

学位論文

シミュレーション駆動による問題分析手法へのアプローチ

－ データ取得, デバイスマデリングおよびシミュレーションの各ステップ実践 －

An Approach for the Method of Simulation Driven Problem Analysis

－ Practices of data acquisition, device modeling and system simulation

氏名: 中上 京治

学籍番号: 14806001

群馬大学大学院 理工学府 知能機械創製理工学領域

指導教員

魏 書剛 教授

白石 洋一 准教授



2017年3月

要 旨

組込みシステム開発・設計においては、モデリングツールを用いたモデルベース設計 MBD(Model Based Design)が広がりつつある。これは制御対象プラントや制御器を MATLAB/Simulink などのモデリングツール上でブロック線図によってモデル化し、段階的詳細化で設計を行うものである。制御器やプラントのモデルは、モデリングツール上でシミュレート動作させることが可能である。シミュレーションによってモデル検証を行うことで、設計検証フィードバックを早期に行うことが可能となる。代表例として、プラントとして実機が存在する場合は、RCP(Rapid Control Prototyping)という手法が知られている。プラント実機が存在しない場合は、プラントをシミュレート動作させ、評価段階の制御器実機と連動させる HILS(Hardware In the Loop Simulation)という手法も挙げられる。設計の早期段階(分析, 基本設計段階)でプラントと制御器の両方をシミュレートし設計検証を行う MILS(Model In the Loop Simulation)も知られている。この際のモデル化対象は人工物であるが、これを自然物に適用拡大し、モデリングツールを用いて対象をシミュレーションによって分析し理解を深めることが、シミュレーション駆動による問題分析のパラダイムである。そのアプローチ方法は、以下の3ステップと考えて取り組んだ。

- (1)プラント(キーデバイス)の特性データを得る
- (2)得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う
- (3)プラントモデルに制御モデルを加えてシミュレート分析する

さらに、これらのステップが研究の環スパイラルを構成し、これらのステップを実践することで研究の環スパイラルを登ることができると考えた。上記は、科学の進展における「武谷三段階論」を参考としたものである。三段階は現象論、実体論、本質論の段階で構成される。惑星運動で例えるなら、現象論段階はティコ・ブラーエの天体観測、実体論段階はケプラーの惑星運動の三法則発見、本質論はニュートンの万有引力の発見に例えられる。上述の第1と第2ステップは、現象論と実体論段階に相当する。第3ステップは、本質論段階に代えて、現代の発達したコンピュータとオブジェク

ト指向のモデリングツールを活用し、作成したモデルを用いたシミュレーションによって対象プラントの分析を行い、本質へ迫るステップとして捉えた。異なる研究テーマではあるが、在学期間にて、考えた3ステップに該当する研究テーマを実践する幸運に恵まれた。その実践内容を述べ、上記手法へのアプローチを紹介する。

第1ステップのデータ取得は、「鉛バッテリーの内部抵抗器の開発」テーマで実践を行った。パルスを与えながら鉛バッテリーを充電することで、鉛バッテリーの延命化が図れるか、データ取得を行った。従来は、短期間の自動測定か長期間の手動測定の結果しかなく、延命効果が不明確であった。直流四端子法による内部抵抗測定回路を作成し、IoT タイプの測定器を6セット構成し、半年に渡る自動測定を行った。弱いながら、パルスによる鉛バッテリーの延命化効果が確認できた。測定継続によるデータ取得とパルス影響による内部抵抗変動を含むモデル化が次の課題である。

第2ステップのモデル化「リチウムイオンキャパシタのモデル化」テーマで実践を行った。研究室の先行研究でリチウムイオンキャパシタ充放電得エイのデータ取得と充放電回路の制御モデル作成は完了していた。しかし、基本設計に適用可能な簡素なプラントモデルは存在せず、充放電特性を再現する簡素なプラントモデルの作成が課題となっていた。充放電電流に対する容量依存性に着目し、可変容量と2つの抵抗の3素子からなる簡素なモデル作成を行った。充放電特性の精度評価を行い、相関係数 0.9986 以上の高い精度を確認した。このモデルを利用した EV におけるハイブリッド・エネルギー・マネジメント・システムのシミュレーションによるモータ駆動と電力回生シミュレーション分析が次の課題である。

第3ステップのシミュレートは、「循環器シミュレータの開発」テーマで実践を行った。研究室の先行研究で心臓(左心室)モデルと単一管大動脈モデルによるシミュレータが存在していた。ここに Campbell'90 の非対称 T 字管型の大動脈モデルを結合し、シミュレーションを行った。Murgo'80 分類の血管タイプに応じたシミュレーション結果を確認した後、モデルによって求めた大動脈中心部の脈波を前進波と後退波に分解する解析を行い、これを用いて大動脈端部の血圧を求めた。この解析結果から大動脈端部から中心部間の伝達関数の再現を行った。このことから、大動脈端

部の脈波から医学的に興味深い中心部の脈波を求められる理論的基盤を確認できた。また、頭部と体部間の大動脈波間の血流動態や大動脈内の進行波・後退波の動態理解が深まった。実際の端部の脈波を測定し、大動脈中心部の脈波推定ができるかが次の課題である。

上記のように、考えた3ステップを全て実践した。また、第3ステップの問題分析によって、大動脈というプラントの理解が深まり、これを契機に「ウェアラブルな容積脈波測定器を用いた中心血圧測定システム」の開発が開始された。第3ステップの結果、研究の環が一段上への環へとスパイラルアップすることを目の当たりにすることができた。

以上をもって、シミュレーション駆動による問題分析手法へアプローチしたと結論づける。

目次

要旨.....	i
目次.....	iv
表目次.....	viii
図目次.....	ix
第1章 緒論.....	1
1.1. 本研究の背景.....	2
1.2. モデル駆動開発.....	4
1.3. モデルベース設計.....	6
1.4. シミュレーション駆動による問題分析手法.....	10
1.4.1. 三段階のアプローチ方法.....	13
1.4.2. プラントモデル.....	16
1.4.3. 制御モデル.....	23
1.4.4. シミュレーションによる問題分析.....	27
1.5. 本研究の経緯.....	29
1.6. 本論文の構成.....	30
参考文献.....	31
第2章 鉛バッテリー内部抵抗測定器の開発.....	33
2.1. 諸言.....	33
2.2. 測定データ.....	34
2.3. システム構成.....	35
2.3.1. パルス制御サブシステム.....	36
2.3.2. 測定・記録サブシステム.....	38
2.3.3. 内部抵抗測定回路.....	39

2.3.4.	内部抵抗測定手順	42
2.3.5.	バッテリー充電器	43
2.3.6.	システムの組立て	44
2.4.	試行測定と対照実験結果	45
2.4.1.	試行測定とその結果	45
2.4.2.	試行測定の問題対策	48
2.4.3.	対照実験とその結果	50
2.5.	結果の検討	58
2.6.	結論	59
	謝辞	59
	参考文献	60
第3章	リチウムイオンキャパシタのモデル化	61
3.1.	諸言	61
3.2.	電気自動車と電源供給システム	63
3.2.1.	電気自動車	63
3.2.2.	電源供給システムの構成	63
3.3.	提案するリチウムイオンキャパシタモデルと充電器, 放電器のモデル	64
3.3.1.	定電流充電モードと定電圧充電モード	64
3.3.2.	従来のスーパーキャパシタモデル	65
3.3.3.	提案するリチウムイオンキャパシタモデル	69
3.3.4.	充電制御と放電制御のモデル	70
3.4.	実験結果	73
3.4.1.	実験に用いた LIC	73
3.4.2.	Simulink に実装した充電回路モデル	74

3.4.3. Simulink に実装した放電回路モデル	75
3.4.4. 充電器と放電器のモデルを実装した電気回路.....	75
3.4.5. 評価	78
3.5. 結論	82
謝辞	82
参考文献	83
第4章 循環器シミュレータの開発.....	87
4.1. 諸言	87
4.1.1. 研究の経緯	87
4.1.2. 研究の目的	89
4.2. 非対称 T 字管型大動脈モデルの循環器シミュレータの開発.....	89
4.2.1. 心臓の左心室モデル.....	89
4.2.2. 大動脈の非対称T字管モデル	92
4.3. Murgó 分類大動脈タイプへの解析適用	97
4.3.1. Murgó 分類の大動脈タイプ	97
4.3.2. 非対称T字管型向けの大動脈パラメタの変換	97
4.3.3. 非対称T字管型大動脈モデルによる循環器シミュレーション	100
4.4. 大動脈波の前進波と後退波への分解.....	103
4.5. 結論	109
参考文献	111
第5章 結論	113
付録.....	116
付録 A 鉛バッテリー内部抵抗測定結果	116
付録 B 循環器シミュレータの入力パラメタ	119

付録 C 循環器シミュレータによる前進波・後退波分解解析結果	121
発表論文・研究業績	124
謝辞	127

表 目 次

表 2.4.1	開発した内部抵抗測定デバイスの精度評価	49
表 2.4.2	対照実験の組合せ表	51
表 2.4.3	対照実験の組合せ表(測定期間を追記)	53
表 2.4.4	気圧モニタリングの期間とセンサ	53
表 3.4.1	実験に用いたパラメタ値	73
表 3.4.2	放電・充電における容量値の特性と相関係数	79
表 3.4.3	シミュレーションで使用したパラメタ値	81
表 4.3.1	Murgo'80 の大動脈血管のタイプ分類	97
表 B.1	循環器シミュレータの入力パラメタ一覧表(解析時間パラメタ)	119
表 B.2	循環器シミュレータの入力パラメタ一覧表(心臓パラメタ)	119
表 B.3	循環器シミュレータの入力パラメタ(大動脈パラメタ)	120

目 次

図 1.3.1	モデルベース開発の領域	7
図 1.3.2	Mathworks 製品の変遷	8
図 1.3.3	モデルベース開発(設計と評価)のV字型プロセス.....	9
図 1.4.1	武谷三段階論による科学の環状の進展	14
図 1.4.2	鉛バッテリーシミュレーションの例題	16
図 1.4.3	鉛バッテリーのプラントモデル例	17
図 1.4.4	リチウムイオンキャパシタの外観例	18
図 1.4.5	リチウムイオンキャパシタのプラントモデル例	19
図 1.4.6	循環器システムの例	20
図 1.4.7	心臓の左心室モデルと非対称T字管型モデルによるシミュレーション	21
図 1.4.8	鉛バッテリーシミュレーションの例題	23
図 1.4.9	リチウムイオンキャパシタのシミュレーションモデル例	25
図 1.4.10	循環器シミュレーションのモデル例	26
図 1.4.11	心室のモデル化コンセプト図	27
図 2.3.1	システム構成図	35
図 2.3.2	パルス制御サブシステム	36
図 2.3.3	Arduino の PWM を用いたパルス制御	37
図 2.3.4	測定・記録サブシステム	38
図 2.3.5	内部抵抗測定回路	40
図 2.3.6	内部抵抗測定手順	42
図 2.3.7	Arduino への分周比設定	43
図 2.3.8	バッテリー充電器	44

図 2.3.9	組立てたシステムの写真	44
図 2.4.1	日を単位とした測定結果	46
図 2.4.2	時間を単位とした測定結果	47
図 2.4.3	市販の内部抵抗測定器((株)東京デバイセズ IW7807)	49
図 2.4.4	測定結果—中古品(5年)の内部抵抗と電圧	54
図 2.4.5	温度と湿度の測定結果	55
図 2.4.6	気圧と鉛バッテリー内部抵抗・電圧	56
図 2.4.7	20 hPa 以上の気圧変動と内部抵抗のピーク・電圧のディップ	57
図 3.2.1	ターゲットとする電気自動車	63
図 3.2.2	電源供給システムの構成	64
図 3.3.1	EDLC スーパーキャパシタのモデル例	65
図 3.3.2	LIC のモデル例 (Zubieta モデルの拡張型)	67
図 3.3.3	LIC のモデル例(Zubieta の第 1 枝を無数の RC 直列接続で構成)	68
図 3.3.4	提案する LIC モデル	69
図 3.3.5	充電・放電システムのモデル	71
図 3.4.1	実験に用いた LIC	74
図 3.4.2	Simulink での充電回路モデル	76
図 3.4.3	Simulink での放電回路モデル	77
図 3.4.4	充電・放電回路を実装した電気回路	77
図 3.4.5	LIC の放電特性	79
図 3.4.6	LIC の充電特性	80
図 4.2.1	心臓の左室モデル	90
図 4.2.2	大動脈の非対称 T 字管型モデル	92

図 4.2.3	MATLAB/ Simulink 上で開発した循環器シミュレータ	96
図 4.3.1	Windkessel 型モデルから非対称 T 字管型モデルへの変換概要 ..	98
図 4.3.2	シミュレーション結果による血圧と血流グラフ (タイプ A) ..	100
図 4.3.3	タイプ別の血圧, 血流のシミュレーション結果一覧比較	101
図 4.3.4	左心室の容積・室圧の履歴プロット	102
図 4.4.1	大動脈波の前進波, 後退波への分解対象	103
図 4.4.2	大動脈波の前進波, 後退波への分解計算ステップ	104
図 4.4.3	計算結果の確認と解析結果例 (Murgo 分類タイプ A)	106
図 4.4.4	中心部血圧と末端部血圧の比較分析例	108
図 4.4.5	末端部血圧からの中心部血圧推定方法	108
図 A.1	新品バッテリー(B19L)・パルス発生デバイスなしの内部抵抗測定結果	116
図 A.2	新品バッテリー(B19L)・パルス発生デバイスあり(弱)の内部抵抗測定結 果	117
図 A.3	新品バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(中)の内部抵抗億艇結 果	117
図 A.4	中古バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスなしの内部抵抗測定結果	118
図 A.5	中古バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(中)の内部抵抗測定結 果	118
図 C.1	大動脈に対する前進波後退波分解解析結果 (Murgo 分類タイプ A)	121
図 C.2	大動脈に対する前進波後退波分解解析結果 (Murgo 分類タイプ B)	122

図 C.3 大動脈に対する前進波後退波分解解析結果 (Murgo 分類タイプC)

..... 123

第1章 緒論

ソフトウェア開発・設計手法は、従来の構造化手法からオブジェクト指向に主流が移り変わってきた。設計対象を分析・設計する際のモデル表記法も従来のデータフローダイアグラムやHIPO(Hierarchy plus Input Process Output)ダイアグラムからUML(Unified Modeling Language)ダイアグラムに主流が移り変わってきた。設計対象をモデル化し、動作を模擬するシミュレーションツールも従来のカスタムメイドのものから MATLAB/Simulink のようなブロック線図による汎用的なモデリングツールが実用化されてきた。組込みシステム開発・設計においては、UML を用いたMDD(Model Driven Development)とブロック線図を用いたMBD(Model Base Design)が広がりつつある。MDD は抽象的な(上流の/機能設計の)分析フェーズで使用され、MBD は具象的な(下流の/詳細な)実装工程で使用されることが多い。本稿は、上流の基本・機能設計において設計対象をモデル化し、シミュレートし、分析を行うシミュレーション駆動による問題分析をテーマとして取り上げた。これは、所属研究室のミッションテーマの1つである。

モデリングを行う対象は、被制御対象のプラント部分とその制御を行う制御部分の両者である。プラント(被制御対象となるキーデバイスなど)が既知のものであれば、制御部分の設計がメインとなり、MBD 型の設計を推進すればよい。一方でプラントが未知のものであれば、その特性データを取得するところから着手することとなる。得られた特性データも制御モデルと親和性の高い形(同じプラットフォーム上で動作可能な形)でモデル化する必要がある。こういった点が、シミュレーション駆動による問題分析の特徴となる。

群馬大学大学院理工学府知能機械創製理工学領域の白石研究室で取り上げている各研究テーマは、纏める段階のもの、現在進行中のもの、これから着手するものなどバラエティに富んだものであった。これらの個別テーマを推進するに当たり、そのアプローチ方法として以下の三段階のステップを念頭において推進してきた。

- (1)プラント(キーデバイス)の特性データを取得する

(2) 得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う

(3) プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレートする

本稿は、(1)(2)(3)の各ステップで執筆者が実践した内容を説明し、シミュレーション駆動による問題分析へのアプローチと題してまとめたものである。なお、各ステップのターゲットは異なるものである。

緒論では、まず本研究で取り組んだテーマの背景を紹介し、続いて、モデル駆動開発、モデルベース設計、シミュレーション駆動分析について紹介する、さらに本研究の経緯と位置付けを述べ、本論文の構成を説明する。

1.1. 本研究の背景

1968年のNATO(北大西洋条約機構)主催の国際会議で「ソフトウェア危機(software crisis)」で宣言された。ここでの危機とは、増大するソフトウェア開発の需要に対して供給能力が追い付かないという意味での危機であり、当時のソフトウェアは、現在の情報系のソフトウェアに該当する。このときに「ソフトウェア工学(software engineering)」という言葉も作られ、コンピュータシステムにおいて、品質の高いソフトウェアを効率的に開発するための各種の手法やプログラミング技法の研究が学問として成立した。その後、ソフトウェアの開発手法は構造化プログラミングを経て、現在のオブジェクト指向へと発展してきた。この発展は、プログラミング言語と一体のもので、プログラミング言語は、機械語からアセンブリ言語、高級言語を経てオブジェクト指向言語へと発展してきた。オブジェクト指向とオブジェクト指向言語の発展と普及によってソフトウェアの生産性・再利用性が高まり、ソフトウェア危機は、ある程度解決されて来たと言える。この経緯については、文献[1]の3章に分かり易く説明されている。一方で、組込みシステムにおいても、組込み系のソフトウェアの危機が指摘されている^[2]。組込みシステムは、マイコンを内蔵した家庭電化製品や携帯端末デバイスに代表されるシステムである。センサ・スイッチ類によってユーザからの指令を受け、特定目的を達成するためのアクチュエータを動作させ、センサ類によってその動作をモニタリングしてアクチュエー

タの動作制御を行うものである。従来の組込みシステムは、比較的単純な機能を担っており、組込みソフトウェアは小規模でシンプルなものが多かった。ソフトウェア開発チームは小規模で、ソフトウェアの開発者には、マイコンやセンサ、アクチュエータの知識、制御理論の理解が求められる傾向が強かった。ところが、組込みシステムの大規模化と複雑化によって、コンピュータシステム同様のソフトウェア危機が顕在化してきたのである。

組込みソフトウェアの危機に関しては、オリジナルのソフトウェア危機と類似した問題・課題と固有の問題・課題が存在していると考えられる。類似している部分は、要求される規模や需要の増大が挙げられる。固有の部分は、用途に用いるセンサやアクチュエータなどのプラントの多様化への追従とリアルタイム性と精度が求められる制御にかかわる問題・課題である。類似している部分に対する対応は、コンピュータシステム同様のアプローチであるオブジェクト指向プログラミングを普及・啓蒙し、ソフトウェアの生産性を高めることとなる。執筆者が所属する研究室が積極的に参加・運営協力している ET ロボットコンテストは、まさに、その実践の場でもある。ET ロボットコンテストは、(一社)組込みシステム技術協会 (JASA) が主催するロボットコンテストである。コンテストの参加チームへは、コンテスト全体や技術教育を通してオブジェクト指向プログラミングによる実装方法と、UML(Unified Modeling Language)によるモデル表記方法を教育・啓蒙している。これらは、本論文の中では、モデル駆動開発の制御モデルに相当する領域の教育・啓蒙に当る。モデリングを行う対象は、通常、被制御対象のプラント部分とその制御を行う制御部分の両者であるが、ET ロボットコンテストにおいては、被制御対象であるプラント部分は LEGO 社の Mindstorms に基づくワンメーカーのものである。そのプラントモデルは、各種の例題、マニュアル、文献を通して与えられているのと同様である。コンテストにおいては、制御部分のモデリングが主要な題目となっている。すなわち、モデル駆動開発における制御部分のモデリングに関しては、ET ロボットコンテストの手法を通して教育・啓蒙が推進されている状況である。実際問題として、プラントモデル開発は限られた範囲のメンバーが関わるもので、ボリュームゾーンとして需要が多い領域は、制御部分のモデリングとなる。自動車産業で例えれば、エンジンのプラントモデルは、エンジン開発を行ったメーカーや、そのモ

デリングに特化したベンチャー企業の戦略的な IP として開発され、関わる人材はごく一部である。それを用いて色々な車種の開発に展開する部分が、ボリュームゾーンとなる。プラントのモデリングは、固有の問題課題に類別される。

その他の固有の部分に関しては、モデルベース設計 (Model Based Design) やモデル駆動開発 (Model Driven Development と称される設計方法とそれを支える開発ツールの発展について言及する必要がある。広義のモデルベース設計は、上流工程であるモデル駆動開発を包含しているものであるが、ここでは、狭義の意味で実装工程に近いレベルでの用語とする。この領域では、Mathworks 社の MATLAB/Sumilink に代表されるモデリングツールが実用化されてきた。ツールボックスと称されるオブジェクト指向によるモデル部品群を用いたブロック線図によるビジュアルプログラミングによって、ユーザは居ながらにしてオブジェクト指向の恩恵を受けることができる仕掛けとなっている。プラントに関しては、ソフトウェアでモデル化(仮想化)したものをソフトウェアでモデル化(仮想化)した制御モデルから使用する MILS(Model In the Loop Simulation)の手法や、仮想化したプラントモデルを実際の制御ユニットから動作させる HILS(Hardware In the Loop Simulation)の手法も実用化されてきている。モデルベース設計の方法論は、研究フェーズから開発・実用へと推移している。従って、本稿では、モデル駆動開発におけるプラントモデル開発手法を研究テーマとして取り上げ、そのアプローチ方法と実践を論じることとする。

1.2. モデル駆動開発

モデル駆動開発 (Model Driven Development) とモデルベース開発 (Model Based Development) は、似て非なる用語である。また、モデルベース設計 (Model Based Design) という用語も本稿では取り上げており、混乱をきたしかねない。この節でモデル駆動開発を説明し、補足を交える形でその他の概要と差異を説明する。

元々、モデル駆動開発 (Model Driven Development) は、情報系のソフトシステム開発手法の用語である。ここでの開発モデルは V 字プロセスで表現し、左側の斜め左上から中央下への部分を

分析・設計(単純に設計とも言う)と称し、中央下から右側斜め上への部分を検証・評価(単純に評価とも言う)と称するものである。ソフト設計は、システムの分析、機能抽出、構造設計、振舞い設計を通してシステムの構造化・詳細化・部品化を行う行為である。設計の初期段階で、基本的に単純な抽象度の高いモデル(上位概念の模型)を提示して開発対象を明確化(可視化)して行くことが、まずありきである。初めに(抽象度の高い)モデルを作成し、それを駆動源として次の段階への詳細化を進める、こういった段階的な詳細化プロセスを経ることがモデル駆動のコンセプトである。一方で、評価は、単体部品の評価、部分の結合評価、全体の結合評価、妥当性検証を通してシステムの結合・統合を行う行為である。用語としての開発は、設計と評価の両方のプロセスを含んでいる。モデル駆動開発は、情報系のソフトシステム開発を意識したものである。情報系の特徴としては、プロセッサを CPU と表現すること、実行環境と開発環境(コンパイルプラットフォーム)が同一、離散系の制御のみ扱える、モデリング言語の代表例として UML(Unified Modeling Language)などが挙げられる。「離散系の制御のみ扱える」は、ソフトウェアからハードウェアの駆動・制御はベンダー提供のドライバ API を通して行うもので、ハードウェアの制御はドライバソフトで調整された範囲でのみ実施することを意味し、ハードウェアのリアルタイムな制御そのものをスコープとする場合は想定していないということの意味する。

一方でモデルベース開発(Model Based Development)は、組込み系システムで用いられる用語である。組込み系の特徴を対比して列挙すると、プロセッサを MPU と表現すること、実行環境と開発環境(コンパイルプラットフォーム)が異なる、離散系に加えて連続系の制御も扱える。モデリング言語の代表例として MATLAB/Simulink などが挙げられる。ここで、「連続系」は、ハードウェアのリアルタイムな制御そのものをスコープとすることを想定していることを意味する。上位概念のモデルを作成し、それを段階的に詳細化するプロセスがコンセプトであることは共通である。

モデルベース設計(Model Based Design)は、モデルベース開発(Model Based Development)の V 字型プロセスのうち、左半分の設計(分析・設計)にスコープを当てたことを意識した用語である。

モデル駆動と開発，モデルベースと設計の組合せの連想で，開発と設計のキーワードで両者を識別し，用語を使い分けて誤解を回避するケースもある。

1.3. モデルベース設計

上述のように，モデルベース設計 (Model Based Design) は，組込み分野におけるシステム設計にスコープを当てた用語である。情報系システムでは，ハードウェアをベンダーから提供されたドライバ API にて駆動・制御する離散的な系を扱うのに対して，組込みシステムは，ハードウェアのリアルタイム制御をスコープとする連続的な系を扱うケースが多い。モデルベース設計 (Model Based Design) においては，非制御対象となる部分をプラントモデルと称し，プラントモデルを制御する部分を制御モデルと称する。モデルベース設計 (Model Based Design) のコンセプトは，両者を同一のコンピュータ上で取り扱い，制御モデルの設計を段階的詳細化の手法で簡便化し，詳細化の最終段階ではソフトウェアコードの自動生成に落とし込むことが挙げられる (ACG: Auto Code Generation)。実制御対象をコンピュータシステムに接続すれば，制御モデルのシミュレーション動作によって，制御モデルの妥当性を設計の早い段階で確認することが可能になる (RCP: Rapid Control Prototype)。実制御対象を直接コンピュータシステムに接続することが困難な場合，プラントモデルを使うことで，MILS (Model In the Loop Simulation) によって，制御モデルの妥当性を設計の早い段階で確認することが可能となる (図 1.3.1)。

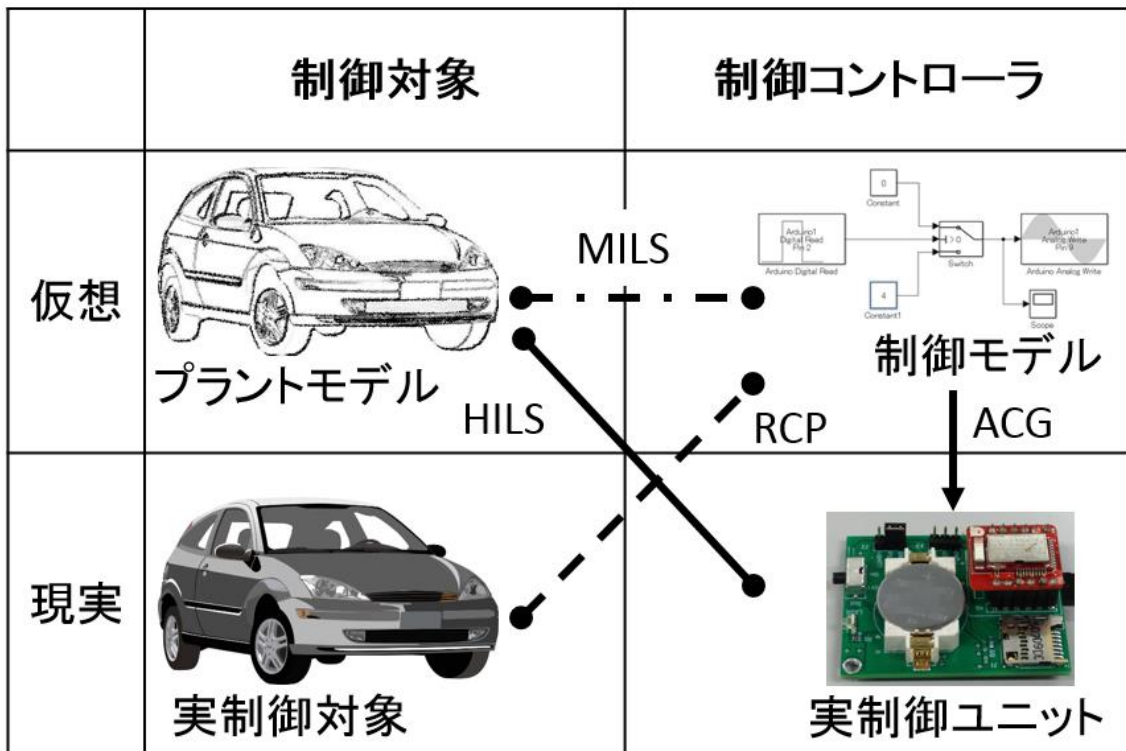


図 1.3.1 モデルベース開発の領域

(書籍[3]の p.007 の図 1.5 を参照し作成)

評価段階の領域になるが、実制御ユニットと制御対象モデルの組合せによって実制御ユニットの検証・評価の効率化を図ることも可能である。

モデルベース設計の代表的なツール(プラットフォーム)製品として MATLAB/ Simulink が挙げられる。元々、MATLAB は、MATrix LABoratory に由来する製品でコンピュータ上での行列計算、科学技術計算を得意とするものであった(1985 年に製品化された)。その後、組込み制御向けの Simulink が 1990 年に製品化された経緯がある(図 1.3.2)。

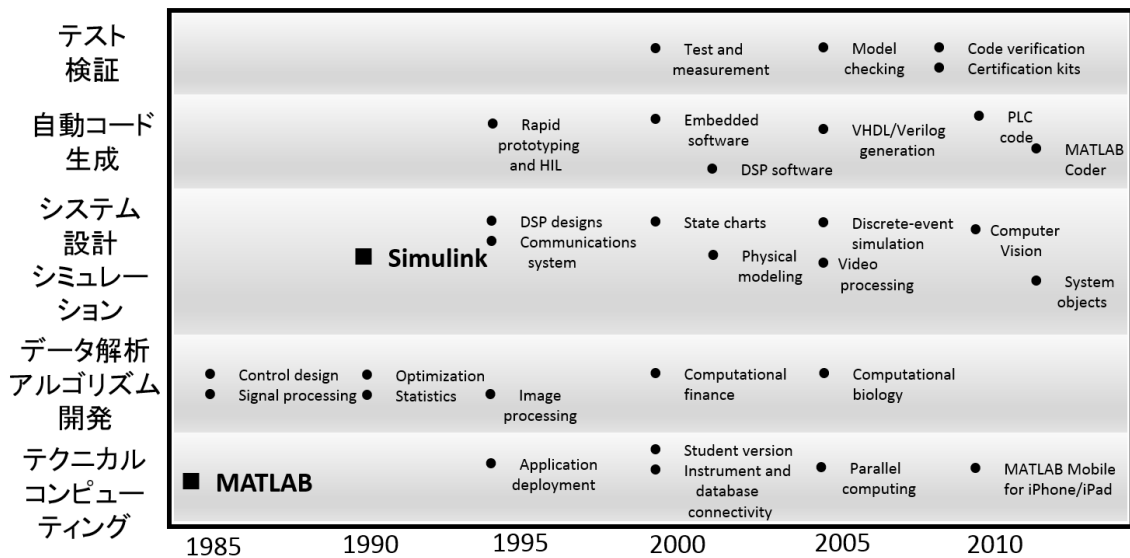


図 1.3.2 Mathworks 製品の変遷

(MATLAB EXPO 2016 Japan^[4]オープンシアターセッションを参照し作成)

モデルベース設計は、前述のように段階的な詳細化で対象スコープを全体から細部移しながら設計して行くコンセプトのものである。一方の評価工程は、細部の評価から全体への評価へと進めるものである。全体評価時などで検出される不具合による対策・再設計は大きな手戻りとなり、多くの工数を必要とする。不具合を早いタイミングで検出し、対策・再設計を行うことができれば、全体の開発工数を低減することに有効である(図 1.3.3)。プラントモデルと制御モデルをコンピュータ上に組み上げてシミュレーションによって不具合を早期に検出する取組みを MILS(Model In the Loop Simulation)と称する。プラントモデルに代えて次実機のプラントを使用して制御モデルのシミュレーションを行う取組みを RCP(Rapid Control Prototype)と称する。

評価サイドでの効率向上となるが、実装された制御器を用いてコンピュータ上のプラントモデルを動作させ、制御モデルの評価を行う取組みは HILS(Hardware In the Loop Simulation)と称される。

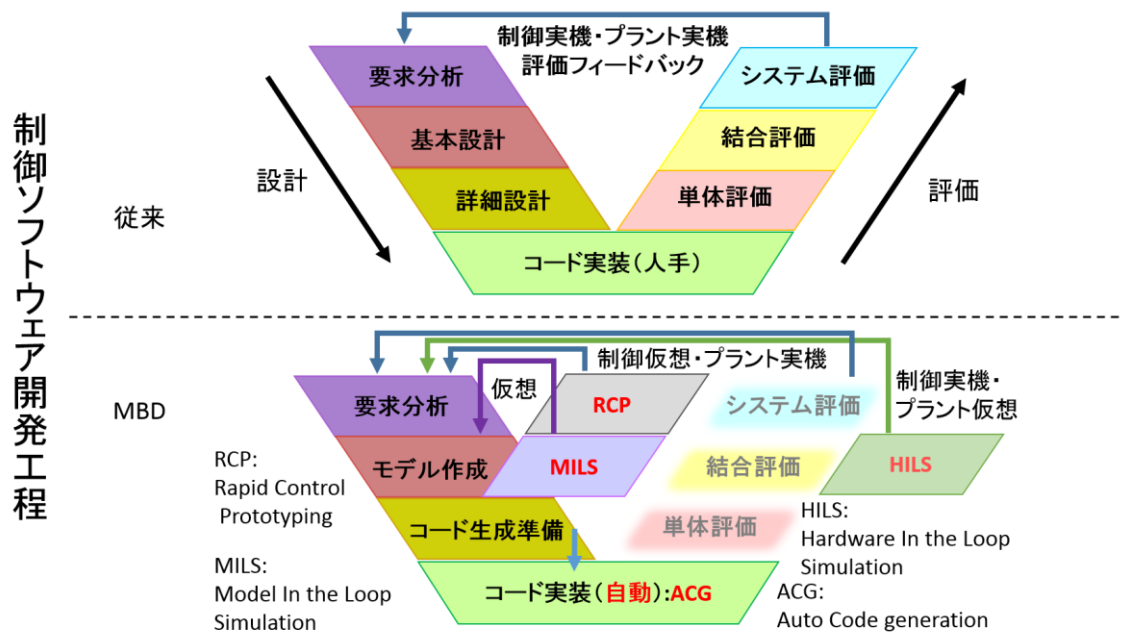


図 1.3.3 モデルベース開発(設計と評価)のV字型プロセス

(文献[3][5]を参照し作成)

このような状況を鑑みると、モデリングツールの発展でシミュレーション技術が発展してきた様子が伺える。MATLAB/ Simulinkをはじめとするモデリングツールは、多方面への展開利用が可能であり、コンピュータの発展と相まって、従来は専用のシミュレータによってなされてきたシミュレーションが、汎用的なモデリングツールのプラットフォーム上に展開可能となったことが伺える。

汎用的なモデリングツールの共通プラットフォーム上に展開されたモデル群は、それらを結合したシミュレーションを可能とする。執筆者が所属する研究室では、モデルベースアプローチに準じた方法で可能となった結合モデルによる全体システムのシミュレーションをモデルベース分析 (Model Based Analysis)^[6]、もしくは、モデル駆動による問題分析 (Model Driven Problem Analysis) と呼んでいる。最近では、組込み系に限らず、情報系全般を連想させる用語としてモデル駆動による問題分析 (Model Driven Problem Analysis)の方が研究室内で用いられることが多く、このキーワードは研究室のミッションテーマの1つである。その他のミッションテーマは、シミュレーション駆

動による製品開発 (Simulation Driven Product Development) と機械学習アルゴリズム (Machine Learning Algorithms) が挙げられる。モデリングツールプラットフォーム上でのモデル結合で可能となったものとして、マルチドメインモデルも挙げられる^{[7][14]}。こちらは、設計に対する要件定義ができた後の基本設計の段階でのシミュレーションの立場である。

モデル駆動による問題分析 (Model Driven Problem Analysis) は、対象を分析・検討する段階で実施する考え方で、設計以前の段階で対象物を知り捉えようとする考え方が背後にある。工学 (エンジニアリング) というよりは理学 (サイエンス) に近い領域に工学分野のモデリングツールを持ち込み、対象物のモデリングを行うという発想である。

本稿では、このモデル駆動による問題分析 (Model Driven Problem Analysis) へのアプローチをテーマとした。

1.4. シミュレーション駆動による問題分析手法

執筆者は、シミュレーション駆動による問題分析へのアプローチを以下の3段階のステップとして捉えて、出会った研究テーマに取り組んできた。

- (1) プラント (キーデバイス) の特性データを取得する
- (2) 得られた特性データからプラント (キーデバイス) のモデル化を行う
- (3) プラントモデルに開発・設計部分 (制御モデル) を加えてシミュレートする

第一の段階は、実験・観測によって対象物 (プラント、すなわちキーデバイス類) の特性データを取得する段階である。測定・観測の条件は、過去の文献類を参考に選定して行くことになる。専門家のアドバイスを得ないと測定・観測の条件を見逃す場合もある。詳細は第2章で説明するが、鉛バッテリーの内部抵抗測定において、学会発表の論文審査にてレビュアーから推奨されたコメントに基づいて測定項目を発見できた場合もある。第二の段階は、モデリングツールの共通プラットフォーム上にプラントモデルを構築する段階である。強力なモデリングツールを駆使することで、第一原理に基づく物理モデルや観測データをフィッティングする統計モデル、それらの組合せでプ

ラントモデルを構築することができる^[8]。類例紹介は第3章で行うが、得られた特性データをモデリングするには仮説検証プロセスが必要となる。テーマはリチウムイオンキャパシタのモデル化であるが、対象をシンプルなモデルで捉えるには、それなりのセンスが必要になる。測定実験を行った研究室の過去の研究では説明・モデル化しきれなかった現象をある程度の精度で説明するモデル化に成功した。第三の段階は、プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレーションを行い、プラントの特性の再現性や制御モデルの妥当性を検証する段階である。類例紹介は第4章で行うが、数値解析手法などの基礎力やある程度の数学力が要求される領域となる。対象とする研究テーマは、循環器シミュレータである。心臓のモデルと大動脈を単一管で近似した系のシミュレーションは、この分野の専門家によって既に遂行されていた。このモデルをモデルベース設計のツールに実装し、動作検証することは研究室にて遂行されていた^[6]。大動脈の近似を単一管から非対称 T 字管へ拡張する試みは別途行われていたが、執筆者らは、これをモデルベース設計のツールに実装し、既に実装済の心臓モデルと結合するシミュレーションに取り組んだ。数学モデルで記述されたモデルをモデリングツール上に実装することは比較的容易であったが、心臓と大動脈の接続インタフェース部分に潜在的な問題が見出された。共有メモリの読み込み・書き出し順の不整合が原因であったが、その原因追究と問題解決には、期間・工数を要した。原因追究には、数値解析分野における過去のデバッグ経験が活かされた。心臓モデルと大動脈モデルは、どちらがプラントモデルでどちらが制御モデルということを議論するようなものではないが、今回は、未知の非対称 T 字管型大動脈をプラントモデルとし、心臓を制御モデルと表現して論じている。循環器のシミュレーションによって、データ取得が難しい大動脈中心部の血圧・血流と比較的データ取得が容易な抹消部(橈骨付近など)の血圧・血流との関係性や、血管の老化による血圧・血流のタイプ変化などを模擬するなど、ターゲットの問題分析を行うことが可能となる。また、解析が不十分なプラントに対しては、分析フェーズでモデル化を試行し、その先の見通しを付けることも重要である。プラントの特性を表すパラメタが、依存するパラメタを漏れなく抽出できているか、

第一原理に基づく物理モデルや観測データをフィッティングする統計モデルでどの程度特性を再現できるモデルが構築できるかなどの見通しを仕様策定の分析フェーズで行うことも重要である。

本論文でテーマとしアプローチしているシミュレーション駆動による問題分析 (Simulation Driven Problem Analysis) は、興味対象の分析フェーズにモデルベース設計で用いられる汎用的なモデリングツールを持ち込み、それを共通プラットフォームとして各種のシミュレーションを実行し得る、様々なモデルの結合シミュレーションを狙ったコンセプトの分析手法である。従来の専用シミュレーションツールとの相違は、ここでのモデリングツールは、オブジェクト指向プログラミングによってシミュレーション対象のモデルを構築できるという点である。

冒頭に記載した3ステップは、文献[9]のいわゆる「武谷三段階論」を参考に、意識し構成したものである。その概要は次節に紹介する。モデルベース設計における問題分析へのアプローチ方法に、この三段階を参考にした方法が、適合可能で有効であるかが本論文のテーマであり、その実践と得られた学術的成果を本論文に記載させて頂くこととする。

モデルベース設計においては、非制御対象をプラントモデルと称し、非制御対象を制御するものを制御モデルとして区別してきた。第4章で取り扱う循環器システムなどでは、制御システムを設計している訳ではないので、何が制御モデルで何がプラントモデルか、不明確となってくるケースもある。ここでは、その特性を知りたい対象をプラントモデルとし、その特性を引き出す能動的な動きを駆動するものを制御モデルとして取り扱うこととする。本節の後半にて、プラントモデルと制御モデルについて説明する。

1.4.1. 三段階のアプローチ方法

シミュレーション駆動による問題分析のアプローチ方法は、以下の3ステップと捉えて研究テーマに取り組んできた。

- (1) プラント(キーデバイス)の特性データを取得する
- (2) 得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う
- (3) プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレートする

先にも述べたが、これは、いわゆる「武谷三段階論」^[9]を参考としたものである。科学の進展は三段階で進められるというパラダイムである。要約すると、三段階の第1の段階は現象論的段階、第2の段階は実体論的段階、第3の段階は本質論的段階と称せられる。第1の段階である現象論的段階は、観測によって諸現象を記述するもので、惑星運動で例えるならば、ティコ・ブラーエの天体観測に例えられる。第2の段階は、観測結果を整理し現象をモデル化する段階で、惑星運動に対するモデル化として導出したケプラーの3法則に例えられる。第3の段階は、得られたモデルを纏める上位の抽象概念の創出の段階で、ニュートンの万有引力の発見に例えられる。そしてこの三段階の環をスパイラル状に繰り返しより先に進むのが科学の進歩、自然への認知であるということである。

シミュレーション駆動による問題分析のアプローチ方法の第1ステップと第2ステップは、「武谷三段階論」の第1段階と第2段階に相当するものを意識して取り込んだ。第3ステップは、作成したモデルの利用方法としての当然の帰着で、それをを用いて分析を行うということである。そしてシミュレーション分析によって、本質へ迫れているかを探るステップである。ニュートンの時代は、数式として汎化した抽象概念でないと他の分野へ応用・適用することは難しかったと思われる。しかし、現代は発達したコンピュータとモデリングツールによるシミュレーションによって、実体論的段階のモデルも使いまわしが可能となっている。ニュートンのような天才でなくても、汎用・応用ができるモデル創出が可能になった時代を迎えたとも言えるであろう。オブジェクト指向プログラミングによってモデルの可搬性が飛躍的に向上したお蔭でもある。

さて、三段階論の特徴は、三段階が環となり、この環がスパイラル状に繰り返し、より先に進む点が挙げられる。上記したティコ・ブラーエの天体観測、ケプラーの三法則発見、ニュートンの万有引力発見が一巡の環となっているが、その後にはアインシュタインの相対性理論の発見という環やシュレディンガー、ハイゼンベルグの量子力学の環が挙げられる。マクスウェルによる電磁気力の統一も含めて、さらに、これらを統一したファインマンらによる場の量子論の環、さらに、ワインバーグ・サラムによる電弱統一論の環、ゲルマンとツウィイクによるクォークモデル導入で発展した量子色力学の構築は、「武谷三段階論」の繰り返しと見ることができる。

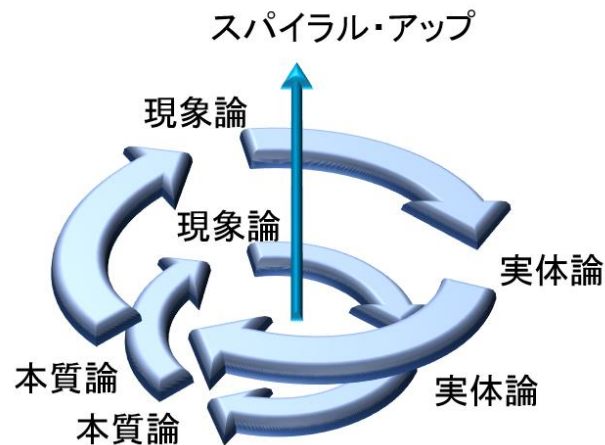


図 1.4.1 武谷三段階論による科学の環状の進展

「武谷三段階論」に対しては、一定の評価が与えられている^[17]が、批判が無い訳ではない。文献[13]の第3章には、「武谷三男－広重徹論争とダリゴルの見解」が著されている。著者は、“広重やダリゴルの見解を受け入れることはできない”と武谷を擁護する立場を示している。ここでは、論争への深入りを避け、まずは三段階論的立場を受け入れることとする。そして、それを参考にして構成した3ステップを実践し、モデルベース設計における問題分析へのアプローチ方法に、この三段階を参考にした方法が、適合可能で有効であるかを意識して研究を進めた。

「武谷三段階論」の三段階を以下に整理しておく。

1. 現象論的段階:現象の記述, 実験結果の記述が行われる段階
2. 実体論的段階:現象の記述が整理されて法則性を得る段階
3. 本質論的段階:諸実体の相互作用の法則を認識する段階

現象論的段階は、「現象を説明するのではなく、ただ現象の知識を集める段階」であるとされる。私たちはこれを、「プラント(キーデバイス)の特性データを取得する」ステップとして捉えた。実体論的段階は、「現象の記述が整理されて法則性を得る段階」であるとされる。私たちはこれを、「得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う」ステップとして捉えた。本質論的段階は、「諸実体の相互作用の法則を認識する段階」であるとされる。この段階は、普遍的な第一原理を発見し、それを数式で表現することに相当する。この領域へは、そう簡単には及ぶことはできないが、現代のコンピュータの発展とモデリングツールの発展によってモデルの可搬性と可用性が向上してきた。そこで、諸実体の相互作用の認識をモデルベースにおけるシミュレーションによる問題分析に置き換えてアプローチすることとした。すなわち、「プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレートする」こととした。

1.4.2. プラントモデル

本稿では、以下の3つをテーマとして取り上げた。

- (1) 鉛バッテリー内部抵抗測定器の開発
- (2) リチウムイオンキャパシタのモデル化
- (3) 循環器シミュレータの開発

各々の概要とプラントモデルについて述べる。

第1の鉛バッテリーのプラントモデルは、基本的なものが既に開発されており、温度特性を含んだモデルは MATLAB の例題モデルとしても参照することができる^[10]。

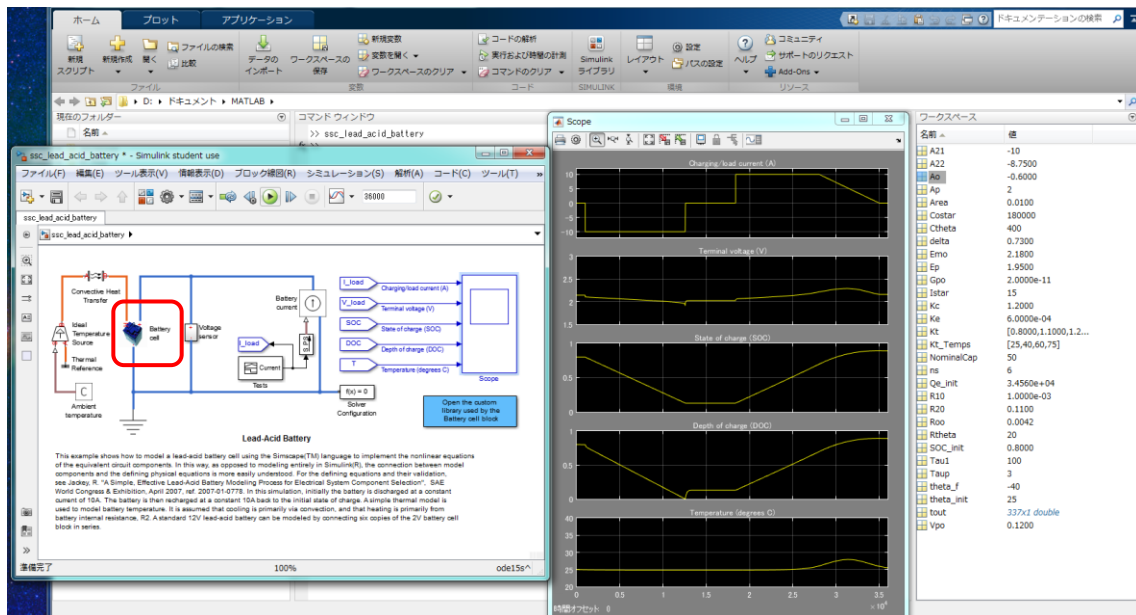


図 1.4.2 鉛バッテリーシミュレーションの例題

(MATLAB の例題, ssc_lead_acid_battery の実行結果)

図 1.4.2 は、そのシミュレーションモデルとシミュレーション実行結果例である。

左側ウィンドウのモデル部分(ブロック線図)の中、赤枠でハイライトした部分が鉛バッテリーのプラントモデル(トップレベル)である。

該当部分を展開すると以下(図 1.4.3)のような構成部品でモデルが作成されていることが分かる。

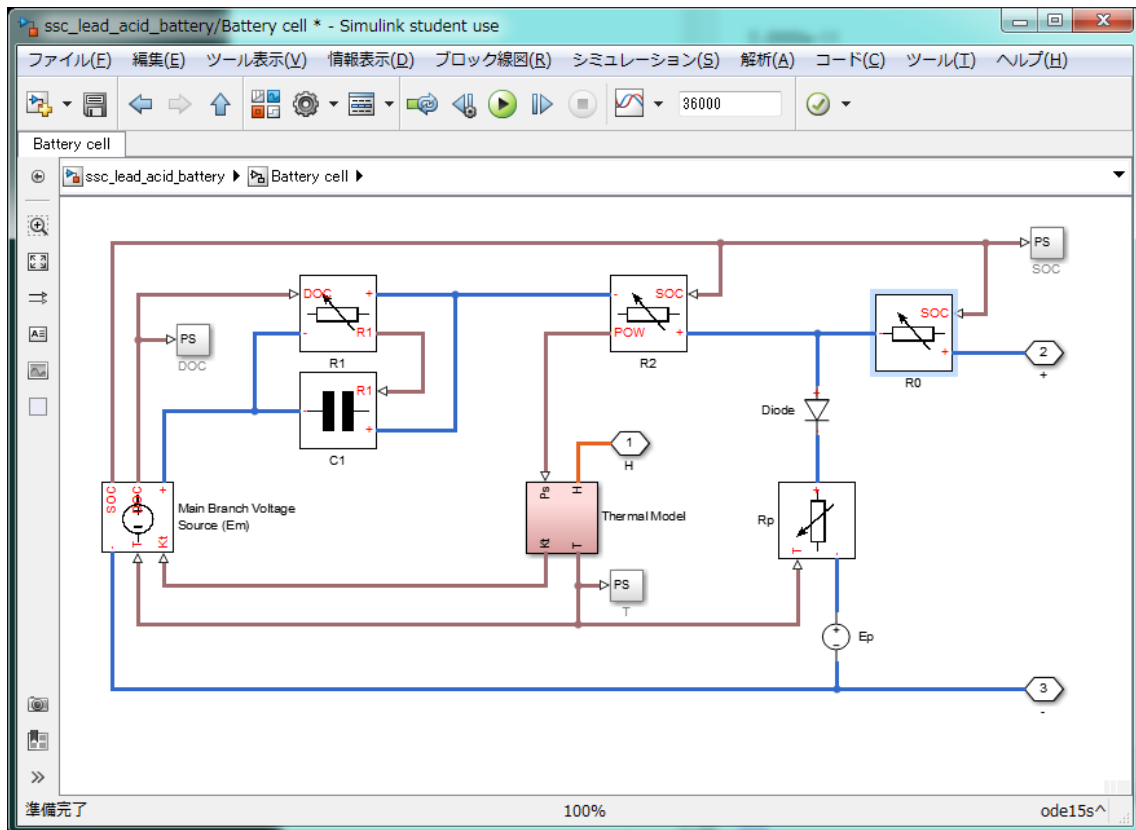


図 1.4.3 鉛バッテリーのプラントモデル例

(MATLAB の例題, ssc_lead_acid_battery の Battery cell 部分を展開した)

左側にバッテリーセルのブロックが配置され、右側に2番の+ (正極) 端子、3番の- (負極) 端子があり、中央部に1番のH(温度)端子がある。4つの抵抗(R0, R1, R2, Rp)、1つの容量(C1)、ダイオード(Diode)、電圧源(Ep)と温度モデルブロック(Thermal Model)がある。詳細は省略させて頂くが、制御モデルによる制御回路は電流駆動であることを前提としていること、+ (正極) 端子から直列に R0, R2, C1 を経由してバッテリーセルに充放電が行われる構成であること、- (負極) 端子からはバッテリーセルに結線が直接接続されていること、温度モデルが考慮されていること、+ (正極) 端子と- (負極) 端子間に並列抵抗 Rp が存在していることが分かる。

鉛バッテリー内部抵抗測定器の開発のゴール形体は、上記を拡張した鉛バッテリーのプラントモデルを作成し、そこに測定結果をモデル化して搭載し、充放電回路の制御モデルと結合してシミュレーション実行を可能とすることである。バッテリーへパルスを与えることでバッテリーの寿命を延ばせることが可能との情報があったことが研究テーマ推進の契機となった。パルスの有無によるバッテリー内部抵抗の変化の相違、バッテリーの保持電圧の相違などを観測する対照実験の必要性を感じた。対照実験を行うためには複数台の内部抵抗測定器が必要である。測定期間も長期に渡ることが想定されたため、内部抵抗測定器を自作し、測定に着手している次第である。シミュレーション駆動による問題分析のステップでは、第1のステップである「プラント(キーデバイス)の特性データを取得する」途上である。鉛バッテリーの内部抵抗測定器の開発は、上記のようなプラントモデル作成を意識して実施してきた。測定は推進中であり、プラントモデルの創出は、データ取得後に実施することになる。データ取得後にモデリングを行ったテーマとして「リチウムイオンキャパシタのモデル化」が挙げられる。次に、そのプラントモデルについて述べる。

リチウムイオンキャパシタは比較的新しいデバイスである。その外観例を図 1.4.4 に示す。



図 1.4.4 リチウムイオンキャパシタの外観例

新規デバイスを使用する際には、予め、そのデバイスの特性を調べある程度見通しを持ってそのデバイスを用いたシステム設計を行うこととなる。そのため、システムの基本設計に先立って、分析フェーズで、大まかな特性を確認・理解することが必要となる。この段階で、シミュレーションに供する簡易なプラントモデルを作成しておくことが特性の確認・理解につながる。大まかなプラント

モデル作成は、デバイスと制御モデルのインタフェース設計も包含しており、制御モデル設計の見直しにもつながる。

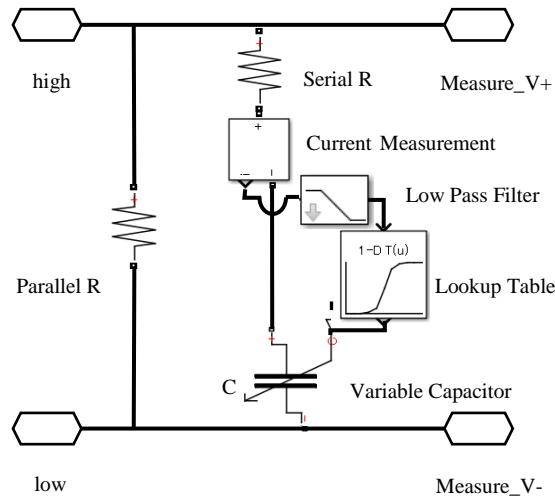


図 1.4.5 リチウムイオンキャパシタのプラントモデル例

図 1.4.5 にリチウムイオンキャパシタのプラントモデル例を示す。この例では、リチウムイオンキャパシタのモデル化を、high(高電位)端子と low(低電位)端子を外部とのインタフェースとし、可変容量(Variable Capacitor C)、C への直列抵抗(Serial R)、C との並列抵抗(Parallel R)で行っている。可変容量の容量値は直列抵抗(Serial R)を流れる電流値に応じた容量値で変化することが測定によって分かったため、測定によって得られた値をルックアップテーブル(Lookup Table)に格納した。直列抵抗(Serial R)を流れる電流値を電流測定器(Current Measurement)で観測し、それをローパスフィルタ(Low Pass Filter)を介してルックアップテーブル(Lookup Table)に入力し、出力として可変容量(C)を調整する構成とした。シミュレーション駆動による問題分析の第2ステップである「モデリング」として、この「リチウムイオンキャパシタのモデル化」を行った。本稿では、第3章でその詳細を述べる。制御モデルは次節で説明するが、このリチウムイオンキャパシタの充放電を行う回路が制御モデルとなる。

上述した2つのケースは、電気・電子デバイスのプラントモデルであり、システム開発・設計は人工物として、これらを有効に使う制御モデルを構築することで進められることになる。システム駆動による問題分析は、システムの分析段階で価値がある方法である。一方で、生体のような自然物に含まれるシステムに関しては、各部分と全体が一体化し相互作用するため、単純にプラントモデルと制御モデルを切り分けることは難しいかと思われる。比較的能動的な部分を制御部と捉え、それ以外の受動的な部分をプラント部と捉えてモデル化を進めざるを得ないと考えるが、この辺りはそれを理解・認知しようとするサイドのスコープによって決まってくるものと考えられる。

本稿では、自然物の例として循環器シミュレータの開発を説明する。

ここで取り上げる循環器系システムは、図 1.4.6 に示すように心臓の左心室とそれに接続する大動脈、その先の末梢動脈を電気回路でモデル化した比較的小規模なものである。

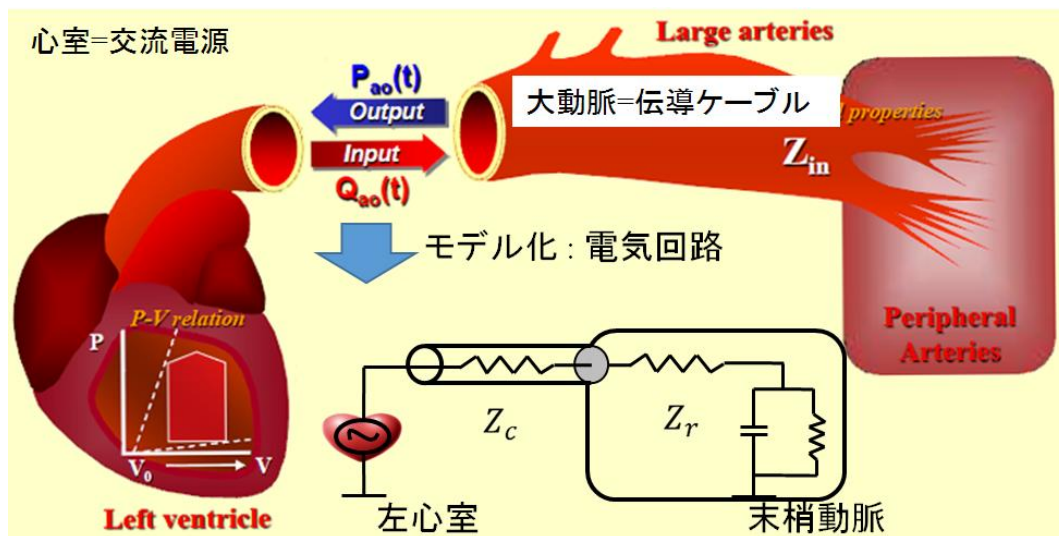


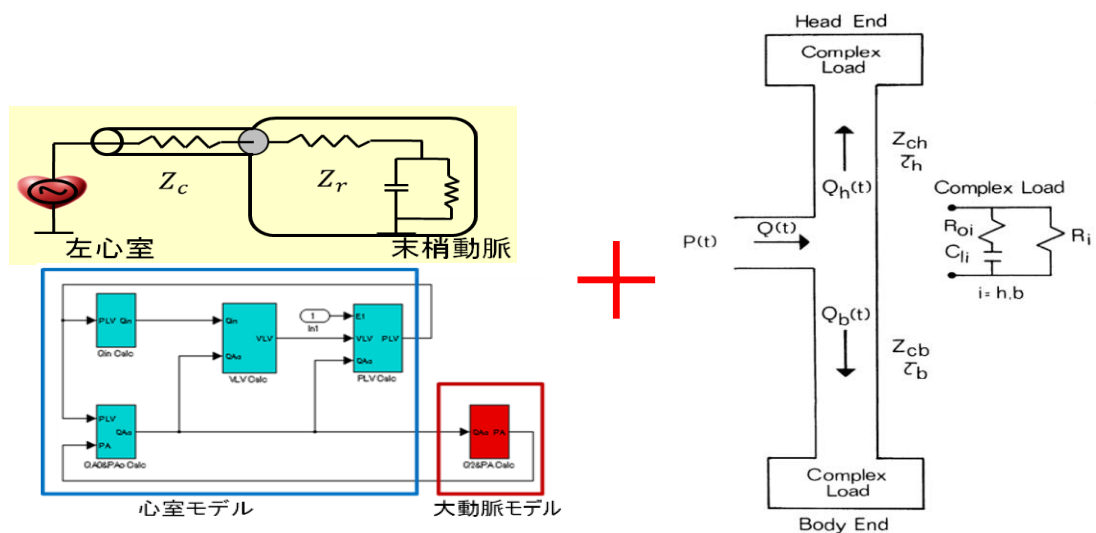
図 1.4.6 循環器システムの例

このモデルは、当初 FORTRAN 言語で作成され、研究室の先行研究によって MATLAB/Simulink プラットフォームに移植された^[6]。そしてシミュレーション駆動による問題分析手法で、心臓左心室と大動脈相互作用を理解する分析が実施されている。この際の大動脈の

モデルは、図 1.4.6 に示すように単一管のモデルであった。従って、心臓の左心室モデル、大動脈とその先の抹消動脈はモデル化が済んでいた。一方で、大動脈は頭部と体部に大きく分岐することは周知の事実であり、それを模擬する非対称 T 字管型の大動脈モデルは数学的なモデルとして既に提案されていた^[11]。心臓の左心室モデルと非対称 T 字管型の大動脈モデルを結合してシミュレートすることは、まさに、シミュレーション駆動による問題分析の典型的なテーマである。

心臓の左心室モデルと非対称 T 字管型の大動脈モデルを結合してシミュレートするモデルを図 1.4.7 に示す。

この例によるシミュレーション、そしてそれによる分析は、シミュレーション駆動による問題分析の第3ステップである「シミュレーションによる問題分析」に対応する。このモデルのうち、非対称 T 字管型の大動脈モデルをプラントモデルとして扱い、心臓の左心室部分は制御モデルとして扱った。



MATLAB/Simulink プラットフォーム

Campbell'90,非対称T字管型モデル

図 1.4.7 心臓の左心室モデルと非対称 T 字管型モデルによるシミュレーション

本論文は、モデルベース設計での分析がターゲットである。その中でプラントに対する、特性データ取得、デバイスモデリング、シミュレーションによる分析の実践による問題分析手法へのアプローチをテーマとしている。

プラントモデリングの工学的なアプローチに関する成書は、幾つか存在する^{[14][15][16]}。

文献[14]では、プラントモデルを物理モデル(ホワイトボックスモデル)と統計モデル(ブラックボックスモデル)とその組合せ(グレーボックスモデル)に大別し、物理モデルは、物理原理から導出されるものであるが、この例として機械系のモデリングと電子回路のモデリングを紹介している。統計モデルは、パラメトリックモデルとノンパラメトリックモデルの分類を紹介している。またモデリングの目的とするスコープにおける、測定した特性データとモデルによる推定特性値の一致性であるシステム同定の方法について紹介している。

文献[15]は、物理モデル(ホワイトボックスモデル)を「考慮する保存則を満たすモデル」とし、実験モデル(ブラックボックスモデル)を「調整パラメタを持つモデル」と定義し、両者の組合せを近似物理モデル(グレーボックスモデル)としている。また、複合物理領域のモデル記述の基礎が紹介され、その例として広範な分野の例題が記載されている。

文献[16]は、2慣性系DCモータモデルの数式モデル化を例題に、そのシステム同定の方法と検証データでの評価方法をサンプルスクリプトによって例示して紹介している。

これらは、私たちのアプローチでの第2ステップである「得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う」スコープに参考になるものである。特に、リチウムイオンキャパシタのモデル化は、これら文献における物理モデルと統計モデルの組合せ(グレーボックスモデル、近似物理モデル)の考え方に合致するモデルである。

1.4.3. 制御モデル

前述のように、本稿では、以下の3つをテーマとして取り上げた。

- (1) 鉛バッテリー内部抵抗測定器の開発
- (2) リチウムイオンキャパシタのモデル化
- (3) 循環器シミュレータの開発

各プラントモデルについては、前節で紹介した。この節では制御モデルについて述べる。

まず、第1番目の鉛バッテリーの場合のプラントモデルは、図 1.4.8 のバッテリー部分以外のものを想定している。前節で紹介した MATLAB/Simulink の例題^[10]の拡大図である。

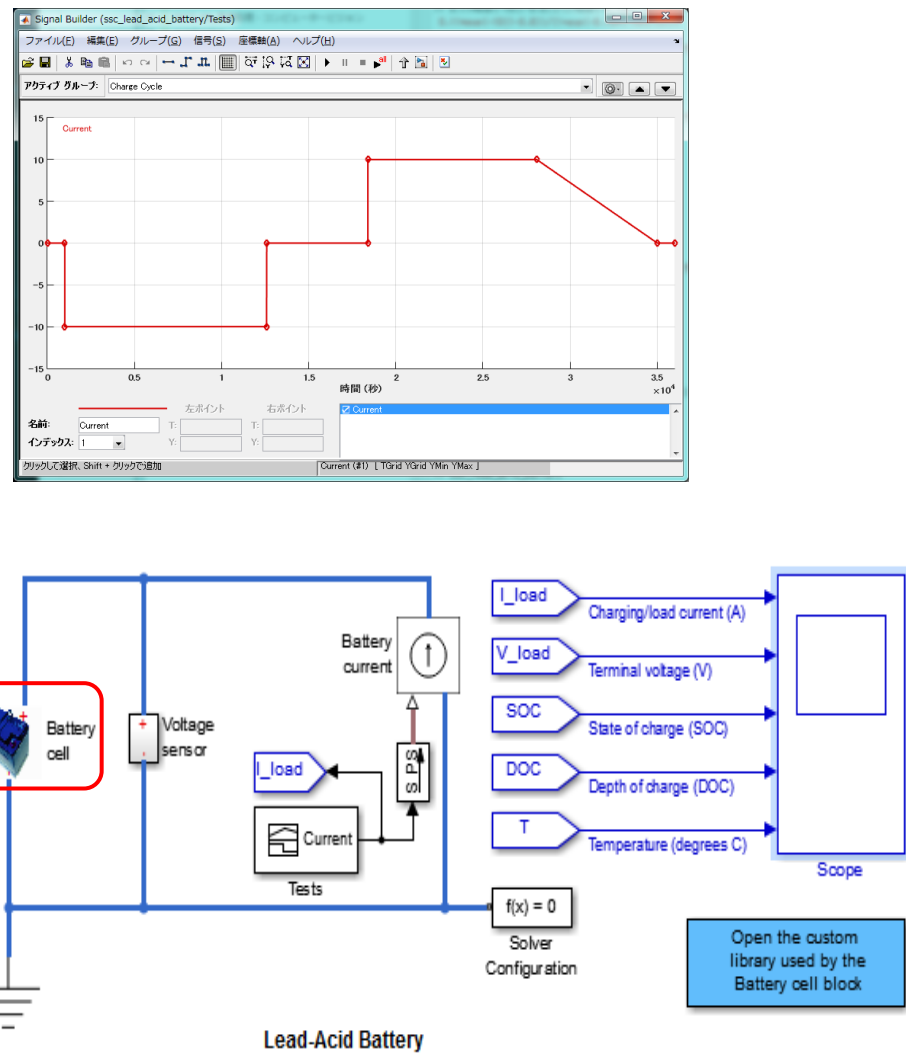


図 1.4.8 鉛バッテリーシミュレーションの例題

左側の理想温度源 (Ideal Temperature Source) に左下の周囲温度値 (ambient temperature) が入力され、温度設定が行われる。鉛バッテリーへの温度伝播は、対流熱伝播器 (Convective Heat Transfer) を通して、実施される。一方で、鉛バッテリーの充放電は、中央の定電流源 (Battery current) を制御することで行われる。その制御シーケンス例は、図 1.4.8 上段に示すようなものである。ここで、マイナスの電流値 (Current) は放電を意味し、プラスの電流値は、充電を意味する。

図中の S_PS なるブロックは、通常の Simulink の信号を物理信号 (Physical Signal) に変換するものである。通常の Simulink の信号は、伝播方向が一方向であるが、双方向の相互作用を扱う物理モデルの部品類 (Simscape Toolbox) を扱う際には、こういった変換器が必要となる^[12]。

第2番目のリチウムイオンキャパシタのシミュレーションモデル例を図 1.4.9 に示す。

このうち、赤い線で囲んだ部分がプラントモデルで、青い枠線で囲んだ部分が、制御モデルである。これは、リチウムイオンキャパシタの放電実験を模したものである。

左側に電子負荷 (Electrical Load) を配置し、これが制御モデルの大半である。放電を行う電流量は、定電流源 (Controlled Current Source) によって実施される。その制御シーケンスは、信号構築器 (Signal Builder) で指定され、放電電流量は、DischargeC (Constant; 定数) で設定できるように組まれている。放電は、デバイスの電圧が一定以下になったら停止する必要があり、その停止条件の値は V_end 定数で設定し、モニタリングされる電圧 V0 との比較で停止条件が成立すると (SW 部分) シミュレーションは停止 (STOP) するように記載されている。

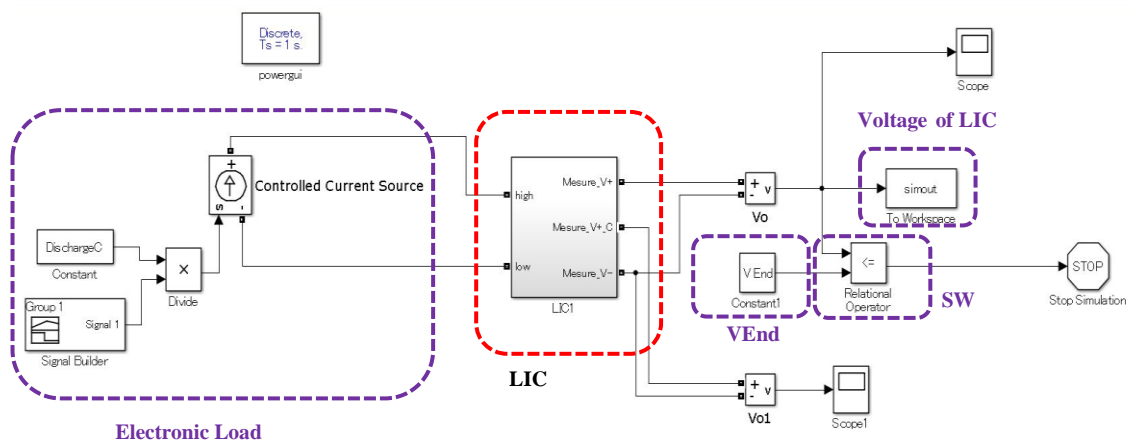


図 1.4.9 リチウムイオンキャパシタのシミュレーションモデル例

第3番目の循環器シミュレータは、大動脈と抹消動脈をプラントモデルとし、心臓の左心室を制御モデルとしている。図1.4.10は、大動脈を単一管で模擬したものである。

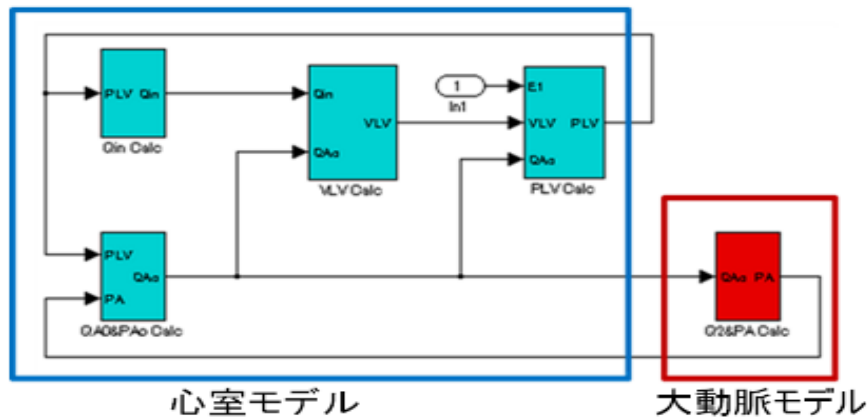


図 1.4.10 循環器シミュレーションのモデル例

これは、図1.4.7の部分拡大図であるが、青い心室モデル部分が心臓で、制御モデルに相当する。赤い大動脈モデルがプラントモデルである。循環器のような自然物をシミュレートする場合は、システム制御工学系の用語であるプラントモデル、制御モデルの名称はふさわしくないかも知れないが、便宜上、そのように区別した。

心臓の左心室をモデル化したコンセプト図を図1.4.11に示す。

これは、血流を電流、血圧を電圧、エラスタンス(弾性)を容量、血流の流体抵抗を電気抵抗、弁(僧帽弁、大動脈弁)をダイオードとして捉えたものである。左心房から左心室への静脈還流を前負荷モデル、MV(Mitral Valve)、流入抵抗 R_{in} で表し、左心房から大動脈への駆出血流を左心室のエラスタンス、内部抵抗 $R_i(p)$ 、大動脈弁 AV(Aortic Valve)で表したものである。

循環器系の例では、完成した制御モデルはそのまま使い、プラントモデルを別なモデルに取り換えてシミュレーションを行った。次にシミュレーションによる問題分析について説明する。

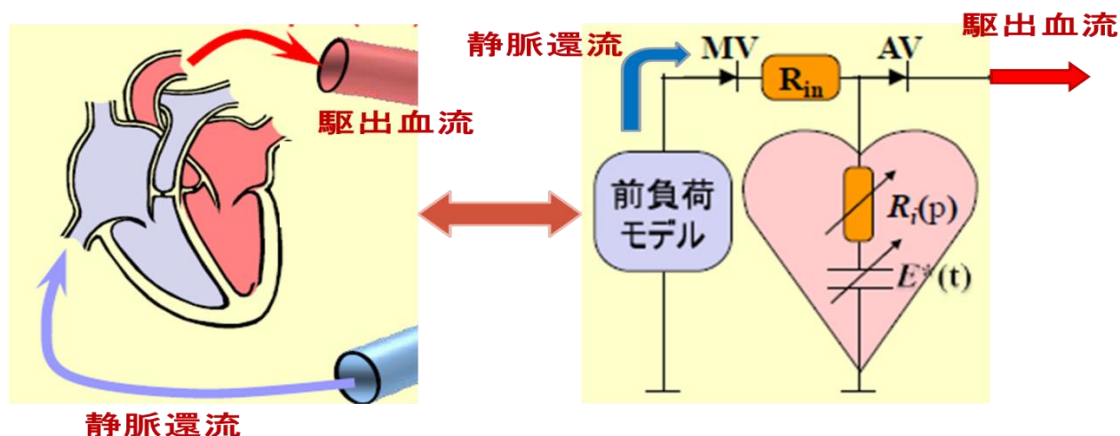


図 1.4.11 心室のモデル化コンセプト図

1.4.4. シミュレーションによる問題分析

1.4 でも述べたが、本論文でテーマとしてアプローチしているシミュレーション駆動による問題分析 (Simulation Driven Problem Analysis) は、対象の分析フェーズにモデルベース設計で用いられる汎用的なモデリングツールを持ち込み、それを共通プラットフォームとして各種のシミュレーションを実行し得る、様々なモデルの結合シミュレーションを狙ったコンセプトの分析手法である。従来の専用シミュレーションツールとの相違は、ここでのモデリングツールは、オブジェクト指向プログラミングによってシミュレーション対象のモデルを構築できるという点が挙げられる。

取り組んだ3つのテーマのうち、(1)鉛バッテリー、(2)リチウムイオンキャパシタの2つのような工業製品(人工物)に対する分析フェーズは、設計・開発工程の初期に限られるケースが多い。段階的詳細化の設計工程に進むと、人工物の問題分析の必要性は減少する。しかし3番目の循環器系のような自然物の問題分析は、それそのものが目的である。サイエンス(理学・科学)分野においては、観測、モデル化、分析のステップを繰り返すスパイラルアップすることで対象物の認知・理解が深まることとなる。エンジニアリング(工学)は、一定の予算の下で見通しを立てながら開発を行う分野であり、経済と結びつきやすく、人類の生活に直接働きかけることができる領域の多くを占めている。そしてサイエンス(理学・科学)で得られた知見を取り入れながら発展して行く。エンジ

ニアリング(工学)とサイエンス(理学・科学)がバランスよく成長してゆく必然性がここにある。シミュレーション駆動による問題分析は、理学と工学の境界領域そのものであると言えるであろう。すなわち、理工学分野の中心テーマそのものの一つであろう。

第1のテーマである鉛バッテリーの内部抵抗測定によって、パルス発生デバイスのバッテリー延命の効果(内部抵抗の増大の抑止)が確認できれば、その効果を鉛バッテリーのプラントモデルに組み込むことができる。制御モデルにパルス発生デバイスの有無を組み込みバッテリー管理システムなどのシミュレーションに応用できるはずである。

第2のテーマであるリチウムイオンキャパシタのモデル化によって、既存のリチウム・イオン・バッテリーのモデルを組み合わせることが可能となる。EV(電気自動車)へのハイブリッド電源システム搭載の効果検討などに応用できると考える。

第3のテーマである循環器系は、取組みフェーズとして、まさにシミュレーションによる問題分析フェーズのものである。文献[6]では、左心室の弾性率(エラスタンス値)の最大値 E_{max} と収縮期のエラスタンスのピークタイミング因子 $DEVF$ (peak DEVIation Factor for E(t))の推定を行っている。これは、特定の E_{max} と $DEVF$ に対応する大動脈入力血圧 $P_{Ao}(t)$ を予めシミュレータで求めておき、その E_{max} と $DEVF$ の値は伏せておいて、大動脈入力血圧 $P_{Ao}(t)$ だけを提示し、血圧が一致する E_{max} と $DEVF$ を探す推定問題である。適当な値でシミュレーションを実施し、大動脈入力血圧を求めて誤差を評価し、徐々に E_{max} と $DEVF$ を答えの値に近づけるものである。実際の測定が困難なパラメタもシミュレーションならではの方法で分析できる例である。本稿では、非対称T字管型の大動脈モデルを導入したケースを第4章で述べる。通常は、測定が困難と思われるものとして、心臓から駆出された血流が抹消動脈から反射した波形を分析できたことを、ここで紹介しておく。詳細は第4章で述べる。

1.5. 本研究の経緯

執筆者が所属した研究室では、理学(科学)分野のテーマや工学分野のテーマの推進を行っている。専門家の知見を頂きながらプラントモデルの開発を行い、それに応じて制御モデルを開発するスタイルが多い印象であった。本研究がアプローチしようとしているシミュレーション駆動による問題解析(SDPA: Simulation Driven Problem Analysis)は、モデルベース設計(MBA: Model Based Analysis)という言葉で医工連携テーマである循環器系のシミュレーション分野に2013年に使われた用語である^[6]。組み込みシステム開発分野の用語であるモデルベース設計(Model Based Design)やモデルベース開発(Model Based Development)の用語から、導出された用語である。このことは、組み込み設計分野で育まれてきたモデリングツール・モデリング技術を情報系のシミュレーション分野であるコンピュータ・サイエンスの領域へ適用するというコンセプトの創造を意味している。

執筆者は、過去の経験からモデルという用語を聞いた際には、第1.4節の冒頭に記載した「武谷三段階論」^[9]を思い浮かべてきた。三段階のうちの3つ目は、モデルの本質を数学表現で抽象化・統一する段階である。この本質論の数式が、多様な分野への応用を可能とする。ただし、本質論は、天才を必要とする分野である。一方で、現代のコンピュータのハードウェアとソフトウェアの発展で、複数のモデルを同一プラットフォーム上で結合することが可能となってきた。モデルの可搬性と可用性が数学による抽象化・統一化の代用に迫る時代となってきた。3つ目を代用し、これらがシミュレーション駆動による問題解析(SDPA)の3段階へのアプローチ方法として捉えた。この三段階モデルのアプローチを道標に、研究室で出会うテーマに臨んだ。

最初に対象とした研究が、循環器シミュレータの開発であった。数式で表現された非対称型 T 字管大動脈のプラントモデルを MATLAB/Simulink 上で開発した。さらに、開発したシミュレータを用いて循環器内の血流・血圧を分析する機会を得た。次にリチウムイオンキャパシタのモデル化を研究テーマとした。実験によって観測されたデータからそのプラントモデルを構築する途上であった。観測データの特徴を把握し、そのモデル化を行った。可変容量を用いることがモデル化のポイントであった。最後に、鉛バッテリーの延命化に関する評価テーマを対象とした。鉛バッテリーの

劣化特性として内部抵抗の上昇が挙げられるが、延命化を行うとされるパルス発生デバイスの有無で内部抵抗変化に差異があるかを対照実験によって比較する必要性に迫られた。6セット程度の測定実験を想定し、内部抵抗測定器を自作し測定を開始した。

以上、異なるテーマではあるが、シミュレーション駆動による問題分析手法として三段階のアプローチを試行し、研究を通して実用に供するか(適合性があるか、有効であるか)、本研究によって検証を行った。

1.6. 本論文の構成

本論文は、緒論でシミュレーション駆動による問題分析へのアプローチの方法論について述べ、以後の第2章、第3章、第4章の3章で取り組んだ3つの研究テーマについて個別に論じる。

第2章では、鉛バッテリー内部抵抗測定器の開発について説明する。これは、問題分析の第1ステップの「プラント(キーデバイス)の特性データを取得する」に対応する。

第3章では、リチウムイオンキャパシタのモデル化について説明する。これは、問題分析の第2ステップの「得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う」に対応する。」

第4章では、循環器シミュレータの開発について説明する。これは、問題分析の第3ステップの「プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレートする」に対応する。」

第5章で、緒論で述べたシミュレーション駆動による問題分析へのアプローチの方法論について評価を行い、結論としてまとめる。

参考文献

- [1] 平澤 章:『オブジェクト指向でなぜつくるか
－知っておきたい OOP, 設計, 関数型言語の基礎知識』日経 BP 社 (2011).
- [2] 浅見 直樹:「(第 1 回)古くて新しい問題,それがソフト危機」(2007),
<<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20070419/268861/>>,
2016 年 10 月 21 日アクセス.
- [3] 久保 孝之:『自動車業界 MBD エンジニアのための Simulink 入門
－4週間で学ぶ Simulink 実践トレーニング』TechShare 社 (2012).
- [4] MATLAB EXPO 2016 JAPAN (2016),
<<http://www.matlabexpo.com/jp/>>, 2016 年 10 月 25 日アクセス.
- [5] 久保 孝之:「MBD の裏表」(2014),
<sec.ipa.go.jp/users/seminar/seminar_tokyo_20140312-03.pdf>,
2016 年 10 月 25 日アクセス.
- [6] Shuji Takahashi, et al., “Modeling, Simulation and Parameter Estimation of the Cardiovascular System by using Model Based Approach”, SICE Annual Conference 2013, pp.493- 500, September 14-17 (2013).
- [7] 石田 修一:「モデルベースデザインによる制御設計」(2015),
<http://iic-hq.co.jp/library/pdf/054_10.pdf>,
2016 年 10 月 25 日アクセス.
- [8] 伊海 佳昭:「集中定数系要素モデルによるディーゼルエンジンモデルの
構築と制御開発への活用」, 第5回 Mathematics for Industry シンポジウム
～ものづくりへの数学的アプローチ～「物理モデルで考える」(2016),
<[http://www.cybernet.co.jp/common/DLink.php?path=/maple/user/seminar/ses2015/
SES2015-C-3.pdf&check=eb3ca3d87c7e3c06f7af39327526fa14](http://www.cybernet.co.jp/common/DLink.php?path=/maple/user/seminar/ses2015/SES2015-C-3.pdf&check=eb3ca3d87c7e3c06f7af39327526fa14)>,

2016年10月25日アクセス(登録ユーザ専用サイト).

[9] 武谷 三男:『弁証法の諸問題』理論社 (1954).

[10] 「鉛蓄電池」,

<http://jp.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples/lead-acid-battery_ja_JP.html>,

2016年10月26日アクセス.

[11] K. B. Campbell, et al.,

“Time-domain formulation of asymmetric T-tube model of arterial system,”

Am J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 258:H1761-H1774 (1990).

[12] 「Simulink と Simscape のブロックを接続するにはどうすれば

良いですか?」,

<<https://jp.mathworks.com/matlabcentral/answers/103585-simulink-simscape>>

2016年10月26日アクセス.

[13] 安孫子 誠也:『アインシュタイン相対性理論の誕生』講談社現代新書 (2004).

[14] dSPACE Japan 監修『モデルベース開発』日経BP社 (2013).

[15] 大島 明:『モデルベース開発のための複合物理領域モデリング』TechShare (2012).

[16] 三田 宇洋:『MATLAB/Simulink によるモデルベースデザイン入門』オーム社 (2013).

[17] 志岐 常正:「複雑系科学である地質学における武谷三段階論の有効性 堆積学, 環境問

題に関わる地質学的例を取り上げて—複雑系科学としての地質学 その3」, 地球科学 70

巻, pp.35-44 (2016).

第2章 鉛バッテリー内部抵抗測定器の開発

本章は、シミュレーション駆動による問題分析の第1ステップ「プラント(キーデバイス)の特性データを取得する」に対する実践の内容である。鉛バッテリーの内部抵抗測定を複数セット・自動・長期間で測定するために、IoTタイプの内部抵抗測定器を開発し、鉛バッテリー内部抵抗という特性データを半年間に渡り取得した。

2.1. 諸言

鉛バッテリーは、車のスターターをはじめとし、電気自動車(EV)や設備のバックアップ供給電源デバイスなどの広い分野で使われてきた。近年、太陽光発電や風力発電など従来のものに代替する発電設備が開発されてきているが、これらは効率的な蓄電デバイスを必要としている。従来の鉛バッテリーに加えて、リチウム・イオン・バッテリーやリチウム・ポリマー・バッテリー、マグネシウムバッテリーが入手可能な時代となった。しかし、現在は、電源蓄積デバイスにおける鉛バッテリーのシェアは90%を超えている。これは、鉛バッテリーのコストの安さと入手性の高さによるものである。しかしながら、鉛バッテリーの劣化はユーザに交換という不可避な重荷を背負わせ、同時にその廃棄による環境への負荷を増大させることになる。鉛バッテリーの電極にパルス波を与えることで鉛バッテリーの寿命が延ばせると、言われて来た。その理由は、パルス波がスムーズな充放電を妨げるサルフェーション現象を改善するからだとされている。しかし、パルス波による鉛バッテリーの延命化は、まだ客観的に証明されていないと考えられる。これは、その測定に数ヶ月の期間を必要とすること、測定が正確で客観性を必要とすることが挙げられる。その点から、本研究の目的は、まず初めに、鉛バッテリーの内部抵抗を測定するデバイスを開発することにある。自動的に、長期間に渡って内部抵抗を測定し、コンピュータサーバ上のデータベースに測定データを保存可能なデバイスが必要である。次に、そのデバイスを用いて測定を行うことである。

一般に、施設において連続充電されるような場合は、鉛バッテリーの劣化は緩やかでパルスデバイスによる性能改善効果も緩やかであると言われている。そのため、パルスデバイスによるサルフェーションの除去は明確には確認されていない。ある研究では効果は見当たらないとされ^[1]、別

な研究では効果が見られると言われている^[2]。短期間で行われた実験によるいくつかの文献は、伝統的なパルス充電で満充電を行うことでバッテリーの寿命が改善すると述べている^{[3][4]}。パルスの適用による効果を評価するためには、数カ月単位の長期間の測定を行う必要がある。鉛バッテリーの劣化の主要な原因は、電極部分への硫酸化結晶の蓄積であり、その現象は内部抵抗の増加として観測される^[5]。従って、鉛バッテリーの内部抵抗を測定し記録するための測定システムを開発する必要がある。この測定システムの測定部は、ワンボードマイコンと幾つかの周辺回路で構成することを想定した。測定においては、内部抵抗とバッテリーの電圧のほかに、室温、湿度を1時間ごとに3週間に渡って測定し、動作確認を行った。測定データは SD カードに記録されると共に、データベースサーバに転送された。さらに、動作状況はウェブブラウザから、いつでもチェックできることを確認した。その後、測定項目に気圧を加えて、内部抵抗測定システムを複数セット用意し、パルスデバイスの有無による対照実験を数か月間に渡って行った。

本章は、以下の構成で記載する。2.2 節で、測定するデータを紹介する。2.3 節で、システム全体の構成と実装、そのサブシステムの詳細について紹介する。2.4 節で、試行実験による、開発した測定デバイスの機能確認結果とその適用性について紹介する。2.5 節で、開発した測定システムを用いた対象実験の内容と測定結果を紹介する。2.6 節で、開発した測定システムと測定結果の検討を紹介する。2.7 節で、結論を導く。

2.2. 測定データ

測定データは、試行実験の際から、鉛バッテリーの電圧、内部抵抗、室温、湿度、測定した日付と時刻を対象とした。その後、対照実験開始時点から、気圧も測定データに追加した。測定は1時間に1回の頻度で行った。2.3.2 節で紹介するように、内部抵抗測定はバッテリーにパルスを印加する。従って、内部抵抗測定が鉛バッテリーの電極に僅かながら影響を与えるかも知れない。この測定では、バッテリーの電極の状態に影響を与えないように、内部抵抗測定の頻度を上述のように大変に低いものに設定した。

2.3. システム構成

測定システムは、図 2.3.1 に示すように、パルス制御サブシステムと測定・記録サブシステムで構成される。パルス制御サブシステムは、バッテリーの電極へ特定のパルスを供給する。測定・記録サブシステムは、バッテリーの内部抵抗と電圧を計測する。このサブシステムは、また、Ethernet へのインタフェースとウェブモニタリングのインタフェースを有する。測定データは、サーバのデータベースに格納され、蓄積されたデータはウェブブラウザからモニタすることができる。さらに、現状のデータは、このサブシステムに直接アクセスすることでチェックすることができる。このシステムはワンボードマイコンである Arduino ボード上に実装した。実装の詳細は、以降の節で説明する。

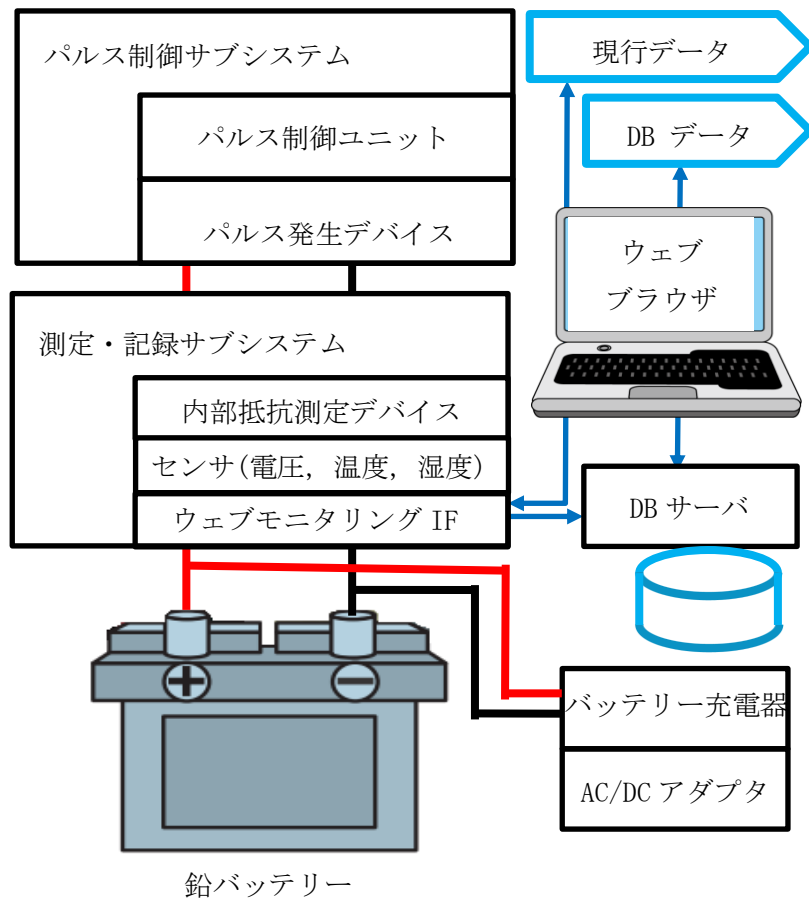
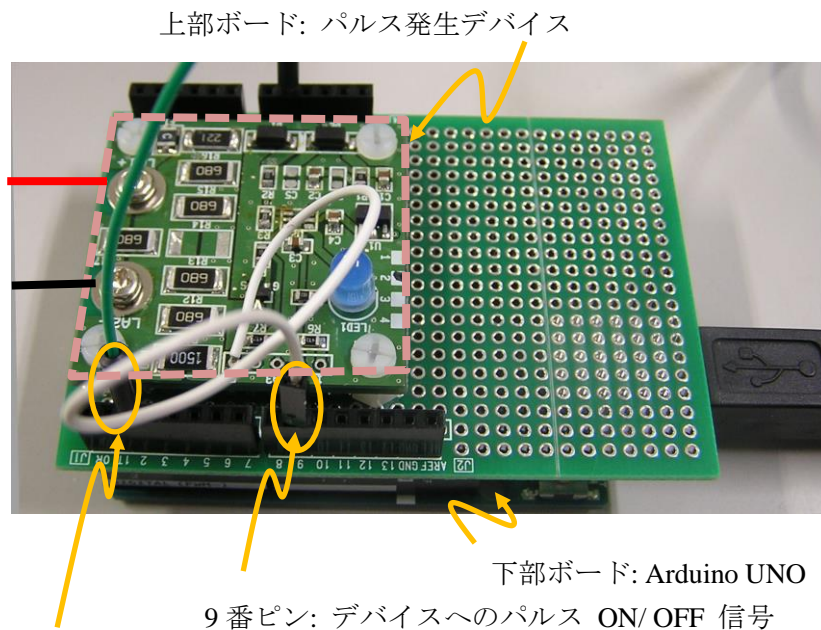


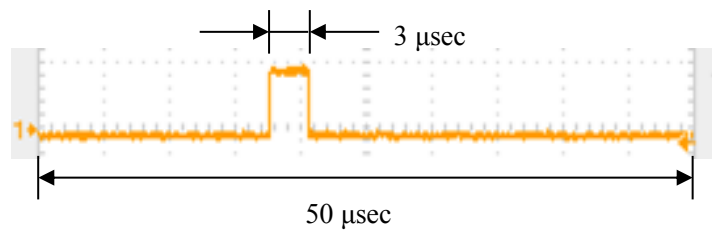
図 2.3.1 システム構成図

2.3.1. パルス制御サブシステム

パルス発生デバイスは、バッテリーの高電位端子と低電位端子間の接続スイッチを ON/ OFF することで、任意のパルスを供給するものである。そしてこのスイッチング制御は、サブシステムに搭載したワンボードマイコン Arduino によって行われる(図 2.3.2(a)).



(a) パルス発生デバイス



(b) 発生信号

図 2.3.2 パルス制御サブシステム

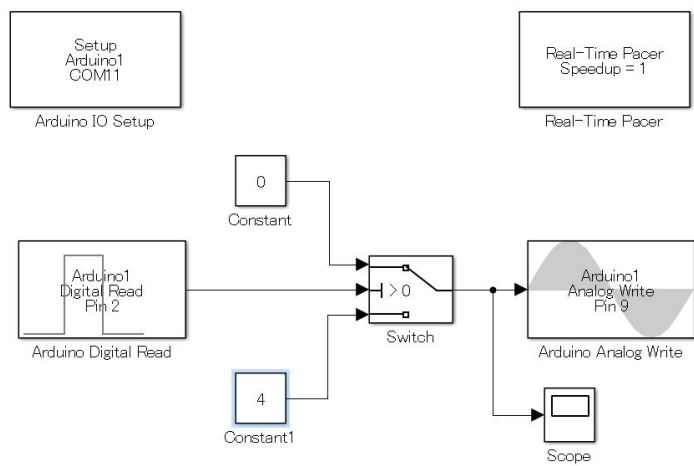
実際にパルスは、Arduino 上のプログラムによって、容易に変更可能である。本稿の以後の実験では、図 2.3.2(b)に示すような、50 μs 周期で 3 μs の幅のパルスを発生させるようにプログラム

のパラメタを設定した. このパルスは, 20KHzの周波数で6%のデューティー比のPWM(Pulse Width Modulation; パルス幅モデューレーション)信号に対応する. 従って, 図 2.3.3(a)に示すように指定レジスタは, 20KHzの周波数の値に設定した.

図 2.3.3(b)に示す Simulink ダイアグラムは, 9番ピンに6%のデューティー比のPWM信号を発生させ, 2番ピンは信号発生の実施/停止信号を受け取るものである. ダイアグラムの左下の定数のブロックは, デューティーレシオに対応し, ここでは”4”に設定した. これは, 上記仕様の信号を発生させる最適な値をオシロスコープのモニタリングを行いながら決定した結果である. この Simulink ダイアグラムを作成後, これをCプログラムに変換し, 測定実験に使用した.

```
// phase and frequency correct mode. NON-inverted
TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1);
// Select mode 8 and select the PWM clock divided by 8.
TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(CS11);
// 20000Hz clock for 9-pin and 10-pin
ICR1 = 50;
```

(a) 20KHz 周期の PWM 向けのレジスタ設定



(b) パルス制御用の Simulink ダイアグラム

図 2.3.3 Arduino の PWM を用いたパルス制御

2.3.2. 測定・記録サブシステム

測定・記録サブシステムは、バッテリーの内部抵抗と電圧、および環境条件を測定し記録する。環境条件は、当初、温度と湿度であったが対照実験時には、別途、気圧の測定・記録も行っている。このサブシステムには Ethernet インタフェースが付属している。システムの基板の写真類を図 2.3.4 に示す。

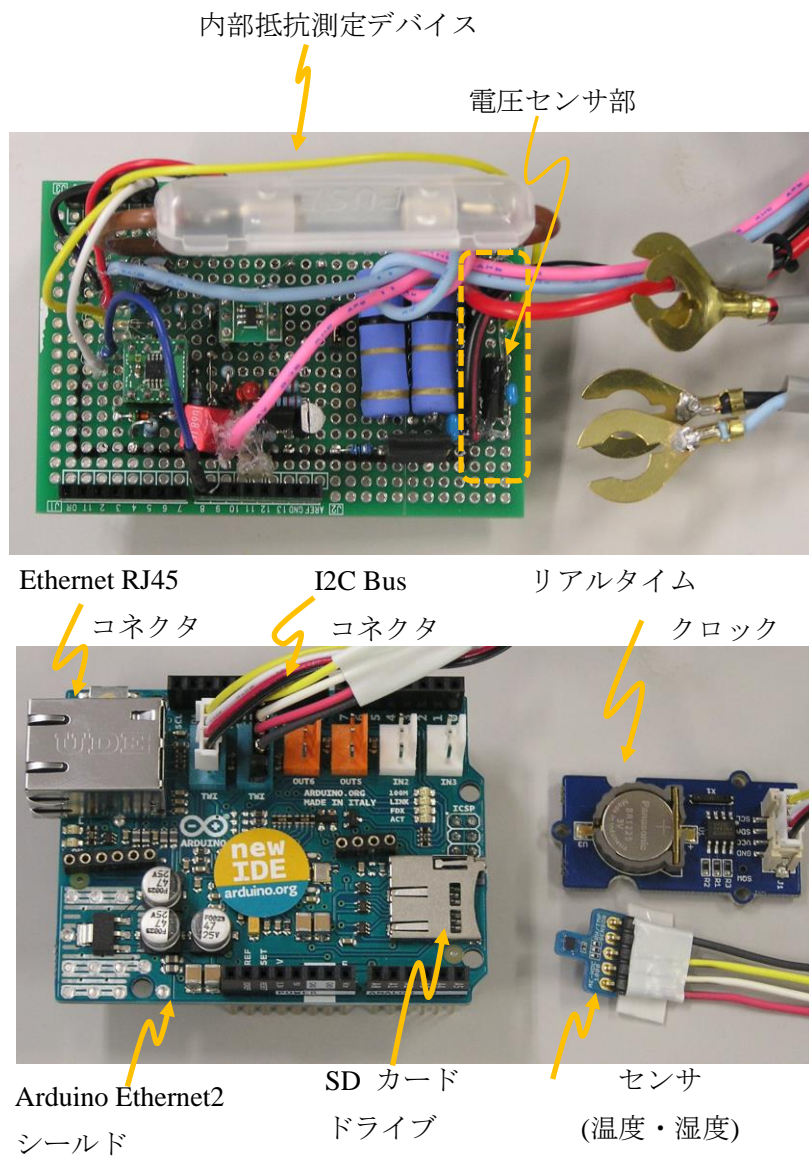


図 2.3.4 測定・記録サブシステム

内部抵抗測定デバイスは、以下に記載する基本的な直流型四端子法を使って実装した。そして、電圧センサもボード上に配置した。温度・湿度センサとリアルタイムクロックは、Arduino の Ethernet shield2 を経由して接続される。このシールド基板は、2つの I2C インタフェースポートを持っており、リアルタイムクロックと温度・湿度センサをこのポートに接続した。さらに、SD カードドライブと Ethernet インタフェースも備えている。

直流型四端子法による内部抵抗測定は、バッテリーの電極間の1つのペア接続にパルス電流を通すことで行う。この際に、別な電極間のペア接続間の電位降下を同時に測定する。内部抵抗測定そのものが、ある一定量のパルス電流を流すので、バッテリーの状態に影響を与えるかも知れない。従って、そこで、この電圧測定の頻度は十分に少ないパルス発生頻度で行った。具体的には、1時間に1回に測定頻度を限定した。ここで、この周期的な測定のトリガとして、CRON ライブラリ^[8]を活用した。測定日付と時間と共に測定データである内部抵抗、電圧、温度、湿度は、SD カードに記録される。そして、これらのデータは、XAMPP サーバ^[9]上のデータベースにも蓄積される。さらに、このサブシステムの動作状況は、ウェブブラウザによって、直接アクセスして確認することができる。Arduino は加速度や赤外線、気圧、速度、GPS、二酸化炭素の濃度などの様々なセンサを有しており、このサブシステムは IoT(Internet of Things)型のデバイスとして、他への応用が可能である。

2.3.3. 内部抵抗測定回路

内部抵抗測定用に設計した回路を図 2.3.5 に示す。この回路は以下に示す3つの部分から成る。

- (a)パルス電流発生回路
- (b)電流測定回路
- (c)電圧測定回路

パルス電流発生回路は Arduino の 8 番ピンの信号で制御される。

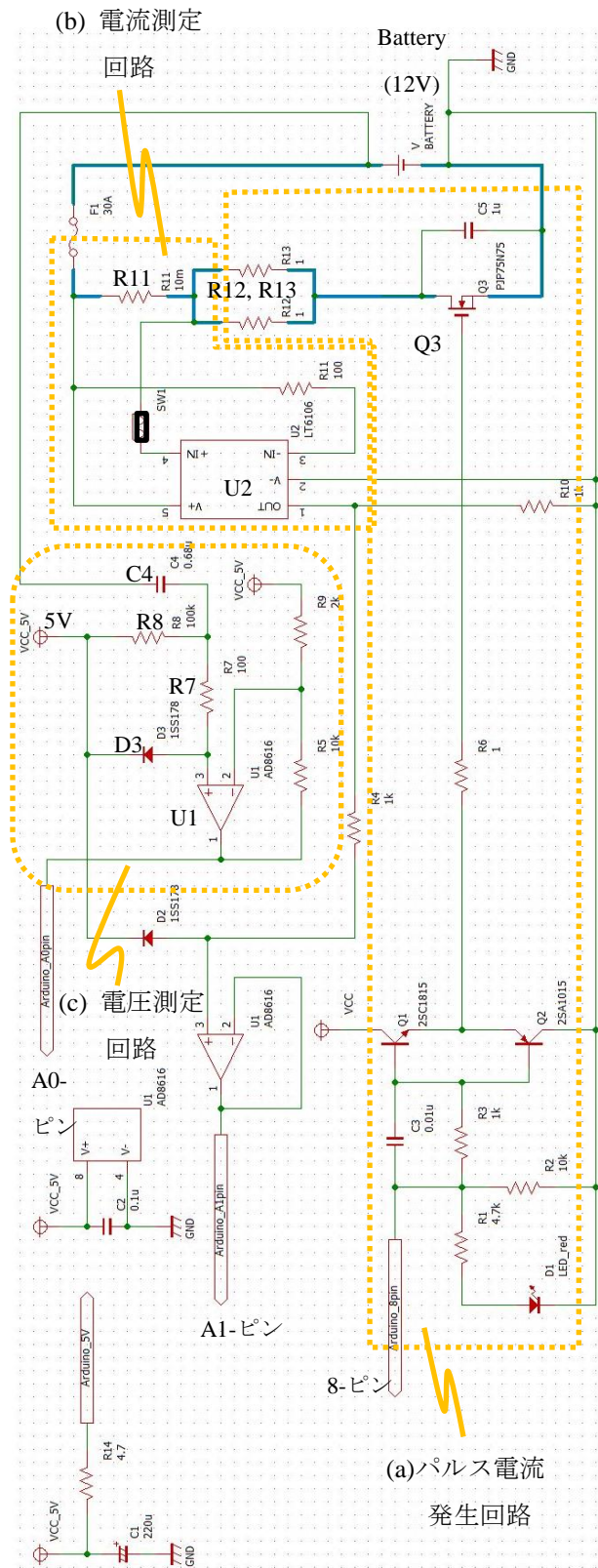


図 2.3.5 内部抵抗測定回路

制御信号は、バッテリーに接続するパワーMOSFET(Q3; PJP75N75 もしくは FKI06075)を駆動し、約 140 μ s 幅のパルス電流を発生させる。パルス電流は、バッテリーに接続する 0.5 Ω (R12 と R13 の並列抵抗)の抵抗を貫通する。この測定では、約 20 A のパルス電流がバッテリーに流れる。

この電流は、シャント抵抗 R11(10 m Ω)にも流れる。この電流は、シャント抵抗両端の電位差を電流センサで測定する。電流センサとしてLT6106(U2)を用い、この信号を 10 倍に増幅した。得られた電流の値は、基板出力として A1 ピンへ出力される。Arduino は 10 ビットの解像度の AD 変換器 (アナログ・デジタル変換器)を保有しており、この解像度は電圧で約 5 mV である。電流に関する解像度は 50 mA である。これは、電流の 0 A から 50 A を電圧の 0 V から 5 V に対応させているからである。

電圧の測定は、容量 C4 を用いて、バッテリーの 12 V の電圧を Arduino の 5 V にシフトして測定する。バッテリーの電圧降下は容量 C4 を通して検出できる。C4 の片方の端子はバッテリーに接続しており、その初期値は 12 V である。C4 の反対側の端子は電圧センサに接続しており、この初期値は 5 V である。ここで、パルス電流がバッテリーに発生すると電圧が降下する。この電圧降下は、センサ(Op-Amp, AD8616(U1))で検出され、測定値は A0 ピンから出力される。ここで、R8 は VCC へのプルアップ抵抗で、R7 はセンサの入力インピーダンスである。ダイオード D3 はセンサが高電圧になることを保護する。電圧降下は 6 倍に増幅され、電圧の解像度は 0.8 mV である。

2.3.4. 内部抵抗測定手順

内部抵抗測定手順を図 2.3.6 に示す.

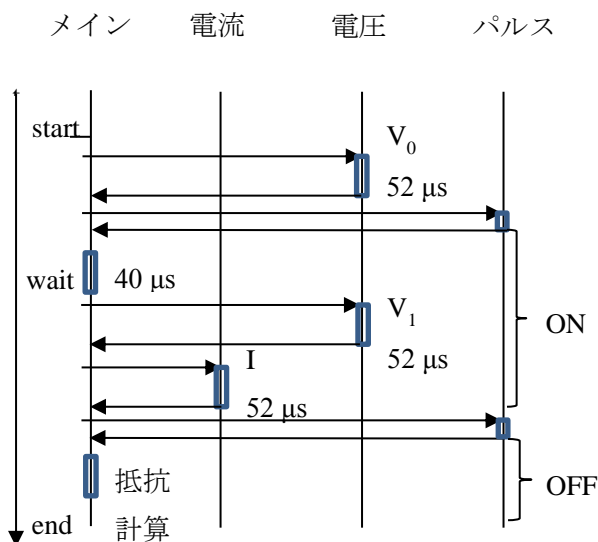


図 2.3.6 内部抵抗測定手順

バッテリーの初期電圧 V_0 は, A0 ピンを通して測定される. そして, バッテリーにパルス電流が流される. 引き続き, 電流が落ち着くまで $40 \mu\text{s}$ 待機し, A0 ピンを通して降下した電圧が V_1 を測定する. 次に, 電流 I が A1 ピンから検出され, そしてパルス電流のスイッチが切断される. これらの測定から, 内部抵抗 R_{int} は, 数式(2.3.1)で求められる.

$$R_{int} = \frac{V_0 - V_1}{I} \quad (2.3.1)$$

この測定セットを 10 回繰り返し, その平均を採用する. Arduino のデフォルトでは, AD 変換に $104 \mu\text{s}$ を必要とする. これは, AD 変換に 13 サイクルを必要とするからである(ここで 1 サイクルは, 128CPU クロックに対応する). しかし, AD 変換の時間を縮めるため, 図 2.3.7 に示すように ADCSRA レジスタの ADPS 部分を設定変更し, 1 サイクルを 64 クロックに変更した^[10]. この方法は,

分周比の設定と呼ばれる。以上の処理全体を Arduino 上で実行できるように C 言語に変換し、実装した。

```
// set all 0 to ADPS in ADCSRA resistor
ADCSRA = ADCSRA & 0xf8;
// set 64(110) to ADPS : set Division Factor 64
ADCSRA = ADCSRA | 0x06;
```

図 2.3.7 Arduino への分周比設定

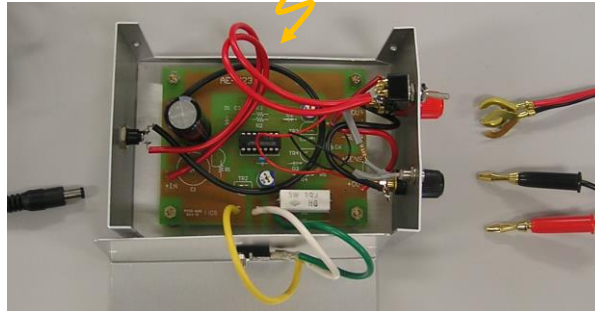
2.3.5. バッテリー充電器

バッテリー充電器は、鉛バッテリー用の LM723 互換・精密電圧レギュレータを用いるキットを用いて実装した^[11]。その写真を図 2.3.8 に示す。

このボードは、5 Ω の出力抵抗を有し、2 A までの電流で 13.68 V までバッテリーを充電する。このキットは、フローティング充電をサポートする。AC/DC アダプタとして、19 V / 3.4 A のものを接続した。

バッテリー充電キット

(精密電圧レギュレータ LM723 コンパチブル)



DC IN

DC OUT (5Ω)

(19V 3.4A AC/DC adapter)

(13.68V, 2A (Max))

図 2.3.8 バッテリー充電器

2.3.6. システムの組立て

図 2.3.9 に組立てたシステムの写真を示す。

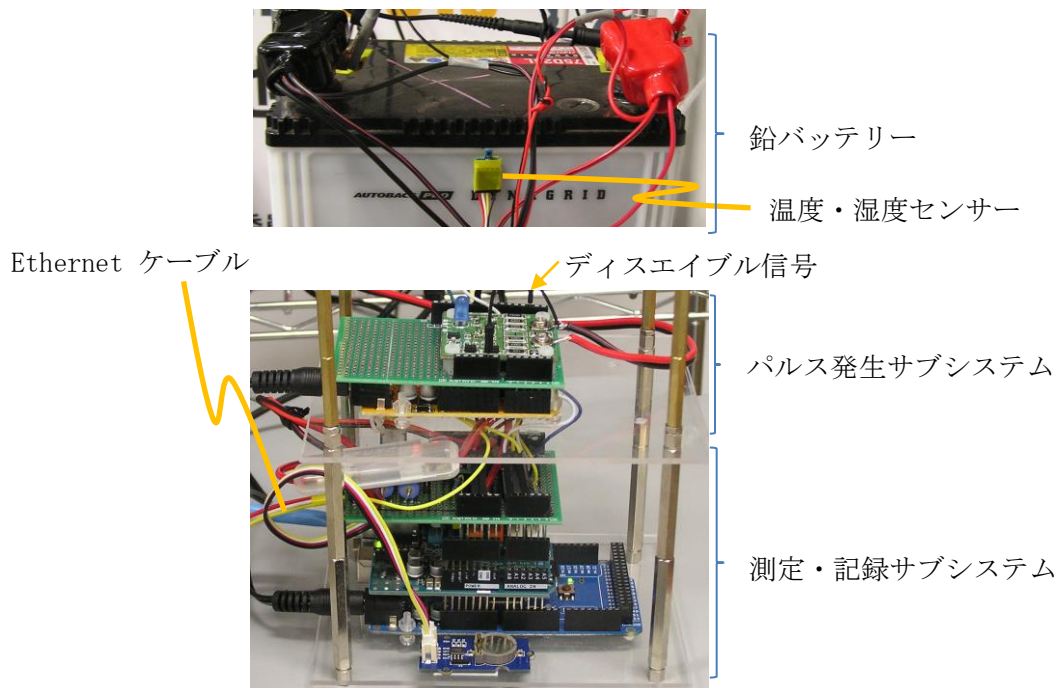


図 2.3.9 組立てたシステムの写真

4組の配線がバッテリーに接続されている。1つ目は、電源供給用である。2つ目は、バッテリーにパルスを供給するためのものである。残りの2つは、内部抵抗測定用である。温度・湿度センサをバッテリーケースの側面に貼付してある。パルス制御サブシステムと測定・記録サブシステムは、1本の配線で接続されている。これは、内部抵抗測定時にはパルス発生デバイスに動作を停止する信号を送付するためのものである。

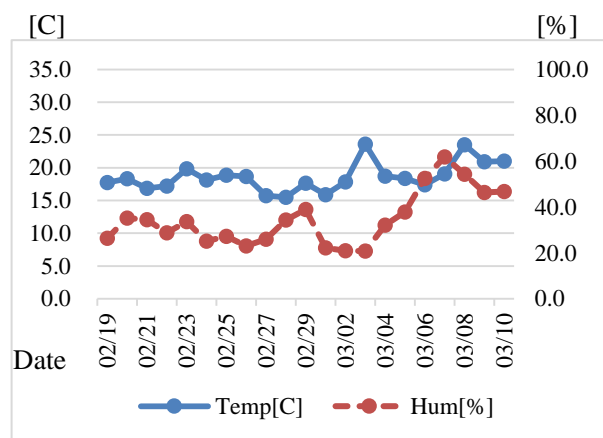
2.4. 試行測定と対照実験結果

2.4.1. 試行測定とその結果

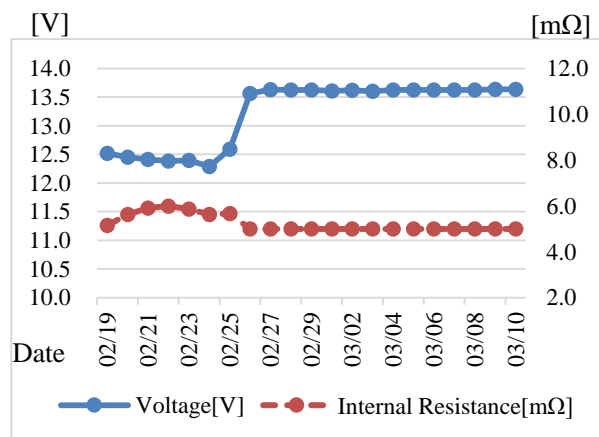
試行測定実験で、開発した測定デバイスの機能と適応性の検証を行った。一般的な車用のバッテリーを検証に用いた。このバッテリーは高性能タイプのもの(型番はD23L)で、内部抵抗は5～6 m Ω である。開発したシステムは予定通りに動作した。

以下に測定した結果を記載する。

測定結果を図 2.4.1 に示す. 図 2.4.1(a)は測定条件を示す. すなわち, 3週間に渡る温度と湿度の測定結果である. 図 2.4.1(b)は, バッテリーの電圧と内部抵抗を示す. これらは, 1時間に1回の頻度で測定し, 日を単位に 24 時間で平均化したものを表示している. 図 2.4.1(b)において, 2/24 から 2/26 にかけて, 電圧が 12.3 V から 13.5 V へと上昇する現象が観測された. そして, それに対応して内部抵抗値が 5.6 から 5.0 mΩ に減少した. この現象は, バッテリーが満充電になったことによるものとして説明できる. もう少し詳しく述べると, 満充電の前は, バッテリー充電器からの



(a) 温度と湿度の測定結果



(b)電圧と内部抵抗値の測定結果

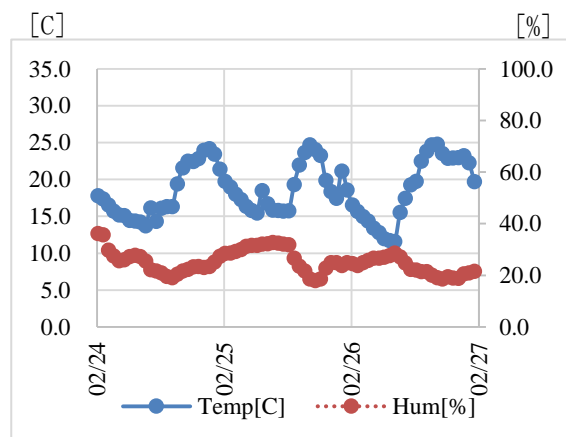
図 2.4.1 日を単位とした測定結果

5 Ω の出力インピーダンスで約 200 mA の電流で充電が行われ, 満充電によって約 1.2 V の電圧上昇が観測されたと言える. 満充電で電圧の降下が消えたということである. 2/24 から 2/27 の

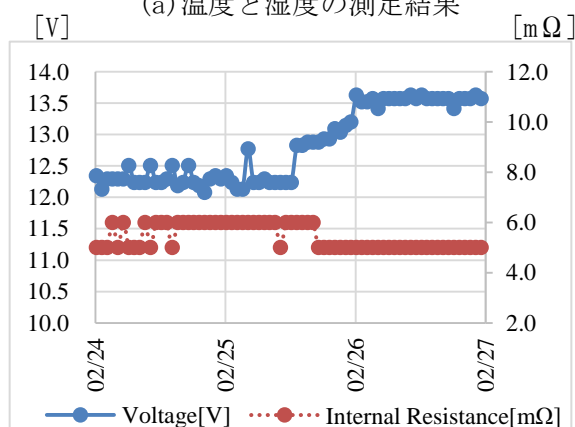
時間ごとの測定結果を図 2.4.2 に示す。このグラフはバッテリーの電圧が徐々に低下していることを明確に示している。この観測だけでは、1週間のフローティングチャージでの電氣的なパルスの有無によってこの現象を説明するには不十分である。この問題を確認するためには、異なるパルス条件やパルスデバイスの有無などの多くの比較実験が必要である。なお、ここで使用したパルス発生デバイスは、後述の対照実験で使ったデバイスの中では「弱」の分類のパルスを発生するデバイスである。

ここでの結果としては、開発した測定デバイスが、この実験に有用であることが結論づけられる。

試行測定について、その結果をまとめておく。



(a) 温度と湿度の測定結果



(b) 電圧と内部抵抗値の測定結果

図 2.4.2 時間を単位とした測定結果

まず、IoT タイプデバイスの鉛バッテリーの状態を測定する測定システムを開発した。これは、1 時間に1回の頻度で測定環境データと一緒にバッテリーの内部抵抗値と電圧を測定し、記録するものである。これは IoT タイプのものであるので、測定したデータはデータベースに転送して蓄積される。そしてバッテリーの状態は、いつでもウェブブラウザからモニタリング可能である。試行実験として、3週間の測定を行い、内部抵抗の低下とバッテリー電圧の上昇を観測することができた。電気的なパルスを与えてバッテリーの寿命を延命することに関しては、このデバイスを使用した多くの対照実験が必要である。

後の課題を以下に纏めておく。

開発した内部抵抗測定デバイスは、標準的な測定デバイスと比較して、その精度を確認すべきである。さらに、内部抵抗計算ソフトウェアを改良して数値の小数以下の有効数字を使えるようにして、内部抵抗の小数点以下の少しの変化も測定できるようにすべきである。また、鉛バッテリーは温度変化に敏感であるとされており、内部抵抗の温度補正も検討すべきである。バッテリーの測定は数カ月単位で継続すべきである。そのため、システムの安定性も確認されなくてはならない。これらが行われて、パルスによるバッテリーの延命が正確に適切に行われ得る。

2.4.2. 試行測定の課題対策

以下、試行結果で分かった今後の課題に関して対応状況を記載しておく。

(1) 内部抵抗測定の精度確認

開発した内部抵抗測定デバイスの測定精度を市販の内部抵抗測定器と比較することで行った。使用した市販の内部抵抗測定器は(株)東京デバイセズの IW7807 で、交流4端子法を用いた内部抵抗計測器である。測定中の写真を図 2.4.3 に示す。

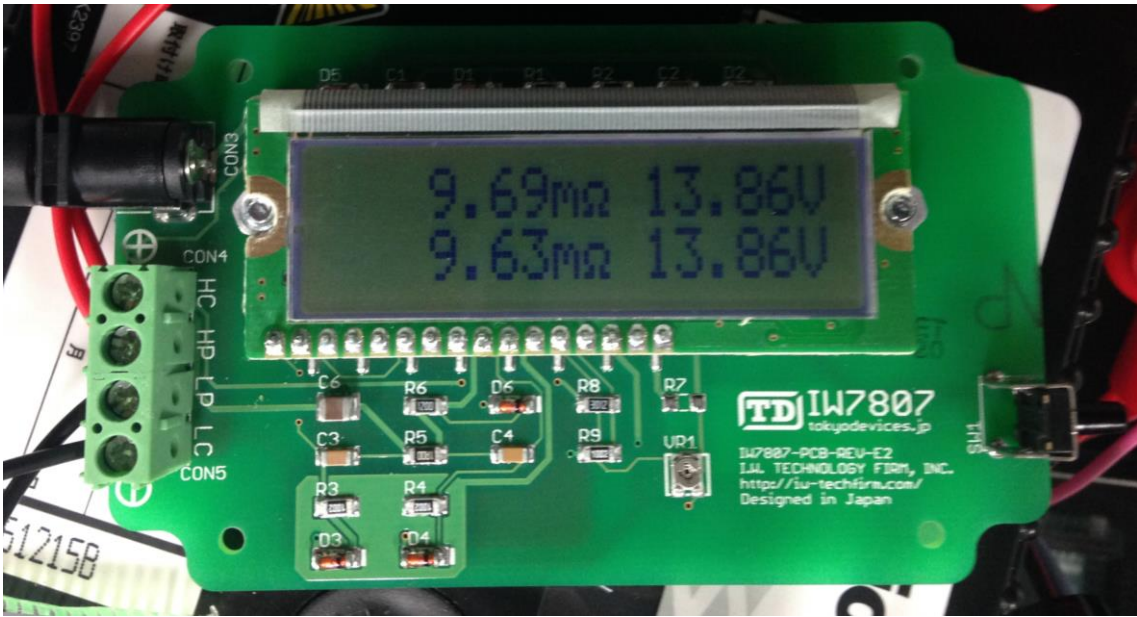


図 2.4.3 市販の内部抵抗測定器((株)東京デバイセズ IW7807)

開発した内部抵抗測定デバイスの精度比較を行った結果を表 2.4.1 に示す。

表 2.4.1 開発した内部抵抗測定デバイスの精度評価

No	測定年月日	バッテリー 形式(使用年)	市販測定器 測定値	開発品 測定値	差	誤差
1	2016/02/19	D23L(2年)	5.5 mΩ	6 mΩ	+0.5 mΩ	9.1%
2	2016/03/02	B19L(5年)	32.0 mΩ	36.0 mΩ	+4.0 mΩ	12.5%
3	2016/06/22	B19L(新品)	9.6 mΩ	10.7 mΩ	+1.1 mΩ	11.5%

概ね 10%程度の精度であり、測定値が市販品よりも大き目になる傾向がある。

なお、No.2 に関して、後述の内部抵抗計算ソフトウェアの整数計算を浮動小数点計算に変更したところ、内部抵抗計算値が+3.0 mΩ 程度シフトした経緯がある。No.2 の開発デバイスの直接の測定値は 33 mΩ であり、上記の表は、これを補正済であることを付記しておく。

本研究での内部抵抗測定は、その絶対値ではなくて、継続的な変化傾向が分かればよいので、この精度で十分であると判断した。

(2) 内部抵抗測定ソフトウェアの修正

試作段階では、作成した内部抵抗測定デバイスに組込んだソフトウェアの内部抵抗計算が整数演算で実施されていた。内部抵抗 R_{int} の計算は以下の式で実施される。

$$R_{int} = \frac{\Delta V}{I}$$

ここで、 ΔV はバッテリーの電圧変動値で、 I はバッテリーの貫通電流である。

使用したバッテリーの内部抵抗が低く貫通電流 I が大きい場合は誤差影響が少ないが、貫通電流 I が小さい場合は整数演算の結果によって誤差が大きくなる可能性がある。

上記の計算を浮動小数点計算で行うようにソフトウェアの修正を行った。

なお、表 2.4.1 の B19L(5 年)は、試行と並行に測定を開始し、測定条件を変更した際に、組み込みソフトウェアの変更を行った。次節での測定結果は、補正済の値を使用している。

(3) 内部抵抗の温度補正

鉛バッテリーの内部抵抗は、温度に敏感である。温度補正方法に関しては、まずは 25 °C を中心に温度が1度上がるごとに+1.2%/°C のリニアな補正を行う方法を採用した(0 °C から 25 °C への上昇で+30% に相当)。測定しながら、実際の温度変動に対して、補正が行えるように、組み込みソフトウェアには補正は組込まず、データ解析の際に補正値を調整できるように準備することとした。

2.4.3. 対照実験とその結果

2.4.3.1. 対照実験の組合せ

パルス発生デバイスの有効性を調べるために、同じメーカーの鉛バッテリーを複数用意して、パルス発生デバイスの有無やパルス強度の違いによる内部抵抗の変化、電圧の変化を測定する対照実験を行うこととした。

パルスデバイスは、パルスデバイス無し/弱いパルス有り/強いパルス有りの3段階のケースを考え、バッテリーは新品/中古の2段階のケースを考えた。この組み合わせで、6セットのバッテリーと測定システムによる実験が必要になる。試行実験で使用した高性能バッテリーは、中古バッテリーを提供する車の解体業者を見つけて入手したが、新品の入手が困難なことが分かった。試行推進中に、ご協力頂いた方から中古バッテリーPanasonic B19Lの提供を受け、その新品の価格が安価であること、中古品の入手性が良いことを確認し、このバッテリーを対照実験に用いることとした。最初に入手した中古バッテリーは使用期間が5年以上のものであったが、後から入手した2個の中古バッテリーは使用期間が1年未満のもので新品に近いものとなってしまった。パルス発生デバイスは、新品バッテリーには弱いものと中程度のパルス付与、中古バッテリーには中程度のパルスと強いパルス付与の組合せを用いることとした。以上を表 2.4.2 にまとめて掲載する。

表 2.4.2 対照実験の組合せ表

対照実験の組合せ表		パルス発生デバイス			
		なし	あり:弱 35 mA	あり:中 40 mA	あり:強 45 mA
バッテリー	新品	○	○	○	—
	中古品	○(5年) ○(1年)	—	○(1年)	○(5年)

パルスデバイスに付記したアンペア数は、バッテリーを貫通する電流の平均値を示す。電流パルスは、 $50 \mu s$ の周期で $3 \mu s$ だけ付与するように現状設定では制御している。45 mA のケースは、瞬間的にパルス電流が 750 mA 流れるデバイスを使用しており、これを平均すると 45 mA ($=750 \times 3 \div 50$)となる。

ここで、中古品バッテリーに対して、パルス発生デバイスが無い場合のケースは、5年使用のものと同1年未満使用の2つの測定を行っている。5年使用の中古バッテリーに対しては、前節の測定試行の直後(2016年3月初旬)に測定に着手した。一方で1年未満の中古バッテリーは、新品同様に劣化が少ないことが入手時点で分かってきた。そのため、パルス発生デバイスの有無に関わらず、数カ月単位の実験では、内部抵抗増加などの傾向をモニタリングできない可能性があることが分かってきた。そこで、5年経過の中古バッテリーをパルス発生デバイスありの組合せ実験に用いることとし、1年未満使用の中古バッテリーをパルス発生デバイスなしの組合せ実験に用いるようにした。同じ組み合わせに2つの中古バッテリーを使用したのは、上記の理由による。

2.4.3.2. 対照実験の経緯

表 2.4.2 の中古品(5年)-パルス発生デバイス「なし」の組合せは、協力者から中古バッテリーの提供を受け、最初に着手した実験である。これは、フロート充電しながら放置してもバッテリーが劣化することを確認するための実験である。まず初めに、この実験を2016年3月上旬に開始し、7月中旬まで測定を継続した。その後、このセットにパルス発生デバイスを追加し、中古品(5年)-パルス発生デバイス「あり:強」の組合せに転用した。その他は、新品3台、中古品(1年)2台の実験を6月から7月に掛けて開始している。

実験期間を、表 2.4.3 に追加記載する。

表 2.4.3 対照実験の組合せ表(測定期間を追記)


対照実験の組合せ表		パルス発生デバイス				
		なし	あり:弱 35 mA	あり:中 40 mA	あり:強 45 mA	
バッテリー	新品	○ 2016/6/23-	○ 2016/7/15-	○ 2016/6/23-	—	
	中古品	○(5年) 2016/3/2- 2016/7/12	○(1年) 2016/6/27-	—	○(1年) 2016/6/27-	○(5年) 2016/7/13-

中古品(5年)-パルス発生デバイス「なし」と中古品(5年)-パルス発生デバイス「あり:強」の組合せは、後の節で連続したデータを紹介するケースもあるが、2016/7/12 までと 2016/7/13 以降で条件が変わっている測定である。

その他、気圧のモニタリングも 2016/6/24 から開始している。試行測定が終わり、その内容を発表する学会に投稿した段階で、レビュアーの推奨コメントに気圧の測定・記録も行うことが記されており、気圧モニタリングを開始した経緯がある。

こちらは、Arduino を用いた IoT デバイスと XAMPP サーバによるデータベースを流用してシステム構築を行った。測定期間と使用センサを表 2.4.4 に掲載する。

表 2.4.4 気圧モニタリングの期間とセンサ

測定項目	測定期間	センサモジュール	センサ型番	外観
気圧	2016/6/24～	GY-68 Arduino	BMP180	

2.4.3.3. 対照実験の結果

中古品(5年)-パルス発生デバイス「なし」と中古品(5年)-パルス発生デバイス「あり:強」の組合せに対する実験結果を図 2.4.4 に示す。中央部の赤い線よりも左側(2016/7/12 まで)がパルス発生デバイス「なし」で、右側(2016/7/13 以降)がパルス発生デバイス「あり:強」である。

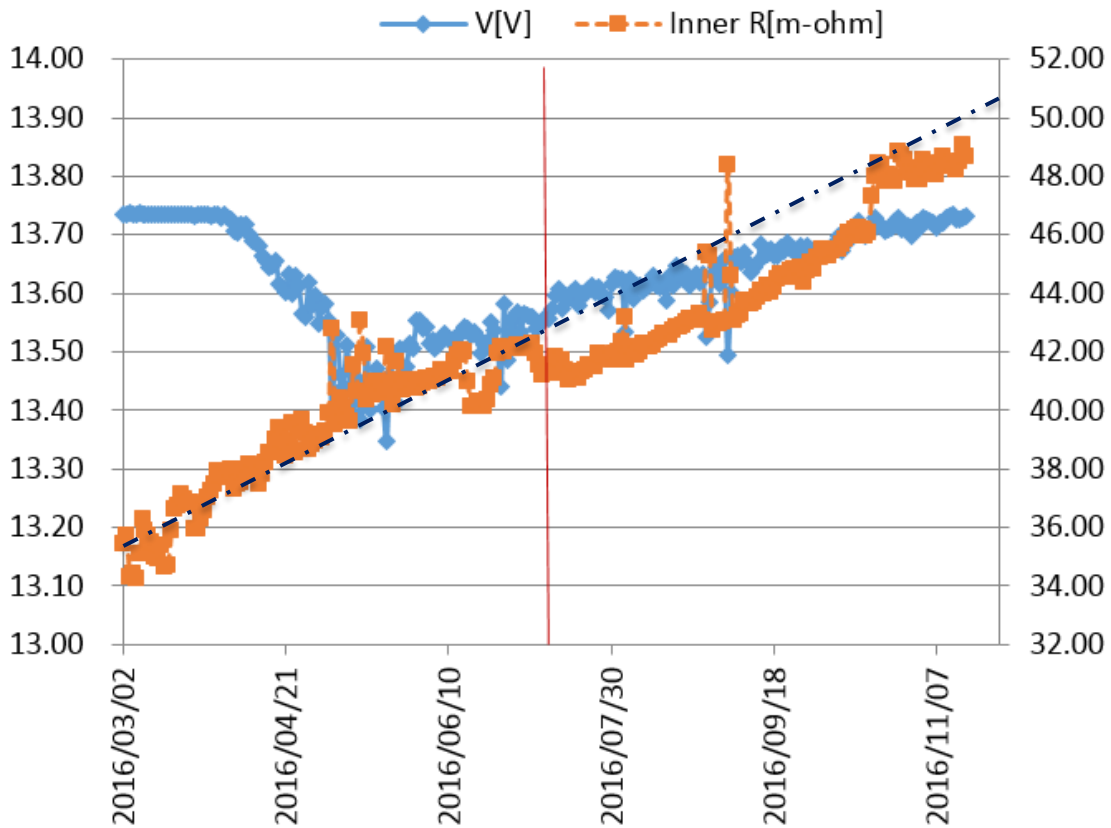


図 2.4.4 測定結果—中古品(5年)の内部抵抗と電圧

(左側はパルス発生デバイス「なし」で、右側はパルス発生デバイス「あり」)

使用したバッテリーは、かなり劣化が進んでいるものである。内部抵抗(オレンジ色;図中で Inner R)は、徐々に値が大きくなっている。大まかな傾向から、パルス発生デバイス「なし」の際の直線補助線(図中の破線)を引き、右側に延長した。パルス発生デバイス「あり」で、内部抵抗の劣化が減速している様子が伺える。このバッテリーの劣化傾向からすると、2ヶ月程度の延命が図られたと考える。だが、10 月末に内部抵抗の急激な上昇が観測されている。その後の内部抵抗上昇は抑え

られているようであるが、継続観察が必要である。ところどころに、内部抵抗値に小さなピークと電圧のディップが観測される。測定デバイスの一時的な誤動作とも考えられるが、これに関する検討は後述する。

一方で、電圧に関しては、4月に電圧低下が発生し、徐々に電位を回復している様子が伺える。電圧の回復傾向は、パルスデバイスの有無に関わらず連続して継続している。この現象は、連続充電による満充電化の効果によるものと思われる。

図 2.4.5 に、この期間の温度と湿度の測定結果を示す。

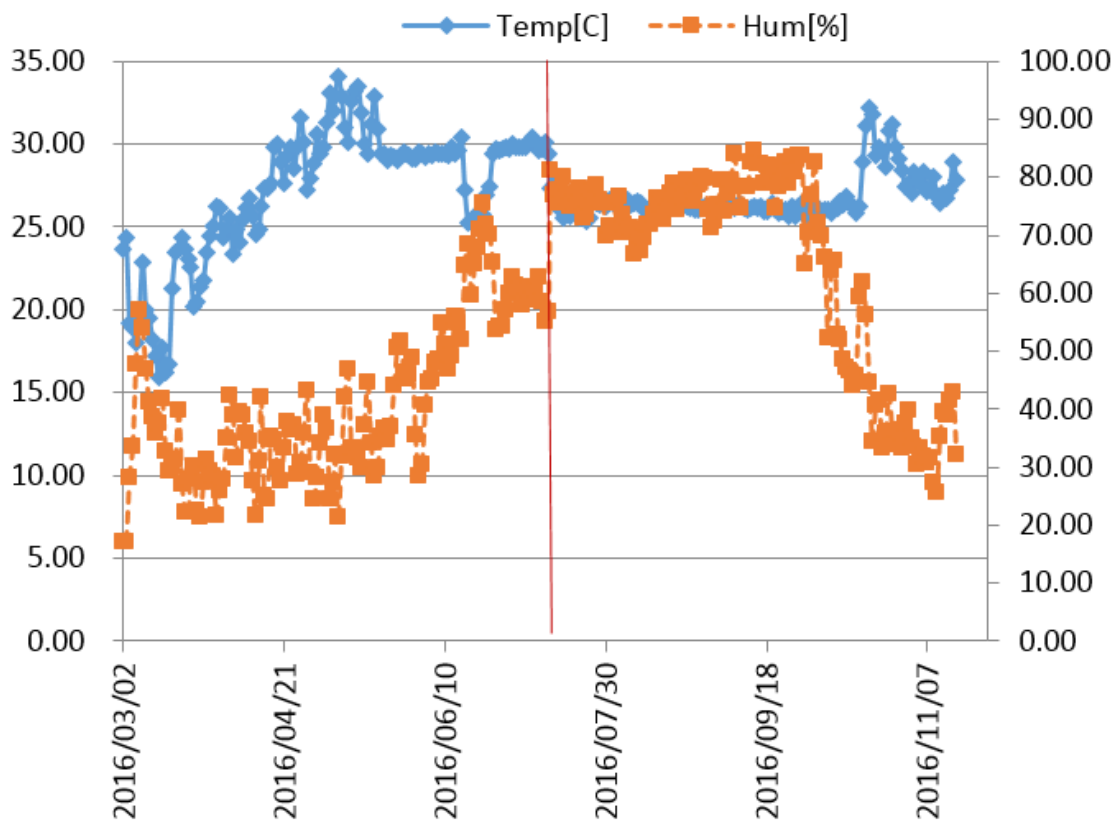


図 2.4.5 温度と湿度の測定結果

測定した部屋は、夏場のみ冷房を利かせる部屋で、5月から10月にかけて冷房にて室温が一定に保たれている。5月以前と10月以降は冷房を停止した様子が観測される。冷房の温度設定が

何度か変更された様子が伺える。湿度に関しては、機器入れ替え前後で値が変化している。湿度は、内部抵抗計算への影響はないので、参考としてみればよいと考える。

ところどころに、内部抵抗のピークと電圧のディップが現れている件、特に、9月上旬の鋭いピークは、台風10号の後のことで、印象深かった。気圧の測定も開始していたので、関連はないか一緒にプロットし、解析してみた(図2.4.6)。

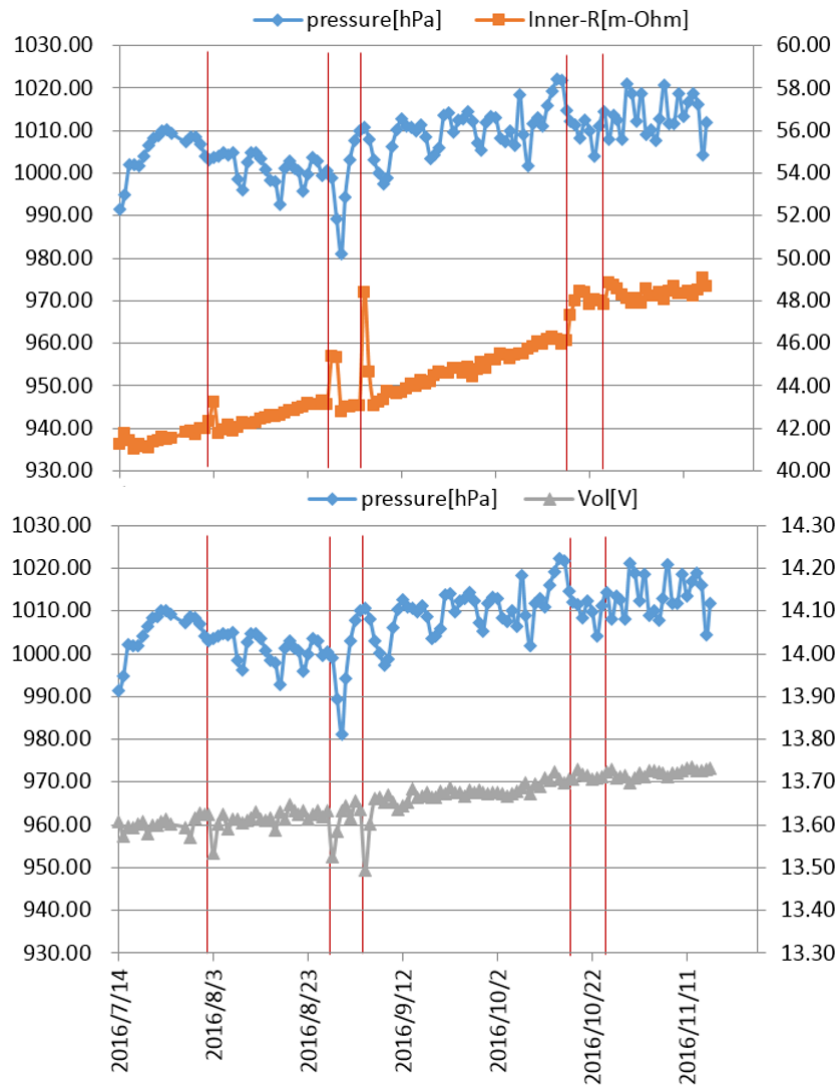


図 2.4.6 気圧と鉛バッテリー内部抵抗・電圧

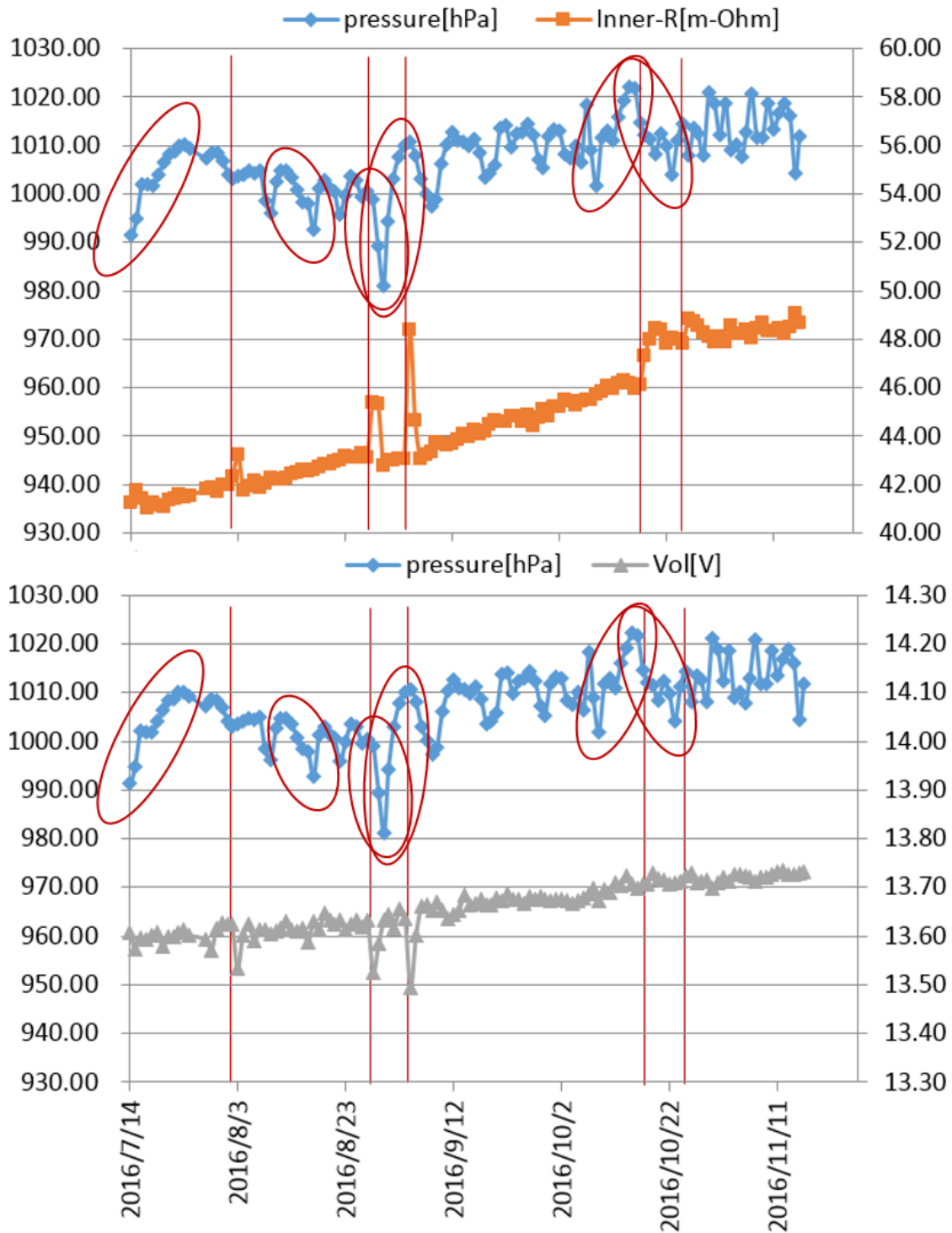


図 2.4.7 20 hPa 以上の気圧変動と内部抵抗のピーク・電圧のディップ

測定データを解析して、20 hPa 以上の気圧変動が内部抵抗のピークと電圧のディップの前に観測されていたことが分かった(図 2.4.7 の赤色の囲み線)。

その他のバッテリーとパルスデバイスの組合せの実験では、元々のバッテリーの状態が良く、内部抵抗の上昇が見られていない。従って、パルス発生デバイスの効果を論じるようなデータは得られていない。測定結果は、付録 A に掲載する。

2.5. 結果の検討

試行測定では、2年使用した鉛バッテリーに対して、充電を行いながらパルスデバイスを与える実験を行った。バッテリーの電圧上昇と内部抵抗の低下というバッテリー特性改善効果を得ることができた。この効果が、充電によるものか、パルスデバイスによるものかを確認するために、対照実験を行った。対照実験用に同一メーカー・型番のバッテリーを新品3台、中古品3台を入手した。中古品の1台は、5年経過で老朽化が進んでいるものであった。中古品の残り2台は、1年も経過しておらず新品同様のものであった。2台の1年物の中古品と3台の新品は、測定中にバッテリーの劣化が見られず、パルスデバイスの効果を評価するには至らなかった。

5年ものの中古バッテリーは、バッテリー劣化の様子を測定することができた。最初の4ヶ月間で、パルスデバイスなし・充電のみだと内部抵抗の上昇+2 mΩ/月が見られた。充電だけでは、内部抵抗の劣化が進行することが確認された。電圧に関しては、当初1ヶ月間は高電位を保持していたが、その後1ヶ月で0.3 V程度劣化した。そして、その後0.05 V/月程度で改善が見られた。電圧の改善には、パルスデバイスの影響は無いものとする。次の4ヶ月間で、パルスデバイスを付加し、パルスありの充電を行った。パルス負荷後に一旦、内部抵抗の劣化がおさまったようであったが、その後劣化が再開した。かなり老朽化したバッテリーではあるが、2ヶ月程度の延命の効果が確認された。

その他、当初の目的からは外れるが、測定結果に時々、内部抵抗のピークと電圧のディップが観測された。これは、20 hPa 以上の気圧変動の後で観測されるようだ。私たちの研究グループは、

この方面の専門家ではないので、本件に関する評価については専門家の方との議論に、評価を委ねたい所存である。

2.6. 結論

鉛バッテリーの内部抵抗を測定する IoT タイプのシステムを開発した。本システムは Arduino と XAMPP サーバをベースに、パルス制御サブシステムと測定・記録サブシステムから成る。このシステム構成は汎用性が高く、同じシステム構成で、気圧測定・記録も開発した。

内部抵抗測定用に回路設計を行い、その基板実装を行った。内部抵抗測定の精度は 10%程度の誤差を有する。測定値は高めに振れる傾向があることが分かった。

開発した内部抵抗測定システムを使用して、鉛バッテリーの内部抵抗を測定した。充電しながら内部抵抗を測定する実験で、電気パルスを与えると中古 2 年もののバッテリーは内部抵抗の改善(値の低下)を確認した。中古 5 年もののバッテリーは内部抵抗の劣化の停滞(値の上昇速度の低下)を観測したが、後に劣化の速度は元に戻った。劣化速度の低下で、鉛バッテリーの延命効果が 2 ヶ月程度あったと評価する。

本来の目的とは異なるが、鉛バッテリーの内部抵抗、電圧に気圧の影響がある可能性を確認した。本件は、専門家の方との議論に評価を委ねたい所存である。

上記のように、IoT タイプの鉛バッテリー内部抵抗測定器を開発し、複数セット・自動・長期間の内部抵抗測定を半年間に渡り推進した。以上をもって、シミュレーション駆動による問題分析の第 1 ステップ「プラント(キーデバイス)の特性データを取得する」の実践を行った。

謝辞

本研究を推進するに当たり、内部抵抗測定システムの実装に関してご協力を頂きました(株)バリューアップシステムズ殿に感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- [1] T. Hongakiuchi, "Sulfation removal device of a lead-acid battery," *Energia Economic and Technical Research Institute Report*, Vol.3, No.25, pp.16-17, http://www.energia.co.jp/eneso/tech/review/no25/pdf/25-p16_17.pdf, 20, (2011) (in Japanese).
- [2] S. Minami, et al., "A New Intense Pulse-charging Method for the Prolongation of Life in Lead-acid Batteries," *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol.2, No.1, pp.541-544 (2004).
- [3] T. Kikuchi, et al., "Electric-Vehicle Lead-Acid Batteries for Electric Forklifts," *Panasonic Technical Journal*, Vol. 56, No.2, pp.21-26 (2010) (in Japanese).
- [4] S. Iwatsubo, et al., "Development of sulfation suppression device for lead acid battery," *Research Report*, Toyama Industrial Technology Center, <http://www.itc.pref.toyama.jp/reserch/report/2010/r2010-2-062.pdf> (2010) (in Japanese).
- [5] B. Hariprakash, et al., "On-line monitoring of lead-acid batteries by galvanostatic non-destructive technique," *Journal of Power Sources* 137 pp.128-133 (2004).
- [6] "Creating a variable frequency PWM output on Arduino UNO," *OxGadgets*, <http://www.oxgadgets.com/2011/04/creating-a-variable-frequency-pwm-output-on-arduino-uno.html>.
- [7] Sparkfun, <https://www.sparkfun.com/products/11166>.
- [8] GitHub, <https://github.com/punkle/ArduinoCronLibrary>.
- [9] Apache Friends, <https://www.apachefriends.org/download.html>.
- [10] Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable FLAF Datasheet," Atmel, http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf.
- [11] AKIZUKI DENSHI TUSHO CO., LTD., <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-00074/> (in Japanese).

第3章 リチウムイオンキャパシタのモデル化

本章は、シミュレーション駆動による問題分析の第2ステップ「得られた特性データからプラント（キーデバイス）のモデル化を行う」に対する実践の内容である。ターゲットプラントは、比較的新しいデバイスであるリチウムイオンキャパシタである。リチウムイオンキャパシタの既存モデルは、素子数が多く、各素子の特性再現に2次から4次の関数を必要とする複雑なもので、簡素なモデルが求められていた。

研究室の別メンバーによってリチウムイオンキャパシタの充放電特性データは取得されていた。すなわち、問題分析における第1の「プラント（キーデバイス）の特性データを取得する」ステップは実施済であった。しかし、第2のモデル化ステップには至っていなかった。電流量を変化させる充電シーケンスに呼応する充電特性データの複雑性や、異なる電流量に対する放電特性データの個別性が背後にあった。特性データを丁寧に観察し、充放電特性を再現する簡素なモデル化を行い、該当するプラントモデルの同定を行った。

3.1. 諸言

地球の温室効果を改善し、エネルギーの多様化を図る寄与があるとして、現在、電気自動車（EV）の拡大に高い関心が集まっている。しかしながら、現実問題として現在普及しているEVには、EVの移動距離が不十分であること、価格が比較的高価であること、頻繁な充電による走行中断などの問題が存在する。EV開発の技術者の多くは、車両に使用するバッテリーの進歩によって残りの問題は解決すると主張している。しかしながら、バッテリーの開発を行っている技術者は、その大幅な性能向上に対して、大変に厳しい困難に直面している。

私たちは、キャパシタとバッテリーで構成するハイブリッド・エネルギー・ストレージ・システム（HESS）の提案を行っている。HESSにスーパーキャパシタを活用することは、多くの研究者に注目されてきた^{[1][2][3]}。キャパシタの充電時間は大変に短い。もっとも、放電時間も短いけれども、ここで、バッテリーの充放電時間は比較すると長時間である。バッテリーの充放電時間は時間単位で

議論されるが、キャパシタの充放電時間は分単位で議論される。こういった特徴は、キャパシタとバッテリーの間の質量当りのパワー密度とエネルギー密度の相違に起因する。さらに、頻繁な充放電(もしくは急速充電)はバッテリーの寿命を縮めるが、キャパシタにはそのような否定的な効果は存在しないようである。従って、キャパシタとバッテリーの混成は、EV 電源の効果的な問題解決策を与える合理的な解決策である。しかしながら、HESS の制御は大変に複雑で制御器の設計には十分に注意を払った設計が必要である。

効果的で伝統的なソフトウェア開発手法である V モデルプロセスは分解(設計)プロセスサイドと再構築(検証)サイドから成る^[4]。設計はトップダウンのやり方で推進され、検証はボトムアップのやり方で推進される。このように、これらのプロセスは、V字型で表現される。モデルベース開発プロセスは、このV字型モデルプロセスに素早いフィードバックループを追加する。すなわち、モデルインザループ(MILS)やラピッドコントロールプロトタイピング(RCP)や、ハードウェアインザループシミュレーション(HILS)を追加する^[5]。MILS や RCP, HILS を使うことで、設計が効率的なものになる。特に、HESS の機能設計を行うには、MILS はモデルベース開発に対して迅速なループバックとして有効である。

この章では、HESS 設計へのモデルベース開発を適用するためのキャパシタとその充電回路、放電回路のモデルを提案する。実験を行った結果、提案したキャパシタのモデルは、HESS 設計のモデルベース開発に適用できることが分かった。さらに、定電流充電と定電圧充電の両方を行う回路モデルも提案し、その性能も検証できた。

この章の構成は次の通りである。3.2 節で、提案する HESS に関わるターゲット EV と電源供給システムについて紹介する。第 3.3 節で、キャパシタのモデルと充電回路、放電回路のモデルを紹介する。これらのモデルの検証を行うため、第 3.4 節で実際の LIC の測定結果との特性比較を行った。3.5 節で、以上の結論をまとめる。

3.2. 電気自動車と電源供給システム

3.2.1. 電気自動車

この章でターゲットとする電気自動車(EV)を図 3.2.1 に示す。ターゲット EV のうち、左側の写真はマイクロ EV で、右側は8輪の中型サイズの EV バスである。現在は、モータ開発会社提供のシンプルなモータ制御器とリチウム・ポリマー・バッテリーが実装されている。完成時には、この研究で提案する HESS を現行のバッテリーシステムに置き換える予定である。



図 3.2.1 ターゲットとする電気自動車

3.2.2. 電源供給システムの構成

この研究での提案する HESS を含む電源供給システムを図 3.2.2 に示す。

これは、モータ制御器とワイヤレス電源供給システムが接続する。HESS の基本回路は双方向な DC-DC 変換器でこの回路はデジタル信号プロセッサ (DSP) によって制御される。HESS のハードウェアは試作を完了し、実際の運転に向けて評価を行っている状況である^[8]。この研究での HESS は、図 3.2.2 の充放電制御器に対応する。キャパシタアレイ中の LIC のモデル化と双方向の DC-DC 変換器での充放電回路が本論に記載される部分に相当する。

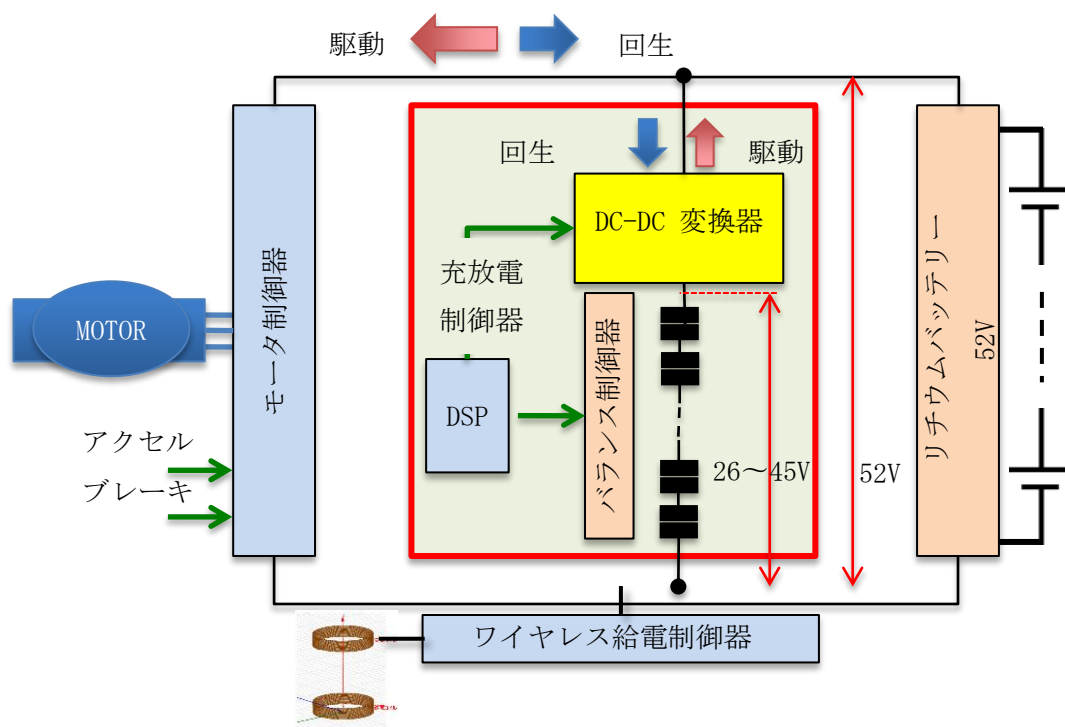


図 3.2.2 電源供給システムの構成

3.3. 提案するリチウムイオンキャパシタモデルと充電器，放電器のモデル

この節では，提案するリチウム・イオン・キャパシタ(LIC)のモデルとその充電，放電モデルについて記述する．まず第1に，LICとLIB(リチウム・イオン・バッテリー)に対して充電モードの特性について述べる．そして，LICを含むスーパーキャパシターに対する，これまでのモデルについて紹介する．最後に，提案するLICモデルと特に充電回路モデルについて説明する．

3.3.1. 定電流充電モードと定電圧充電モード

LICアレイやLIBアレイの充電を行う際には，定電流充電(CC(Constant Current)充電)と定電圧充電(CV(Constant Voltage)充電)モードが使用される．CCモードはアレイ全体を充電するのに主要なもので，CVモードは各LICやLIBセルの充電状態(SoC)のバランスをとるために必要なもので

ある。バッテリー管理システムに関するモデルは既に報告されている^{[3][11]}が、CC や CV の充電回路を考慮するものは存在しない。

3.3.2. 従来のスーパーキャパシタモデル

EV(電気自動車)へ MBD(モデルベース開発)を応用する際のバッテリーモデルは、いくつか提案されてきている^{[12][13][14][15]}。キャパシタに関しては、電気二重層キャパシタ(EDLC)のモデルが報告されている^{[6][16]}。さらに、一般的なスーパーキャパシタに対する回路シミュレーションモデル^[17]やスーパーキャパシタの動作モデル^[18]に関して既に議論が始まっている。

ここでは、LIC や EDLC 使用時のスーパーキャパシタの実装について着目する。もともと単純な EDLC モデルは RC の直列モデルである(図 3.3.1(a))。ここで、抵抗 R とキャパシタ C が RC 接続と呼ばれる直列接続で繋がっている^[19]。並列に RC 直列接続が3つ分岐するモデルが検討されてきており^[19]、Zubieta モデルと呼ばれている(図 3.3.1(b))。このモデルは、電圧依存性をもったキャパシタで表現されている。この他のタイプのモデルとして、時変応答で動作する2つの直列スイッチを含む、3つの RC 直列接続のものが挙げられる。

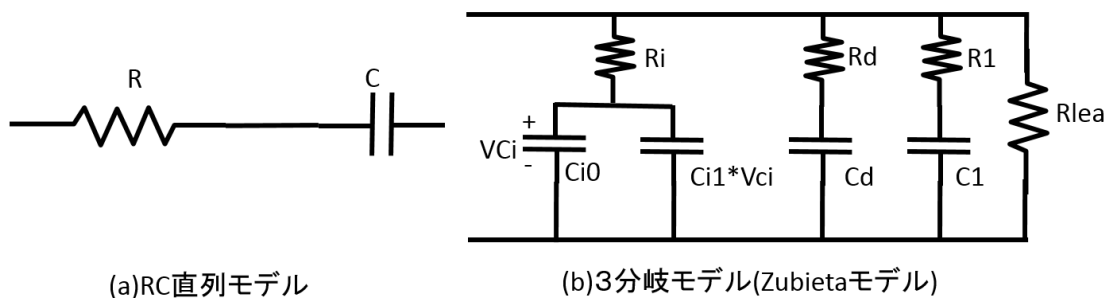


図 3.3.1 EDLC スーパーキャパシタのモデル例

EDLC に対する3分岐モデルのものは、異なる時定数の成分を異なる枝で表現したものである。そういったモデルは、文献[19]で開発されてきた。EDLC の特性に合わせるための精度向上で、RC 直列接続を追加し、EDLC モデルが徐々に複雑なものになってきた。しかしながら、モデルの性能向上に関しては、キャパシタを付け加えてゆくことで得られるその効果は、大変に小さいと言われている^[21]。従って、これまでの多くの EDLC モデルは、RC 直列接続で実装され、充電特性や放電特性を実測値に合せ込むように追加の RC 直列接続を加えることで、改良されてきたといえる。

LIC は比較的新しいデバイスで、LIC モデルに関しては数例の研究しか議論されていない。これまでに提案されてきた LIC モデルは、2つのカテゴリに分類することができる。1つ目のモデル^[22]のタイプは、EDLC の Zubieta モデルを拡張したもので、3セットの可変キャパシタと2つの可変抵抗のセット(1つが充電特性、1つが放電特性を表す)と1つの並列抵抗で構成される(図 3.3.2)。ここで、これらの可変デバイスの値は、測定結果から作成された対応するルックアップテーブルを参照することで決定される。従って、このモデルは使用されるデバイスに限定されるものとなる。ルックアップテーブルの項目は電流や充電状態(SoC)、温度、充電・放電サイクルなどがあり、ルックアップテーブルの可変素子は2次元から4次元のオーダを有する。ルックアップテーブルを完成させるためには、大規模な専用設備で、大変に注意が行き届いた測定が必要である。対照的に、このタイプのモデルは各々の RC 直列ブランチに対する抵抗(これは基本的な Zubieta モデルの改良であるが)を含んでいない。改良の目的は、EDLC の三分岐モデルの簡素化にある。このモデルの簡素化への取組みは、LIC には EDLC ほど電圧依存性がないという事実に基づいている。

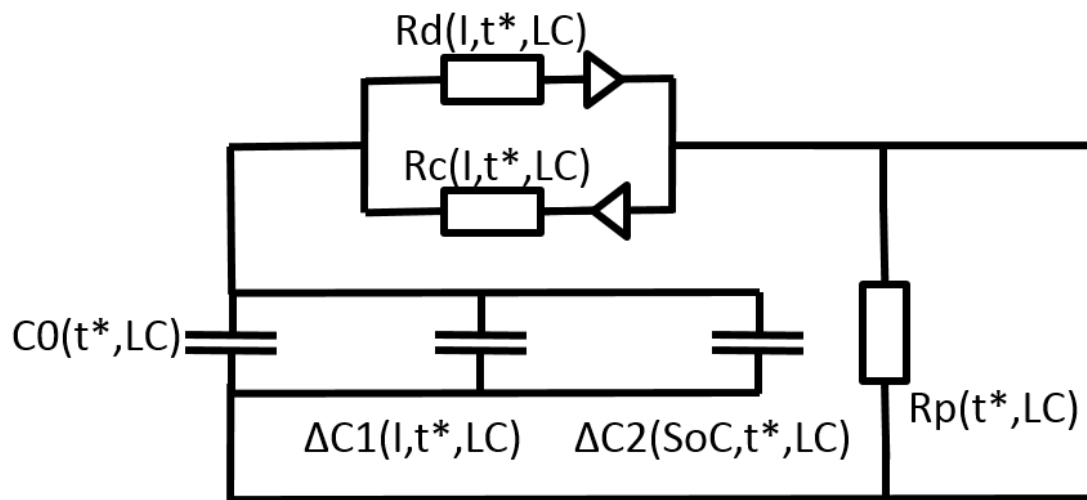


図 3.3.2 LIC のモデル例 (Zubieta モデルの拡張型)

2つ目のモデル^[23]は、無数の RC 直列接続で構成される(図 3.3.3)。そして、R と C は3つのパラメタ (R_i :抵抗値, C:容量値, τ :時定数)で決定され、これらは電圧の3次や4次の多項式で近似される。このモデルは、図 3.3.1(b)の左側の EDLC モデルの第1の枝に由来するものである^[24]。第1の枝のみを考慮した理由は、LIC の放電電流が EDLC よりも強い線形性を有していることにあることは自明である。LIC の周波数特性を含むインピーダンスはこれらの3つのパラメタから計算することができる。そして、このモデルから同定されるパラメタは比較的単純である。しかしながら、後程説明するように、LIC は放電電流に対する容量依存性を持っている。電圧依存性ではなくて、電流依存性をモデリングにおいては考慮すべきである。

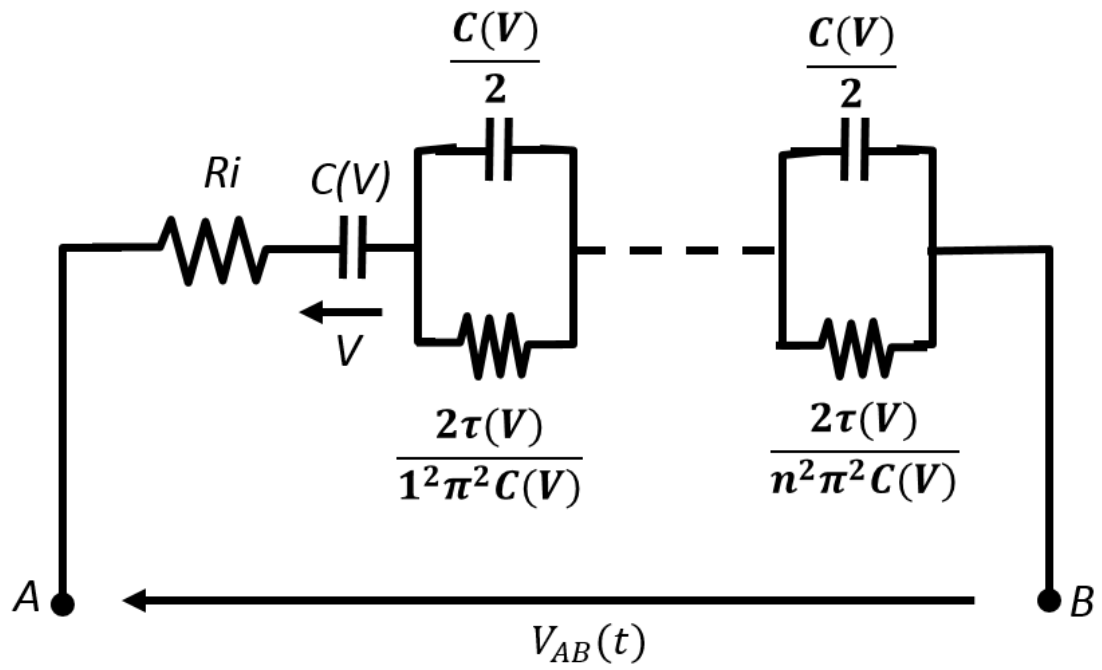


図 3.3.3 LIC のモデル例 (Zubieta の第 1 枝を無数の RC 直列接続で構成)

3.3.3. 提案するリチウムイオンキャパシタモデル

本論における LIC モデル化の目的は、MBD メソッドに基づく LIC の充放電の振舞いの機能設計に役立つモデルの提供にある。従って、簡素で実践的な LIC モデルが要求される。温度特性やライフサイクル特性は、この機能設計の段階では必要とされない。通常、LIC の製造業者からデータシートが提供されるが、ここで必要なモデリングには、その程度で十分である。たとえば、(株)太陽誘電で製造される汎用的な LIC に対してはレポート^[25]で示されるようなデータシートが存在し、これをこの実験に用いた。その中のグラフで示される放電レート特性は、与えられた電圧に対しては強い線形性を示し、放電電流については非線形性を有することが見て取れる。さらに、データシートから、放電初期時の IR ドロップの振舞いや、自己放電特性のグラフから、LIC は数千時間経過しても 95%以上の電圧を維持していることも分かる。このような視点から、電流依存性のある可変キャパシタを含む簡素な LIC モデルを提案する。

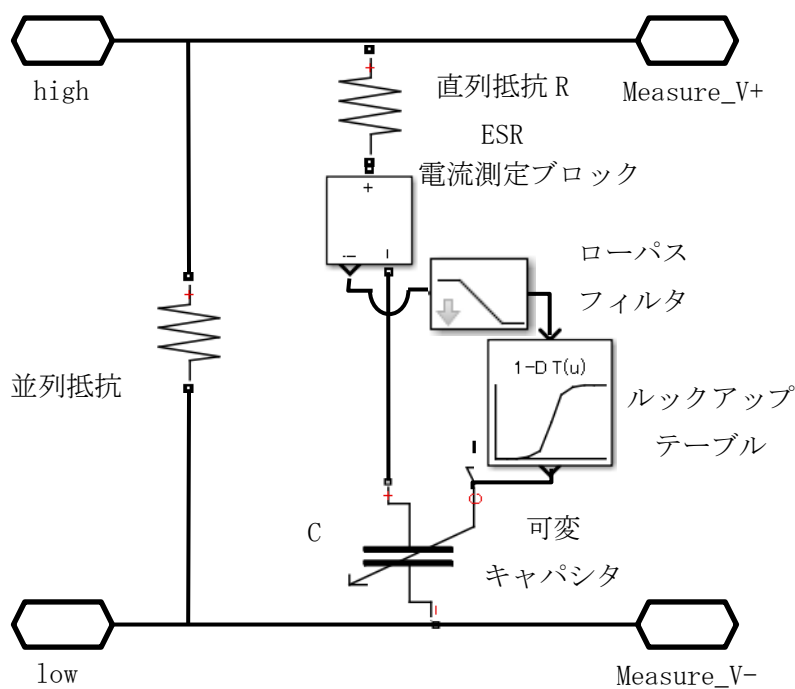


図 3.3.4 提案する LIC モデル

図 3.3.4 に提案する LIC モデルを示す. 詳細な電氣的な振舞いよりもモデリングにおいては, 機能やタイミングの振舞いを重視した. 従って, このモデルは比較的値の大きな並列抵抗と上述した RC 接続で構成する. 本論では, このモデルには温度特性は含まない. RC 接続は, 直列抵抗 R と可変キャパシタ C で表される. 直列抵抗 R は等価直列抵抗(ESR)のことで, C は LIC の容量で, これは放電電流に従属性を有する. そのため, 直列抵抗 R と C の間に電流測定ブロックを配置している. そして, 観測された電流からルックアップテーブルを探して対応する容量値を C に設定する. 時定数 1.0 s のローパスフィルターを電流測定ブロックとルックアップテーブルの間に配置した. これは, 容量 C の瞬時の急激な変化を避けるためのものである. 上述のように, このモデルは大変に簡素で, 後の実験で分かるように様に有効である.

3.3.4. 充電制御と放電制御のモデル

3.3.1 節で述べたように, CC 充電と CV 充電のモードは LIC の充電に必要である. CC モードと CV モードを実装した電気回路と制御器から成るモデルを図 3.3.5 に示す.

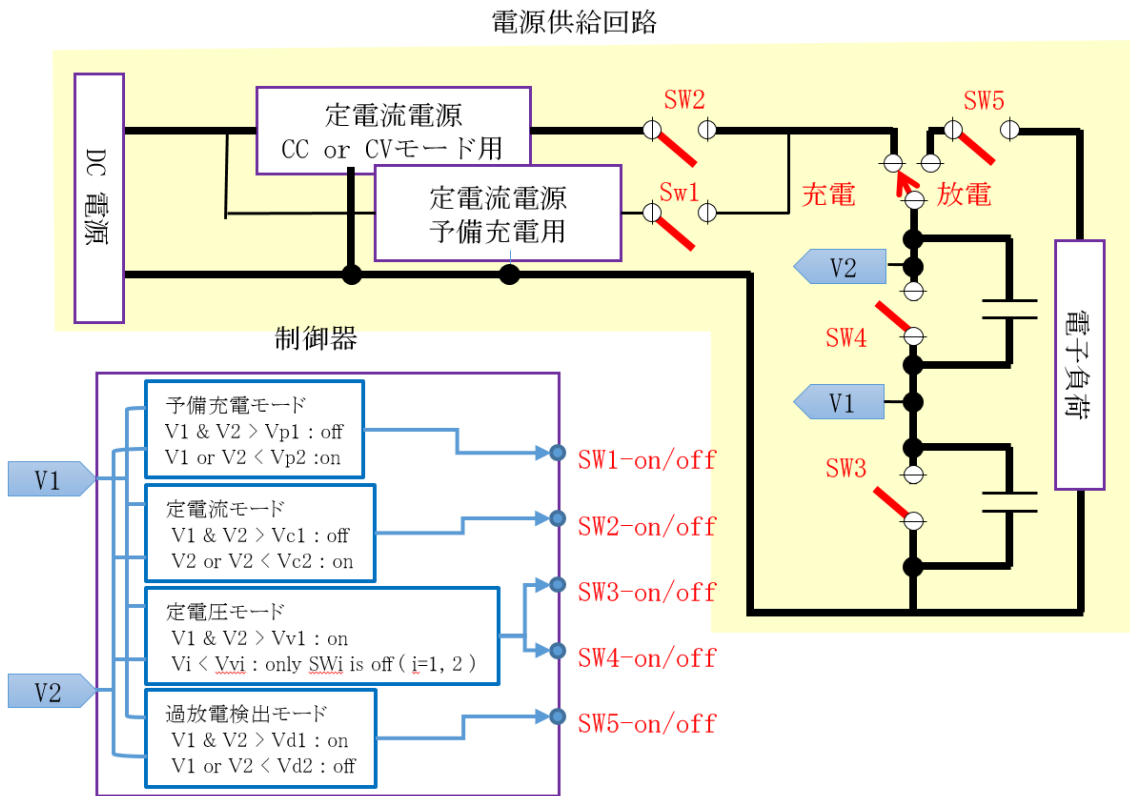


図 3.3.5 充電・放電システムのモデル

この提案するモデルは、充電と放電回路とその制御器から成る。制御器はモードによって動作を変更する。たとえば、充電/放電、予備充電、CC 充電、CV 充電などで、これらは、LIC の電圧である $V1$, $V2$ によって変更される。さらに、制御器は LIC の過放電をチェックする。それらのすべてのモードで、 $V1$ と $V2$ は $(Vp1, Vp2)$, $(Vc1, Vc2)$, $(Vv1, Vv2)$, $(Vd1, Vd2)$ などの指定電圧と比較される。制御器は電気回路でも組み込みシステムでも実装可能である。図 3.3.5 では、LIC アレイの充電バランス取りと放電をテストできるように2つの LIC が接続できる構成である。

制御器の機能を次に説明する。 $V1$ と $V2$ が予備充電モード閾値の電圧 $Vp1$ よりも大きい場合は、スイッチ $SW1$ は予備充電モードを終了させるために OFF となる。しかしながら、 $V1$ か $V2$ の何れかが、 $Vp2$ よりも小さい場合は ON となる。同様に CC モードに関しては、 $V1$ と $V2$ もしくは $V1$ か $V2$ によって $SW2$ が ON や OFF になる。CV モードに関しては、 $i=1, 2$ として、対応する電圧 V_i に

対してスイッチ番号は SW_{i+2} となり, 閾値 V_{vi} より V_i が小さい場合は, SW_{i+2} が OFF となり, それ以外は ON となる. SW_5 は, 放電時に過放電を防ぐスイッチである.

3.4. 実験結果

この節では、制御器の機能をチェックし、提案したモデルの性能を評価する実際の LIC を用いた実験に関して記載する。表 3.4.1 に使用したパラメタ値を記載する。

表 3.4.1 実験に用いたパラメタ値

No.	Parameter Name	Notation	Typical Value
1	予備充電 OFF 電圧	Vp1	2.5 V
2	予備充電 ON 電圧	Vp2	2.3 V
3	定電流充電 CC モード OFF 電圧	Vc1	3.8 V
4	定電流充電 CC モード ON 電圧	Vc2	3.4 V
5	定電圧充電 CV モード OFF 電圧	Vv1	3.8 V
6	定電圧充電 CV モード ON 電圧	Vv2	3.6 V
7	過放電機能 OFF 電圧	Vd1	2.7 V
8	過放電機能 ON 電圧	Vd2	2.5 V
9	定電流モードの充電電流値	Icc	4 A
10	定電圧モードの充電電流値	Icv	4 A
11	予備充電モードの充電電流値	Ipr	0.18 A

提案モデルはシミュレーション駆動の製品設計のパラダイムに基づいて MATLAB/Simulink 上
に実装した。モデルの振舞いであるシミュレーション結果は、実際の LIC と充電および放電から成
る電気回路の振舞いと比較を行った。

3.4.1. 実験に用いた LIC

図 3.4.1 に実験に使用した LIC の写真とその仕様を示す。大容量である、このタイプの LIC は現
在、多くの用途で使用されている。その平均容量値は 200 F で、その ESR(図 3.3.4)は、50 mΩ
である。その並列抵抗値は大変に大きい。3,000 時間以上経過後も、初期電圧の 95% 以上の電
圧を保持している。並列抵抗に関しては、測定時間が数千時間ではなくて数分であれば、充放電
特性には影響を与えない。

そこで、自己放電の測定結果から、経過時間が 3,000 時間から 3,800 時間で 0.2% 電圧が減少し
ていることから、並列抵抗値は 6 MΩ と概算した。



仕様

項目	仕様
最大使用電圧	3.8 V
最小動作電圧	2.2 V
容量値	160-240 F (平均 200 F)
ESR (等価直列抵抗値)	50 mΩ

図 3.4.1 実験に用いた LIC

3.4.2. Simulink に実装した充電回路モデル

図 3.3.5 に提案する充放電システムのモデルを示した。そのシステムのうち充電動作に関して、Simulink で実装したものを図 3.4.2 に示す。図 3.4.2 では、1つのキャパシタソケットは省略し、そのため SW4 は含まれない。図 3.3.4 で示した LIC は、図 3.4.2 の中央部に配置する。充電動作は、図 3.3.5 に記載したスイッチング動作で実施される。予備充電モードでは、SW1 を経由して電力が供給される。CC モードと CV モードでは、SW2 を経由して電力が供給される。SW3 のスイッチ動作は、LIC の電圧に応じて繰り返し実施される。

3.4.3. Simulink に実装した放電回路モデル

図 3.3.5 の放電動作を, Simulink で実装したものを図 3.4.3 に示す. LIC の時変電圧値は, LIC 電圧と記載した simout 端子ブロックで観測される. Vd2 ブロックは, 最小の動作電圧であり, これは, 図 3.3.5 に記したように SW5 よって放電動作が終了することを意味する.

3.4.4. 充電器と放電器のモデルを実装した電気回路

提案した LIC のモデルとその充電回路, 放電回路のモデルの機能と性能を比較するために, 図 3.4.4 に示すような実物の電気回路を実装した. プリント基板のサイズは, $310 \times 228 \text{ mm}^2$ である. 制御器は論理回路で実装した. これは, 汎用的なマイクロコンピュータと組み込みソフトウェアを使っても構成することができる.

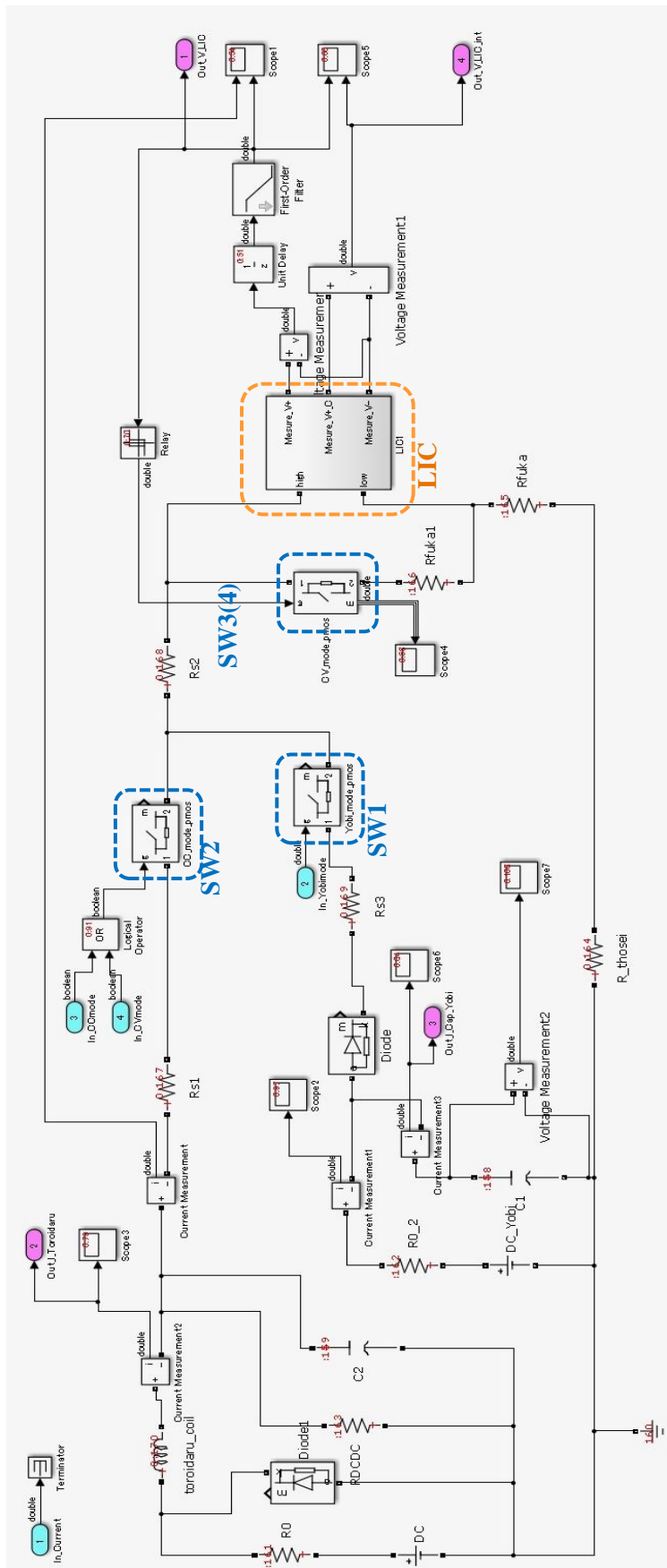


図 3.4.2 Simulink での充電回路モデル

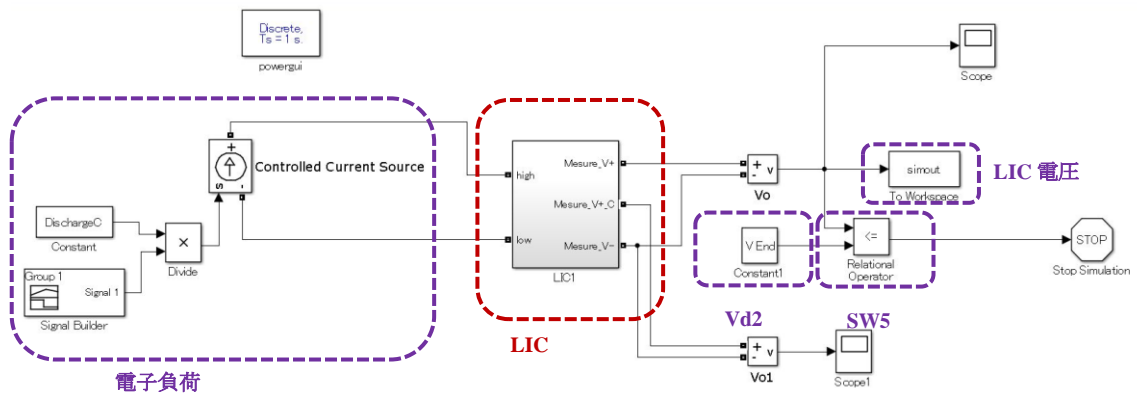


図 3.4.3 Simulink での放電回路モデル

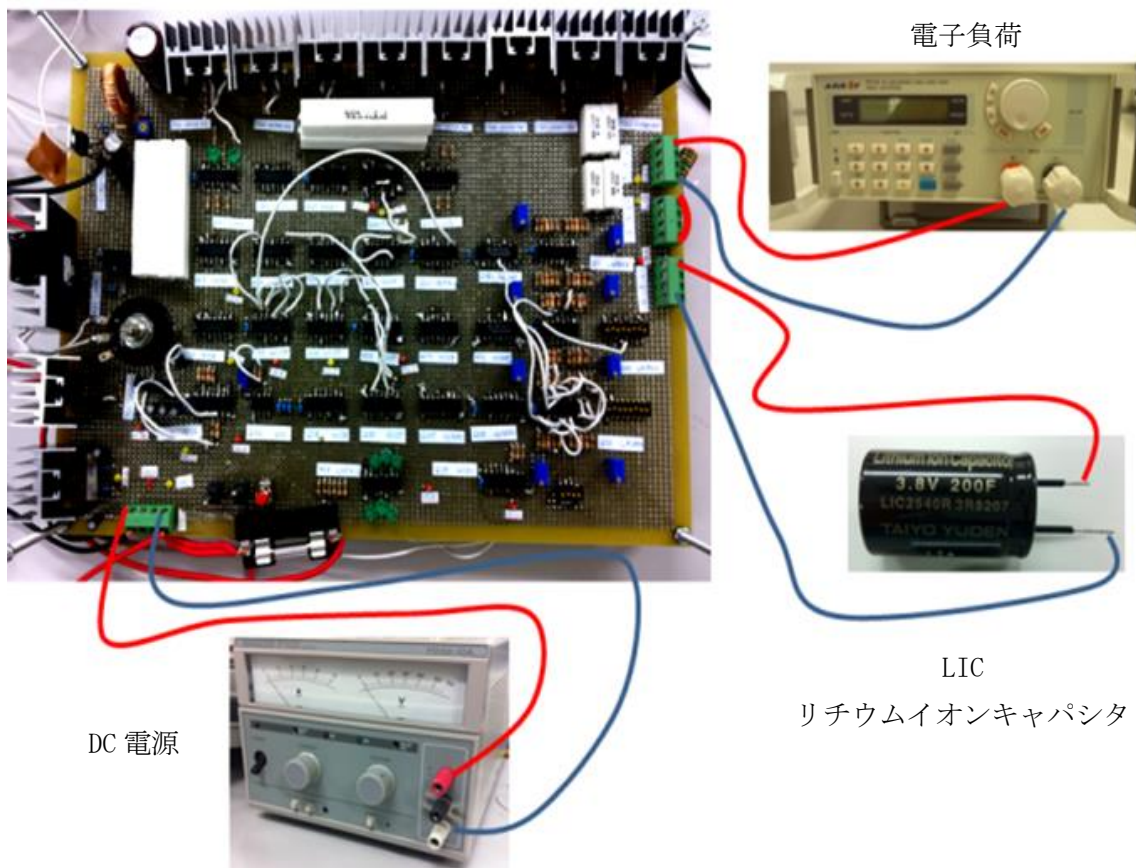


図 3.4.4 充電・放電回路を実装した電気回路

3.4.5. 評価

この節で、提案する LIC モデルを実物の LIC デバイスと比較した評価結果を示す。まず、測定結果を記述し、その後に、充電特性放電特性の比較を行う。

3.4.5.1. 評価対象と評価尺度

提案した LIC モデル(3.3.3 節参照)の精度を評価することをここでの目的とする。ここでは、詳細な電氣的寄生素子やノイズなどは考慮していないこと、LIC デバイスの個々の特性があることから、ここでのゴールは LIC モデルと実物の LIC の数値的な一致とはしないでおく。従って、提案した LIC モデルと実物の LIC デバイスの電圧特性を比較する尺度は、自乗平均平方ではなく、相関係数とする。

3.4.5.2. 放電特性

LIC モデルと実物の LIC デバイスの放電特性を比較した。その結果を図 3.4.5 に示す。ここで、電子負荷デバイスは、図 2.4.4 のように接続した。放電特性は、放電電流が 0.3 A, 0.5 A, 1.0 A, 2.0 A, 3.0 A, 4.0 A, 5.0 A の7通りの場合で比較した。これらの測定結果から LIC は電圧に対して、高い線形性を有することが分かった。図 3.4.5 の電圧降下の傾きが実際の容量値に対応する。容量値 C_d は次式を用いて線形近似することで計算できる。

$$C_d = I_d \cdot \Delta t / \Delta V$$

ここで、 C_d は放電容量、 I_d は放電電流、 Δt は放電時間、 ΔV は降下電圧である。

表 3.4.2 に計算した放電容量値を示す。放電要領は放電電流に対して非線形性を有する。この放電容量値は図 3.3.4 のルックアップテーブル中に登録する。そして、シミュレーションした結果の放電特性を図 3.4.5 の点線で示す。

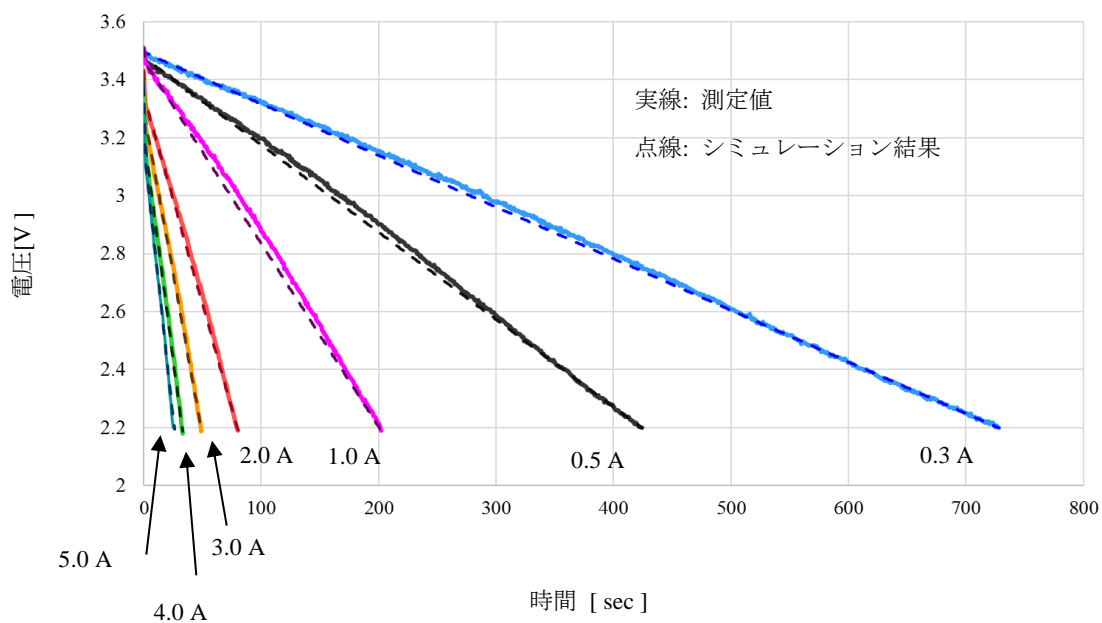


図 3.4.5 LIC の放電特性

表 3.4.2 放電・充電における容量値の特性と相関係数

モード	放電							充電
充電電流 [A]	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	-0.5	-0.3	>=0.0
容量値 [F]	132.80	128.44	133.68	138.82	158.23	165.88	168.58	231.87
相関係数	0.9994	0.9993	0.9991	0.9991	0.9991	0.9994	0.9997	0.9986

実物の測定結果とシミュレーションした結果の放電特性の相関係数を表 3.4.2 の相関計係数欄に示す。この場合の相関係数は、大変に 1.0 に近い値となっている。放電時の最大の差異は 0.0009 である。提案した LIC モデルの放電特性に対する高い精度が確認できた。

3.4.5.3. 充電特性

図 3.4.6 に LIC の充電特性の測定値とシミュレーション結果を示す. このシミュレーションに用いたパラメタを表 3.4.3 に示す. プリント基板上では, 電圧パラメタは可変抵抗のボリュームを調整することで行われる.

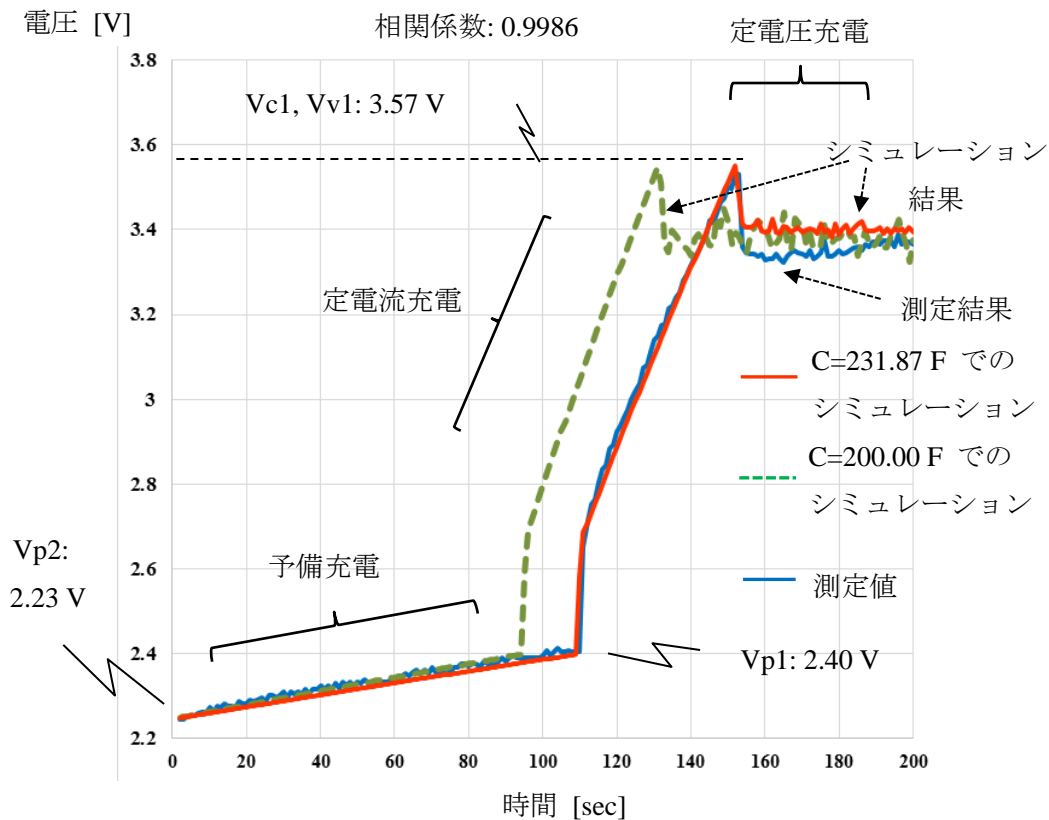


図 3.4.6 LIC の充電特性

V_{p1} , V_{p2} , V_{c1} , V_{v1} は電圧計で測定した結果である. 図 3.4.6 において, 青の実線は測定結果の特性で, 赤い実線は容量値 $C=231.87$ F と内挿で見積もった場合のシミュレーション結果の特性である. 緑の点線は, 比較のために, 容量値 $C=200.00$ F のシミュレーション結果の特性を掲載したものである. このグラフから, $C=200.00$ F の結果は, 測定結果に対して, 予備充電モードから早めに定電流充電モードに移行し, 定電流充電モードの勾配も大きいものとなっている.

3.3.1 節で述べたように、LIC 充電は予備充電と同様に定電流充電モードと定電圧充電モードにも適合しなくてはならない。この視点をとっても、提案したモデルは測定結果に大変に類似したもののとなっている。その相関係数は 0.9986 とかなり 1.0 に近い値である。ESR(等価直列抵抗)の影響は、112 sec の急峻な電圧の上昇と、154 sec の急峻な電圧の下降として認識される。

実際の CV モードでは、LIC の電圧は徐々に上昇している。これは、LIC の観測電圧が、直接フィードバック制御されるからである。しかしながら、シミュレーションでの提案した LIC モデルでは、その電圧は定電流モードの直後から、ほぼ一定の値となっている。この不一致は、Simulink のフィードバック制御機構利用方法に原因がある。実際の電気回路のフィードバック制御は大変に高速に遂行される。しかし、Simulink 実装においては、フィードバックは直接行われるのではなく、シミュレーションサイクル時間である1ユニット遅延で行われるようになっている。上記のような点を考慮した上で、機能設計における使用として、CV モードの間にどの程度の電位を保つかを知るには十分なシミュレーションであると考えられる。

表 3.4.3 シミュレーションで使用したパラメタ値

No.	パラメタ名	記号	Typical 値	Sim.使用値
1	LIC 容量値	C	200 F	表 3.4.2 参照
2	等価直列抵抗	ESR	50 m Ω	50 m Ω
3	等価並列抵抗	EPR	6 M Ω	6 M Ω
4	予備充電モード OFF 電圧	V_{p1}	2.5 V	2.40 V
5	予備充電モード ON 電圧	V_{p2}	2.3 V	2.23 V
6	定電流充電モード OFF 電圧	V_{c1}	3.8 V	3.57 V
7	定電圧充電モード OFF 電圧	V_{v1}	3.8 V	3.57 V
8	定電圧充電モード ON 電圧	V_{v2}	3.6 V	= $V_{v1} - 0.2$
9	過放電機能 ON 電圧	V_{d2}	2.5 V	2.20 V

3.5. 結論

新しい LIC モデルの提案を行った。このモデルは大変に簡素である。200 F の LIC デバイスに対して、その充電と放電の機能に対する精度が検証できた。提案したモデルと実際のデバイスの充電モードでの相関係数は 0.9986 であった。色々な負荷に対する放電モードの相関係数は、0.9991 から 0.9997 の間の値であった。提案した LIC モデルと充電器モデル、放電器モデルは、モデルベース開発手法に基づく HESS(ハイブリッド・エネルギー・ストレージ・システム)のモデリングに使用することができる。将来の課題として、モデルベース開発フレームワークの範疇で、提案した LIC モデルをモータ制御などと一緒に組み合わせて、電気自動車の設計に組み込んで行くことを挙げておく。

上記のように、LIC に対して簡素な3素子(1つの可変容量と2つの抵抗)によるモデル化を行い、そのモデル同定を行った。以上をもって、シミュレーション駆動による問題分析の第2ステップ「得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う」の実践を行った。

謝辞

充電器と放電器の回路設計に関してご協力を頂きました(株)DAiEN の大淵功社長に感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- [1] Park, S., Kim, Y. and Chang, N., “Hybrid Energy Storage Systems and Battery Management for Electric Vehicles,” Proceedings of the Design Automation Conference, Austin, 29 May 2013–7, pp.1–6, June (2013), <http://dx.doi.org/10.1145/2463209.2488854>.
- [2] Medora, N.K. and Kusko, A., “Battery Management for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitors as a Supplementary Energy Storage System,” Proceedings of the Telecommunications Energy Conference, Scottsdale, 30 September 2012–4, pp.1–8, October (2012).
- [3] Cao, J. and Emadi, A., “A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” IEEE Transactions on Power Electronics, 27, pp.122–132, (2012). <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2011.2151206>.
- [4] IEC 61508-3, Functional Safety of Electrical/Electronic/ Programmable Electronic Safety-Related Systems Part 3: Software Requirements. International Electrotechnical Commission 61508-3 Version 12.0 (1997).
- [5] Kubo, T, “The Ins and Outs of MBD. SEC Seminar (2014) (In Japanese). http://sec.ipa.go.jp/users/seminar/seminar_tokyo_20140312-03.pdf.
- [6] Nagaoka, N., Fujiyama, S., Nonoyama, H. and Ametani, A., “Parameter Estimation of a Nonlinear EDLC Model for ENMTP Simulation,” Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients, Kyoto, pp.1–6, 3–6 June (2009).
- [7] Goswami, D., Lukasiwycz, M., Kauer, M., Steinhorst, S., Masrur, A., Chakraborty, S. and Ramesh, S., “Model-Based Development and Verification of Control Software for Electric Vehicles,” Proceedings of the Design Automation Conference, Austin, pp.1–9, June 7 (2013).
- [8] Kobayashi, Y., Tatsuno, S., Takahashi, S., Motegi, K. and Shiraishi, Y., “A DSP-Based Embedded System for Hybrid Energy Storage System consisting of Capacitor and Battery,”

- Proceedings of 57th Joint Conference on Automatic Control, Ikaho, pp.1294–1299, 10–12 Nov. (2014) (in Japanese).
- [9] Shimamura, Y., Shiraishi, Y., Motegi, K., Kobayashi, Y., Koga, T., Nakamoto, E., Uchida, J. and Todoh, T., “A Motor Modelling for Micro–Mobility by using Model Based Development Method,” Proceedings of 57th Joint Conference on Automatic Control, Ikaho, pp.1311–1316, 10–12 Nov. (2014) (in Japanese).
- [10] Sen, C. and Kar, N.C., “Battery Pack Modeling for the Analysis of Battery Management System of a Hybrid Electric Vehicle,” Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, pp.207–212, 7–10 September (2009).
<http://dx.doi.org/10.1109/vppc.2009.5289848>.
- [11] Bonfiglio, C. and Roessler, W., “A Cost Optimized Battery Management System with Active Cell Balancing for lithium Ion Battery Stacks,” Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, pp.203–309, 7–10 September (2009).
<http://dx.doi.org/10.1109/vppc.2009.5289837>.
- [12] Kroeze, R.C. and Krein, P.T.R., “Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations,” Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, pp.1336–1342, 15–19 June (2008). <http://dx.doi.org/10.1109/pesc.2008.4592119>.
- [13] Moss, P.L., Au, G., Plicht, E.J. and Zheng, J.P., “Investigation of Solid Electrolyte Interfacial Layer Development during Continuous Cycling Using AC Impedance Spectra and Micro–Structural Analysis,” Journal of Power Sources, 189, pp.66–71 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.048>.
- [14] He, H., Xiong, R. and Fan, J., “Evaluation of Lithium–Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach,” Energies, 4, pp.582–598 (2011).
<http://dx.doi.org/10.3390/en4040582>.

- [15] Buller, S., Thele, M., De Doncker, R.W. and Karden, E., "Impedance-Based Simulation Models of Supercapacitors and Li-Ion Batteries for Power Electronic Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41, pp.742-747 (2005).
<http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2005.847280>.
- [16] Yamada, T., Nakamura, K., Yamashiro, S., Sasaki, M. and Araki, S., "On the Electric Characteristics of High-Power Density Electric Double Layer Capacitor," *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, Jeju Island*, pp.425-430, 7-11 July (2002).
- [17] Farcas, C., Petreus, D., Ciocan, I. and Palaghita, N., "Modeling and Simulation of Supercapacitors," *Proceedings of the 15th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages, Gyula*, pp.195-200, 17-20 September (2009).
<http://dx.doi.org/10.1109/siitme.2009.5407373>.
- [18] Camara, M.B., Gualous, H. and Dakyo, B., "Supercapacitor Modeling and Integration in Transport Applications," *Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Orlando*, pp.1-7, 9-13 October (2011). <http://dx.doi.org/10.1109/ias.2011.6074422>.
- [19] Cheng, Y., Wei, L., Shen, X.J. and Liang, H.Q., "Study of Supercapacitor in the Application of Power Electronics," *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 8, pp.508-517 (2009).
- [20] Zubieta, L. and Bonert, R., "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36, pp.199-205 (2000).
<http://dx.doi.org/10.1109/28.821816>.
- [21] Johansson, P. and Andersson, B., "Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling," *Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg* (2008).
- [22] Omar, N., Daowd, M., Hegazy, O., Al Sakka, M., Coosemans, T., Van den Bossche, P. and Van Mierloa, J., "Assessment of Lithium-Ion Capacitor for Using in Battery Electric Vehicle

and Hybrid Electric Vehicle Applications,” *Electrochimica Acta*, 86, pp.305–315 (2012).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.026>.

[23] Barcellona, S., Flavio, F., Iannuzzi, D. and Piegari, L., “Modeling and Parameter Identification of Lithium-Ion Capacitor Modules,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5, pp.785–794 (2014).

[24] Musolino, V. and Piegari, L., “New Full-Frequency-Range Supercapacitor Model with Easy Identification Procedure,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60, pp.112–120 (2013).
<http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2012.2187412>.

[25] TAIYO YUDEN Navigator, “The Use of PAS Capacitors/Lithium Capacitors for Adapting to Diversification of Energy Supply,” Volume 4, Special Topics 1, pp.1–9 (2015).
http://www.yuden.co.jp/productdata/navigator/en/004/E-SP1_101013.pdf.

[26] LIC2540R3R8207 Datasheet,

http://www.datasheetlib.com/datasheet/142803/lic2540r3r8207_taiyo-yuden.html.

第4章 循環器シミュレータの開発

本章は、シミュレーション駆動による問題分析の第3ステップ「プラントモデルに開発・設計部分（制御モデル）を加えてシミュレートする」に対する実践の内容である。心臓（左心室）と大動脈の相互作用シミュレーションにおいて、研究室ではモデルベースの手法で MATLAB/Simulink 上にシミュレータを開発していた。しかし、ここでのプラントモデルは単一管型の大動脈であった。これを非対称 T 字管型のプラントモデルに置き換えてシミュレーションを行い、大動脈の中心部と抹消部の動的な振舞いを解析し、理解を深める必要があった。最終的なゴールは、抹消部の脈波データから大動脈中心部の血圧・血流量を推定することであるが、それに向けた取り組みの一環の位置付けである。

4.1. 諸言

4.1.1. 研究の経緯

循環器系（心血管器系）の動的な血流量を観察することは、健常状態の場合でも病気状態の場合でも、大変に重要なことである。日本などの先進国の成人の死亡率の大部分は、癌を筆頭とするが、それに並んで脳血管および心血管疾患が続く^[1]。血管疾患は、アテローム性動脈硬化症、動脈硬化症、動脈瘤破裂および血栓塞栓症などによって誘発される。これらの場合、動脈循環系の血流異常が重要な病理学的役割を果たす。

現在、臨床実践において、心血管機能不全を客観的に評価することは、必ずしも十分ではない。その理由は、臨床的に利用可能な血行動態パラメータを制限する血管内圧および血流量の直接測定が困難であるのに対し、実際の心血管系は臨床的に利用可能な心血管パラメータ以外の多くの決定要因を有する。さらに、生理学的条件化で様々なパラメータ値を取得し、臨床的設定において、それらを連続的に測定することは非常に困難である。一度に、全てのパラメータの正確な生体内測定は不可能である。

心臓血管系を解析するための工学的アプローチとして、いくつかの研究[2], [3], [4]がすでに効果的な結果を出している。実際に、私たちの研究グループは、従来の手続き型コンピュータ言語を用いて心臓血管系シミュレータを実装し、電気回路によるモデリングの有効性を示した^[2]。しかし、手続き型言語のままでは、開発を継続することは困難である。そこで、モデルベースアプローチを使用した。まずは、先の研究に基づいて、心臓(左心室および前負荷システム部分)および、動脈系などの心臓血管構成要素の各々を最初にモデル化し、それらを心臓血管系全体の動的な心室動脈相互作用を再現するように結合した。モデルベースアプローチは自動車用 ECU(Electronic Control Units)^[5]などの組込みシステムの設計を中心に普及が進んでいる。実際には、この分野ではモデルベース設計(MBD: Model Based Design)アプローチまたはモデル駆動開発(MDD: Model Driven Development)アプローチが採用されている。さらに、モデルベースアプローチは様々なシミュレーションモデルを相互に接続して結合システム全体をシミュレートし、その全体システムを分析することにも有効であると考えられる。これは、モデルベース設計の MILS(Model In the Loop)手法の問題分析フェーズへの適用に相当する。私たちはこの手法をシミュレーション駆動による問題分析(SDPA: Simulation Driven Problem Analysis)と称し、この手法を心臓血管系のシミュレーションに適用してきた^[6](文献[6]においては MBA(Model Based Analysis)と称していたが、その後、スコープを広く考えて SDPA と称するようになった)。モデルベースのプラットフォームとして自動車業界で普及している MATLAB/Simulink を採用した。

話を元に戻すと、文献[6]では、心臓をいくつかの構成要素でモデル化し、大動脈を単一管モデルとして電気回路でモデル化した。次に、それらを結合して全体のシステムを構成した。さらに、全体システムを用いてシミュレーションを行い、心臓血管系のパラメータ推定に適用している。これは、測定結果からモデルのパラメータを推定する逆問題を解く方法^{[7][8]}の応用である。具体的には、心臓の弾性率を表す最大エラスタンス E_{max} とエラスタンスのピークタイミングを示す因子 $DEVF$ を推定パラメータとし、2つのパラメータを異なる値から出発させて、全体の系が安定するように2つのパラメータを補正する方法で、正解に導けることを示した。

上記では、大動脈を最も簡単な単一管で近似していたが、実際の大動脈は頭部と体部に分岐している。SDPA パラダイムでは、大動脈を単一管に代えて分岐したモデルに置き換え、心臓モデルと結合し、シミュレーションによって問題分析を行うことが可能である。

ここでは、大動脈に非対称T字管型モデル^[9]を導入し、単一管モデルを置き換える。置き換えたモデルで全体システムのシミュレーションを行うことが可能であること、さらにはシミュレーションによる脈波の波形解析を行ってみることとした。

4.1.2. 研究の目的

シミュレーション駆動による問題分析 (SDPA: Simulation Driven Problem Analysis) を循環器系 (心血管系) シミュレータに適用することを本章の目的とする。以下を研究の目的とした。

- (1) 非対称T字管型大動脈モデル作成とそれを用いた循環器シミュレータの開発
- (2) 異なる大動脈血管タイプへの解析適用による動作検証
- (3) 大動脈波の前進波と後退波への分解解析

各々に関して、以下の節に記載し、最後に結論を述べ、本章をまとめることとする。

4.2. 非対称 T 字管型大動脈モデルの循環器シミュレータの開発

この節では、心臓の左心室モデルと非対称T字管型大動脈モデルを結合したシミュレータの開発について述べる。心臓の左心室モデルは既開発^[6]のものを流用した。非対称T字管型大動脈モデルは、文献[9]の数学モデルのものを MATLAB/Simulink 上に実装した。

まずは、心臓の左心室モデルについて説明し、その後に大動脈の非対称T字管型モデルとその実装について説明する。

4.2.1. 心臓の左心室モデル

心臓の左心室モデルを図 4.2.1 に示す (1.4.2 節に既出のものを再掲する)。

これは、血流を電流、血圧を電圧、エラスタンス(弾性)を容量、血流の流体抵抗を電気抵抗、弁(僧帽弁、大動脈弁)をダイオードとして捉えたものである。左心房から左心室への静脈還流を前負荷モデル、MV(Mitral Valve)、流入抵抗 R_{in} で表し、左心房から大動脈への駆出血流を左心室のエラスタンス、内部抵抗 $R_i(p)$ 、大動脈弁 AV(Aortic Valve)で表している。

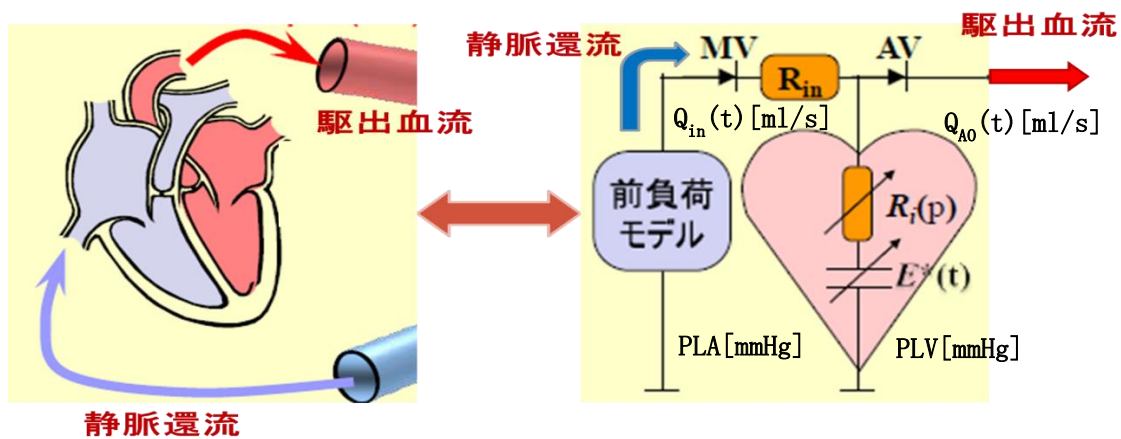


図 4.2.1 心臓の左室モデル

図 4.2.1 の左側は、静脈還流と駆出血流を説明している。心室へは静脈から血液が流入し(静脈還流)、心室容積と心室圧の変化によって心室に蓄えられた血液が動脈へと駆出される(駆出血流)。これは、右心室でも左心室でも同様である。本稿では駆出血流の先は大動脈を想定しており、静脈還流は左心房から左心室への入力血流、駆出血流は左心室から大動脈への出力血流として説明する。左心房から左心室への流入血流 $Q_{in}(t)$ は、図 4.2.1 の前負荷モデル、MV(僧帽弁: Mitral Valve)、流入抵抗 R_{in} によってモデル化される。

ここで、静脈還流の血圧を PLA 、左心室内の血圧を $PLV(t)$ として、左心室への流入血流 $Q_{in}(t)$ は、以下の数式(4.2.1)で表される。

$$Q_{in}(t) = [PLA - PLV(t)]/R_{in} \quad (4.2.1)$$

但し, MV(僧帽弁)の働きによって, $PLA - PLV(t) < 0$ となる場合は, $Q_{in}(t) = 0$ となる.

左心室から大動脈に拍出される心室拍出量 $Q_{Ao}(t)$ は, 大動脈の血圧を $PA(t)$, 大動脈の入力抵抗を R_c として, 以下の数式(4.2.2)で表される.

$$Q_{Ao}(t) = [PLV(t) - PA(t)]/R_c \quad (4.2.2)$$

但し, AV(大動脈弁; Aortic Valve) の働きによって, $PLV(t) - PA < 0$ となる場合, $Q_{Ao} = 0$ となる.

ある時刻ステップ t での左心室の容積 (Volume of Left Ventricle) を $VLV(t)$ とすると, 単位時間 T_1 での次のステップ時刻での左心室の容積 $VLV(t+1)$ は, 次式(4.2.3)となる.

$$VLV(t + 1) = VLV(t) + [Q_{in}(t) - Q_{Ao}(t)] \times T_1 \quad (4.2.3)$$

ある時刻ステップ t での左心室の血圧 (Pressure of Left Ventricle) を $PLV(t)$ とすると, 単位時間 T_1 での次のステップ時刻での左心室の血圧 $PLV(t+1)$ は, 次式(4.2.4)となる.

$$PLV(t + 1) = E(t) \times [VLV(t) - V_0] \times RFF(t) \quad (4.2.4)$$

ここで, $E(t)$ は左心室の時変エラスタンス, V_0 は左心室の血液量が 0 の場合での左心室容積, $RFF(t)$ は心室内部抵抗の $E(t)$ への影響係数を意味する(図 4.2.1 中の $R_i(p)$ に相当する).

ここで, $RFF(t)$ は次式である.

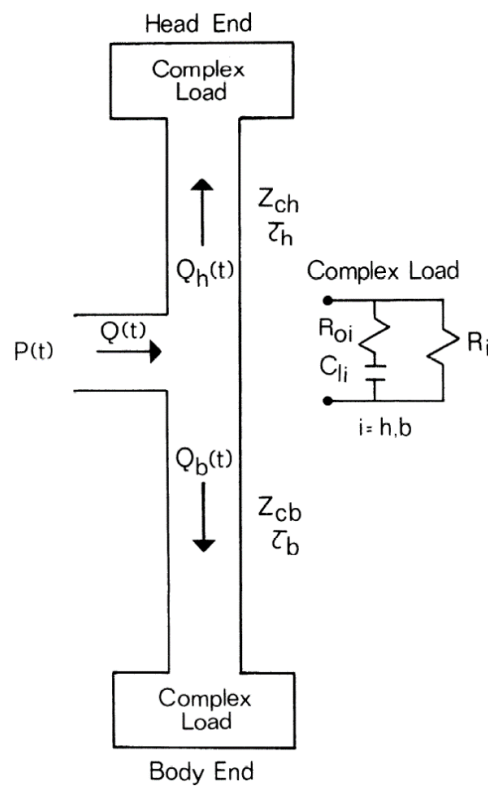
$$RFF(t) = 1 - [RF \times Q_{Ao}(t)] \quad (4.2.5)$$

以上が，心臓の左心室モデルである．

4.2.2. 大動脈の非対称T字管モデル

大動脈の非対称T字管型モデルは，文献[9]のものを使用した．図 4.2.2 にその概要を示す．

図中で，上側が頭部抹消(Head End)で，下側が体部抹消(Body End)となる．



Campbell' 90, T字管型モデル

図 4.2.2 大動脈の非対称T字管型モデル

心臓との接点である中心部の血圧と血流は， $P(t)$ ， $Q(t)$ で表わされる．頭部への血流は $Q_h(t)$ で，体部への血流は $Q_b(t)$ で表わされる．中心部から頭部抹消への大動脈はインピーダンス

Z_{ch} , 遅延時間 τ_h の特性を有する. 中心部から体部抹消への動脈は, インピーダンス Z_{cb} , 遅延時間 τ_b の特性を有する.

抹消部分のモデルは, 図中の Complex Load 部分の電気回路で表わされる. これは, $i = h, b$ として, 2つの抵抗 R_{oi} と R_i と1つの容量 C_i で, 各々をモデル化したものである. この電気回路のモデルは物理的な実態を反映した古典的な Windkessel モデルとは異なる. 容量 C_i に直列接続する R_{oi} が Windkessel モデルに付加されている. 以下, 文献[9]の数学モデルを紹介する.

中心部の血流 $Q(t)$ は, $Q_b(t)$ と $Q_h(t)$ に分岐するので, 次式が成り立つ.

$$Q(t) = Q_b(t) + Q_h(t) \quad (4.2.6)$$

Complex Load の抵抗 R_{oi} と容量 C_i の間のノードに位置する端部血圧を $x_i(t)$ で表わすと, 血流 $Q_i(t)$ と端部血圧 $x_i(t)$ は, 以下の関係となる ($i = h$; 頭部, b ; 体部).

$$Q_b(t) = \frac{1}{Z_{cb}} P(t) - \frac{1}{R_{ob}} x_b(t - \tau_b) \quad (4.2.7)$$

$$Q_h(t) = \frac{1}{Z_{ch}} P(t) - \frac{1}{R_{oh}} x_h(t - \tau_h) \quad (4.2.8)$$

数式(4.2.6)~(4.2.8)から, 以下が導かれる.

$$\hat{P}(t) = Z_c Q(t) + \frac{Z_c}{R_{ob}} x_b(t - \tau_b) + \frac{Z_c}{R_{oh}} x_h(t - \tau_h) \quad (4.2.9)$$

ここで, $\hat{P}(t)$ の表現は, $Q(t)$ を入力として, モデル計算における計算対象であることを意味している. そして, Z_c は, 以下で定義した (Z_c は, 2つの血管の並列インピーダンスに相当する).

$$Z_c = \frac{Z_{ch} \cdot Z_{cb}}{Z_{cb} + Z_{ch}} \quad (4.2.10)$$

体部, 頭部の端部血圧の状態方程式は, 以下となる.

$$\frac{dx_b}{dt} = -\alpha_b \cdot x_b(t) + \beta_b [P(t - \tau_b) + Z_{cb} \cdot Q_b(t - \tau_b)] \quad (4.2.11)$$

$$\frac{dx_h}{dt} = -\alpha_h \cdot x_h(t) + \beta_h [P(t - \tau_h) + Z_{ch} \cdot Q_h(t - \tau_h)] \quad (4.2.12)$$

これらの式から、 $Q_b(t)$ 、 $Q_h(t)$ を消去すると、以下の式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dx_b}{dt} = & -\alpha_b \cdot x_b(t) \\ & + \beta_b \left[2Z_c \cdot Q(t - \tau_b) + \frac{2Z_c - Z_{cb}}{R_{ob}} x_b(t - 2\tau_b) \right. \\ & \left. + \frac{2Z_c}{R_{oh}} x_h(t - \tau_b - \tau_h) \right] \end{aligned} \quad (4.2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_h}{dt} = & -\alpha_h \cdot x_h(t) \\ & + \beta_h \left[2Z_c \cdot Q(t - \tau_h) + \frac{2Z_c - Z_{ch}}{R_{oh}} x_h(t - 2\tau_h) \right. \\ & \left. + \frac{2Z_c}{R_{ob}} x_b(t - \tau_b - \tau_h) \right] \end{aligned} \quad (4.2.14)$$

ここで、 α_b 、 α_h 、 β_b 、 β_h は、以下である。

$$\alpha_b = \frac{1}{2R_{ob} \cdot Cl_b} \frac{2R_{ob} + R_b}{R_{ob} + R_b} \quad (4.2.15)$$

$$\alpha_h = \frac{1}{2R_{oh} \cdot Cl_h} \frac{2R_{oh} + R_h}{R_{oh} + R_h} \quad (4.2.16)$$

$$\beta_b = \frac{1}{2R_{ob} \cdot Cl_b} \quad (4.2.17)$$

$$\beta_h = \frac{1}{2R_{oh} \cdot Cl_h} \quad (4.2.18)$$

上記とは逆に、血圧 $P(t)$ を入力として血流 $Q(t)$ を計算する関係も成り立つ。

$$\hat{Q}(t) = \frac{1}{Z_c} P(t) - \frac{1}{R_{ob}} x_b(t - \tau_b) - \frac{1}{R_{oh}} x_h(t - \tau_h) \quad (4.2.19)$$

$$\frac{dx_b}{dt} = -\alpha_b \cdot x_b(t) + \beta_b \left[2P(t - \tau_b) - \frac{Z_{cb}}{R_{ob}} x_b(t - 2\tau_b) \right] \quad (4.2.20)$$

$$\frac{dx_h}{dt} = -\alpha_h \cdot x_h(t) + \beta_h \left[2P(t - \tau_h) - \frac{Z_{ch}}{R_{oh}} x_h(t - 2\tau_h) \right] \quad (4.2.21)$$

MATLAB/Simulink による実際のモデリングは、数式(4.2.9)と(4.2.11), (4.2.12)の組み合わせのものを使用した。作成したモデルは、心臓から駆出される現在タイムステップの血流 $Q(t)$ を入力とし、中心部血圧 $P(t)$ をもとめ、1タイムステップ前の $x_b(t-1)$, $x_h(t-1)$ を参照しながら、現在タイムステップの抹消部血圧 $x_b(t)$, $x_h(t)$ や頭部、ボディ部への血流 $Q_b(t)$, $Q_h(t)$ を求めるものである。これを1つのブロックとして MATLAB/Simulink 上に実装した。

実装したブロックを MATLAB/Simulink 上で、従来の心臓の左心室モデルと結合し、これによって非対称T字管型大動脈モデルの循環器シミュレータの開発が完了した。

経験的に、従来の手続き型言語による開発では、このようなシンプルな手法でモデル結合を行うことは困難な場合が多いことを付記しておく。

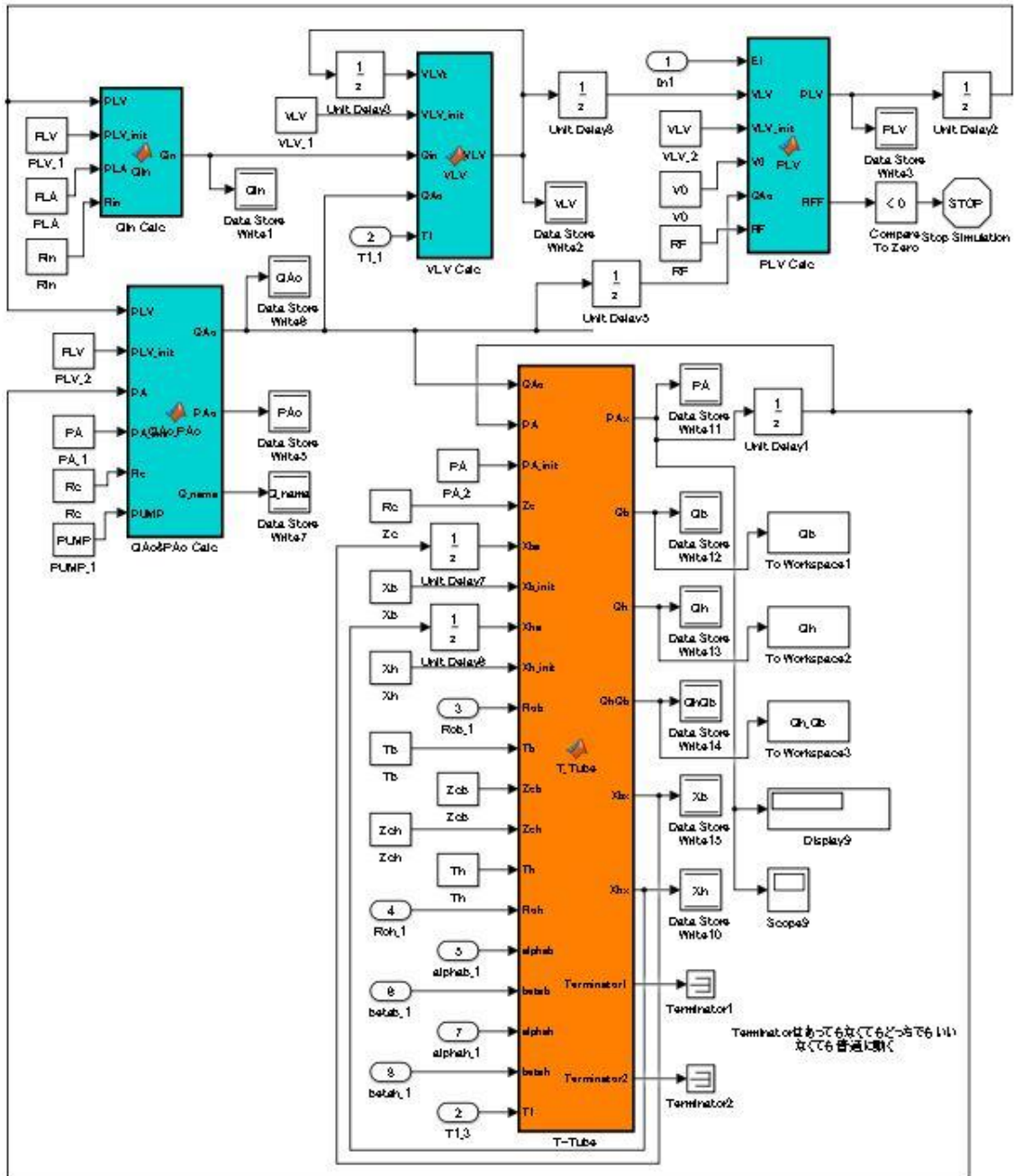


図 4.2.3 MATLAB/ Simulink 上で開発した循環器シミュレータ

4.3. Murgo 分類大動脈タイプへの解析適用

開発した非対称T字管型大動脈モデルの循環器シミュレータを異なる大動脈血管タイプのモデルパラメタで評価し、その動作検証を行った。

本節では、はじめに Murgo 分類の大動脈タイプを紹介する。Murgo 分類による血管の電気回路モデルは伝統的な Windkessel の3素子モデルを入手したが、これを Campbell'90 の非対称T字管型の大動脈モデル^[9]に適用するためには、パラメタの変換が必要であった。次にこのパラメタ変換方法を紹介する。最後にシミュレーションを実施した。その検証した結果を紹介する。

4.3.1. Murgo 分類の大動脈タイプ

大動脈血管のタイプ分類は、Murgo によって文献[10]で行われている。その分類は、タイプ A, B, C の3分類で、以下のような想定年代と特徴による分類である。

表 4.3.1 Murgo'80 の大動脈血管のタイプ分類

タイプ	想定年代	特徴
A	中年期(30代~50代)	左室収縮後期圧が、収縮前期圧を超える
B	中間(20代~40代)	左室収縮後期圧と収縮前期圧がほぼ等しい
C	青年期(10代~20代)	左室収縮前期圧が、収縮後期圧を超える

その特徴を換言すれば、大動脈の特性によって心臓の左心室へのフィードバックが異なり、心臓から駆出される血圧の特徴に変化が現れることを示唆するものであると言える。

4.3.2. 非対称T字管型向けの大動脈パラメタの変換

執筆者らが入手した Murgo'80 による大動脈分類パラメタは伝統的な Windkessel 型の電気回路モデルである。一方で非対称T字管型の大動脈モデルは、想定する電気回路が異なるモデルで

ある. Murogo 分類のタイプごとのモデルパラメタを Windkessel 型から Campbell 型に変換する必要に迫られた. その変換方法を記載しておく.

図 4.3.1 に Windkessel 型モデルから非対称T字管型モデルへの変換概要を示す.

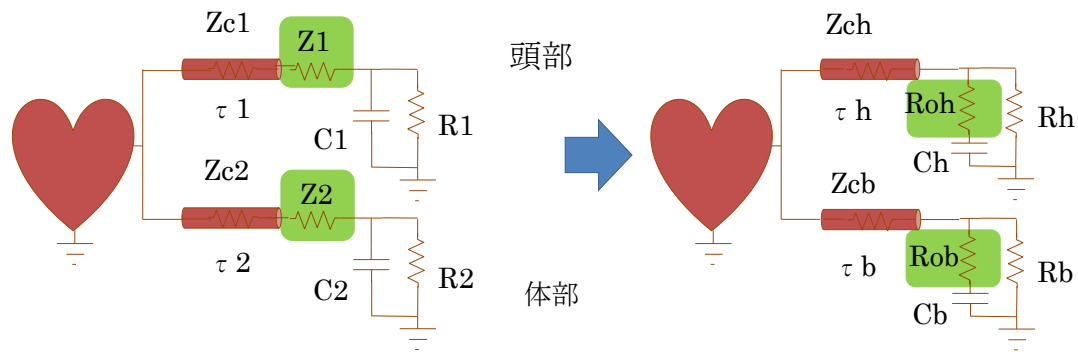


図 4.3.1 Windkessel 型モデルから非対称T字管型モデルへの変換概要

(左側で, $Z_{c1}=Z_1$, $Z_{c2}=Z_2$ は同一であり遅延を含む抵抗の意味である.)

まず, 頭部側のパラメタ変換を示す.

頭部の大動脈端部の負荷インピーダンスと反射係数は, 左側の Windkessel 型モデルでは, 以下の式で表わされる.

$$Z_L(j\omega) = Z_1 + \frac{R_1}{1 + j\omega \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.3.1)$$

$$\Gamma(j\omega) = \frac{R_1}{R_1 + 2Z_1 + 2j\omega \cdot Z_1 \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.3.2)$$

右側の非対称T字型モデルでは以下の式で表わされる.

$$Z_L(j\omega) = \frac{R_h + j\omega \cdot R_{oh} \cdot R_h \cdot C_h}{1 + j\omega R_1 C_1} \quad (4.3.3)$$

$$\Gamma(j\omega) = \frac{R_h - Z_{ch}}{R_h + Z_{ch} + 2j\omega \cdot Z_{ch} \cdot C_h (R_{oh} + R_h)} \quad (4.3.4)$$

ここで、両モデルに登場する以下のパラメタは、共通の値として保存すると考えるのが自然である。

$$\tau_h = \tau_1, Z_{ch} = Z_1 (= Z_{c1}), Ch = C_1$$

R_{oh} と R_h を計算するために、角速度 ω が無限大における負荷インピーダンスの一致(数式(4.3.1)と(4.3.3)が一致)と $\omega=0$ における反射係数の一致を条件とした(数式(4.3.2)と(4.3.4)が一致)。

これによって、以下の式が導かれる。

$$Z_1 = \frac{R_{oh} \cdot R_h}{R_{oh} + R_h} \quad (4.3.5)$$

$$\frac{R_1}{R_1 + 2Z_1} = \frac{R_h - Z_1}{R_h + Z_1} \quad (4.3.6)$$

結果として、以下の R_{oh} と R_h に変換する数式を導いた。

$$R_{oh} = \frac{Z_1 \cdot R_h}{Z_1 - R_h} \quad (4.3.7)$$

$$R_h = R_1 + Z_1 \quad (4.3.8)$$

体部側も同様に、以下の R_{ob} と R_b に変換する数式を導いた。

$$R_{ob} = \frac{Z_2 \cdot R_b}{Z_2 - R_b} \quad (4.3.9)$$

$$R_b = R_2 + Z_2 \quad (4.3.10)$$

Murgo 分類の A,B,C タイプの Windkessel 型大動脈パラメタを上記で変換し、非対称T字管型の大動脈パラメタとして使用した。

これらのパラメタを用いて、大動脈を非対称T字管型モデルとする循環器シミュレーションを実施した。

4.3.3. 非対称T字管型大動脈モデルによる循環器シミュレーション

上述した Murgo の3タイプの大動脈パラメタを用いて非対称T字管型大動脈モデルによる循環器シミュレーションを実施した。

タイプAに対する、その結果を図 4.3.2 に示す。

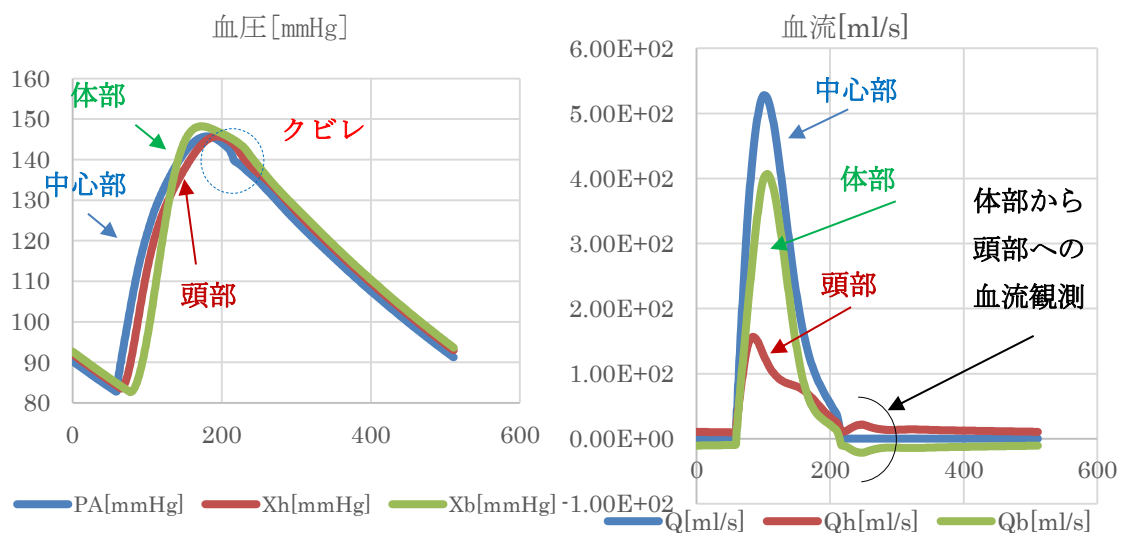


図 4.3.2 シミュレーション結果による血圧と血流グラフ (タイプA)

タイプAの中心部血圧には、反射波の影響によるクビレが見られる。血流の方では、中心部の心臓からの駆出が終わった後に、体部から頭部への血流が観測された。グラフから体部側への血圧、血流の伝達が頭部よりも遅くなり、心臓からの駆出が終わった後に体部側の血圧が高めに残り、体部側から頭部側に血液が反射した様子が伺える。

横軸に左心室の容積[ml], 縦軸に左心室の室圧[mmHg]を配置し, 左心室の動作履歴をプロットしたグラフを図 4.3.4 に紹介する.

このグラフは心臓の動きに合わせて, 動作履歴を残したもので, 左下コーナーから動作を説明する. 最初は左下コーナーから右下コーナーに履歴が進み, その後, 右下から反時計回りに動作が進み, 左下コーナーに履歴が戻る繰り返しである. 最初の左下から右下方向への動きは, 左心室への血液の充満期である. 左心室が空で最小の状態から, 室圧は殆ど上昇しないで容積が膨らむ時期である. その後, 左心室が血液を駆出し始める状況が, 右下から上方への履歴で等容量収縮期となる. 右上から左上への動きは, 駆出期で, 左心室は容積を縮めながら血液を駆出する様子が分かる. 最後に, 左上から左下は, 等容積弛緩期で少し残った血液の駆出を行っている.

タイプ A は, 左上にピーク位置を確認できる. タイプ B は中央部上方にピーク位置を確認できる. タイプ C は右上にピーク位置を確認できる. 「左室収縮期前期の室圧」である右上部分の室圧と「左室の収縮期後期の室圧」である左上部分の室圧を比較する. タイプ A は, 左上の室圧が右上の室圧よりも高めである. タイプ B は, 左上と右上の室圧がほぼ同じレベルと考えるとよさそうである. タイプ C は左上よりも右上の室圧が高めである. これらの特徴は, 4.3.1 節で述べた Murgó 分類の各タイプの特徴をよく反映している.

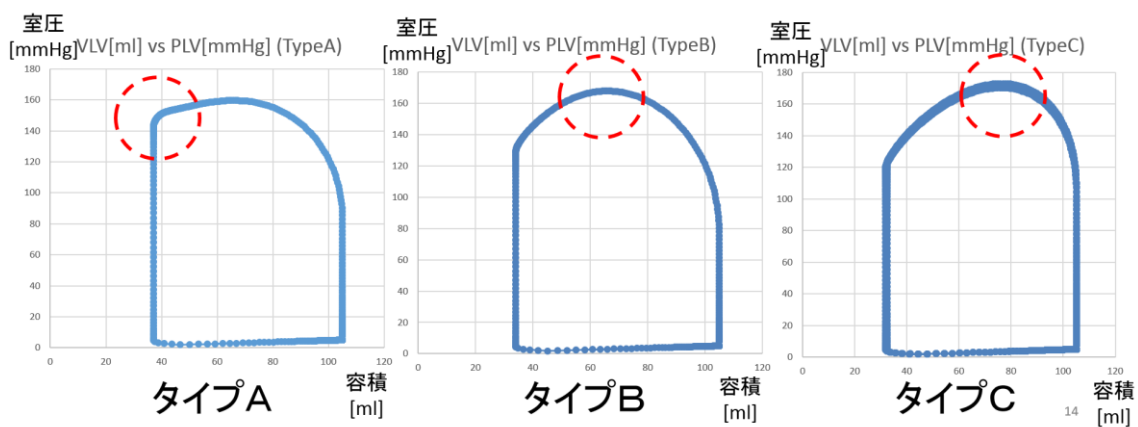


図 4.3.4 左心室の容積・室圧の履歴プロット

以上によって、開発したシミュレータの検証を行うことができた。

なお、シミュレータで使用した入力パラメータは付録 B に掲載した。

4.4. 大動脈波の前進波と後退波への分解

文献[9]には、大動脈抹消部による後退波(反射波)血圧成分を求める数式も示されている。後退波が求めれば、前進波も求まる。大動脈の血流の振舞いを理解するために前進波と後退波への分解解析を行ってみた。ここでの計算対象は、図 4.4.1 の赤い文字で表記している血圧、血流である。まず、 $P_{bwh}(t)$ 、 $Q_{bwb}(t)$ 、後述の文献[9]記載の式で求められる。

残りを計算するステップの概要を図 4.4.2 に示す。

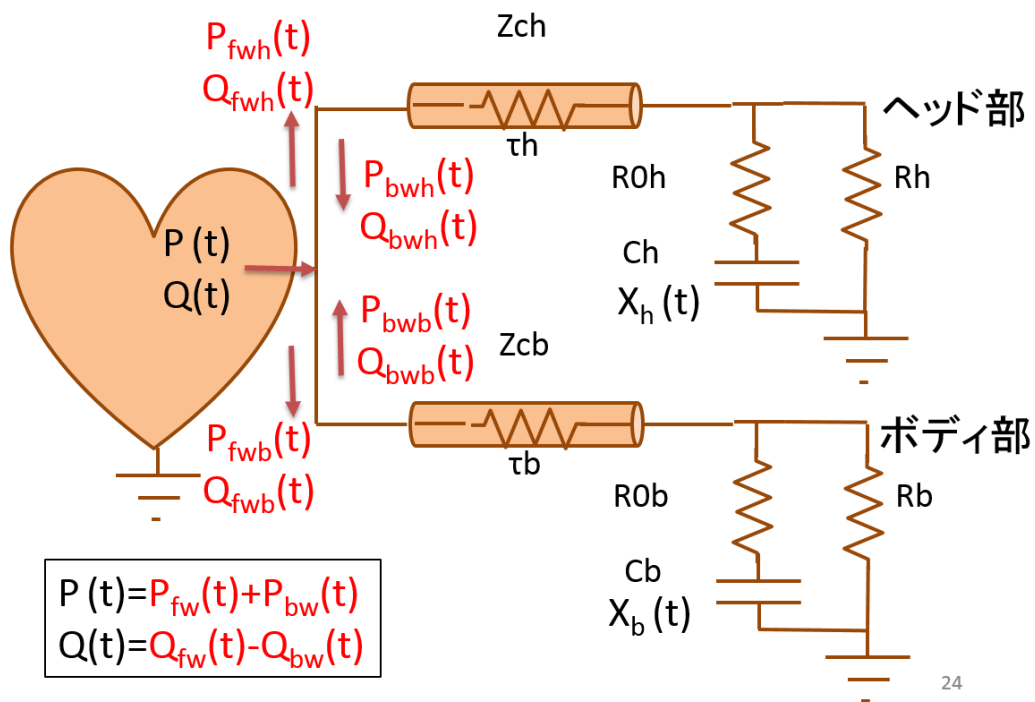


図 4.4.1 大動脈波の前進波、後退波への分解対象

• 計算ステップ

- | | |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| (1) 血圧(前進波)を求める | (3) 中心部の血流(前進・後退)を求める |
| $P_{fwh}(t) = P(t) - P_{bwh}(t)$ ヘッド | $Q_{fw}(t) = Q_{fwh}(t) + Q_{fwb}(t)$ 中心 |
| $P_{fwb}(t) = P(t) - P_{bwb}(t)$ ボディ | $Q_{bw}(t) = Q_{bwh}(t) + Q_{bwb}(t)$ 中心 |
| (2) 血流(前進、後退)を求める | (4) 中心部の血圧(前進・後退)を求める |
| $Q_{fwh}(t) = (1/Zch)P_{fwh}(t)$ | $P_{fw}(t) = Q_{fw}(t)/Z_c$ 中心 |
| $Q_{bwh}(t) = (1/Zch)P_{bwh}(t)$ ヘッド | $P_{bw}(t) = Q_{bw}(t)/Z_c$ 中心 |
| $Q_{fwb}(t) = (1/Zch)P_{fwb}(t)$ | ※ $Z_c = Z_{cb} * Z_{ch} / (Z_{cb} + Z_{ch})$ |
| $Q_{bwb}(t) = (1/Zch)P_{bwb}(t)$ ボディ | (5) 確認を行う |
| | $Q(t) = Q_{fw}(t) - Q_{bw}(t)$ の一致確認 |
| | $P(t) = P_{fw}(t) + P_{bw}(t)$ の一致確認 中心 |

図 4.4.2 大動脈波の前進波、後退波への分解計算ステップ

まず、文献[9]記載の頭部、体部の後退波の血圧 $P_{bwh}(t)$, $P_{bwb}(t)$ から各々の前進波の血圧 $P_{fwh}(t)$, $P_{fwb}(t)$ を求められる。次に、頭部の前進波、後退波の血流 $Q_{fwh}(t)$, $Q_{bwh}(t)$ と体部の前進波、交代波の血流 $Q_{fwb}(t)$, $Q_{bwb}(t)$ を求め、さらに、これらから中心部の前進波、後退波の血流 $Q_{fw}(t)$, $Q_{bw}(t)$ と血圧 $P_{fw}(t)$, $P_{bw}(t)$ を求め、最後に、上記で求めた中心部の血流と血圧の合計値をシミュレーション結果と比較して計算の確認を行うものである。

以下に、数式を交えて説明する。

頭部の後退波の血圧成分 $P_{bwh}(t)$ と体部の後退波の血圧成分 $P_{bwb}(t)$ は次式である^[9]。

$$P_{bwh}(t) = \frac{1}{2} \frac{Z_{ch}}{R_{oh}} xh(t - \tau_h) \quad (4.4.1)$$

$$P_{bwb}(t) = \frac{1}{2} \frac{Z_{cb}}{R_{ob}} xb(t - \tau_b) \quad (4.4.2)$$

後退波の血圧成分が求めれば、前進波の血圧成分は、引き算で求められる。頭部の前進波血圧 $P_{fwh}(t)$ と体部の前進波血圧 $P_{fwb}(t)$ は、次式で求まる。

$$P_{fwh}(t) = P_h(t) - P_{bwh}(t) \quad (4.4.3)$$

$$P_{fwb}(t) = P_b(t) - P_{bwb}(t) \quad (4.4.4)$$

この際の頭部の前進波の血流 $Q_{fwh}(t)$ と後退波の血流 $Q_{bwh}(t)$ は、以下で求められる。

$$Q_{fwh}(t) = \frac{1}{Z_{ch}} P_{fwh}(t) \quad (4.4.5)$$

$$Q_{bwh}(t) = \frac{1}{Z_{ch}} P_{bwh}(t) \quad (4.4.6)$$

同様に、体部の前進波の血流 $Q_{fwb}(t)$ と後退波の血流 $Q_{bwb}(t)$ は、以下で求められる。

$$Q_{fwb}(t) = \frac{1}{Z_{cb}} P_{fwb}(t) \quad (4.4.7)$$

$$Q_{bwb}(t) = \frac{1}{Z_{cb}} P_{bwb}(t) \quad (4.4.8)$$

中心部の前進波と後退波の血流は、頭部と体部の合計であり、次式となる。

$$Q_{fw}(t) = Q_{fwh}(t) + Q_{fwb}(t) \quad (4.4.9)$$

$$Q_{bw}(t) = Q_{bwh}(t) + Q_{bwb}(t) \quad (4.4.10)$$

中心部の前進波と後退波の血流は、以下で求められる。

$$P_{fw}(t) = \frac{Q_{fw}(t)}{Z_c} \quad (4.4.11)$$

$$P_{bw}(t) = \frac{Q_{bw}(t)}{Z_c} \quad (4.4.12)$$

ここで、 Z_c は大動脈中心部から頭部と体部の大動脈全体を見込んだインピーダンスである。

$$Z_c = \frac{Z_{cb} \cdot Z_{ch}}{Z_{cb} + Z_{ch}} \quad (4.4.13)$$

求めた中心部の前進波血流，後退波血流 $Q_{fw}(t)$ ， $Q_{bw}(t)$ と前進波血圧，後退波血圧 $P_{fw}(t)$ ， $P_{bw}(t)$ から中心部の血流 $Q(t)$ と中心部の血圧を再計算する。血流は流れなので，向きが逆の流れの合算は引き算となる。血圧は圧力なので，向きが逆でも合算は足し算となる。

$$Q(t) = Q_{fw}(t) - Q_{bw}(t) \quad (4.4.14)$$

$$P(t) = P_{fw}(t) + P_{bw}(t) \quad (4.4.15)$$

図 4.4.3 に計算結果の確認例と解析結果例を示す。

• $Q(t) = Q_{fw}(t) - Q_{bw}(t)$ の一致

• $P(t) = P_{fw}(t) + P_{bw}(t)$ の一致

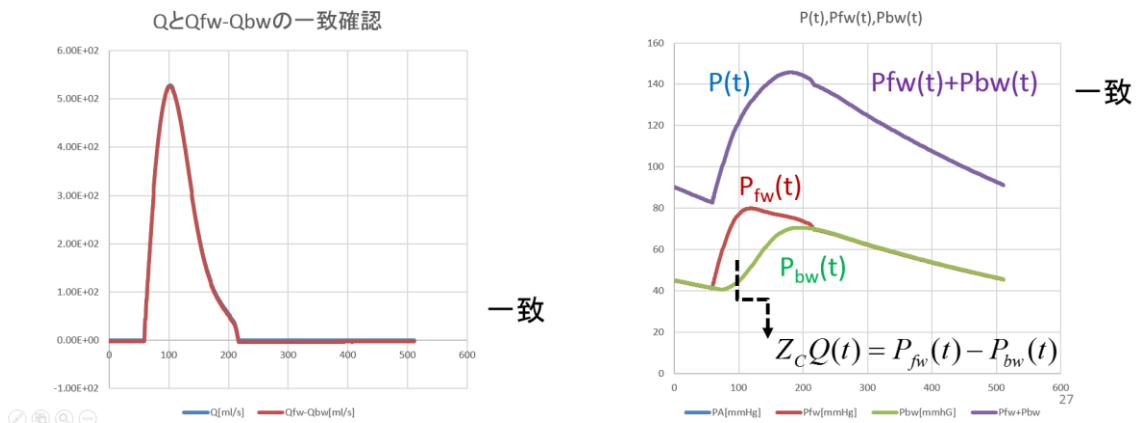


図 4.4.3 計算結果の確認と解析結果例 (Murgo 分類タイプ A)

図 4.4.3 の左側は，中心部の血流一致の確認である。青のシミュレーション結果と前進波，後退波分解による計算結果が一致し，重なって表示されており，両者の一致を確認できる。右側は，

血圧である。青のシミュレーション結果 $P(t)$ と紫の前進波，後退波分解による計算結果 $P_{fw}(t)+P_{bw}(t)$ が一致し，重なって表示されており，両者の一致を確認できる。

赤は大動脈中心部の前進波成分 $P_{fw}(t)$ で，緑は後退波成分 $P_{bw}(t)$ である。この差分が $Z_c Q(t)$ (中心部から見込んだ大動脈のインピーダンスと左側の血流の積に相当している)である。前進波と後退波の血圧成分は，心臓から血液が駆出される血流がある間は差があるが，心臓からの血液駆出がない場合，両者は均衡し一致している。心臓からの血液駆出が終わっても，前進波と後退波の往来は継続し，徐々に減衰する様子を解析することができた。

その他の前進波，後退波分解による解析は，付録 C に結果のグラフを掲載した。

大動脈末端部分の血圧 $P_{Ti}(t)$ ($i=h$:頭部, $i=b$:体部)は，末端部分への入射波(incident wave)と反射波(reflected wave)を用いて，以下で表される。

$$P_{Th}(t) = P_{iwh}(t) + P_{rwh}(t) = P_{fwh}(t - \tau_h) + P_{bwh}(t + \tau_h) \quad (4.4.16)$$

$$P_{Tb}(t) = P_{iwb}(t) + P_{rwb}(t) = P_{fwb}(t - \tau_b) + P_{bwb}(t + \tau_b) \quad (4.4.17)$$

非対称T字管型モデルは損失のない伝達管モデル^[9]であり，末端部分の血圧は中心部分の前進波血圧と後退波血圧をタイムシフトした合成によって表される。これから末端部分(手首の橈骨部位)の血圧の動態を中心部分と比較分析することが可能になる。分析した結果例を図 4.4.4 に示す。この図では，赤い実線が中心部血圧で青い点線が頭部末端部血圧である。末端部は中心部から τ_h 遅延して伝播した前進波とその反射波の合成血圧となる。そのため，脈波の位相がシフトする。図中では，赤い中心部の波形変化に τ_h 遅延して青い点線の末端部波形が動き出していることが分かる。また，赤い中心部の波形に比べて青い点線の末端部の波形のピークが大きく振れていることが分かる。

このようにシミュレーションによって中心部の血圧と末端部の血圧の関係の分析が可能となってくる。

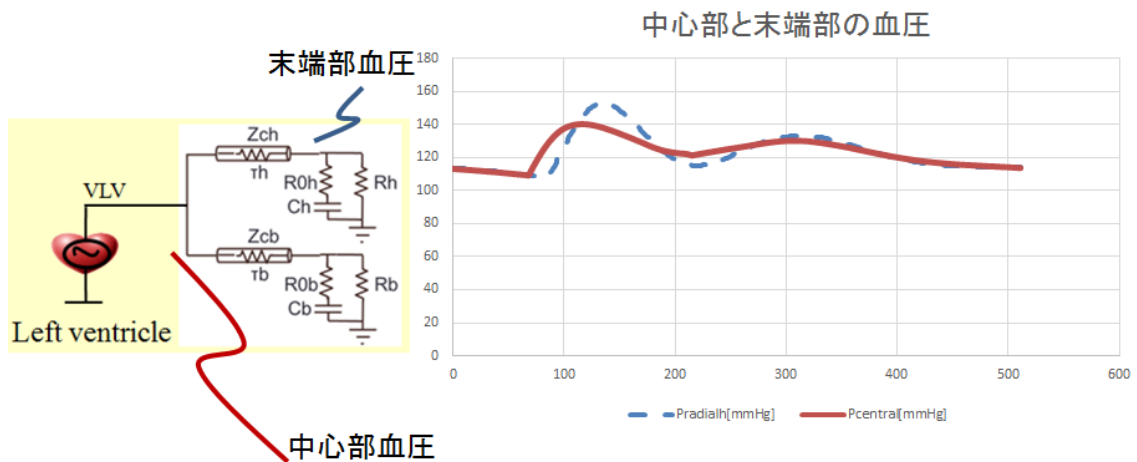


図 4.4.4 中心部血圧と末端部血圧の比較分析例

末端部の血圧から中心部の血圧を推定する試みは被験者の負担を減らせる方法として、従来から研究されてきた。手法を簡単に述べると、中心部血圧と末端部血圧の関係を表す圧伝達関数を求めて、末端部血圧から中心部血圧を推定するものである。

図 4.4.5 に末端部血圧から中心部血圧を推定する計算方法を示す。

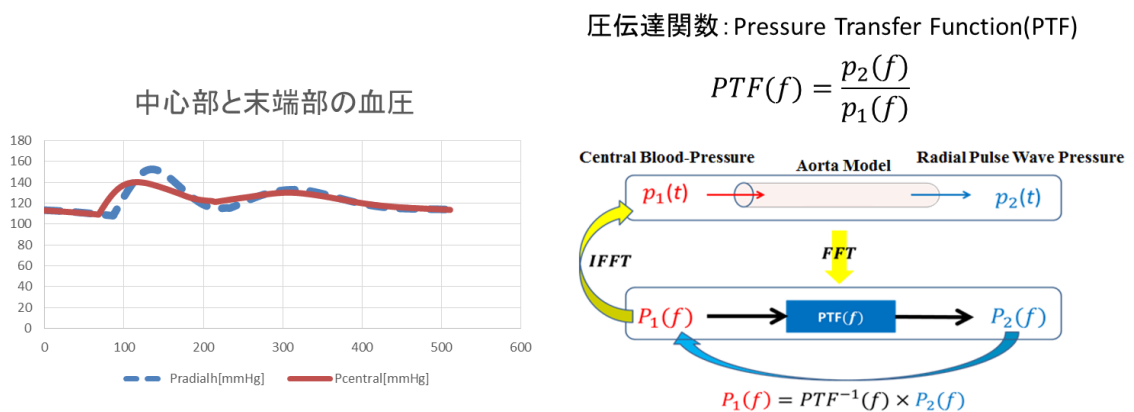


図 4.4.5 末端部血圧からの中心部血圧推定方法

これは、中心部血圧(図中では $P_1(t)$)と末端部血圧(図中では $P_2(t)$)をフーリエ変換によって周波数空間に変換し、周波数空間で中心部から末端部への圧伝達関数($PTF(f)$)を予め求めて

おくものである。測定される末端部血圧を周波数空間に変換し、それを圧伝達関数($PTF(f)$)で除算し、その結果を逆フーリエ変換することで中心部血圧を推定するものである。

そのような製品として HEM-9000 や SphygmoCor などが知られている。しかし、これらの製品は大型・高価である。執筆者らの研究グループでは、小型で安価なセンサを用いた中心血圧推定を目指して、ウェアラブルな容積脈波センサを用いた中心血圧推定システム開発に着手している^[11]。その内容の紹介については別の機会に譲るとして、そのシステム構築において、本節で述べた中心部血圧と末端部血圧の比較分析は重要である。また分析方法を理解したことを契機にウェアラブルな容積脈波センサによる測定デバイス開発が着手され、シミュレーション駆動による問題分析 SDPA が一段階ステップアップし、次の測定-モデリング-問題分析の環へとシフトして行った。

4.5. 結論

執筆者らの研究グループが提唱するシミュレーション駆動による問題分析 SDPA(Simulation Driven Problem Analysis)のパラダイムにより、非対称T字管型の大動脈モデル(プラントモデル)を MATLAB/Simulink 上で開発し、既存の心臓モデル(制御モデル)と結合して、非対称T字管型大動脈モデルを有する循環器シミュレータを開発した。この際、伝統的な Windkessel モデルの電気回路素子パラメタを非対称T字管型の電気回路素子パラメタへの変換を行った。シミュレータを Murgó 分類の3タイプの血管パラメタに適用し、左心室の容積-室圧履歴プロットが Murgó 提唱の動的特性を再現していることを確認し、シミュレータの検証を行った。さらに、得られた脈波を前進波と後退波に分割解析し、体部と頭部で相互に行き交う脈波の挙動把握解析を行った。

従来の大動脈モデルは単一管型であったが、これの非対称T字管型モデルへの置き換えは比較的容易に行うことができた。これは、モデルベース手法ならではのモデルの可搬性・可用性の特性の効果である。

上記のように、モデルベース設計ツールを自然物である循環器系に適用して、大動脈中の前進波と後退波の動態を理解することができた。さらに、抹消部の血圧を中心部の血圧に変換する伝

達関数を求めることができた。これをもってシミュレーション駆動による問題分析の第3ステップ「プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレートする」の実践を行った。また、その結果による見通しから、ウェアラブルな容積脈波センサによる測定デバイス開発が着手された。シミュレーション駆動による問題分析のスパイラルが一段階ステップアップし、次の測定-モデリング-問題分析の環へとシフトして行くことができた。

参考文献

- [1] 厚生労働省：平成 26 年（2014）人口動態統計（確定数）の概況，
<http://www.mhlw.go.jp/english/database/db-hw/dl/81-1a2en.pdf>.
- [2] H. Miyashita, M. Sugimachi, T. Sato, T. Kawada, T. Shishido, T. Nakahara, R. Yoshimura, H. Takaki, H. Miyano and K. Sunagawa, “A novel servo-control system that imposes desired aortic input impedance on in situ rat heart”, *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 278(3):H998–H1007 (2000).
- [3] W.W. Nichols, M.F. O’Rourke and C. Vlachopoulos, “McDonald’s Blood Flow in Arteries: Theoretical, Experimental and Clinical Principles”, 6th ed. London: Hodders Arnold (2011).
- [4] B. Fetics, E. Nevo, C.H. Chen, and D.A. Kass, “Parametric Model Derivation of Transfer Function for Noninvasive Estimation of Aortic Pressure by Radial Tonometry”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 46, No.6, pp.698–706 (1999).
- [5] JMAAB, Website, <http://jmaab.mathworks.jp/>.
- [6] Shuji Tkahashi, Kenta Sakawa, Yoichi Shiraishi and Hiroshi Miyashita, “Modeling, Simulation and Parameter Estimation of the Cardiovascular System by using Model Based Approach,” *SICE 2013 Annual Conference*, pp.493–500, September (2013).
- [7] S.M. Sait and H. Youssef, “Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering: Solving Combinatorial Optimization Problems,” John Wiley & Sons (2000).
- [8] Tadashi Ito, Shingo Yamada and Hideaki Kazama: Measurement of Body Fat Distribution by Using Electrical Impedance Tomography *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, pp.2551–2554, Busan, Korea, Oct.18–21 (2006).
- [9] K. B. Campbell, R. Burattini, D. L. Bell, R. D. Kirkpatrick and G. G. Knowlen, “Time-domain formulation of asymmetric T-tube model of arterial system,” *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 258:H1761–H1774, (1990).

- [10] J. P. Murgu, N. Westerhof, J. P. Giolma and S. A. Altobelli, "Aortic input impedance in normal man: relationship to pressure waveforms," *Circulation* 62: pp.105–116 (1980).
- [11] Kyoji Nakajo, Yudai Komori, Shuji Takahashi, Kazuhiro Motegi, Yoichi Shiraishi and Hiroshi Miyashita, "Pressure Transfer Function for Aorta Model in Cardiovascular Simulator - Feasibility Study of Wearable Central Blood-Pressure Gauge," the first International Conference on Medical Engineering, Health Informatics and Technology (MediTec 2016) (2016) (in press).

第5章 結論

本研究では、シミュレーション駆動による問題分析へのアプローチをテーマとして推進した。シミュレーション駆動による問題分析は、モデルベース設計の手法を人工物のみならず、自然物へも展開するパラダイムと捉えた。以下の3ステップを念頭にして個別の研究テーマに取り組んだ。

- (1) プラント(キーデバイス)の特性データを取得する
- (2) 得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う
- (3) プラントモデルに開発・設計部分(制御モデル)を加えてシミュレートする

第1のステップは、第2章「鉛バッテリーの内部抵抗測定器の開発」で実践を行った。ここでは、鉛バッテリーの劣化特性を代表とする内部抵抗を測定し、特性データを取得した。成果として、IoTタイプの鉛バッテリー内部抵抗測定器を開発したこと、および、測定結果から、パルス発生デバイスによる、弱いながらもバッテリーの延命化効果を確認したことが挙げられる。今後のステップとしては、パルスの有無による内部抵抗変化を含む鉛バッテリーのモデル化があるが、その前にさらなるデータの積み上げが必要である。

第2のステップは、第3章「リチウムイオンキャパシタのモデル化」で実践した。ここでは、簡素なリチウムイオンキャパシタのモデル化を行い、そのモデル同定を行った。リチウムイオンキャパシタの放電特性を丁寧に観察し、電流依存性が強く電圧依存性が低いことに着目し、簡素な3素子(1つの可変容量と2つの抵抗)でのモデル創生とその同定に成功した。今後のステップとしては、このモデルを用いたハイブリッド・エネルギー・ストレージ・システムのシミュレーションによる分析と実車EVへの応用が挙げられる。

第3のステップは、第4章「循環器シミュレータの開発」で実践を行った。ここでは、心臓左心室モデルと単一管型大動脈モデルで構成される、研究室で開発した循環器シミュレータをベースに研究に着手した。既存のシミュレータと同一のモデルベース設計プラットフォーム(MATLAB/Simulink)上に非対称T字型の大動脈モデルを構築し、これを従来の単一管型大動脈モデルに置き換えた。非対称T字管型の大動脈モデルは、血流・血圧の前進波と後退波分解を

可能とするモデルで、シミュレーションとその結果分析によって脈波の動態理解を深めることができた。その結果として、動脈抹消部分の脈波から大動脈中心部分の脈波推定を伝達関数で再現できることを確認した。その結果から、ウェアラブルな指尖容積脈波センサによる中心血圧測定デバイスの開発に着手した。

以上のように、シミュレーション駆動による問題分析の3ステップを実践し、最後の第3のシミュレーションステップによって、問題分析のスパイラルが一段階ステップアップし、次の測定-モデリング-問題分析の環へとシフトすることを示すことができた。

ここで、第3のシミュレーションステップは、1.4.1節で紹介した武谷三段階論の本質論的段階を置き換えたものである。直接、本質論に迫るのは困難と考え、実体論によって作成したモデルをシミュレートすることで分析し、この本質を見極めようとするステップとして試行錯誤するためのステップであると言える。現象の観測や実体モデルの本質を数式・方程式で看破・抽象化するのが本質論である。これは幅広い領域に汎用的に適用できる特徴を持つ。オブジェクト指向において、オブジェクトとしてプログラミングされたモデルは、本質論の方程式と同様の可搬性、可用性の特性を有する。ある意味では、現代のコンピュータとシミュレーションプラットフォームの発達によって、この可搬性、可用性が獲得されてきたと言える。この方法は、本質論に迫る問題分析に有効であると考えられる。第4章で述べた循環器系シミュレーションにおいて、大動脈内の前進波と後退波の分解分析は、この典型例である。この方法で本質論に迫る問題分析ができているかどうかについては今後の判断を待たなければならないが、モデルの可搬性、可用性に関しては有効であったと考える。そして、それに引き続くウェアラブルな指尖容積脈波センサによる測定デバイス開発へと問題分析のスパイラルが一段階ステップアップし、次の測定-モデリング-問題分析の環へとシフトさせることができた。

総じて、本論で取り上げたシミュレーション駆動による問題分析の3ステップは、ここで紹介した個々のテーマ推進に対しては、よく適合し有効であった。研究推進の道標として、3ステップは、どれも重要で不可欠であり、必要条件ではある。しかし、この3ステップでシミュレーション駆動による問題分析の全てに適合できるか、十分であることまでは証明できていない。十分条件であるかの確認は、今後の課題であると結論付ける。

付録

付録A 鉛バッテリー内部抵抗測定結果

以下に本文で紹介しなかった、対照実験測定を行った組合せでの実験結果を掲載する。

・組合せ: 新品バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスなし

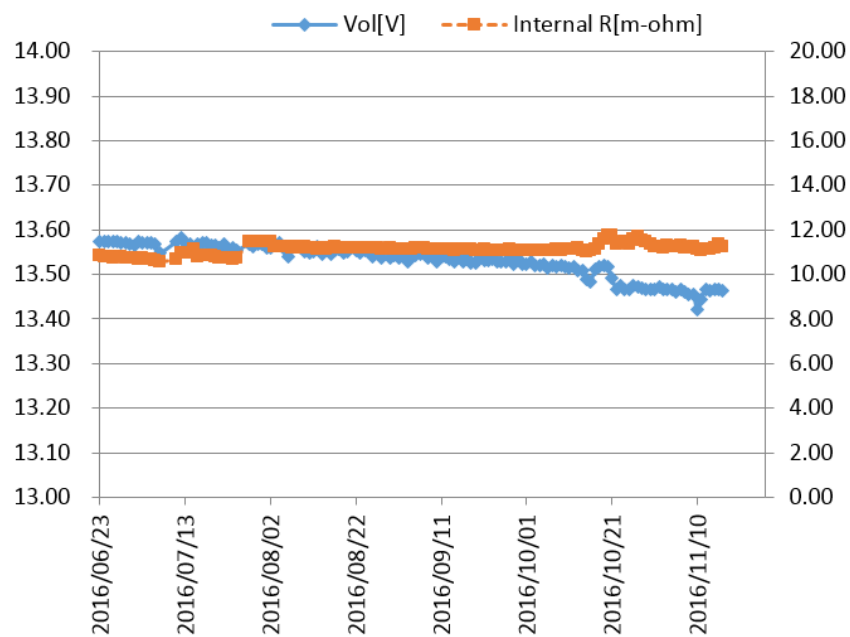


図 A.1 新品バッテリー(B19L)・パルス発生デバイスなしの内部抵抗測定結果

・組合せ:新品バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(弱)

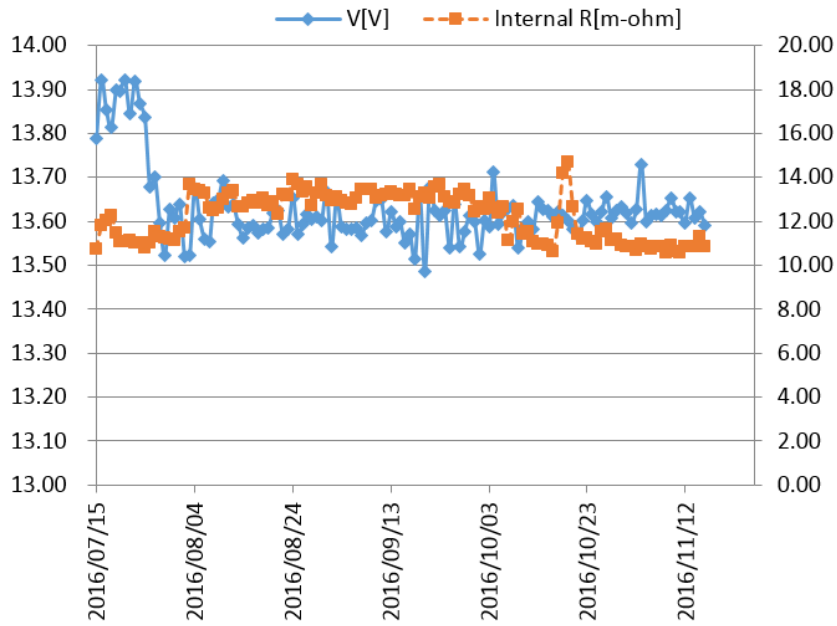


図 A.2 新品バッテリー(B19L)・パルス発生デバイスあり(弱)の内部抵抗測定結果

・組合せ:新品バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(中)

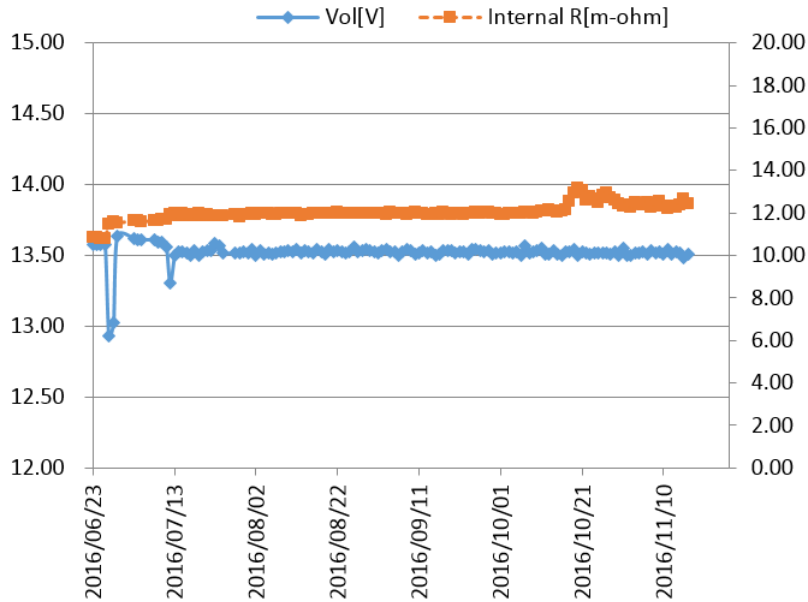


図 A.3 新品バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(中)の内部抵抗億艇結果

(充電スイッチを誤操作で電源 OFF した場合は2回ある)

・組合せ: 中古バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスなし

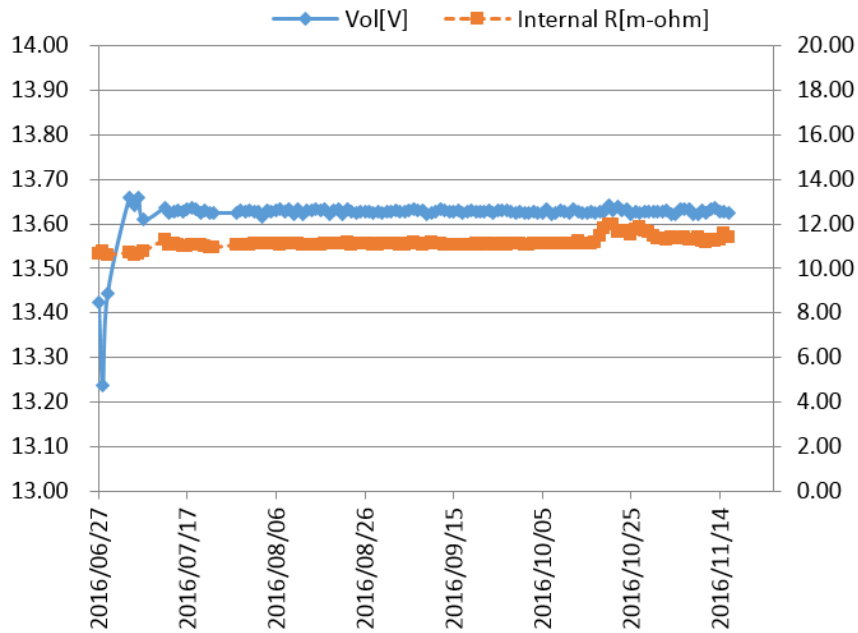


図 A.4 中古バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスなしの内部抵抗測定結果

(充電スイッチを誤操作で電源 OFF した場合は1回ある)

・組合せ: 中古バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(中)

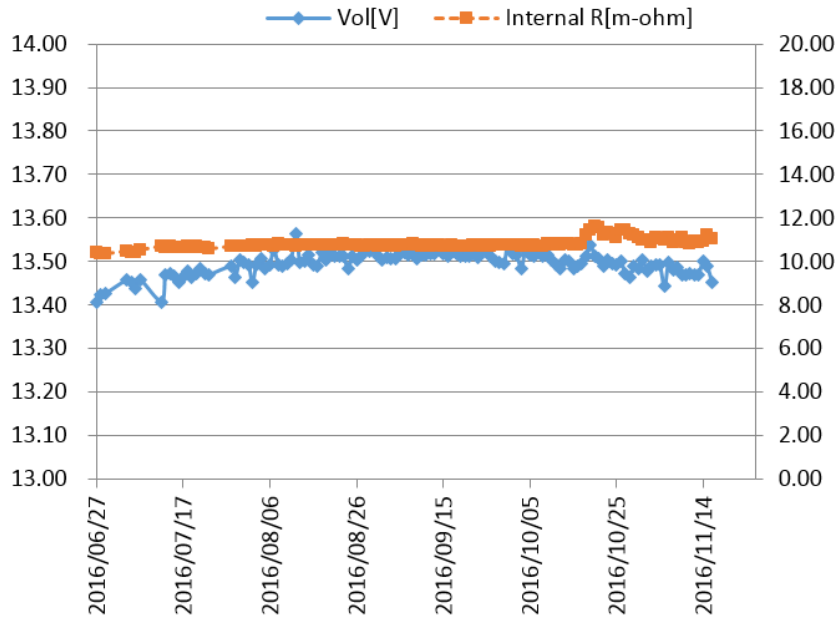


図 A.5 中古バッテリー(B19L)-パルス発生デバイスあり(中)の内部抵抗測定結果

付録B 循環器シミュレータの入力パラメタ

以下に本研究で使用した循環器シミュレータの入力パラメタを示す。

表 B.1 循環器シミュレータの入力パラメタ一覧表(解析時間パラメタ)

	パラメタ名	設定値	備考
解析時間 パラメタ	TT [sec]	0.85714	1心拍の実時間
	NT	512	サンプリングプレート

表 B.2 循環器シミュレータの入力パラメタ一覧表(心臓パラメタ)

	パラメタ名	設定値	備考
心臓パラメタ (固定値)	E_{max} [mmHg/ml]	4.5	心室時変エラスタンスの最大値
	E_{min} [mmHg/ml]	0.05	心室時変エラスタンスの最小値
	$DEVF$	0.75	心室時変エラスタンスのピーク因子
	RF	0.0001	心室内部抵抗
	PLA [mmHg]	5	前負荷圧
	R_{in}	0.0015	心室流入抵抗
心臓パラメタ (初期値)	V_0 [ml]	5	初期心室容積
	$PLV(0)$ [mmHg]	5	初期心室圧
	$PA(0)$ [mmHg]	83.32315272	初期動脈圧

表 B.3 循環器シミュレータの入力パラメタ(大動脈パラメタ)

	パラメタ名	タイプA 設定値	タイプA 設定値	タイプA 設定値	備考
大動脈 パラメタ (頭部)	$\tau h[sec]$	0.01	0.016	0.03	頭部への伝達遅延時間
	$Zch[\Omega]$	0.150038	0.145455	0.142536	頭部大動脈の特性インピー ダンス
	$Rh[\Omega]$	3.525881	3.85974	3.375844	頭部大動脈抹消抵抗
	$Roh[\Omega]$	0.156706	0.151151	0.148819	頭部大動脈抹消分岐抵抗
	$Clh[F]$	0.1333	0.125	0.2666	頭部大動脈血管容量
大動脈 パラメタ (体部)	$\tau b[sec]$	0.03	0.04	0.09	体部への伝達遅延時間
	$Zcb[\Omega]$	0.10502626	0.1777777	0.097524	体部大動脈の特性インピー ダンス
	$Rb[\Omega]$	2.730683	2.1777777	2.723181	体部大動脈抹消抵抗
	$Rob[\Omega]$	0.109227	0.19358	0.101147	体部大動脈抹消分岐抵抗
	$Clb[F]$	0.2666	0.375	0.6665	体部大動脈血管容量

付録C 循環器シミュレータによる前進波・後退波分解解析結果

Murgo 分類タイプ A, B, C の大動脈に対する前進波，後退波分解解析結果を図 C.1 から図 C.3 に示す．各図で，左側が頭部（ヘッド部），中央が体部（ボディ部），右側が中心部である．上段に前進波血圧（青）と後退波血圧（赤）と血流量（緑）を掲載し，下段に血圧合計（緑），前進波血圧（青），後退波血圧（赤）を示す．

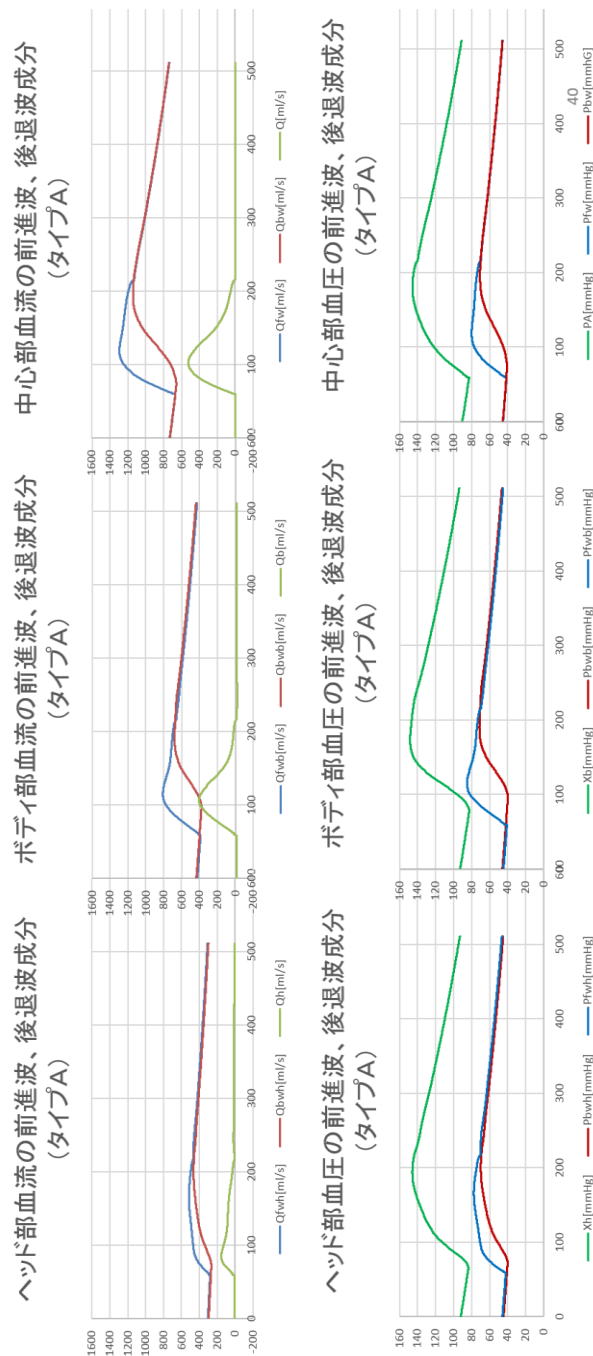


図 C.1 大動脈に対する前進波後退波分解解析結果 (Murgo 分類タイプ A)

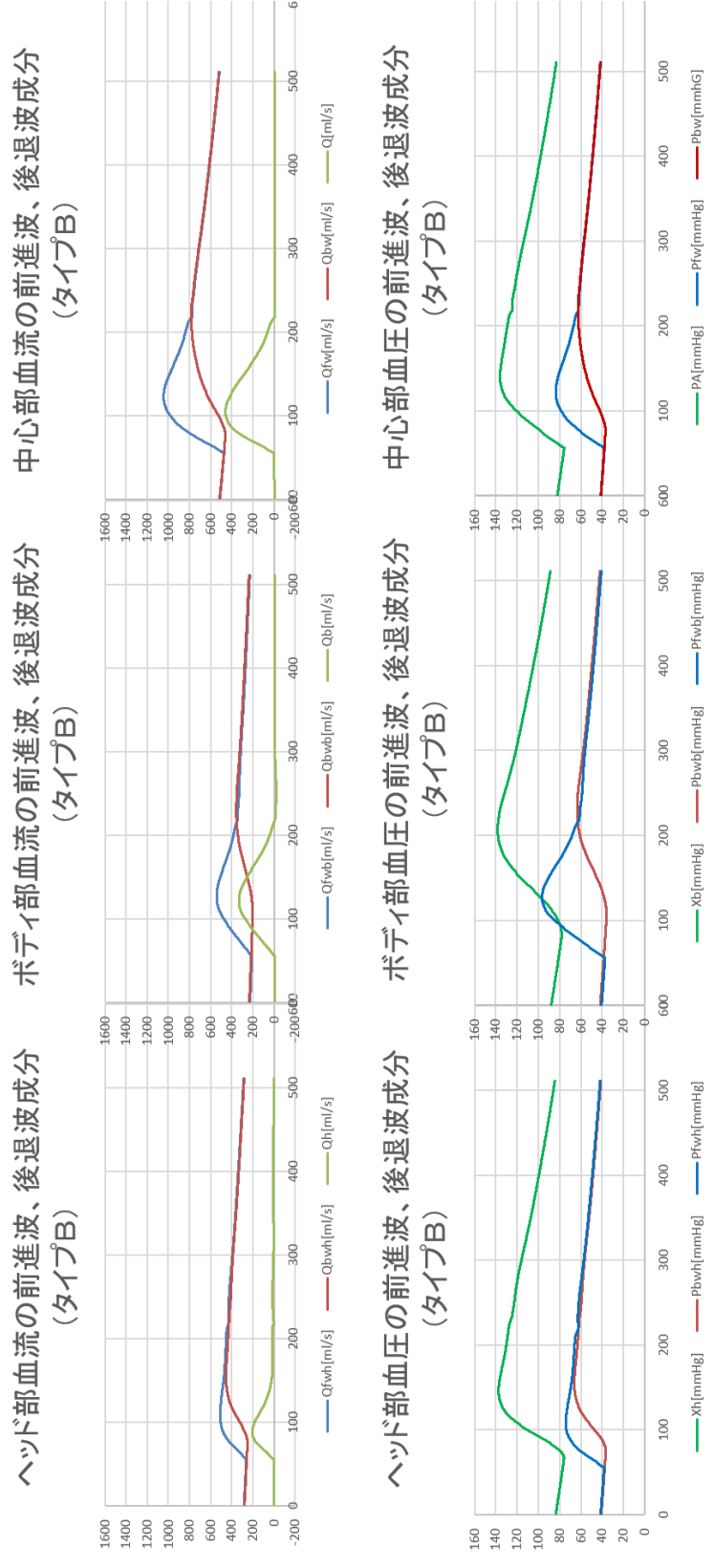


図 C.2 大動脈に対する前進波後退波分解解析結果 (Murgo 分類タイプB)

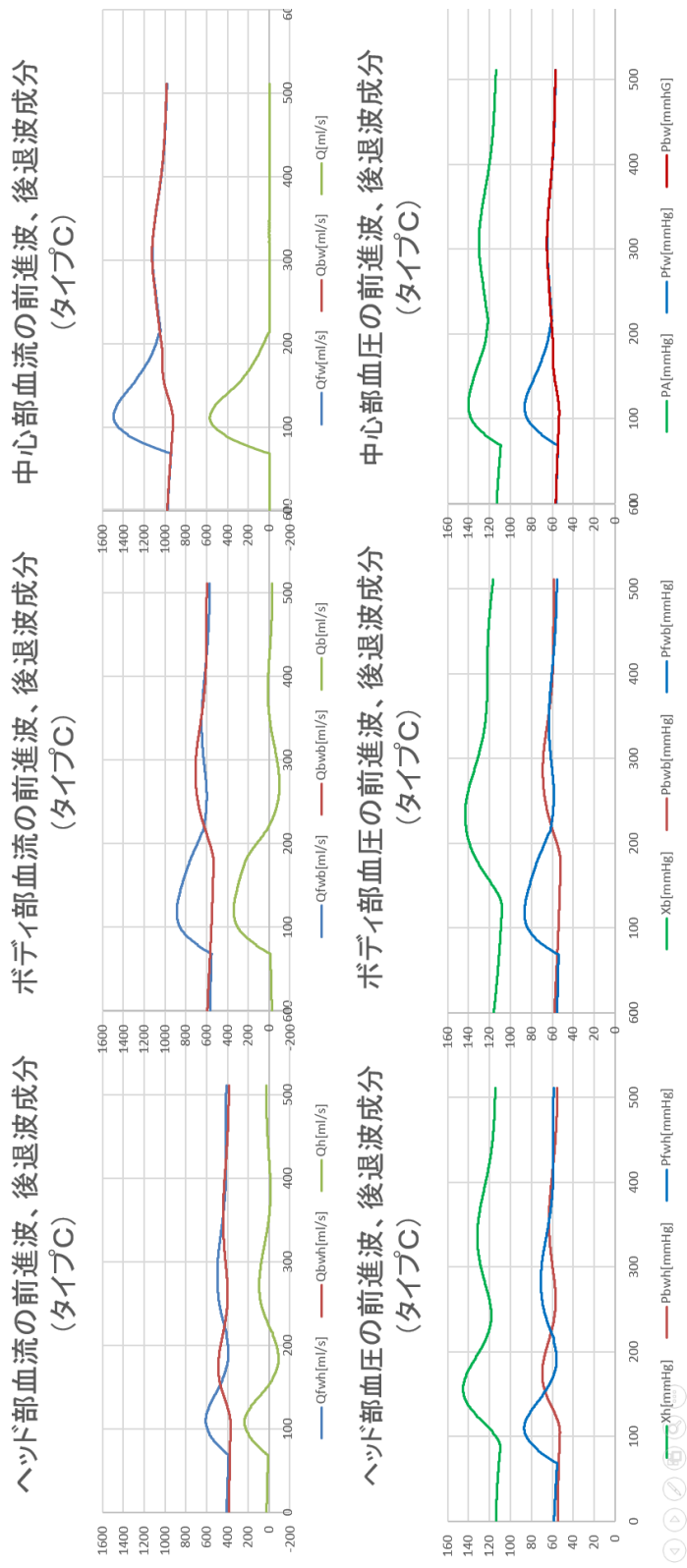


図 C.3 大動脈に対する前進波後退波分解解析結果 (Murgo 分類タイプC)

発表論文・研究業績

論文誌(査読付き)

- [1] Kyoji Nakajo, Shinji Aoki, Takashi Yatsuda, Shuji Takahashi, Kazuhiro Motegi, Yasuhiro Kobayashi, and Yoichi Shiraishi, "Modeling of a Lithium-Ion Capacitor and Its Charging and Discharging Circuit in a Model-Based Design," Scientific Research, Circuits and Systems, Vol.7, No.1, pp.11-22, January (2016).
- [2] 高橋修司, 宮島雅弥, 堀口敦史, 中上京治, 茂木和弘, 白石洋一, 須田高史:機械学習を用いた打音による鋼管柱の非破壊欠陥推定, 日本応用情報学会, NAIS Journal, Vol.10, pp.9-15, 9月 (2016).

学会発表(査読付き)

- [3] Kyoji Nakajo, Sampath Kumarasinghe, Yuki Shimamura, Shuji Takahashi, Kazuhiro Motegi, and Yoichi Shiraishi, "On-line Measurement System for Internal Resistance in Lead Acid Battery," SICE 2016, Tsukuba, September (2016).
- [4] Kyoji Nakajo, Yudai Komori, Shuji Takahashi, Kazuhiro Motegi, Yoichi Shiraishi, and Hiroshi Miyashita: "A Central Blood-Pressure Measurement System with Wearable Pulse Volume Gauges," 8th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, L08, December (2016).
- [5] Kyoji Nakajo, Yudai Komori, Shuji Takahashi, Kazuhiro Motegi, Yoichi Shiraishi, Hiroshi Miyashita, "Pressure Transfer Function for Aorta Model in Cardiovascular Simulator, Feasibility Study of Wearable Central Blood-Pressure Gauge," International Conference on Medical Engineering, Health Informatics and Technology (MediTec 2016), Dhaka, December 17-18 (2016) (Dr. Fatema Rashid Best Paper Award) (in press).
- [6] Shuji Takahashi, Masaya Miyajima, Atsushi Horiguchi, Kyoji Nakajo, Kazuhiro Motegi, Yoichi Shiraishi, and Takashi Suda, "A Non-Destructive Defect Estimation Method for Metal Pole based on Machine Learning Approach," 2016 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science (AICS2016), Guilin China, December 24-25 (2016) (in press).

研究会発表, 等(査読なし)

- [7] 高橋修司, 中上京治, 茂木和弘, 白石洋一, 宮下洋:循環器シミュレータにおける非対称 T 字管モデルの実装, 第 55 回脈波・加速度脈波研究会, pp.25-36, 6 月 (2014).
- [8] 中上京治, 高橋修司, 宮下洋, 都丸有紀, 茂木和弘, 白石洋一:非対称 T 字管型大動脈モデルにおける Wavelet 解析による脈波の分類, 第 57 回脈波解析研究会, pp.27-32, 6 月 (2015).
- [9] 白石洋一, 中上京治, 高橋修司, 茂木和弘, 宮下洋:シミュレーション駆動による循環器系の解析とウェアラブル血圧計の検討, エレクトロニクス実装学会, システム Jisso-CAD/CAE 研究会, pp.5-10, 7 月 (2015).
- [10] Alankarage Sampath Nissanka Kumarasinghe, Kyoji Nakajo, Yuki Shimamura, Shuji Takahashi, Kazuhiro Motegi, and Yoichi Shiraishi, "Development of Monitoring and Recording Sub-System in the Lead Acid Battery's Internal Resistance Measuring System," エレクトロニクス実装学会, アカデミックプラザ論文集, 6 月 (2016).
- [11] 宮島雅弥, 堀口敦史, 高橋修司, 中上京治, 茂木和弘, 白石洋一, 須田高史:機械学習を用いた打音による鋼管柱の非破壊欠陥推定, エレクトロニクス実装学会, アカデミックプラザ論文集, 6 月 (2016).
- [12] 小森雄大, 中上京治, 高橋修司, 茂木和弘, 白石洋一, 宮下洋, 小林康博, 齋藤孝則:脈波を取得するウェアラブルセンサーと活動を可視化する表示システム, エレクトロニクス実装学会, アカデミックプラザ論文集, 6 月 (2016).
- [13] 小森雄大, 中上京治, 高橋修司, 茂木和弘, 白石洋一, 宮下洋, 小林康博, 齋藤孝則:脈波を取得するウェアラブルセンサーと活動を可視化する表示システム, 脈波解析研究会, 6 月 (2016).
- [14] 白石洋一, 茂木和弘, 中上京治, 島村祐樹, 高橋修司, 小林康博:EV の電源系, 駆動系における制御システムのシミュレーション駆動設計開発, エレクトロニクス実装学会, カーエレクトロニクス研究会, pp.1-25, 11 月 (2016).

著書

- [15] 白石洋一, 茂木和弘, 中上京治, 高橋修司, 宮下洋:ウェアラブル脈波センサの開発と中心
血圧管理システム, 生体情報センシング技術とヘルスケア, 健康管理への最新応用, 第 3 章,
第 2 節, (株)技術情報協会 (2017)(出版予定).

展示会, 産業交流出典・発表

- [16] 中上京治, 岡大輔, 中島彩奈, 関根智, 西谷一希, 白石洋一:SCADE 生成コードの組み
込み方法(事例紹介), ANSYS Electronics Simulation EXPO 2016 9 月 (2016).

謝辞

本論文をまとめるに当たり、多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました、白石洋一先生に厚く感謝の意を表します。ご提唱を頂いたシミュレーション駆動による問題分析のパラダイムを本論文の拠り所とさせて頂きました。また、様々な研究テーマに触れる機会を頂きました。そして、テーマを深耕した部分は、国際学会での発表や研究会への発表、論文投稿へと一気にお導き頂きました。私との関係は、若い頃の職場の先輩という古いお付き合いからのスタートでした。時を隔てて、ET ロボコンによる再会を経て、大学院への入学という経緯がございました。丁度、学び直しの必要性を痛感した時期でした。大変なご縁を感じております。今後とも、このご縁を大切にさせて頂きたいと思えます。

学位論文審査委員の先生方に感謝申し上げます。論文を査読頂き、多くのご指摘を頂きました。変更すべき論文の構成や論旨の不明確さを含めて様々な問題をご指摘いただきました。ご指摘に沿って論文を見直し、自身の理解不足・調査不足を感じながら、調べ直しを行い、修正を行いました。結果として、論文の完成度を高めることができたと考えます。

白石研究室の諸先輩・同輩・後輩に感謝致します。研究テーマの多くの部分は、各位の努力の蓄積で成り立っており、一緒に取り組ませて頂きました。特に、高橋修司さんと嶋村祐樹さんは研究室の先輩として、日常生活面や各種スキル、部品調達方法を含めて、色々と教えて頂きました。また、同輩・後輩には、自主ゼミに付き合ってもらいました。私にとって、理解を伝えることで理解を深めるモデルケースの実践でした。理解を深めたい内容を一緒に学び、それをレジュメにまとめ、そして、それを次年度は後輩がその後輩に伝えるスパイラルの形成を狙ったものでもありました。

退職した職場(現(株)日立超LSIシステムズ)の方々に感謝申し上げます。私が社会人ドクターで群馬大学大学院を受験することを了解頂き、最終的に早期退職する道を選んだことを容認頂きました。今でも何人かの方との交流も継続しており、ご縁を大切にしたい所存です。

各研究テーマの外部協力の方々に感謝します。(株)バリューアップシステムズの小宮様、(株)DAiENの森様、(株)リアライズコンピュータエンジニアリングの小林様には、各種のご教示と議論を頂きました。また、ご協力のご理解を賜りました各社様へ感謝申し上げます。

発表をエントリーした学会、投稿した論文を審査頂いたレビュアーの方々に感謝します。レビュー指摘によって該当論文の完成度を高めることができました。第1章での気圧測定はレビュアー・コメントで開始した実験です。この測定がなかったら、鉛バッテリーの内部抵抗のピークと電圧のディップの挙動理解に苦しんでいたと思います。また第57回脈波解析研究会で議論頂いた方々に感謝致します。特に東京医科大学医学部の高沢健二先生には、血管分類に関する私の誤理解の指摘を頂きました。

家族に感謝致します。妻の直子は、入学後の私を日常面・精神面から、以前と変わらず支えてくれました。私が展開する抽象論も嫌がらずに議論の聞き役となってくれ、貴重な示唆も与えてくれました。息子の拓哉にも感謝します。彼の存在が、私と社会との接点を広げてくれました。研究室の学生は、息子と同世代が殆どですが、違和感なく、日常生活を共有できました。

最後に、健康に産み育てて頂いた両親に感謝します。