

博士論文

内燃機関の制御のための
対象の特徴に基づく
微分フィルタの設計と実装

青野俊宏

目次

第1章	序論	3
1-1	内燃機関制御の発展	3
1-2	内燃機関における信号処理	5
1-3	燃焼状態推定	7
1-3-1	空燃比制御のために推定すべき燃焼状態	8
1-3-2	点火タイミング制御のために推定すべき燃焼状態	10
1-3-3	燃焼状態推定のための信号処理	12
1-4	ノック検知	15
1-5	OBD	18
1-6	アクチュエータの個体差検知	19
1-7	空燃比センサの信号処理	22
1-8	内燃機関における信号処理の課題と本研究のとりくみ	23
第2章	基本成分の倍周波数成分を強調する微分フィルタ	29
—	クランク角センサからの燃焼トルクの推定—	29
2-1	はじめに	29
2-2	内燃機関回転速度からの燃焼トルク推定方法	30
2-3	燃焼トルクの推定結果	36
2-4	IMEPの推定結果	40
2-5	クランク角センサ角度分解能による燃焼トルク推定性能への影響	43
2-6	おわりに	46
第3章	平坦な周波数特性をもつ微分フィルタ	48
—	微分フィルタの周波数特性に基づく空燃比センサの診断—	48
3-1	はじめに	48
3-2	空燃比センサの劣化検出の考え方	49
3-3	フィルタの設計と最適化	52
3-3-1	フィルタの設計	52
3-3-2	フィルタのゲインの脈動の低減	54
3-3-3	フィルタの長さや次数の最適化	54
3-4	空燃比センサの劣化識別性能の評価	58
3-5	マイコン実装性の評価	59
3-6	おわりに	60
第4章	代数的な特徴に着目したフィルタの設計	61
—	2つのフィルタの組合せによる失火と残響振動の識別—	61

4-1	はじめに.....	61
4-2	2つのフィルタによる失火と残響振動の識別.....	62
4-3	2つのフィルタの設計.....	67
第5章	クランク軸振動と内燃機関の加減速にロバストな失火検出方法.....	79
5-1	はじめに.....	79
5-2	従来の失火検出の方法.....	79
5-3	クランク軸振動解析.....	82
5-5	失火検出フィルタ.....	87
5-6	おわりに.....	91
第6章	製造ばらつき低減のためのマイクロ秒レベルの信号処理.....	93
6-1	はじめに.....	93
6-2	閉弁検知に基づく個体差の補正.....	94
6-3	量産マイクロコンピュータによる閉弁検知の実現.....	96
6-3-1	FIRフィルタの計算負荷.....	96
6-4-2	AD変換.....	98
6-4-3	エイリアシングの低減.....	100
6-4-4	RH850を用いた閉弁検知.....	100
6-5	閉弁検知の精度.....	101
6-6	おわりに.....	102
第7章	結論.....	104
	謝辞.....	107
	参考文献.....	108

第1章 序論

1-1 内燃機関制御の発展

19世紀末に、オットー、ダイムラー、マイバッハが4ストロークサイクルの内燃機関の概念を作り上げ、これをダイムラー、マイバッハ、ベンツが車両に搭載して以来、内燃機関は自動車等の動力源として、世界の人々の生活の向上と産業の発展に大きな貢献をしてきた。一方で、その普及に伴い、大気汚染、地球温暖化の原因としての負の側面も認識されてきた。

1975年にマスキー法が施行されたところを境に、自動車の排気中の有害物質に対する規制が米国、欧州、日本で強化された。例として、日本における排気中の有害物質の許容値を Fig.1-1 に示す¹⁾。強化された排気規制に、それまでのメカニカルな制御では対応できなくなり、内燃機関に電子制御が導入された。内燃機関の制御の大きな流れを Fig.1-2 を用いて説明する。

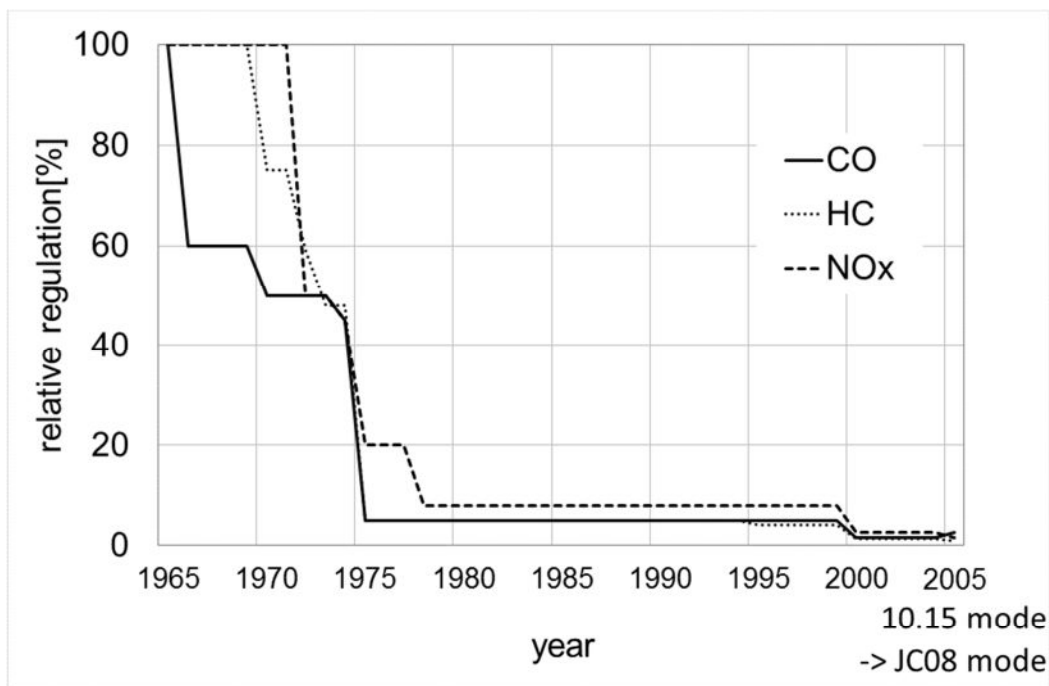


Fig.1-1 Regulation for emission in Japan¹⁾

内燃機関が排出する有害物質を低減する為には、空気と燃料の割合(空燃比: 空気質量/燃料質量)を精密に制御する必要がある。空燃比が高いと NOx の排出量が増え、低いと未燃炭化水素 HC の排出が増える。規制導入以前の1960年代は、吸気管の負圧によって燃料を

吸い上げ、空気と混合するキャブレタ式によって燃料と空気の混合気を生成していた。しかし、排気規制導入の社会気運が高まると、規制をクリアするために、内燃機関の回転数や負荷に応じて燃料噴射量を柔軟に変えられるような電子制御噴射方式が1970年前から採用されはじめた。燃料噴射量は、吸気管内の圧力に基づいて算出されていたが、大気圧や温度の変動による影響を受けるので、吸入空気の質量が直接計測できるようにエアフローセンサが1970年代前半から導入された。吸気量を精密に計測し、これに対する燃料噴射量の目標値を正確に算出できても、インジェクタの個体差、経年劣化により、目標値に対する噴射量には誤差が生じる。更なる空燃比制御の精度向上には、O₂センサで排気から計測した空燃比に基づいて燃料噴射量をフィードバック制御することが1980年代に必要なになった。このO₂センサは、内燃機関を起動してから活性化するのに時間がかかり、この間はフィードバック制御ができないので、前回の補正値を記憶しておき、これに基づき内燃機関起動直後の制御を行う学習制御も1980年代前半に導入されている。

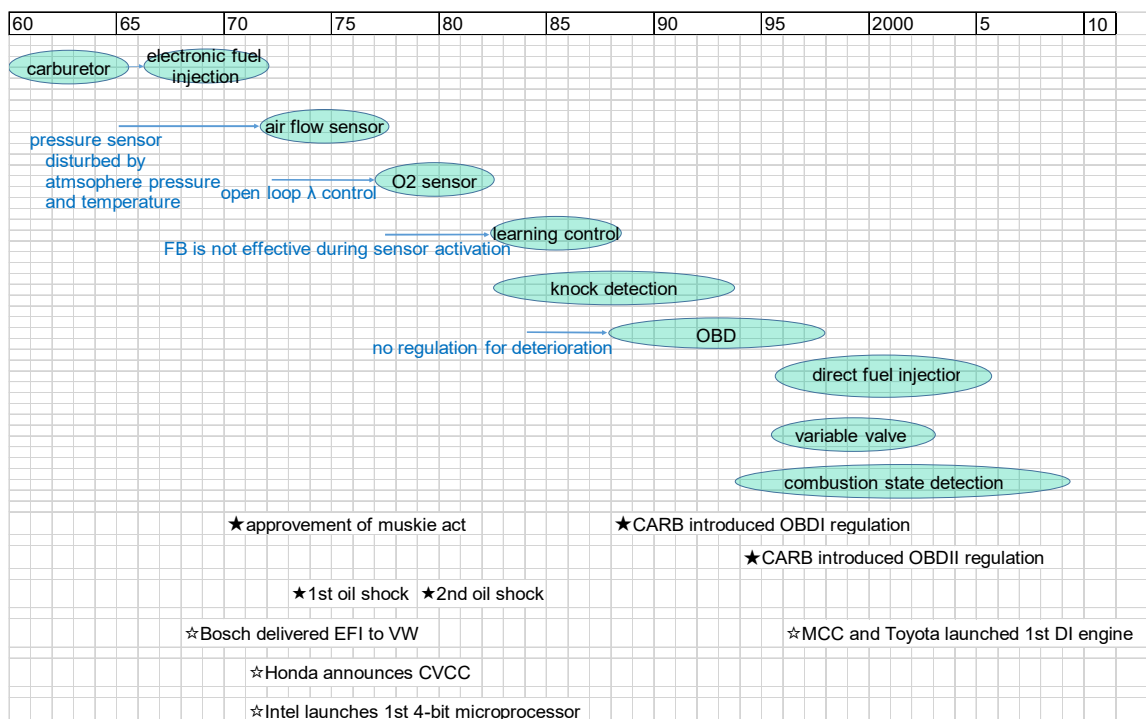


Fig.1-2 Innovation in gasoline engine control

排気中の有害物質の低減のための取り組みの一方で、内燃機関の効率を向上させるための取り組みもなされてきた。内燃機関の効率は、点火タイミングがMBT(Minimum advance for the Best Torque)に近づくように早くすると向上するが、早くしすぎるとノックという異常燃焼がおこる。1980年代の前半からノックセンサによりノックを検出し、ノックが発生するまで点火タイミングを進めるといった制御が開発され、普及してきた。

このように、厳しくなる排気規制や効率向上への要求に対応して内燃機関制御の電子化

が進展したが、排気規制は新車の段階の内燃機関性能を規制するのみで、販売後の劣化や故障には対応していなかった。こうした販売後の劣化や故障に対応するために、エンジンコントローラに、内燃機関の動作の不具合を自己診断する OBD(On Board Diagnosis:車載故障診断)を搭載することを求める規制が 1988 年に米国カリフォルニア州で導入されたのを皮切りに²⁾、2000 年には欧州³⁾、日本⁴⁾でも導入されている。この規制も、内燃機関の電子制御を発展させる契機となっている。

さらに、1996 年に市場投入されたガソリン直噴内燃機関や、2000 年前後に急速に普及、高度化した可変動弁機構等が内燃機関をさらに複雑化し、これによって電子制御も絶え間なく進化している。

また、1990 年代ごろからは、内燃機関の排出する有害物質の更なる低減と、HCCI(Homogeneous-Charge Compression Ignition:予混合圧縮着火)^{5,6)}のような新しいコンセプトの内燃機関の開発への関心が高まり、気筒内の熱発生タイミング、速度を精密に制御したいという要求がおこり、燃焼圧を計測する筒内圧センサ等による燃焼状態の検知に基づく制御の研究が盛んになってきた。

これによって、内燃機関制御のソフトウェアの規模は Fig.1-3 に示すように増大して、これに関する研究が活発化されてきた⁷⁾。これに伴い、内燃機関の信号処理の開発も盛んになってきている。次節では、この信号処理の状況についてサーベイする。

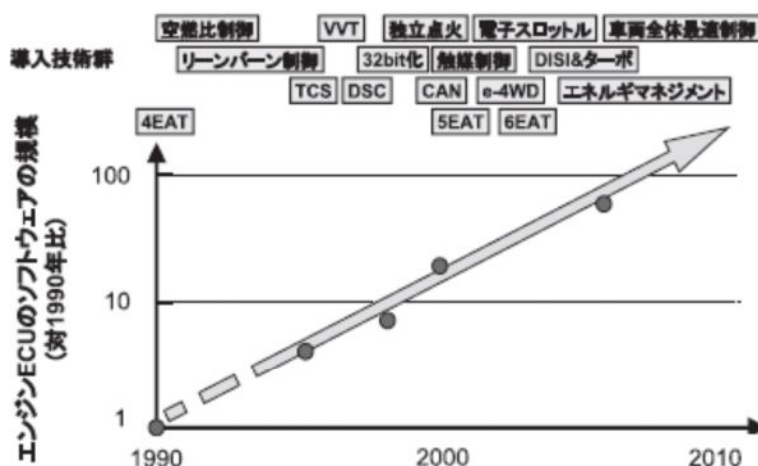


Fig.1-3 Increase of engine software volume⁷⁾

1-2 内燃機関における信号処理

Fig.1-4 は、キーワード「信号処理」または「フィードバック制御」を含む、SAE に掲載された内燃機関(ICE: Internal Combustion Engine)を対象とする論文の数を示す⁸⁾。2010 年以降は、電気自動車(EV: Electric Vehicle)、先進運転支援システム(ADAS: Advanced Driver Assistance System)などの開発対象の増加に伴い論文数はどちらも減少している

が、長期的な増加傾向が見られる。

興味深いのは、「信号処理」、「フィードバック制御」のそれぞれを含む論文数の比である。「信号処理」に関する論文数は、「フィードバック制御」に関する論文の約 1/4 である。

IFAC, IEEE, IEEJ, SICE, CCC などの計測・制御を扱う学会では、モデルベース制御等の内燃機関への適用例の増加により内燃機関の「制御」に関する論文が増えてきたが、それと比較して内燃機関の「信号処理」に関する論文は増加していない。例えば、中国で開催された 2015 年 SICE 年次会議では、内燃機関を対象とした信号処理を含むセンシングについての論文は 1 件のみであった⁹⁾。

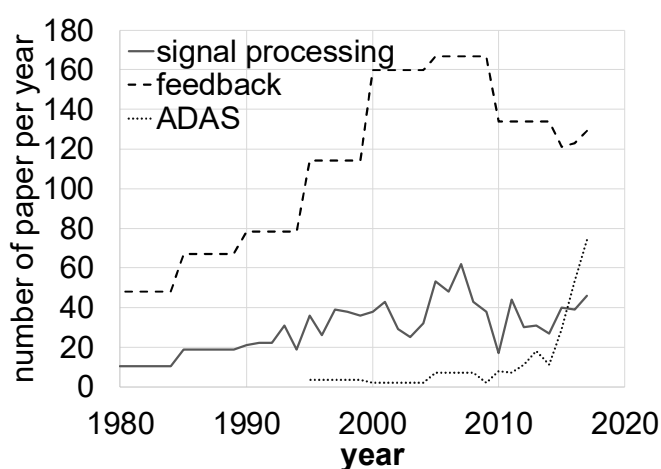


Fig.1-4 Trend of the number of the published papers⁸⁾

Table1-1 Number of categorized papers about signal processing published in SAE from 2011 to 2017⁸⁾

category	paper number
combustion state estimation	22
knock detection	12
OBD	8
production deviation detection	3
air fuel ratio estimation	2

Table 1-1 は、2011 年から 2017 年にかけて SAE で発表された内燃機関の信号処理に関する論文を分類した結果である⁸⁾。

最も多いのは、燃焼状態推定 (combustion state estimation) に関する論文である^{10~32)}。最近では、CO₂ 排出量低減と排出ガス浄化の手段として EV³³⁾、HEV (Hybrid Electric Vehicle: ハイブリッド電気自動車)³⁴⁾を集めているが、内燃機関の効率・排気の改善はいまだ強く求められている。内燃機関の効率・排気の改善のためには、空燃比と点火タイミング

の精密な制御が必要である。これまでは、排気ガス中の O_2 イオン濃度から空燃比を推定して空燃比を目標値に保つように噴射量をフィードバック制御していた。さらなる制御の精密化のために、燃焼により熱が発生するタイミングや速度といった燃焼状態パラメータを、燃焼圧やクランク軸回転速度から推定して、空燃比と点火時期を調整する研究が注目されている^{16, 19, 21, 28)}。

2 番目に多いのは、ノック検知(knock detection)に関する論文である^{35~46)}。点火時期の進角は内燃機関の燃焼効率を向上させる一方、ノッキングと呼ばれる異常燃焼を発生させ、シリンダブロックに騒音や損傷を引き起こす。そこで、燃焼圧やシリンダブロックの振動からのノック検出に基づいて、ノッキングが発生する直前の最も効率のいい点火時期を実現する制御が盛んに研究されている。

3 番目に多いのは OBD である^{47~54)}。排気規制導入当初は、新車の排気制御性能を規制するのみであったが、これだけでは経年劣化が規制の対象外となってしまう。そこで、エンジンコントローラには、内燃機関の排気制御性能を監視し、故障が検出されると、運転者に知らせ、修理を促す機能が搭載されている⁵⁵⁾。信号処理の適用先として、世界の自動車メーカ、サプライヤ、欧米の大学で研究されてきた。

内燃機関制御の今後のトレンドを示すものとして、まだ普及途上ではあるが、アクチュエータの個体差検知(production deviation detection)に関する論文が見られる^{56~58)}。内燃機関効率向上のため、ディーゼルエンジンで普及している多段噴射が火花点火内燃機関に適用され始めた^{59~61)}。圧縮着火のディーゼルエンジンでは、火花着火が行われなため、1行程の燃料噴射を複数回に分割し(多段噴射)、熱の発生を制御している⁶²⁾。同様の多段噴射を、火花点火内燃機関でも採用したいというニーズがある。多段噴射を実現するためには、1ショット当たりの噴射量を低減する必要がある。インジェクタの個体差に起因する噴射量のばらつきが大きいと、噴射量の低減が制限される。個体差の低減にはコストがかかるので、個体差低減の代わりに、それを検出し制御で補正する技術が量産エンジンコントローラに導入される動きがある⁵⁹⁾。

次節以降は、これらの信号処理の対象のそれぞれについて、信号処理の目的と信号処理の方法についてサーベイした結果をまとめる。

1-3 燃焼状態推定

ここでは、内燃機関の制御方法を概説し、この制御を効率化するために何を検出し、検出した結果を何に使うかについて述べる。まず、内燃機関の一般的な動作を説明し^{63, 64)}、燃焼状態推定に基づいて何を制御するのかを説明する。

Fig. 1-5 は、内燃機関の構成の概略を示す。内燃機関は、ピストンが下降することによりシリンダ内に空気を取り込み、取り込んだ空気に燃料噴射装置で燃料を噴射し、燃料と空気の混合気に点火プラグで着火し爆発させ、爆発によるエネルギーでピストンを往復運動させ

る。この往復運動は、コネクティングロッド等からなるリンク機構でクランク軸の回転運動に変換され、自動車を動かす駆動力となる。

空気は、エアクリーナで濾過され、スロットルで流量を調整され、コレクタ、吸気ポートを経て、シリンダに流入する。エアクリーナとスロットルの間には、エアフローセンサがあり、内燃機関に取り込まれる空気の量が計測される。

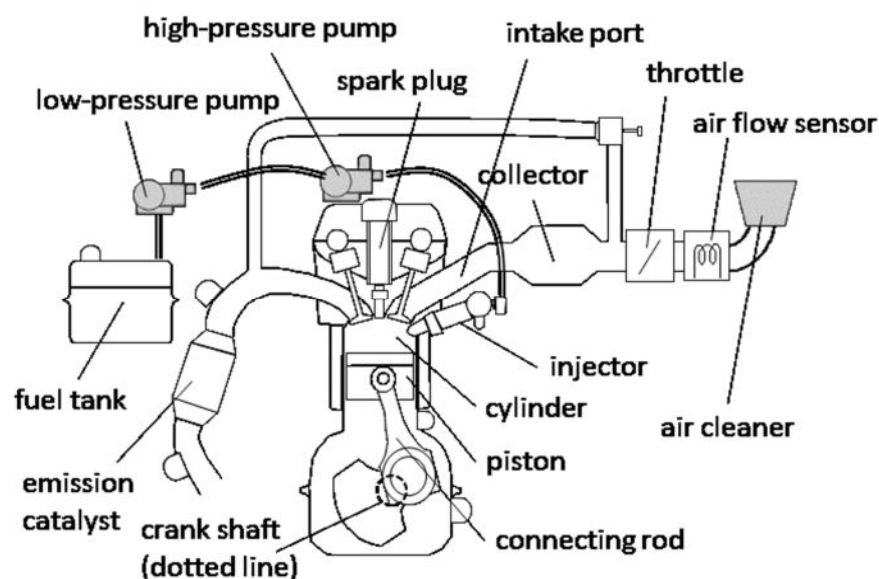


Fig.1-5 Configuration of engine components

一方で、燃料タンク内の燃料は、低圧ポンプで低圧配管に送られ、低圧配管の燃料は高圧ポンプで高圧配管に送られ、高圧配管内の燃料は高圧に保たれる。高圧配管にはインジェクタが取り付けられ、インジェクタ内のソレノイドに流す電流を制御することで、燃料の噴射量が制御される。

内燃機関では、気筒に取り込まれた空気に燃料が噴射されることで混合気が形成され、この混合気が点火により燃焼し、燃焼により生成された熱エネルギーが回転運動に変換される。このような内燃機関での制御対象は3つある。①気筒に取り込まれる空気量と②燃料噴射量により制御される空燃比と、③点火タイミングである。このうち、①はドライバのアクセル操作により主に制御される。フィードバックにより制御されるのは、主に②と③である。

1-3-1 空燃比制御のために推定すべき燃焼状態

まず、1つ目の制御対象、空燃比制御のために推定すべき燃焼状態について述べる。従来の空燃比制御では、排気触媒を最も高い効率で動作させるため、空燃比を14.7に保つように制御してきた。しかし、近年の地球温暖化防止のためのCO₂削減の社会的要求を満たす

ため、空燃比をより大きくしようという試みがなされている⁶⁵⁾。

Fig. 1-6 の線“fuel consumption”に示すように、内燃機関の燃費は一般に空燃比が大きいほど低減する。この図では空燃比 19~20 で最も燃費が良く、それ以上空燃比が大きくなると燃費が悪化しているが、これは空燃比が大きくなることによって起こりやすくなる失火により燃料が未燃のまま排出され、燃料のロスが生じるからである。一方で、空燃比がある値(この図では 18~19)よりも大きくなると燃焼の安定性が急に悪化し、このことは、Fig. 1-6 の“CPi#1~#4, CPi Total”に示されるように、燃焼エネルギー IMEP(Indicated Mean Effective Pressure : 図示平均有効圧)⁶⁴⁾のばらつき CPi の増加に現れる。燃焼が不安定になると、発生する燃焼エネルギー IMEP が変動するため乗り心地が悪くなり、さらに未燃燃料の排出にもつながるので、大気汚染を引き起こす可能性がある。

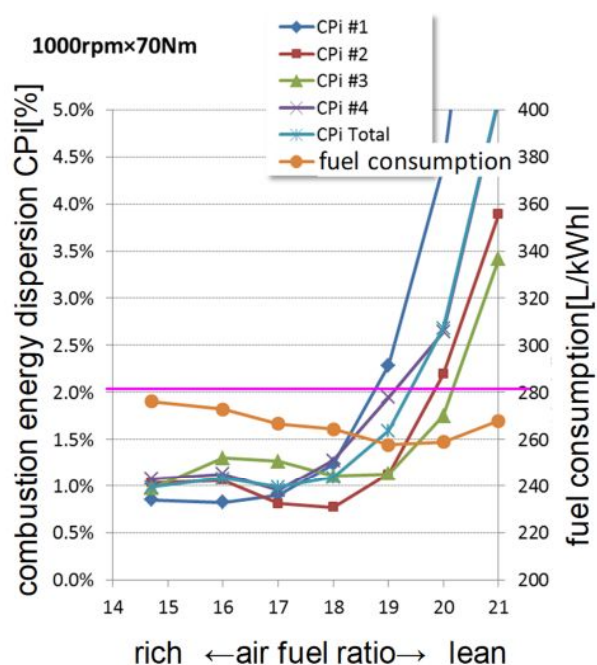


Fig.1-6 Effect of air fuel ratio to combustion stability and fuel consumption

そこで、燃焼ばらつき CPi が急に増加する空燃比のぎりぎり手前を目標にして空燃比を制御したい。この空燃比は内燃機関個体によってばらつくのみでなく、気筒によるばらつきや、内燃機関回転数・負荷等の運転条件によってもばらつくので、事前に実験により適合した目標空燃比によりフィードフォワード制御しようとする必要はある。最近の CO₂ 排出量規制の強化⁶⁶⁾、自動車メーカーの販売競争の激化により、このマージンを低減して、より燃費を低減しようという動きが出てきている。そのためには、爆発工程ごとの燃焼エネルギー検出値のばらつき CPi に基づいた空燃比フィードバック制御や、燃焼安定性と燃焼速度に相関があることに着目して、Fig. 1-7 に示すような燃焼により発生する熱量

のプロファイルから算出された一定割合の熱量 ΔQ が発生する期間 $\Delta\theta$ から推定できる熱発生速度 $\Delta Q/\Delta\theta$ に基づく F/B 制御が望ましい⁶⁷⁾。このように、空燃比制御のために燃焼エネルギー IMEP のばらつき CPi や、熱発生速度 $dQ/d\theta$ を推定することが求められる。

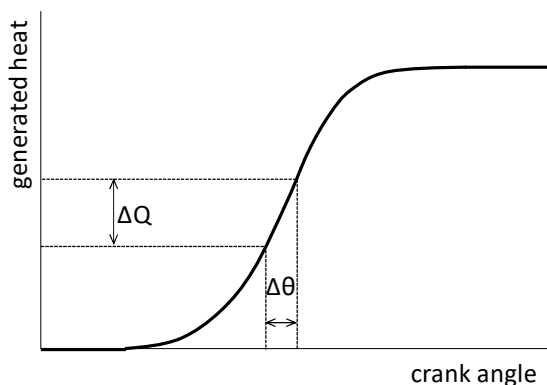


Fig.1-7 Definition of heat release rate $dQ/d\theta$

1-3-2 点火タイミング制御のために推定すべき燃焼状態

次に、2 つ目の制御対象である点火タイミングの制御のために何を検出するかを考える。

Fig.1-8 で示すような気筒で発生した爆発によりピストンを押す燃焼圧 P_{comb} は、ピストンとクランク軸の間のリンク機構によりクランク軸の回転トルク τ_{comb} に変換される。これらの関係は、クランク角 β に依存し、

$$\begin{aligned} \tau_{comb} &= \frac{P_{comb} A_{cyl} R \sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha} \\ &= P_{comb} A_{cyl} R \frac{\sin \alpha \cos \beta + \sin \beta \cos \alpha}{\cos \alpha} \\ &= P_{comb} A_{cyl} R \left\{ \sin \beta + \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\cos \alpha} \right\} = P_{comb} A_{cyl} R \left\{ \sin \beta + \frac{\frac{R}{l} \sin \beta \cos \beta}{\sqrt{1 - \frac{R^2}{l^2} \sin^2 \beta}} \right\} \dots\dots\dots(1-1) \\ &= P_{comb} A_{cyl} R \sin \beta \left\{ 1 + \frac{R \cos \beta}{\sqrt{l^2 - R^2 \sin^2 \beta}} \right\} \end{aligned}$$

で算出できる⁶⁸⁾。

Fig.1-9 は、燃焼圧 P_{comb} がコネクティングロッド等のリンク機構を通してクランク軸を回転させる燃焼トルク τ_{comb} に変換される効率 τ_{comb}/P_{comb} を示す。式(1-1)の両辺を P_{comb} で割ってもわかるように、この効率はクランク角 β に依存することを Fig.1-9 は示しており、クランク角 β が 70° 付近で最も燃焼圧から燃焼トルクへの変換効率 τ_{comb}/P_{comb} が高い。そこで、燃焼圧のピークをこの角度に近づけるように点火タイミングを早くしたい。そこで、燃

焼圧がピークになるタイミング θ_{pmax} を検出し、この検出値と目標の比較に基づいてフィードバックにより点火タイミングを制御する。

このように、内燃機関の制御は、主に空燃比と点火タイミングの制御によって行われ、そのためには、燃焼エネルギー、熱発生速度、燃焼圧のピーク、を検出したい。

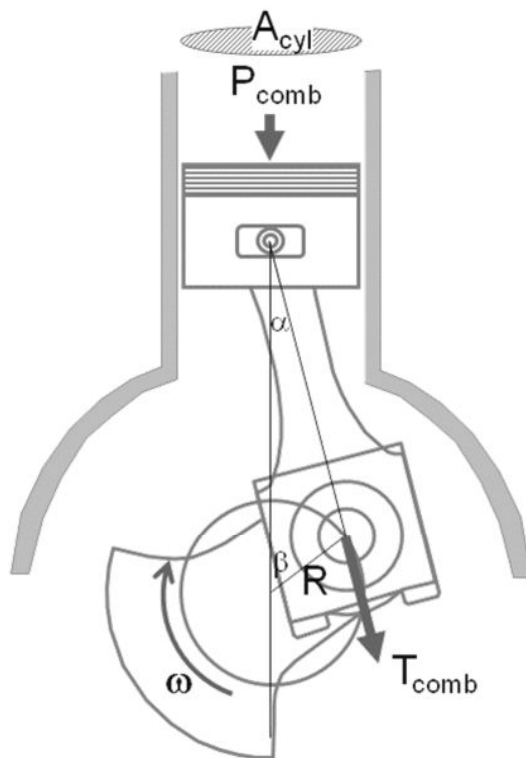


Fig.1-8 Geometry between piston and crankshaft⁶⁸⁾

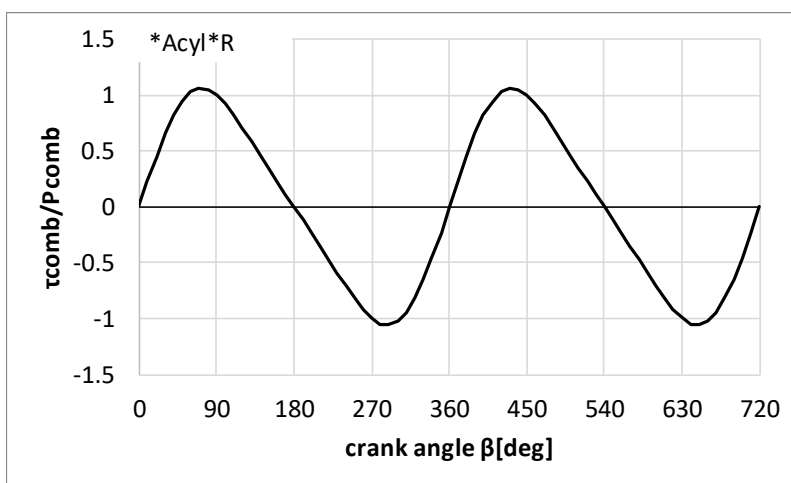


Fig.1-9 Relation between T_{comb} and P_{comb}

1-3-3 燃焼状態推定のための信号処理

2012-2016年にSAEで発表された論文の中から、空燃比の制御に関する信号処理について述べる。1-3-1で、空燃比制御のためには、燃焼エネルギー IMEP や熱発生速度 $dQ/d\theta$ を検知したいことを述べた。

燃焼状態とは、熱が発生したタイミングと量である。気筒壁面を通した放熱に比べ、気筒内の燃焼が十分早いので、気筒内の燃焼を断熱現象とすると、燃焼圧 P_{comb} 、気筒体積 V 、熱発生量 Q の関係は、

$$dQ = \frac{1}{\gamma-1} V dP_{comb} + \frac{\gamma}{\gamma-1} P_{comb} dV \dots\dots\dots(1-2)$$

で与えられる。燃焼圧 P_{comb} と燃焼トルク τ_{comb} の関係は、式(1-1)でも示したが、

$$\tau_{comb} = \frac{P_{comb} A_{cyl} R \sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha} \dots\dots\dots(1-3)$$

であらわされる。クランク軸の回転速度 ω と燃焼トルク τ_{comb} の関係は⁶⁸⁾、摩擦トルク τ_{fric} 、回転イナーシャトルク τ_{iner} 、負荷トルク τ_{load} も含めて考えると、

$$J\dot{\omega} = \tau_{comb} + \tau_{fric} + \tau_{iner} + \tau_{load} \quad , \quad \dots\dots\dots(1-4)$$

ピストンとシリンダブロックで囲まれた燃焼室の体積 V は、

$$V = A_{cyl} \{R(1 - \cos \beta) + (l - \sqrt{l^2 - R^2 \sin^2 \beta})\} \dots\dots\dots(1-5)$$

$$\frac{dV}{d\beta} = A_{cyl} R \sin \beta \left(1 + \frac{R \cos \beta}{\sqrt{l^2 - R^2 \sin^2 \beta}}\right) \dots\dots\dots(1-6)$$

で示される。このような関係に基づき、熱発生量 Q は、燃焼圧 P_{comb} 、燃焼トルク τ_{comb} 、クランク軸回転速度 ω に基づき推定される。

燃焼圧 P_{comb} がする仕事は、Fig. 1-10に示すP-V線図の斜線部の面積に等しく、この仕事を気筒体積 V_{cyl} で正規化した IMEP は、

$$\begin{aligned} IMEP &= \frac{P_{comb} dV}{V_{cyl}} \\ &= \frac{\int_0^{4\pi} P_{comb} A_{cyl} R \sin \beta \left(1 + \frac{R \cos \beta}{\sqrt{l^2 - R^2 \sin^2 \beta}}\right) d\beta}{V_{cyl}} \dots\dots\dots(1-7) \\ &= \frac{\int_0^{4\pi} \tau_{comb} d\beta}{V_{cyl}} \end{aligned}$$

である。

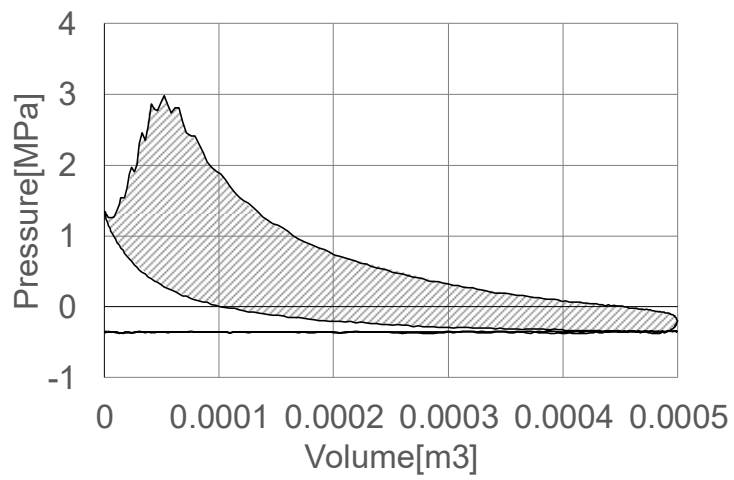


Fig.1-10 Definition of IMEP by PV diagram

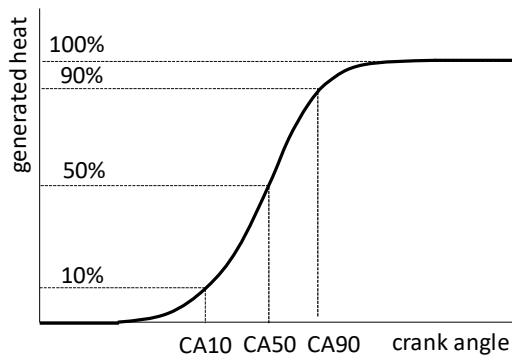


Fig.1-11 Heat release profile

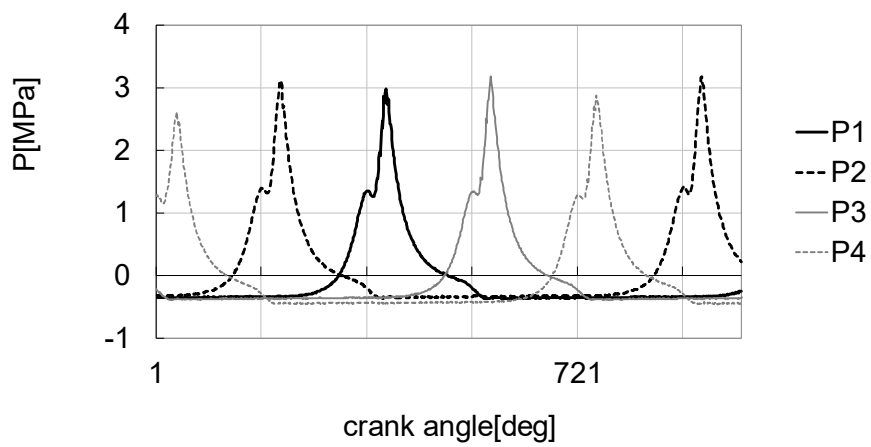


Fig.1-12 Example of cylinder pressure

燃焼圧から燃焼タイミングや燃焼エネルギーを求める方法^{11, 12, 21)}では、式(1-2)に基づいて燃焼圧から Fig. 1-11 のような熱発生プロファイルを算出するので、信号処理の手法としてオリジナリティは主張されていない。燃焼タイミングとして CA10, CA50, CA90(それぞれ、燃焼による熱が 1 燃焼行程での熱発生量の 10%, 50%, 90%発生するクランク角)のどれを用いればいいかという議論¹⁰⁾, IMEP や CA50 の算出に悪影響を与える要因として、クランク軸のねじり振動や、すす等の堆積物による筒内容積の変化が支配的であるという議論¹¹⁾, 筒内圧センサから求めた CA50 は計測ノイズを含むので、回転数, 吸気圧, 点火タイミングから予測した CA50 を用いたカルマンフィルタで平滑するといった議論²¹⁾がなされてきた。

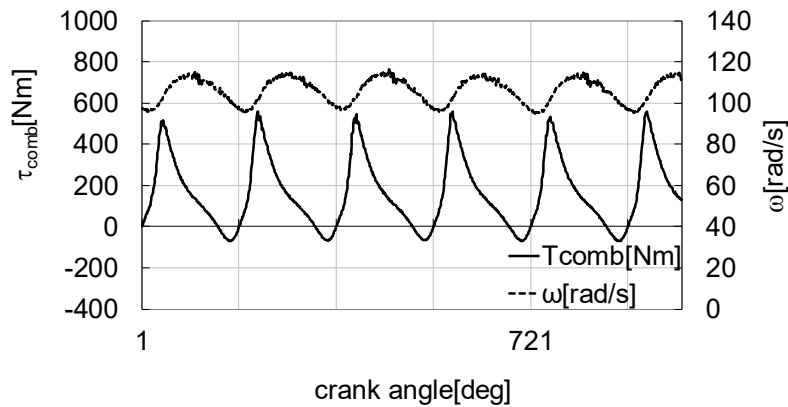


Fig.1-13 Example of crankshaft speed and combustion torque⁶⁸⁾

クランク軸回転速度 ω から燃焼状態を推定した研究では、式(1-4)に示す ω と燃焼トルク τ_{comb} の関係に着目している。燃焼圧 P_{comb} , 燃焼トルク τ_{comb} , 回転速度 ω の計測例を Fig. 1-12, Fig. 1-13 に示す。燃焼圧 P_{comb} と燃焼トルク τ_{comb} の間には、前述の式(1-3), 燃焼トルク τ_{comb} と回転速度 ω の間には式(1-4)の関係がある。式(1-4)から、 ω の振幅と τ_{comb} の振幅がほぼ比例することがわかるので、この比例関係に着目して、 ω の 180° 周期の振幅をフィルタリングによって求め、この比例関係に基づきトルク振幅を求めた例¹⁰⁾, クランク軸回転速度の 1 サイクル(クランク角 720°)分の変化をみるために 3 角関数でフィルタリングし、燃焼トルクのサイクル変動を求めた例²²⁾がある。また、 ω の上死点后 20°から 180°の変化量が IMEP と相関があることに着目し、 ω の変化量から IMEP の標準偏差を推定した例がある²⁸⁾。また、式(1-4)に基づいて ω を微分して燃焼トルクを求めた例としては、0.375° CA 毎にサンプルされた ω を微分して燃焼トルクを求め、このとき生じる燃焼トルクの推定誤差を、1 気筒につけた燃焼圧信号から得られる燃焼トルクと ω を微分して得られる燃焼トルクとの差が、全ての気筒で同じように生じるという仮定に基づいて補正した例²³⁾, 1° CA 毎にサンプルされた ω を 20° CA のローパスフィルタで平滑化し、微分してトルクを求

めた例³¹⁾がある。燃焼トルクから燃焼圧を求めることは、

- ① 1つの燃焼トルク τ_{comb} から気筒数分の燃焼圧 P_{comb} を復元する
- ② 上下死点ではリンク機構の特性上、 $\sin(\alpha+\beta)=0$ となるので、式(1-3)に基づいて τ_{comb} から P_{comb} を求めることができない

という課題があるが、吸気→圧縮→爆発→排気のうち、爆発以外の気筒の寄与を無視することで①をクリアし、TDC(Top Dead Center : 上死点)前後の燃焼圧を補間することで②をクリアし、燃焼圧を推定している³¹⁾。

P_{comb} , τ_{comb} , ω 以外の燃焼状態を検出する情報としては、エンジンプロックの振動、内燃機関回りの音響振動、気筒内に通した光ファイバの光学信号を用いた例もある。

燃焼圧によってシリンダ壁面は押されるので、燃焼圧とシリンダブロックの振動は相関がある。

エンジンプロック振動の zerocross やピーク角・値と CA50, θ_{pmax} , P_{max} , SOC(Start of Combustion)の相関に基づき、これらの燃焼パラメータを求めた例や^{11, 15, 27)}、燃焼圧の変化率とシリンダブロックの加速度の変化率の相関から、燃焼圧の変化率を求めた例²⁴⁾、エンジンプロックのネジのひずみをニューラルネットワークを用いて燃焼圧の時系列に変換したものの¹⁷⁾がある。エンジンプロック振動の zerocross, ピークの検出が行われている研究例では、物理現象の相関に着目したという点は主張されているが、ロバストにこれらを検出するにはどうすればいいかという信号処理の手法についてはオリジナリティは主張されていない。

また、エンジンプロックの振動は音として内燃機関周辺の空気に伝搬される。燃料中にアルコール添加量により燃焼速度は変化する。これは燃焼圧のピークの変化として現れ、音響信号の変化として観測される。これに基づき、音響信号の周波数強度から、アルコール添加量を推定した例³⁰⁾がある。

このように、zerocross 抽出、ピーク抽出、微分、周波数強度算出といった処理がなされているが、物理信号と信号の特徴との相関に着目した点を主張するものが多く、量産センシングシステムでロバストな信号処理を行うにはどうすればいいかという観点から論じられることはあまりなかった。

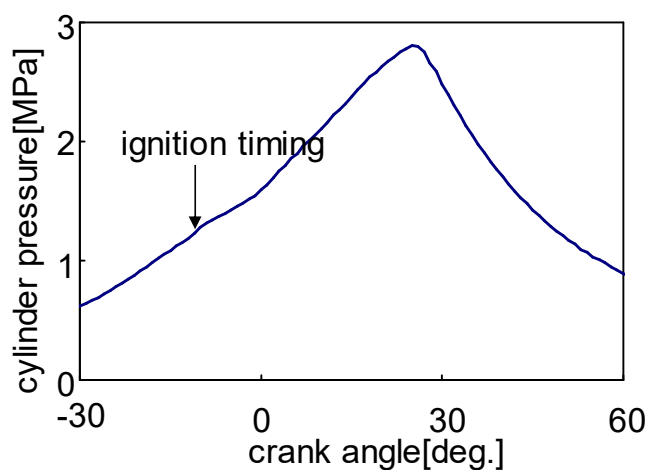
1-4 ノック検知

前節 1-3 で述べたように、点火タイミングを早くすると内燃機関の効率は向上するが、早くしすぎるとノックと呼ばれる異常燃焼がおこる。点火タイミング早期化や過給により、混合気の圧力・温度が上昇し、火炎伝播より早く混合気が自着火することがある。自着火が引き起こす気筒内圧力伝搬による振動現象がノックである。自着火により極端に速く熱が発生し、局所的な高圧部が発生し、これによる圧力波が気筒内を伝播する。正常な燃焼時の燃

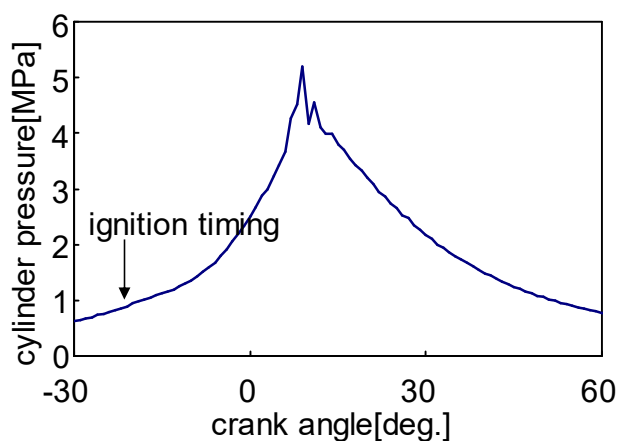
焼圧は Fig. 1-14(a) のようになるが、ノックが発生すると、圧力の伝播により Fig. 1-14(b) のように燃焼圧ピーク付近に振動が発生する。

ノックは、ドライバにとって不快な騒音であるばかりでなく、内燃機関のシリンダブロックを破損することもある。したがって、点火タイミングを進角することで燃焼効率を上げる一方で、進角しすぎることによるノックも避ける必要がある。ノックしないぎりぎりの点火タイミングは、内燃機関個体差、気筒による吸気・EGR 量のばらつき、内燃機関回転数、負荷により異なるため、フィードフォワードによる制御だけに頼ることは困難で、ノックを検出したら点火タイミングを遅角するというフィードバック制御が必要である。

ノックの検知は、ノックによって発生する気筒内の混合気の振動を検出することによって行われる。ノックによって発生する混合気の周波数 f_{knock} は、



(a) normal combustion



(b) knock

Fig.1-14 Effect of knock to cylinder pressure

$$f_{knock} = \rho_{mn} \frac{v_{sound}}{\pi D_{cyl}} \dots\dots\dots(1-8)$$

$$v_{sound} = \sqrt{\kappa RT} \dots\dots\dots(1-9)$$

によって与えられるので、この周波数の混合気の振動を検出すればよい⁶⁹⁾。なお、

ρ_{mn} : Table1-2 で与えられる振動モード定数

v_{sound} [m/s] : 音速

D_{cyl} : 気筒直径






κ : 比熱比

R [J/kgK] : 気体定数

T [K] : 温度

である。

Table 1-2 vibration modes and their constant⁶⁹⁾

vibration mode	10	20	30	01	11
					
ρ_{mn}	0.56	0.972	1.337	1.22	1.697

混合気の振動を検出する方法には、

- ① 燃焼圧の振動を直接計測する
 - ② シリンダブロックの振動を計測することで、混合気の振動の伝搬を検出する
 - ③ 内燃機関雰囲気への振動の伝搬を音響的に検出する
- が考えられる。

燃焼圧に基づいてノックを検出する取り組みは、Liu⁴⁰⁾、Luo⁴⁴⁾らによってなされており、ここでは、燃焼圧から開示されていない何らかの方法でノック指標を求め、FIR フィルタで平滑化して耐ノイズ性を向上しているが、この FIR フィルタの係数を運転状態によって変えている。また、Liu らは圧力の 2 階微分値のピークに基づいてノックを判定している。

シリンダブロックの振動を計測する取り組みは、Cavina³⁵⁾、Bi³⁸⁾、Zhang³⁹⁾らによってなされており、Cavina らは Butterworth フィルタによりノック帯域にバンドパス特性を持つフィルタを実現し、精度向上を図っている。Bi, Zhang らは、Empirical Ensemble Mode Decomposition によりノック周波数が 5~10KHz であることを示し、1 次モードの 2 乗積分値からノックを検知している。

音響的な方法としては、Cavina^{35, 36)}が取り組んでおり、Cavina³⁵⁾では Butterworth フィル

タ, Cavina³⁶⁾ではフィルタは明示されていないもののバンドパスフィルタが用いられている。Knock 検知は量産内燃機関にも普及しており、ロバストなフィルタの開発は量産設計レベルでも取り組まれている。

1-5 OBD

内燃機関の周りには多くのセンサ・アクチュエータがついており、これらが協調して動作することで、有害物質の排出を抑えながらドライバの満足する出力を得ている。これらのセンサ・アクチュエータが故障すると、単にドライバビリティが低下するのみならず、有害物質の排出につながることもある。このような有害物質の排出は、社会の不利益になるので、内燃機関システムに故障があれば、速やかに修理を促すことが求められる。

内燃機関を制御するコントローラには、内燃機関システムの故障を自ら診断する機能を備えることが法令で義務付けられている。この仕組みは OBD とよばれ、1988 年にアメリカカリフォルニア州で義務付けられた²⁾のを皮切りに、世界中で義務付けられている^{3,4,70)}。主な検査項目を Table1-3 に示す⁵⁵⁾。検出精度は、排気規制を満たすように決められるので、排気規制が年々厳しくなるにつれ、検出精度も改善が求められる。つまり、OBD の技術は常に進化し続けている。

Table1-3 Diagnosis items required in OBD II⁵⁵⁾

1	Catalyst deterioration or malfunction
2	Misfire
3	Oxygen sensor deterioration or malfunction
4	Any vapor leak in the evaporative and/or fueling system
5	Any deterioration or malfunction occurring in a powertrain system or component directly intended to control emissions, including but not necessarily limited to, the exhaust gas recirculation (EGR) system, if equipped, the secondary air system, if equipped, and the fuel control system
6	Any other deterioration or malfunction occurring in an electronic emission-related powertrain system or component not otherwise described above

OBD に関する論文としては、失火検出に関するものが多い。失火検出は、Ma ら⁴⁹⁾、Tsai ら⁵¹⁾がクランク角センサに基づく信号処理で実現している。Ma らは、クランク角センサ信号を Fourier 変換し、変換結果から検出の指標を算出し、ファジーで閾値を決める方法を

提案し、Tsai らは、燃焼前後のクランク軸の回転速度の差から失火を判定する方法を提案している。

Amadou⁵⁰⁾らは、失火により排気中の O_2 濃度が変化することに着目し、 O_2 センサの出力に基づいて失火を検出する方法を提案している。また、Doi⁵⁴⁾らは、燃焼による火炎のイオンを点火プラグの電極でとらえ、このイオンによる電流の変動から失火を検出することを提案し、そのためのSN比を向上するためのプラグを検討している。信号処理の手法には言及していない。

OBDに関しては、Fourier変換等の取り組みがあるが、計算量の観点で車載は困難である。また、回転速度の差を取るようなアプローチでは、ロバスト性確保が困難なので、量産レベルでは、スロットル開度等の他の情報と組み合わせることでロバスト性を確保している。

1-6 アクチュエータの個体差検知

1-3節では、内燃機関の制御対象は、空燃比と点火タイミングであると述べたが、近年の排気規制の強化により、制御対象は拡大しており、従来オープンループで制御されていたものも、フィードバックで制御しようという動きがある。

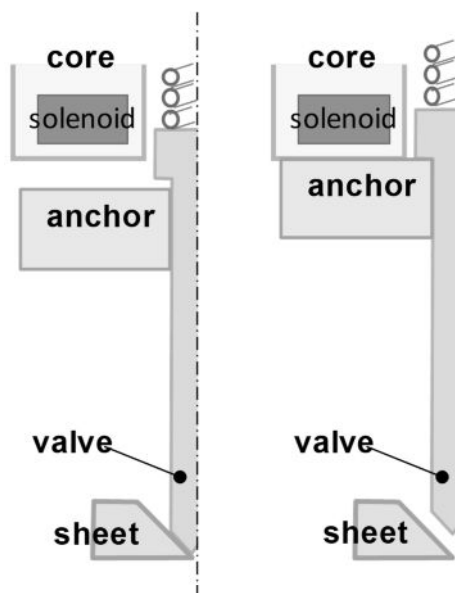


Fig.1-15 Cross-section structure of injector⁸⁾

排気規制が厳しくなるにつれ、燃焼室内に噴射した燃料の壁面付着の低減が求められるようになった。そのためには、インジェクタの噴口の形状改善による噴霧粒系、形状、方向の改善や、1回の燃焼サイクルに求められる燃料を複数回に分割噴射することで、噴射の勢

いを弱くすること、などがとりくまれている。最近では、1回の噴射量を mg オーダーにしたいという要求が増えている⁵⁹⁾。

インジェクタの構造を Fig.1-15 に示す⁸⁾。ここでは、ソレノイドに電流を流し、生じる磁気吸引力でアンカ、弁体を引き上げ、弁体とシートとの間の隙間より燃料が噴射される。燃料噴射量は、弁体がシートから離れている時間にほぼ比例する。

噴射量を低減するときの問題となるのが、インジェクタの個体差である。噴射量が低減されるほど、個体差の影響の割合が深刻になる。

Fig.1-16 では、同じシリーズのインジェクタの弁の動きの個体差を比較している⁸⁾。この図は、同じ駆動パルスを与えても、閉弁タイミングが約 80us ばらつくことがわかる。燃料噴射量は、インジェクタが開弁してから閉弁するまでの時間に支配され、その関係は Fig.1-17 のようになる。この図から、閉弁タイミングが 80us ばらつくと、燃料噴射量は 1.2mg ばらつくことがわかる。目標とする燃料噴射量が 4mg だと、誤差の割合が 30%に達してしまう。このような誤差を低減するために、インジェクタの開弁タイミング、閉弁タイミングを個体毎に検出して、それに応じてインジェクタを駆動する電流を補正しようという取り組みがなされている^{56~58)}。

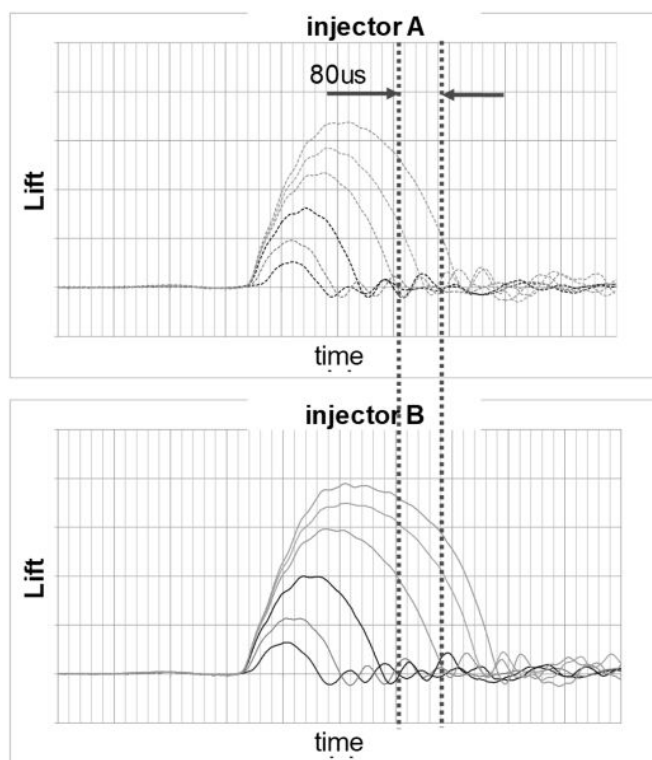


Fig.1-16 Comparison of valve lift of two injector⁸⁾

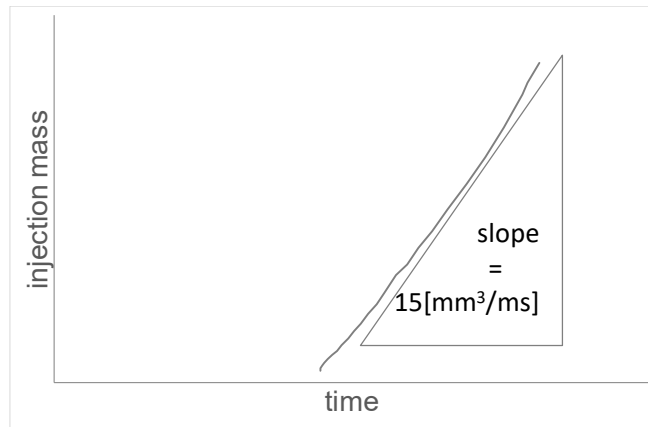
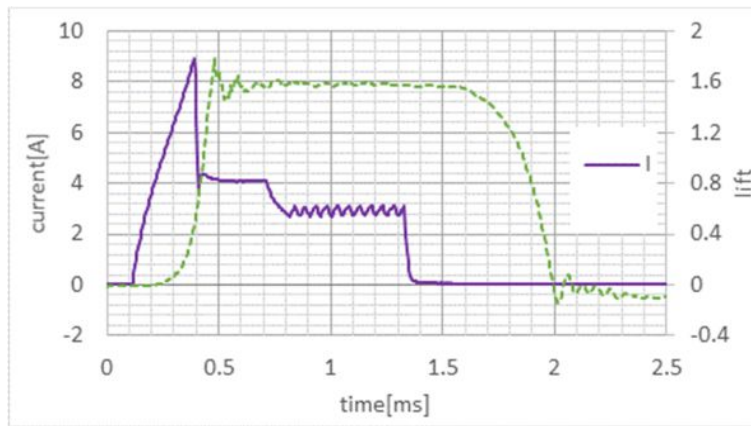
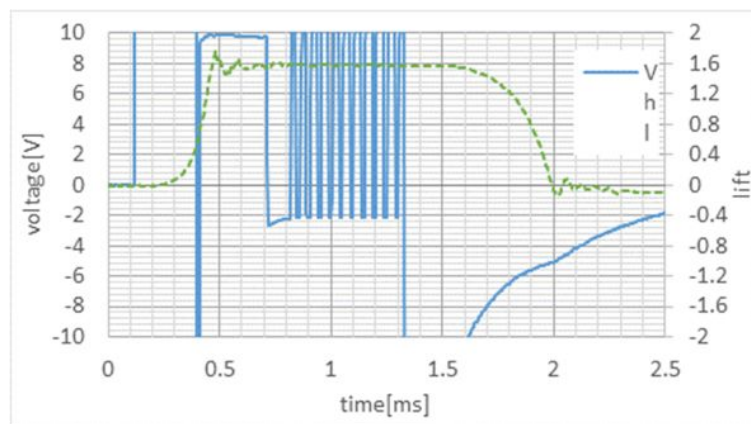


Fig.1-17 Relation between open duration and injection mass⁸⁾



(a) Relation between valve lift and solenoid current



(b) Relation between valve lift and solenoid voltage

Fig.1-18 Relation between valve lift and solenoid electric signal

インジェクタの個体差の検知対象としては、燃料の噴射が始まる開弁開始と、噴射が終わる閉弁完了タイミングがある。

一般に、Fig. 1-18 の開弁完了のタイミング(0.5ms 付近)では、ソレノイド電流に変曲点あらわれており、閉弁タイミング(2ms 付近)では、ソレノイド電圧に変曲点が生じている。注意すべきは、閉弁タイミングは多くの場合観測できるが、開弁タイミングは、Fig. 1-18(a) の条件では観測できるが、駆動電流のピーク電流の印加時間(Fig. 1-18(a)の0.1~0.4msの時間)が長くなると電流立ち上がり部で閉弁し、電流立上り部では磁気飽和が起こっているため、閉弁しても変化は現れない。

Parotto⁵⁸⁾らは、閉弁完了タイミングを、駆動電圧電流信号から検出して補正することで、最小噴射量を0.5mgに低減できたと報告しているが、具体的な検出方法は開示していない。

Tagaliatera⁵⁷⁾らは、閉弁完了時に弁体の動きが急激に変化し、これによって生じる駆動電圧の変曲点を閉弁完了タイミングとして検出する方法を提案している。弁が動かない程度の短い駆動パルスを与えた時の駆動電圧を参照電圧とし、弁体を駆動した際の信号との差分を取り、差分の最大値を変曲点のタイミングとしている。

Ito⁵⁶⁾らは、これらの研究と同じように、閉弁タイミングの検出に加え、開弁タイミングも検出している。閉弁時に駆動電圧に生じる変曲点を検出することは上記の2例と同じである。開弁時にはFig. 1-18(a)に示すように電流に変曲点が発生することに注目している。変曲点を検出する具体的な信号処理には開示されていないが、信号処理の負荷を低減するために、マイコンではなく、専用のASICで信号処理したと報告されている。

このように、個体差検知のために電気信号の変曲点を用いることに注目され、その応用が試みられているが、例えばエンジンコントローラ内のノイズに対するロバスト性といった観点での取り組みはこれからである。

1-7 空燃比センサの信号処理

1-3節で、内燃機関の主要な制御対象は、空燃比と点火タイミングであると述べた。空燃比制御において問題となるのは、内燃機関の気筒によって空燃比が異なることである。空燃比が気筒によって異なる原因は、内燃機関の吸気管の形状により気筒毎に吸入酸素量が異なることと、インジェクタの燃料噴射量のばらつきである。空燃比センサを気筒毎に配置し、気筒毎の空燃比を計測すれば、この問題は解決するが、気筒毎に空燃比センサを配置することはコスト、信頼性の観点から受け入れがたい。そこで、排気管の集合部に設けられた1つの空燃比センサから気筒毎の空燃比を推定し、気筒毎にインジェクタへの燃料噴射指令信号にフィードバックするのが、空燃比センサの信号処理の主要課題である。

1つの空燃比信号から気筒毎の空燃比を推定する方法は、空燃比センサ信号を時分割し、対応する気筒の空燃比を推定することである。

Qiaoら⁷¹⁾は、5燃焼サイクル分の長さの空燃比信号をバンドパス特性をもつFIRフィル

タに入力した出力から、空燃比の気筒毎の偏りを検出することを提案している。偏っている気筒を特定するために、インジェクタから空燃比信号の変化がフィルタ出力として現れるまでの無駄時間のマップとして持っている。

Cavina ら⁷²⁾は、2 輪 3 輪車向けの小排気量 2 気筒内燃機関の空燃比の違いを検出する方法を提案している。この内燃機関では、点火タイミングの間隔が 270° CA と 450° CA という不等間隔である。このことを利用し、1 サイクル(720° CA)内の空燃比信号の最大値と最小値の差と、その間隔から、どちらの気筒の空燃比が濃いかを特定している。点火タイミングの不均一性を利用することで、燃料噴射から空燃比センサが応答するまでの無駄時間への対応を巧みに切り抜けている。

このように、内燃機関の回転に同期した空燃比の変動をフィルタにより抽出しようという試みがなされている。

1-8 内燃機関における信号処理の課題と本研究のとりくみ

これまで SAE における信号処理に関する論文をサーベイしてきた。その結果わかったことは、内燃機関の複雑なシステムを制御するのに、どの物理的な特徴を捉えればいいのかという議論が盛んに行われていることである。こうした議論は、1990 年ごろから燃焼状態の検知に関して特に盛んにおこなわれてきたが、まだ歴史が浅い。一方で、様々な環境での運転に適応できるロバスト性や、車載マイコンに搭載するための実装性の検討に関しては、ノック検知や OBD で進んでいる。ノック検知に関してはバンドパスフィルタの設計が量産レベルで進められている一方で、OBD に関しては、検知に適した運転条件に限定する等の工夫で検知性能を確保しているにとどまり、広範な条件に適応できるロバストでシンプルな検知方法を実現するには、まだ開発の余地が大きい。本研究では、実環境に広範な運転条件で適応でき、車載マイコンに搭載できる信号処理を開発することを目標とする。その中でも特に、ロバストでコンパクトな微分フィルタを実装した信号処理システムを実現することを目標とする。微分フィルタに特にフォーカスする理由を以下説明する。

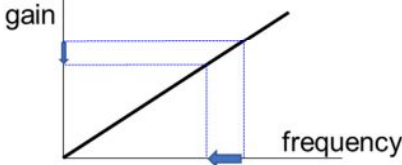

Table 1-4 に示すように、微分フィルタには、

- ① 因果律を遡る(結果から原因を復元する、微分方程式の出力から入力を復元する)
- ② 周波数に比例したゲイン特性を持つ
- ③ 変化点を強調する

という特徴がある。因果律を遡る特徴を活かしたアプリケーションとしては、先述の燃焼トルク推定^{10, 22, 23, 31)}や、ABS・粘着制御における空転推定などのトルク推定^{73, 74)}と、熱線流量計の応答性の補正⁷⁵⁾、などがある。周波数に比例したゲインを活かしたアプリケーションとしては、空燃比センサ⁷⁶⁾やスプリング⁷⁷⁾の劣化が引き起こす応答性の低下を検知することが考えられる。変化点を強調する特徴を活かしたアプリケーションとしては、失火による内燃機関の回転速度の急変⁷⁸⁾や、インジェクタの弁体の閉弁による弁体速度の変化をソレ

ノイドの端子間に発生する逆起電力の急変^{56~58)}でとらえる、などが考えられる。このように、微分フィルタの特徴を活かしたアプリケーションが、自動車制御においても多々考えられる。

Table 1-4 Function and application of differential filter

function	application
<p>reverse causality</p> <p>$F = m\dot{v}$ estimation of F from v</p> <p>$\tau = J\dot{\omega}$ estimation of τ from ω</p>	<p>torque estimation</p> <ul style="list-style-type: none"> ◎ combustion torque estimation ○ ABS ○ Adhesion control <p>response compensation of hot wire flow sensor</p>
<p>proportional gain to frequency</p> 	<p>diagnosis of deterioration</p> <ul style="list-style-type: none"> ◎ diagnosis of A/F sensor ○ deterioration of dumper
<p>detect changing point</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ misfire detection ◎ valve close detection

上記のようなメリットがある一方で、微分フィルタの実現が難しいのは、デジタル化してマイコンに取り込んだ段階で、数学の定義通りの微分

$$\frac{dx}{dt} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x(t+h) - x(t)}{h} \dots\dots\dots(1-10)$$

はできなくなってしまうからである。そこで、差分を取るなり、平滑化するなどの計算実現上の課題が生じる。

これまでどのようなアプリケーションに対して、どのように微分フィルタが実現されてきたかを CiNii (Citation Information by National Institute of Informatics, 国立情報学研究所が運営する学術論文や図書・雑誌などの学術情報データベース) で調べた。その結果を Table 1-5 に示す。微分される信号の対象としては、①心電図や眼球運動等の生体信号⁷⁹⁻⁸¹⁾、②無線⁸²⁻⁸⁶⁾、③スロットル制御⁸⁷⁾、移動体姿勢⁸⁸⁾や剛体傾斜角⁸⁹⁾の推定等の機械システム、④内燃機関の空燃比センサ⁷⁶⁾のような機械システム、⑤特に指定のないもの^{90~95)}、がある。

Table 1-5 Relation between the object of differentiation and differentiation method

object	Filtrng method	necessary object characteristics
Biological signal (Feature extraction from ECG and eye movement)	Savitzky-Golay filter ⁷⁹⁾ (signal is approximated by polynomial) order-statistic low-pass differentiation filter ^{80,81)}	
Wireless communication (Estimation and removal of DC and frequency offset)	difference ⁸²⁻⁸⁶⁾	
mechanical system (throttle control ⁸⁷⁾ , estimation of mobile ⁸⁸⁾ , rigid tilt ⁸⁹⁾)	observer	plant model
mechanical system (air-fuel ratio sensor of internal combustion engine ⁷⁶⁾)	Approximated signal by trigonometric function is differentiated Filter order is designed to achieve the target gain and flatness	frequency characteristics
(not identified)	Filters is designed to achieve the target gain, phase, flatness, etc. ⁹⁰⁻⁹⁵⁾	frequency characteristics

①を対象とした微分フィルタとしては、心電図の信号を微分するために、信号を多項式で近似し微分する Savitzky-Golay フィルタ ⁷⁹⁾が使われ、眼球運動を微分する手段としては、パルス状の外乱にロバストな順序統計低域微分フィルタ ^{80,81)}が用いられている。ここでは、微分フィルタで信号の平滑化が行われているものの、信号やノイズの特性から微分フィルタがどう設計すべきかという議論はなされていなかった。

②を対象としたシステムでは、無線信号の DC 成分や周波数オフセットの推定、除去を微分フィルタを用いて行うが、ここでは差分が用いられており ⁸²⁻⁸⁶⁾、ここでも信号やノイズの特性等にあった微分フィルタを設計するという事には取り組まれていなかった。

③の、スロットル ⁸⁷⁾や移動体 ⁸⁸⁾、傾斜板 ⁸⁹⁾等の剛体からなる機械システムでは、対象のプラントモデルを用いてオブザーバを使って微分している。

④の内燃機関の空燃比センサの信号の微分 ⁷⁶⁾では、信号を三角関数で近似したものを微分しているが、信号の周波数特性によってフィルタの次数を設計して、微分性能の向上、ノイズ除去性能の改善を図っている。

また、⑤のように、対象を特定することなく、対象の特性に基づいて、フィルタのゲイン特性、位相特性、平坦度を設計する方法の研究もおこなわれている ^{90~95)}。

ここで特に着目したいのが、④のように、対象のプラントモデルに基づくオブザーバを用いて微分しているものと、⑤のように対象の周波数特性に基づいて微分フィルタを設計して微分するものの違いは何かということである。

④のように、オブザーバを用いて微分しているのは、剛な機械システムである。このような対象では、プラントモデル化がしやすい。例えば、モータの場合は、発生するトルクは、磁束 ϕ と電流 I を用いて、

$$\tau = \phi \times I \dots\dots\dots(1-11)$$

で記述できる。また、剛体の運動を運動方程式で記述するのは、比較的容易である。

剛体ではなくても、内燃機関のトルクベース制御では、発生トルクは、気筒吸気量 \dot{m}_c に比例し、内燃機関回転数 N_{eng} 、気筒体積 V_d 、吸気効率 η_{vol} 、気体定数 R 、吸気管温度 T_{man} 、吸気管圧力 p_{man} 、吸気管体積 V_{man} 、スロットル通過空気量吸気量 \dot{m}_t 、流量補正計数 c_t 、スロットル開口面積 A_t 、大気圧力 p_{amb} 、大気温度 T_{amb} 、比熱比 k を用いて、

$$\tau \propto \dot{m}_c = \frac{N_{eng} V_d \eta_{vol}}{120 R T_{man}} p_{man} \dots\dots\dots(1-12)$$

ただし、

$$p_{man} = \frac{R T_{man}}{V_{man}} (\dot{m}_c - \dot{m}_t) \dots\dots\dots(1-13)$$

$$\dot{m}_t = c_t A_t \frac{p_{amb}}{\sqrt{R T_{amb}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \sqrt{\left(\frac{p_{man}}{p_{amb}}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_{man}}{p_{amb}}\right)^{k+1/k}} \dots\dots\dots(1-14)$$

と記述でき、これレベルでプラントモデルを作成することは比較的容易である⁹⁶⁾。そのため、このような対象では、モデルベース制御の研究例が多い。

一方で、機械システムでも、内燃機関の燃焼制御となると、モデル化することは容易ではない。例えば、内燃機関が発生するトルクを算出するにしても、先述の吸気量のほかに、この気筒間ばらつきや、燃料と空気の混合状態の気筒内での3次元的な分布、点火が引き起こす空気と燃料の混合気の燃焼の拡散の仕方など、考慮すべきことが複雑で、単純なモデル化は困難である⁹⁷⁾。しかし、こうした複雑な現象を対象として燃焼効率を改善するのが、内燃機関の開発において最も関心の高いことである。

本研究では、内燃機関の燃焼制御のように、モデル化困難な領域を対象とし、対象特性から微分フィルタへの要求を導き、要求を満たすようにフィルタを設計する、ということを一貫して行う。

微分フィルタを適用するアプリケーションとしては、

- ① を活かすアプリケーションとしては、クランク角センサ信号からの燃焼トルクの復元
- ② を活かすアプリケーションとしては、空燃比センサの劣化診断
- ③ を活かすアプリケーションとしては、外乱環境における失火検出

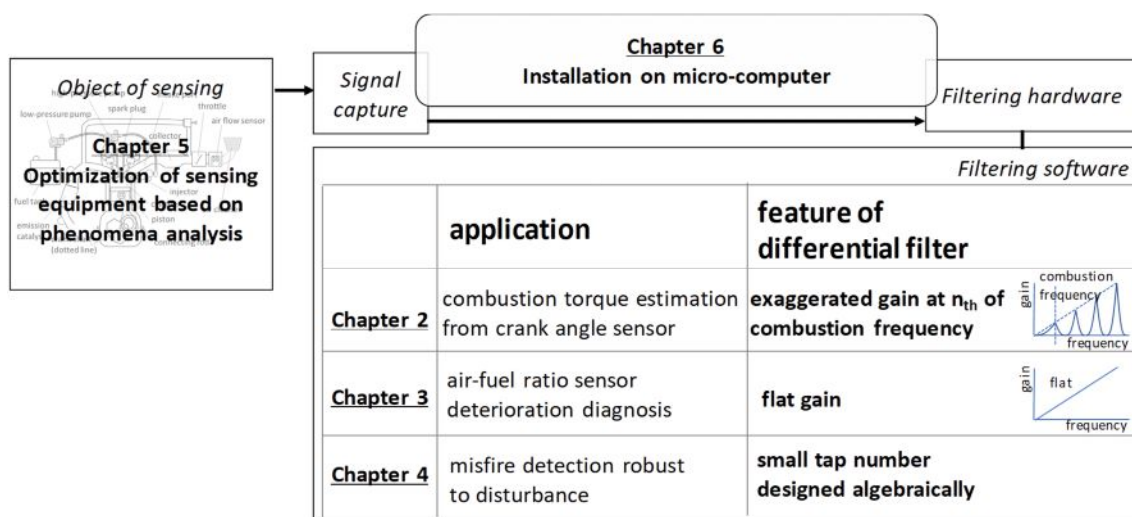
を扱う。

アプリケーション1におけるクランク角センサ信号からの燃焼トルクを復元する際に考慮すべき対象の特徴には、燃焼の周期性がある。この周期性のため、クランク軸の回転速度も燃焼トルクも、燃焼周期およびその整数倍の成分が支配的である。そのため、このアプリケーションにおいて、因果律をさかのぼってクランク角速度からトルクを求めるための微

分フィルタは、燃焼周期およびその倍成分のゲインが強調されていることが望ましい。

アプリケーション 2 における空燃比センサの劣化診断に求められる微分フィルタの特徴は、周波数とゲインの関係にリップルがなく平坦でなくてはならないことである。この関係が平坦でない、ゲインから周波数が一意に推定できない可能性があり、周波数の変化を抽出するには都合が悪い。アプリケーション 3 における外乱環境下の失火検出の特徴は、失火検出のためのクランク角の検出は、1 燃焼行程に 1 回という、他のアプリケーションに比べてまばらなセンシングを行うため、フィルタのタップ数が小さいことである。検知精度を向上すべくフィルタの通過帯域を絞ると、フィルタが長くなり検出の分解能が低下する。そこで、フィルタの組み合わせにより検知精度の確保を図る。このようなアプリケーションでは、フィルタの因数分解からフィルタ特性を議論する。

Table 1-6 required feature of differential filter for each application



そこで、Table 1-6 に示すように、本論文の第 2 章は、クランク角センサ信号からの燃焼トルクの復元のための、燃焼周期およびその倍周期が強調された微分フィルタの設計を議論し

第 3 章では、空燃比センサの劣化診断のための、ゲイン特性がフラットな平坦の設計について議論し、

第 4 章では、外乱環境における失火検出を実現するための代数的方法についてのべる。外乱にロバストに失火検出を行うには、外乱と周波数の違いを識別するように通過帯域の狭いフィルタを設計することが考えられるが、帯域を狭くするには、周波数分解能を上げること、すなわち、フィルタ長を長くする必要がある。そこで、2 つのフィルタへクランク角信号を入力して得られる出力の比から失火と外乱の識別を行うが、そのためには 2 つのフィルタの出力が所定のタイミングでピークをとる必要がある。本章では、2 つのフィルタの出力が所定のタイミングでピークをとるための条件を代数的に導き、これに基づいて 2 つの

フィルタを設計する。

さらに、以上述べてきた信号処理の周辺課題として、本論文では2つの課題にとりくむ。

一つは、計測対象での、信号の伝達メカニズム、ノイズの発生メカニズムを考慮したうえで信号を取り込むセンシングシステムを最適化する必要がある。

例えば、ノック検知を行う際には、振動センサを内燃機関のどこに配置するか、ノック検知性能は大きく依存する。そのため、信号処理の設計の前提として、ノックセンサの配置の検討が必要である。

2章の燃焼検知や4章の失火検出を行うために、クランク角センサの信号処理をする際には、クランク軸のどこで、どのクランク角の範囲での回転速度ないしは回転時間を検出するかによって、ねじり振動による外乱の影響の強さが異なってくる。

そこで、5章では、信号の伝達・ノイズの発生メカニズムを考慮したうえでのセンシングシステムの最適化例として、クランク角センサの信号処理を例とし、クランク角センサの信号処理への外乱要因であるねじり振動を除去するためのセンシングシステムの最適化を行う。

信号処理の周辺課題の2つ目としては、信号を取り込んで信号処理を実行するマイコンの能力がある。Fig. 1-19に示すように、信号処理で見たい現象の周期が短くなるにつれ、マイコンに求められる計算能力も大きくなることがわかる。本章6節のアクチュエータの個体差検知を行うためには、従来のマイコンの計算能力では足りないことがわかる。そこで、第6章では、従来のマイコンの計算能力では実現困難であるアクチュエータの個体差検知を、最新のマイコンの機能を活かして、量産マイコン実装した事例を述べる。

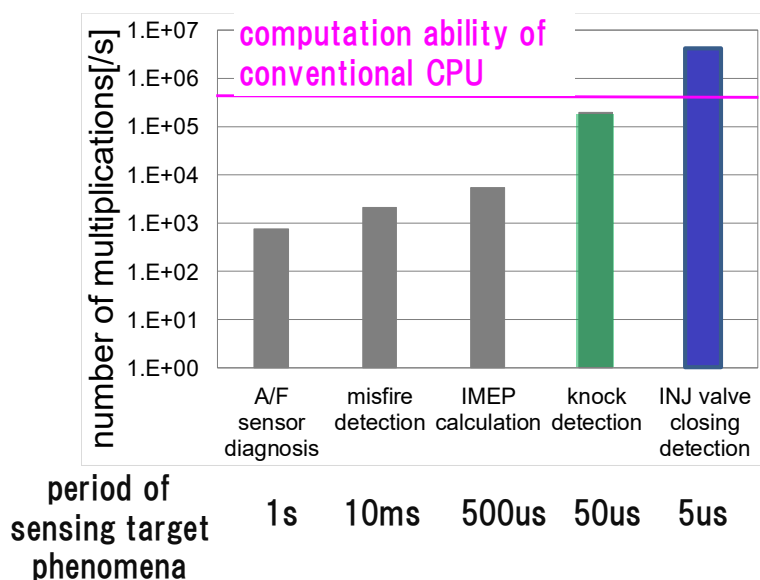


Fig.1-19 Calculation load of signal processing applications³⁾

第2章 基本成分の倍周波数成分を強調する微分フィルタ

—クランク角センサからの燃焼トルクの推定—

2-1 はじめに

第1章では、微分フィルタの機能を3つに分類し、そのうちのひとつである、因果律をさかのぼる機能を生かすことで、トルク推定や熱線流量計の応答が補正できることを議論した。トルク推定としては、内燃機関の燃焼トルク推定^{10,22,23,31)}や、ABSや粘着制御の空転推定^{73,74)}があるが、ここでは、内燃機関の制御で重要な問題である、クランク角センサの書いた回転速度信号からの燃焼トルクの推定のための微分フィルタの開発を行う。クランク軸の回転速度も燃焼トルクも、燃焼周期に同期した現象なので、このフィルタに求められる特性は、燃焼周期およびその整数倍でゲインが強調されていて、他の部分の周波数成分は除去する特性が望ましい。

自動車内燃機関に求められる排気規制は年々厳しくなる⁹⁸⁾。従来の内燃機関では、排気規制は、排気中の酸素濃度に基づく空燃比制御、および発生してしまった有害物質を触媒で除去することによってクリアされてきたが、最近の規制は、これら二つでは満たすことが難しくなっている。燃料噴射タイミングや点火タイミングなどによる燃焼プロセスの精密な制御が、近年の厳しい規制を満たすために必要とされている⁹⁹⁾。

NO_xやすずの排出量は燃焼温度¹⁰⁰⁾に依存する。燃焼温度が低いとすずの排出が増加し、高いとNO_xの排出量が増加するため、精密な燃焼温度制御が必要となる。精密な温度制御は、燃焼タイミングと燃焼速度を制御することにより達成されるが、高応答の温度計測は量産内燃機関では困難であるため、燃焼圧が温度推定¹⁰¹⁾に使用される。

これまでも自動車用内燃機関に燃焼圧を計測する筒内圧センサが搭載されたことがあるが¹⁰²⁾、筒内圧センサは、高コストのためにそれほど普及しなかった。一方で、クランク軸回転速度は燃焼圧と密接に関連しているため、筒内圧センサの代わりに燃焼状態をモニタするための代替手段として考えることができる。

例えば、従来の失火検出¹⁰³⁾においては、クランク軸回転速度の変化に基づいて正常燃焼と失火が判定されてきた。ここでは、燃焼行程1回毎に回転速度が1回だけ測定されるため、回転速度計測の時間分解能が粗かった。この分解能は、正常燃焼と失火を識別するには十分であったが、燃焼圧の推定には不十分である。

燃焼プロセスの精密な制御のための燃焼圧推定を実現するには、単に燃えたか燃えないかだけでなく、瞬時の燃焼圧のプロファイルを求める必要がある。そのために、クランク軸回転速度検出を、燃焼行程1回につき1サンプリングではなく、全てのクランク角センサの歯の間(現在量産車に搭載されているものは6°~15°)の速度を計測し、これを有効に利用す

る信号処理を開発する。

本章では、クランク軸回転速度から燃焼トルクを推定する信号処理方法を提案し、推定燃焼トルクに基づいて、燃焼圧指標IMEPを推定する^{68,104)}。燃焼トルクは、クランク軸回転速度の微分により推定するが、その精度は、微分方法に依存する。

燃焼トルクの推定は、内燃機関の燃焼制御における重要な課題の一つであり、これまでも様々な試みがなされてきた。クランク軸の回転速度を微分する際に、微分によってノイズが強調されてしまうのを避けるため、周波数領域で微分に相当する処理を行う手法が提案されてきたが¹⁰⁵⁾、時間領域と周波数領域の往復には計算コストがかかる。また、時間領域で直接トルクを求める方法としては、Liuらの方法がある。Liuらはクランク軸回転速度を微分する代わりに、速度の2乗の変化に基づいて燃焼トルクの瞬時値を推定する方法を検討した³¹⁾。彼らは、クランクシャフト速度を微分することは困難であったと指摘し、速度の2乗の差分からトルクを求めているが、速度信号からノイズを除去するフィルタと、差分の間隔をどう設定するかによりトルク推定精度が依存する、という、数値微分上の問題は残る。ここでは、より簡単な推定方法の開発を試みた。燃焼周期(ある燃焼行程の上死点から次の燃焼行程の上死点までのクランク角で、4気筒内燃機関の場合180°である。内燃機関制御では、時間に同期して信号をサンプルするより、クランク角に同期してサンプルしたほうが都合がよいことが多く、本論文でもクランク角に同期して信号をサンプルする)の間のクランク軸回転速度を三角関数の和で近似し、この和を微分することで高精度なトルク推定を少ない計算で実現した。

また、クランク軸回転速度の微分から推定した燃焼トルクには、負荷トルクと摩擦トルクの影響が含まれるが、それらは内燃機関の幾何学的性質(上下死点で燃焼圧のクランク軸への伝達効率が0になるという性質。この幾何学的な補償は4気筒内燃機関にのみ使用できる)でキャンセルした。

内燃機関試験によりこのトルク推定方法を評価した。ここでは、クランク角速度情報から燃焼トルク、IMEPがどこまで高精度に求められるかを調べるため、1°間隔のクランク角センサを用いて検討した。内燃機関を定常運転した場合と、過渡運転した場合の燃焼トルク推定性能を報告する。また、この燃焼トルクに基づいて、IMEPを推定し、バルブタイミングの変化によるIMEPの変化に推定値が追従したことを報告する。

さらに、クランク角センサの分解能がトルク推定性能に与える影響を調べるため、量産内燃機関に搭載されている10°のクランク角センサを用いて燃焼トルクを推定する実機評価を行い、クランク角センサの分解能による燃焼トルクの推定性能の違いを比較した。

2-2 内燃機関回転速度からの燃焼トルク推定方法

内燃機関回転速度 ω と燃焼トルク τ_{comb} の関係は次式で表せる。

$$J\dot{\omega} = \tau_{comb} + \tau_{fric} + \tau_{iner} + \tau_{load} \dots\dots\dots(2-1)$$

ここで、 τ_{fric} , τ_{iner} , τ_{load} は、摩擦トルク、慣性トルク、負荷トルク、 J は内燃機関回転系の慣性を表す。 ω の微分により、 $\tau_{comb} + \tau_{fric} + \tau_{iner} + \tau_{load}$ を計算することができるが、測定された内燃機関回転速度 ω にはノイズがあり、このノイズは微分により強調されてしまう。

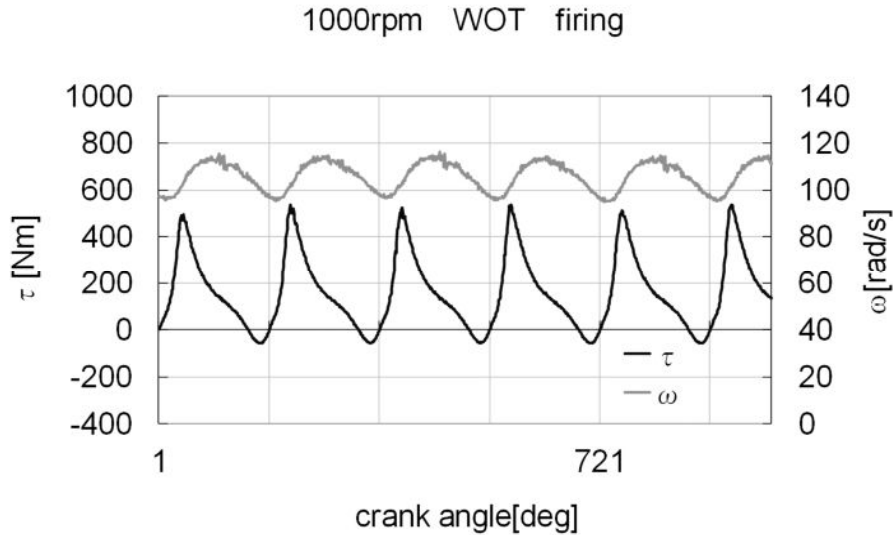


Fig.2-1 Time series of engine torque and rotation speed⁶⁸⁾

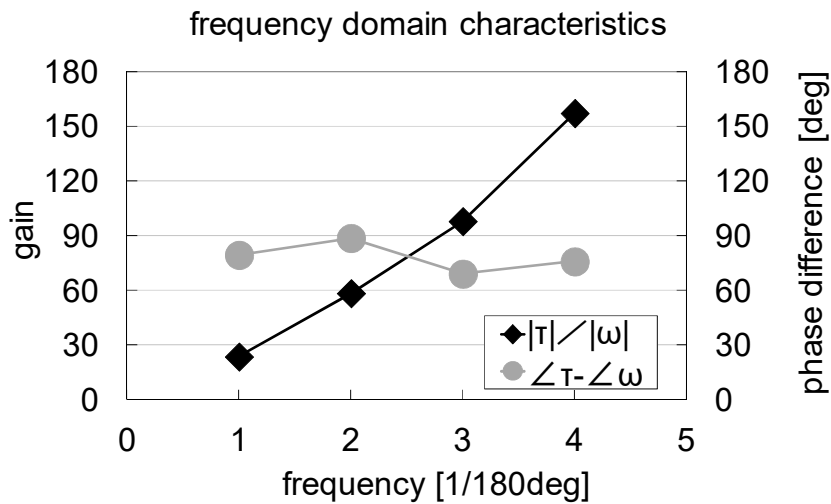


Fig.2-2 Frequency domain relation between engine torque and rotation speed⁶⁸⁾

微分によるノイズの強調を避けるために、 ω と $\tau = \tau_{comb} + \tau_{iner}$ の関係を周波数領域で考え、高周波成分をカットすることを試みる。Fig. 2-1は、 ω と τ の時系列を示している。Fig. 2-2は、燃焼周波数(燃焼周期の逆数。ここでは4気筒内燃機関を扱うので、 $1/180^\circ$)の4倍までの ω と τ の周波数領域での関係を示している。実験的な検討に基づき、 ω と τ は燃焼周波数の4倍まで

の成分が支配的であることがわかったので、燃焼周波数の4倍より大きい高周波成分は、ノイズをカットするために無視する。この次数は、実機データに基づいてトルクを推定するのに十分であることを確認した値である。Fig. 2-2は、ゲイン $|\tau|/|\omega|$ が周波数に比例していて、位相差 $\angle\tau - \angle\omega$ は定数 $2\pi/4$ であることを示す。このゲイン比、位相差は、微分演算の理論上の特性と一致する。

このことから、 ω をフーリエ変換し、この燃焼周波数の1, 2, 3, 4倍の成分の振幅をそれぞれ1, 2, 3, 4倍し、位相を $2\pi/4$ 進めることで、周波数領域のトルクが求まり、これを逆フーリエ変換すると、トルクの時系列が求められるが¹⁰⁵⁾、周波数領域と時間領域の間の信号の変換は計算量を要するので、等価な計算を時間領域で実現することを試みる。具体的には、クランク角速度を三角関数の和で近似し、近似関数を微分することで、安定な微分を実現する。

なお、燃焼圧の周期性に着目し、燃焼周波数、その倍周波数の信号強度・位相からIMEPを求めることで、IMEPの計算コストを低減しようという試みが土屋らによって行われた。筒内圧センサを直接使っても、IMEPを求めるためには内燃機関の1燃焼行程をさらに細かく分割して筒内圧を取り込む必要があるため、例えばクランク角 1° で燃焼圧を取り込もうとすると、AD変換やIMEP演算に多くの計算量を要する。この計算量削減のため、土屋らは燃焼圧波形の周期性により、燃焼圧波形をフーリエ級数で近似すれば、サンプリング間隔を広くできて、計算量を削減できるということを示した¹⁰⁶⁾。

本研究では、内燃機関燃焼圧、燃焼トルクやクランク軸回転速度の周期性によりこれらがフーリエ級数で近似でき、離散信号をフーリエ級数で近似し連続関数として扱うことで、さらに安定な微分が可能となることを利用し、筒内圧センサを用いなくてもクランク軸回転速度から燃焼トルク瞬時値やIMEPが推定できることを示す。任意の開始点 θ_0 からクランク角 $\Theta=180^\circ$ の間の内燃機関回転速度 $\omega(\theta)$ ($\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \Theta$)をFourier級数に分解する。ここでは、4次成分まで考えれば燃焼トルクが十分再現できるという実験結果に基づいて、4次成分まで考える。

$$\begin{aligned} \omega(\theta) &= \omega_0 + c_1 \cos \frac{2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} + s_1 \sin \frac{2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} \\ &\quad + c_2 \cos \frac{2 \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} + s_2 \sin \frac{2 \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} \\ &\quad \dots + c_4 \cos \frac{4 \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} + s_4 \sin \frac{4 \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} \dots \dots \dots (2-2) \\ &= \omega_0 + \sum_{k=1}^4 \left\{ c_k \cos \frac{k \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} + s_k \sin \frac{k \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} \right\} \end{aligned}$$

ただし、Fourier級数の性質より、 c_k, s_k は以下のように計算される。

$$\begin{aligned} c_k &= \frac{2}{\Theta} \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \Theta} \omega(\theta) \cos \frac{k \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} d\theta \\ s_k &= \frac{2}{\Theta} \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \Theta} \omega(\theta) \sin \frac{k \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} d\theta \dots \dots \dots (2-3) \end{aligned}$$

(2)に $\theta=\theta_0+\Theta/2$ を代入すると,

$$\begin{aligned}\omega(\theta_0 + \Theta/2) &= \omega_0 + \sum_{k=1}^4 \{c_k \cos(k\pi) + s_k \sin(k\pi)\} \dots\dots\dots(2-4) \\ &= \omega_0 + \sum_{k=1}^4 \{c_k (-1)^k\}\end{aligned}$$

これは、 $\omega(\theta)$ ($\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \Theta$)を平滑化して、中間のタイミングの $\omega(\theta_0 + \Theta/2)$ を計算するフィルタである。この計算のブロック図はFig. 2-3のようになる。 c_k は、長さ Θ の区間の信号の k 次のcos成分で、Fig. 2-3における各フィルタで計算される。これらの和をとることで $\omega(\theta_0 + \Theta/2)$ は計算される。

同様に、 ω の微分を求める。(2-2)を微分すると,

$$\dot{\omega}(\theta) = \sum_{k=1}^4 \frac{k \cdot 2\pi}{\Theta} \left\{ c_k \sin \frac{k \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} - s_k \cos \frac{k \cdot 2\pi(\theta - \theta_0)}{\Theta} \right\} \dots\dots\dots(2-5)$$

これに $\theta=\theta_0+\Theta/2$ を代入すると,

$$\dot{\omega}(\theta_0 + \Theta/2) = \sum_{k=1}^4 \frac{k \cdot 2\pi}{\Theta} \{c_k \sin k\pi - s_k \cos k\pi\} = \sum_{k=1}^4 \frac{k \cdot 2\pi}{\Theta} s_k (-1)^k \dots\dots\dots (2-6)$$

したがって、 $\dot{\omega}$ は所与の区間の信号と、1~4次のsinフィルタとの畳込を、周波数に比例した重み付けした和で計算される。これをブロック図で表すとFig. 2-4のようになる。

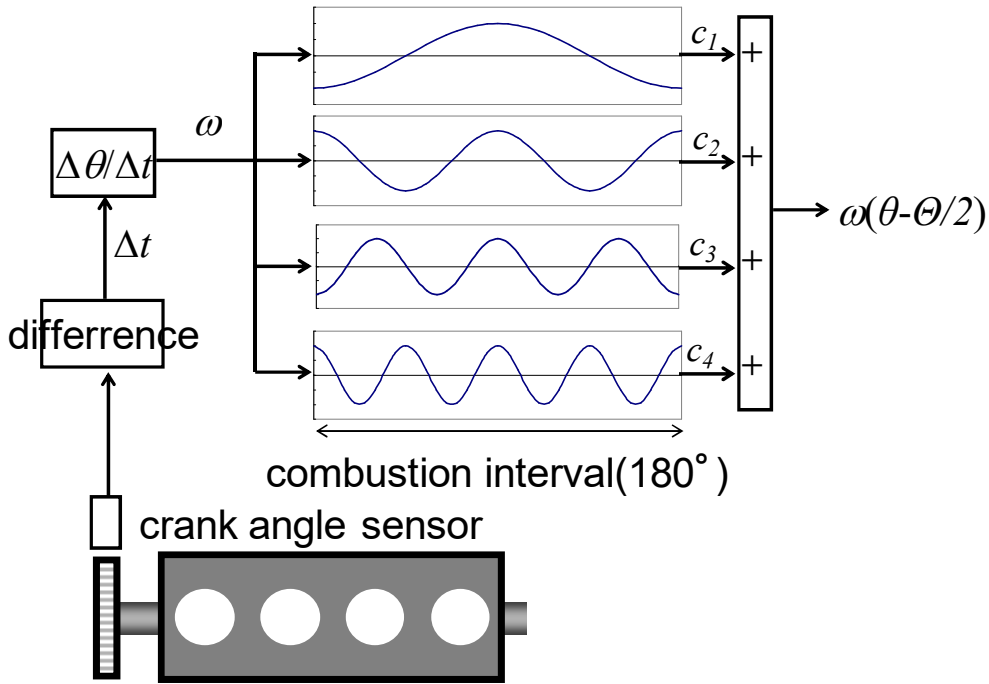


Fig.2-3 A filter for smoothing ω ⁶⁸⁾

Fig.2-4に示す手順は, Fig.2-5に示さるような係数のFIRフィルタに集約して実現することができる. この周波数特性を, Fig.2-6に示す. このフィルタは, 燃焼周波数の4倍である $f = 4 / (180^\circ)$ までは, 周波数とゲインはほぼ比例し, これを過ぎるとゲインは0に収束しノイズを除去する. これにより, ノイズを効率的に除去しつつ, 安定な燃焼トルク推定を実現する.

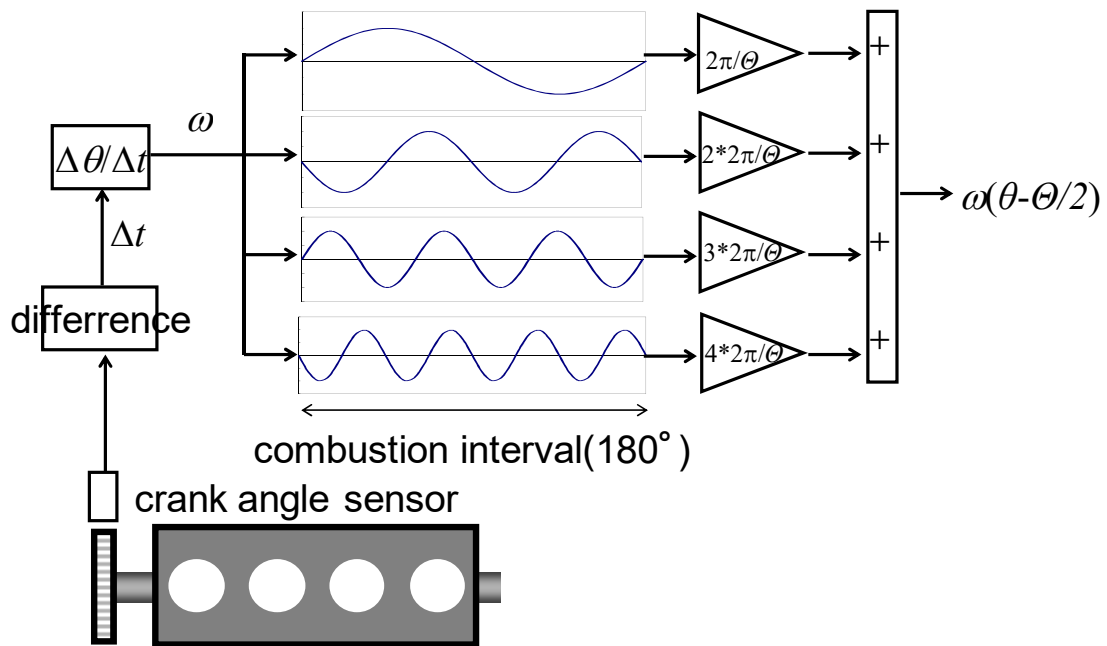


Fig.2-4 Proposed procedure for engine torque estimation from engine speed by numerical differentiation of ω ⁶⁸⁾

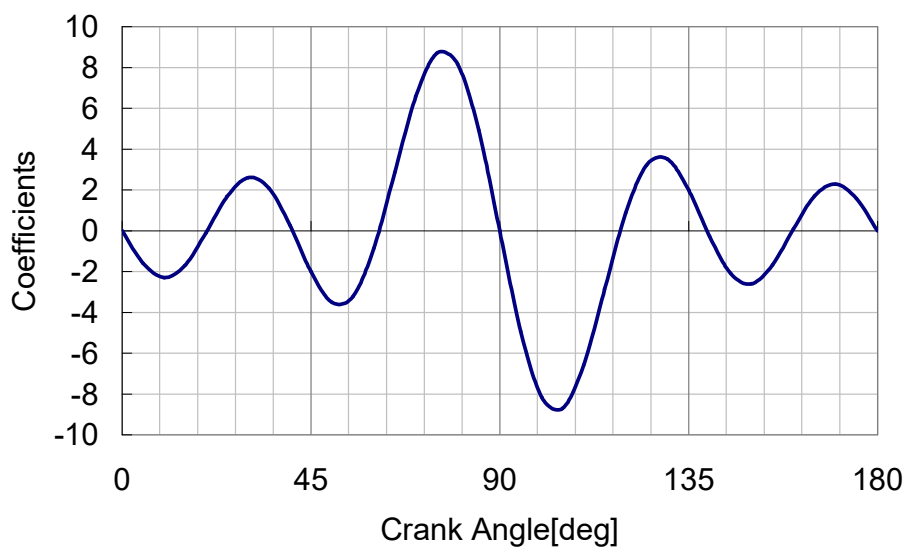


Fig.2-5 Coefficients of torque estimation filter⁶⁸⁾

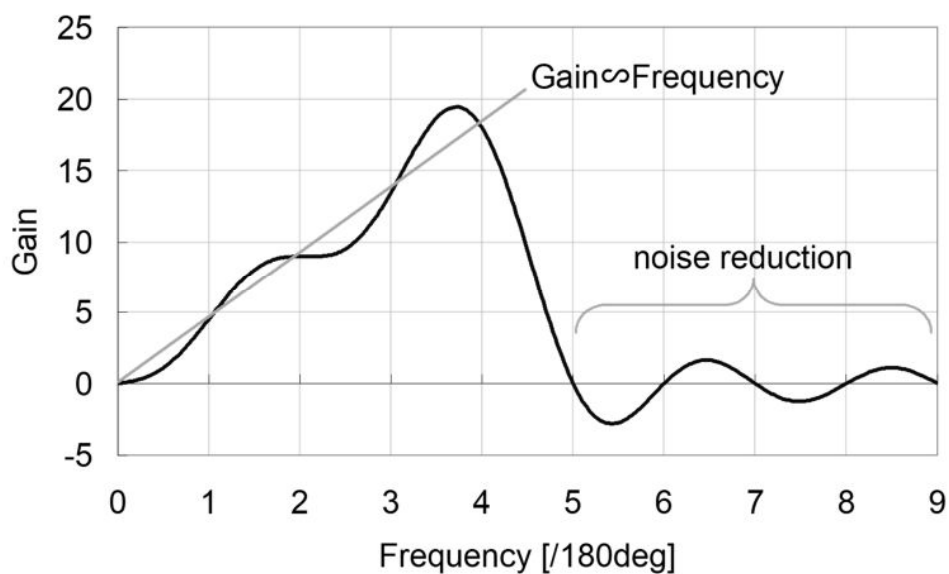


Fig.2-6 Frequency characteristic of torque estimation filter⁶⁸⁾

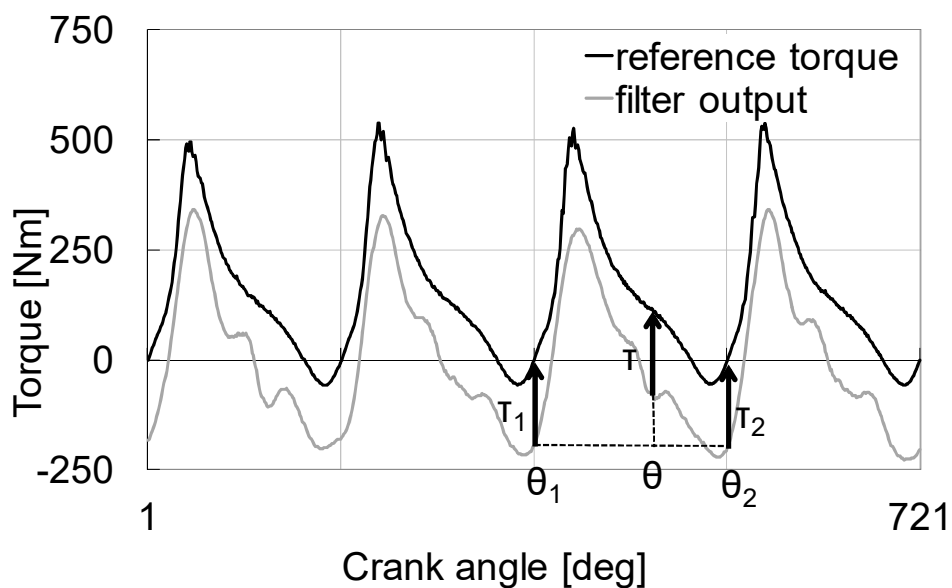


Fig.2-7 Torque estimation filter output⁶⁸⁾

このフィルタにより、 ω からトルクを推定した結果を、Fig. 2-7に示す。この図では、濃い色の線は、参照のために取り付けられた筒内圧センサから計算された参照トルクであり、薄い色の線が本方式で推定されたトルクである。

推定トルクは参照トルクと高い相関を持つことがわかるが、それらの間には、摩擦トルクや負荷トルクによるオフセットが存在する。

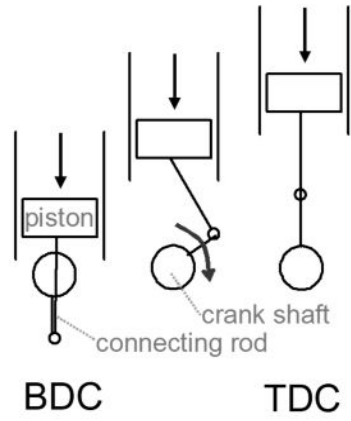


Fig.2-8 Geometrical characteristic of engine link mechanism⁶⁸⁾

Fig. 2-8に示す，内燃機関のコネクティングロッドの幾何学的な特徴を用いて，このオフセットを打ち消す．内燃機関のピストンの位置がTDCまたはBDC(Bottom Dead Center：下死点)である場合は，Fig. 2-8の左右の図のように，シリンダの燃焼圧力はクランク軸に伝達できない．従って，燃焼トルクはTDCとBDCでゼロである．この条件を使用して，推定トルクのオフセットを補償する．

Fig. 2-7のように，TDCあるいはBDC（クランク角 θ_1 ）でフィルタ出力が τ_1 で，次のBDCあるいはTDC（クランク角 θ_2 ）でフィルタ出力が τ_2 である場合は， θ_1 と θ_2 の間の補正トルクは次式で与えられる．

$$\tau_{compensation} = \tau_1 \frac{\theta_2 - \theta}{\theta_2 - \theta_1} + \tau_2 \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \dots\dots\dots(2-7)$$

この補正の効果はFig. 2-10(a)に示され，推定トルクは精度よく参照トルクを推定していることがわかる．

2-3 燃焼トルクの推定結果

提案されたトルク推定方法を，内燃機関試験で評価した．実験装置をFig. 2-9に示す．クランク軸回転数は，クランク軸の回転角度1度毎に立ち下がりパルスを検出するクランク角センサによって測定した．クランク角センサ信号は1MHzでAD変換され，データロガーに記録された．記録された信号は，PC内で提案手法によって処理された．トルク推定精度を評価するために，4気筒に筒内圧センサを取り付けてその計測された圧力を先述のデータロガーに記録し，参照トルクを計算し，推定トルクと比較した．

内燃機関試験の運転条件を以下Table 2-1に示す．

Table 2-1 Engine operating condition for evaluation⁶⁸⁾

1000rpm, WOT(wide open throttle)	Fig.2-10 (a)
1000rpm, 1/3 load	Fig.2-10 (b)
1000rpm, 1/3 load, torque step =15%	Fig.2-10 (c)
Idle	Fig.2-11
2000rpm, WOT	Fig.2-12 (a)
2000rpm, 1/3 load	Fig.2-12 (b)
Transient (idle → Full load)	Fig.2-13.

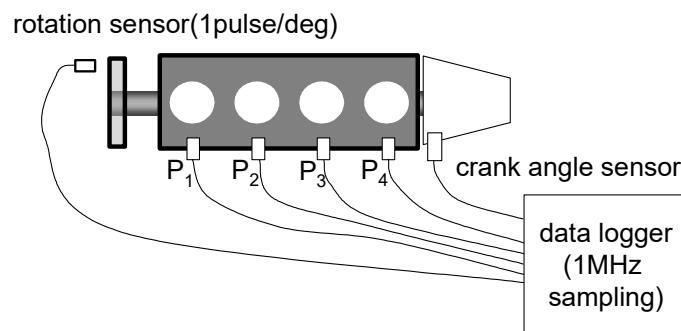
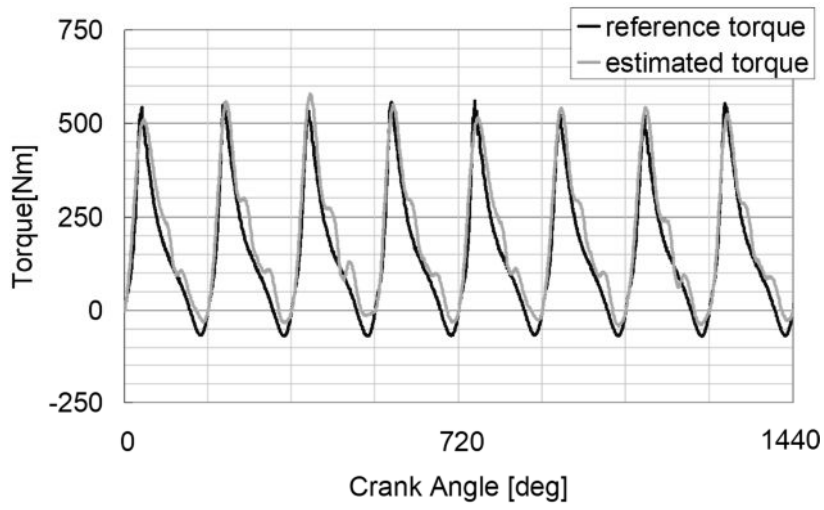


Fig.2-9 Experimental setup⁶⁸⁾

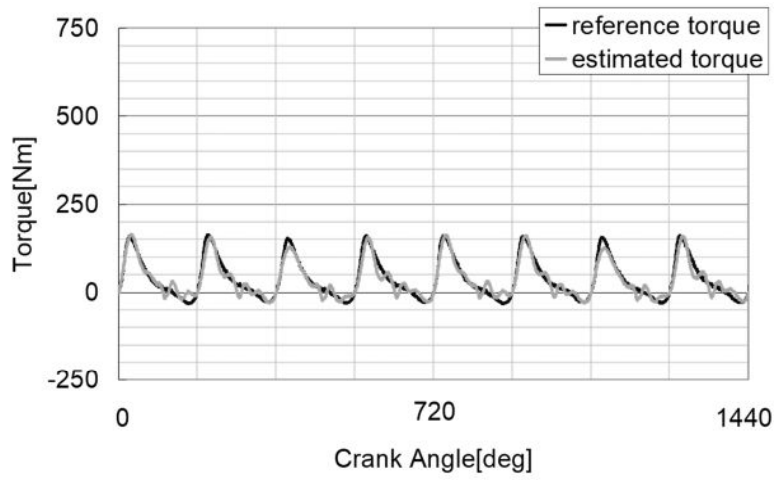
Fig. 2-10は、内燃機関回転数が1000rpmのときのトルク推定結果を示す。(a)は全負荷、(b)は1/3負荷のときの結果で、(c)は1/3負荷で、特定の1気筒の点火タイミングを他気筒より遅らせて、トルクを15%減らしたものである。(a) (b) (c)ともに、トルクの立下り時に推定トルクに振動がのるものの、トルクの立上りとピークが、推定値と参照値で一致していることを示す。また、(c)におけるトルクの気筒間のばらつきも推定トルクに再現されている。

Fig. 2-11は、内燃機関をアイドル状態で運転したときの、トルクの推定結果を示す。アイドル時はトルクのピークが燃焼毎に変動するが、推定結果はこの変動に追従している。

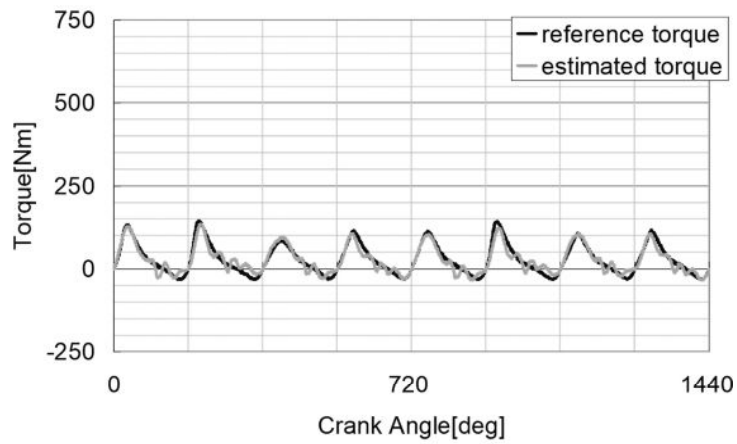
Fig. 2-12に示すように内燃機関回転数が2000回転まで増加すると、推定トルクのピークとボトムは参照トルクに追従するが、推定トルクの脈動が増大し、無視できなくなる。脈動の理由は、クランク軸振動や内燃機関回転速度のサンプリング周波数の不足である。Fig. 2-13は、内燃機関がアイドルからフルスロットルに操作されたときの結果を示す。過渡的な運転条件でも、提案手法は正確に燃焼トルクを推定したことが確認される。燃焼トルク、クランク軸回転角速度の周期性に基づいて、周波数領域で回転角速度から燃焼トルクを求める方法¹⁰⁵⁾では、フーリエ変換する区間の長さによっては過渡的なトルク推定は困難であるが、本方式では、クランク角180°の区間のフィルタでクランク軸回転角速度のフィルタリングを行い、クランク角180°毎に発生する上下死点でのトルク補正を行うことで、過渡時の精度良いトルク推定が実現できた。



(a) 1000rpm, WOT



(b) 1000rpm, 1/3 load



(c) 1000rpm, 1/3, torque step = 15%

Fig. 2-10 Torque estimation results, when engine rotation speed was 1000rpm⁶⁸⁾

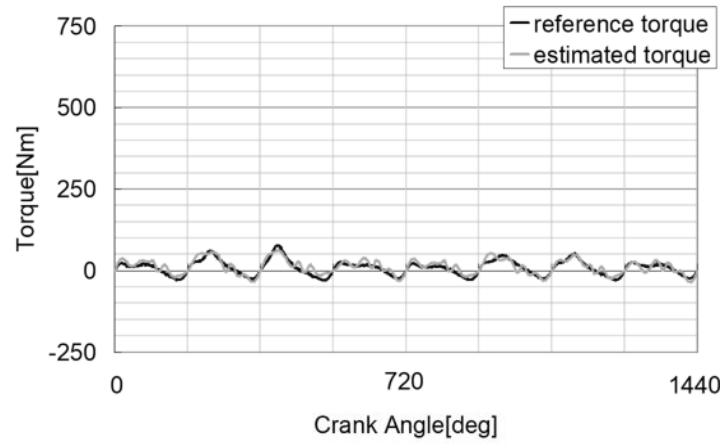
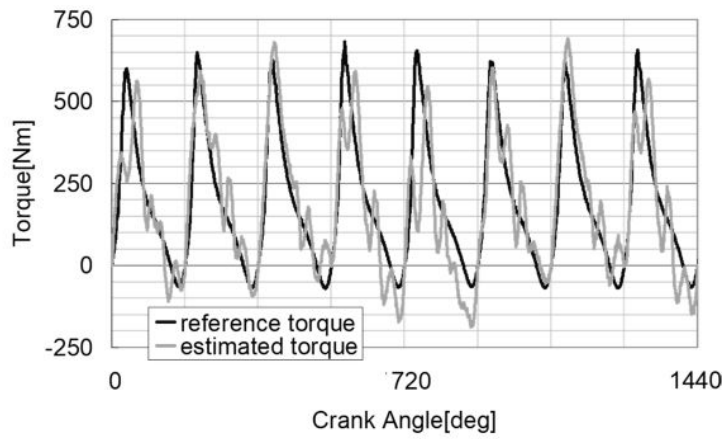
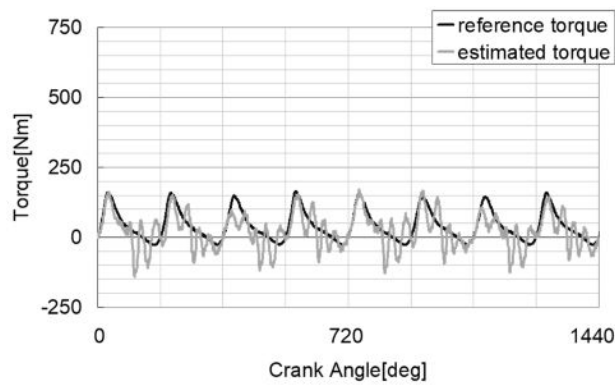


Fig. 2-11 Torque estimation results, when engine was idle⁶⁸⁾



(a)2000rpm WOT



(b)2000rpm, 1/3 load

Fig. 2-12 Torque estimation results, when engine rotation speed was 2000rpm⁶⁸⁾

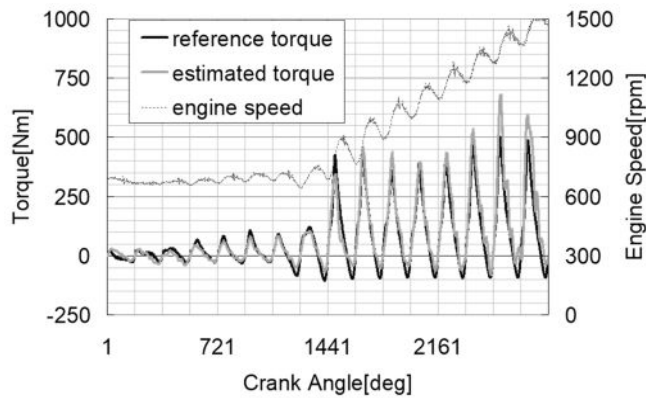


Fig.2-13 Torque estimation results, when engine was operated from idle to full throttle mode⁶⁸⁾

2-4 IMEPの推定結果

この節では、提案手法を用いて推定された燃焼トルクに基づいて、燃焼圧指標IMEPを算出する。

燃焼圧 P_{comb} と燃焼トルク τ_{comb} の関係は、Fig. 2-14より、シリンダ断面積 A_{cyl} 、クランクアーム長 R 、コネクティングロッドと中心軸の間の角 α 、クランクアームと中心軸の間の角 β を用いて、

$$\tau_{comb} = \frac{P_{comb} A_{cyl} R \sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha} \dots \dots \dots (2-8)$$

この式に基づいて、第 i 気筒のIMEPは、第 i 気筒燃焼圧 P_i 、第 i 気筒燃焼トルク τ_i を用いて、次式に従って計算される。

$$IMEP_i = \frac{\int_{\theta_{BDC(compression)}}^{\theta_{BDC(compression)} + 4\pi} P_i dV}{V} = \frac{\int_{\theta_{BDC(compression)}}^{\theta_{BDC(compression)} + 4\pi} \tau_i d\theta}{V} \dots \dots \dots (2-9)$$

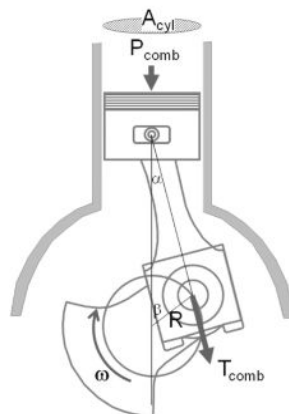


Fig.2-14 Relation between cylinder pressure and engine torque⁶⁸⁾

1気筒内燃機関であれば、燃焼トルクは1つしかないが、この論文の対象内燃機関は4気筒であり、4気筒それぞれに燃焼トルクがある。しかし、クランク軸の回転から推定される燃焼トルクは1つしかなく、4気筒分の燃焼トルクの合計が得られるにすぎない。そこで、一つの燃焼トルクから4気筒分のIMEP計算するため、Fig. 2-15に示すように、燃焼トルクをクランク角度で分割する。

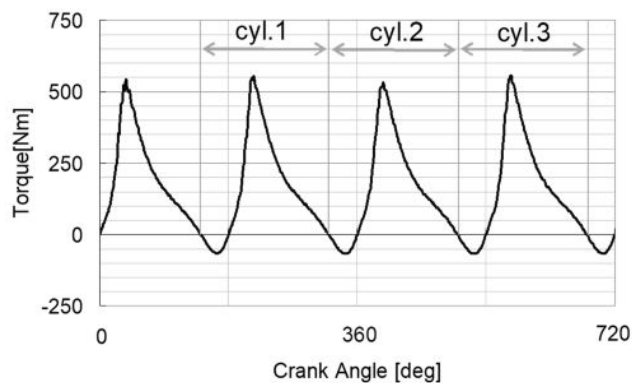


Fig.2-15 Time division of engine torque for IMEP calculation⁶⁸⁾

Table 2-2 Engine condition for IMEP estimation⁶⁸⁾

Engine speed	1000 [rpm]	1000 [rpm]	1000 [rpm]	idle
Engine load	Full	2/3	1/3	

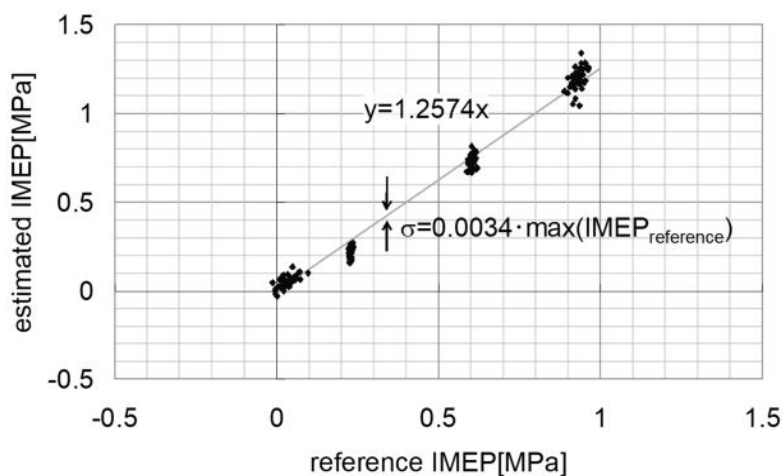


Fig.2-16 Relation between estimated IMEP and reference IMEP (1000rpm, idle)⁶⁸⁾

2-3節における燃焼トルクに基づいてIMEPを算出し、筒内圧センサで計測した各気筒の燃焼圧から算出したIMEPと比較した。Table 2-2に示す条件で内燃機関を運転したときの、参照IMEPと推定IMEPをFig. 2-16に示す。

この図は、推定IMEPと参照IMEPとは密接に相関していることを示す。相関を次式で近似すると

$$\text{IMEP}_{\text{estimated}} = 1.2574 \cdot \text{IMEP}_{\text{reference}}, \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

推定誤差は、

$$\sigma = 0.034 \cdot \max(\text{IMEP}_{\text{reference}}) \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

となり、最大IMEPの3.4%となった。式(2-10)の比例係数は、内燃機関によって変わる値であり、実験により同定した。

バルブタイミングは内燃機関の吸気効率に影響し、この変化によってIMEPも変化する。この変化に推定IMEPが追従できるか調べた。

吸排それぞれのバルブタイミングのテスト条件をTable 2-3に示す。これらの実験では、バルブタイミングのみ変更し、それぞれの開弁から閉弁までの期間は一定に保った。

Table 2-3 Combination of intake and exhaust valve timing for IMEP estimation⁶⁸⁾

		intake valve timing		
		standard -10deg	standard	standard +10deg
exhaust valve timing	standard -10deg	○	○	○
	standard	○	○	○
	standard +10deg	○	○	○

Table 2-3に示す各バルブタイミングで、筒内圧センサから計測された参照IMEPと、クランク角センサから推定されたIMEPの関係を、Fig. 2-17に示す。この図をみると、バルブタイミングによってIMEPの真の値は変化するが、IMEPの推定値もこれに追従して変化していることがわかる。

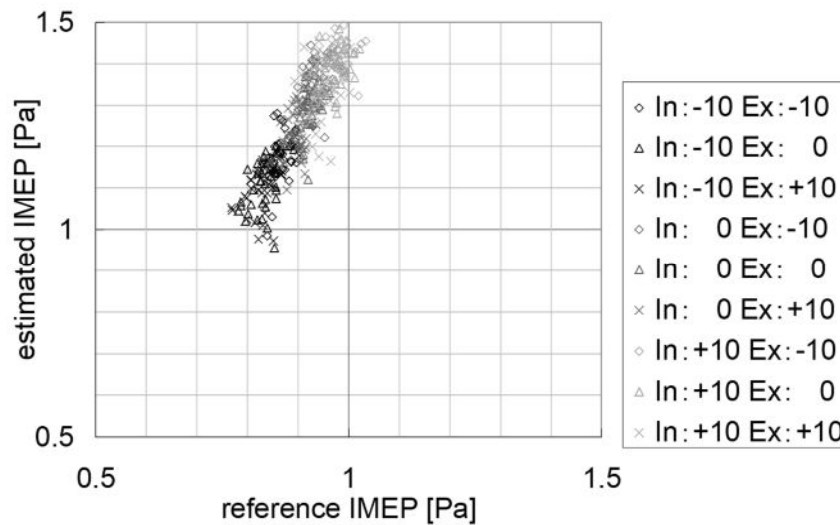


Fig. 2-17 Relation between estimated IMEP and reference IMEP, when valve timing was changed⁶⁸⁾

2-5 クランク角センサ角度分解能による燃焼トルク推定性能への影響

2-3節では、内燃機関回転速度からの燃焼トルク推定が原理的にどこまで可能かを評価するため、角度分解能が1°のクランク角センサを用いて、燃焼トルクの推定性能を評価した。これに対し本章では、提案する燃焼トルク推定方法が、量産内燃機関に装着されているクランク角センサでも実現できるかを、実機試験で検討する。Fig. 2-18に示すような試験装置で検討した。クランク角センサは、10°間隔で歯をもち、基準位置の特定のために、一か所だけ歯が欠けていて、30°の間隔のところがある。この出力はFPGAに読み込まれ、そこで歯の立下りから次の立下りまでの回転所要時間から回転速度を計算し、DA変換してFPGAから電圧信号として出力した。回転所要時間の計測分解能は1MHzである。

量産型のクランク角センサと、1°分解能のクランク角センサとで計測したクランク軸の回転速度(それぞれ ω_{cra} , ω_{1deg} で示される速度)をFig. 2-19に示す。

(a)は内燃機関回転数が1000rpm、スロットル全開で計測されたクランク軸回転速度であるが、一度アナログ化することによるノイズが含まれるものの、おおむねクランク角10°ごとの階段状になっている。また、クランク角90°から120°、270°から300°の間は、それぞれほぼ一定の速度となっているが、これは歯の間隔が30°のところに相当する。また、その後の10°では、30°回転する所要時間で10°を割ったため、 ω の値が他の区間のほぼ1/3となっている。歯の間の回転所要時間が1つ前の値に比べて急激に大きくなったら、歯欠けがあったと考えると、回転所要時間で10°ではなく30°を割れば、角速度が1/3になることを補正できる。この図では補正前の角速度を示している。

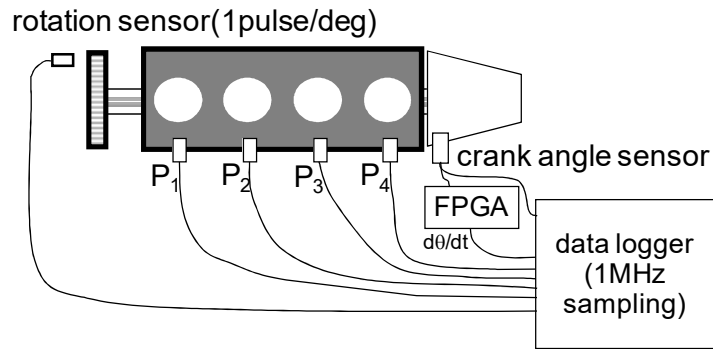
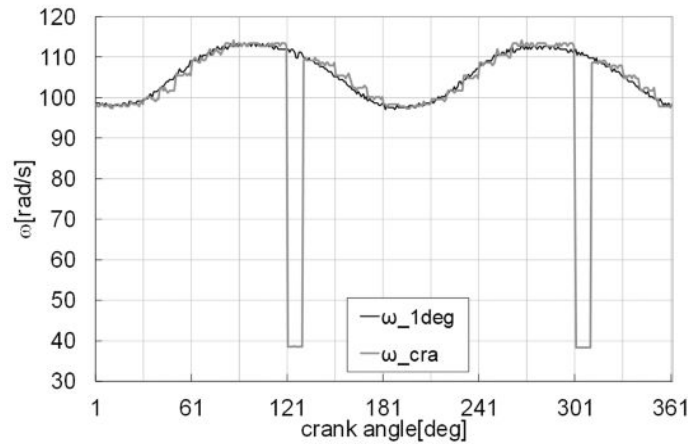
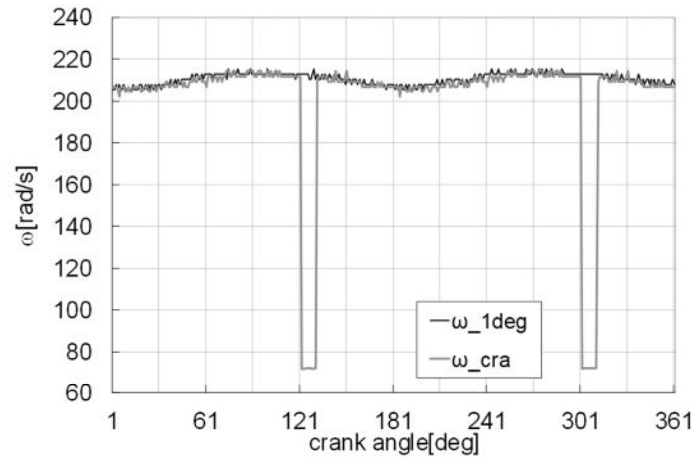


Fig.2- 18 Experimental setup for evaluation of torque estimation performance using mass-production crank angle sensor⁶⁸⁾

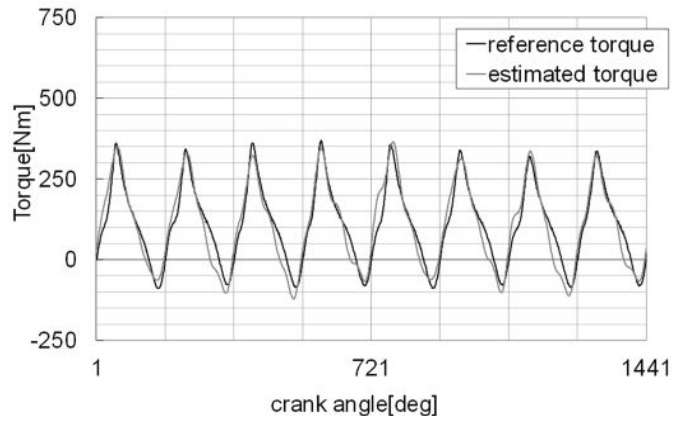


(a) Rotation speed when engine was operated at 1000rpm, full throttle

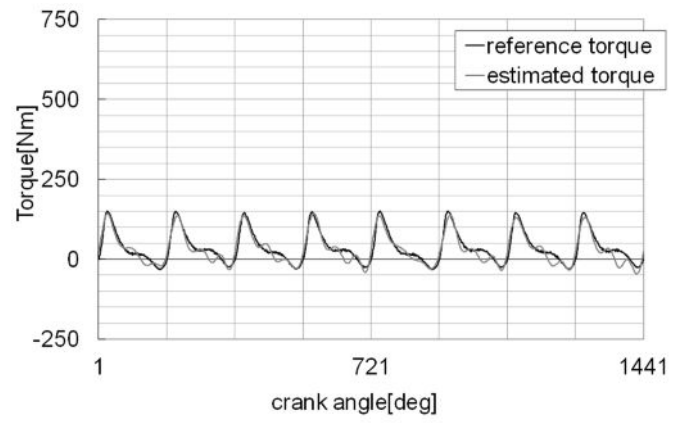


(b) Rotation speed when engine was operated at 2000rpm, full throttle

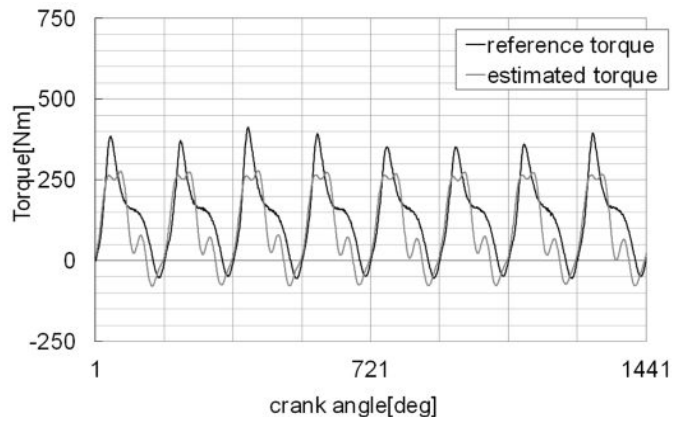
Fig.2-19 Crank shaft rotation speed measured by 1deg rotation sensor and mass-production crank angle sensor⁶⁸⁾



(a) Combustion torque when engine was operated at 1000rpm, full throttle



(b) Combustion torque when engine was operated at 1000rpm, 1/3 load



(c) Combustion torque when engine was operated at 2000rpm, full throttle

Fig.2-20 Estimated and reference combustion torque when mass production crank angle sensor, whose teeth interval was 10deg, was used.⁶⁸⁾

(b)は2000rpm, スロットル全開におけるクランク軸回転速度であるが, 1000rpmのときに比べると振幅がだいぶ小さくなっており, S/N比がかなり悪くなっていることが危惧される.

このようなクランク軸回転速度に, 2章で述べた燃焼トルク推定方法を適用して燃焼トルクを推定した結果をFig. 2-20に示す.

(a)は1000rpmでスロットル全開, (b)は1000rpmで1/3負荷の場合であり, それぞれFig. 2-10の(a) (b)と内燃機関の運転条件は同じである. これらを見ると, クランク角センサの分解能が 10° でも燃焼トルク山谷が波形が正確に再現されていて, 1° の場合と比較してもそれほど燃焼トルク推定性能が劣化していないことが確認される.

この理由としては, 次の通り考えられる. この方法ではクランク軸回転速度の燃焼4次, すなわちクランク角 45° の成分とそれより低次の成分をフィルタリングしているため, クランク角センサを 10° から 1° にすることにより増加する情報は, フィルタで除去されてしまっているため, クランク角センサの分解能が 1° でも 10° でも, 同じような燃焼トルク推定が実現できたと考えられる.

また, Fig. 2-20(c)に示す, 2000rpm, スロットル全開のトルク推定結果をみると, トルクの大まかな山の位置は一致しているが, かなり振動が目立ってくる. このことは, 同じ運転条件で 1° の分解能でクランク軸回転速度を計測したFig. 2-12の(a)でも見られることである. この振動の周期はクランク角 45° で, 2-2節の推定フィルタの最高次数のものが透過させる成分と一致する. これは, 2000rpmになると, とりたい回転速度変動の振幅と, 回転速度計測のノイズの振幅が, かなり近くなり, これが最もゲインの大きい燃焼4次のフィルタを通過してしまったためだと考えられる. クランク軸回転速度計測の時間分解能を向上させる等の方法でノイズを低減できれば, 2000rpmでもより高精度に燃焼トルクが推定できるものと期待できる.

2-6 おわりに

クランク軸回転速度の時間変動から, 内燃機関トルクを推定する方法を提案した. この方法は, クランク角 180° のクランク軸回転速度を三角関数で近似し, 近似関数を微分することと等価な処理をFIRフィルタで実現することで, 安定な微分を実現し, クランク軸回転速度から燃焼トルクを推定するものである. また, 負荷トルクや摩擦トルクの影響を, 内燃機関の上下死点で燃焼トルクが0になることに基づいて補正する方法を提案した.

この方法で, クランク軸回転速度から燃焼トルクが推定できることを原理的に評価するため, クランク軸回転速度の計測分解能が 1° の内燃機関試験を実施した. その結果, (1)1000rpmでは全負荷でも1/3負荷でもトルクの立ち下がり推定値に振動が乗るものの, トルクの立ち上がり, ピークは正確に再現できることがわかった. また, 推定トルクはトルクの気筒ばらつきにも追従できることがわかった.

(2)推定トルクはアイドル時のトルク変動にも追従できた.

(3)2000rpmになると, 推定された燃焼トルクに振動が目立ってくるが, これはクランク軸のねじり振動や, リングギアの回転所要時間を計測するときの時間分解能の影響の影響だと考えられる.

(4)周期性を前提としないFIRフィルタの処理によりクランク角速度を微分し, さらに上下死点でトルクを補正することで, 過渡運転のトルク変動も正確に追従できた.

このトルク変動に基づいてIMEPを推定した結果, 1000rpmでIMEPを1/3負荷から全負荷まで変化させたときのIMEP推定性能は, 標準偏差が最大IMEPの3.4%であることが分かった. また, バルブタイミングを変化させることによるIMEPの変化にも, 推定結果は追従できることが確認された.

また, 量産内燃機関に搭載されているクランク角センサの分解能での燃焼トルク推定性能を評価するため, 10° の分解能のクランク角センサの信号から燃焼トルクを推定したところ, クランク角センサが 1° のときの推定性能と比べて劣化が小さいことがわかった. これは, 燃焼トルク, クランク軸回転角速度の周波数成分は燃焼4次(クランク角 $180^\circ/4=45^\circ$)までが支配的なので, クランク角 10° より細かい周期の成分の寄与は小さいからである.

第3章 平坦な周波数特性をもつ微分フィルタ

—微分フィルタの周波数特性に基づく空燃比センサの診断—

3-1 はじめに

本章では、微分フィルタの3つの特徴のうち、周波数に比例したゲイン特性を生かしたアプリケーションとして、空燃比センサの診断を開発する。このアプリケーションでは、ゲイン特性のリップルがあると誤った周波数の認識につながるため、ゲイン特性は平坦であることが求められる。

車検制度のない北米では、故障した自動車が走り続ける可能性がある。このような事態を防ぐため、車載コンピュータには内燃機関を制御するセンサ・アクチュエータの故障を診断する機能を備えることが1988年よりカリフォルニア州で義務付けられた。このような車載コンピュータに備えられている内燃機関制御系を診断する機能はOBD²⁾と呼ばれている。さらに1996年からはより高度な診断機能であるOBD IIが全米で義務付けられた。OBD IIと同等な機能は、2001年からは欧州で³⁾、2008年からは日本でも義務付けられた^{107,108)}。本章では、OBDの一つである、空燃比センサの劣化診断について述べる。

自動車の内燃機関で燃料と空気の混合気が燃焼する際に、窒素酸化物NO_x、炭化水素HC、一酸化炭素COが発生する。これらの有害物質は三元触媒によって無害な物質に変換されるが、3つの有害物質の変換効率は空燃比に依存し、空燃比を14.7に保つと3つの有害物質を同時に高効率で無害物質に変換できる⁶⁴⁾。自動車の内燃機関では、空燃比センサ(A/Fセンサ)¹⁰⁹⁾により排気ガス中の酸素イオン濃度を計測し、これから空燃比を推定し、空燃比が目標値14.7に収束するように制御している。

この空燃比センサは長時間運転していると、排気ガス中の汚れがセンサに蓄積し、応答性が劣化する。応答性が劣化すると空燃比制御の性能が劣化し、空燃比が14.7から外れてきて、排気ガスへの有害物質の放射の原因となる。そこで、空燃比センサの劣化を診断し、劣化していれば、ドライバに交換を促すことが必要となる。この機能はOBDの一つとして義務付けられている²⁾。

これまで空燃比センサの劣化診断は、空燃比が楕状のパターンになるように燃料噴射量を制御し、そのときのセンサ出力の応答性を観測し、この応答性に基づいて行っていた¹¹⁰⁾。このような方法では、本来、目標空燃比に保たれていることが望ましいはずの空燃比を、空燃比センサの診断のために目標空燃比から外しているため、排気に悪影響を与える。年々厳しくなる排気ガス規制には、もはやこれまでの空燃比を楕形に制御する方法では対応できなくなった。そこで、従来の診断方法とは発想を変えて、診断のために特別な空燃比制御を

せずに目標空燃比を保ちながら診断が行える方法を開発した。開発した方法は様々な内燃機関回転数と負荷で実機評価された⁷⁶⁾。

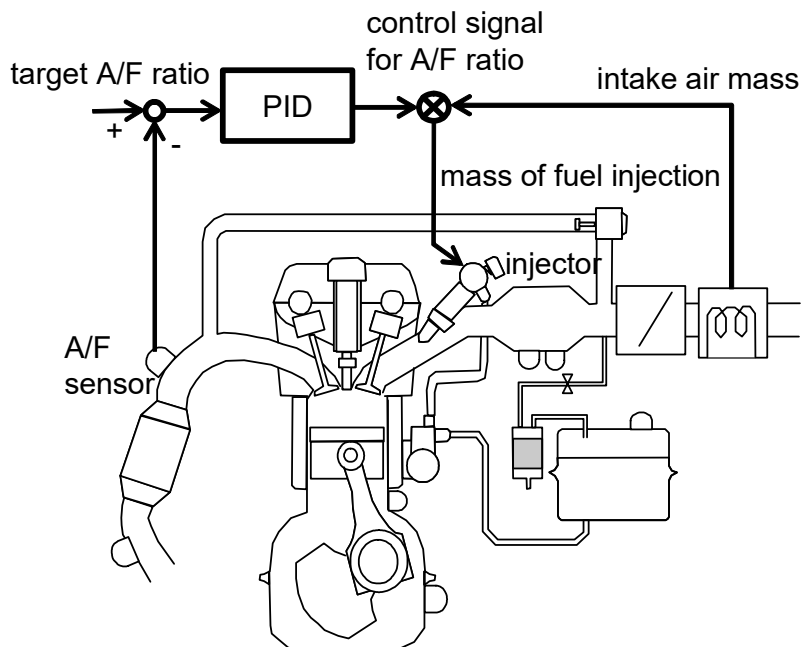


Fig.3-1 Blockdiagram of A/F feed-back⁷⁶⁾

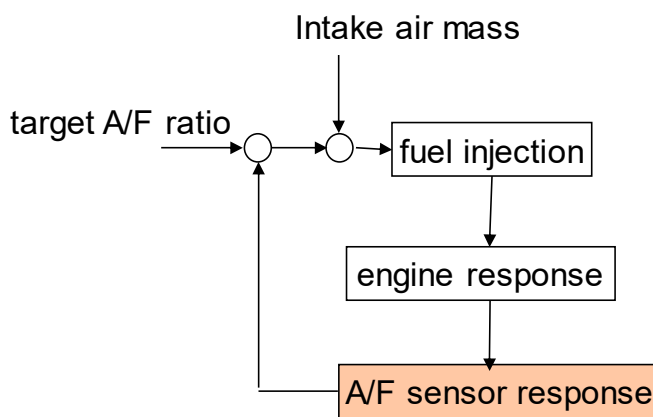


Fig.3-2 Feedback loop of A/F control

3-2 空燃比センサの劣化検出の考え方

空燃比フィードバックのブロック図をFig. 3-1 に示す。空燃比センサはFig. 3-2に示すようなフィードバックループの中の一つの遅れ要素となっており、これが劣化して応答性が低下すると、空燃比フィードバックループ全体の時定数が大きくなる。フィードバック

ループの時定数が大きくなれば、空燃比の周波数分布は低周波側にシフトする。この周波数分布の特徴量に基づいて、空燃比センサの診断を行おうというのが、本研究のコンセプトである。

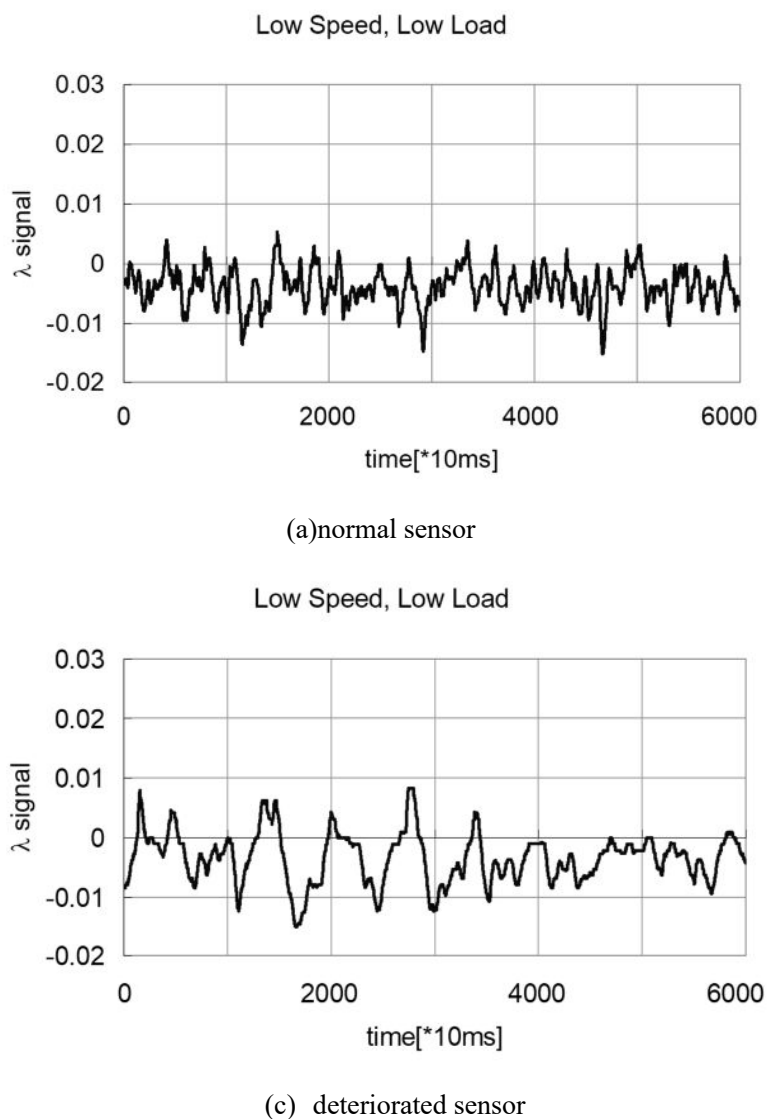
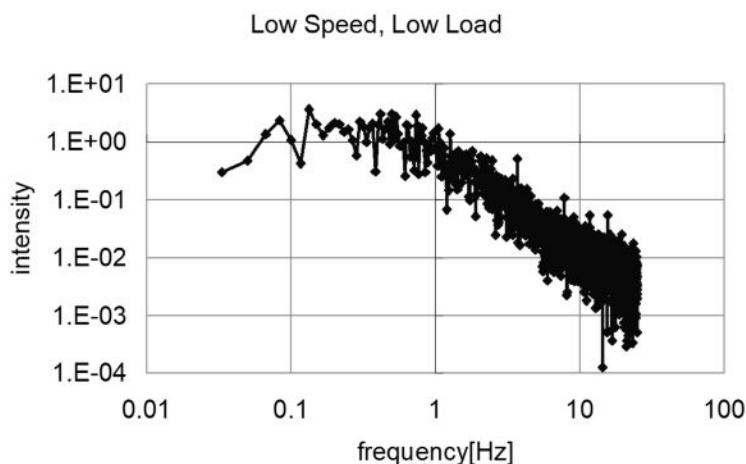


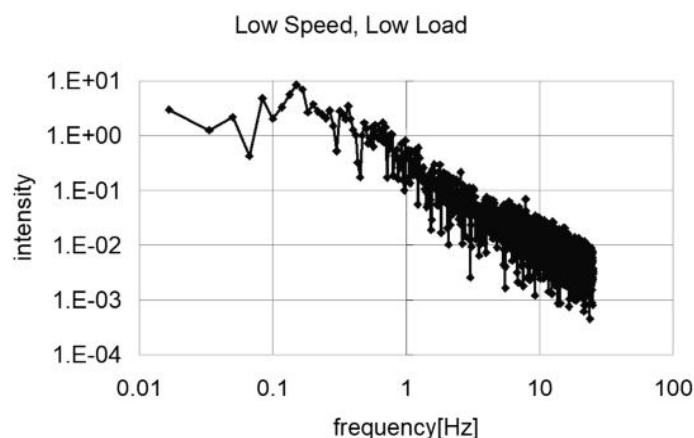
Fig.3-3 Λ signal at low engine speed and low load⁶⁶⁾

Fig. 3-3 は、内燃機関が低回転・低負荷で運転されているときに空燃比センサが出力する信号 λ を 10ms でサンプリングしたものである。この図から、空燃比センサが劣化することによって、周波数が低いほうにシフトしていることがわかる。Fig. 3-4 は Fig. 3-3 をフーリエ変換した結果である。正常なときは、0.1Hz から 1Hz の周波数スペクトル強度はほぼフラットで、1Hz より周波数が高いときに周波数スペクトル強度は右下がりに減衰しているが、

劣化センサの場合は0.2Hz程度から単調に減衰している.つまり,センサが劣化すると0.1Hzから1Hz程度の低周波の周波数スペクトル密度が正常品に比べて高くなっており,周波数分布の重心が低周波数側にシフトすることがわかる.従って,ここでは周波数スペクトラムの特徴を表すパラメータにより空燃比センサの診断を行う方法を開発する.



(a) normal sensor



(b) deteriorated sensor

Fig.3-4 Frequency spectrum of λ signal at low engine speed and low load⁶⁶⁾

OBDは車載のエンジンコントローラ上で実現される必要があるため, フーリエ変換等の周波数領域の処理では計算コストがかかりすぎる. 少ない計算コストで診断を実現するためには, 時間領域で処理することが望ましい. そこで, 本研究では, 微分フィルタのゲインが周波数に比例することに着目した. 空燃比センサの劣化によって空燃比信号の周波数分布が低周波側にシフトすれば, 微分フィルタの入出力比が小さくなるはずである. 本論文では, 微分フィルタの入力と出力の比を劣化診断の指標とする診断方式を開発した.

3-3 フィルタの設計と最適化

3-3-1 フィルタの設計

ここでは、 $t=0, \Delta, 2\Delta, \dots, 2N\Delta (2N\Delta=T)$ で定義された離散的な入力信号 $\lambda(t)$ を 3 角関数の和で表すことで連続化し、連続化した関数を微分して $\lambda'(t)$ とし、 $\lambda(t)$ から $\lambda'(t)$ を生成するよ
うにフィルタを設計する。ここでの設計方法は、window method¹¹¹⁾、窓関数法¹¹²⁾の考え方に
基づいて行う。

$\lambda(t)$ は以下のように 3 角関数の和で表せる。

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t + \alpha_n\right) \dots\dots\dots (3-1) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \end{aligned}$$

これを時間 t で微分すると $\lambda'(t)$ を得る。

$$\lambda'(t) = -\sum_{n=1}^N a_n \omega_n \sin(\omega_n t + \alpha_n) \dots\dots\dots (3-2)$$

したがって、 $\lambda(t)$ から $\lambda'(t)$ を得るフィルタを設計することがここでの課題である。

フィルタを

$$f(t) = \phi_0 + \sum_{n=1}^N \phi_n \cos(\omega_n t + \beta_n) \dots\dots\dots (3-3)$$

と表し、 $\lambda(t)$ を $f(t)$ に入力したときに出力が

$$\begin{aligned} \lambda'(t - \frac{T}{2}) &= -\sum_{n=1}^N a_n \omega_n \sin\{\omega_n(t - \frac{T}{2}) + \alpha_n\} \dots\dots\dots (3-4) \\ &= -\sum_{n=1}^N a_n \omega_n \sin(\omega_n t - \pi n + \alpha_n) \end{aligned}$$

と一致するように $f(t)$ のパラメータを決める。時間を $T/2$ シフトするのは、フィルタの出力
はフィルタの長さの半分遅れるからである。

$\lambda(t)$ を $f(t)$ に入力したときの出力は、

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \int_0^T f(\tau) \lambda(t - \tau) d\tau \\ &= \phi_0 \int_0^T \lambda(t - \tau) d\tau \dots\dots\dots (3-5) \\ &\quad + \sum_{n=1}^N \phi_n \int_0^T \cos(\omega_n \tau + \beta_n) \lambda(t - \tau) d\tau \\ &= \phi_0 a_0 T + \sum_{n=1}^N \phi_n a_n \frac{T}{2} \cos(\omega_n t + \beta_n + \alpha_n) \end{aligned}$$

となるので、これが $\lambda'(t - T/2)$ と一致する条件は、

$$\begin{cases} \phi_0 = 0 \\ \phi_n = 2\omega_n / T \\ \beta_n = \pi / 2 - \pi n \end{cases} \dots\dots\dots (3-6)$$

である。したがって、フィルタは

$$f(t) = -\sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi n) \dots\dots\dots (3-7)$$

となる。

このフィルタの周波数特性は、

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_0^T f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= -\sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \int_0^T \sin(\omega_n \tau - \pi n) e^{-i\omega\tau} d\tau \dots\dots\dots(3-8) \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{4\omega_n^2}{T} \frac{\sin(\frac{\omega T}{2})}{(\omega_n - \omega)(\omega_n + \omega)} e^{-\frac{i\pi}{2}} e^{-\frac{i\omega T}{2}} (-1)^n \end{aligned}$$

となる。N=1, 2, 3, 10 の場合について周波数特性のゲインをプロットすると Fig. 3-5 のようになり、次数 N をあげるほど高い周波数までゲインが増加していくことがわかる。一方で、ゲインの増加の仕方が線形ではなく、脈動していることが気になる。脈動していると、ゲインと周波数が 1 対 1 に対応しないため、診断の妨げになる。

脈動の原因は、信号の長さを T としたため、微分フィルタは周期 T, T/2, T/3... の信号には望ましい特性を示すが、そのあいだの周期の信号については特性が悪くなるためである。次節ではこの脈動を低減するようにフィルタを改善する。

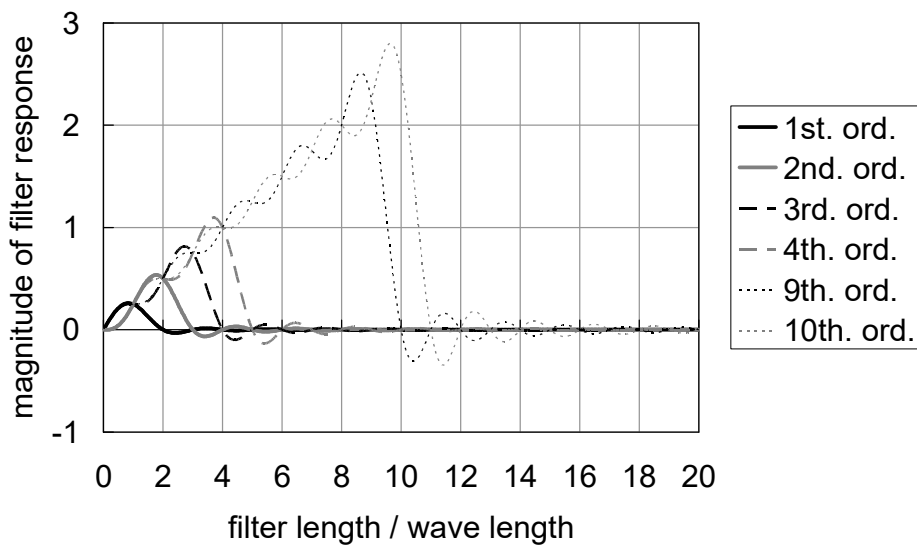


Fig.3-5 Response characteristics of differential filter⁷⁶⁾

3-3-2 フィルタのゲインの脈動の低減

Fig. 3-4 をみると、 $\omega=0$ の近傍でのゲインの上昇の仕方が、 N が奇数のときは上に凸で、偶数のときは下に凸となる。そこで、 N 次のフィルタと $N+1$ 次のフィルタの平均をとり、フィルタ

$$g(t) = \frac{1}{2} \left\{ - \sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi) - \sum_{n=1}^{N+1} \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi) \right\} \dots\dots\dots(3-9)$$

$$= - \sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi) - \frac{2\omega_{N+1}}{T} \sin(\omega_{N+1} t - \pi N - \pi)$$

を考えれば、周波数ゲインは Fig. 3-6 に示すようになり、脈動は低減する。このフィルタを $n+0.5$ 次フィルタと呼ぶこととする。次節でこの最適化を行う。

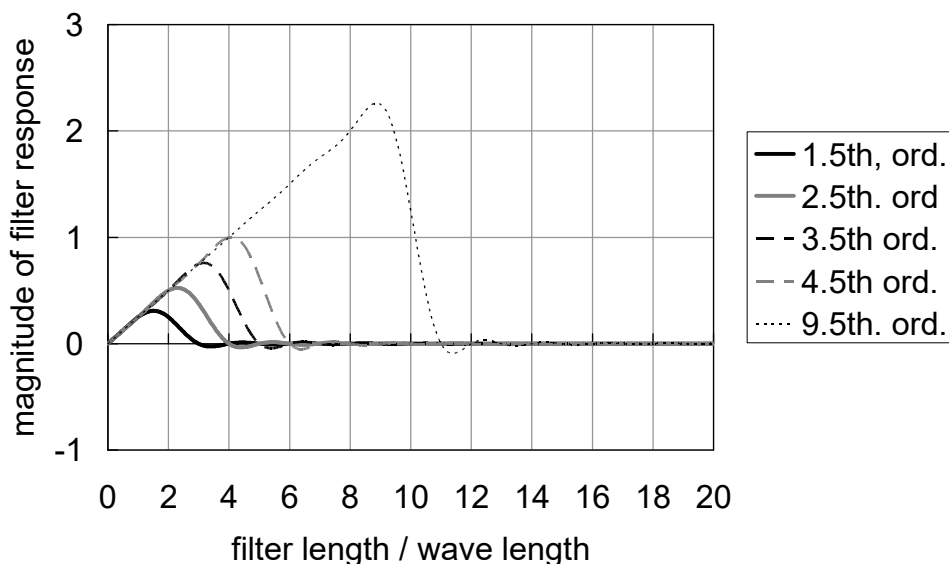


Fig.3-6 Response characteristics of $(n+0.5)$ th differential filter⁷⁶⁾

3-3-3 フィルタの長さや次数の最適化

3-2 節で導いたフィルタの長さ T と次数 N の最適化をここで行う。長さ $0.4s$ の 1.5 次フィルタに、Table3-1 の case1 の運転状態における正常なセンサと劣化したセンサの信号を入力し、入力と出力それぞれの $1s$ 間の標準偏差を示したのが Fig. 3-7 である。この図では正常センサと劣化センサの分離があまりうまくいっていない。分離度を上げるには、正常、劣化それぞれにおいて、横軸に示す入力の標準偏差と、縦軸に示す出力の標準偏差の相関を強くするようにフィルタの長さ、次数を最適化する必要がある。Table3-1 に示す各条件で、

正常, 劣化それぞれのセンサについて, フィルタの長さや次数を変えたときのフィルタの入出力の標準偏差の相関を調べた結果が Fig. 3-8 である. 全体的に言えることはフィルタの長さが 0.4s のときは次数と相関の関係が安定しない. フィルタの長さが 0.8s 以上のときは傾向は劣化センサの case4 が典型的である. 振動のサンプリング間隔はここでは 40ms としているため, フィルタの長さが T のときに, 最高次数は

$$\frac{T}{40[ms] \cdot 2} \dots\dots\dots(3-10)$$

なので, T=0.8s なら 10 次, T=1.2s なら 15 次, T=1.6s なら 20 次が最高次数である. 劣化センサの case4 では, T=0.8s で 9.5 次, T=1.2s で 14.5 次, T=1.6s で 19.5 次で相関が最も強くなっていて, 周波数の高い成分まで微分するようにフィルタを設計することで, 相関が強くなるのがわかる. 劣化センサの case4 が一番相関が低いので, この場合に最も相関を強くする T=1.2s で 14.5 次を採用する. 正常センサと劣化センサの出力の違いが 0.1~1Hz に表れていたことを考えると, フィルタの長さを 1.2s に設定することは妥当なことだと考えられる.

Table 3-1 Engine operating condition⁷⁶⁾

P _b [atm] \ N _{eng} [rpm]	1500	2250	3000
1/3	case1		case4
2/3		case3	
3/3	case2		case5

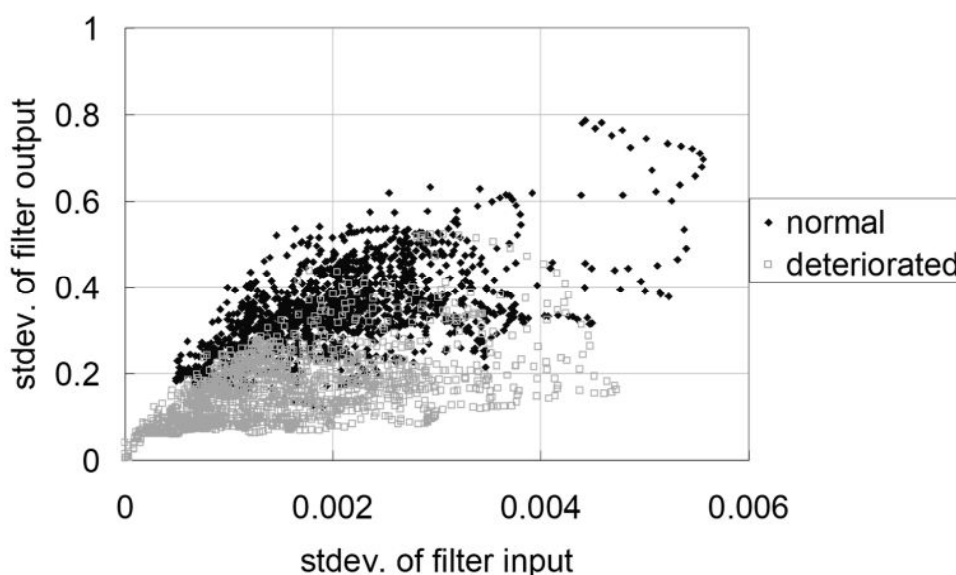
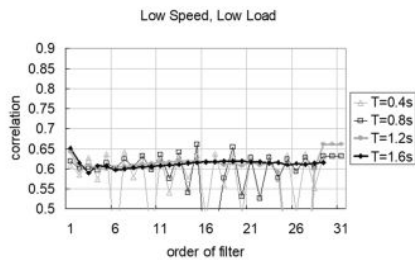
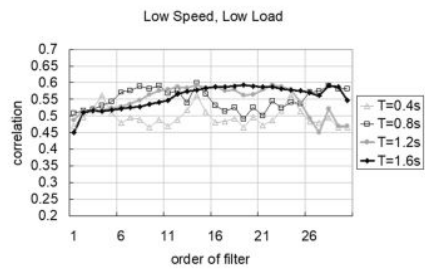


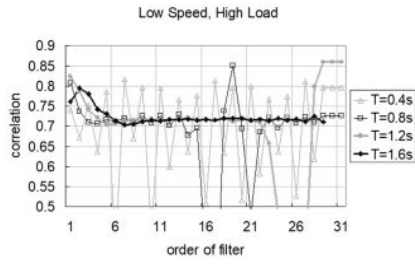
Fig. 3-7 Distribution of standard deviation of λ and λ derivative in case 1⁷⁶⁾



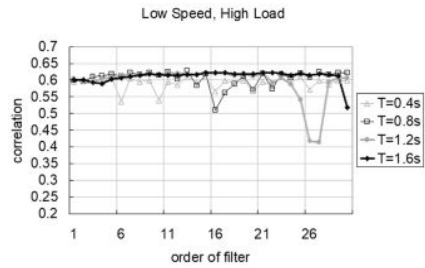
(a) case 1, normal sensor



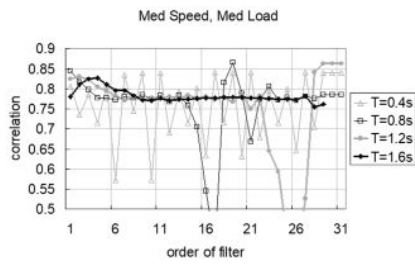
(f) case 1, deteriorated sensor



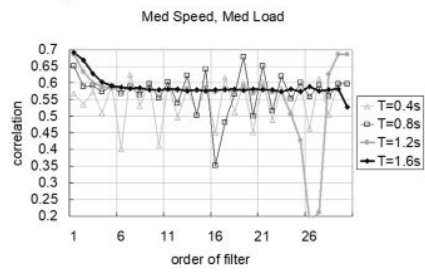
(b) case 2, normal sensor



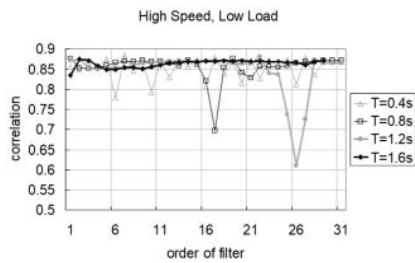
(g) case 2, deteriorated sensor



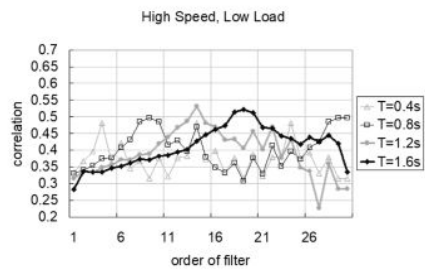
(c) case 3, normal sensor



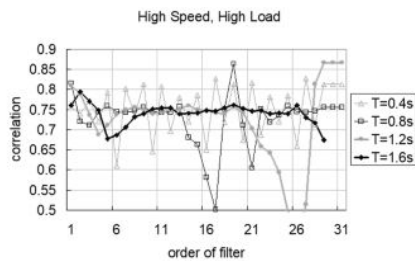
(h) case 3, deteriorated sensor



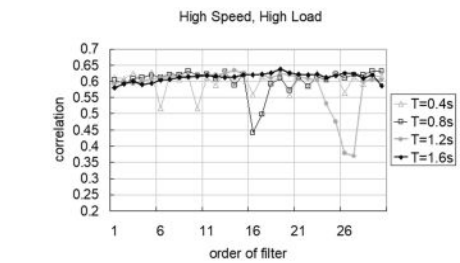
(d) case 4, normal sensor



(i) case 4, deteriorated sensor

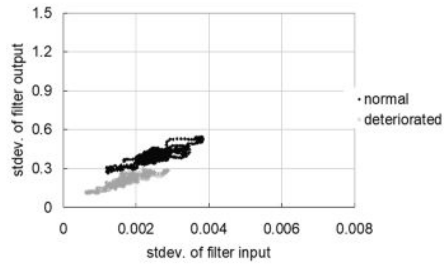


(e) case 5, normal sensor

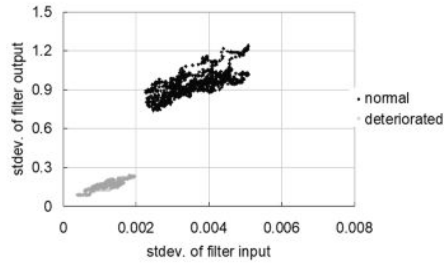


(j) case 5, deteriorated sensor

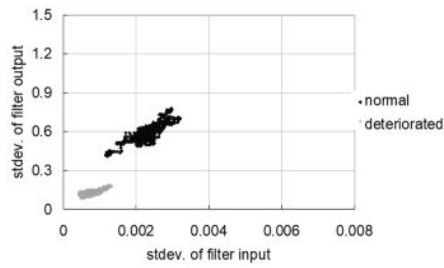
Fig. 3-8 Relationship between correlation, filter length and order⁷⁶⁾



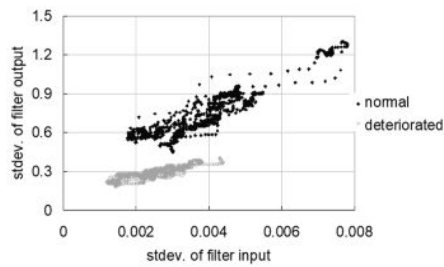
(a)case1



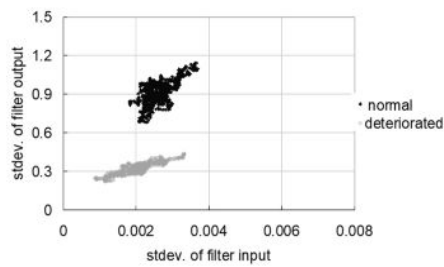
(b)case2



(c)case3



(d)case4



(e)case5

Fig. 3-9 Distribution of standard deviation of λ and λ derivative using optimized differential filter⁷⁶⁾

3-4 空燃比センサの劣化識別性能の評価

前章で開発・最適化した、長さ1.2sの14.5次の微分フィルタを用いて空燃比センサの信号 λ を微分し、微分前後の信号 λ, λ' の標準偏差を用いて空燃比センサの正常、劣化を識別する。一定時間の空燃比センサ信号 λ の標準偏差 $\sigma(\lambda)$ と、 λ の微分 λ' の標準偏差 $\sigma(\lambda')$ を計算し、Fig.3-10に示すように点 $(\sigma(\lambda), \sigma(\lambda'))$ への角度

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sigma(\lambda')}{\sigma(\lambda)} \dots\dots\dots(3-11)$$

と閾値の大小で劣化を識別する。

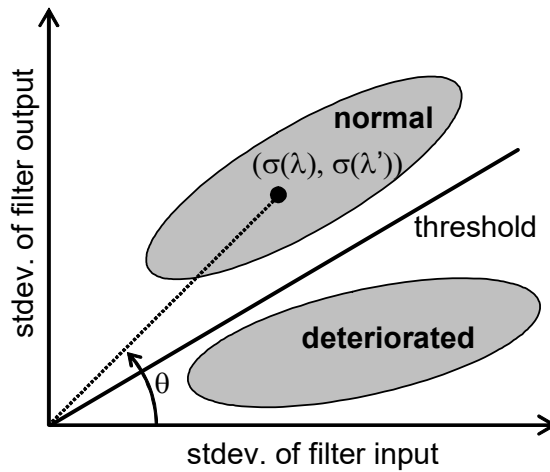


Fig. 3-10 Concept of A/F sensor diagnosis⁷⁶⁾

Table3-1に示す各ケースにおいて、正常センサと劣化センサの信号のフィルタの入出力の4秒間の標準偏差をFig. 3-9に示す。この図から、内燃機関負荷の大きいcase2, case5のときは正常と劣化がかなりのマージンをもって識別できることがわかる。一方で、内燃機関速度が低く負荷が小さいcase1で識別性能が最も悪い。また、特に正常センサの場合に、傾きが運転条件に依存してばらつく。

そこで、内燃機関への空気流量 Q に基づいて

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sigma(\lambda') + a_y \cdot Q + b_y}{\sigma(\lambda) + a_x \cdot Q + b_x} \dots\dots\dots(3-12)$$

と補正し、識別性能の向上を図る。識別性能が最も良くなるようにパラメータを

$$\begin{aligned} a_x &= -0.000011 [\ell^{-1}] \\ b_x &= 0.01 \dots\dots\dots(3-13) \\ a_y &= -0.0013 [\ell^{-1}] \\ b_y &= 0.59 \end{aligned}$$

と最適化し、識別性能を運転条件ごとに評価する。識別性能の指標は、正常センサと劣化

センサのそれぞれの信号から4秒毎に求めた θ の平均 $\mu[\theta_{\text{normal}}]$, $\mu[\theta_{\text{deteriorated}}]$, 標準偏差 $\sigma[\theta_{\text{normal}}]$, $\sigma[\theta_{\text{deteriorated}}]$ を用いて,

$$\frac{\mu[\theta_{\text{normal}}] - \mu[\theta_{\text{deteriorated}}]}{\sigma[\theta_{\text{normal}}] + \sigma[\theta_{\text{deteriorated}}]} \dots\dots\dots (3-13)$$

によって定義する. その結果, 4秒ごとに θ を求めたときの識別性能は, 表のようになる.

Table 3-2 Diagnosis performance in the condition that is measured for 4 seconds⁷⁶⁾

	case1	case2	case3	case4	case5
diagnosis performance	2.6	8.7	6.7	3.7	6.6

この表をみると, 内燃機関が低負荷のcase1とcase4で識別性能が6に満たない. では, 何秒間の空燃比信号 λ からフィルタの入出力の標準偏差をとれば識別性能が6になるか調べたところ, case1の場合は17秒, case2の場合は8秒であることがわかった. これは通常の自動車のキーオンからキーオフまでの時間に比べればはるかに短い時間であり, 診断に必要な時間として問題ないレベルである.

3-5 マイコン実装性の評価

3-3 節で開発したフィルタ, ならびに, 3-4 節で導いた 17 秒間の微分フィルタの入出力の標準偏差の比をとる演算の, 計算負荷を見積もる.

3-3 節で開発したフィルタは, 長さが 1.2s で次数が 14.5 次(14 次と 15 次の平均)なので, サンプル間隔は $1.2\text{s}/15/2=0.04\text{s}$ となり, フィルタのタップ数は, $1.2\text{s}/0.04\text{s}+1=31\text{tap}$ となる.

車載される量産マイコンの一例において, 動作周波数は 160MHz, RAM 容量は 320KB¹¹³⁾なので, フィルタリング演算に必要な 31 回の積算と 30 回の加算を実行するのに要する時間は, 乗算・加算がそれぞれ 2 クロックで実行できると考えると,

$$\frac{31 \times 2 + 30 \times 2}{160[\text{MHz}]} = 0.76[\mu\text{s}] \dots\dots\dots (3-14)$$

となり, サンプル間隔の 0.04s に比べればはるかに小さな値である. また, tap 数 31 のフィルタ演算のために保持しておく信号のサンプル値は, 31 個で, 32bit であらわすと, 必要なメモリ量は, $31 \times 32\text{bit}=992\text{bit}$

となり, RAM の容量に比べれば小さな値である.

車載マイコン上で実行されるアプリケーションは, 空燃比診断だけではないので, マイコンリソースは, 他のアプリケーションとの兼ね合いであるが, 逐次的に処理できる分, フー

リエ変換する場合よりは実装の余地が高い。また、フーリエ変換結果を劣化指標に変換する手間がない点からも実装の余地が大きいと考えられる。

3-6 おわりに

空燃比センサの劣化により空燃比フィードバックループの周期が長くなることに着目し、診断のために特別なパターンで空燃比を制御することなく、空燃比センサの診断ができる方法を提案した。この方法は、空燃比信号を微分フィルタで微分し、その入出力のゲイン、具体的には、入出力信号の標準偏差の比によって、空燃比フィードバックループの周期の変化をとらえ、周波数領域での処理に比べはるかに少ない計算量で診断が可能である。周波数によるゲインの脈動の小さい微分フィルタを実現するため、window methodにより設計される奇数次のフィルタと偶数次のフィルタの平均をとる方法を提案した。また、実験データからフィルタの入力と出力の標準偏差の相関を調べ、相関が最も強くなるようにフィルタの次数を決定した。この方法の妥当性を検証するため、実機データで正常センサと劣化センサを識別したところ、最も診断に不利な低回転低負荷の条件下でも17秒で識別性能が6に達し、診断時間に関しては実用上問題がないことを確認した。

第4章 代数的な特徴に着目したフィルタの設計

— 2つのフィルタの組合せによる失火と残響振動の識別 —

4-1 はじめに

本章では、微分フィルタの3つの機能のうち、変化点の強調に関するアプリケーションである、失火検出について述べる。特に、外乱環境下での失火検出について述べる。失火による特徴とよく似た外乱が発生することがある。失火と外乱を識別する1つの方法は、失火だけを検出して外乱を除去するようフィルタの帯域を絞ることであるが、微妙な違いを識別するにはフィルタの長さが長くなり、検出分解能の悪化や計算負荷の増大が危惧される。そこで、失火と外乱の2つの微妙な違いを、2つのフィルタの組合せで分離・識別するのである。この2つのフィルタを代数的な手法によって開発する。

自動車の内燃機関では、空気と燃料の混合気に点火し、爆発させることでトルクを得ているが、点火プラグの劣化、空燃比の制御不良等により混合気が正常に爆発しないことがある。このような現象は失火と呼ばれる。失火が起こると、未燃ガスや窒素酸化物が大気中に放出されるため、1994年以来、車載コンピュータで自己診断し、失火が発生したら運転者に修理を促す表示をすることが米国で販売される全ての自動車に義務づけられている。これはこれまで述べてきたOBDの一つの機能である。また、この法規は2000年から欧州で、日本では2008年から導入されている⁵⁵⁾。

失火検出が義務付けられた当初は、内燃機関回転が低・中速で路面状態の良い、検出し易い条件でのみ検出すればよかった。しかし、法規が厳しくなるにつれて、全ての内燃機関回転数で、路面状態によらずに検出することが求められつつある。

失火検出には、3つの方法がある。1つはクランク軸の回転に基づく方法¹¹⁴⁾。2番目はイオン電流に基づく方法^{115,116)}。そして3番目は気筒内圧力に基づく方法¹⁰¹⁾である。最初の方法は低コストで実現できるため、最も広く用いられている。しかし、この方法は、①路面からの外乱、②内燃機関の加減速、③クランク軸のねじり振動、④回転を計測するためのリングギアの製造ばらつき、などの外乱に影響される。また、1度失火が発生すると、車体の振動が誘起され、これがクランク軸の振動を引き起こす残響振動になり、1度の失火が複数回の失火としてカウントされる。最近ではこのことも問題視されている¹¹⁷⁾。

失火検出に関する研究は、海外では大学でも行われているが、国内では主に企業で行われている。国内公開特許から失火検出に関する特許を調べた。失火検出は、クランク軸が一定角度（ウィンドウ幅と呼ぶ）を回転する時間をサンプルし、この回転時間の変化を信号処理により抽出することで行われる。信号処理の方法としては、回転所要時間ないしはその逆数の回転速度の2階差分をとり、回転加々速度を算出する方法¹¹⁸⁻¹²⁰⁾と、クランク軸2回転（1内燃機関サイクル、4ストローク内燃機関はクランク軸が2回転する間に全ての気筒で爆発

が起こる) を周期とする回転 0.5 次成分を抽出する方法¹²¹⁻¹²³⁾に大別できる。

最近問題視されている残響振動と失火を区別するために、これらの周波数の違いに着目した方法が提案されている¹¹⁷⁾。ここで問題となるのは、失火による振動と残響振動は周波数が近いことである。従って、1つのフィルタでこれらを区別するためには、フィルタの長さを伸ばすか、サンプリングレートを上げることで周波数分解能を向上する必要がある。前者は検出の時間分解能を低下させ、後者は信号処理負荷の増大、クランク回転計測の S/N 比低下につながる。

本章では、フィルタ長を伸ばしたり、サンプリングレートを上げることなく、失火と残響振動を区別する方法を提案する。この方法は、周波数特性の異なる 2 つのフィルタに回転時間の時系列を入力したときの、出力の比によって周波数の微妙な違いを識別する方法である。次に、この 2 つのフィルタを設計する方法を述べる。この方法では、失火から一定サンプル後にフィルタ出力が必ず極大になる条件と、フィルタは内燃機関の加減速に影響されない条件を、フィルタ係数の代数的な条件に置き換えてフィルタを設計する。2 つのフィルタによる失火と残響振動の識別性能を、実機データを用いて評価する^{124,125)}。

4-2 2つのフィルタによる失火と残響振動の識別

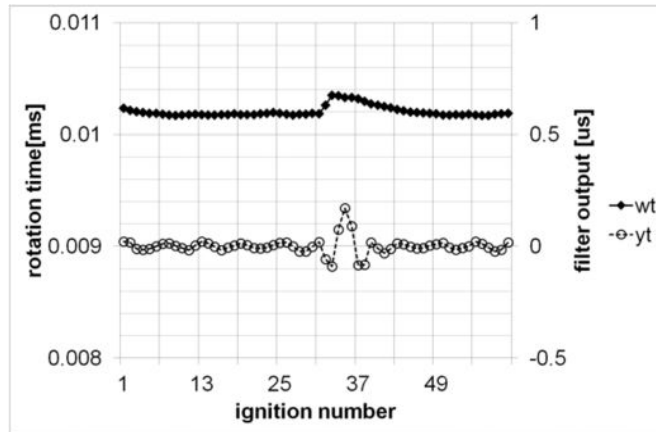
ここでは、V型6気筒内燃機関を例にとり考える。クランク軸には、ミッションと反対側にクランク軸の回転計測のためのリングギアがついている。リングギアには 15° 間隔で歯がついていて、磁気ピックアップによって歯の立下りの時刻を計測している。本システムでは、各気筒の TDC 前 20° から後 100° までの回転所要時間を点火毎に計測し、これを信号処理し、失火を検出する。

Fig.4-1 に、(a) 1 つの失火が発生したときの回転所要時間
(b) 河原の悪路を走行しているときの回転所要時間
(c) 1 つの失火が発生し、残響振動が発生したときの回転所要時間、を黒実線として示す。なお、回転所要時間は点火に同期してサンプルされるので、横軸は点火回数である。

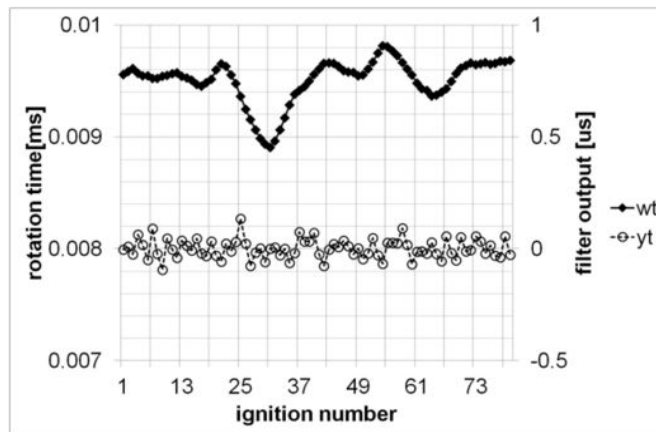
また、Fig.4-2 に失火検出フィルタの係数を示す。このフィルタは、内燃機関の加減速にロバストで、0.5 次成分を抽出するフィルタとして導かれた⁷⁸⁾。このフィルタに、Fig.4-1 の実線の信号 w_i を入力したときのフィルタ出力 y_i を Fig.4-1 の点線で示す。 y_i と w_i の関係は

$$y_i = \sum_{l=0}^6 f_l \cdot w_{i-l} \dots \dots \dots (4-1)$$

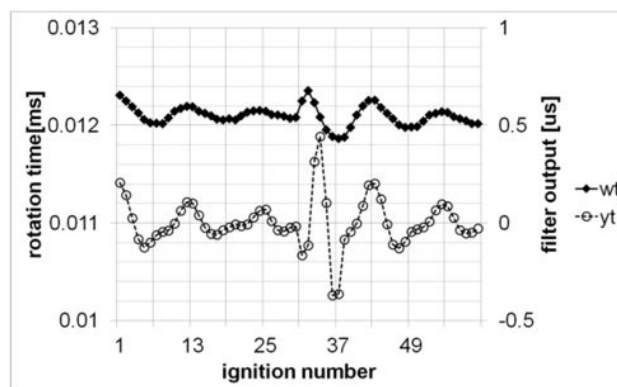
Fig.4-1 から以下のことがわかる。まず、(a) のケースでは、第 32 点火で発生した失火により 2 サンプルにわたって回転所要時間が急に増加し、その後、徐々に元の所要時間に戻る。これをフィルタに入力すると、失火からフィルタの長さの半分である 3 点火後に出力はピークを発生する。このピークから失火を検出できる。



(a) in case that single misfire happens at 32nd ignition



(b) in case that running on river side rough road



(c) in case that single misfire happens at 31st ignition and resonance is derived

Fig.4-1 Rotation time and filter output¹²⁵⁾

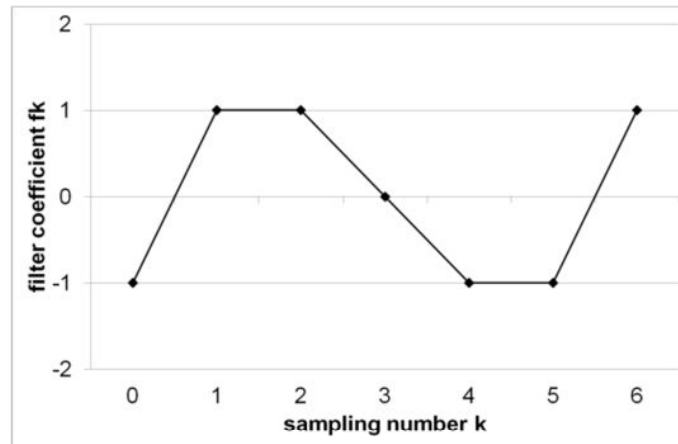


Fig.4-2 An example of misfire detection filter⁷⁸⁾

(b)のケースでは、回転所要時間は、失火による回転所要時間の変化より長い周期で振動しているが、この振動はフィルタの共振点(Fig.4-11 で後述するが、 $1/3[\text{ignition}^{-1}]$)より低い周波数のため、フィルタの出力には明瞭なピークは出現しないことがわかる。

(c)のケースでは、(a)と同様に第 31 点火で発生した失火によって 2 点火にわたって回転所要時間が長くなっている。このうち、回転所要時間が振動しながら収束している。これをフィルタに入力すると、フィルタ出力は、ケース(a)と同様に、失火の 3 サンプル後にピークが発生するが、これに加えて、振動しながら減衰するため、1つの失火に対してピークが第 43,54 点火付近でも複数発生する。失火によるピークと残響振動によるピークを識別するには、ピークの高さによる方法も考えられるが、ピークの高さのばらつきを考えると、ピークの高さだけでは明瞭に区別するのは困難である。

そこで、失火による回転変動の変化が、残響振動による回転所要時間の変化より高周波の現象であることに着目し、識別することを試みる。

Fig.4-3 のように、周波数特性の異なる 2つのフィルタを考える。失火に対しては 2つのフィルタのゲインがほぼ同じなので、2つのフィルタの出力はほぼ同じ値をとり、これより低周波数の残響振動に対しては、フィルタ 1 のゲインのほうが小さいので、フィルタ 1 の出力はフィルタ 2 の出力より小さくなる。フィルタ 1 とフィルタ 2 の出力をプロットすれば Fig.4-4 のようになることが期待でき、この出力比によって失火と残響振動を識別する。

フィルタの設計方法は次章で述べるが、Fig.4-5 に示す 2つのフィルタに Fig.4-1 に示すそれぞれの場合での回転所要時間を入力した結果は Fig.4-6 のようになる。失火による 2つのフィルタの出力は、原点からみて狭い角度範囲に分布し、正常燃焼時の 2つのフィルタ出力とは角度の違いで明瞭に分離できる。つまり、フィルタ 1 とフィルタ 2 の出力比によって失火と残響振動が識別できることがわかる。

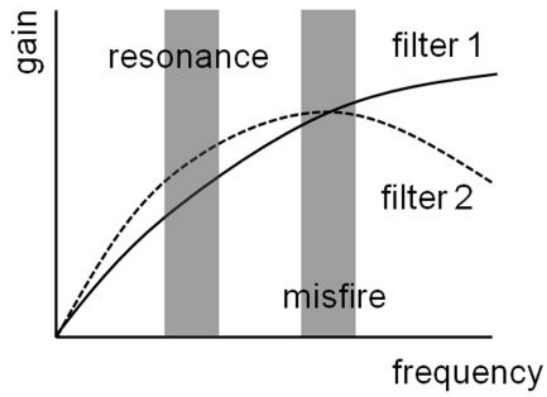


Fig.4-3 Frequency characteristics of two filters for recognizing misfires from resonances¹²⁵⁾

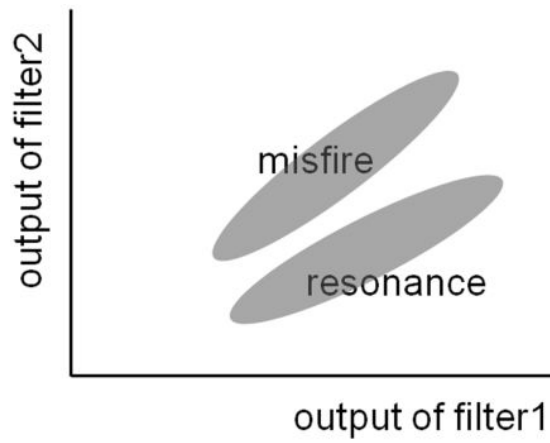


Fig.4-4 Output of two filters for recognizing misfires from resonances¹²⁵⁾

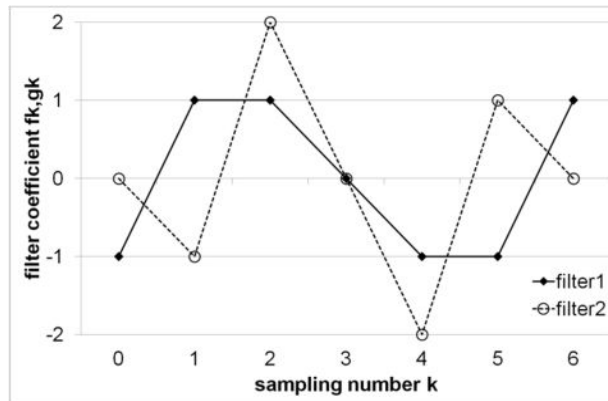
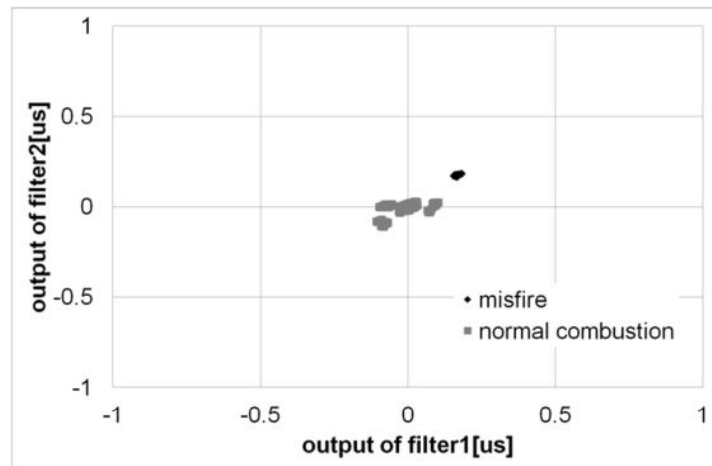
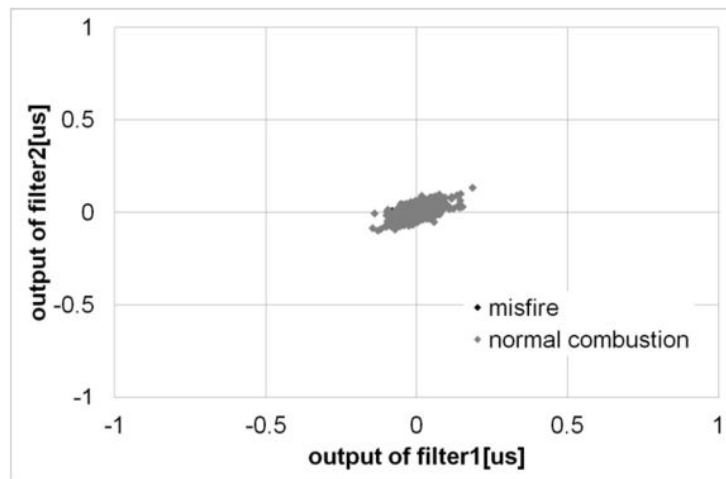


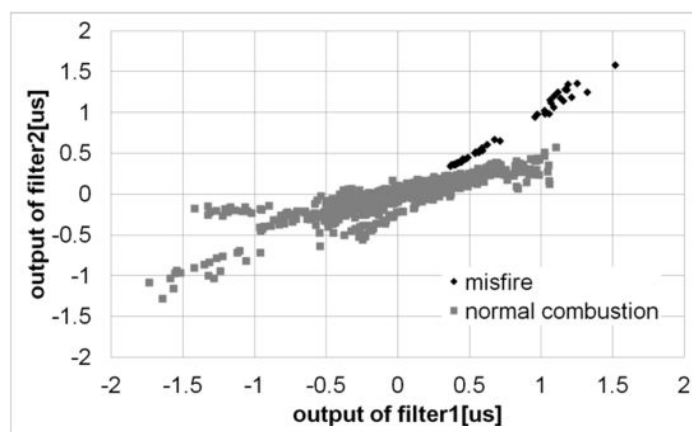
Fig.4-5 Combination of two filters for recognizing misfires from resonances¹²⁵⁾



(a) in case that single misfire happens



(b) in case that running on river side rough road



(c) in case that single misfire happens and resonance is derived

Fig.4-6 Output of two filters¹²⁵⁾

4-3 2つのフィルタの設計

本章では、失火と残響振動を識別するための2つのフィルタを設計する方法を述べる。一般に、フィルタの設計は、周波数特性や、ステップ入力に対する応答特性等で行われる。失火検出では、単に失火の有無がわかればいいだけではなく、どの気筒が失火しているのかを特定する必要がある。つまり、1 サンプルの誤差も許されずに、失火発生タイミングを検出する必要がある。そこで、 T_0 で発生した失火に対し、Fig.4-8 のように、フィルタ長 K の半分 $K/2$ のサンプル後にフィルタが最大値を出力するようにフィルタを設計したい。本節では、フィルタの z 変換を因数分解したときの要素に着目して、代数的にフィルタを設計する。フィルタ F が満たすべき条件は、

① Fig.4-8 のように、失火タイミング T_0 からフィルタ長の半分 $K/2$ のサンプル後にフィルタ出力が最大になる。

③ 内燃機関の一定加速度の加減速にロバストである。

の2つである。これら2つの条件を満たすフィルタを代数的に求めたのちに、失火と残響振動の識別性を吟味する。

簡単のために、失火による回転所要時間を、Fig.4-7 のような2 サンプルにわたり値が増加する2 段ステップ入力として近似する。これをフィルタに入力したときに、出力がフィルタ長 K の半分後に最大値をとるようにフィルタを設計する。

2 段ステップ入力を

$$w_{T_0}(t) = \begin{cases} 0 & (t < T_0) \\ 1 & (t = T_0) \dots\dots\dots(4-2) \\ 2 & (t > T_0) \end{cases}$$

と表わす。これは、ステップ入力

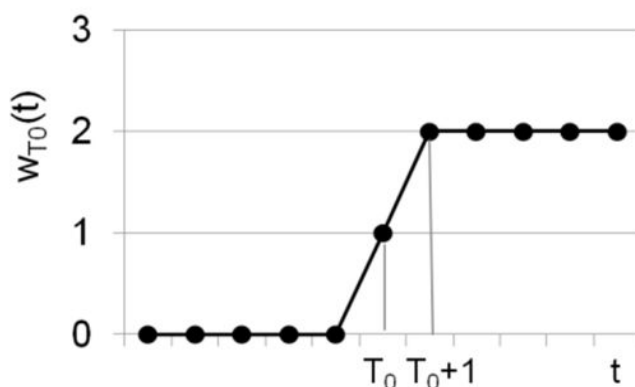


Fig.4-7 Misfire signal approximated as two-step input¹²⁵⁾

$$u_{T_0}(t) = \begin{cases} 0 & (t < T_0) \\ 1 & (t \geq T_0) \end{cases} \dots\dots\dots(4-3)$$

を用いて,

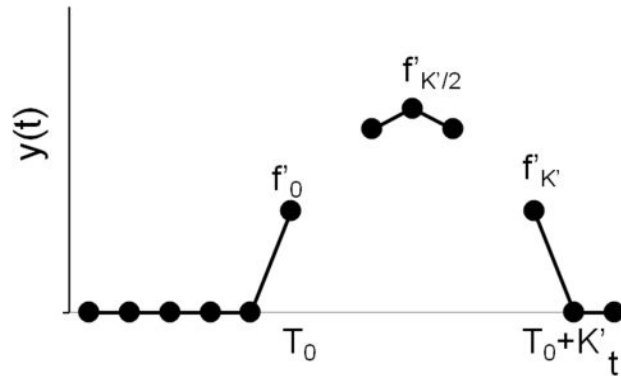


Fig.4-8 Desirable filter output for misfire at T_0 ¹²⁵⁾

$$w_{T_0}(t) = u_{T_0}(t) + u_{T_0+1}(t) \dots\dots\dots(4-4)$$

とあらわせる. また, インパルス入力

$$\delta_{T_0}(t) = \begin{cases} 0 & (t < T_0) \\ 1 & (t = T_0) \\ 0 & (t > T_0) \end{cases} \dots\dots\dots(4-5)$$

とステップ入力の関係は,

$$\delta_{T_0}(t) = u_{T_0}(t) - u_{T_0+1}(t) \dots\dots\dots(4-6)$$

となる. 式(4-4)(4-6)を z 変換して,

$$W_{T_0}(z) = U_{T_0}(z) + U_{T_0+1}(z) = (1 + z^{-1})U_{T_0}(z) \dots\dots\dots(4-7)$$

$$D_{T_0}(z) = U_{T_0}(z) - U_{T_0+1}(z) = (1 - z^{-1})U_{T_0}(z) \dots\dots\dots(4-8)$$

これをまとめて, 失火による回転所要時間を 2 段ステップ入力として近似した $w_{T_0}(t)$ の z 変換 $W_{T_0}(z)$ は, インパルス入力 $\delta(t)$ の z 変換 $D_{T_0}(z)$ を用いて,

$$W_{T_0}(z) = \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} D_{T_0}(z) \dots\dots\dots(4-9)$$

とあらわせる. この 2 段ステップ入力を係数が $f_k(0 \leq k \leq K)$ のフィルタ F に入力すると, その出力 $y(t)$ の z 変換 $Y(z)$ は, フィルタ f の z 変換 $F(z)$ を用いて,

$$\begin{aligned}
Y(z) &= F(z)W_{T_0}(z) \\
&= F(z)\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}D_{T_0}(z) \equiv F'(z)D_{T_0}(z) \dots\dots\dots(4-10)
\end{aligned}$$

となる。Fig.4-8 のように最大値が T_0 から一定サンプル後に出力されるように、直線位相 FIR フィルタ F' を設計する。

$$F'(z) = \sum_{k=0}^{K'} f'_k z^{-k} \dots\dots\dots(4-11)$$

とすると、 $w_{T_0}(t)$ を F に入力したときの出力、すなわち、 $\delta_{T_0}(t)$ をフィルタ F' に入力したときの出力には、Fig.4-8 のように時刻 T_0 からフィルタの係数 f'_k が表れる。この図のように T_0 から $K/2$ サンプル後に最大値をとるようにフィルタを設計したい。これがフィルタの満たすべき条件の①で、もう一つのフィルタが満たすべき条件は、②の、加減速にロバストということである。この条件は、フィルタ F の係数の平均と、モーメントが 0 ということである 78)。つまり、

$$\sum_{k=0}^K f_k = 0, \quad \sum_{k=0}^K kf_k = 0. \dots\dots\dots(4-12)$$

これより、

$$f_0 = -\sum_{k=1}^K f_k, \quad f_1 = -\sum_{k=2}^K kf_k. \dots\dots\dots(4-13)$$

したがって、 f の z 変換は、

$$\begin{aligned}
F(z) &= \sum_{k=0}^K f_k z^{-k} = -\sum_{k=1}^K f_k + \sum_{k=1}^K f_k z^{-k} \\
&= \sum_{k=1}^K f_k (z^{-k} - 1) = f_1(z^{-1} - 1) + \sum_{k=2}^K f_k (z^{-k} - 1) \\
&= -\sum_{k=2}^K kf_k (z^{-1} - 1) + \sum_{k=2}^K f_k (z^{-k} - 1) \dots\dots\dots(4-14) \\
&= \sum_{k=2}^K f_k \{(z^{-k} - 1) - k(z^{-1} - 1)\} \\
&= \sum_{k=2}^K f_k (z^{-1} - 1) \{(z^{-k+1} + z^{-k+2} + \dots + z^{-1} + 1) - k\} \\
&= \sum_{k=2}^K f_k (z^{-1} - 1) \{(z^{-k+1} - 1) + \dots + (z^{-1} - 1)\}
\end{aligned}$$

となつて、 F は $(1-z^{-1})^2$ を因子としてもつことがわかる。これと式(4-10)を考えあわせると、 $F' = F(1+z^{-1})/(1-z^{-1})$ は $(1-z^{-1})(1+z^{-1})$ を因子としてもつ。

以上まとめると、 f' は、

- ① $(1-z^{-1})(1+z^{-1})$ を因子としてもち、
- ② $K/2$ 番目の係数 $f'_{K/2}$ が最大の係数

となるフィルタである。

条件②は、入力のステップ発生点に対し、一定の遅延ののちに出力が最大になることを求めているので、フィルタ f' は線形位相 FIR フィルタであることが必要である。線形位相 FIR

フィルタには、Table4-1 に示す 4 つのタイプがある。先述の条件②のように、フィルタの中央に最大値を持つためには、typeI のフィルタである必要がる。

typeI のフィルタとは、直線位相フィルタを表 1 に示す 4 種類に分類したときの、長さが奇数の線対称なフィルタのことである¹¹²⁾。このタイプにすることで、F' のインパルス応答は対称な山の形となり、1 つのピークをもつ。

条件①を満たす、最小次数の typeI の直線位相 FIR フィルタ $F'=(1-z^{-1})(1+z^{-1})F''$ を探したい。そのために、線形位相 FIR フィルタの積算の規則を考える。証明は略すが、直線位相 FIR フィルタの積は、線形位相 FIR フィルタになり、かけ合わせるタイプによって積のタイプが Table4-2 のように決まる。

Table 4-1 Four types of linear phase FIR filter¹²⁵⁾

		length	
		even	odd
Impulse response	sym-metric		
	anti-symmetric		

Table 4-2 Product of two linear phase FIR filter¹²⁵⁾

	typeI	typeII	typeIII	typeIV
typeI	typeI	typeII	typeIII	typeIV
typeII	typeII	typeI	typeIV	typeIII
typeIII	typeIII	typeIV	typeI	typeIII
typeIV	typeIV	typeIII	typeII	typeI

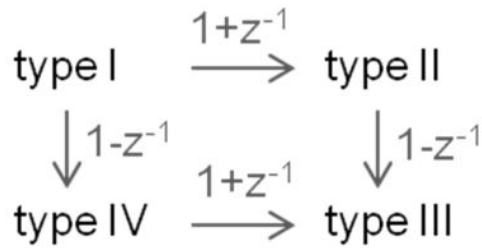


Fig.4-9 Relation between types of linear phase FIR filter¹²⁵⁾

条件①②より、 $F^*=(1-z^{-1})(1+z^{-1})F^*$ を typeI のフィルタにしたい。 $(1-z^{-1})(1+z^{-1})=1-z^{-2}$ は typeIII のフィルタで、 $F^*=(1-z^{-1})(1+z^{-1})F^*$ を typeI にするためには、Table 4-2 より F^* は typeIII にする必要がある。では、この typeIII のフィルタをどのように決めればよいか？ そのために、以下の定理を用いる。

【定理】

typeI のあるフィルタが $(\alpha+z^{-1})$ を因数として含むなら、このフィルタは $(\alpha+z^{-1})(\alpha^{-1}+z^{-1})$ を因数として含む。

この定理より、 F^* は $(1-z^{-1})$ を含むことより、 F^* は $(1-z^{-1})^2$ を含むことがわかる。また、 F^* は $(1+z^{-1})$ を含むことより、 F^* は $(1+z^{-1})^2$ を含むことがわかる。したがって、 F^* は $(1-z^{-1})^2(1+z^{-1})^2$ を含む。 $(1-z^{-1})^2(1+z^{-1})^2=1-2z^{-2}+z^{-4}$ は、ちょうど typeI の直線位相フィルタである。また、このフィルタの係数は図 10 のようになるので、全体に -1 をかけて $G(z)=-1(1-z^{-1})^2(1+z^{-1})^2$ とすれば、まん中の係数が一番大きいという条件③もみたす。従って、条件①②③を満たすフィルタ F^* の候補として、フィルタ

$$G(z) = -(1-z^{-1})^2(1+z^{-1})^2 \dots\dots\dots(4-15)$$

が導けた。

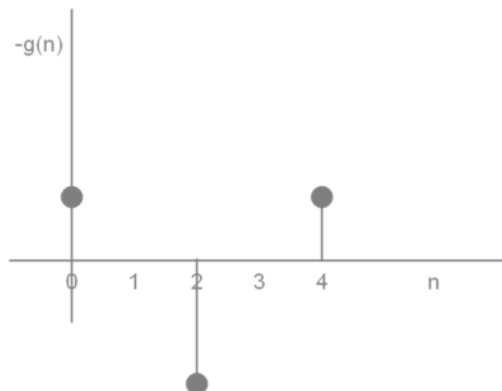


Fig.4-10 A filter which satisfies the three requirements¹²⁵⁾

我々は、失火と残響振動を識別するために 2 つのフィルタがほしいので、さらに次数をあげることで自由度をあげて、フィルタ F' として、2 つの typeI フィルタ $G_1(z)=G*G_{10}$ と $G_2(z)=G*G_{20}$ を設計する。

G_1, G_2 が typeI で G も typeI なので、 G_{10}, G_{20} も typeI であることが必要である。2 つのフィルタを実現するためには、少なくとも 2 自由度のフィルタ係数が必要なので、 G_{10}, G_{20} を 3 次の typeI フィルタにする。3 次の typeI フィルタは、

$$\begin{aligned} G_{10} &= z^{-1} \\ G_{20} &= (1+z^{-1}+z^2) \end{aligned} \dots\dots\dots(4-16)$$

の線形結合和で表せるので、この 2 つを G_{10}, G_{20} とする。すると、フィルタ F' の条件を満たす最小次数の 2 つのフィルタとしては、

$$\begin{aligned} G_1 &= -(1-z^{-1})^2(1+z^{-1})^2 z^{-1} \\ G_2 &= -(1-z^{-1})^2(1+z^{-1})^2(1+z^{-1}+z^2) \end{aligned} \dots\dots\dots(4-17)$$

が得られる。このように導かれた F' と式 10 から、 F として、

$$\begin{aligned} F_1 &= G_1 \cdot \frac{(1-z^{-1})}{(1+z^{-1})} = -(1-z^{-1})^3(1+z^{-1})z^{-1} \\ &= 0 - z^{-1} + 2z^{-2} + 0 \cdot z^{-3} - 2z^{-4} + z^{-5} \\ F_2 &= G_2 \cdot \frac{(1-z^{-1})}{(1+z^{-1})} \dots\dots\dots(4-18) \\ &= -(1-z^{-1})^3(1+z^{-1})(1+z^{-1}+z^2) \\ &= -1 + z^{-1} + z^{-2} + 0 \cdot z^{-3} - z^{-4} - z^{-5} + z^{-6} \end{aligned}$$

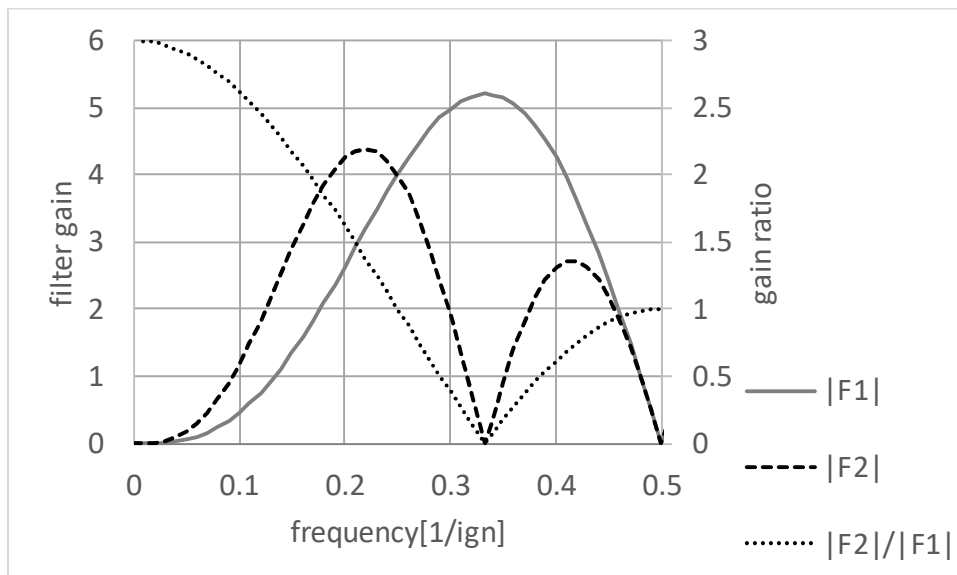


Fig.4-11 Frequency-gain characteristics and gain ratio of developed filters F_1 and F_2

が得られる．このようにして Fig.4-5 のフィルタ係数は求められたのである．これらの周波数-ゲイン特性とゲインの比 $|F_2|/|F_1|$ は， Fig.4-11 のようになる．このシステムでは回転時間は，時間同期ではなく，燃焼同期，すなわち，点火に同期してサンプルされるため，横軸は $[1/ign]$ となっている．フィルタ 1 のゲインが $0.33[1/ign]$ でピークをとるということは， $1/0.33[ign]=3[ign]$ ，すなわち，クランク軸 1 回転に同期した成分に対しゲインがピークをとるという意味である．この図から，この周波数 $0.33[1/ign]$ までゲイン比 $|F_2|/|F_1|$ が単調に減少することがわかる．

これらのフィルタに，失火の際のクランク軸回転時間を模擬した Fig.4-7 に示す 2 段階ステップ入力を入力すると，出力は Fig.4-12 のようになり， 2 つのフィルタ出力は失火から 3 点火後に同じ振幅でピークをとることがわかる．このことから，失火の際のフィルタの出力比が 1 であることがわかり，これは Fig.4-6 で実験的にえられた結果と一致する．あとは，残響振動の際の振動の周波数に対応したフィルタの出力比が 1 より大きければ，失火と残響振動が分離できることになる．

残響振動の周波数は，内燃機関のフライホイールの慣性モーメントと，ドライブシャフトの剛性で決まり，その値はほぼ $3\sim 5\text{KHz}$ である¹²⁶⁾． Fig.4-11 において，失火に対応して 2 つのフィルタの出力比が 1 となる周波数は， $0.25[1/ign]$ なので， M 気筒内燃機関が $N[\text{rpm}]$ で運転されているときの，この周波数を Hz に変換すると，

$$f_{\text{misfire}} = 0.25[1/ign] \times N[\text{rpm}] \times \frac{1}{60} [\text{min}/s] \times \frac{M}{2} [ign/s] \dots\dots\dots (4-19)$$

となる．この失火に対応した周波数が残響振動の周波数の範囲の上限 5Hz よりも大きければ失火と残響振動は分離できるので，失火と残響振動が分離できる条件を算出すると，

$$0.25[1/ign] \times N[\text{rpm}] \times \frac{1}{60} [\text{min}/s] \times \frac{M}{2} [ign/s] > 5[\text{Hz}] \dots\dots\dots (4-20)$$

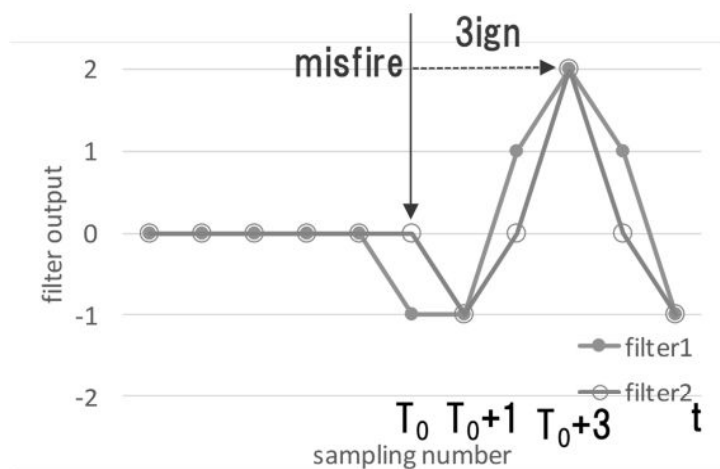


Fig.4-12 Responses of two filters F1, F2 for 2step input described in Fig.4-7

これを解くことで、4気筒内燃機関なら失火と残響振動が分離できるのは、内燃機関の回転数が600rpm以上のとき、6気筒内燃機関なら400rpmのときであり、通常の内燃機関なら失火を残響振動が分離できるといえる。

以上のようにして、失火と残響を識別するフィルタを設計でき、設計された2本のフィルタを用いて、失火の残響振動を識別できることが内燃機関搭載車の走行試験の結果から確認されるとともに、残響振動の周波数の一般的な値に基づく考察からも導けた。

4-4 おわりに

失火と残響振動を識別するための方法を提案した。この方法は、2つのフィルタの周波数特性の違いにより、出力の比に基づいて2つを識別しようというものである。

失火をしたときの出力の形と、加減速にロバストであるということを代数的な条件で表し、2本のフィルタを設計した。この結果は実機で評価され、失火と残響振動が分離できることが確認された。

付録

1. 2つの typeI の FIR フィルタの積は、typeI の FIR フィルタである、ことの証明

2つの Type I のフィルタ

$$A(z) = \sum_{m=0}^M a_m z^{-m} \quad (M \text{ is even.}) \dots\dots\dots(4-21)$$

$$B(z) = \sum_{n=0}^N b_n z^{-n} \quad (N \text{ is even.})$$

ただし、

$$M \geq N \dots\dots\dots(4-22)$$

を考える。A,B は typeI なので、

$$\begin{aligned} a_{M-m} &= a_m \quad (m = 0, \dots, M) \\ b_{N-n} &= b_n \quad (n = 0, \dots, N) \end{aligned} \dots\dots\dots(4-23)$$

フィルタ A,B の積を C は、

$$\begin{aligned} C(z) &= \left(\sum_{m=0}^M a_m z^{-m} \right) \left(\sum_{n=0}^N b_n z^{-n} \right) \\ &= \sum_{l=0}^{M+N} \sum_{k=0}^l a_{l-k} b_k z^{-l} + \sum_{l=N}^M \sum_{k=0}^N a_{l-k} b_k z^{-l} \dots\dots\dots(4-24) \\ &\quad + \sum_{l=M+1}^{M+N} \sum_{k=l-M}^N a_{l-k} b_k z^{-l} \end{aligned}$$

とあらわせる。

$$\begin{aligned} j = M + N - l & & l = M + N - j & \dots\dots\dots(4-25) \\ i = N - k & & k = N - i & \end{aligned}$$

とおき、式(4-23)を考えあわせると、

$$\begin{aligned} \sum_{l=M+1}^{M+N} \sum_{k=l-M}^N a_{l-k} b_k z^{-l} &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=N-j}^N a_{M+N-j-k} b_k z^{j-M-N} \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^j a_{M-j+i} b_{N-i} z^{j-M-N} \dots\dots\dots(4-26) \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^j a_{j-i} b_i z^{j-M-N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{l=N}^M \sum_{k=0}^N a_{l-k} b_k z^{-l} &= \sum_{j=N}^M \sum_{k=0}^N a_{M+N-j-k} b_k z^{j-M-N} \\ &= \sum_{j=N}^M \sum_{i=0}^N a_{M-j+i} b_{N-i} z^{j-M-N} \dots\dots\dots(4-27) \\ &= \sum_{j=N}^M \sum_{i=0}^N a_{j-i} b_i z^{j-M-N} \end{aligned}$$

したがって、

$$C(z) = \sum_{l=0}^{M+N} c_l z^{-l} \dots\dots\dots(4-28)$$

は、長さが M+N+1、つまり、奇数で、係数に関しては

$$c_l = c_{M+N-l} \quad (l = 0, \dots, M + N) \dots\dots\dots(4-29)$$

がなりたつので、2つの typeI のフィルタ A,B の積のフィルタ C は typeI のフィルタである。

2. typeII の FIR フィルタは、typeI の FIR フィルタと(1+z⁻¹)の積である、ことの証明

typeII のフィルタを、非負整数 N を用いて

$$A(z) = \sum_{n=0}^{2N+1} a_n z^{-n} \dots\dots\dots(4-30)$$

とおくと、この FIR フィルタが typeII であることより、

$$a_{2N+1-n} = a_n \quad (n = 0, \dots, 2N + 1) \dots\dots\dots(4-31)$$

であるから、

$$\begin{aligned}
A(z) &= \sum_{n=0}^N a_n z^{-n} + \sum_{n=N+1}^{2N+1} a_n z^{-n} \\
&= \sum_{n=0}^N a_n (z^{-n} + z^{n-2N-1}) \\
&= \sum_{n=0}^N a_n (1+z^{-1})(z^{-n} - z^{-n+1} \dots - z^{n-2N-1} + z^{n-2N}) \dots \dots \dots (4- \\
&= \sum_{n=0}^N a_n (1+z^{-1}) \sum_{m=n}^{2N-n} z^{-m} (-1)^{m-n}
\end{aligned}$$

32)

ここで

$$P_n = \sum_{m=n}^{2N-n} z^{-m} (-1)^{m-n} \dots \dots \dots (4-33)$$

とおいて、例えば、N=2 のときに

$$\begin{aligned}
P_0 &= 1 - z^{-1} + z^{-2} - z^{-3} + z^{-4} \\
P_1 &= z^{-1} - z^{-2} + z^{-3} \dots \dots \dots (4-34) \\
P_2 &= z^{-2}
\end{aligned}$$

なので、 $\sum_{n=0}^N a_n P_n$ は typeI の FIR フィルタである。同様に考えれば、N=2 以外の場合でも、 $\sum_{n=0}^N a_n P_n$

は typeI の FIR フィルタ。

従って、typeII の FIR フィルタ

$$A(z) = (1+z^{-1}) \sum_{n=0}^N a_n P_n \dots \dots \dots (4-35)$$

は、typeI の FIR フィルタと $(1+z^{-1})$ の積である。

3. typeIV の FIR フィルタは、typeI の FIR フィルタと $(1-z^{-1})$ の積である、ことの証明

typeIV のフィルタを非負整数 N を用いて

$$A(z) = \sum_{n=0}^{2N+1} a_n z^{-n} \dots \dots \dots (4-36)$$

とおくと、この FIR フィルタが typeIV であることより、

$$a_{2N+1-n} = -a_n \quad (n = 0, \dots, 2N+1) \dots \dots \dots (4-37)$$

であるから、

$$\begin{aligned}
A(z) &= \sum_{n=0}^N a_n z^{-n} + \sum_{n=N+1}^{2N+1} a_n z^{-n} \\
&= \sum_{n=0}^N a_n (z^{-n} - z^{n-2N-1}) \dots\dots\dots (4- \\
&= \sum_{n=0}^N a_n (1 - z^{-1})(z^{-n} + z^{-n+1} \dots + z^{n-2N-1} + z^{n-2N}) \\
&= \sum_{n=0}^N a_n (1 - z^{-1}) \sum_{m=n}^{2N-n} z^{-m}
\end{aligned}$$

38)

ここで

$$Q_n = \sum_{m=n}^{2N-n} z^{-m} \dots\dots\dots (4-39)$$

とおいて、例えば、N=2 のときに

$$\begin{aligned}
Q_0 &= 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} \\
Q_1 &= z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} \dots\dots\dots (4-40) \\
Q_2 &= z^{-2}
\end{aligned}$$

なので、 $\sum_{n=0}^N a_n Q_n$ は typeI の FIR フィルタである。同様に考えれば、N=2 以外の場合でも、 $\sum_{n=0}^N a_n Q_n$

は typeI の FIR フィルタ。

従って、typeIV の FIR フィルタ

$$A(z) = (1 - z^{-1}) \sum_{n=0}^N a_n Q_n \dots\dots\dots (4-41)$$

は、typeI の FIR フィルタと $(1-z^{-1})$ の積である。

4. typeI のフィルタが $(\alpha + z^{-1})$ を因数として含むなら、このフィルタは $(\alpha + z^{-1})(\alpha^{-1} + z^{-1})$ を因数として含むことの証明

typeI のフィルタの伝達関数を

$$A(z) = \sum_{n=0}^{2N} a_n z^{-n} \dots\dots\dots (4-42)$$

とおく。typeI の FIR フィルタの対称性より

$$a_{2N-n} = a_n \quad (n = 0, \dots, 2N) \dots\dots\dots (4-43)$$

なので、

$$\begin{aligned}
 A(z) &= \sum_{n=0}^{N-1} a_n z^{-n} + a_N z^{-N} + \sum_{n=N+1}^{2N} a_n z^{-n} \dots\dots\dots(4-44) \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} a_n (z^{-n} + z^{n-2N}) + a_N z^{-N}
 \end{aligned}$$

$A'(z) = A(z)z^N$ とあらわすと,

$$A'(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n (z^{N-n} + z^{n-N}) + a_N \dots\dots\dots(4-45)$$

となるので,

$$A'(z^{-1}) = A'(z) \dots\dots\dots(4-46)$$

したがって,

$$A'(\alpha^{-1}) = A'(\alpha). \dots\dots\dots(4-47)$$

このことより, $-\alpha$ が $A(z)=0$ の解なら, $-\alpha^{-1}$ も $A(z)=0$ の解である. したがって, typeI のフィルタが $(\alpha + z^{-1})$ を因数として含むなら, このフィルタは $(\alpha + z^{-1}) (\alpha^{-1} + z^{-1})$ を因数として含むことが証明された.

第 5 章 クランク軸振動と内燃機関の加減速にロバストな

失火検出方法

5-1 はじめに

第2～4章では、微分フィルタの役割ごとに代表的なアプリケーションを実現するフィルタの設計について述べた。一方で、フィルタに入力される信号が対象とする物理情報を含んでいない、あるいは、ノイズが大きいなどの場合は、フィルタをいくら改善しても実現したいアプリケーションが実現できないことがある。本章では、対象システムでおこる物理現象を解析し、外乱要因を特定し、これにロバストなセンシングシステムのハードスペックを最適化した例を報告する。

本章では、クランク軸のねじり振動と内燃機関の加減速にロバストな失火検出方法を開発することを目的とする。第4章では、路面の凹凸や車体の残響振動にロバストな失火検出の信号処理を、フィルタの設計にフォーカスして開発したが、その前提として、外乱にロバストに失火によるクランク軸の回転変動が取り込まれている必要がある。まず、従来の失火検出の方法を説明し、内燃機関が高回転のときに検出不能になる例を紹介する。次に、クランク軸振動の解析を行い、クランク軸のねじり振動が、高回転で失火検出ができない原因であることを明らかにする。この解析に基づき、クランク軸のねじり振動の影響にロバストで、失火による回転変動を効率よく抽出するための方法を開発した。さらにクランク軸のねじり振動以外の失火検出を妨げる要因である内燃機関の加減速については、失火によりクランク軸の回転が遅くなったのか、それとも内燃機関が減速しているのか、区別する必要がある。そのために、なだらかなクランク軸回転の減速の影響を取り除き、突発的な内燃機関の回転変動のみを抽出するフィルタの満たすべき条件を導き、これに基づいてフィルタを設計した。この失火検出方法を実験により評価した結果を報告する⁷⁸⁾。

5-2 従来の失火検出の方法

Fig. 5-1は失火検出システムの構成を示す。この論文は、内燃機関がV型6気筒4ストロークサイクル火花点火内燃機関の場合について述べるが、気筒数に依存する点火間隔の違いや1サイクルあたりの点火回数の違いを考慮すれば、他の気筒数の内燃機関にも適用できる。クランク軸にはリングギアが取り付けられ、リングギアには、Fig. 5-2に示されるように15°間隔で24個の歯が取り付けられる。リングギアの凹凸に同期して磁気センサの出力が脈動する。

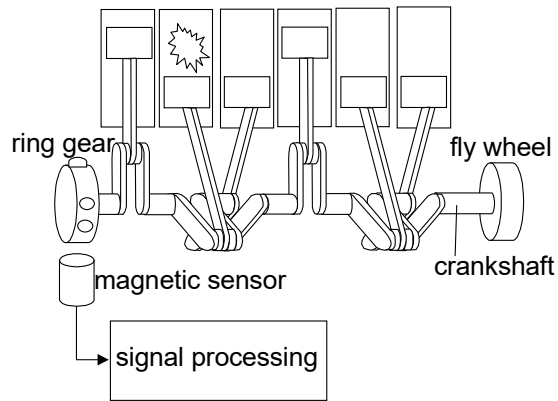


Fig.5-1 Sensor system for misfire detection⁷⁸⁾

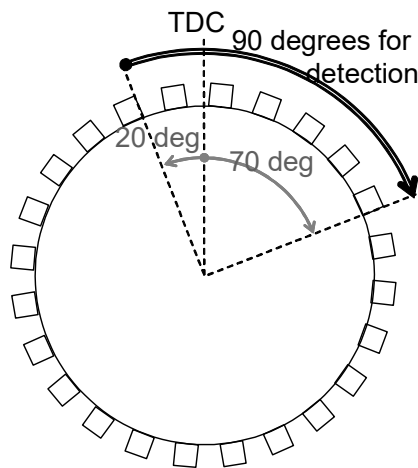


Fig.5-2 Ring gear⁷⁸⁾

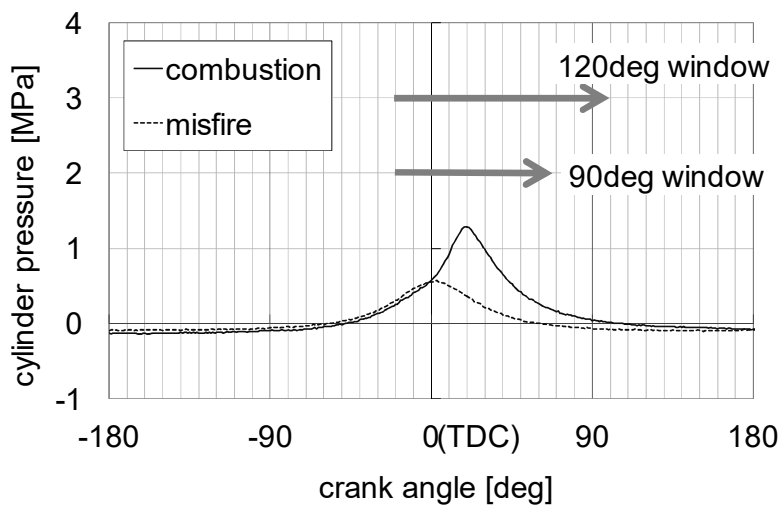


Fig.5-3 Misfire detection window to detect the difference in cylinder pressure due to combustion or misfire⁷⁸⁾

燃焼による筒内圧はFig. 5-3のようになる。この燃焼による筒内圧のピークによるクランク軸の回転変動の変化をとらえるため、各気筒の爆発行程のTDCの前20°の歯の立下りから後ろ70°の立下りまでの90°の区間を失火検出のウィンドウと考えた。このウィンドウを回転するのに要する時間、すなわち、ウィンドウの開始点が磁気センサに検知されてからウィンドウの終了点が磁気センサに検知されるまでの時間、に基づいて失火検出を行った。実験は、内燃機関を車体に搭載し、内燃機関回転数をほぼ一定に保ちながら実車走行し、データを記録した。

Fig. 5-4は内燃機関の回転速度が4000rpmのときに、①第1気筒が毎サイクル失火、②第5気筒が毎サイクル失火、③第6気筒が毎サイクル失火している場合と、④失火がない場合の、90°のウィンドウの回転に要する時間の時系列を示す。

1回の点火に対してウィンドウの回転に要する時間は1回計測されるので、横軸に点火回数を示し、縦軸にウィンドウを回転するのに要する時間を示す。失火気筒と回転所要時間の関係を見やすくするため、第1気筒失火のときは第6気筒、第5気筒失火のときは第4気筒、第6気筒失火のときは第5気筒から時系列を開始している。この図では、①～③の場合で6回目、12回目、…の点火(図中の○で囲まれた点)で失火が起こっていることが表されており、失火が起こると回転所要時間が長くなり時系列の振幅が大きくなることがわかる。これにより、最も大きいステップの前の気筒が失火気筒であると特定できる。内燃機関の回転数が低いときは、このようにして、90°区間の回転所要時間の差分から失火が特定できていた。

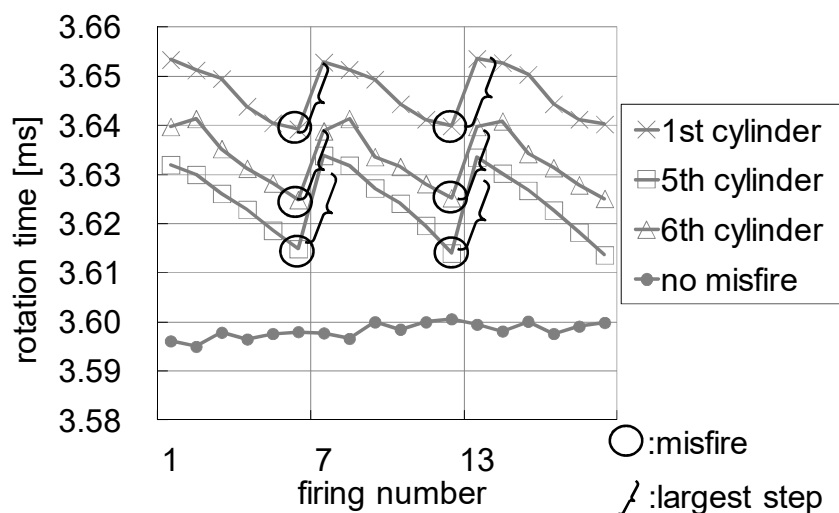


Fig.5-4 Time series of rotation time at approximately 4000rpm (detection window is 90 degree)⁷⁸⁾

このように、4000rpmで失火検出ができることが確認されたので、内燃機関回転数の上限である6000rpmのときの検出可否を検討する。

Fig. 5-5は、内燃機関回転速度が約6000rpmであるときに、①第1気筒が毎サイクル失火、②第5気筒が毎サイクル失火、③第6気筒が毎サイクル失火している場合と、④失火がない場合の、90°のウィンドウの回転に要する時間の時系列を示す。この図から、約6000rpmでも、約4000rpmのときと同様に、時系列の振幅が失火によって大きくなることがわかる。

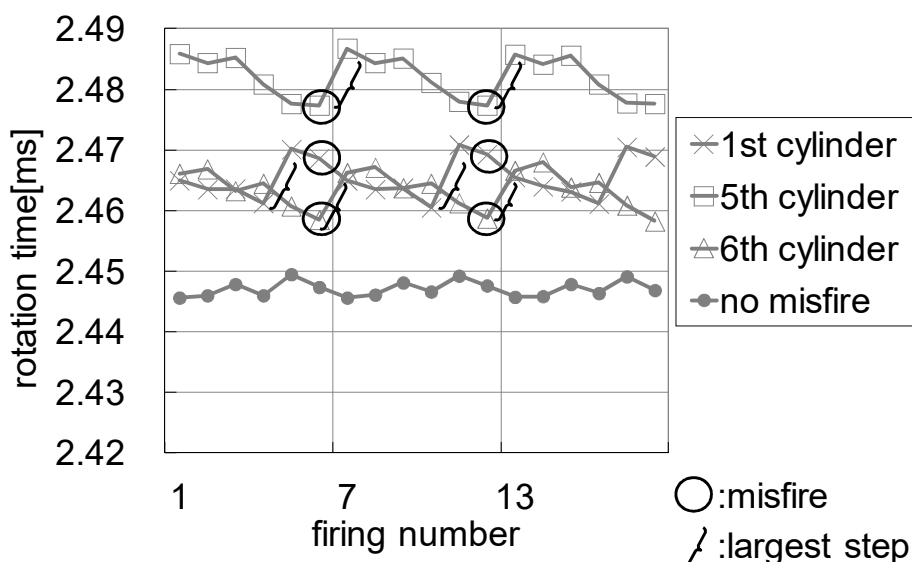


Fig.5-5 Time series of rotation time at approximately 6000rpm (detection window is 90 degree)⁷⁸⁾

第5気筒、第6気筒が失火しているときは、6回目と12回目の点火で失火した直後に回転所要時間が長くなっており、これは4000rpmの時と同じであるが、第1気筒が失火しているときは、失火の直後に回転所要時間が長くなってはいない。

このことから、90°のウィンドウによる失火気筒の識別が、約4000rpmのときは可能であるが、約6000rpmのときは不可能であることがわかり、内燃機関回転数の上限での失火検出はまだ実現できていない。次章では、クランク軸振動解析に基づき、この理由を考える。

5-3 クランク軸振動解析

前章では、約4000rpmのときには、失火が起こると90°ウィンドウの回転所要時間が延びるので、回転所要時間の変化を見れば失火がわかったが、約6000rpmではそれが成り立たないことがわかった。この原因としては、回転数が高くなるとクランク軸のねじり振動が大きくなって、失火による回転速度の変化がクランク軸のねじり振動に埋もれてしまうことが考えられる。ここでは、クランク軸のねじり振動の解析をすることで約4000rpmで検出できた失火が約6000rpmでは検出できなくなる原因を考察する。

クランク軸をFig. 5-6に示すようなバネマス系としてモデル化した。各気筒、リングギア、

およびフライホイールをマス $J_1, \dots, J_6, J_p, J_f$ としてモデル化した。これらはバネ $k_{p1}, k_{12}, \dots, k_{56}, k_{6f}$ によってつながれている。トルク T_1, \dots, T_6 は気筒 J_1, \dots, J_6 に加わるトルクであり、発生熱量はWiebe関数⁶³⁾に従うと仮定し、内燃機関シミュレータによって気筒内圧から計算した。

Fig. 5-7, Fig. 5-8は開発されたモデルに基づくクランク軸振動のシミュレーション結果を示す。Fig. 5-7は、失火がない場合にクランク軸の回転速度の1サイクルあたりの平均値を1500rpmから6000rpmにスイープしたときのリングギアの回転速度の解析結果である。Fig. 5-8は1つの気筒が失火している場合のシミュレーション結果を示す。いずれの図でも、内燃機関回転速度そのものを縦軸にするとレンジが広くなりすぎて回転変動が見えなくなってしまうので、ハイパスフィルタで低周波成分をカットし、回転変動のみを表示した。これらの図の比較により、内燃機関回転速度が低いときには、失火による影響が明確であるが、内燃機関回転速度が5000rpmを超えると、クランク軸振動は増加して、失火の影響が隠れてしまうことがわかる。したがって、内燃機関回転数が約6000rpmのときの失火検出を障害する要素はクランク軸のねじり振動であると考えられる。一般に、耐振性の観点から、ねじり振動の共振点は高い周波数になるようにクランク軸系は設計されるので、回転数が高くなるほどねじり振動が大きくなって、それにより失火検出が妨げられたということは、耐振設計の観点からも妥当な解析結果である。

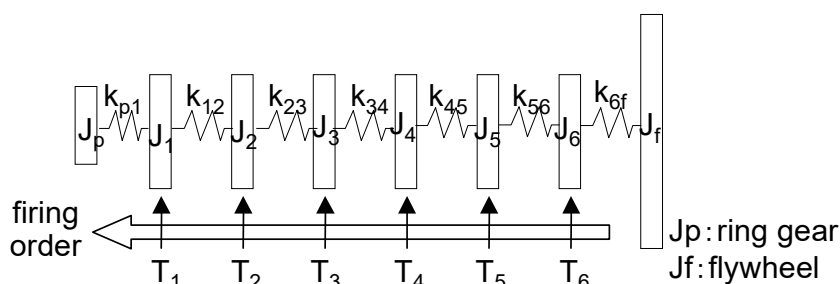


Fig.5-6 Model of crank shaft as spring-mass system ⁷⁸⁾

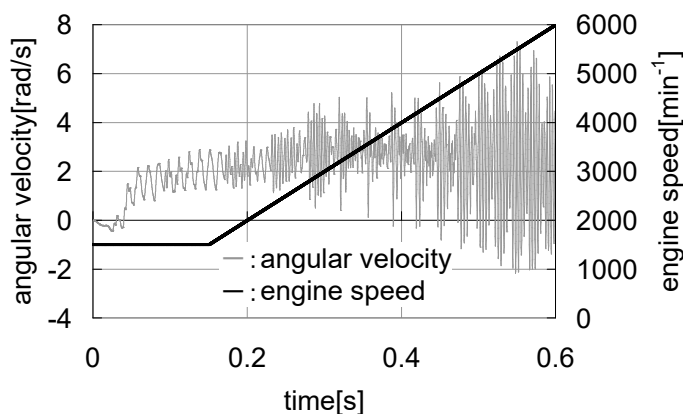


Fig.5-7 Angular velocity of ring gear when no cylinder misfires ⁷⁸⁾

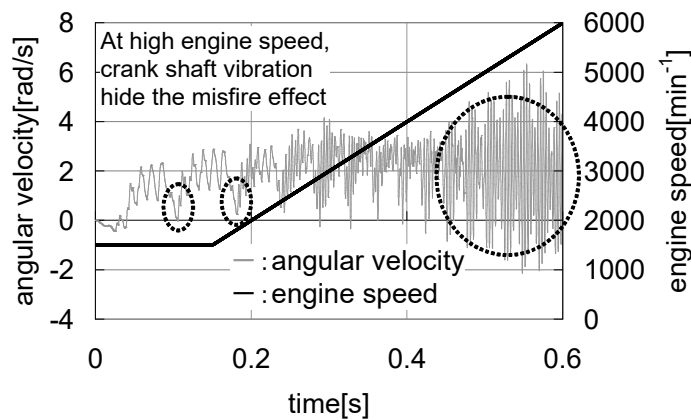


Fig.5-8 Angular velocity of ring gear when the 1st cylinder misfires⁷⁸⁾

5-4 クランク軸のねじり振動にロバストな内燃機関回転計測

次に、失火の影響を効率的に抽出するために、クランク軸振動を打ち消す方法を考える。開発されたクランク軸振動モデルを使用して、内燃機関回転速度の1サイクルあたりの平均値が6000rpmのときに一つの気筒が失火している場合のリングギアの角速度を解析した。Fig. 5-9はこの解析結果を示す。この結果から、リングギアの角速度が内燃機関サイクルあたり6回振動したことがわかる。つまり、クランク軸のねじり振動の周期が、6つの気筒の筒内圧によりクランク軸に加えられるトルクの周期とちょうど同期したときに、筒内圧によるトルクとクランク軸のねじり振動は共振し、その影響が深刻になる。この共振周波数を打ち消すようなクランク軸回転時間計測のウィンドウ幅は、クランク角でみればトルクの周期に一致するので、 $720^\circ/\text{気筒数}=120^\circ$ である。このように、検出ウィンドウを 90° から 120° に変えることでクランク軸振動が打ち消せると予想できる。

Fig. 5-9の角速度を角度 90° 、 120° のウィンドウで平滑化した結果をFigs. 5-10, 11に示す。角速度 $\omega(t)$ を角度 θ のウィンドウで平滑化した $\bar{\omega}_\theta(t)$ は、 θ 回転するのに要する時間 t_θ を用いて、

$$\bar{\omega}_\theta(t) = \frac{1}{t_\theta} \int_t^{t+t_\theta} \omega(\tau) d\tau \dots\dots\dots (5-1)$$

で計算した。

ウィンドウのサイズはFig. 5-10ではクランク軸回転角 90° 、Fig. 5-11ではクランク軸回転角 120° である。これらの図からウィンドウサイズを 90° から 120° にすることでクランク軸振動が低減されて、効率的に失火の影響が抽出されることがわかる。

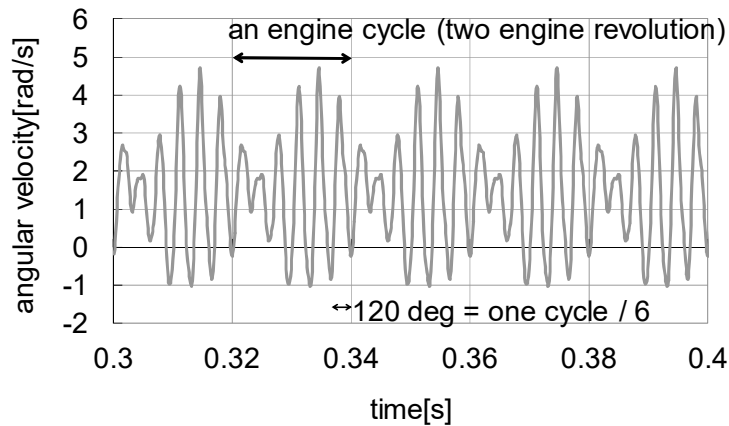


Fig.5-9 Angular velocity of ring gear when a cylinder misfires at engine speed 6000rpm⁷⁸⁾

ウィンドウサイズを120°にすることでクランク軸振動が低減された理由は、以下のように考えられる。クランク軸のねじり振動が最も深刻になるのは、クランク軸系の共振周波数と内燃機関の点火が一致したときである。したがって、内燃機関の点火間隔のねじり振動を平滑化すればよいことになる。内燃機関の点火間隔とは、6気筒内燃機関ではクランク軸が120°回転する時間になるため、ウィンドウサイズを120°にすることでクランク軸振動が打ち消されたと考えられる。

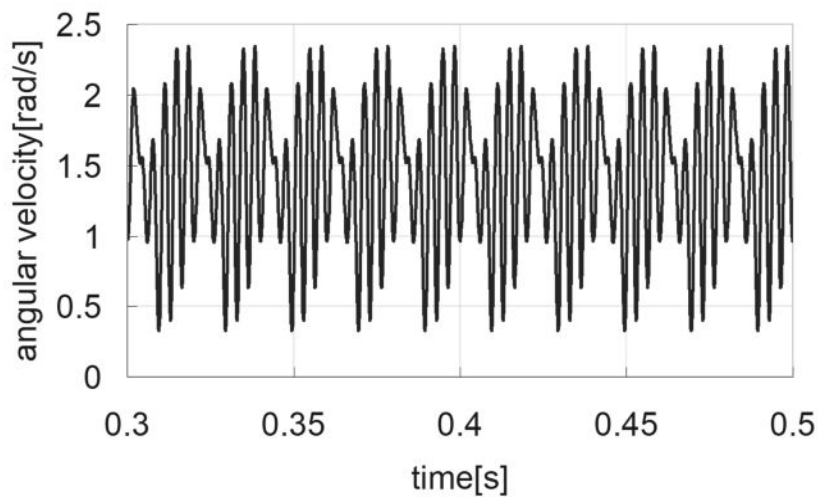


Fig.5-10 Angular velocity averaged for 90 degree⁷⁸⁾

これまでは燃焼圧が正の値を取る区間の幅を90°と考え、これに対応してウィンドウサイズを考えていたが、これを120°に変えても燃焼圧の変化は捉えられる。そこで、ウィンドウサイズを720°を気筒数で割った120°に変える。

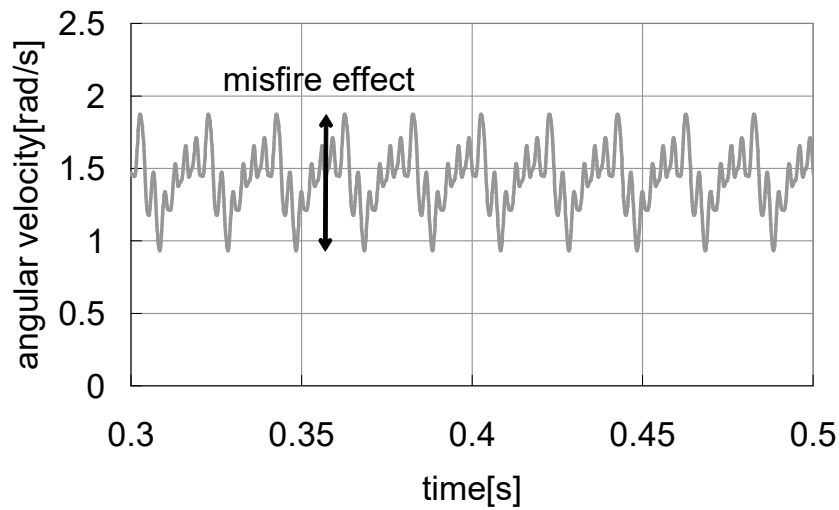


Fig.5-11 Angular velocity averaged for 120 degree⁷⁸⁾

第3章のシミュレーション結果に基づいて、検出ウィンドウを90°から120°に変えた。検出ウィンドウの開始点は、Fig. 5-3の120deg detection windowに示す通り、各気筒の燃焼行程のTDCの前20°で、終了点はTDCの後ろ100°である。

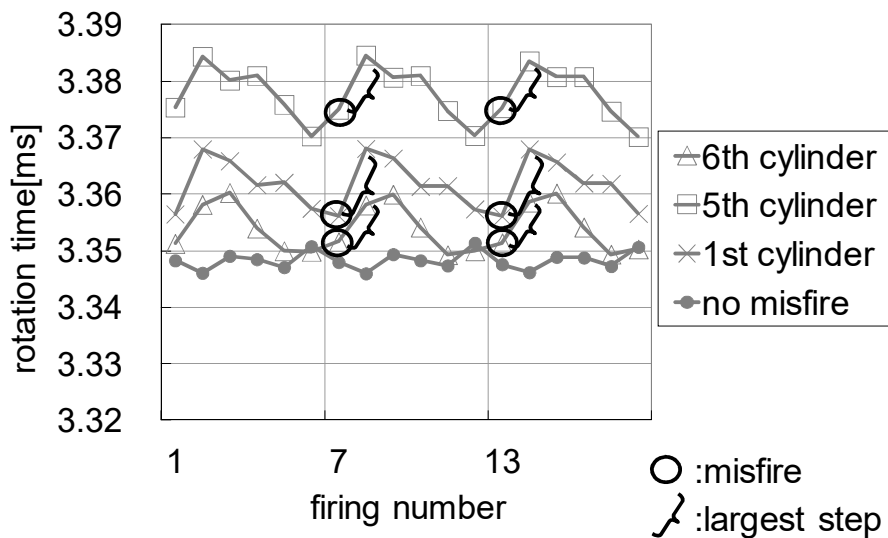


Fig.5-12 Time series of interval for rotation at approximately 6000rpm (detection window is 120 degree rotation)⁷⁸⁾

Fig. 5-12は内燃機関テストで得られた、Fig. 5-5と同じ内燃機関運転状態での120°の検出ウィンドウを回転するのに要した時間を示す。この図から、失火が起こると回転所要時間が増加しており、最も大きいステップを検出することにより失火気筒を特定できることがわかる。

5-5 失火検出フィルタ

4章までは失火検出に用いる，クランク軸が回転するのに要する時間を計測する方法の改善について述べてきた．本章では，この回転所要時間の時系列をフィルタリングし，フィルタ出力を閾値判定して，失火を検出する方法について述べる．

120°の検出ウィンドウを回転するのに要する時間の時系列 $u(n)$ (n はサンプル回数，すなわち点火回数) を処理することで失火を検出するフィルタを開発する．フィルタは以下の要素を満たす必要がある．

(1) フィルタは内燃機関の加減速の影響を打ち消すために，一定の加速度の内燃機関の回転変化には応答しないで，加速度の変化を抽出する．

(2) フィルタは周期的な失火(特定の気筒が全てのサイクルで失火する)だけではなく，孤立失火(前後のサイクルは失火しない)も検出する．

周期的失火は，各内燃機関サイクルに一度失火が起こる，つまり，6サンプルに一度，失火が起こるので，失火検出のフィルタの一例として，Fig. 5-13に示すような係数のFIRフィルタを用いて，

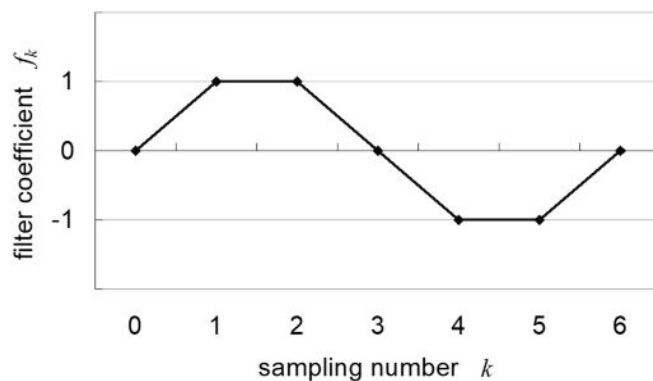


Fig.5-13 Example of misfire detecting filter for periodical misfire⁷⁸⁾

$$y(n) = \sum_{k=0}^6 f_k u(n-k) \dots\dots\dots (5-2)$$

により失火を判定する．

内燃機関が一定加速度で減速しているとき，Fig. 5-14のように回転所要時間は常に増加する．回転所要時間を

$$u(n) = an + b \dots\dots\dots (5-3)$$

と表すと，Fig. 5-14に示された回転所要時間とFig. 5-13に示されたフィルタ係数の畳込みは，

$$y(6) = u(5) + u(4) - u(2) - u(1) = 6a \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

であり、このフィルタでは内燃機関の加減速の影響を打ち消せない。

内燃機関の加減速の影響を受けない失火検出フィルタを実現する必要条件は、この畳込みが0となることである。フィルタ係数を g_k ($k=0, 1, \dots, 6$) としたときに、Fig. 5-14に示される回転所要時間の畳込みは、

$$\begin{aligned} y(6) &= g_0(6a+b) + g_1(5a+b) + \dots + g_5(a+b) + g_6 \cdot b \\ &= a(6g_0 + 5g_1 + \dots + g_5 + 0 \cdot g_6) \\ &\quad + b(g_0 + g_1 + \dots + g_5 + g_6) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

加減速にかかわらず畳込みをゼロにするために、以下の2方程式を満たされる必要がある。

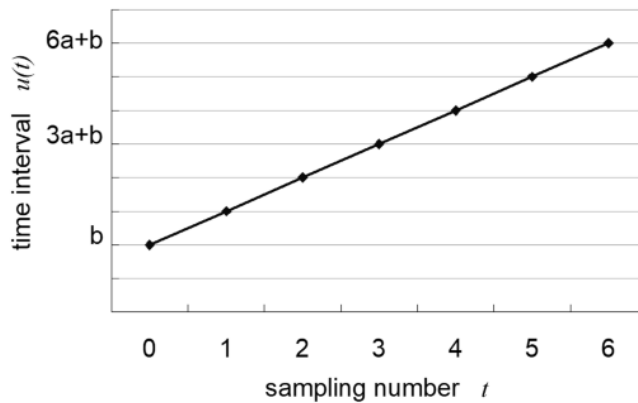


Fig.5-14 Time series of time interval when the engine is decelerating constantly⁷⁸⁾

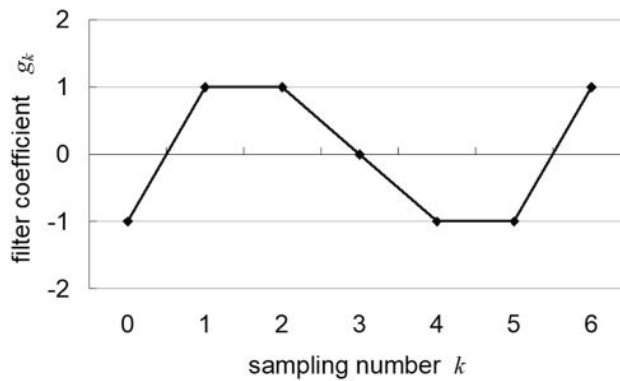


Fig.5-15 Example of filter coefficients which satisfy Eqs.1 and 2⁷⁸⁾

$$6g_0 + 5g_1 + \dots + g_5 + 0 \cdot g_6 = 0 \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

$$g_0 + g_1 + \dots + g_5 + g_6 = 0 \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

式6は、フィルタ係数のモーメントがゼロであることを意味し、式7はがフィルタ係数の総和が0であることを意味する。したがって、内燃機関の加減速の影響を受けないフィルタの係数の条件は、総和とモーメントが0であることである。式6と7を満たすフィルタ係数の例をFig. 5-15に示す。

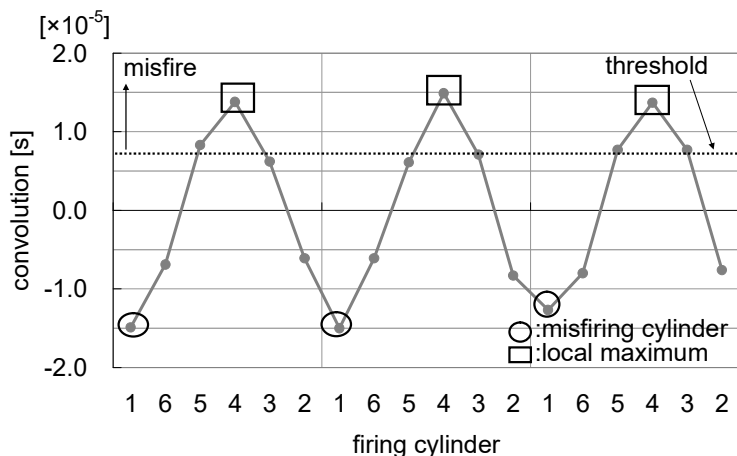


Fig.5-16 Filter output when 1st cylinder misfires every cycle at engine speed approximately 6000 rpm⁷⁸⁾

Fig. 5-16は、第1気筒が全内燃機関サイクルで失火するときのフィルタ出力を示す。この図から、失火気筒の3気筒後にフィルタ出力は極大値をとり、閾値(この場合は、閾値は例えば 0.7×10^{-5} に設定できる)を超えることがわかる。つまり、失火気筒がフィルタの中央にきたときに、フィルタ出力は極大となり、これがFIRフィルタの長さの半分の無駄時間のもとで検出される。したがって、閾値を超える極大値の3つ前の気筒が失火気筒であると特定できる。

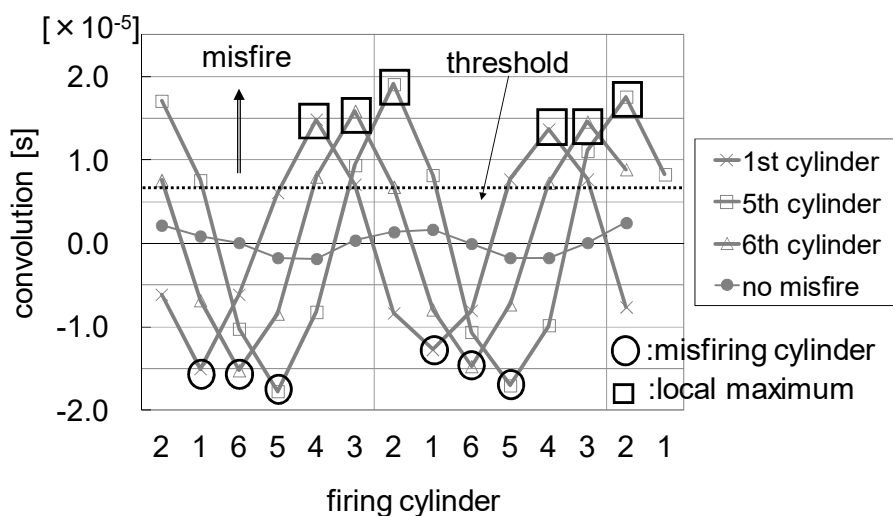


Fig.5-17 Filter output when 1st, 5th, 6th cylinder misfire every cycle and no cylinder misfires at engine speed approximately 6000rpm⁷⁸⁾

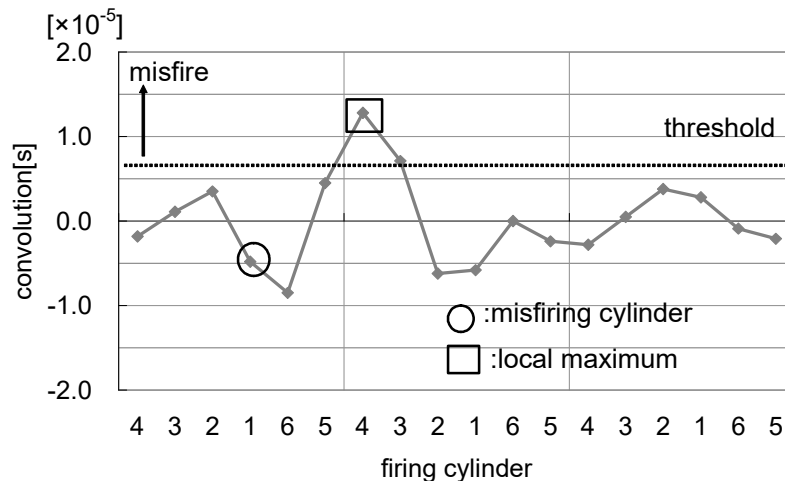


Fig.5-18 Filter output when 1st cylinder misfires once per seven cycle at engine speed approximately 6000 rpm⁷⁸⁾

Fig. 5-17は、第1, 5, 6気筒がそれぞれ全サイクルで失火する場合と、失火が起こらない場合の、フィルタ出力を表す。この図から、どの気筒が失火した場合でも、フィルタ出力は失火から3点火後に極大値をとり、かつ、その極大値は失火が起こらない場合のフィルタ出力のすべての値より大きいことがわかる。

Fig. 5-18は第1気筒が孤立失火しているときのフィルタ出力を表す。この図から、失火の3点火後にフィルタ出力は極大値を取ることがわかる。このことはFig. 5-15, 5-16で示した、常時失火の場合と同じであるが、孤立失火の場合は、失火気筒の3気筒後以外にも極大値が現れる。したがって、失火気筒の3点火後の極大値と、それ以外の極大値の間に、閾値が引けるかどうかの問題となる。

Fig. 5-19は、第1 から第6 気筒がそれぞれ孤立失火しているときのフィルタ出力の、失火から3点火後の極大値(local maximum A)と、それ以外の極大値(local maximum B)と、失火がない場合のすべてのフィルタ出力(all output), を示す。この図から、失火に対応した local maximum Aは、失火に対応しないlocal maximum Bと、失火がない場合のすべてのフィルタ出力とから、 0.7×10^{-5} の閾値で分離できることがわかる。また、local maximum Aは失火がないときのall outputとも分離できる。

以上のように、常時失火の場合でも、孤立失火の場合でも、Fig. 5-15に示すフィルタによって、内燃機関回転数6000rpmにおいて失火が正しく検出できることが確認された。

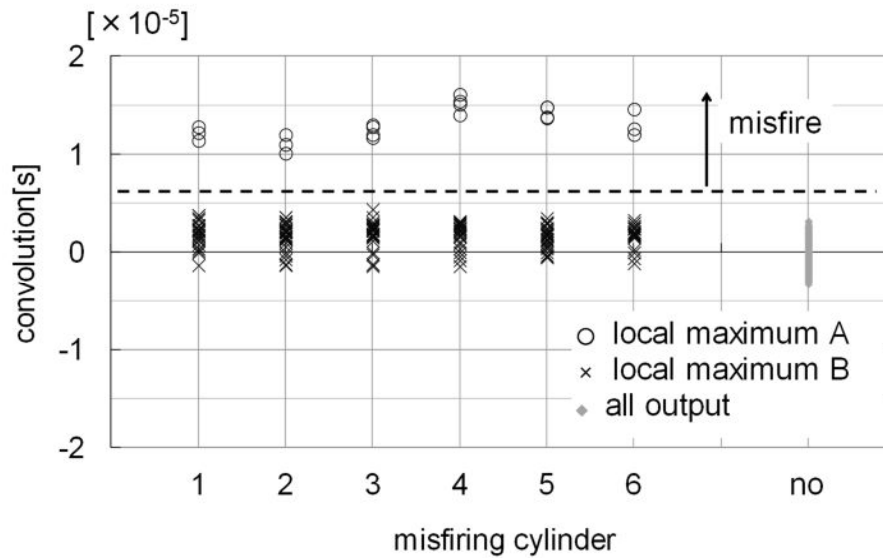


Fig.5-19 Distribution of local maximum A (local maximum which appears 3 cylinder after misfiring cylinder) and B (local maximum other than local maximum A) when one cylinder misfires once per seven cycle at engine speed approximately 6000 rpm and distribution of filter output when no cylinder misfires⁷⁸⁾

5-6 おわりに

内燃機関の回転数が高くなると失火検出がうまくいかなくなる原因を解明するため、クランク軸のねじり振動解析を行った。その結果、失火検出がうまくいかなかった6000rpmまで内燃機関回転数が高くなると、ねじり振動が大きくなり、失火による回転変動が埋もれてしまうことが分かった。また、ねじり振動の影響は、ねじり振動の周期と点火間隔が一致した時に最も深刻になることがわかった。つまり、1内燃機関サイクル720°を気筒数でわったクランク角に同期した成分(本論文では6気筒内燃機関を対象としているのでクランク角120°の振動成分)がもっとも悪影響を及ぼす成分であることが分かった。

この解析結果に基づいて、失火の検出ウィンドウの幅を720°を気筒数で割った120°に設定した。その結果、失火気筒とウィンドウの回転所要時間の増加の関係が、従来失火検出ができなかった6000rpmまで内燃機関回転数を高くしても、失火気筒によらず一定になり、内燃機関回転数が高くなると深刻になっていたねじり振動にロバストにウィンドウ回転所要時間から失火が検出できる見通しが立った。

内燃機関の加減速にロバストな失火検出を実現するための、フィルタ係数に許される条件が、フィルタ係数の総和とモーメントが0になる必要があることを導いた。この条件にもとづき失火検出フィルタを設計した。

この検出フィルタを用いて実機で失火検出を行ったところ、特定の気筒が毎サイクル失火する場合でも、孤立して失火する場合でも、失火と正常燃焼が識別できることが確認された。

第6章 製造ばらつき低減のためのマイクロ秒レベルの信号処理

6-1 はじめに

信号処理を実現するには、フィルタ設計、センシングのためのハードウェアのチューニングのほかに、処理マイコンの信号取り込み能力、処理能力を適切に扱う必要がある。電磁弁の開閉弁の際に生じる微弱な信号の変化を高い時間分解能でとらえるには、マイコンのAD分解能、ノイズ除去性能、計算性能に最新のスペックのマイコンを投入し、活用する必要が生じた。本章はその取り組みを報告する^{8,127)}。

直噴内燃機関は、1990年に市場投入されて以来、燃費、出力、排気をバランスよく改善する手段として普及してきた。従来のポート噴射内燃機関に対し、直噴内燃機関は、排気の浄化が難しい。ポート噴射内燃機関では、ポートに噴射された燃料が気化したのち気筒に取り込まれるため、燃料の濃淡のばらつきは小さい。一方で、直噴内燃機関では、気筒内に直接燃料を噴射して点火により燃焼させるため、噴射の仕方によって気筒内に燃焼の濃淡のばらつきができる。気筒内の空気と燃料の混合気の空燃比に濃淡のばらつきにより、空燃比の薄いところからはNOxが発生する。一方で、噴射された燃料が気筒内壁面に付着し、未燃のまま排出されるので、PNの発生につながる^{60,61)}。PNの発生を抑制するため、インジェクタから噴射される燃料が気筒内壁面に付着しないように、噴射される燃料の噴霧形状の改善や、噴射の勢いを弱くするための分割噴射が取り組まれてきた。燃料の分割噴射を行うと、噴射量が小さくなるので、1-6節で述べたような噴射ばらつきの影響が相対的に大きくなり、空燃比のばらつきにつながる。そこで、噴射量のばらつきの低減に取り組んできた。噴射量のばらつきの低減には、インジェクタの製造ばらつきを低減することが望ましいが、これはコストがかかるので、製造誤差低減のかわりに、それを検出して制御で補正したい⁵⁹⁾。

このような製造誤差の検出と補正には、マイクロ秒レベルでの噴射弁の運動特性の検出が必要となる。エンジンコントローラ周辺には、DC-DCコンバータやPWMコントローラなどのノイズ源が多く、このような状況下では、弁体の動きによる微弱な信号変化の検出は困難である。

本章では、微小な信号変化を検出するノイズにロバストなフィルタを開発し、量産内燃機関制御マイコンに実装した。閉弁タイミングを検出する性能を実機評価し、検出された閉弁タイミングに基づき、製造誤差を補正することで、燃料噴射のばらつきが低減することを実機評価で確認した^{8,127)}。

6-2 閉弁検知に基づく個体差の補正

Fig.1-15 に示すような構造のインジェクタの弁体の動きは Fig.1-16 のようになり、ここでは閉弁タイミングが約 80us ばらつき、このことは噴射量が 1.2mg ばらつくことに相当し、目標燃料噴射量が 4mg のとき誤差の割合が 30%に達するので、補正したいということは 1-6 節で述べた。

弁リフトの製造誤差を補正するためには、閉弁タイミングの検出方法、および、この検出に基づいてソレノイド駆動電流の継続時間の補正方法を開発する必要がある。 Fig.6-1 は、閉弁タイミング付近のソレノイド駆動電流を示している。この図は、閉弁タイミングにおけるソレノイド電圧に変曲点が生じることを示す。この変曲点は、閉弁時におけるアンカー加速の急変に起因する起電力の変化によって発生すると考えられる。

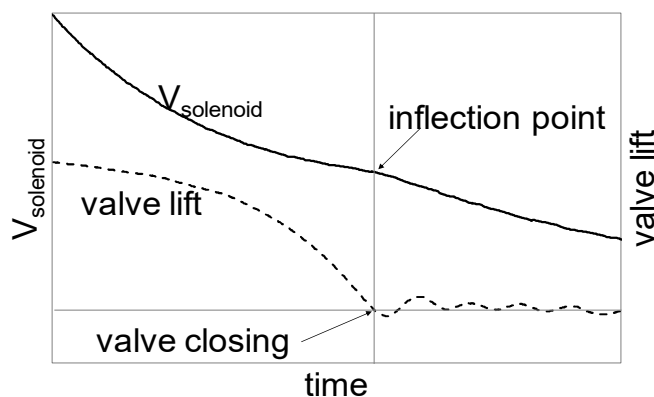


Fig.6-1 Solenoid voltage near valve closing¹²⁷⁾

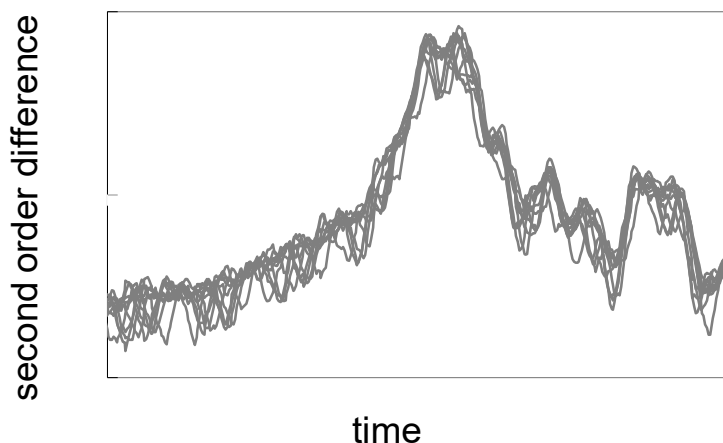


Fig.6-2 Output of 1st order delay and 2-order difference¹²⁷⁾

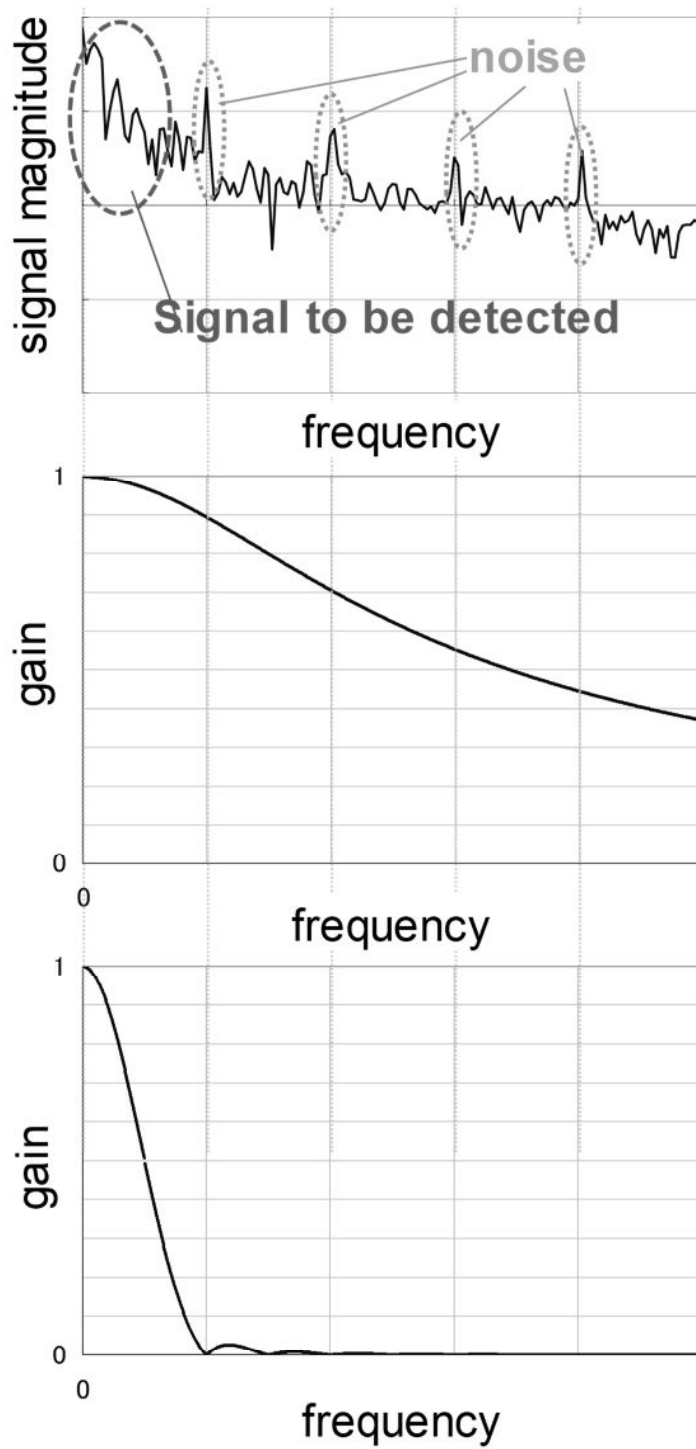


Fig.6-3 Frequency characteristics of signal to be detected and noise (upper figure), 1st order low pass filter (middle figure) and developed FIR filter (lower figure)¹²⁷⁾

変曲点は、ソレノイド電圧の2階微分の極大値に基づいて検出されると考えられる。Fig.6-2 にソレノイド電圧を1次遅れフィルタで平滑化して、2階差分した結果を示す。この図は、2階差分が信号ノイズを強調し、強調されたノイズが極大値検出を妨げることを示す。ノイズ強調は、1次遅れフィルタの時定数と2階差分のステップサイズに依存し、最良のマッチングを見出すには手間がかかる。

1つの駆動条件（1つの燃圧、1つの内燃機関負荷）において最良のマッチングが可能であっても、マッチングポイントは駆動条件に依存する。そこで、インジェクタの種類や駆動条件に依存しない閉弁タイミングの精密な検出方法を開発したい。

Fig.6-3（中央）に1次遅れフィルタの周波数ゲイン特性を示す。Fig.6-3（上段）は、閉弁前後のソレノイド電圧信号の周波数の分布を示している。これらの図から、1次遅れフィルタのゲインの減衰はゆるやかなので、騒音低減性能と閉弁検出精度を両立できないことがわかる。

そこで、雑音領域においてフィルタゲインの急峻な減衰が求められる。我々はこれをFig.6-3下段のような特性をもつFIRフィルタを用いて実現することにした。しかし、このような μs レベルの分解能をもつFIRフィルタを実現するには、従来の車載量産マイコンでは、計算負荷等の課題があり、なかなか実現されなかった。微分を避けるための工夫は、例えば特許等に伺える¹²⁸⁾。この発明では、参照波形を発生させソレノイド電圧との差をとることで、ソレノイド電圧の低周波成分を除去し、微分する代わりに変曲点を強調している。参照波形はインジェクタにより異なり、運転条件によっても異なるので、適合に工数がかかるという問題がある。本研究では、最新の車載量産マイコンの機能を活用することで、FIRフィルタ演算による微分機能を実現した。

6-3 量産マイクロコンピュータによる閉弁検知の実現

量産マイコンを用いた閉弁検出用FIRフィルタの実現時に発生する問題は次のとおり。

- (i) デジタルフィルタリングの計算負荷。
- (ii) AD変換の時間分解能および電圧分解能。
- (iii) デジタルフィルタのエイリアシングの低減。

ここでは、量産内燃機関制御マイコンRH850を用いてこれらの問題を解決したことを報告する。

6-3-1 FIRフィルタの計算負荷

6-2節で提案されたFIRフィルタの実現には、少なからぬ計算性能が求められる。入力 u_t に対するFIRフィルタ出力 y_t は、次のように表される。

$$y_t = \sum_{n=0}^{N-1} f_n u_{t-n} \cdot \dots\dots\dots(6-1)$$

我々のアプリケーション（閉弁タイミングの検出）では、サンプリング間隔は 5μs、フィルタタップ数 N は 20 である。言い換えれば、上記の式で表される乗算と積算は 5μs で処理する必要がある。このフィルタリング負荷は、従来の内燃機関制御マイクロコンピュータには重い。

図 6-4 は、この閉弁検出のフィルタリング負荷と内燃機関制御における他の信号処理アプリケーションの負荷を比較する。従来、最も高負荷の信号処理アプリケーションの 1 つに、ノック検出があった。ノック検出を実現するため、マイコンメーカーは様々な技術を開発してきたが、この図は、閉弁検出がさらに高い計算性能を必要とすることを示す。

高い計算性能を得るため、ルネサス RH850E1 を閉弁検出に採用した。このマイコンには、内燃機関信号処理アプリケーション用に特別に設計された DFE (Digital Filter Engine) と呼ばれる信号プロセッサが搭載されている。Table 6-1 に性能を示す。この DFE は、メインコアに負荷をかけることなく、閉弁検出に必要な十分な計算性能を提供する。

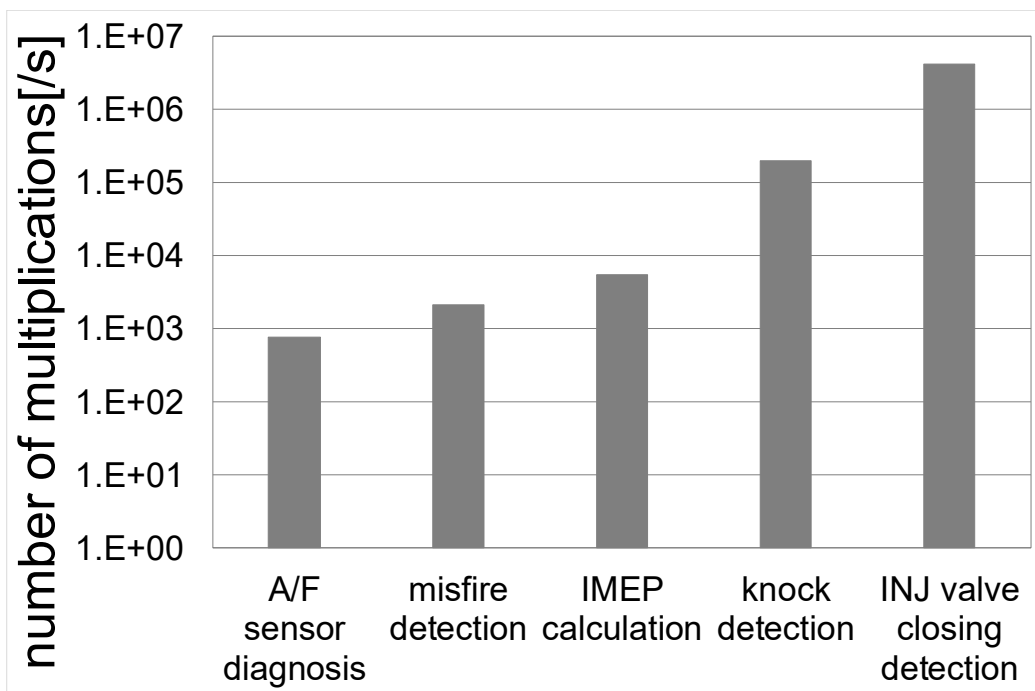


Fig.6-4 Calculation load of signal processing applications¹²⁷⁾

Table 6-1 Specification of DFE of RH850E1x¹²⁷⁾

number of taps	up to 32
bit length of input data	16bit
frequency	up to 200KHz

6-4-2 AD変換

Fig.6-5 に示すように、閉弁時に発生するソレノイド電圧の変化は約 150mV であった。この図では、 $V_{solenoid}$ とその近似線との差 V_{diff} がプロットされている。AD 変換する信号範囲（減衰前）が 30V の場合、この信号変化と信号範囲の比は

$$\frac{150mV}{30V} = \frac{1}{2^8} \dots\dots\dots(6-2)$$

Fig.6-6 に従来型の AD 変換器の分解能を示すが、従来型で多く提供されていた 8 ビット分解能の AD 変換器では、信号変化は 1 ビットの変化にしかない。したがって、電圧分解能を向上させる必要がある。この高分解能は $\Delta\Sigma$ AD 変換器によって提供される。 $\Delta\Sigma$ AD 変換器では、オーバーサンプリング、デシメーションの機能によりコンパクトサイズで電圧サンプリングの高分解能が実現される。RH850E1x の $\Delta\Sigma$ AD 変換器の ENOB（有効ビット数）は 200KHz で 13 ビットなので、アプリケーションには十分である。

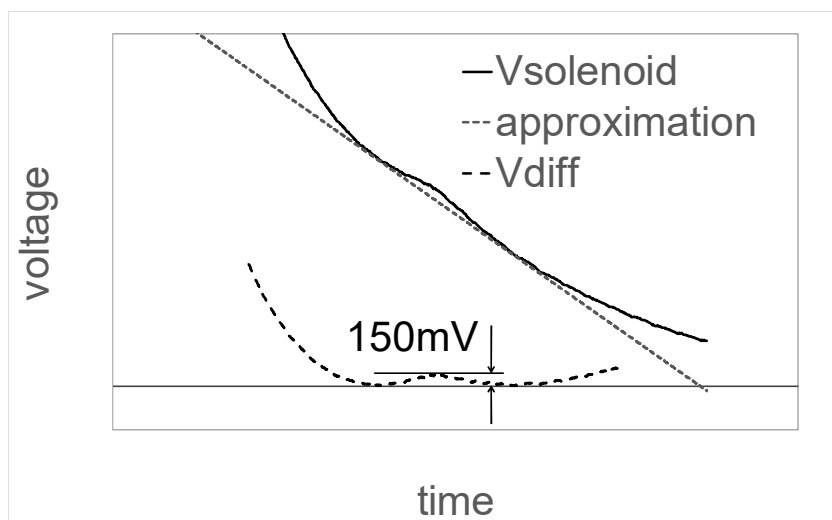


Fig.6-5 Magnitude of signal change caused by valve closing¹²⁷⁾

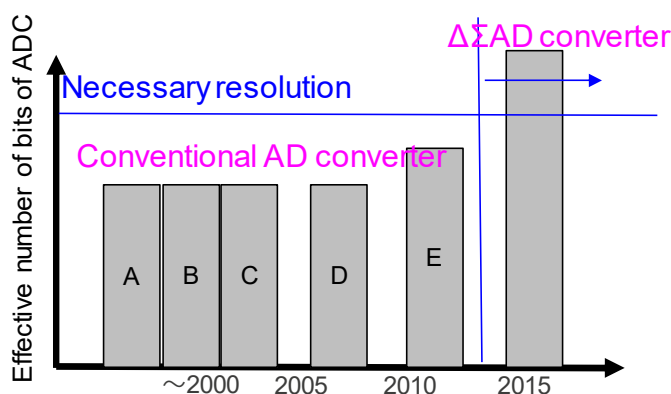


Fig.6-6 Improvement of AD conversion resolution by $\Delta\Sigma$ converter

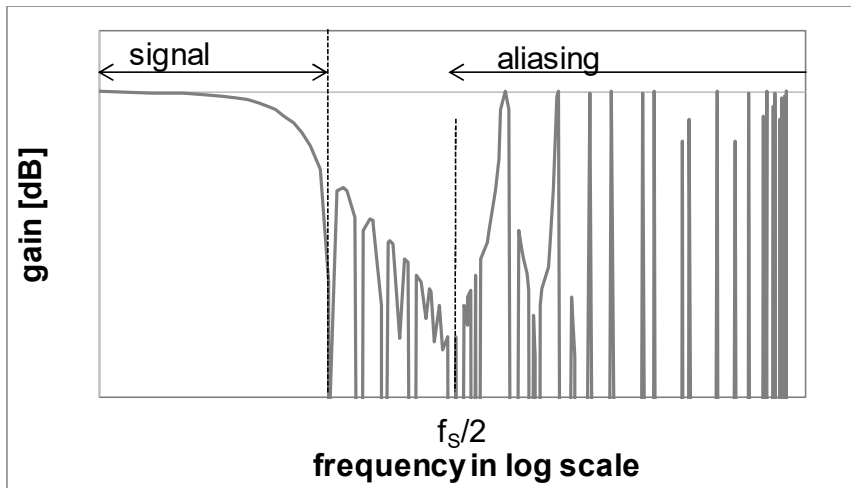
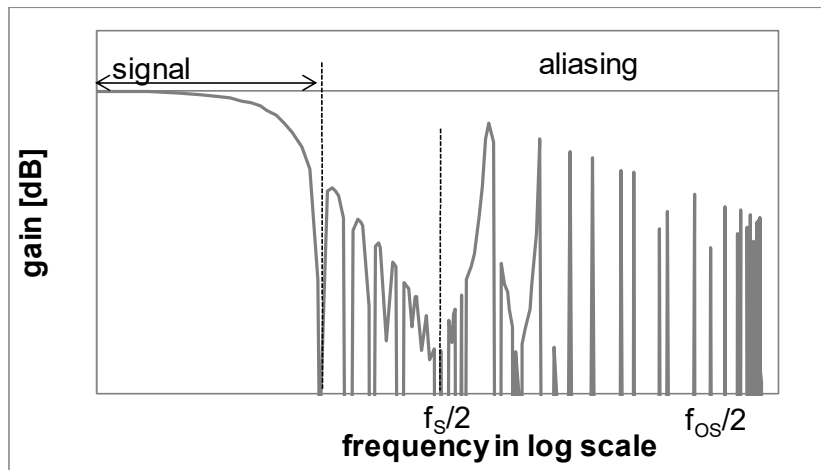
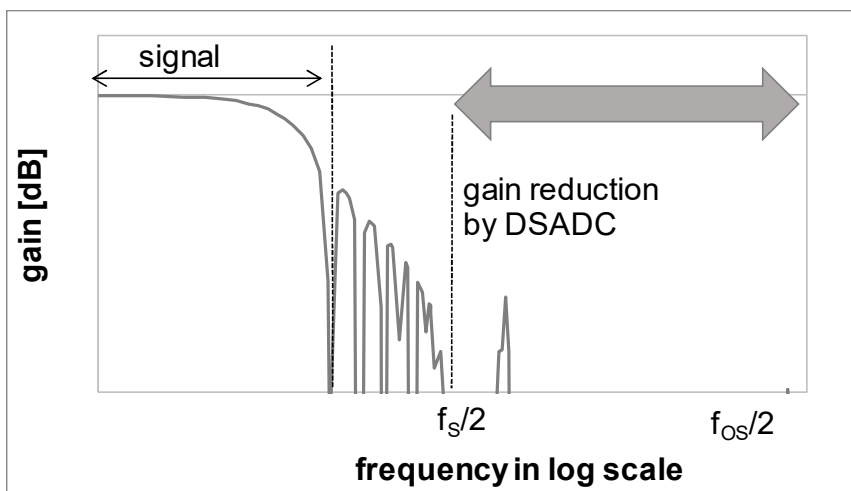


Fig.6-7 Gain of FIR filter¹²⁷⁾



(a) Total gain of FIR filter, SAR ADC and analog filter



(b) Total gain of FIR filter, $\Delta\Sigma$ ADC and analog filter

Fig.6-8 Comparison of aliasing reduction performance¹²⁷⁾

6-4-3 エイリアシングの低減

Fig.6-9 に閉弁検出のブロック図を示す。6-2 節で説明したように、ソレノイド電圧を FIR フィルタリングすると、Fig.6-7 のようにエイリアシングが発生する。アナログフィルタのみでエイリアシングを低減すると、無視できない位相シフトが発生する。位相シフトを抑えつつエイリアシング効果を低減するため、 $\Delta\Sigma$ AD 変換器に注目した。

$\Delta\Sigma$ AD 変換器は、サンプリング周波数 f_s の半分とオーバーサンプリング周波数 f_{os} の半分との間のゲインを減少させる。Fig.6-7 に示すデジタルフィルタゲインでは、エイリアシングが深刻である。Fig.6-8(a)は、アナログフィルタ、従来の SARAD 変換器、FIR フィルタのシーケンスのゲインを示す。この図では、アナログフィルタによってエイリアシングが低減されているが、十分ではない。Fig.6-8 (b)に、アナログフィルタ、 $\Delta\Sigma$ AD 変換器、FIR フィルタのシーケンスのゲインを示す。この組合せにより、エイリアシングは十分に低減される。

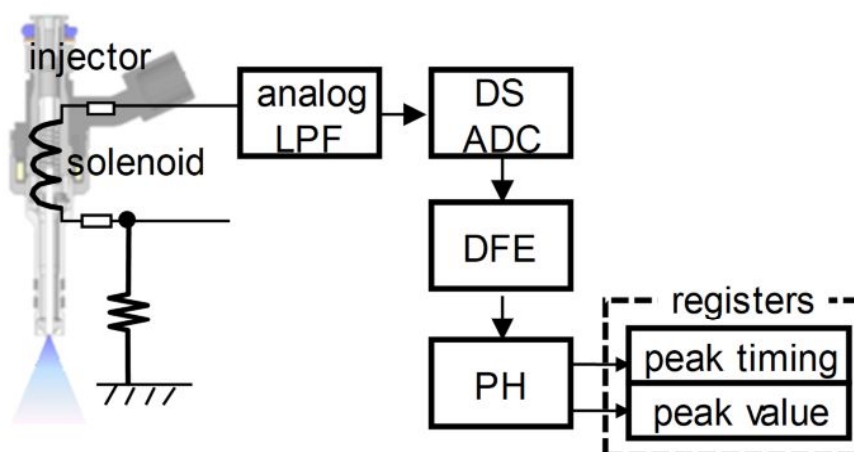


Fig.6-9 Block diagram of valve closing detection¹²⁷⁾

以上のように、電圧分解能とエイリアシング低減の観点から、RH850E1x の $\Delta\Sigma$ AD 変換器は十分である。

6-4-4 RH850 を用いた閉弁検知

Fig.6-9 に閉弁検出のブロック図を示す。ソレノイド電圧は、アナログ LPF(ローパスフィルタ)によって平滑化された。これは主に $f_{os}/2$ を超えるノイズを低減する。アナログフィルタ後の平滑化された信号は、 $\Delta\Sigma$ AD 変換器によってデジタル化された。この AD 変換器は、 $f_s/2$ と $f_{os}/2$ の間のノイズを除去する。デジタル化された信号は、DFE によって実現される FIR フィルタによって 2 階差分され、DC-DC コンバータと PWM コントローラのノ

イズが低減された。

DFEの後処理機能である Peak Holder により、2 階微分の極大値が検出さる。ピークタイミングはレジスタに書き込まれ、製造ばらつきの補正に用いる。

6-5 閉弁検知の精度

量産マイクロコンピュータ RH850E1x で実現した閉弁検出性能を評価する。Fig.6-10 は、ソレノイド信号が入力されたときの FIR フィルタの出力を示す。Fig.6-2 と比較すると、ノイズは除去され、明確な最大値が Fig.6-10 に見られる。

RH850 を用いたソレノイド電圧から推定した閉弁タイミングと弁リフトを直接測定した閉弁タイミングを Fig.6-11 で比較した。この図は、閉弁タイミング検出が AD 変換分解能である 5 マイクロ秒の精度で実現されたことを示す。

閉弁タイミングの検出に基づいて、インジェクタ弁の動きを補正した。この補正では、検出に基づいて駆動電流の継続時間を補正した。Fig.6-12 は、補正によって得られる効果を示す。この補正により、製造誤差による噴射偏差が低減される。噴射偏差の減少は、排出規制をクリアするための重要な技術である多段噴射を実現するために必要とされる噴射量の減少を可能にする。

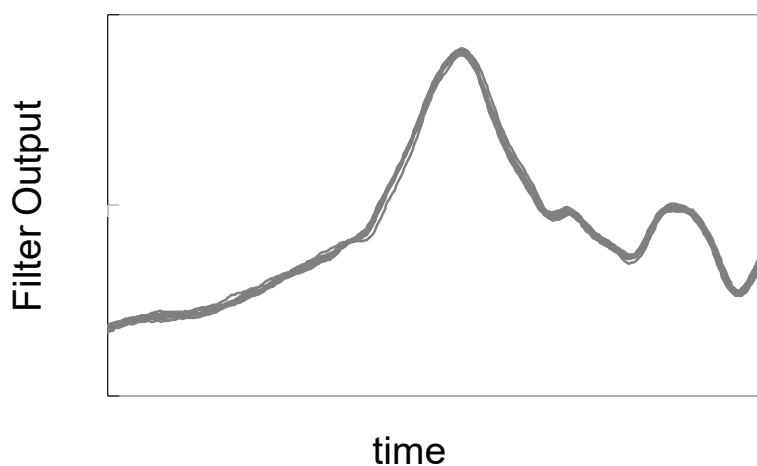


Fig.6-10 Output of FIR filter¹²⁷⁾

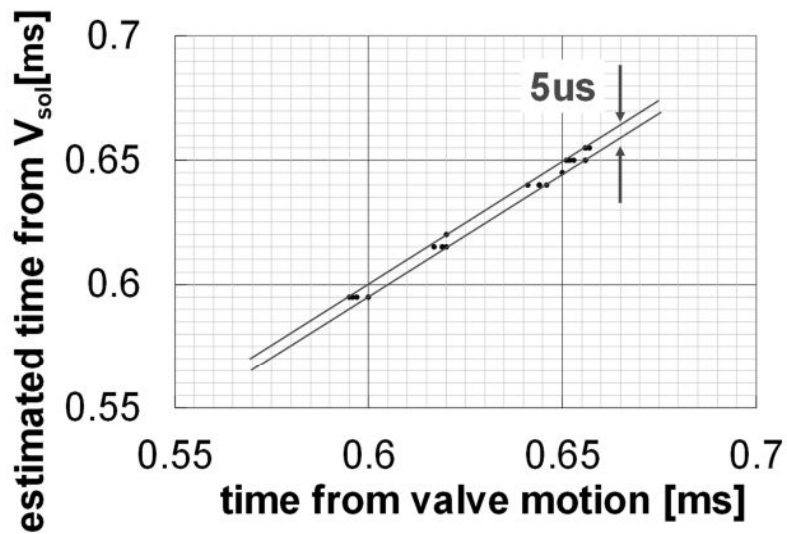


Fig.6-11 Comparison of valve closing timing detected by FIR filter and detected from valve motion¹²⁷⁾

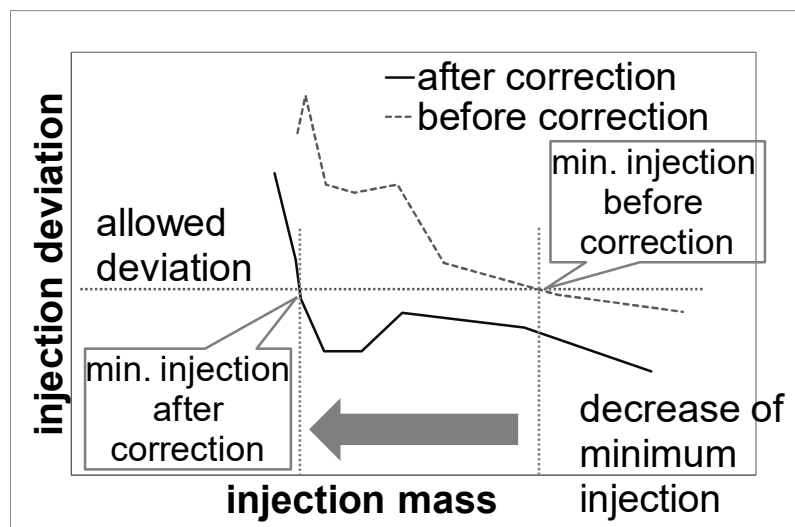


Fig.6-12 Decrease of minimum fuel injection on the basis of developed valve closing timing detection¹²⁷⁾

6-6 おわりに

内燃機関を対象とした信号処理アプリケーションの最近のトピックの 1 つは、インジェクタの製造誤差を補正することである。インジェクタの製造誤差を補正するために、インジェクタの閉弁タイミングを検出する技術を開発した。閉弁タイミングを検出するには、AD 変換範囲のわずか $1/2^8$ であるソレノイド電圧の信号変化を、マイクロ秒の精度レベルで捕捉し、DC-DC コンバータのノイズによって妨げられないように信号処理する必要がある。

この信号処理を実現するため、ノイズ周波数領域で急激にゲインが低下する FIR フィルタを設計し、量産マイコン RH850E1x の DFE に搭載した。振幅が AD 変換レンジの $1/2^8$ の信号を捉え、FIR フィルタのエイリアシングを除去するために、 $\Delta\Sigma$ AD 変換器を採用した。

ソレノイド電圧の信号処理に基づく閉弁タイミング検出の性能は、弁動作を直接測定した結果との比較に基づいて評価した。結果は、検出が AD 変換の時間分解能である $5\mu\text{s}$ の精度内で実現されたことを示す。

この検出を用いて、製造誤差によるインジェクタ弁の動作ばらつきの補正を行った。この補正の結果、噴射偏差の減少が確認された。

第7章 結論

自動車の内燃機関の制御の進化に伴い、信号処理も進化してきた。その開発の状況は、ノック診断やOBDのように量産品に搭載されて市場に流通しているのものがある一方で、燃料状態推定等では、いまだに実験室レベルにとどまっているものもある。本論文では、コンパクトでロバストな信号処理の中でも、特に、微分フィルタに着目し、微分フィルタが内燃機関の制御において果たす役割を整理し、具体的なアプリケーションについて、対象の特性に基づいて微分フィルタを適用したシステムを開発した。

第1章では、内燃機関の制御の進歩に応じて進化してきた信号処理の研究状況を整理した。信号処理のアプリケーションとしては、燃焼状態検知、ノック検知、OBD、アクチュエータの個体差検知、空燃比センサの信号処理に分類でき、このそれぞれについて信号処理の状況について整理した。その結果、ノック診断のように設計レベルで実用に耐えうるものがある一方で、どのような物理現象に着目するか、そのためにはどんな信号の特徴に着目すべきかを論じてはいるものの、量産内燃機関への搭載に耐えうる、ロバストでコンパクトな信号処理を実現するには、いまだ開発の余地があるものもあることがわかった。このような状況において、信号処理の中でも特に広い役割が期待できる微分フィルタについて、その3つの役割、因果律をさかのぼる、周波数に比例したゲインを示す、変化点を強調するについて、これらを生かしたアプリケーションを整理した。微分フィルタにはこうした広い役割がある一方で、差分間隔や平滑化の仕方といった設計によって性能が左右されるという課題がある。微分フィルタに関する研究例を調べた結果、スロットル、移動体、傾斜剛体等のプラントモデルを作成しやすいアプリケーションに対しては、オブザーバを使った微分フィルタが多く使われていることが分かった一方で、内燃機関の空燃比センサの信号のような、モデル化が困難なアプリケーションでは、モデルの代わりに対象の周波数特性に基づいて微分フィルタが設計されていることがわかった。内燃機関の制御では、燃焼制御のようなモデル化しがたい対象が扱われることが多いので、本研究では、内燃機関のようにモデル化困難な領域を対象とし、対象特性から微分フィルタへの要求を導き、要求を満たすようにフィルタを設計する、ということを一貫して行う。

第2章では、信号に周期性がある場合を対象に、周期性を活かした信号処理を実現するため、この周期とその倍周波数を強調するフィルタの実現の例として、クランク角センサ信号からの燃焼トルクの推定方法を開発した。クランク角センサの周期性に着目し、これを三角関数で近似し、近似したものを微分するという機能をFIRフィルタで実現した。これによって、低回転数の1000rpmではトルクの立ち上がり、ピーク位置が正確に再現できることがわかり、トルクの気筒ばらつきにも追従できることがわかった。また、FIRフィルタによる安

定で応答性の良い微分と上下死点のトルク補正の効果により、過渡トルクの変動に正確に追従できることがわかった。また、量産内燃機関のクランク角センサの分解能で燃焼トルクが再現できるか調べるため、10degの分解能のクランク角センサから燃焼トルクを推定したところ、クランク角1degの場合と比べて推定性能の劣化が小さいことがわかった。これは、燃焼トルク、クランク軸回転角速度の周波数成分は燃焼4次(クランク角 $180^\circ / 4 = 45^\circ$)までが支配的なので、クランク角 10° より細かい周期の成分の寄与は小さいからである。

第3章では、平坦なゲイン特性を示すフィルタの実現を目指し、空燃比センサの劣化の推定方法を開発した。ここでは、フィルタの長さに対し、奇数次のFIRフィルタと偶数次のFIRフィルタの平均によりリップルを平滑化する方法を考案し、実験データに基づきフィルタ長と次数を最適化した。その結果、診断に最も不利な低回転低負荷の条件下でも、識別性能が6に達し、実用上確保可能な診断時間で診断が実現できることがわかった。

第4章では、短いフィルタを代数的に設計する例として、失火と外乱の識別の開発に取り組んだ。失火検出の外乱としては、車体の残響振動があり、これが発生すると、失火による波形変化と類似した波形が発生する。これらを識別する方法として、失火を検知し残響振動を除去する帯域の狭いフィルタが考えられるが、これを実現するにはフィルタ長を長くする必要があり、検出の応答性の低下や計算負荷の増加が危惧される。そのため、2つのフィルタを用いて特徴を抽出し、その比によって失火と残響振動を分離することを試みた。これを実現するためのフィルタの特徴を代数的に明らかにし、2つのフィルタを設計し、失火と残響振動が分離できることを実験データに基づき示すとともに、一般的な残響振動の周波数帯域が3Hz~5Hzであることに基づき失火と残響振動の分離が行える内燃機関回転数の範囲を見積もった結果、4気筒・6気筒とわず、通常の内燃機関の運転範囲では識別できることがわかった。

第5章では、処理したい信号が外乱に埋もれてしまうという状況を改善するため、センシングシステムのハードのチューニングを行った。信号が外乱に埋もれてしまう例として、クランク角センサからの失火検出をとりあげた。振動解析により、この外乱がクランク軸のねじり振動であることを示した。ねじり振動が深刻になるのは、クランク軸の回転周期と燃焼周期が一致したときなので、回転を検出するためのリングギアの歯の間隔を燃焼周期(クランク角 120°)に一致するようにチューニングし、高回転でも失火検出が可能となった。

第6章では、ますます厳しくなる環境規制に対応するために、アクチュエータの個体差を検出するための信号処理をマイコンに実装した。アクチュエータの個体差の検出では、微細な信号の変化を高い時間分解能で検出する必要がある。そのために、最新のマイコン

の AD 変換機能とデジタル信号処理エンジンを活用し、システム設計した。エンジンコントローラ周りのノイズを効率的にカットするようにデジタルフィルタを設計し、設計したフィルタはデジタルフィルタエンジンで処理することでメインコアに負荷をかけることなくリアルタイム処理が可能となり、 $\Delta\Sigma$ AD 変換器の特性によりエイリアシングの問題を解決した。このように製造ばらつきを検出する信号処理をマイコンに実装することで、 $5\mu\text{s}$ の精度で閉弁タイミングのばらつきを検出可能となり、これに基づき製造ばらつきを補正することで最小噴射量を低減することができた。

このように、内燃機関の制御に微分フィルタを適用するには、

- (1) 必要な情報を含み不要な情報を除去するための計測ハード
- (2) 必要な情報を得るためのフィルタ
- (3) 信号を取り込み処理するマイコン

の 3 つの観点から設計することが必要となるが、実際のアプリケーションにおいて、これらの観点から課題を解決し、内燃機関に適用できる、コンパクトでロバストな信号処理システムを開発した。

これまでも、因果律を遡る、特徴点を抽出するために信号を微分することはあった。多くの場合、1 次遅れフィルタ等で信号をなましたのち、差分をとる、といった処理をおこなうので、適合に手間がかかる、また、周波数に対するゲインの減衰が緩やかなので、望ましい減衰特性が得られずにノイズの影響を受ける、という問題があった。

本研究では、対象の特性に応じた微分フィルタを用いることにより、

ノイズを効率的に除去でき、安定な微分ができるようになった(2 章, 3 章, 6 章)

少ない計算量で処理ができるようになった(2 章, 4 章)

フィルタの適合の手間が削減できた(2 章, 3 章, 4 章)

というメリットが得られた。

また、見たい物理現象がノイズに埋もれてしまう場合に際しては、ノイズの原因をメカニカルに解析し、ノイズに対してロバストな信号が得られるように、計測システムを最適化した。

さらに、高い時間分解能で微細な変化を捉えるためには、高い AD 変換分解能と計算能力が要求されるが、最新のマイコンの AD 変換機能と計算エンジンを活かしたシステム設計をすることで、必要な信号処理ができるようになった。

これらの結果、量産内燃機関の制御に適用できる信号処理システムが実装できた。

謝辞

本研究を博士論文としてまとめるにあたり、懇切な御指導を賜りました東京大学大学院情報理工学研究科石川正俊教授に御礼申し上げたいと思います。先生には修士課程在学のところから、長年にわたってご指導賜りました。先生に主査を引き受けて頂いて博士論文をまとめることができたことを感慨深く思います。

また、計測工学の観点から有益な御助言賜りました、東京大学大学院情報理工学研究科篠田裕之教授、奈良高明教授、制御技術の産業応用の観点から有益な御助言賜りました、東京大学大学院新領域創成科学研究科堀洋一教授、内燃機関の制御の観点から有益な御助言賜りました東京大学大学院工学系研究科山崎由大准教授には、謹んで深謝いたします。

本研究は、日立製作所に入社後、機械に密着した計測制御がしたいと希望し、内燃機関の機構・計測・制御に関する研究室の扉をたたいたときから今日に至るまでの研究をまとめたものです。快く研究室に入れてくれた門向裕三博士、示唆に富んだ議論をしてくれた小渡武彦様、於保茂先生(現日本工業大学)に感謝いたします。

本研究は主に日立オートモティブシステムズ株式会社のご支援、ご助言にもとづき行ってまいりました。失火検出の研究開発においてお世話になりました、福地栄作様、堀俊夫様、高久豊様、空燃比センサの診断の研究開発におきましてお世話になりました、清村章様、渡邊悟様、燃焼状態検知の研究開発におきましてお世話になりました、猿渡匡行様、古屋純一様、大畠英一郎様、長澤義秋様、インジェクタの閉弁検知の研究開発におきましてお世話になりました、坂本英之様、福田隆夫様、小島諭史様、豊原正裕様、向原修様、板羽史博様をはじめとした皆様に、感謝申し上げます。

研究所内におきましては、業務と博士論文執筆の両立のためにご配慮・お気遣いいただきました、高橋絢也博士、島田敦史博士、研究遂行にご協力いただいた安部元幸様、草壁亮様、安川義人様、宮本明靖様、岩澤寛様、米谷直樹様、石浩雲様(現上智大学)をはじめとした皆様に御礼申し上げます。

企業のエンジニアとして、ハードな毎日だったと思いますが、それにも関わらず健康でいられたのは、苦勞以上の学ぶ喜び、成果を出す達成感があったからだと思います。導いていただいた皆様に改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 自動車技術ハンドブック編集委員会：自動車技術ハンドブック⑥試験・評価(パワートレイン)編, 137/142, 自動車技術会(2006)
- 2) <http://www.arb.ca.gov/msprog/obdprog/obdprog.htm>
- 3) DIRECTIVE 98/69/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 October 1998 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0069:19981228:EN:PDF>
- 4) 国土交通省：高度な車載式故障診断装置について，排出ガス測定方法及び車載式故障診断装置の基準等を改正しました別添 2, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/09/091101_2_.html (2006)
- 5) 林卓哉,山崎由大,金子成彦,疋田孝幸,水野沙織,藤井拓磨：離散化モデルを用いた HCCI エンジンの制御シミュレーション, 日本機械学会論文集, 84-860, 17/00325(2018)
- 6) 角谷啓,山岡士朗,熊野賢吾,佐藤 真也：ガソリン HCCI 制御システムの開発(第 5 報)-過渡運転時の燃焼切替手法に関する検討, 自動車技術会論文集, 40-3, 775/780(2009)
- 7) 今田道宏,小森賢：エンジン制御システム技術開発, 計測と制御, 53-8, 702/709 (2014)
- 8) 青野俊宏, 岩澤寛, 草壁亮, 坂本英之, 福田隆夫, 小島諭史, 豊原正裕, 向原修, 板羽史博：製造ばらつき低減のためのマイクロ秒レベルの信号処理, 電気学会研究会資料, ST 2018 29-32, 1/7 (2018)
- 9) T.Aono, A.Kiyomura: An Air Fuel Ratio Sensor Diagnosis Method Based on Frequency Characteristics of Differential Filter, Proc. of the 34th Chinese Control Conference & SICE Annual Conference (2015)
- 10) V.Ravaglioli, F.Ponti, M.Cesare, F.Stola, F.Carra, E.Corti: Combustion Indexes for Innovative Combustion Control, SAE paper 2017-24-0079 (2017)
- 11) T.Johansson, O.Stenlaas: Heat Release Based Virtual Combustion Sensor Signal Bias Sensitivity, SAE paper 2017-01-0789 (2017)
- 12) X.Storm, H.Salminen, R.Virrankoski, S.Niemi, J.Hyvonen: Analysis of Cylinder pressure Measurement Accuracy for Internal Combustion Engine Control, SAE paper 2017-01-1067 (2017)
- 13) N.Cavina, N.Rojo, L.Poggio, L.Calogero, R.Cevolani: Investigation on Pre-Ignition Combustion Events and Development of Diagnostic Solutions Based on Ion current Signals, SAE paper 2017-01-784 (2017)
- 14) B.Imhoff, M.Muehlthaler, G.Wachtmeister: Heat Release Calculation of Internal Combustion Engines by Analyzing the Flame Radiation with Crankshaft Angle Resolution, SAE paper 2017-01-0787 (2017)

- 15) D.Siano, G.Valentino, F.Bozza, A.Iacobacci, L.Marchitto: A Non-Linear Regression Technique to Estimate from Vibrational Engine Data the Instantaneous In-Cylinder pressure Peak and Related Angular Position, SAE 2016-01-2178 (2016)
- 16) K.Song, H.Xie, W.Jiang, Q.Chen, T.Shen: On-Line Optimization of Direct-Injection-Timing for SI-CAI Hybrid Combustion in a PFI-DI Gasoline Engine, SAE paper 2016-01-0757 (2016)
- 17) L.Romani, G.Lenzi, L.Ferrari, G.Ferrara: Indirect Estimation of In-Cylinder pressure through the Stress Analysis of an Engine Stud, SAE paper 2016-01-0814 (2016)
- 18) V.Bellis, L.Teodosio, D.Siano, F.Minarelli, D.Cacciatore: Knock and Cycle by Cycle Analysis of a High Performance V12 Spark Ignition Engine. Part 1: Experimental Data and Correlations Assessment, SAE paper 2015-24-2392 (2015)
- 19) R.Saracino, M.Gaballo, S.Mannal, S.Motz, A.Carlucci, M.Benegiamo: Cylinder Pressure-Based Closed Loop Combustion Control: A Valid Support to Fulfill Current and Future Requirements of Diesel Powertrain Systems, SAE paper 2015-24-2423 (2015)
- 20) C.Hocking, S.Antonov, A.Shahlari: Instrumentation, Acquisition and Data Processing Requirements for Accurate Combustion Noise Measurements, SAE paper 2015-01-2284 (2015)
- 21) Q.Zhu, S.Wang, R.Prucka, M.Prucka, H.Dourra: Model-Based Control-Oriented Combustion Phasing Feedback for Fast CA50 Estimation, SAE paper 2015-01-0868 (2015)
- 22) H.Li, Y.Huang, G.Li, Y.Yang: Research on the Cylinder-by-Cylinder Variations Detection and Control Algorithm of Diesel Engine, SAE paper 2015-01-1644
- 23) J.Wang, F.Yang, M.Ouyang: Cylinder by Cylinder Indicated Torque and Combustion Feature Estimation Based on Engine Instantaneous Speed and One Cylinder Pressure through Error Similarity Analysis, SAE paper 2015-01-1249 (2015)
- 24) X.Zhao, Y.Cheng, L.Wang: Pattern Recognition Method Applied to Extract In-Cylinder pressure Excitation Response from Measured Vibration Signals, SAE paper 2014-01-2703 (2014)
- 25) G.Malaczynski, G.Roth, D.Johnson: Ion-Sense-Based Real-Time Combustion Sensing for Closed Loop Engine Control, SAE paper 2013-01-0354
- 26) R.Maurya, A.Agarwal: Experimental Investigation of Close-Loop Control of HCCI Engine Using Dual Fuel Approach, SAE paper 2013-01-1675 (2013)
- 27) G.Ponti, V.Ravaglioli, E.Corti, D.Moro, M.Cesare: Development of a Novel Approach for Non-Intrusive Closed-Loop Heat Release Estimation in Diesel Engines, SAE paper 2013-01-0314 (2013)
- 28) K.Ogata: Investigation of Robustness Control for Practical Use of Gasoline HCCI Engine, SAE paper 2013-01-0323 (2013)
- 29) L.Carvalho, T.Melo, R.Netto: Investigation on the Fuel and Engine Parameters that Affect the Half Mass Fraction Burned (CA50) Optimum Crank Angle, SAE paper 2012-36-0498 (2013)

- 30) N.Cavina, D.Moro, S.Sgatti, F.Cavanna: Ethanol to Gasoline Ratio Detection via Time-Frequency Analysis of Engine Acoustic Emission, SAE paper 2012-01-1629 (2012)
- 31) F.Liu, G.Amaratunga, N.Collings, A.Soliman: An Experimental Study on Engine Dynamics Model Based In-Cylinder Pressure Estimation, SAE paper 2012-01-0896 (2012)
- 32) T.Badawy, N.Henein, W.Bryzik: Closed Loop Control Using Ion Current Signal in a Diesel Engine, SAE paper 2011-01-2433 (2011)
- 33) 堀洋一：電気屋が作った電気自動車の夢，パワーエレクトロニクス研究会論文誌， **27**, 2/13(2001)
- 34) 神谷宗宏,久保馨：ハイブリッド車における燃費向上技術の動向，電気学会論文誌D， **120**-1, 251/1256(2000)
- 35) N.Cavina, A.Businaro, M.Cesare, F.Monti, A.Cerofolini: Application of Acoustic and Vibration-Based Knock Detection Techniques to a High Speed Engine, SAE paper 2017-01-0786 (2017)
- 36) N.Cavina, A.Businaro, M.Cesare, F.Monti, L.Paiano: Knock Control Based on Engine Acoustic Emissions: Calibration and Implementation in an Engine Control Unit, SAE paper 2017-01-0785 (2017)
- 37) C.Pimenta, I.Trevas, W.Navegantes, R.Montemor, V.Netto: Knock Sensor Background Analysis and Their Relation with Combustion Pressure Curve, SAE paper 2016-36-0403 (2016)
- 38) F.Bi, T.Ma, J.Zhang: Knock Feature Extraction in Spark Ignition Engines Using EEMD-Hilbert Transform, SAE paper 2016-01-0087 (2016)
- 39) J.Zhang, C.Liu, F.Bi, Y.Pei, X.Bi: Knock Threshold Detection in Turbocharged Gasoline Engine Using EEMD and Bispectrum, SAE paper 2016-01-0643 (2016)
- 40) Y.Liu, L.Li, H.Lu, J.Deng, Z.Hu: In-Cycle Knocking Detection and Feedback Control Based on In-Cylinder pressure and Ion Current Signal in a GDI Engine, SAE paper 2016-01-0816 (2016)
- 41) D.Siano, F.Bozza, D.D'Agostino, M.Panza: The Use of Vibrational Signals for On-Board Knock Diagnostics Supported by In-Cylinder pressure Analyses,SAE paper 2014-32-0063 (2014)
- 42) D.Siano, M.Panza, D.D'Agostino: Knock Detection Based on MAPO Analysis, AR Model and Discrete Wavelet Transform Applied to the In-Cylinder pressure Data: Results and Comparison, SAE paper 2014-01-2547 (2014)
- 43) J.Spelina, J.Jones, J.Frey: Recent Advances in Knock Analysis, Simulation, and Control, SAE paper 2014-01-1349 (2014)
- 44) W.Luo, B.Chen, J.Naber, C.Glugla: Stochastic Knock Detection, Control, Software Integration, and Evaluation on a V6 Spark-Ignition Engine under Steady-State Operation, SAE paper 2014-01-1358 (2014)
- 45) D.Siano, F.Bozza: Knock Detection in a Turbocharged S.I. Engine Based on ARMA Technique and Chemical Kinetics, SAE paper 2013-01-2510 (2013)

- 46) T.Jahn, F.Schuerg, S.Kempf: Knock Control on Small Four-Two-Wheeler Engines, SAE paper 2012-32-0052 (2012)
- 47) Y.Guo: Dynamic Misfire Threshold Determination Based On Zone-Level and Buffer-Level Adaptations for Internal Combustion Engines, SAE paper 2017-01-0599 (2017)
- 48) F.Tseng, I.Makki, P.Kumar, R.Jentz, A.Dudar: Model Based Engine-Off Natural Vacuum Leak Detection Monitor, SAE paper 2017-01-1020 (2017)
- 49) X.Ma, Z.Xia, H.Wu, X.Huang: Combined Frequency Domain Analysis and Fuzzy Logic for Engine Misfire Diagnosis, SAE paper 2015-01-0207 (2015)
- 50) Y.Amadou, C.Wu, Y.Jiang, J.Lu: Detecting the Misfire of Motorcycle Engine with Wide Band Oxygen Sensor, SAE paper 2013-32-9065 (2013)
- 51) H.Tsai, B.Gao, M.Chiang, B.Chen, Y.Wu: Misfire Diagnostic Strategy for Motorcycles, SAE paper 2013-32-9058 (2013)
- 52) O.Brunel, F.Duault, J.Lavy, Y.Creff, B.Youssef: Smart Soot Sensor for Particulate Filter OBD, SAE paper 2013-01-1334 (2013)
- 53) M.Aly: Engine Fault Detection Using Wavelet Packet Transforms, SAE paper 2013-01-1705 (2013)
- 54) K.Doi, Y.Nakamura, K.Hanashi, K.Hashizume: Development of Spark Plug for Ion Current Misfire Detection System, SAE paper 2012-01-1253 (2012)
- 55) 青野俊宏, 栗原伸夫: 世界的な規制に対応した自動車エンジンの故障診断, 計測と制御, **55-3**, 214/220(2016)
- 56) A.Ito, M.Kawano, S.Fujita: ECU Structure Strategy to Detect Lift Timing of GDI Solenoid Injectors with High Precision, SAE paper 2017-01-1628 (2017)
- 57) F.T.Scafati, F.Pirozzi, S.Cannavacciuolo, L.Allocca, A.Montanaro: Real Time Control of GDI Fuel Injection during Ballistic Operation Mode, SAE paper 2015-24-2428. (2015)
- 58) M.Parotto, S.Sgatti, F.Sensi: Advanced GDI Injector Control with Extended Dynamic Range, SAE paper 2013-01-0258 (2013)
- 59) 角井啓, アンドレアス クファラート, ロジャー ブッシュ, ミヒャエル フランク, アクセル シュトルヒ: EU6直噴ガソリンエンジンの課題と実行可能なソリューションの評価, 自動車技術, **67-9**, 39/44 (2013)
- 60) K.Cedrone, W.Cheng: SI Engine Control in the Cold-Fast-Idle Period for Low HC Emissions and Fast Catalyst Light Off, SAE paper 2014-01-1366 (2014)
- 61) J.Ketterer, W.Cheng: On the Nature of Particulate Emissions from DISI Engine at Cold Fast Idle, SAE paper 2014-01-1368 (2014)
- 62) 佐田翼, 伊藤聡一郎, 喜久里陽, 草鹿仁, 大聖泰弘: 小型ディーゼルエンジンにおける多段噴射による熱損失低減と熱効率向上に関する研究, 自動車技術会論文集, **46-4**, 755/761(2015)
- 63) J. B. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals, 390, McGraw-Hill, (1988)

- 64) 自動車技術会教育図書編集委員会：自動車工学－基礎－，自動車技術会(2002)
- 65) 飯田訓正,横森剛,津江光洋,北川敏明,小酒英範,三好明,森吉泰生：SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームの研究成果—高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究開発—，日本燃焼学会誌，61-197，178/192(2019)
- 66) 白石拓也：火花点火式筒内噴射エンジンの混合気形成に関する研究，千葉大学博士論文(2016)
- 67) 浦野繁幸,永井正勝,加古純一：熱効率最大化に向けた燃焼制御法の研究—熱発生率制御法に関する検討—，自動車技術会論文集，48-2，253/258(2017)
- 68) 青野俊宏,猿渡匡行：クランク軸の回転計測からのエンジントルクと筒内圧指標の推定，計測自動制御学会論文集，51-9，605/613(2015)
- 69) 緒方健一郎,熊野賢吾,紀村博史,山岡士朗：エンジン制御システムにおける燃焼状態センシング技術，計測と制御，53-8，683/689(2014)
- 70) 国家环境保护总局：轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国Ⅲ，Ⅳ阶段），中华人民共和国国家标准 GB18352.3-2005
- 71) N. Qiao, C. Krishnamurthy, N. Moore: Determine Air-fuel Ratio Imbalance Cylinder Identification with an Oxygen Sensor, SAE paper 2015-01-0869 (2015)
- 72) N.Cavina, R.Francesco, M.D.Cesare, E.Brugnoni: Individual Cylinder Air-Fuel Ratio Control for Engines with Unevenly Spaced Firing Order, SAE paper 2017-01-0610(2017)
- 73) 具嶋和也：鉄道車両の滑走防止を目的とした増粘着材噴射・検出システムの開発，京都大学博士論文，甲第 17605 号(2013)
- 74) 前田健太,藤本博志,堀洋一：タイヤ横すべりを考慮した限界スリップ率推定に基づく電気自動車の駆動力制御，計測自動制御学会論文集 50-3，259/265(2014)
- 75) 小渡武彦,荒井信勝,小林千尋：信号処理による自動車用熱線式エアフローセンサの検出誤差補正（脈動流中におけるポピン式熱線素子の検出流量低下誤差の補正手法），日本機械学会論文集 C 編，65-630，630/635(1999)
- 76) 青野俊宏,清村章：微分フィルタの周波数特性に基づく空燃比センサの診断，計測自動制御学会論文集，49-9，817/822(2013)
- 77) 三尾典克：M2052 のスプリングによる防振系の評価実験について，<http://www.g-munu.t.u-tokyo.ac.jp/mio/doc/m2052.pdf>
- 78) 青野俊宏,福地栄作：クランク軸振動とエンジンの加減速にロバストな失火検出方法，計測自動制御学会論文集，52-4，213/219(2016)
- 79) 藤田壤,清野健:多重スケール Savitzky-Golay 微分フィルタを用いた心電図波形解析，生体医工学 Annual156，S123，2018
- 80) 野口大輔,小濱剛,吉川昭,吉田久：ビッグデータ時代の低遅延・高機能微分フィルタ，電気学会論文誌 C 138-4，336/340(2018)

- 81) 野口大輔, 小濱剛, 吉川昭, 吉田久: 順序統計低域微分フィルタを用いたマイクロサ
ッカードの検出, 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集 2011, 12-2-1, (2011)
- 82) 稲森真美子, 高山周造, 眞田幸俊: DC オフセット及び周波数オフセット存在下におけ
る周波数軸 IQ インバランス推定法, 電子情報通信学会技術研究報告 SR, 109-61,
35/42(2009)
- 83) 稲森真美子, 眞田幸俊: ダイレクトコンバージョン型 OFDM 受信機における DC オフセ
ット及び IQ インバランス存在下での周波数オフセット推定の特性解析, 電子情報通
信学会技術研究報告 SR, 108-446, 11/16(2009)
- 84) 眞田幸俊: ダイレクトコンバージョン受信機における歪補償のための信号処理, 電子情
報通信学会技術研究報告 SR 107-519, 129/135(2008)
- 85) 稲森真美子, ボスタマン アナス ムハマド, 眞田幸俊, 南英城: ダイレクトコンバー
ジョン型 OFDM 受信機における時間変動 DC オフセット及び IQ インバランス存在下の周
波数オフセット推定法, 電子情報通信学会技術研究報告 SR 107-69, 85/91 (2007)
- 86) 稲森真美子, ボスタマン アナス ムハマド, 眞田幸俊, 南英城: ダイレクトコンバー
ジョン型 OFDM 受信機における時間変動 DC オフセット環境下の周波数オフセット推定
法 電子情報通信学会技術研究報告 SR, 106-395, 59/65(2006)
- 87) 荷宮剛, 木束裕太, 松尾孝美, ウメルジャン サウット, 中野和司: 適応微分フィルタ
を用いた電子制御スロットルの状態推定, 自動制御連合講演会講演論文集 53,
298/298(2010)
- 88) 朴淳鉉, 松尾孝美: 適応同定法による時間微分フィルタと移動体検出への応用, 電気学
会論文誌 C, 126-11, 1359/1366, (2006)
- 89) 高原健爾, 大山和宏, 橋本幸男: 微分フィルタを利用した剛体の傾斜角計測システム
の開発, 福岡工業大学研究論集 39-2, 229/233(2007)
- 90) 吉田嵩, 中本昌由, 相川直幸: ビッグデータ時代の低遅延・高機能微分フィルタ, 電気
学会論文誌 C 138-4, 336/340(2018)
- 91) 立花康夫: 微分フィルタを用いた同定における入力信号に対する条件, 回路とシステム
ワークショップ論文集 24, 266/269(2011)
- 92) 立花康夫: 微分フィルタ設計における Chebyshev 近似と Remes アルゴリズム, 神奈川
工科大学研究報告. B, 理工学編 35, 11/16(2011)
- 93) 鈴木敬彦, 張熙: A-4-33 複素チェビシェフ近似による FIR 分数微分フィルタの設計,
電子情報通信学会総合大会講演論文集 2011 年_基礎・境界, 111(2011)
- 94) 立花康夫, 河井敏勝: FIR 型狭帯域フィルタによる微分フィルタ, 神奈川工科大学研究
報告 B 理工学編 (31), 11/16(2007)
- 95) 立花 康夫: FIR 型狭帯域フィルタによる微分フィルタの設計, 電子情報通信学会技術
研究報告 SIP, 105-149, 37-42, (2005)

- 96) 青野俊宏, 小渡武彦: 電子制御スロットルの特性を考慮した内燃機関の応答性の向上, 計測自動制御学会論文集, **38-10**, 892/898(2002)
- 97) 山崎由大編: 基礎からわかる自動車エンジンのモデルベース制御, 第2章, コロナ社(2019)
- 98) 古野志健男: グローバルに進む排出ガス規制強化と対応するパワートレイン技術, 自動車技術, **67-9**, 6/13 (2013)
- 99) 田中貴史, 沖中学, 中村敏之, 本間哲治: 筒内圧力センサ付グロープラグによる予混合圧縮着火燃焼移行時の騒音, NOx 制御技術開発, JSAE Paper 20145229 (2014)
- 100) Z.Han: Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine, SAE Paper 960633 (1996)
- 101) Y.Shimasaki, M.Kobayashi, H.Sakamoto, M.Ueno, M.Hasegawa: Study on Engine management System Using In-cylinder Pressure Sensor Integrated with Spark Plug, SAE paper 2004-01-0519 (2004)
- 102) トヨタ自動車: 新世代希薄燃焼エンジン, Press Information '92 (1992)
- 103) 於保茂, 青野俊宏, 鈴木邦彦, 勝康夫: エンジン制御モデルベース開発の先進技術, 日立評論, **91-10**, 54/57 (2009)
- 104) T.Aono, M.Saruwatari, J.Furuya: Estimation of Engine Torque and Cylinder Pressure Index Based on Crankshaft Rotation Measurement, Proc. of 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 360/365(2013)
- 105) P.M.Azzoni: Indicated and Load Torque Estimation using Crankshaft Angular Velocity Measurement, SAE paper 1999 -01 -0543 (1999)
- 106) K.Tsuchiya: A Calculation Method for Indicated Mean Effective Pressure Based on Harmonic Analysis of Pressure Waveform, Int. J. of Engine Research, 4-2, 87/101 (2003)
- 107) (独)情報処理推進機構セキュリティセンタ : 2010 年度 自動車の情報セキュリティに関する調査報告書(2011)
- 108) OBDII,EOBD 適合試験の自動化, [http://www.etas.com/data/RealTimes_2007/rt_07_02_37_jp .pdf](http://www.etas.com/data/RealTimes_2007/rt_07_02_37_jp.pdf)
- 109) エンジンテクノロジー編集委員会: 自動車エンジン要素技術 II, 山海堂(2005)
- 110) P.J.Maloney : A Production Wide-Range AFR Sensor Response Diagnostic Algorithm for Direct-Injection Gasoline Application, SAE Paper 2001-01-0558(2001)
- 111) A.V.Oppenheim, R.W.Schafer, J.R.Buck : Discrete-Time Signal Processing 2nd ed., Prentice Hall (1999)
- 112) 有本卓: 信号・画像のデジタル処理, 産業図書(1980)
- 113) <https://www.renesas.com/jp/ja/products/microcontrollers-microprocessors/rh850/rh850e1x/rh850e11.html>
- 114) D. Moro, P. Azzoni, G. Minelli: Misfire Pattern Recognition in high performance SI 12 cylinder engine, SAE Paper 980521 (1998)
- 115) 土井香, 中村義裕, 端無憲, 橋爪勝志: イオン電流失火検出システム用スパークプラグの開発, デンソーテクニカルレビュー, **17**, 22/29 (2012)

- 116) L.Anson, J.S.Pyko: Engine misfire detection by ionization current monitoring, SAE Paper 950003 (1995)
- 117) 青山幸俊, 島崎勇一: 内燃機関の失火検出装置, 特開 2012-251473
- 118) 井畑遼亮, 宇津木克洋, 三木浩太郎: エンジン制御装置, 特開 2014-199040
- 119) 岡崎俊太郎, 石田真規, 片山章弘, 池尻祐貴: 内燃機関の燃焼状態判定装置, 特開 2012-36832
- 120) 鈴木純一, 吉岡衛: 内燃機関の制御装置, 特開 2011-111908
- 121) 青山幸俊, 長谷川亮, 山田智海, 村瀬淳一, 三好悠司: 内燃機関の失火検出システム, 特開 2014-234814
- 122) 青山幸俊, 山田智海, 三好悠司: 内燃機関の失火検出システム, 特開 2014-84840
- 123) 村瀬淳一, 林大介, 長谷川亮, 青山幸俊: 内燃機関の制御装置, 特開 2013-231372
- 124) T.Aono; E.Fukuchi: Misfire Detection Method Robust against Road Noise and Vehicle Body Jolting : Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology, 2444/2449 (2006)
- 125) 青野俊宏: 2つのフィルタの組合せによる失火と残響振動の識別, 平成 28 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集 TC16-12(2016)
- 126) 門松晃司: 前輪駆動車のエンジン振動防振に関する研究, 神奈川工科大学博士論文(2006)
- 127) T.Aono, R.Kusakabe, H.Sakamoto, T.Fukuda, M.Toyohara, O.Mukaihara: Decrease of Minimum Injection Fuel Mass on The Basis of The Micro-sec-level Production Error Detection, IFAC-PapersOnLine 51-31, 35/40(5th IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling) (2018)
- 128) J.Klaus: Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine, bei dem eine Groesse ermittelt wird, DE102010027806A(2010)