

# 改訂 実習で学ぶ モデルベース開発

— 『モデル』を共通言語とするV字開発プロセス —

山 本 透 編著  
脇 谷 伸  
原 田 靖 裕  
香 川 直 己 共著  
足 立 智 彦  
沖 俊 任  
原 田 真 悟

コ ロ ナ 社

●編著者・執筆者一覧●

○編著者

やまもと とおる  
山本 透 (広島大学)

○執筆者

わきの しん  
脇谷 伸 (広島大学)

ほらだ やすひろ  
原田 靖裕 (元マツダ株式会社)

かがわ なおき  
香川 直己 (福山大学)

あだち ともひこ  
足立 智彦 (マツダ株式会社)

おき としたか  
沖 俊任 (福山大学)

ほらだ しんご  
原田 真悟 (マツダ株式会社)

(2023年1月現在)

## 発刊によせて（初版時）

世間一般にモデルベース開発というと、制御開発のために使う「制御対象モデル」と「制御モデル」を使った設計検証手法を指すことになっている。しかし筆者らは、3D形状データを用いたCAEモデルを含め、0次元や1次元の制御対象モデルも、制御モデルも…これらシミュレーションを用いた机上開発全般をモデルベース開発と呼びたいと、新しいモデルベースの定義を提唱してきた。究極の開発の姿から思い描くと、逆にこれらを区別して話すことは意味がなくなり、連続してつながる一つの技術やプロセスになるはずと考えるからである。本書では、この新しい定義でモデルベース開発という言葉を使っている。すなわち、開発対象のバラバラな数式としてモデル化できるレベルまで解明し、そのモデルを使って最適開発する技術の全般を、「モデルベース開発」と定義している。

モデルベース開発というと、開発の効率化をイメージされる方々が多い。あるいは、開発の補助的な解析のようなものとイメージされる方々も多い。しかし、本書で伝えたいのは、その意味をはるかに超えて、これなしには開発が成立しない、使いこなせないと産業が衰退する、というくらいに切迫した産業革命の荒波が押し寄せているということである。本書はモデルベースに関わる方々への入門書ではあるが、その目的にとどまらず、ものづくりに携わっている多くの方々にぜひ一読いただき、これからの激動の時代の波を予知し、それに備える一助としていただきたい。

ここで、本書の1章において述べているが、開発エピソードの一部から、その予告編としてエッセンスだけを以下に紹介する。

### 【事例1：世界一の燃焼は、モデルベースを駆使したからこそ実現できた】

当時、燃焼モデルは使い物にならず、どの企業も参考程度にしか利用していなかったのが実態であるが、資源が少ない会社であるからこそ、ここに真っ向勝負してモデル精度を上げてきた。ついには、モデルによる転写設計までが可能なレベルにまで精度が高まった。このモデルなしには世界一の燃焼は実現できなかった、といわれるほどの成果となった。このエピソードから、世界一の最適設計を世界で最初に成し遂げる価値こそが、モデルベース開発のやるべき役割の究極の姿であると、筆者らは伝えたい。

### 【事例2：自動車の制御系開発は、すでにモデルベース開発なしに成立しない】

自動車の制御システムの規模は10年で10倍ずつの指数的スピードで増大しており、すでに実機ベース開発で可能な臨界点を超えている。本書の中で取り上げているが、モデルベー

スなしには3か月かかる技術開発が1日で可能な事例などは、その好例であろう。また、図面を出す前の仕様検証は、もはや人間では不可能なレベルの仕様書のページ数（きっと印刷すれば数万ページ）であり、モデルを使っていくらかでも机上検証できる環境を備えなければ不可能な時代に突入している。そうやって仕様書の品質を高めたあとも、最終品質を高めるためのさらに膨大なキャリブレーション業務や総合車両評価業務が待ち構えており、まさに想像を超えたレベルでの激しい業務があたりまえとなっている。

### 【事例3：孤立孤高のロータリーエンジンの開発からモデルベース開発は始まった】

1987年、もう30年も前、資源面で余力がなかったロータリーエンジン開発の中でモデルベース開発は始まった。筆者らが知る限り、自動車業界としては世界でも最も早い時期であったと思う。当時、ロータリーの制御は他のエンジンの3倍のプログラムサイズであり、アルゴリズムは破格の複雑さをもつ規模であった。当時は、言語もツールもプラントモデルもすべて自前開発であった。50種ほどの関数の組合せだけで、自由にエンジン制御を設計検証開発できる環境を構築した。当時としては高度なアクティブ制御を、開発着手からキャリブレーションの終了まで、半年かかるのがあたりまえのところを、1週間でやりきったことで関係者を驚かせた。

以上述べたいずれの事例にも共通点がある。世界中でだれも助けてくれない、普通のやり方では生き残れない、自分たちで革新しなければ滅亡する、という危機感の中からモデルベース開発による革新は生まれてきた。世界中の他の成功事例をひもといても、複雑で高度な開発であればあるほど、モデルベース開発はその威力を発揮してきたといえるであろう。例えば、月面着陸したアポロプロジェクトが有名であるが、文字どおり彼らは、一度も月での実機検証をすることなく、その偉業を達成させたのである。モデルベース開発の発展の歴史は、宇宙航空分野から始まり、自動車分野に広がってきた。そして現在では、さらに多くの工業分野に展開されつつある。いずれも、複雑な開発の解決策として広がってきた。

本書は、広島大学の山本透教授に編集者となっていただき、新しい定義でのモデルベース開発の入門書としてまとめたものである。本書が、将来のさらに高度で複雑な開発に挑戦されるであろう方々の一助となればありがたい。

2018年3月

マツダ株式会社  
統合制御システム開発本部長  
原田 靖裕

## ま え が き

製品に対する顧客のニーズは、年々、多様化・複雑化しており、企業はこれらの要求に迅速に応えなければならない現状にある。しかしながら、自動車などの複雑なシステムでは、最適なコンポーネントの組合せや、その調整パラメータが無数に存在し、実物を用いた設計や調整を行うには膨大な時間と費用が必要となっている。その一方で、国際的な開発競争の激化から、製造にかかるコストや時間をできる限り抑制しなければならない制約が課せられている。ところで、コンピュータ技術の急速な発展により、最近では複雑なシステムをコンピュータ上で実現し、机上でシステムの設計・検証を行うモデルベース開発 (Model Based Development: MBD) の重要性が唱えられ、産業界では急速にその適用が進められている。

このような背景において、国内では JMAAB (Japan MBD Automotive Advisory Board) が創設され、MBD に関わる技術者のスキル基準の策定など、MBD の普及振興に精力的に取り組まれている。また、広島県においても、『ひろしま自動車産学官連携推進会議 (「ひろ自連」と略称)』が 2015 年 6 月 11 日に創設され、「2030 年産学官連携ビジョン」を掲げて活動を行っている。上記目標の達成にあたり、ひろ自連では、三つの委員会と四つの専門部会を設置し、相互連携を進めながら活動を行っている。専門部会の一つであるモデルベース開発専門部会では、先に述べたモデルベース開発力の基盤強化を目的として、マツダ株式会社と広島大学が中心となり、2016 年に「MBD (モデルベース開発) 基礎講座」が広島大学に設置された。この「MBD 基礎講座」は、自動車産業を中心とした地域企業に対して、実践的な教育とエンジニアの育成の役割を担っている。また、2017 年に「ひろしまデジタルイノベーションセンター (HDIC)」が創設され、自動車産業以外も含めた県内企業技術者に対する MBD 研修などのサービスを通して、MBD の県内外企業への浸透に努められている。さらに、2021 年 7 月には MBD 推進センター (JAMBE) が設立されるなど、MBD の普及・振興の気運が、自動車産業に留まらず、さまざまな産業分野へ拡がりが高まりを見せるに至っている。

そのような背景に鑑み、上述の「MBD 基礎講座」が中心として進める MBD 基礎研修における入門書として、2018 年 6 月に本書「実習で学ぶモデルベース開発」(初版)を発行した。以来、多くの方々に手にしていただいているところであるが、本書の中で扱っているソフトウェア (MATLAB & Simulink) もこの間バージョンアップを重ね、本書も新しいバージョンに即した形に書き改める必要が生じてきたことから、この機会に内容を再考させていただいた。これまで同様、実習を中心として MBD を体験的に学習することができるという特徴を維持した形で 7 章構成とし、それぞれを以下のように分担して執筆していただいた。

- |                     |               |
|---------------------|---------------|
| 1章 原田靖裕, 足立智彦, 香川直己 | 2章 脇谷 伸, 沖 俊任 |
| 3章 脇谷 伸, 山本 透       | 4章 脇谷 伸       |
| 5章 脇谷 伸             | 6章 原田真悟, 足立智彦 |
| 7章 山本 透, 脇谷 伸       |               |

本書は、おもに1章～3章の準備にあたる部分と、MBDの醍醐味となる4章～6章から構成され、さらに新しく7章ではMBDの今後について概観している。

1章では、「MBDとは何か？」について、MBDによる開発エピソードを交えながら、わかりやすくまとめている。2章では、モデリング、シミュレーション、検証などモデルベース開発に必要な不可欠となる開発ツールの操作方法を中心に解説している。3章では、「モデルとは何か？」に始まり、微分方程式による物理モデリングについて、上述の開発ツールを用いた実習を通して詳述している。

4章では、「DCモータの制御システム」を題材として、MILS (Model-In-the-Loop Simulation) の手順をわかりやすくまとめている。これに連続する形で、5章において、HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) について解説している。HILSの学習にはHILシミュレータが必要とされているが、高価な機器であるため、なかなかそろえられない。このことがMBDの教育・研修が広く普及しにくい一因となっている。この問題に鑑み、筆者らは「学習用簡易HILシミュレータ」を開発し、これを用いた実習に基づいてHILSを説明している。なお、HILSで利用する「学習用簡易HILシミュレータ」と「DCモータの制御システム」については、下記サイト<sup>†</sup>を参照されたい。また、同サイトでは各章で作成したプログラムの解答例も掲載しているので併せて参照されたい。6章では、モデルと実システムをつなぐキャリブレーションとしてMBC (Model-Based Calibration) の概略を紹介している。

7章では、「モデル」と「データ」のインタプレイ (相互作用) に基づく新しいデジタルものづくり開発プラットフォームの必要性を述べるとともに、その開発プラットフォームの一例として、編者らが広島大学デジタルものづくり教育研究センター「データ駆動型スマートシステムプロジェクト」において考察を重ねてきた「スマートMBD」を紹介している。

最後に、文章校正等には広島大学助教の木下拓矢氏をはじめ、広島大学システム制御論研究室の学生にご協力いただいた。さらに、マツダ株式会社の森重智年氏、MBD推進センターの村岡正氏、ひろしまデジタルイノベーションセンターの安藤誠一氏、久保田寛氏、広島大学デジタルものづくり教育研究センターの前垣直美氏、小林精機製作所の小林隆氏、ならびに一般社団法人デジケーションの山城友栄氏、中下範里子氏には、本書の基盤となっているMBD研修の円滑な実施・運営にご助力いただいた。また、出版に際してコロナ社の関係各位にはご尽力賜った。ここに記して謝意を表するとともに、本書が、MBDのさらなる普及・振興に繋がることを切に願っている。

2023年1月

山本 透

<sup>†</sup> <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339046830/>

# 目 次

## 1. モデルベース開発 (MBD)

1.1 自動車業界における MBD	1
1.1.1 高度な開発を支える MBD	1
1.1.2 過去の MBD の総括	6
1.1.3 MBD によるあらゆる産業の開発変革への取組み	7
1.1.4 将来の MBD	9
1.2 大学における MBD の教育	10
1.2.1 モデルを使ったものづくり	12
1.2.2 これからの工学教育	13

## 2. MATLAB/Simulink によるモデル構築

2.1 MATLAB/Simulink の準備	15
2.2 まずは動かしてみよう	16
2.2.1 フォルダの作成	16
2.2.2 Simulink の起動	16
2.2.3 ブロックの配置・結合とシミュレーション	18
2.2.4 Scope ブロックの入力数を増やそう	20
2.2.5 m ファイルと連携しよう	21
2.2.6 MATLAB/Simulink の実行の流れ	24
2.3 こんなときは?—MATLAB/Simulink の機能を理解しよう—	26
2.3.1 予約語 (MATLAB)	26
2.3.2 Scope 画面のスタイル設定の変更 (Simulink)	27
2.3.3 Scope 画面のコンフィギュレーションプロパティの変更 (Simulink)	28
2.3.4 可変・固定ステップサイズを選択 (Simulink)	28
2.4 Stateflow の基礎	30

2.4.1 Stateflow .....	30
2.4.2 チャートの読み方 .....	31
2.4.3 チャートの動作実験 .....	32
章 末 問 題 .....	37

### 3. 物理モデリングと解析の基礎

3.1 モデリングの基礎 .....	38
3.1.1 モデルとモデル化誤差 .....	38
3.1.2 ホワイトボックスモデリングとブラックボックスモデリング .....	39
3.1.3 動的モデルと静的モデル .....	40
3.2 微分方程式と数値積分 .....	41
3.2.1 微分と積分 .....	41
3.2.2 システムモデリングと微分・積分操作の関係 .....	43
3.3 物理モデリングに挑戦 .....	44
3.3.1 液位プロセスモデル (タンクシステム) .....	45
3.3.2 RLC 回路モデル (電気システム) .....	51
3.4 システムの平衡状態を考慮したモデリング .....	56
3.4.1 マス・バネ・ダンパモデル .....	56
3.4.2 熱収支モデル .....	63
3.5 ラプラス変換と伝達関数 .....	67
3.5.1 ラプラス変換の定義 .....	67
3.5.2 一次遅れ系 .....	69
3.5.3 伝達関数とステップ応答の関係 .....	71
3.5.4 二次遅れ系 .....	73
3.5.5 $n$ 次遅れ+微分系 .....	74
3.6 より高度なモデリングのために .....	75
3.6.1 アナロジーによるシステムの理解 .....	75
3.6.2 非線形モデリングと線形化 .....	76
章 末 問 題 .....	80



## 4. MILS

4.1 V字開発プロセス	83
4.2 DC モータ制御システムを用いた MILS の実習	86
4.2.1 DC モータ制御システム	86
4.2.2 要件定義	86
4.2.3 DC モータ制御システムの機能とブロック線図	87
4.2.4 設計の手順	88
4.3 DC モータ・ディスクモデルの要素設計 (プラントモデル)	89
4.3.1 DC モータ・ディスクモデル	89
4.3.2 センサモデル (タコジェネレータ)	92
4.3.3 モータドライバモデルと電流センサ	96
4.3.4 プラントモデル結合テスト	99
4.4 DC モータ・ディスクモデルの要素設計 (コントローラモデル)	100
4.4.1 A-D 変換器	100
4.4.2 パルス発生器	103
4.4.3 アルゴリズムの設計 1	106
4.4.4 コントローラモデル結合テスト	110
4.4.5 プラントモデルとコントローラモデルの結合テスト	112
4.4.6 アルゴリズムの設計 2 (PID 制御)	116
章 末 問 題	118

## 5. HILS

5.1 HILS と HIL シミュレータ	119
5.1.1 HILS の目的	119
5.1.2 HIL シミュレータの要件	121
5.2 簡易 HIL シミュレータの構築	122
5.3 コントローラモデルの実装	126
5.4 HILS による動作テストと制御実験	129
5.4.1 HILS による ECU の動作テスト	129

5.4.2 制御システムの製作と実験結果	132
章末問題	133

## 6. MBC

6.1 MBCのプロセス	135
6.1.1 領域探索	135
6.1.2 実験計画法 (DOE)	136
6.1.3 データ採取	137
6.1.4 モデル化	137
6.1.5 最適化	138
6.2 今後の課題	140

## 7. モデルとデータのインタプレイによるスマートMBD

7.1 モデルとデータを相互に利用する必要性	141
7.2 スマートMBD	143

## 付録：Arduino を用いた HILS 環境構築

A.1 Arduino	145
A.2 簡易 HIL シミュレータ用シールド	146
A.3 インタフェースの仕様決定	147

引用・参考文献	149
---------	-----

章末問題解答	151
--------	-----

索引	160
----	-----

# 1

## モデルベース開発 (MBD)

本書の読者には、まだモデルベース開発 (Model Based Development : MBD) の実践経験がない方々もおられると想定される。本章では、なぜモデルベース開発が必要なのか？ どのような意義があるのか？ どのような実践をしているのか？ まずはこれらを事例に基づいて紹介する。なお、わかりやすく具体的に伝えるために、自動車業界における筆者らの業務経験にかたよった紹介にならざるを得ないことを容赦されたい。

### 1.1 自動車業界における MBD

#### 1.1.1 高度な開発を支える MBD

まず、MBD が必要とされた背景から説明しよう。当時 (2006 年頃)、筆者が所属する会社では、世界一の燃焼効率のエンジン開発に挑戦していた。新世代商品開発の目標は、過去に例がないくらい高いものであった。なにしろ、ハイブリッド電気自動車 (Hybrid Electric Vehicle : HEV) でもない、電気自動車 (Electric Vehicle : EV) でもないのに、当時の HEV に並ぶくらいの燃費を出すような目標であった。開発人員もきわめて少なかった。従来のやり方では、到底開発は成功できそうになかったという背景を理解されたい。

〔1〕 エンジン燃焼開発での実例 このプロジェクトで燃費を大きく改善した要因で最大のものは、何とんでもエンジン燃焼の革新であった。当時、燃焼効率は良いエンジンでも 30% 程度であり、70% は損失するというのが相場であった (図 1.1)。まず、究極の燃焼を機能強化から構想し、3-STEP で理想に到達する道を描いて進めることにした。電気部品の効率がすでに 90% を超えていることに比べると、エンジンはまだまだ大きな改善の余地があり、宝の山である。理論的にはエンジンの圧縮比 (吸い込んだ気体を何倍の密度に圧縮してから燃焼させるかの比率) を上げれば上げるほど、燃焼効率が改善することは知られているが、異常燃焼という悪魔の現象を伴うことから、これまでだれもこれを克服できなかった。

このエンジンが産声を上げたときのエピソードを披露したい。あるチーフエンジニアが圧縮比 15 のエンジンを回してみることを構想した。圧縮比 12 が困難なときに 15 は正気の沙汰ではない。当時の担当者たちは、「ものになるわけがない」「ご乱心か？」と陰で揶揄した。しかし、回した結果は、予想外にトルクが落ちなかった。担当者は「実験ミスだと思ひ何度も

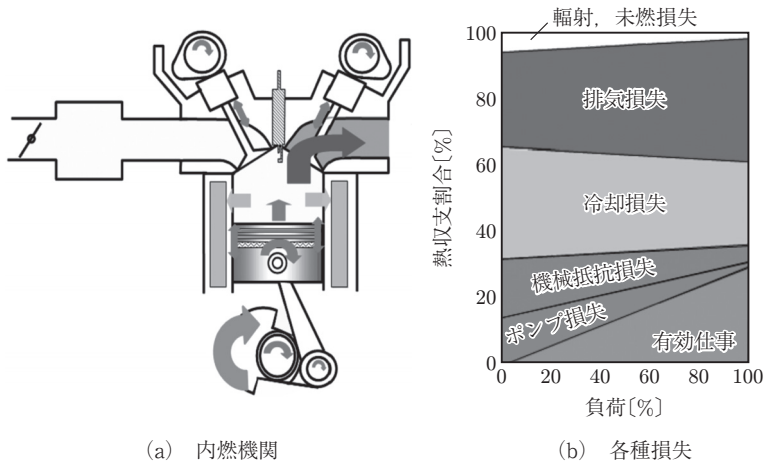


図 1.1 内燃機関とその各種損失

確かめた」と後述している。あとからわかることだが、着火前の低温酸化反応で燃焼に変化が生まれていた。思ったほどトルクが落ちなかったとはいえ、悪魔の異常燃焼は存在しており、実用化のためには問題が山積していた。その後、燃焼室の形状をさまざまに変更して研究を進めたが、当初、実験結果とシミュレーションは合わなかった。当時の CAE (Computer Aided Engineering) モデルでは説明することができなかった (図 1.2)。そのカラクリは容易には見えてこず途方に暮れた。

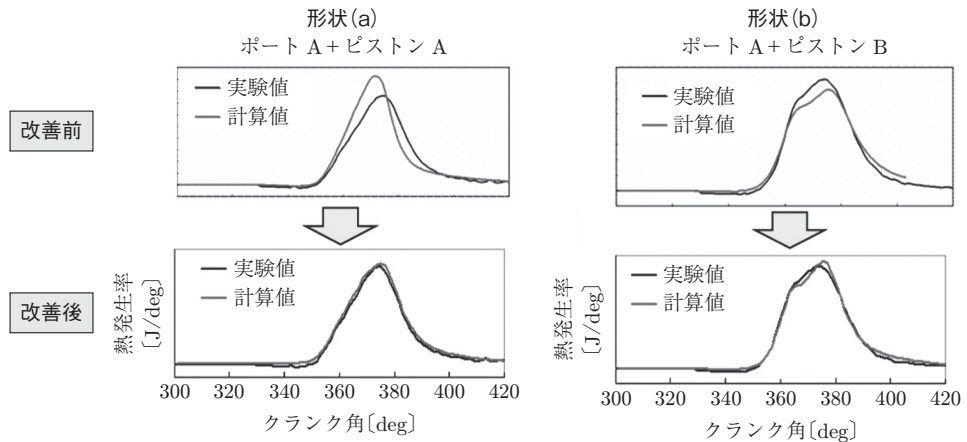


図 1.2 エンジン燃焼モデルの精度改善

これに対処するために、まず、サファイアガラスでエンジンの燃焼室内部を観察できる特殊なエンジンを試作した。なんと、燃焼する直前、CAE モデルで予測したのとは逆向きの混合気流動渦を発見し、愕然とした。説明がつかず、その日から苦しい日々が始まった。CAE 技術者とエンジン設計者と実験者とが一体となって、モデルで燃焼のカラクリを説明できる

ように、とことん追求していった。

ここに、開発後半に私たちが手に入れた技術力レベルを説明する逸話がある。いつもはピリピリした開発進捗会議しんちよくでのこと、主担当者がこのモデルの技術的解釈を説明し終えたとき、どこからともなく賞賛の拍手が沸き起こり、止まらなかった。最初の頃、モデルに懐疑的であった開発の最前線の専門家たちが、開発後半で語ってくれたのは、「このモデルがなければ、この燃焼は絶対に実現できなかった。」という褒詞ほめことばであった。モデルが信用できるようになれば、机上での仮説検証はいくらでもできる。机上とはいえ無作為に試行錯誤するのではなく、良い燃焼特性を狙い通りに最適設計することにもチャレンジした。この開発において、排気量が異なるエンジンでも、狙った特性にそろえることに初めて成功した(図 1.3)。これにより、二つめからのエンジンへの展開は、大きく効率化された。

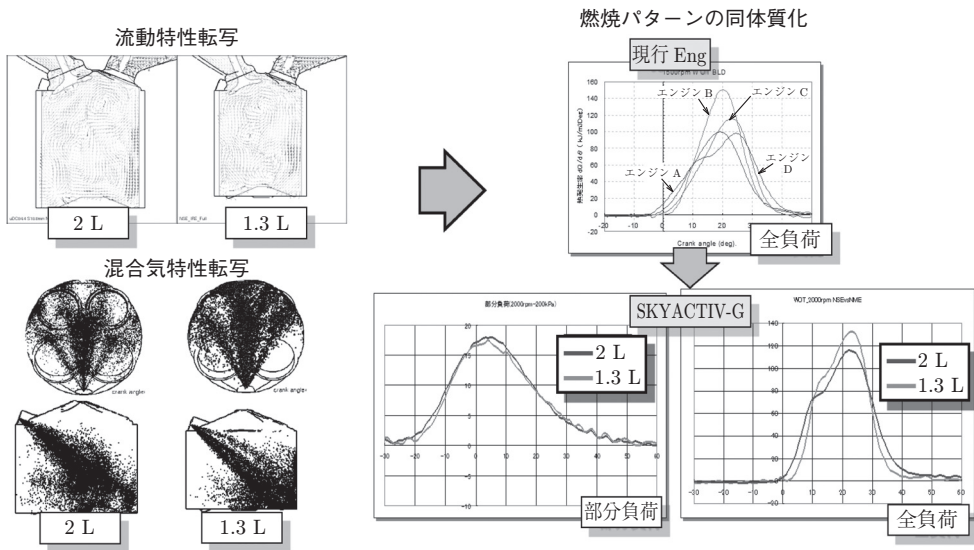


図 1.3 燃焼のコモンアーキテクチャー

〔2〕 エンジン制御系開発での実例 エンジンのポテンシャルを安定的に高く引き出すのは制御の役割である。これについても、すべて新規開発になったのでモデルベース開発をすべてに適用した。当時から、制御システムの複雑化が進行し、開発しにくい困難な状況が加速していた。制御システムの規模は 10 年で 10 倍ずつの指数的スピードで増大していた。最適化すべきパラメータの数は膨大で、最適な高い山がどこにあるかの探索は、人間の能力の限界を超えてきていた。モデルベース開発による革新を理解しやすくするため、かなり昔の開発プロセスを以下に示す(図 1.4)。

昔の制御開発プロセスは大きくは 3 工程に分かれており、第 1 の工程では、自動車メーカーが制御仕様を設計し出図する。しかしこの時点では、その仕様に矛盾があるかないかは検証

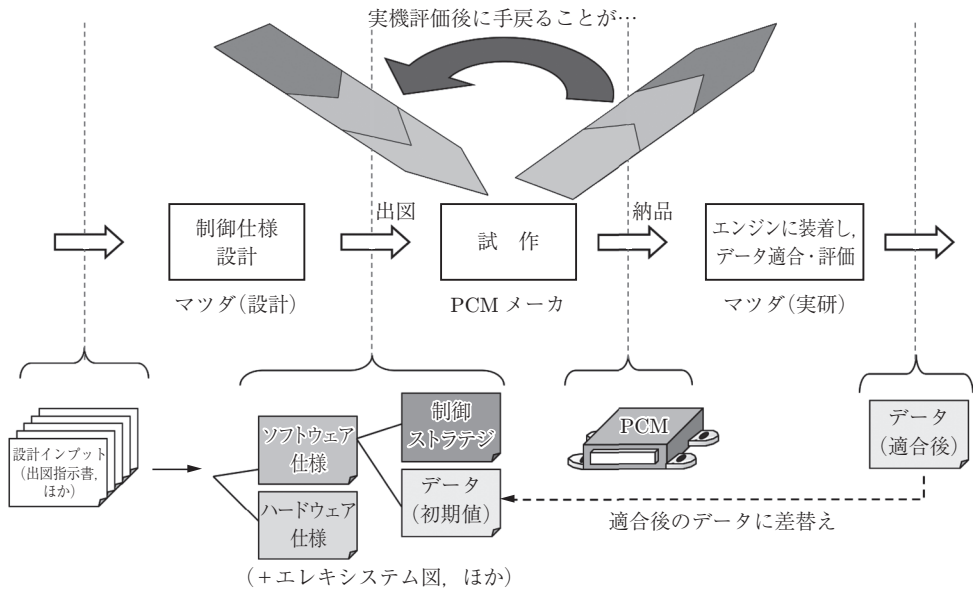


図 1.4 従来型制御系開発プロセス

ができていないものであった。第2の工程では、電装品メーカーが制御コンピュータ (Engine Control Unit : ECU) を試作するが、これにはたっぷり3か月を要していた。第3の工程では、できあがった ECU を試作エンジンと接続するが、仕様ミスとバグが原因で、数か月間まともにエンジンが動かないのはあたりまえのことであった。動き始めてから数か月かけてエンジンのキャリブレーション<sup>†</sup>を行い、やっと開発の1サイクルが回る。これを数度繰り返す。つまり、膨大な手戻りの構図であった。

これに対し、新しい制御システム開発は、5工程のV字開発プロセスで構築されている (図 1.5)。

まず、第1のプロセスは、**Rapid-ECU** と呼ばれ、内製の汎用制御コンピュータを活用する。これによると、試作に3か月をかけることなく、朝思いついたアイデアを、昼にはプログラム化し、夕方には実車テストやベンチテストにより結果を見ることができる。つまり90日かかっていたことが1日でできることになる。ECU 試作を待たずに、どんどん実機を使ったカラクリ研究開発を進める手段である。

第2のプロセスは、**構想設計用 MILS (Model-In-the-Loop Simulation)** を活用した、エンジンも車も存在しない開発初期段階のモデルベース開発である。車両レベルで走りも燃費も変速も再現できる車両モデル技術が求められる。走行するためには、制御モデルもドライバーモデルも路面モデルも必要である。このモデルを活用し、エネルギー最適化を机上で

<sup>†</sup> 制御で操作する量やタイミングを、あらゆる環境下で最適にするために、制御パラメータをチューニングする作業を指す。

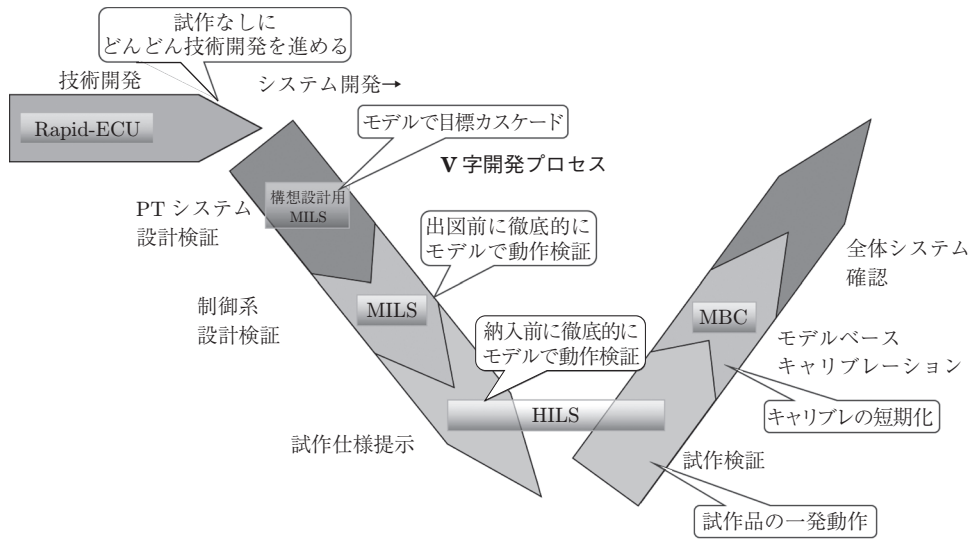


図 1.5 モデルベース開発プロセス (現在の制御系開発プロセス)

徹底的に行う。当時の燃費目標は 30 km/L であった。その実車の姿も形も無い開発着手時期に、30 km/L で走る仮想車両モデルができあがっていた。そのモデルを規範として開発が進められ、この初期段階において、燃費目標の整合は取られた。

第 3 のプロセスは、前工程で配分された機能目標を形あるものにブレークダウンする工程である。各部門の詳細設計をサポートするものであり、**詳細設計用 MILS** を活用する。この段階になると、エンジンモデルも車両モデルも詳細度を増し、それとつながる制御のモデルも詳細になる。モデルとして非常に計算が重くなる。これを効率化するために、複数のコンピュータを並列処理させる特別なハードウェアに、これらの詳細モデルをインストールしての設計検証業務となる。それをもってしてもエンジン燃焼モデルは、スーパーコンピュータ上でないと動作できないくらい計算が重いため、この解決のためには、IN/OUT 関係だけ合わせ込んだ、計算が軽い統計モデルのようなものに置換して利用する。このようなモデルのハイブリッド的な利用は、実用化技術としてなくてはならない工夫である。これらのモデルを使って、従来は実車でなければできなかったような車両レベルの総合診断を、1 万通りでも 10 万通りでも机上で自動実験可能となる。

第 4 のプロセスは、**HILS** (Hardware-In-the-Loop Simulation) を活用した実機 ECU の動作検証である。この工程では、前工程で設計検証した結果どおりとなるよう、答え合わせを行う。また、この工程になると、本物のセンサやアクチュエータもつないで、電気的な過渡応答やノイズの影響などを効率的に検証していく。

第 5 のプロセスは、実機試作後のキャリブレーションへの活用である。ここでエンジンのキャリブレーションの困難さを知らない方々も多いはずなので説明する。燃料噴射のタイミ

# 索引

<b>【あ】</b>		<b>【と】</b>
アナロジー 76	システム構成 121	導関数 42
<b>【い】</b>	システムパラメータ 21	動作電圧 146
一次遅れ系 72	実験計画法 85, 135	動的モデル 40
遺伝的アルゴリズム 138	時定数 72	動特性 40, 45
<b>【え】</b>	シミュレーション 84	
液位プロセスモデル 45	詳細設計用 MILS 5	<b>【に】</b>
エンコーダ 107, 108	詳細モデル 38	二次遅れ系 73
エンコード部 107	状態遷移図 31	二次遅れ+微分系 74
	<b>【す】</b>	入力範囲 101
<b>【か】</b>	ステートフロー 31	
拡大プラント 141	スマート MBD 143	<b>【は】</b>
可変ステップソルバー 28		パルス発生器 103
簡略化モデル 39	<b>【せ】</b>	
<b>【き】</b>	制御アルゴリズム部 106	<b>【ひ】</b>
逆ラプラス変換 68, 71	整定時間 87	微分 42
	静的モデル 40, 41	微分ゲイン 116
<b>【く】</b>	静特性 41	微分方程式 44
グレーボックスモデリング 40	積分 42	比例ゲイン 116
<b>【け】</b>	積分ゲイン 116	
結合テスト 88	線形化 76	<b>【ふ】</b>
減衰比 73		フィードバック制御 116
<b>【こ】</b>	<b>【た】</b>	物理モデリング 44
構想設計用 MILS 4	タコジェネレータ 92	ブラックボックスモデリング 40
効率的な開発環境 121	多目的遺伝的手法 138	プラント・コントローラ間の伝送
固定ステップソルバー 29	多様なインタフェース 121	路やインタフェースの影響 120
固有周波数 73	単体テスト 88	プラントモデル 84
コントローラモデル 84		——と実際のプラントの違い 119
——と実際のコントローラ	<b>【ち】</b>	——のリアルタイム演算 121
の違い 119	逐次二次計画法 138	ブロック線図 87
<b>【さ】</b>	チャート 31	ブロックパラメータ 21
最急降下法 138		ブロックマスク 93
最大オーバシュート量 87	<b>【て】</b>	プロパー 74
<b>【し】</b>	テイラー展開 79	分解能 101, 104
システムゲイン 72, 73	デコーダ 106, 107	
	デコード部 106	<b>【へ】</b>
	テスト環境 120	平衡状態 62
	テスト条件 120	平衡点 63
	データ駆動型制御器 141	変換時間 101
	デューティ比 97	
	伝達関数 70	<b>【ほ】</b>
		ホワイトボックスモデリング 40



<b>【ま】</b>	モデル	38, 84	<b>【り】</b>		
マクローリン展開 79	モデル化誤差	39	領域探索	135	
マス・バネ・ダンパモデル 58, 73	モデル駆動型制御器	142	<b>【わ】</b>		
<b>【も】</b>	モデルベース開発	1, 15	ワインドアップ現象	131	
モータドライバ 96	<b>【ら】</b>		ワークスペース	25	
モデリング 38	ラプラス変換	68			
◇					
<b>【C】</b>	HILS	5, 119	<b>【R】</b>		
Chart 31	<b>【M】</b>		Rapid-ECU	4	
clc 関数 25	MBC	135	RCP	85	
clear 関数 25	MBD	1	RLC 回路システム	76	
close 関数 25	MDD	12	RLC 回路モデル	51	
<b>【D】</b>	MILS	83	<b>【S】</b>		
D-A 変換器の出力電圧範囲 146	Model	38	SILS	84	
DC モータ制御システム 86	<b>【O】</b>		sim 関数	26	
DDC 141	open 関数	26	Stateflow	31	
Dynamical Model 40	<b>【P】</b>		Static Model	40	
<b>【E】</b>	PID 制御則	116	<b>【V】</b>		
ECU 84	PID ゲイン	116	V 字開発プロセス	4, 83	
<b>【H】</b>	PWM 周波数の設定範囲	104	V 字プロセス	10	
HIL シミュレータ 84, 120, 121	PWM 信号	96, 97			
	——の計測	146			

—— 編著者略歴 ——

1987年 徳島大学大学院工学研究科修士課程修了（情報工学専攻）  
1987年 高松工業高等専門学校助手  
1992年 大阪大学助手  
1994年 博士（工学）（大阪大学）  
1994年 岡山県立大学助教授  
1999年 広島大学助教授  
2005年 広島大学教授  
現在に至る

改訂 実習で学ぶ モデルベース開発

— 『モデル』を共通言語とする V 字開発プロセス —

Model Based Development — Learning with Practical Training — (Second Edition)

© Yamamoto, Wakitani, Y. Harada, Kagawa, Adachi, Oki, S. Harada 2018, 2023

2018年6月8日 初 版第1刷発行

2021年5月10日 初 版第4刷発行

2023年3月22日 改訂版第1刷発行

★

検印省略

編 著 者 <sup>やま</sup>山 <sup>もと</sup>本 <sup>とおる</sup>透  
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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04683-0 C3053 Printed in Japan

(新井)



＜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。