

基礎からわかる
自動車エンジンの
モデルベースト制御

金子 成彦
監修

山崎 由大
編著

大森 浩充・平田 光男・水本 郁朗
一柳 満久・松永 彰生・神田 智博
共著

コロナ社

監修のことば

監修者がチームリーダーを務めた、内閣府 SIP (Strategic Innovation Promotion Program) 「革新的燃焼技術」(2014~2018 年度) の制御チームでは、革新的燃焼技術を具現化するモデリングと制御の研究開発に取り組んできた。その中で、エンジンのリアルタイム制御とエンジンのシリンダ内挙動の数値可視化に役立てることを目指したモデルの構築やシミュレーションツールが生み出された。このたび、その活動成果をモデルの解説や利用方法を中心に、2冊の書籍の形にまとめることとした。

1冊目は、自動車用エンジンの新たな制御アーキテクチャーとして提案した「RAICA (雷神)」において、次世代ディーゼルエンジンの制御を物理によって表現したモデルを用いるモデルベース制御アルゴリズムに関する解説書で、2冊目は、ガソリンエンジンを対象に関連されたエンジンシミュレーションコードの「HINOCA (火神)」の解説書である。

RAICA が提唱する制御アルゴリズムは、厳しい排出ガス規制を満たしつつ、高効率を狙う新しい燃焼方式の実現には欠かせないロバストな制御を可能にする。これは、従来の制御 MAP に代わる、オンボード実装可能な計算負荷の軽い物理モデルに基づくアルゴリズムで、過渡状態を含む実走行にも適用できるリアルタイム制御を可能にしている。また、RAICA では、このモデルベースの制御アルゴリズムを基盤に、IoT や AI 技術と組み合わせることでドライバの特性までも考慮した制御への発展を描いている。

一方、HINOCA は、ガソリンエンジンのシリンダ内挙動の数値可視化のための統合シミュレーションソフトである。このソフトでは、吸排気バルブやピストンの移動境界に加え、吸気行程の乱流現象から液体燃料の噴射、分裂、蒸発、さらには混合気の燃焼・化学平衡、既燃ガスの膨張、燃焼過程における壁

面からの熱損失，さらには排気バルブからの排気という複雑な過程から，ノッキング，PM生成までを扱うことができる。

この2冊の書籍に共通する特徴は，実際にアルゴリズムやソフトの開発に従事された産学の多くの研究者によって執筆されたもので，実体験に基づいて書かれた類まれな書籍であるという点である。

本書が，自動車業界でエンジンの開発に携わっておられる方に限ることなく，広くエンジン技術者や内燃機関を学ぶ大学院の学生が，最前線のエンジン制御やエンジンCAEを学ぶ際の参考となることを大いに期待している。

2019年1月

金子 成彦

内閣府 SIP 革新的燃焼技術制御チームリーダー

ま え が き

自動車産業は大きな変革期を迎えている。演算速度の向上した GPU (graphics processing unit) などを活かした自動運転の導入、IoT (internet of things) による常時ネットワーク接続での新たなサービスの提供、とこれまでになかった新たなシステムの導入が始まろうとしている。このような状況のもと、パワートレインにも電動化の大きな波が来ており、これまでパワートレインとしてはもちろんのこと、自動車産業の中でも主要な装置、技術として大きな役割を果たしてきた内燃機関 (エンジン) の役割や立場も変わろうとしている。このパワートレインの電動化の潮流は、2015 年に米国で発覚したディーゼルエンジンの排出ガス規制に関するディフィートデバイスを用いた不正問題を機に拍車が掛かっている。

一方で、中国やインドなどでは経済的な発展が急速に進んでいるものの、先進国の自動車普及率 (0.6 台/人程度) にはまだ及んでいない。今後も経済発展に伴い先進国並みの自動車普及率に近づいていくことは間違いないと思われるが、その過程においては、現状安価なガソリンエンジンを搭載した自動車から普及しはじめる可能性が高い。また、IEA (International Energy Agency, 国際エネルギー機関) の自動車用パワートレインの将来シナリオにおいては、エンジンのみを搭載した自動車の割合は開発途上国の経済発展に伴い、いったん増加するが、その後は減少し、代わって日本国内では一般的となっているが、世界的に見ると現時点ではその導入割合が高くない HV (hybrid vehicle) や PHV (plug-in hybrid vehicle) などの割合が増え、2050 年で全体の 7 割近くになるとしている^{1)†}。パワートレインの電動化といわれる場合、いかにもモータとバッテリーのみとなる EV (electric vehicle) になるであろうと認識され

† 肩付き数字は巻末の引用・参考文献の番号を表す。

ている方も多と思うが、HV化することも電動化であり、使用形態は異なってもエンジンを搭載する自動車の割合は30年後においても大半を占めると考えられる。なお、EVの普及に関しては、電源構成がどのようになるかによって、二酸化炭素(CO₂)の排出量が大きく異なることもあり、自動車産業の動きのみでは決められないといった側面もある。いずれにしても、エンジン技術の継続的な向上による熱効率向上や排気の浄化は、少なくともこの先30年は重要な課題となることは間違いない。

ディーゼルゲートの報道で知ることになった方もいると思うが、自動車の排出ガス規制や燃費、および基準達成の評価は、シャシダイナモ(台上試験)上で、ある特定の速度パターンの評価走行モードを用いて行われる。評価走行モードの速度パターンは、路上の状況をできるかぎり評価できるように設計がされているものの、実際には路上の状況はさまざまであり、評価用の速度パターンも見直しはされているものの、カタログ燃費と実燃費には現在も乖離がある。このような背景のもと、欧州を中心に、実際の路上での走行を評価しようとする動きがあり、実路での性能向上が問われるようになってきている。路上での燃費や排出ガスの改善を行うには、エンジンのハードウェアの絶対的な性能(定常での性能)を向上させることも重要であるが、ソフトウェアや制御の果たす役割(過渡の性能向上)が大きくなる。

エンジン開発において、制御の果たす役割が多くなると同時に、その開発工数も多大なものとなっている。また、制御性能の向上だけでなく、現在の多くの実験の結果をもとに制御系を構築する仕組みでは、制御設計が開発の後半に集約されることになり、開発期間の制約のある状況下では前工程での遅れなども吸収する必要が生じることなどから、時間的に厳しい状況となることも多く、開発方法自体の開発も必要な状況となっている。実際の開発現場においては、エンジンの核となる燃焼開発(者)とそのポテンシャルをいかに発揮させるための制御開発(者)の間に、少なからずギャップがあるのも事実である(これは、筆者がもともとエンジン燃焼を専門としてきたところから、燃焼の知識を活かしつつエンジン制御をやらうと思いつき、これまで取り組んできた中で

の経験でもあり、このような経験をいろいろなところでお話した際に、共感いただいたことから間違いのないと思われる)。このギャップはいろいろな側面があるが、顕著なところでは、同じ言葉であってもその意味するところが同じではないことがある。例えば、「制御」という言葉が一つの例といえる。燃焼開発で「制御」というと、“何と何のアクチュエータを動かすか”ということを示していることが多く、いわゆる制御則といえるようなもので、ここでは時間的な概念は入っていない。一方で、制御開発で「制御」というと、“どのように動かすか”ということを示し、時間の概念（ダイナミクス）が入ってくる。また、興味の対象としても、燃焼開発では、そのメカニズムにあり、制御開発では、その入出力関係となる。このような異なる文化を背景とした両者のギャップを取り払い、密な連携のもとで開発を行っていくことが、今後、実際の路上でのエンジンやパワートレインの性能向上には必要となってくる。その両者を共通の言語として有機的に結ぶのは、数式および汎用のプログラム言語で記述されたモデルであると考えられる。自動車産業では、これまで試作と改良、すり合わせによる開発を行ってきた。近年では、開発期間の短期化、コストの低減などの要求が厳しくなり、モデルを用いた開発（モデルベース開発、model based development, MBD）が取り入れられるようになってきた。エンジンは、シリンダ内の燃焼現象が複雑なことからも、モデル構築の難しさはあるが、モデルを利用した設計、制御が進められていくことは間違いのないであろう。

このような背景のもと、2014年から始まった内閣府が主導する省庁横断型のプロジェクトであるSIP（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）²⁾の11個のテーマの一つとして、「革新的燃焼技術」³⁾が実施されている。この活動は、大きく分類して四つのチームで取り組んでおり、ガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンそれぞれの燃焼技術の向上や機械損失の低減を目標とする取組みに加え、実際の路上での性能向上を目指した制御システム開発が行われている。特に、SIPの中では、高効率で低公害な革新的燃焼技術の市場導入に向けて新たな制御システムの導入が必要となり、そのような視点によって、モデルに基づいた制御および制御システムの構築手法に関する研

究の取組みがなされてきた。制御技術は、各社の商品性を左右する競争的領域としての側面もあるが、今後の開発基盤となるモデルを利用した制御系の開発や制御手法は、共通基盤となるところである。

本書では、おもにこの SIP の制御チーム内の活動から得られた成果をもとに、モデルを活用した制御系を導入する際の基礎や基盤を学べるとともに、本書に従ってプログラムを行えば、モデルを活用した制御系の基本形が構築できるようになっている。また、構築した制御系を実際にエンジンに適用した事例も紹介している。具体的な燃焼や吸排気系の制御モデルの構築手法、各種制御理論の解説、およびそれらを利用した制御器の設計手法が解説されており、また、各章にはコラムを設けて、章の内容、背景などについてわかりやすく解説した。エンジン制御を取り扱った書籍そのものの数は少なく、本書のように、自動車用エンジンのモデルを用いた制御系の設計手法を体系的にまとめたものは皆無であり、大学院の学生には、エンジンのエッセンスを抽出したモデリング手法、制御理論とその利用価値、および方法の理解を促し、また、産業界においては、エンジニアや研究者の入門書として、今後のモデルを活用したエンジンの制御系設計の導入に役立ててもらいたいという思いのもとで、まとめたものである。

最後に、SIP での活動としてエンジン制御システムの構築を含め、本書を出版するにあたっては、東京大学の池村亮祐氏、酒向優太郎氏、高橋 幹氏、慶應義塾大学の幾竹優士氏、Jost Kurzrock 氏、江口 誠氏、福田直輝氏、宇都宮大学の石月創太氏、小泉 純氏、林 知史氏、旭 輝彦氏、熊本大学の恒松純平氏、藤井聖也氏、内田 智氏、上智大学の小島和樹氏、定地隼生氏、松井大樹氏といった多くの学生、およびコロナ社には多大なるご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

2019 年 1 月

山崎 由大

内閣府 SIP 革新的燃焼技術制御チーム制御グループ長

目 次

1. 序 論

1.1 自動車のエンジンシステム	1
1.2 従来のエンジンの制御と適合	5
1.3 走行モード, 燃料, 新燃焼と, 制御 MAP との関係性, およびその適合	7
1.4 モデルと制御系設計	13
コラム 1.1: 適合	15

2. 燃焼のモデリング

2.1 離散化モデル	18
2.2 吸 気 行 程	20
2.3 圧 縮 行 程	22
2.4 燃 料 噴 射	23
2.5 着 火 , 燃 焼	25
2.6 膨 張 行 程	33
2.7 排 気 行 程	33
2.8 圧縮ポリトロープ指数	36
2.8.1 シリンダ内ガス温度および圧力モデル	38
2.8.2 シリンダ内ガス組成および比熱比モデル	42
2.8.3 シリンダ内ガス流動モデル	45
2.8.4 冷却損失モデル	49
2.8.5 壁温度モデル	50
2.8.6 圧縮ポリトロープ指数モデル	53
コラム 2.1: ディーゼル燃焼	55

コラム 2.2：なぜ圧縮・膨張行程をポリトロープ変化で モデル化できるのか？	57
3. 吸排気システムのモデリング	
3.1 吸排気システムの構成	60
3.2 マニホールド要素	63
3.3 バルブ要素	66
3.4 シリンダ	68
3.5 ターボチャージャ	68
3.5.1 概要	68
3.5.2 タービンのモデリング	69
3.5.3 コンプレッサのモデリング	71
3.5.4 ターボチャージャ全体のモデル	72
3.5.5 タービンおよびコンプレッサマップを用いたより精緻なモデル	73
3.6 シミュレーション	80
コラム 3.1：吸排気システム	83

4. 制御器設計

4.1 制御理論	85
4.1.1 逆モデルによるフィードフォワード (FF) 制御	85
4.1.2 H_∞ 制御	86
4.1.3 出力フィードバックに基づく適応制御	98
4.1.4 深層学習	110
4.2 エンジン制御モデルへの制御理論の適用と制御器設計	116
4.2.1 逆モデル燃焼 FF 制御器	119
4.2.2 H_∞ 制御による燃焼制御	123
4.2.3 適応燃焼 FB 制御器	133
4.2.4 フィードバック誤差学習 (FEL) 制御と学習	146

4.3 吸排気制御システム	161
4.3.1 FF 制御器	161
4.3.2 FB 制御器	167
コラム 4.1：わかりやすい制御の話	178

5. 制御システム評価

5.1 実機評価システム	183
5.2 実機を用いた制御試験結果	186
5.2.1 評価運転パターン	186
5.2.2 燃焼 FF 制御	188
5.2.3 燃焼 FF 制御 + FB 制御	194
5.2.4 燃焼 FF 制御 + FB 制御 + 吸排気 FF 制御 + FB 制御	196
5.2.5 FB 燃焼誤差学習制御	198
5.3 モデルを用いた制御，制御系設計の有効性と今後の課題	200
引用・参考文献	203
索 引	209

執筆分担

金子 成彦(東京大学)	: 監修
山崎 由大(東京大学)	: 1章, 2.1~2.7節, 4.1.1項, 4.2.1項, 5章
大森 浩充(慶應義塾大学)	: 4.1.4項, 4.2.4項, コラム 4.1
平田 光男(宇都宮大学)	: 3章, 4.1.2項, 4.2.2項, 4.3節
水本 郁朗(熊本大学)	: 4.1.3項, 4.2.3項
一柳 満久(上智大学)	: 2.8節, コラム 2.2
松永 彰生(トヨタ自動車)	: コラム 1.1, コラム 3.1
神田 智博(本田技術研究所)	: コラム 2.1

(2018年12月現在)

1 | 序 論

1.1 自動車のエンジンシステム

1876年に Nikolaus August Otto (ドイツ) がガソリンエンジンの基礎となる熱力学サイクルであるオットーサイクルを確立し、1893年には Rudolf Christian Karl Diesel (ドイツ) がディーゼルエンジンの特許を取得して以来、1世紀以上にわたってガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンは自動車の主要な動力源としての役割を果たしてきた。

一般的な自動車用の往復動型のエンジン（動力の取り出し方として、ピストンの往復運動をクランク軸の回転運動に変換するピストンクランク機構を採用しているもの）は、つぎのような動作メカニズムとなっている。まず、吸気バルブを介して燃料と空気の子混合気あるいは空気をシリンダに導入し、ピストンによる圧縮を行う。ピストン圧縮によってシリンダ内のガスの温度、圧力が高くなったところで、火花点火（ガソリンエンジン）や燃料噴射（ディーゼルエンジン）を起点に着火、燃焼を生じさせる。この燃焼によって発生した熱を利用してシリンダ内のガスの圧力が上昇し、ピストンに対して仕事をを行い、その後、燃焼ガスは排気バルブから排出される。このような熱力学の基本サイクルに基づいたエンジンの動作機構（**図 1.1**）は、100年以上、なんら変わることなく最新のエンジンでも利用されている。

基本的な動作機構は変わらないものの、さまざまな要素技術が盛り込まれることで、排出ガス性能や熱効率は向上している。この性能の向上には各国とも

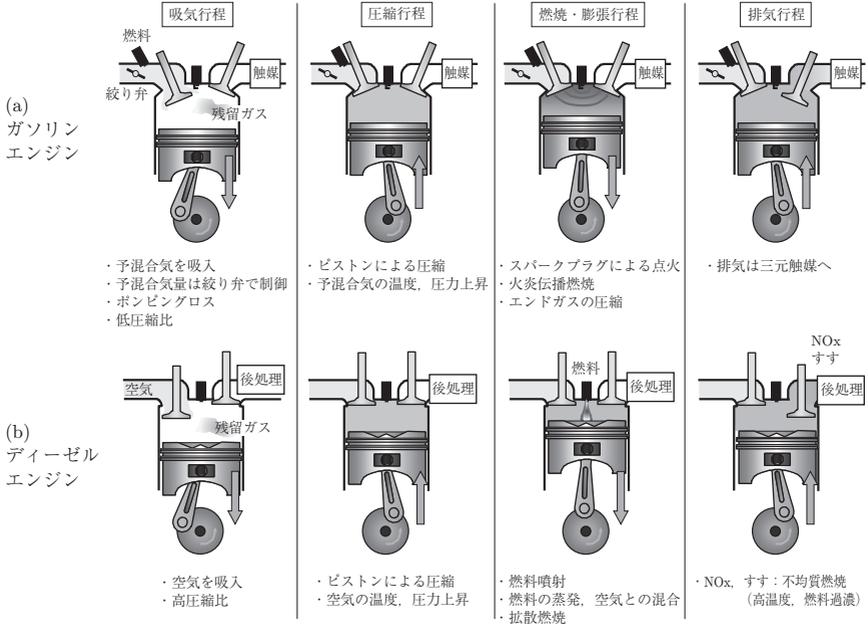


図 1.1 ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの動作機構および特徴

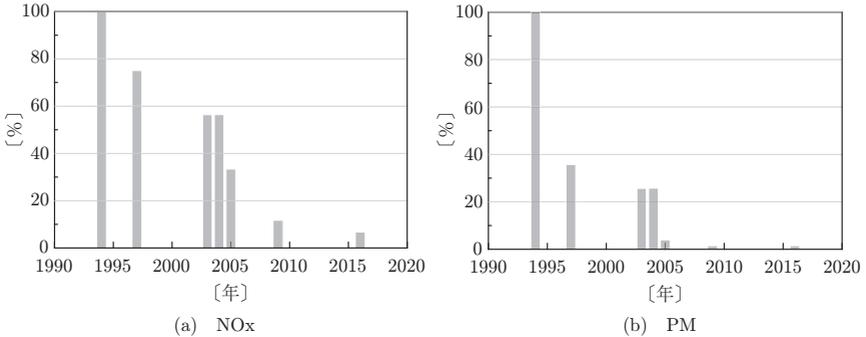


図 1.2 排出ガス規制の変遷 (1994 年基準, 例: 日本におけるディーゼル中量車)

年々厳しさを増す排出ガス規制の強化¹⁾ (図 1.2) や燃費基準の導入がおおいに関係している。

その例として、ガソリンエンジンエンジンでは、1970 年の米国での大気浄化法改正法 (通称、マスキー法) に準じた 1978 (昭和 53) 年排出ガス規制への対

応のため、未燃燃料（HC）、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NO_x）の同時低減を実現する三元触媒の導入が行われた。また、広域の回転数、負荷（トルク）条件での使用が前提となり、使用条件に応じて吸排気特性の最適化を行うために、1990年頃からは吸気バルブ、排気バルブの位相、およびリフトを可変とする機構の導入が行われはじめ、近年では比較的価格帯の低い軽自動車などにも採用される要素技術となっている。

ディーゼルエンジンにおいても、排出ガス規制は1970年代から年々厳しくなり、特に1990年代からはNO_xに加えてディーゼル燃焼に特徴的な粒子状物質（particulate matter, PM）の規制も行われるようになった。NO_xは一般的に燃焼室内の高温部分で生じやすい一方で、PM（おもな成分としてはすす）は比較的低温や、酸素が不足するような場で、燃料どうしが結合するような形で形成されるのがおもな生成機構であるが、温度が高い場所ではいったん生成されたとしても酸化され消滅することもある。このため、NO_xとPMには一般的にはトレードオフの関係があり、燃焼改善だけではその同時除去は容易ではなく、排気バルブから排出後の後処理装置の導入が必須となっている。後処理装置はディーゼルエンジンの燃焼とガソリンエンジンの燃焼が異なることから、おもにNO_xを還元するためのシステムとPMを除去するためのシステムが必要となり、ガソリンエンジンの三元触媒を利用するものより複雑で高コストとなっている。

また、容易ではないにしろディーゼルエンジンの燃焼改善も重要な課題として取り組まれており、要素技術として燃料噴射装置が大きく進化した。1990年代以前のディーゼルエンジンでは、クランク軸の回転と同期したポンプで圧送された燃料の圧力を利用して、機械的な機構で開閉する燃料噴射ノズルが用いられていた。1990年代後半からは、クランク軸の動力を利用して圧送した燃料をいったん圧力容器に溜め込み超高压としたものを、微粒化を促進するために小さくした噴孔を持ち、さらにソレノイドやピエゾ素子による電気的な開閉機構を有した噴射ノズルを利用して噴射することで、空気との混合をより促進できるようなコモンレールシステムが採用されるようになった。燃料の噴射圧は、初期のコモンレールシステムでは130 MPa程度であったが、近年では250 MPa

に到達している。

噴射装置以外にも、**EGR** (exhaust gas recirculation, 排気ガス再循環) システムの導入も行われてきた (図 1.3)。EGR は排出ガスを吸気に取り込み、再度シリンダに導入することで、排出ガス中に存在する比熱の高い成分である二酸化炭素 (CO_2) によって、燃焼時の温度を低下させ NO_x の低減を図るものである。さらに、排気の未利用熱エネルギーの有効利用による熱効率向上や燃焼場への空気の効率的な導入による排出ガス低減、ほかにもさまざまな効果を生むものとしてターボ過給機が広く使われている。特に、最新のディーゼルエンジン (図 1.3) では必須の装置となっており、ここでも運転条件に応じて空気を効率的にシリンダに導入できるように、タービン翼へ排出ガスを当てる角度を任意に調整できる機構を持った可変ジオメトリーターボ (variable geometry turbo, VGT) の採用も一般的となっている。EGR とターボ過給機が搭載されている場合、ターボによって過給圧が高くなると、排気時の圧力とのバランスで所望の EGR をシリンダに導入できない場合が生じてくる。これに対しては、通常のディーゼルエンジンにおいては必要とされない吸気の空気量を制限する

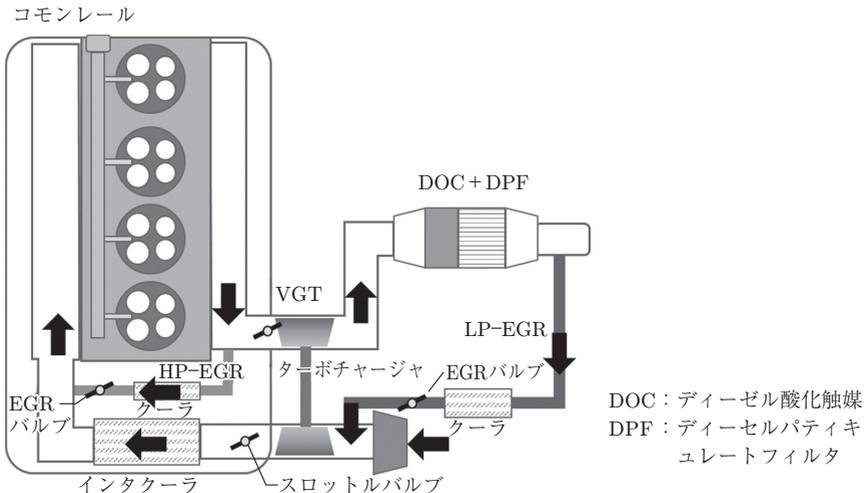


図 1.3 最新のエンジンシステム (例:ディーゼルエンジン)

スロットルバルブを搭載し、その制御によって適切な EGR を確保するなどの対応がとられている。また一方で、過給圧を増加させたい場合には、EGR を多くするとターボに供給されるエネルギーが低下し、所望の過給圧が得られなくなるといった課題も生じる。これに対しては既燃ガスを吸気に循環させる経路を、通常の排気バルブ直後とターボのタービン出口後の 2 か所に設け、高い過給圧が要求される場合にはタービンで仕事を行わせた後の排出ガスが EGR として利用される。前者は High pressure EGR (HP-EGR) と呼び、後者はタービンで仕事を行う分エンタルピーが下がる (圧力が下がる) ため Low pressure EGR (LP-EGR) と呼ばれている。両者は吸気までの経路長が変わってくるために、過渡での EGR としての応答が異なることになる。

このようにガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンともに基本的な動作原理は発明された当時とは変わらないが、おもに排出ガス規制への対応から、新たな技術を搭載した多くのデバイスが追加され、非常に複雑なシステムとなっていた。

1.2 従来のエンジンの制御と適合

先に述べたように、排出ガス規制や燃費基準を満たすためにエンジンシステムを構成するアクチュエータ数や機能が増えていった。また、エンジンの基本動作を担う部品についても、要求される精度は高くなっていった。例えば、ガソリンエンジンの場合は、以前はスロットルバルブの開閉に応じて変化するインテークマニホールドの圧力変化を利用して、投入される燃料量の調整を行うキャブレタを利用していた。排出ガス浄化のための三元触媒の効率的な動作のためには、燃料と空気の比率を量論混合比 (燃料と空気が過不足ない状態) でエンジンに供給することが要求されるが、キャブレタのような機械式のアクチュエータでは、十分な精度での燃料流量制御が行われず、電子制御式のインジェクタが用いられるようになっていった。また、ディーゼルエンジンにおいても、クランク軸に取り付けられた燃料ポンプで発生する圧力と、燃料噴射弁内のば

索引

【あ】	隠れ層	111	コンプレッサトルク	78	
圧縮行程	22	ガス流動	37	コンプレッサマップ	76
圧縮ポルトロープ指数	36	ガソリンエンジン	iii	【さ】	
後処理装置	3	活性化関数	111	サージライン	77
鞍点	115	壁温度	37	サージング	76
【い】	壁温度モデル	50	三元触媒	3	
一括学習	114	可変ジオメトリターボ	4	参照圧力	74
一酸化炭素 (CO)	3	可変ノズルターボ	69	参照温度	74
インタクーラ	60	可変容量ターボ	69	残留ガス	12
インタークマニホールド	60	加法的摂動	87	【し】	
		観測出力	94	軸方向流	46
		感度関数	91	シャシダイナモ	9
【う】	【き】			修正混合感度問題	97
ウェイストゲートバルブ	69	吸気行程	20	修正回転速度	75
【え】	吸気バルブ	3	修正流量	74	
エキゾーストマニホールド	60	吸排気システム	83	出力層	111
エポック学習	114	教師あり学習	110	順伝搬型ニューラル	
		教師なし学習	110	ネットワーク	110, 151
【お】	強正実性	99	小脳演算モデルコント		
重み	111	局所最適解	115	ローラ	151, 157
オンライン学習	114	【く】		乗法的摂動	87
		訓練学習	113	シリンダ	68
【か】	【こ】			新気	60
回帰	110	勾配降下法	113	深層学習	110
概強正実性	98	勾配損失問題	115	【す】	
外部入力	94	国際調和排出ガス・		スキッシュ流	46
外乱抑圧	90	燃費試験法	10	図示平均有効圧力	40
火炎伝播燃焼	11	誤差逆伝播法	112	スモールゲイン定理	88
過学習	115	コモンレールシステム	3	スロットル	60
過給圧	4, 68	混合感度問題	96	スロットル閉度	62
拡散燃焼	11	コンプレッサ	60, 68, 71	スワール流	47

【せ】		【て】	標準 H_{∞} 制御問題	95
正規化コンプレッサ流量	79	定圧比熱		
正規化線形関数	112	定積比熱	62	
正規化ヘッドパラメータ	79	ディーゼルエンジン	iii	
制御 MAP	6	ディーゼル燃焼	55	
制御帯域	90	ディープラーニング	110	
制御入力	94	適応 PFC	108	
制御量	94	適応出力フィードバック		
正実性	99	制御系設計	105, 108	
正則化	115			
摂動	87	【と】		
線形化逆モデル	121	等エントロピー過程	70	
線形化モデル	120	動径基底関数	112	
線形行列不等式	95			
【そ】		【に】		
双曲線正接関数	112	2 自由度適応出力フィード		
相補感度関数	90	バック制御系設計	107	
		入力層	111	
【た】		ニューラルネットワーク	110	
台上試験	9			
多層ニューラルネット		【ね】		
ワーク	110	熱発生率	32	
タービン	68, 69	燃焼	27	
タービン効率マップ	75	燃焼 FF 制御	188	
タービンコンプレッサ		燃料噴射	23	
シャフト	72, 78			
タービントルク	76, 78	【の】		
タービンブレード速度比	75	ノック予測	25	
タービンマップ	75	ノミナルモデル	87	
タービン流量マップ	75			
ターボ過給機	4	【は】		
ターボチャージャ	68	バイアス	111	
断熱過程	70	排気	33	
		排気バルブ	3	
【ち】		バイパス制御	184	
逐次勾配降下法	114	ハイプレッシャ EGR	61	
窒素酸化物 (NO _x)	3	バンド幅	90	
着火	25			
チョーキング	77	【ひ】		
チョークライン	77	ピストンクランク機構	1	
		非線形モデル予測制御	168	
		比熱比	37, 64	
		【ふ】		
		フィードバック誤差学習		114, 146
		フィードバック誤差学習		110
		フィードフォワード制御	107	
		不確かさ	87	
		プラトー	115	
		フルパス制御	183	
		プレスロトルマニ		
		ホールド	60	
		噴霧	23	
		噴霧流	47	
		分類	110	
		【へ】		
		平均値モデル	60	
		並列フィードフォワード		
		補償器	101	
		【ほ】		
		膨張	33	
		ポリトロープ変化	33, 57	
		【ま】		
		摩擦トルク	78	
		マスキー法	2	
		マッハ数	80	
		【み】		
		乱れ強さ	48	
		未燃燃料 (HC)	3	
		【も】		
		目標値追従	90	
		モデルベース開発	v	
		モデルベースト 2 自由度		
		燃焼制御	194	
		モデルベースト FF 制御器	190	
		モデルベースト制御	85	

【ら】	理想気体の状態方程式	62	冷却損失モデル	49
ラピッドプロトタイピング	粒子状物質	3	【ろ】	
183	量論混合比	5	ロジスティック関数	112
	臨界圧力	67	ロバスト安定化問題	88
	【れ】		ロバスト性	86
【り】	冷却効率	66	ロバスト制御	86
リカッチ代数方程式	冷却損失	37	ロープレッシャ EGR	61
離散化モデル				

【A】	【G】	【M】
AI	GPU	MATLAB
201	iii	87
ASPR	Gray box model	MBD
98	18	v
ASPR 条件		Model Based Calibration
100		12
	【H】	【N】
【C】	H_∞ 制御	NEDC
CFD	92	7
CMAC	H_∞ 制御問題	
151, 157	94	
	H_∞ 制御理論	
	87	
	H_∞ ノルム	
	92	
【D】	HCCI	【P】
DC モータ	11	PCCI
DoE	High pressure EGR	56, 168
16	5	PCCI 燃焼
	HINOCA	102
	HV	i
		PHV
		iii
		PM
		3
【E】	【I】	【R】
ECU	IMEP	RAICA
6, 151	40	i, 201
EGR	IoT	RDE
4, 60	iii, 201	11
EGR クーラ	IVC	
60	20	
EGR バルブ	IVO	
60	20	
EGR バルブ開度		
62		
EGR 率		
62		
EV		
iii		
	【J】	【U】
【F】	JC 08	US 6
FB 誤差学習	7	7
198		
FB 制御器		
178		
FFNN		
110, 151		
FF 制御		
85		
FF 制御器		
161, 178		
	【K】	【V】
	KYP-Lemma	VGT
	99	4, 60, 69
		VGT ベーン閉度
		62
		VNT
		69
	【L】	【W】
	Livengood-Wu 積分	WLTP
	25	10
	Low pressure EGR	
	5	

— 監修者・編著者略歴 —

金子 成彦 (かねこ しげひこ)	山崎 由大 (やまさき ゆうだい)
1976年 東京大学工学部機械工学科卒業	1997年 慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業
1978年 東京大学大学院工学系研究科修士課程 修了 (船用機械工学専攻)	1999年 慶應義塾大学大学院理工学研究科前期 博士課程修了 (機械工学専攻)
1981年 東京大学大学院工学系研究科博士課程 修了 (船用機械工学専攻) 工学博士	2003年 慶應義塾大学大学院理工学研究科後期 博士課程修了 (総合デザイン工学専攻) 博士 (工学)
1981年 東京大学講師	2003年 東京大学大学院産学官連携研究員
1982年 東京大学助教授	2004年 東京大学大学院助手
1985 ～86年 マギル大学 (カナダ) 客員助教授	2007年 東京大学大学院講師
2003年 東京大学大学院教授 現在に至る	2011 ミュンヘン工科大学 (ドイツ) 訪問研 究員 ～12年 2014年 東京大学大学院准教授 現在に至る

基礎からわかる 自動車エンジンのモデルベース制御

Model Based Control for Automotive Engines

© Kaneko, Yamasaki, Ohmori, Hirata, Mizumoto, Ichiyanagi, Matsunaga, Kanda
2019

2019年2月25日 初版第1刷発行



検印省略

監修者	金子成彦
編著者	山崎由大
著者	大森浩充
	平田光男
	水本郁朗
	一柳満久
	松永彰生
	神田智博
発行者	株式会社 コロナ社
	代表者 牛来真也
印刷所	三美印刷株式会社
製本所	有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04661-8 C3053 Printed in Japan

(中原)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構 (電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp) の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたしません。