

# 基礎からわかる 自動車エンジンの シミュレーション

金子 成彦

監修

草鹿 仁

編著

高林 徹・溝渕 泰寛・南部 太介

尾形 陽一・高木 正英・川内 智詞

小橋 好充・周 蓓霓・堀 司

神長 隆史・森井 雄飛・橋本 淳

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開発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

最近では、自動車を購入する際、カタログに記載された燃費の値で車種を決める消費者も多いであろう。電気自動車（battery electric vehicle, EV）も温暖化に対する一対策ではあるものの、現状の火力、水力、原子力、再生エネルギーの発電構成、および新興国を中心に市場が伸びていく事情を考慮すると、今後30年以上にわたり、エンジンの高効率化がCO<sub>2</sub>の排出を抑制する実効力の高い現実解の一つであることは間違いない。一方で、乗用車の後部ガラスに貼られた三つ星や四つ星マークのステッカ以外にユーザの目にとまることはあまりないが、ガソリン自動車からの排出ガスは1965年以前の未規制時と比べ総じて1/50～1/33程度まで削減されてきた。今後も、さまざまな国や地域の規制に適合するため、多くのエンジン機種に対してより一層のクリーン化を実施しなくてはならない。

幸いにして現在、わが国の乗用車産業は厳しい国際競争を勝ち抜き欧州の自動車メーカーと肩を並べている。しかしながら、つねに強化しつづければ、一瞬にして弱体化することはスポーツなどの真剣勝負の世界では常識である。このような中で、コンピュータを援用したシミュレーションによる設計支援は、試作に依存した開発に比べて、開発期間や開発費用を大幅に削減しうる可能性を秘めている。コンピュータ上では、図面を描けば加工、製造プロセスを経ずに、ただちにさまざまな形状の部品を創出でき、疲れを知らないコンピュータは、与えられたコマンドを休むことなく黙々と実行しつづけることができるからである。そして、人工知能が、人間が考えるよりも的確なコマンドを与える時代が目前に迫っている。

動力性能を向上させながら、環境およびエネルギー問題に対する社会的要請にも応えつづけてきたエンジンは非常に複雑化しており、要素部品の設計変更は、思わぬ形でさまざまなほかの部品へ波及する。もし、シミュレーションでバーチャルエンジンを作ることができれば、エンジンの開発工程の最終段階ま

で試作する必要はなくなるであろう。

本書は、エンジン本体の心臓部である熱エネルギー変換をつかさどる熱流体現象を対象としている。この中には、バルブやピストンの移動境界付近の作動ガスの挙動、乱流、液体燃料の物理過程・相変化、火花放電、混合気の化学反応といった複雑な現象が含まれ、熱力学、流体力学はもとより、物理化学、化学工学といった広範囲の知識と経験が必要となる。

吸気、圧縮、燃焼・膨張、排気の全行程に含まれる各種現象のモデリングについて記述された書籍としては、Gunnar Stiesch 教授の『Modeling Engine Spray and Combustion Processes』（Springer, 2003 年）が挙げられる。同書は広範囲な内容を比較的コンパクトに 1 冊の書籍にまとめられており、エンジンのシミュレーションに携わる研究者にはとても役立つ本となっている。その後に出版された Rolf Reitz 教授らによる『Modeling Diesel Combustion』（Springer, 2010 年）は、ディーゼルエンジンの噴霧燃焼のシミュレーションについてまとめており、同グループは、コンピュータを援用したエンジンの最適化について『Computational Optimization of Internal Combustion Engines』（Springer, 2011 年）として発刊されているが、すでに 8 年の歳月が経過している。

そこで本書では、自動車エンジンの研究、開発という視点に立ち、最新の内容を基礎から系統的にまとめ、エンジン内部の熱と流れのシミュレーションの全体像が理解できるように工夫した。エンジンモデリングに携わる者はもちろんのこと、熱流体、燃焼、化学反応のシミュレーションに取り組む大学院生、初級および中級の研究者、技術者の座右の書となれば幸いである。

最後に、本書を出版するにあたり、SIP の活動の中で貴重なご助言をいただいた、東京工業大学 店橋 護 教授、九州大学 安倍賢一 教授、大阪府立大学 須賀一彦 教授、名古屋工業大学 服部博文 氏、慶應義塾大学 深淵康二 教授、東京農工大学 岩本 薫 教授、日本大学 秋濱一弘 教授、徳島大学 名田 譲 准教授、東京工業大学 源 勇氣 助教には厚く御礼申し上げます。また、コロナ社には本書の構想段階から原稿執筆、印刷まで貴重なアドバイスと激励をいただき心より謝意を表する次第である。

2019 年 5 月

草 鹿 仁

内閣府 SIP 革新的燃焼技術制御チームサブリーダー

# 目 次

## 1. 概 要

1.1 高度化する自動車エンジン	1
1.1.1 排出ガス規制, 燃費規制の状況	1
1.1.2 パワートレインと今後の動向	4
1.1.3 本書の扱う分野と目的	4
1.2 複雑化するエンジンシステム全体の開発プロセス	6
1.2.1 自動車用エンジンの概要と燃焼技術	6
1.2.2 企業のエンジン開発における CFD の役割	9
1.2.3 1次元シミュレーション	12
1.2.4 3次元シミュレーション	16
1.2.5 ポート定常流計算	19
1.2.6 シリンダ内流動計算	26
1.2.7 燃料噴霧計算	32
1.2.8 燃 焼 計 算	42
1.2.9 計 算 時 間	45
1.2.10 本章のまとめ	47
コラム 1: 数学から機械工学に入って	47

## 2. 熱・流動のモデリング

2.1 概 要	49
2.2 理 論	50
2.2.1 圧縮性流体方程式	50
2.2.2 乱流モデル	53
2.2.3 境界埋込み法	58
2.2.4 壁近傍の熱・流動モデル	62
2.2.5 離散化手法	78
2.3 HINOCA による計算事例	84

2.3.1	定常ポート流	84
2.3.2	モータリング (流動)	87
2.3.3	モータリング (壁面熱流束)	89
コラム 2: エンジン燃焼ソフトウェア KIVA シリーズについて		90

### 3. 燃料噴霧のモデリング

3.1	概 要	92
3.2	理 論	93
3.2.1	離散液滴モデル	93
3.2.2	液 滴 の 運 動	97
3.2.3	燃料噴射初期条件 (噴孔出口モデル)	98
3.2.4	液滴分裂モデル	100
3.2.5	液滴衝突・合体モデル	105
3.2.6	液滴蒸発モデル	107
3.2.7	壁面衝突モデル	119
3.2.8	液膜流動モデル	128
3.2.9	液膜伝熱モデルおよび液膜蒸発モデル	129
3.3	HINOCA による計算事例	131
3.3.1	自 由 噴 霧	131
3.3.2	壁面衝突噴霧	143
コラム 3: ディーゼル噴霧モデル開発の思い出		147

### 4. 火花点火のモデリング

4.1	放 電 の 理 論	150
4.1.1	放電経路の開始	150
4.1.2	容量放電と誘導放電	151
4.1.3	放電経路の伸長	152
4.1.4	再 放 電	152
4.1.5	電 気 回 路	153
4.1.6	火 炎 核	154
4.1.7	最小点火エネルギー	154
4.2	各種点火モデル	154

4.2.1	点火エネルギー供給モデル	154
4.2.2	DPIK モデル	155
4.3	放電経路を考慮した点火モデル	156
4.3.1	モデル式	156
4.3.2	0次元計算による検証	161
4.3.3	HINOCA による点火モデルの計算事例	165
4.4	超希薄燃焼での火炎核成長モデル	169
4.4.1	モデル式	169
4.4.2	0次元モデルでの検証	171
	コラム 4：化学反応解析プログラム CHEMKIN について	173

## 5. 火炎伝播モデル

5.1	概要	175
5.2	理論	176
5.2.1	G 方程式モデル	176
5.2.2	層流燃焼速度モデル	184
5.2.3	乱流燃焼速度モデル	191
5.3	HINOCA による計算事例	202
5.4	ノックモデル	209
5.4.1	理論	210
	コラム 5：OpenFOAM によるエンジン燃焼計算	213

## 6. PM モデル

6.1	概要	215
6.2	理論	218
6.2.1	すす粒子計算の基礎方程式	218
6.2.2	モーメント法を用いた粒子計算	225
6.2.3	既存モデル	227
6.3	計算例	230
6.3.1	ガソリンサロゲート燃料を対象とした PM 生成モデルの最適化	230



6.3.2 HINOCA によるシリンダ内燃料液膜燃焼における PM 生成の数値計算 .....	235
---	-----

## 7. 今後のモデリングの展望

7.1 将来のシミュレーション像 .....	240
7.2 計算の高速化 .....	241
7.3 化学反応ソルバの大規模化, 高速化 .....	243
7.4 格子自動細分化 .....	246

引用・参考文献 .....	248
---------------	-----

索引 .....	268
----------	-----

### 執筆分担

金子 成彦 (早稲田大学)	: 監修
草鹿 仁 (早稲田大学)	: 1 章, 6 章, コラム 2.1, コラム 4.1
高林 徹 (本田技術研究所)	: 1 章, コラム 1.1
溝渕 泰寛 (宇宙航空研究開発機構)	: 2 章, 5 章, 7 章
南部 太介 (宇宙航空研究開発機構)	: 2 章, 5 章, 7 章
尾形 陽一 (広島大学)	: 2 章
高木 正英 (海上技術安全研究所)	: 3 章
川内 智詞 (海上技術安全研究所)	: 3 章
小橋 好充 (北海道大学)	: 3 章
周 蓓霓 (早稲田大学)	: 3 章, 5 章, コラム 2.1, コラム 4.1
堀 司 (大阪大学)	: 4 章, コラム 5.1
神長 隆史 (早稲田大学)	: 5 章
森井 雄飛 (東北大学)	: 5 章
橋本 淳 (大分大学)	: 6 章

(2019 年 6 月現在)

# 1 | 序 論

## 1.1 高度化する自動車エンジン

### 1.1.1 排出ガス規制，燃費規制の状況

エンジンは，ガソリンや軽油の持つ化学エネルギーを動力エネルギーに変換し，生物では発生することができない大きなトルクや出力を長時間にわたり出しつづけることが大きな魅力である。これによって，自動車は馬車では到達することができないような速度で何時間も休むこともなく走行することができる。このように人間の生活をより豊かなものにするエンジンのパワーは，複雑な形状を有するシリンダ内で，燃料と空気の混合気が燃焼することにより生み出される。一方で，シリンダ内は数 MPa に及ぶ圧力，1800℃を超えるような高温となるので，一酸化炭素（CO），窒素酸化物（NO<sub>x</sub>），および未燃燃料や未燃燃料の一部が熱分解をしたものが**未燃炭化水素**（unburned hydrocarbons, HC）として排出される。

CO は，生物にとって有害であることはもちろんであるが，NO<sub>x</sub> と HC が夏期のような気温の高い大気中で光化学反応を起こし，光化学スモッグに代表されるような局所的な大気汚染の一因となる。1970年代から自動車の台数増加に伴い，エンジンからの排出ガスが社会問題となったため，わが国では自動車の**排出ガス規制**（exhaust gas emission regulations）を定め，この排出ガス性能規制値を満たさない車両は新車として登録することができないこととした。

図 1.1 に，わが国におけるガソリンエンジンの排出ガス規制値の推移を示す。

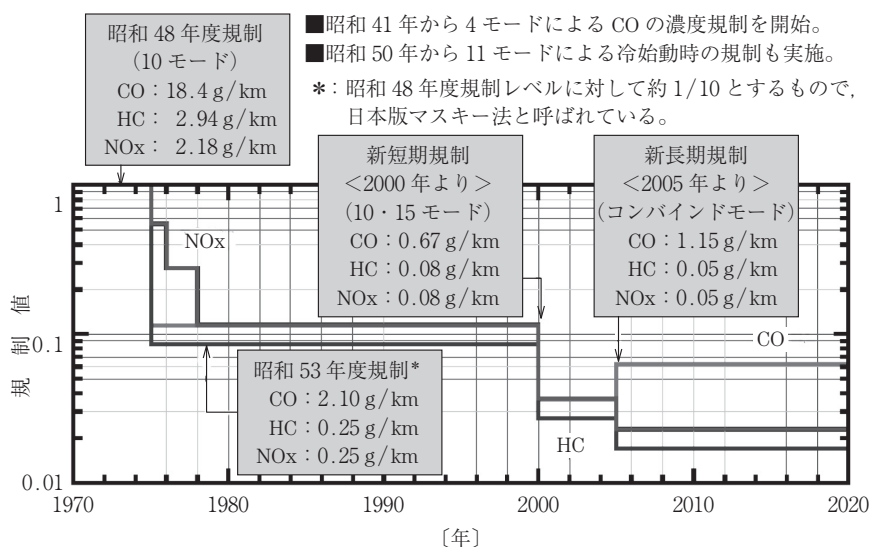
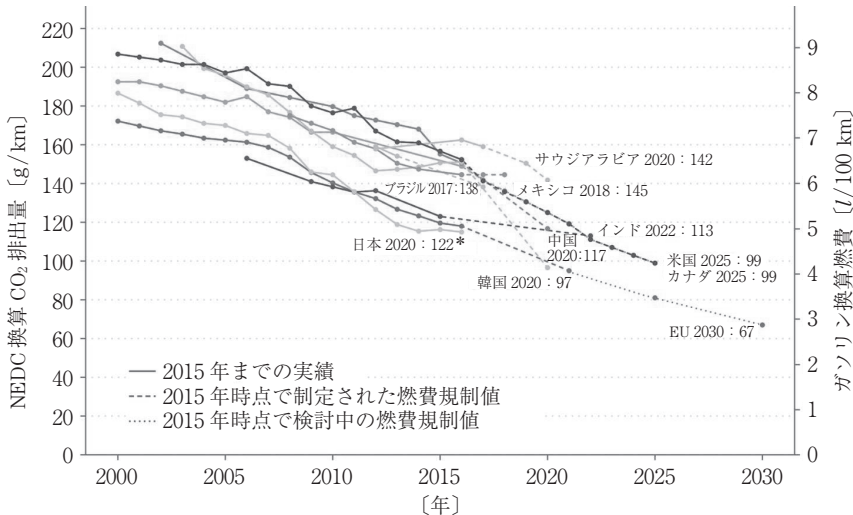


図 1.1 わが国におけるガソリンエンジンの排出ガス規制値の推移 (1973年のCO, HC, NOxの規制値を1としている)

1973（昭和48）年に施行された最初の規制値を1として、以降、CO（一酸化炭素）、HC（未燃炭化水素）、およびNOx（窒素酸化物）の排出ガス規制値の推移を示している。実際の排出ガス規制値は車両重量別に規制値が設定されているが、図は平均値で示している。段階的に規制が強化されるとともに、現代のエンジンは、NOxとHCは最初の規制値に対して1/50、COは1/33まで排出ガスが低減され、エンジンのクリーン化が図られている。

一般的には、エンジンからの排出ガスを抑制すると**燃料消費率**（specific fuel consumption）は悪化するが、昨今では運輸物流部門における温暖化対策としてエンジンの燃費向上が期待されていると同時に、人々の関心も集めている。2015年のCOP21パリ協定を受け、わが国は2013年度比で温暖化ガスを26%減、運輸部門においては2013年度の2億2500万トンに対して27.4%の削減を実行することを閣議決定するとともに、自動車の**燃費基準値**（fuel economy standard）を定め、企業平均で燃費基準を達成できない場合、ペナルティーを課すこととしている。世界各国における乗用車の燃費基準（平均値）



\*：わが国は2020年度基準を2013年に達成している。

図 1.2 世界各国の乗用車の燃費基準（平均値）の推移<sup>1)†</sup>

の推移を図 1.2 に示す。

図では、各国の試験走行モードが異なるので、**NEDC**（New European Driving Cycle, EUにおける走行試験モード）に換算し、この走行モード1 km 当りに排出されるCO<sub>2</sub>の重量で示している。また、右縦軸は100 km 走行する際に消費するエネルギーをガソリンの量に換算して示している。自動車の平均燃費はしだいに減少しており、2020年には、CO<sub>2</sub>の排出重量で韓国が97 g/km、中国が117 g/km、2022年にはインドが113 g/km、2025年に米国が99 g/km、2030年にEUが67 g/kmを目指して開発を進めている。

自動車用エンジンは、運輸物流の主要動力源であるばかりか、人々の生活を豊かにしていることは周知の事実であろう。その一方で、「排出ガス」および「燃費」の二律背反する性能を同時に解決するという社会的要請にも応えながら、つねに進化している。

† 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

### 1.1.2 パワートレインと今後の動向

以上、これまで電子制御燃料噴射インジェクタ (electric fuel injector), 三元触媒 (three way catalyst),  $O_2$  センサ (oxygen sensor) により排出ガスのクリーン化を達成してきたガソリンエンジンのつぎなる課題として、燃費向上が挙げられる。また、仕向地により試験モード、排出ガス規制、燃費規制値が異なることは1.1.1項で示したとおりである。現在、世界の人口は76億人程度であるが、2050年にはアフリカ、アジアの人口増加により100億人近くに達するといわれている。また、新興国を中心とした経済成長により自動車の販売台数は現在の年間約1億台から倍増することが見込まれている。現在、バッテリー (battery) のエネルギー密度向上と価格低減が大幅に見込めないことに加えると、今後はマイルドからフルまで程度の差はあるもののハイブリッドシステム (hybrid system) が主流になるものと予測している。この複雑なシステムのエネルギー変換をつかさどるエンジンについて、CAE (computer aided engineering, コンピュータを援用した開発) と実験を併用して、いろいろな国や地域に対し規制値、性能向上を同時に実施していくことが、わが国の基幹産業を支えていく観点からも必要である。

### 1.1.3 本書の扱う分野と目的

本書の対象は、1.1.2項で述べたように、動力性能と環境性能を両立させるため、高度な複雑なシステムに進化している自動車のパワートレインの心臓部であるガソリンエンジンである。そして、その中でも熱エネルギー変換をつかさどるエンジン内部の熱流体现象に焦点を当てている。高速で運動する吸排気バルブやピストンによる移動境界が存在する場での、気体の熱流動、気-固体の熱伝達、液体燃料の噴射、点火、燃焼、異常燃焼 (ガソリンノック)、さらには、**粒子状物質** (particulate matter, **PM**) の生成を取り扱っている。エンジンの作動流体の現象は、わずか1/100～1/25秒程度の極短時間の間に、常温から2000℃を超える温度、0.5気圧程度から100気圧程度まで変化する高温・高圧力場で、かつ、高速非定常現象である。学問分野としては乱流、熱伝

達，多成分液体の物性，分裂，蒸発，燃料の壁面との衝突や液膜の形成，点火，火炎伝播，相変化，化学反応，気-固相反応と，多岐にわたる知識と経験が求められる。

そこで，このような広範囲にわたる学術分野を包括する，いわば，機械工学における熱流体分野の学問の総合デパートメントストアともいえる，エンジンの熱エネルギー変換現象に取り組む初学者や中級者の「座右の書」となることが本書の目的である。

1章では背景と狙いを述べるとともに，現代の開発現場の最前線ではどのようにCAEが活用されているか，そして何が問題かを詳しく述べる。そして，2章以降では，実際のエンジンの作動流体に起きる現象の順序に沿って，モデル化の手法と支配方程式について述べる。

2章では，気体の流動現象に焦点を当て，移動境界，各種乱流モデル，化学反応，相変化を伴う熱流体モデル，さらには壁面近傍の熱，流れについて説明する。

3章では，多成分からなる液体燃料の噴射，分裂，壁面衝突や液膜の形成，さらには蒸発現象について解説する。

4章においては，電気回路モデルと火花点火，混合気の着火のモデル化手法について述べる。

5章では，点火後の火炎が高温，高圧の乱流場のシリンダ内をどのように伝播するか，さらには，未燃混合気が火炎伝播で燃焼する前に自己着火してしまう，いわゆるガソリンノックのモデル化手法について述べる。

6章では，排出ガスの中でもこれからますます重要になる粒子状物質（PM）の生成と酸化のモデルを取り扱う。

いずれの章も豊富な参考文献とともに，計算事例も数多く示した。本書では，圧縮性流体コードHINOCA（火神）を用いた計算事例を多く示したが，モデル化手法と理論の勘所を理解すれば，さまざまな計算コードに応用できるであろう。

7章では，エンジンシミュレーションの将来像を示すとともに，モデルの複

# 索引

<b>【あ】</b>	
圧縮性ナビエ・ストークス 方程式	50
アノード	157

<b>【い】</b>	
一次回路	157
一次コイル	153
一般化動力学方程式	217
陰解法	81

<b>【う】</b>	
ウェーバー数	101, 119
渦度テンソル	54
渦粘性近似	55
渦粘性係数	55

<b>【え】</b>	
液体熱容量	119
液体粘性係数	117
液体密度	117
液 滴	105
液滴衝突・合体モデル	105
液滴変形量	97
エンタルピー	52, 95
エンドガス	42

<b>【お】</b>	
オイラー型方程式	92
オイル希釈	32
オーネズルゲ数	101
温度拡散率	67

<b>【か】</b>	
解析的壁関数	72
解適合格子細分化法	246
火炎核	154
火炎構造ダイアグラム	176
火炎伝播	154, 175
火炎片理論	176, 178
火炎面	159
化学種バンドル法	246
拡散係数	53, 119
拡散速度	53
革新的燃焼技術	25
核生成	216
確率密度関数	93
下死点	12
カソード	157
合体・結合	217
壁関数	28, 63
壁座標	62
壁法則	63
可溶性有機成分	215
カルマン定数	63
完全ガンマ関数	100
貫通距離	34
感度解析	244
簡略化反応機構	155

<b>【き】</b>	
境界埋込み法	49, 59
境界層厚さ	65
凝 集	217

<b>【く】</b>	
曲率項	181
空間電位層	158
空間方向の離散化	78
クランク角度	12
グリッドスケール	192

<b>【け】</b>	
計算流体力学	49
ゲルトラー型解	99
減圧沸騰モデル	112
元素状炭素	215
顕 熱	96

<b>【こ】</b>	
硬直性	244
抗力係数	97
誤差関数	99
コルモゴロフスケール	50, 177
コレクタ	105
混合関数	58
混合気形成	92
コントロールボリューム	72

<b>【さ】</b>	
サイクル間変動	49
最小点火エネルギー	154
再初期化操作	181
再付着点	74
再放電	152
再放電電圧	152
ザウタ平均粒径	99

サーカムコロネン 219  
 サーカムサーカムコロネン 219  
 サーカムピレン 219  
 サブグリッドスケール 192  
 サロゲート燃料 185  
 酸化 217

【し】

時間積分法 81  
 磁気エネルギー 151  
 自己誘導 153  
 シース 158  
 実質微分 66  
 質量保存式 50  
 死点 12  
 シャーウッド数 109  
 縮流 112  
 シュミット数 110  
 蒸気圧 118  
 衝撃波 51  
 詳細反応簡略化 243  
 上死点 12, 72  
 状態方程式 51  
 蒸発潜熱 118  
 蒸発速度定数 137  
 蒸発噴霧 137  
 シリンダ内直接噴射 32  
 シリンダ内流動計算 26  
 シリンダライナ 36

【す】

数値実験 240  
 数値流束 79  
 数値流束制限関数 81  
 スキャットバンド 31  
 図示平均有効圧力 13  
 すす 32  
 すす体積分率 235  
 ストリーマ理論 151  
 スブラッシュ 122  
 スマゴリンスキー SGS モデル 195

スマゴリンスキー定数 54  
 スレッド並列 242  
 スワール比 19

【せ】

正極 157  
 成長過程 217  
 静電エネルギー 151  
 セクショナル法 217  
 絶縁体 150  
 接触面 51  
 ゼルドビッチ数 169  
 遷移状態理論 227  
 遷移層 63  
 全エネルギー 52  
 選択拡散効果 188  
 せん断層 51  
 潜熱 96

【そ】

総括反応 155  
 相互誘導 153  
 層流火炎厚さ 160  
 層流境界層 63  
 層流燃焼速度 154  
 層流燃焼速度モデル 184  
 速度ひずみテンソル 53

【た】

第1種ノイマン条件 66  
 第一種不完全ガンマ関数 100  
 対数正規分布関数 99  
 対数法則 63  
 対数領域 63  
 体積効率 7  
 多環化 216  
 多環芳香族炭化水素 216  
 多成分モデル 107  
 多段 Runge-Kutta 法 82  
 縦渦比 19  
 単成分モデル 107  
 タンブル比 19

【ち】

中心差分法 81  
 直接数値シミュレーション 62, 64, 175

【て】

定常ポート流解析 84  
 ディープラーニング 243  
 定容器 34  
 テイラー数 101  
 デュアルタイムステッピン  
 ング陰解法 81  
 電子制御燃料噴射イン  
 ジェクタ 4  
 電子なだれ 151  
 電離 151

【と】

等価回路 153  
 等間隔直交格子法 49  
 動的スマゴリンスキー  
 モデル 54

【な】

ナヴィエ・ストークス  
 方程式 27  
 長島の内外判定法 61  
 ナローバンド法 182

【に】

二次回路 157  
 二次コイル 153  
 ニュートンの運動方程式 97  
 ニュートン流体 52

【ぬ】

抜山-棚沢粒径分布関数  
 100  
 抜山点 120  
 ヌッセルト数 109



<b>【ね】</b>		プラズマ	150	モーメント法	217
熱伝達率	96	プラントル数	67, 110	モル質量	52
熱伝導	65	プラントルの渦粘性モデル		<b>【ゆ】</b>	
熱流束	65	フーリエの熱伝導の法則	65	有機炭素	215
粘性底層	63	プール燃焼	33	有効燃焼速度	170
燃費基準値	2	ブレークダウン	150	誘導起電力	153
燃料消費率	2	フロースタンド	19	誘導電圧	151
燃料噴射初期条件	98	プロセス並列	242	誘導放電	151
燃料噴霧	92	分子熱伝導係数	52	<b>【よ】</b>	
<b>【は】</b>		分子粘性係数	52	陽解法	81
排出ガス規制	1	噴霧形状	131	容量放電	151
排気再循環	7	噴霧先端到達距離	131	横渦比	19
ハーゲンポアズイユ流れ	62	分裂時間	102	よどみ点	74
パーセル	92	分裂長さ	102	<b>【ら】</b>	
パタネータ	34	<b>【へ】</b>		ラウールの法則	110
バッファ層	63	平均粒径	131	ラグランジュ型方程式	92
バルブリフト	84	壁面衝突モデル	121	ラプラス数	122
反応系路解析	244	壁面せん断応力	62	乱流エネルギー	8, 29, 55
<b>【ひ】</b>		壁面熱流束	69	乱流エネルギー生成項	55
非蒸発噴霧	131	壁面摩擦速度	62	乱流境界層	63
ピストン冠面	33	ヘッドガasket	41	乱流シュミット数	53
標準 $k-\epsilon$ モデル	55	<b>【ほ】</b>		乱流消散率	55
標準スマゴリンスキーモデル	53	ポアズイユ流れ	62	乱流層	63
表面成長速度	226	ポアソン分布	105	乱流ダムケラー数	194
表面張力	117	放電経路	150	乱流熱伝導係数	53
表面反応	217, 218	放電粒子	156	乱流燃焼速度モデル	192
ビレン	220	保存形	51	乱流粘性係数	53
ビン法	217	ポート内噴射	32	乱流プラントル数	53
<b>【ふ】</b>		ボルツマン定数	113	乱流壁面熱流束モデル	65
ファーブル平均	50	<b>【ま】</b>		<b>【り】</b>	
フィルムモデル	108	マークシュタイン数	188	離散液滴モデル	33, 92
負極	157	マークシュタイン長さ	188	理想混合気体	51
付着	122	<b>【み】</b>		粒径分布関数	100
物性推算法	116	密度汎関数理論	227	粒子状物質	4, 215
物体適合格子	49	未燃炭化水素	1	流動構造	50
普遍ガス定数	52	<b>【も】</b>		流量係数	86
フラクタル SGS 乱流燃焼速度モデル	192	モータリング解析	84	臨界圧力	116
				臨界ウェーバー数	122
				臨界温度	116

臨界衝突パラメータ 105  
 臨界直径 154  
 臨界容積 116

## 【る】

ルイス数 107, 169  
 ルイス数効果 188

## 【れ】

レイノルズ応力 53  
 レイノルズ数 62, 97  
 レイリー・プリセット式 114  
 レベルセット法 180

## 【ろ】

ロードバランス 46  
 ロードバランス平滑化 241  
 ロジン・ラムラー粒径分布 103

## 【A】

adaptive mesh refinement 246  
 adhesion 122  
 aggregation 217  
 AMR 246  
 analytical wall function 72  
 anode 157  
 AWF 72

## 【B】

BAMR 247  
 BDC 12  
 bin method 217  
 blending function 58  
 body fitted grid 49  
 Boltzmann constant 113  
 bottom dead center 12  
 boundary layer thickness 65  
 breakdown 150  
 breakup length 102  
 breakup time 102  
 broken reaction zones 178

## 【C】

CA 12  
 CAD 11  
 capacitive discharge 151  
 Cartesian grid 法 49  
 cathode 157  
 CCV 49  
 central difference method 81  
 CFD 49

CFM 176  
 CO 1  
 coagulation 217  
 collector 105  
 compressible Navier-Stokes equation 50  
 complete gamma function 100  
 computational fluid dynamics 49  
 computer aided design 11  
 conservation form 51  
 constant volume chamber 34  
 contact surface 51  
 control volume 72  
 corrugated flamelets 178  
 crank angle 12  
 critical diameter 154  
 critical impact parameter 105  
 critical pressure 116  
 critical temperature 116  
 critical volume 116  
 critical Weber number 122  
 Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program 25  
 cycle to cycle variation 49  
 cyclization 216  
 cylinder liner 36

## 【D】

DDM 34, 92  
 dead center 12

deep learning 243  
 density functional theory 227  
 DFT 227  
 DI 32  
 diffusion coefficient 53  
 diffusion velocity 53  
 direct injection 32  
 direct numerical simulation 62  
 directed relation graph 法 244  
 discharge coefficient 86  
 discrete droplet model 33  
 discrete particle ignition kernel 155  
 DNS 62, 64, 175  
 DPIK モデル 155  
 drag coefficient 97  
 DRG 法 244  
 droplet 105  
 droplet collision and coalescence model 105  
 droplet deformation 97  
 droplet distribution function 100  
 dual-time stepping implicit method 81  
 dynamic Smagorinsky model 54

## 【E】

EC 215  
 eddy viscosity coefficient 55

eddy viscosity 近似 55  
 effective flame velocity 170  
 EGR 7, 166  
 electric discharge channel 150  
 electric fuel injector 4  
 electron avalanche 151  
 electrostatic energy 151  
 elementary carbon 215  
 end gas 42  
 enthalpy 52  
 equation of state 51  
 equivalent circuit 153  
 ERENA 245  
 error function 99  
 estimation method of physical properties 116  
 Eulerian equations 92  
 EUにおける走行試験モード 3  
 evaporating spray 137  
 evaporation rate constant 137  
 exhaust gas emission regulations 1  
 exhaust gas recirculation 7  
 explicit method 81  
 extended robustness-enhanced numerical algorithm 245

**[F]**

flame front 159  
 flame kernel 154  
 flame propagation 154  
 flow stand 19  
 Farvre average 50  
 flow structure 50  
 fuel economy standard 2  
 fuel spray 92

**[G]**

GDE 217

general dynamic equation 217  
 Goertler 型解 99  
 GPU 243  
 grid scale 50  
 growth process 217  
 GS 50, 192  
 Gülder らの実験式 190  
 G 方程式モデル 176

**[H]**

HACA 機構 217, 222  
 HC 1  
 head gasket 41  
 heat flux 65  
 heat transfer coefficient 96  
 heat transfer number 109  
 HLLEW 法 79  
 hydrogen abstraction  $C_2H_2$  addition 217

**[I]**

IB 法 49, 59  
 ideal gas mixture 51  
 immersed boundary 法 49  
 implicit method 81  
 in-cylinder flow 計算 26  
 indicated mean effective pressure 13  
 induced electromotive force 153  
 induced voltage 151  
 inductive discharge 151  
 innovative combustion technology 25  
 insulator 150  
 ionization 151

**[K]**

$k$ - $\omega$  モデル 57  
 KH-RT モデル 100  
 Kolmogorov scale 50

**[L]**

Lagrangian equations 92  
 laminar boundary layer 63  
 laminar flame speed 154  
 laminar flame thickness 160  
 Laplace number 122  
 large eddy simulation 50  
 laser induced fluorescence 11  
 latent heat 96  
 law of the wall 63  
 Leidenfrost temperature 120  
 Leidenfrost 温度 120  
 LES 50  
 Lewis number 107  
 LIF 11  
 load balance 46  
 load balancing 241  
 log-law 63  
 log-normal distribution function 99  
 lower incomplete gamma function 100  
 LU-SGS 法 83

**[M]**

magnetic energy 151  
 mass conservation equation 50  
 mass transfer number 109  
 mean droplet diameter 131  
 Menter shear stress transport モデル 58  
 Menter SST モデル 58  
 message passage interface 242  
 Metghalchi-Keck の実験式 188  
 method of moments 217  
 MIE 154  
 MIE transition 154  
 MIE 遷移 154

minimum ignition energy		overall reaction	155	Raoult's law	110
	154	oxidation	217	Rayleigh-Plesset equation	
mixture formation	92				114
molar weight	52	<b>[P]</b>		reaction path analysis	244
molecular thermal		PAH	216	Realizable $k-\varepsilon$ モデル	56
conductivity coefficient	52	PAH condensation	217	reattachmentpoint	74
molecular viscosity coefficient	52	PAH 凝縮	217	reduced reaction mechanism	155
monotone upstream-centered		parcel	92	reduction of detailed	
scheme for conservation		particle image velocimetry	11	chemistry	243
laws 法	81	particle volume fraction	235	restrike	152
motoring 解析	84	particulate matter	4	restrike voltage	152
MPI	242	pataneta	34	Reynolds averaged Navier-	
MTS	245	penetration	34	Stokes	27
multi-time scale	245	PI	32	Reynolds number	62
MUSCL 法	81	piston crown	33	Reynolds stress	53
mutual induction	153	Pitsch モデル	192	RNG $k-\varepsilon$ モデル	56
		Pitzer acentric factor	116	Runge-Kutta 法	81
<b>[N]</b>		Pitzer の偏心因子	116		
Naber-Reitz の壁面衝突モデル		PIV	11	<b>[S]</b>	
	121	plasma	150	Sauter mean diameter	99
Navier-Stokes 方程式	27	PM	4, 215	scatter band	31
NEDC	3	Poisson distribution	105	Schmidt number	110
New European Driving Cycle		pool fire	33	secondary breakup	33
	3	port injection	32	secondary circuit	157
Newtonian equation of		Prandtl number	67	secondary coil	153
motion	97	PRF	229	sectional method	217
Newtonian fluid	52	primary breakup	33	self induction	153
non-evaporating spray	131	primary circuit	157	sensible heat	96
NOx	1	primary coil	153	sensitivity analysis	244
NS 方程式	27	primary reference fuel	229	SGS	192
nucleation	216	probability density function		SGS stress	53
Nukiyama temperature	120		93	SGS viscosity coefficient	53
numerical experiment	240	process parallel	242	SGS 応力	53
numerical flux	79	PVF	235	SGS 粘性係数	53
numerical flux limiter	81			SGS 乱流燃焼速度モデル	192
Nusselt number	109	<b>[Q]</b>		shear layer	51
		QSSA	245	sheath	158
<b>[O]</b>		quasi-steady-state		Sherwood number	109
OC	215	approximation	245	shock wave	51
Ohnesorge number	101			SIP	25
oil dilution	33	<b>[R]</b>		SLAU 法	78
organic carbon	215	RANS	27, 50		

Smagorinsky constant	54
SOF	215
soluble organic fraction	215
soot	32
spark particle	156
species bundling technique	246
specific fuel consumption	2
splash	122
spray shape	131
spray tip penetration	131
SST モデル	58
stagnationpoint	74
standard Smagorinsky model	53
steady port flow 解析	84
stereolithography データ	60
stiffness	244
STL データ	60
streamer theory	151
substantive derivative	66
surface growth rate	226
surface reaction	217
swirl ratio	19
<b>[T]</b>	
TAB モデル	98, 102
Taylor analogy breakup model	98
Taylor number	101
TDC	12, 72

thermal conduction	65
thermal diffusivity	67
thin reaction zones	178
thread parallel	242
time integration method	81
TKE	8
toluene reference fuel	227
top dead center	12
total energy	52
transition state theory	227
TRF	227
TST	227
turbulent viscosity coefficient	53
tumble ratio	19
turbulent boundary layer	64
turbulent dissipation rate	55
turbulent energy production term	55
turbulent kinetic energy	8
turbulent Prandtl number	53
turbulent Schmidt number	53
turbulent thermal conductivity coefficient	53
turbulent wall heat flux	65

**[U]**

unburned hydrocarbons	1
universal gas constant	52

**[V]**

valve lift	84
van Driest-style dumping function	54
van Driest 型の減衰関数	54
velocity strain tensor	53
vena contracta	112
volumetric efficiency	7
vorticity tensor	54

**[W]**

WALE model	54
WALE モデル	54
wall adapting local eddy-viscosity モデル	54
wall coordinate	62
wall friction velocity	62
wall function	28
wall heat flux	69
wall shear stress	62
Weber number	101
wrinkled flamelets	178

**[Z]**

Zel' dovich number	169
--------------------	-----

**[数字]**

1次分裂	33
2次分裂	33

—— 監修者・編著者略歴 ——

**金子 成彦**（かねこ しげひこ）

- 1976年 東京大学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）
- 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
- 1981年 東京大学講師
- 1982年 東京大学助教授
- 1985  
～86年 マギル大学（カナダ）客員助教授
- 2003年 東京大学大学院教授
- 2019年 東京大学名誉教授
- 2019年 早稲田大学教授  
現在に至る

**草鹿 仁**（くさか じん）

- 1991年 早稲田大学理工学部機械工学科卒業
- 1993年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了（機械工学専攻）
- 1995年 早稲田大学助手
- 1997年 早稲田大学大学院理工学研究科後期博士課程修了（機械工学専攻）
- 1999年 早稲田大学専任講師
- 2001年 早稲田大学助教授
- 2005  
～06年 チャルマーズ工科大学（スウェーデン）訪問研究員
- 2008年 早稲田大学教授  
現在に至る

# 基礎からわかる 自動車エンジンのシミュレーション

Simulation for Automotive Engines

© Kaneko, Kusaka, Takabayashi, Mizobuchi, Nambu, Ogata, Takagi,  
Kawauchi, Kobashi, Zhou, Hori, Kaminaga, Morii, Hashimoto 2019

2019年7月17日 初版第1刷発行

★

検印省略

監修者	金子成彦
編著者	草鹿仁
著者	高林徹
	溝部 泰寛
	南形 介一
	尾高 正英
	川内 智詞
	小橋 充寛
	周堀 司
	神長 隆史
	森井 飛雄
	橋本 淳
発行者	株式会社 コロナ社
	代表者 牛来真也
印刷所	新日本印刷株式会社
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 978-4-339-04660-1 C3053 Printed in Japan

(柏原)



**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す。





