的変化量DE) 1出力(微分値DU)

の2つの制御系でそれぞれ求まる積分値IUと微分値DUとの加算値をISCVの制御量としている。

この2つの制御系において、入力から出力を導くための手段として、ファジー推論のうち後件部を定数で定義する「簡略化ファジー推論法」を用いている。

以下に推論の方法について簡単に述べていく。

3. 2 メンバシップ関数(あいまい集合)

メンバシップ関数とは、制御ルールの状態(速い、遅い、大きい、小さい、等)の度合いを連続的に表す関数である。例えば「大きい」という入力に対し、どれだけ大きいか(大変大きい、少し大きい、等)の人間の表現を数値的に表す方法で、三角型、台形型、釣鐘型が良く用いられる。ファジーISCでは取扱の容易さや、制御上三角型と釣鐘型に差がないことから、三角型、および台形型を使用した。

図-5に、ファジーISC制御に使用したメンバシップ関数を示す。

3. 3 制 御 ル ル ル

制御ルールとは、メンバシップ関数によって求められた入力の状態から、要求されている出力を導き出すルールの事を言い、例えば「エンジン回転数の落ち込みが大きい」という入力に対して、「ISCVの開度を大きくしなさい」という答えが返ってくるように予め決めておいたルールの集まりのことである。

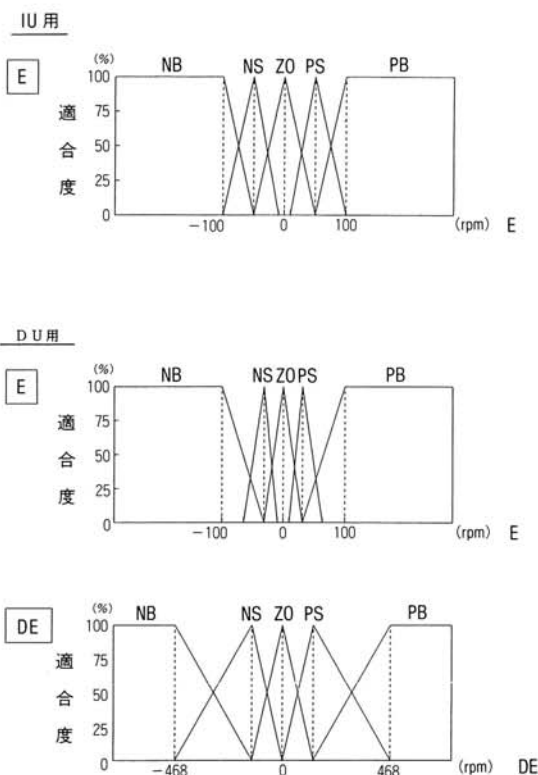


図-5 メンバシップ関数 (IUのルール用、DUのルール用)
Fig.5 Membership function (IU rule, DU rule)

ルール	前 件 部	後 件 部
ルール1	もしEが、PBならば、	IUをPBとする
ルール2	もしEが、PSならば、	IUをPSとする
ルール3	もしEが、ZOならば、	IUをZOとする
ルール4	もしEが、NSならば、	IUをNSとする
ルール5	もしEが、NBならば、	IUをNSとする

図-6 IU用制御ルール

Fig.6 Control rule for IU

ファジーISC制御ルールは、積分値(IU)用と、微分値(DU)用の2種類がある。

積分値(IU)の制御ルールを図-6に示す。制御ルールの前件部(入力)である偏差Eのメンバシップ関数5個に対して、5個の後件部(出力)とした。

DE \ E	PB	PS	ZO	NS	NB
PB	⑭ PB	⑮ PB	① PB	⑫ PB	⑮ PM
PS		⑯ PM	② PM	⑬ PS	⑰ ZO
ZO	⑥ PS	⑦ PS	③ ZO	⑧ NS	⑨ NS
NS	⑰ ZO	⑩ NS	④ NS	⑳ NS	
NB		⑪ NS	⑤ NM	㉑ NM	

図中の①～㉑は、ルールNo.を示す。

〔この場合は、縦軸、横軸が前件部、中のデータ〕
が後件部を表す。

言葉の意味

PB : POSITIVE BIG
PM : POSITIVE MEDIUM
PS : POSITIVE SMALL
ZO : ZERO
NS : NEGATIVE SMALL
NM : NEGATIVE MEDIUM
NB : NEGATIVE BIG

図-7 DU用制御ルール

Fig. 7 Control rule for DU

次に、微分値 (DU) の制御ルールを図-7に示す。

前件部 (入力) は、偏差 E、エンジン回転数 N の時間的変化量 DE のメンバシップ関数から成る 2 次元的なマップで表している。

また、後件部 (出力) は、E、DE の一方を ZO (ZERO) に固定した標準ルール (ルール 1 ～ ルール 9) と、エンジン回転数が目標回転数に近づいた時、エンジン回転数の安定を早くするためのルール (ルール 10 ～ ルール 13) を追加した。さらに、アンダーシュート量を制御しかつ耐エンスト性を向上させるため、ルール 14 ～ ルール 17 を追加した。さらに、オーバーシュート量を抑制するために、ルール 18 ～ ルール 21 を追加し、合計 21 ルールとした。

ここで例えばルール 1 は「もしも DE が正に大きく、かつ E がゼロならば、DU を正に少しだけ動かせ」ということを表していることになる。

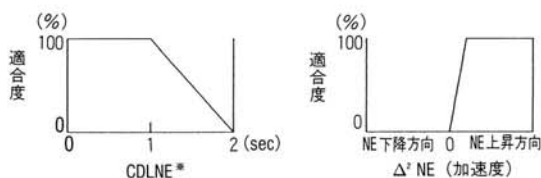
上に述べたルールは、入力が偏差 E と NE の変化量 DE であり、簡単に言えば「目標回転数から離れていれば大きく、NE の落ち込みが大きければ大きく制御せよ」という、いわばフィードバック制御の基本ルールと言えるが、ファジー ISC ではさらに、以下に述べる「ルール 22」を追加した。

大きな NE の落ち込みを検出した時には当然バイパス流量はかなり開き側に制御することになるが、制御遅れがあるために NE は、一度目標回転数をオーバーシュートする。そしてその時には NE は上昇しているために今度はバイパスを閉じ側に制御し、また NE はアンダーシュートをする、というふうに、最終的に目標回転数に収束するまでに何度かハンチングを起こしてしまうという問題があった。ルール 22 はこの問題を解決するために、DE (NE の変化量) がある一定値以上になった時点からの経過時間と、NE の 2 階微分値によるメンバシップ関数を作り、落ち込み後の NE の上昇を検出したときには制御量を減らし、オーバーシュートを抑えるという目的で設けられた付加的なルールである。

そしてこのルールを追加することで、ルール 22 が無いときに比べて NE の収束性が大幅に向上した。図-8 にメンバシップ関数を、図-9 にルール 22 を、図-10 にルール 22 の有り無しによる制御性能の比較を示す。

このルール 22 は、ある特定の条件が成立した時のみに有効となるルールであるが、従来の制御のように単純な付加的な制御ではなく、基本ルールとルール 22 の両方から推論した結果を後で述べる

「重み付け」によって、出力に変換するため実になめらかな出力特性が得られ、ファジー制御の優れた部分の一つだと言える。



※CDLNE: DE が一定値以上の時にクリアし、その後は一定時間毎に増加するカウンタ

図-8 ルール22のメンバシップ関数

Fig. 8 Membership function of rule 22

前 件 部	後 件 部
CDLNE ≤ 2 (sec) かつ、 $\Delta^2 NE$ が上昇方向の時は	NVB とする

NVB: NEGATIVE VERY BIG

図-9 制御ルール (ルール22)

Fig. 9 Control rule (rule 22)

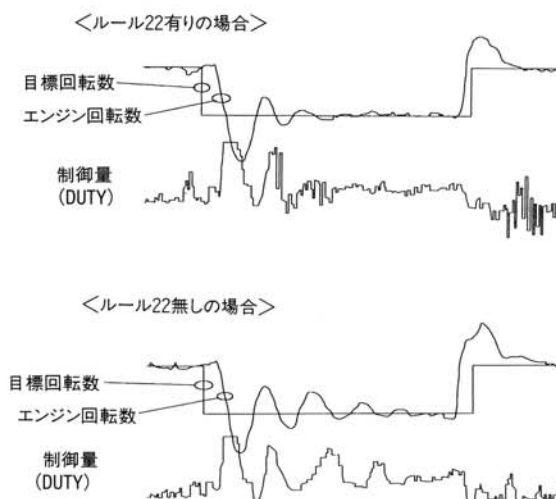


図-10 ルール22有り無しによる制御比較

Fig.10 Controlled results by rule 22

3. 4 非ファジー化

一般的にファジー推論形式としては、制御ルールの後件部をメンバシップ関数で定義するが、本ファジー推論では車載用であるという事を考慮し、プログラム容量を削減でき、処理速度も速いというメリットがあるという点で、後件部を定数で定義する方法で行った。図-11に積分制御IU、微分制御DUの非ファジー化定数を示す。

非ファジー化の演算は式(3)で表され、メンバシップ関数より求まる適合度を制御ルールより求めた後件部に対し重み付け計算を行っている。

後件部 (出力値) =

$$\frac{(\text{ルール1の後件部} \times \text{ルール1の適合度})}{\text{ルール1の適合度}} + \frac{(\text{ルール2の後件部} \times \dots)}{\text{ルール2の} \dots} + \dots + \frac{(\text{ルールnの後件部} \times \text{ルールnの適合度})}{\text{ルールnの適合度}} \dots \dots \dots (3)$$

ルールの適合度は、ルールの中の前件部にパラメータが2つ以上ある時は、小さい方の適合度をそのルールの前件部の適合度とする。

これまで述べたメンバシップ関数、制御ルールをもとに、積分値、微分値の入出力の関係を数値的に求め図示すると、図-12、図-13のようになる。(但し、図-13においてルール22は考慮していない場合である。)

図-4に示すファジーISCの積分値の入出力の関係は、入力(前件部)が1つであることから2次元のグラフになっているが、微分値の入出力の関係は、入力(前件部)が2つであり3次元のグラフになっており、入力のE、DEと出力の微分値(DU)の間に複雑な入出力関係が表されていることがわかる。

〈IUの後件部の非ファジー化定数〉

PB	+0.6	(%)
PS	+0.3	
ZO	0.0	
NS	-0.15	
NB	-0.3	

〈DUの後件部の非ファジー化定数〉

PB	+7.0	(%)
PM	+4.0	
PS	+1.0	
ZO	0.0	
NS	-1.0	
NM	-3.0	
NB	-7.0	

図-11 非ファジー化定数 (IU用、DU用)
Fig.11 Non-fussy coefficient of IU, DU

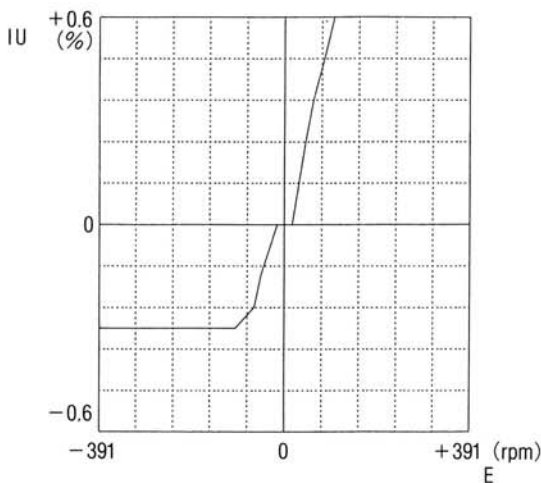


図-12 積分値 (IU) の入出力関数
Fig.12 Relation between input and output of IU

4. 評価結果

ファジー制御を応用した回転数フィードバック制御 (ファジーISC) と従来の回転数フィードバック制御 (従来ISC) について、制御性能

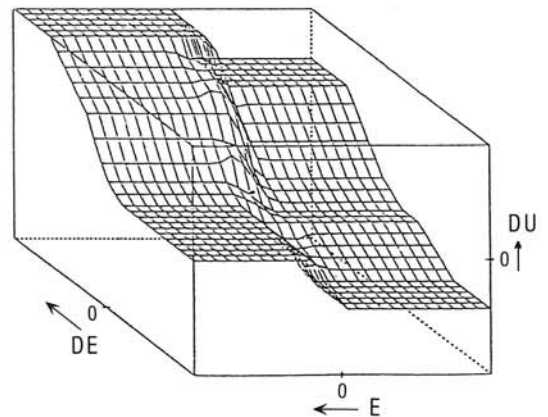


図-13 微分値 (DU) の入出力関数
Fig.13 Relation between input and output of DU

(特に収束性) と外乱に対する安定性の比較検討を行った。

4. 1 制御性能 (収束性)

制御性能の評価方法としては、ISCで最も問題となる負荷入り直後および負荷抜け直後のエンジン回転数の収束性によって判定した。

図-14に、従来ISCとファジーISCの各方式と、アイドル時各負荷入り直後のアンダーシュート量 (落ち込み量) との関係を示す。この図から判ることは、負荷の変動が入力信号によって予測出来る場合 (エアコン、シフト位置等は、コンピュータに入力が有り、現在の状態が認識できる) に関しては、従来ISCもファジーISCもアンダーシュート量に大差は見られない。それは、従来ISCでも負荷変動が検出できるものは予め適合された見込み量分の制御を行っているからである。しかし、例えばコンピュータがアイドル状態と判定する最大のアクセルの踏み込み状態から戻した場合等では従来の方法だと、エンジンにかかる負荷の量を予測することは難しく、ファジーISCの方がアンダーシュート量が大幅に少なくなっている。

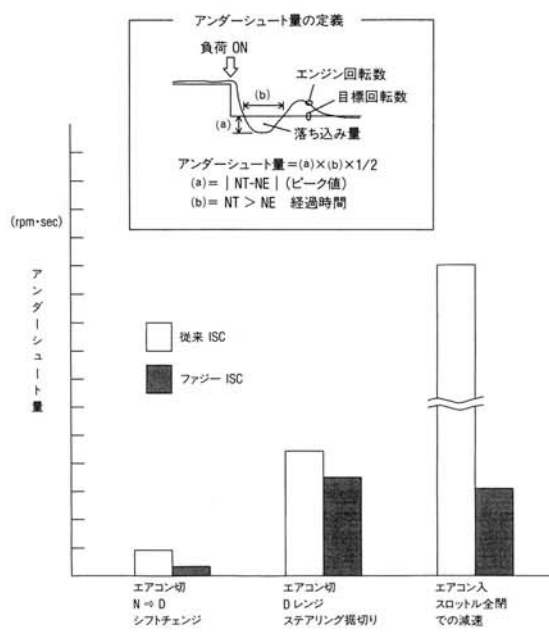


図-14 各ISC方式のアイドル時負荷入り時のアンダーシュート量
 Fig.14 Quantity of undershoot of ISC(load on)

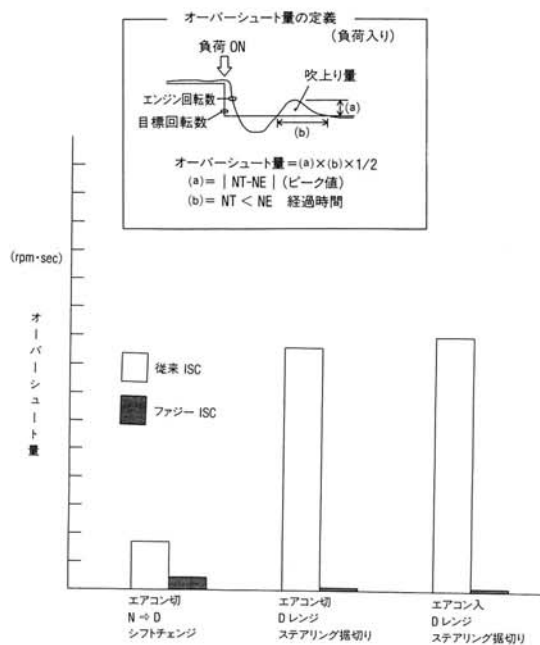


図-15 各ISC方式のアイドル時負荷入り時のオーバーシュート量
 Fig.15 Quantity of overshoot of ISC(load on)

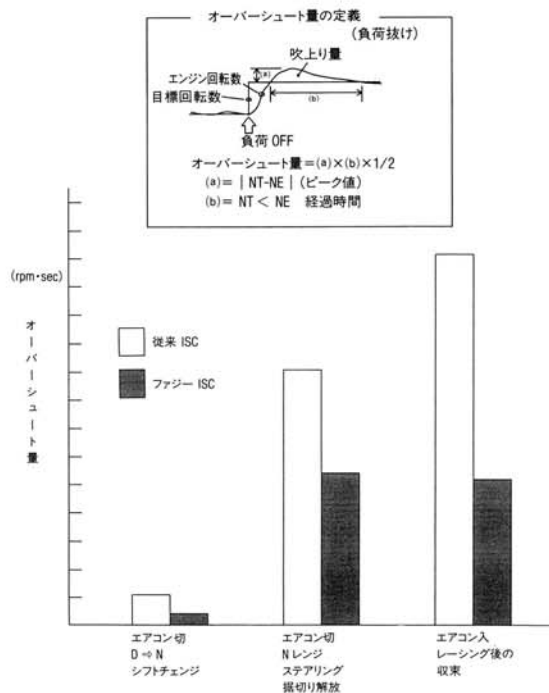


図-16 各ISC方式のアイドル時負荷抜け時のオーバーシュート量
 Fig.16 Quantity of overshoot of ISC(load off)

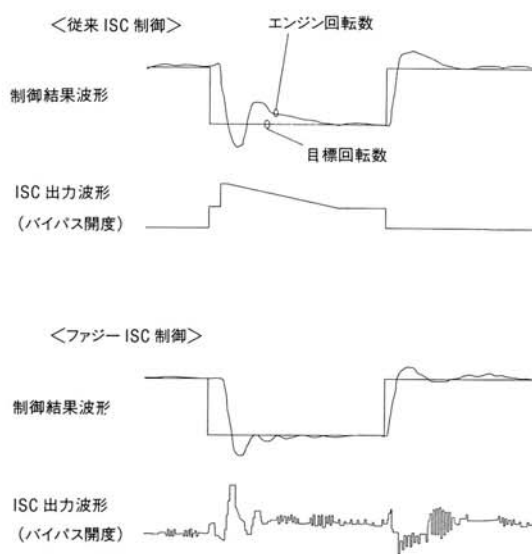


図-17 各ISC方式での制御波形と制御結果比較
 Fig.17 Shapes of control signal and controlled results of ISC

次に、図-15に従来ISCとファジーISCの各方式とアイドル時での各負荷入り直後のオーバーシュート量（吹き上がり量）との関係を示す。図から判るように、従来ISCに比べてファジーISCの方がオーバーシュート量が大幅に少ない。

次に、図-16に従来ISCとファジーISCの各方式とアイドル時での各負荷抜け直後のオーバーシュート量（吹き上がり量）との関係を示す。図から判るように、負荷抜け時のオーバーシュート量は、やはり従来ISCに比べてファジーISCの方がオーバーシュート量が少なくなっている。

以上の結果から、従来ISCに比較してファジーISCの方が制御性能（収束性）が優れていることがわかった。

図-17に従来ISC、ファジーISCの実際の目標回転数とエンジンの動きを示す。

4. 2 外乱に対する安定性

外乱に対する安定性の評価方法としては、空燃比を希薄側に設定することによってエンジンの発生トルクを変化させて外乱を起こし、その時のエンジン回転数の振れ具合（ハンチング幅）を測定する事で判定した。即ち外乱要素を不安定（空燃比を希薄）にした時にエンジン回転数の振れ具合が小さい程、安定しているといえる。

図-18に、従来ISCとファジーISCの各方式と前述の外乱に対するエンジン回転数のハンチング幅の関係を示す。

図から判るように、空燃比がある一定値までの外乱に対して従来ISCとファジーISCにおいてはエンジン回転数のハンチング幅に差はないが、空燃比が希薄側に移行するにつれ、従来ISCに比べてファジーISCの方がエンジン回転数のハンチング幅が小さくなっている。

従って、外乱に対する安定性についても、ファ

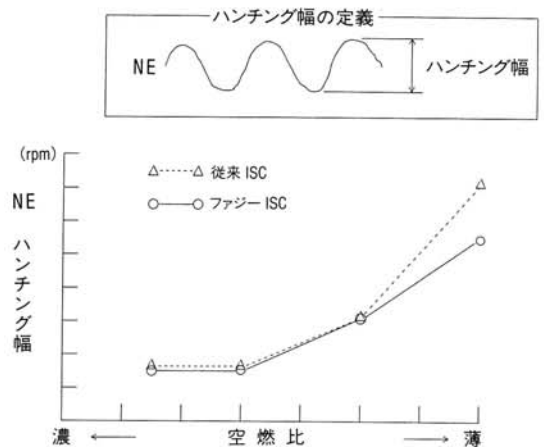


図-18 各ISC方式における外乱（空燃比）とエンジン回転数のハンチング幅との関係

Fig.18 Relation between air fuel ratio hunching width of engine rotating number of ISC

ジーISCの方が従来のISC制御よりも優れていることが確認できた。

5. おわりに

今回、アイドル回転数制御装置の回転数フィードバック制御にファジー制御の応用を検討した結果、従来方式の回転数フィードバックに比べて制御性能の改善が実現できた。

また、ファジー制御の特徴である「言語的表現」による制御アルゴリズムによって、従来制御の課題となっていたマッチングに要する工数の削減にも期待が持てたと言えよう。

ところで、今回の評価では特に性能を重視したが、製品化を考えるとソフトウェアのメモリ容量も重要な項目であり、それに対応するためにファジーISCと並行して、ファジー推論によって得られる結果を予めメモリ内の定数として記憶させておくという方法も検討中である。

この方法であれば、推論部分のロジックプログラムが不要になり、メモリ容量の削減と実行時間の短縮が可能になる。

以上、概略のみを説明してきたが、まとめとして言えることは、従来からのシステムを含めたハード的な変更は全くせずに、従来と比較して性能の向上を実現することが出来たと言える。

今回は、ファジー制御をエンジン制御に初めて応用を試みたということで、まずISC制御だけであったが、得られた結果から十分応用が可能ということが判明したため、今後も他のエンジン制

御にファジー制御の応用を検討していきたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 菅野：ファジィ制御 日刊工業新聞社(1988)
- 2) 寺野、浅居、菅野：応用ファジィシステム入門
オーム社(1989)
- 3) トヨタ カムリ新型車解説書(1990)