

JARI Research Journal

2024年
7月号



●一般記事

【研究活動紹介】 [OpenModelica を用いた電気自動車のモデリング
—ベースモデルの構築および代表特性の精度検証—](#) p. 1～
(6 p)

松本 雅至, 羽二生 隆宏 (環境研究部) JRJ2024070

【エッセイ】 [東日本大震災被災地での活動を振り返って \(2\)](#) p. 7～
(5 p)

鎌田 実 (研究所長) JRJ20240702

OpenModelica を用いた電気自動車のモデリング*

—ベースモデルの構築および代表特性の精度検証—

Modeling of a Pure Electric Vehicle by Using OpenModelica

—Construction of a base model and validation for representative characteristics—

松本 雅至^{*1}

Masashi MATSUMOTO

羽二生 隆宏^{*2}

Takahiro HANIU

本報告では、オープンソースソフトウェアである OpenModelica を用いて電気自動車のシミュレーションモデルを構築し、実車の試験結果を用いてモデルパラメータの同定および精度検証を実施した例について紹介する。また、モデル計算機能の拡張性を確認するため、簡易的にモータおよびバッテリーの熱マネジメントモデルを追加した事例について概説する。

KEY WORDS: モデリング, EV システム, 車両開発, 熱・温度マネジメント

1. はじめに

昨今、自動車産業においてモデルベース開発 (Model Based Development: MBD) の導入が積極的に進められている。一般財団法人日本自動車研究所 (Japan Automobile Research Institute: JARI) では MBD による車両開発促進への貢献を目的とし、リアル評価とバーチャル評価を融合した車両性能の統合的評価および解析機能の強化を推進している。一例として自動車用内燃機関技術研究組合 (The Research association of Automotive Internal Combustion Engines: AICE) の事業ではエンジン、排気後処理デバイス、車両等に関する研究事業に参画しており、併せてモデル構築および予測精度の検証を実施している²⁾。本報告では、さらなる MBD の活用を推進することを目的とし、OpenModelica³⁾を用いて電気自動車 (Pure Electric Vehicle: PEV) のシミュレーションモデルを構築した事例について紹介する。

2. 電気自動車のベースモデル構築

モデル構築に際しては、OpenModelica は v1.22.1, Modelica 標準ライブラリ (Modelica Standard Library: MSL) は v4.0.0 を使用した。表 1 に、電気自動車のベースモデル構築において最低限必要と考えられるコンポーネントモデルについて、MSL におけるモデル取り扱い状況と本研究での対応を整理した結果を示す。必要なコンポーネントモデルとしては機械系ドメインとして車体、ギアおよびブレーキが挙げられ、電気系のドメインではモータ、バッテリーおよびコンバータが挙げられる。また、車両制御やドライバといった各種制御系のモデル群も必要である。本研究では、将来的な MSL の発展を鑑みて基本的には MSL を活用したモデル構築を進めるが、過度に詳細化されたモデルはパラメータの設定が困難となるケースが多く、計算負荷にも影響を及ぼすと考えられる。そのため、本研究では各種コンポーネントモデルについて MSL での実装状況を確認し、必要に応じて簡略化した。図 1 に、各種コンポーネントモデルを統合して構築したベース車両モデルのダイアグラムを示す。

* 2024年5月27日受理

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士 (工学)

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

表 1 電気自動車のベースモデル構築に必要なコンポーネントモデルと MSL での取り扱い状況

コンポーネントモデル	MSLでの取り扱い状況 ✓ 含まれている: ○ ✓ 含まれていない: ×	本研究での対応
車体	○	MSLの車体モデルをベースに、走行抵抗係数を入力可能なモデルを構築
ギア	○	MSLの理想ギアモデルをベースに、伝達効率を外部信号により入力可能なモデルを構築
ブレーキ	○	MSLのブレーキモデルを使用
モータ	○	MSLのElectricalパッケージを用いて、効率マップを搭載した簡易モデルを構築
バッテリー	○	MSLのバッテリーモデルをベースに、熱容量の要素を組み合わせたモデルを構築
コンバータ	○	MSLのBlocksパッケージを用いて、外部信号に応じて電流・電圧を変換する簡易モデルを構築
ドライバ	×	MSLのBlocksパッケージを用いて、目標車速と実車速に応じてペダルを操作するモデルを構築
各種制御	×	MSLのBlocksパッケージを用いて、モータ・コンバータ・ブレーキを制御するモデル群を構築

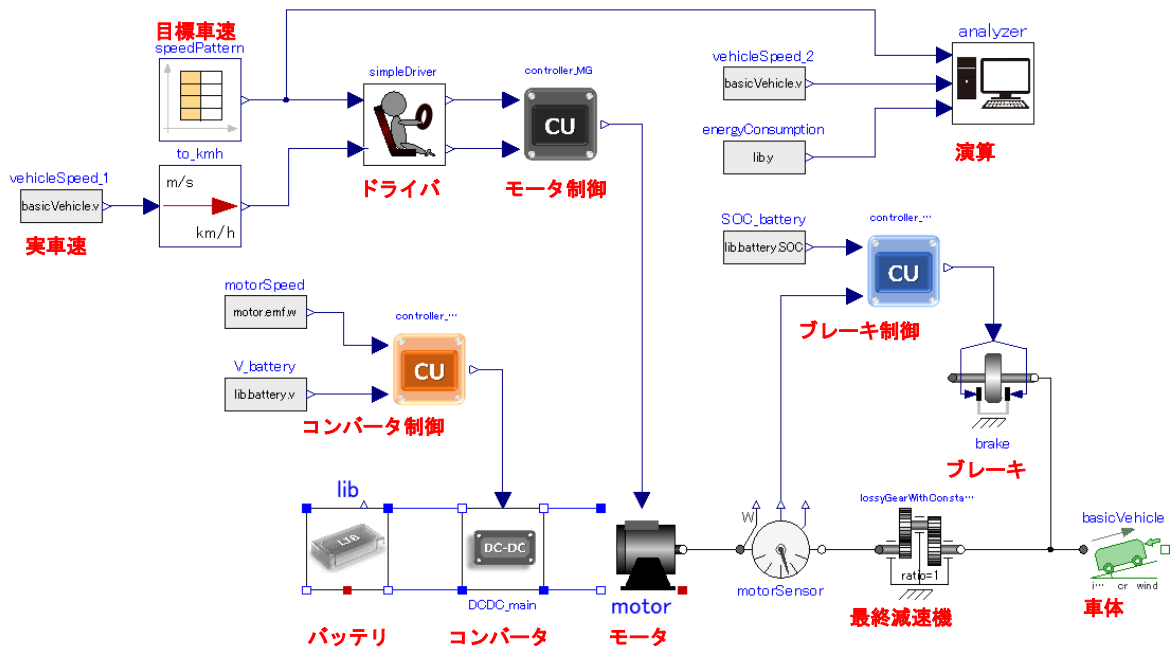


図1 電気自動車のベースモデルダイアグラム

3. 試験データを用いたモデルの同定および検証

3.1 モデルパラメータの同定

モデル同定・検証用の試験データとして、シャーシダイナモにおいて取得した車両試験の結果を用いた。供試車両は量産の電気自動車であり、常温環境下で WLTP (Worldwide harmonized Light-duty Test Procedure) の PEV 連続サイクル試験手順に従って一充電走行距離や直流電力量消費率を評価した。以下に、各種モデルの設定について概説する。

車体モデル

主要パラメータは車両重量、タイヤ半径および走行抵抗係数である。これらの値はカタログや試験結果をもとに設定した。

最終減速機モデル

主要パラメータは減速比および伝達効率である。減速比はカタログを参照して設定し、伝達効率は試験時におけるバッテリー電流値の測定結果をもとに同定した。

モータモデル

本モデルは回転数およびトルクに応じた効率マップが必要であるが、車両試験では当該データを取得していない。そこで、本研究では MBD 推進センター (Japan Automotive Model-Based Engineering center: JAMBE) の web ページ⁴⁾にて公開されているシリーズハイブリッド自動車用燃費モデル ver. 1.0 のモータ効率マップを使用した。

バッテリーモデル

カタログのバッテリー諸元値を参考にセル数、単一セルの容量および電圧を設定した。なお、内部抵抗については試験時のバッテリー電圧変動をもとに同定したが、温度依存性は持たせていない。また、シャードイナモ試験結果をもとに推定されるバッテリー残量とバッテリー電圧の関係を整理し、開回路電圧 (Open Circuit Voltage: OCV) と充電率 (State of charge: SOC) の関係性を考慮した。

コンバータモデル

当該モデルは外部信号に応じて異なる電圧系の電気回路を接続する機能を有しているのみであり、パラメータの設定は不要である。

モータ制御モデル

本モデルのパラメータはアクセルペダルおよびブレーキペダルの操作ゲインであるが、車両試験では各ペダル開度のデータを取得していない。そこで、本研究では目標車速に対して実車速が十分に追従する値に設定した。

ブレーキ制御モデル

車両減速時における回生ブレーキ量はバッテリー SOC に応じて変化するため、不足分の車両制動力についてはメカニカルブレーキで補う必要がある。ブレーキ制御モデルはメカニカルブレーキを制御することで間接的に回生ブレーキ量を制御する役割を担っており、パラメータとして走行時のバッテリー電流値をもとに SOC と回生トルク制限値の関係を同定したテーブルデータを使用した。

補機モデル

車両試験では、停車時において駆動バッテリーから補機類へ電力が供給されている様子が見られた。そこで、実験結果をもとに一定電流で電力が消費される簡易的な補機モデルを構築し、ベースモデルにおけるバッテリーモデルに対してコンバータモデルを介して接続した。

3.2 モデルの検証

図 2 に、連続サイクル試験を対象とした実験結果とモデル計算結果の比較を示す。なお、バッテリー電流については 1 サイクル分の比較を示しており、本図においては正が回生であり負は力行を意味する。いずれの項目においても、実験結果と計算結果はおおむね一致していることが確認された。表 2 に、主要項目に対する実験結果と計算結果の比較を示す。本節では、使用可能なバッテリーエネルギー (Usable REESS energy : UBE)、航続距離 (Pure electric range : PER) および直流電費 (Electric energy consumption : EC_{DC}) について予実差を検証した。低速フェーズに関しては走行距離や電費の誤差が 10%程度と幾分大きいものの、おおむね 3%以内の精度で実験結果と計算結果は一致することが確認された。

当該車両モデルについてさらなる高精度化を試みる場合には、バッテリー、モータ、インバータといった各種コンポーネントのユニット試験などを実施する必要がある。一方で、代表的な条件について実験結果を表現する車両モデルの構築という観点では、本研究のように車両試験の結果のみである程度の精度を有したモデルを構築可能なケースも存在すると考えられる。モデルに求められる予測精度や適用範

囲はモデルユーザにより多種多様であるため、さまざまなモデル活用事例を想定したコンポーネントモデルの拡充および計算事例の創出が重要と考えられる。

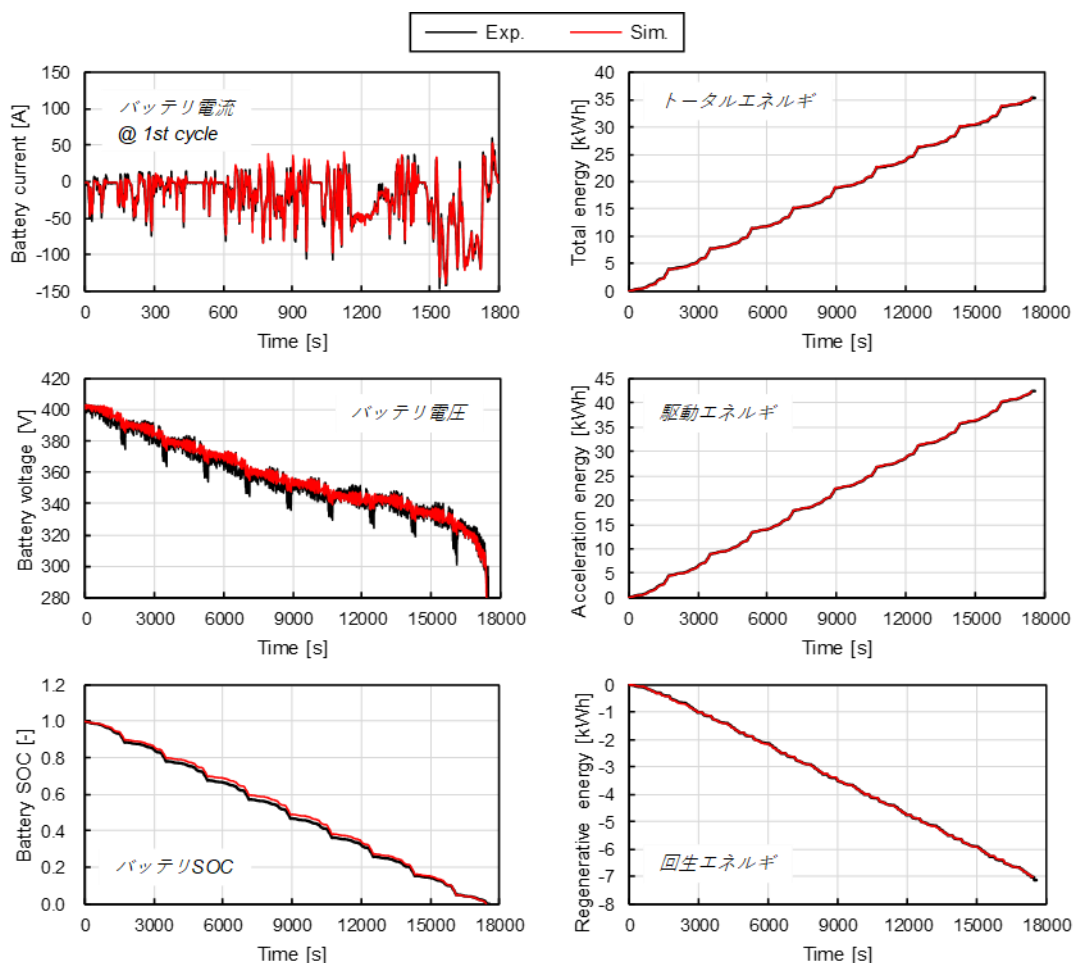


図2 連続サイクル試験を対象とした実験結果とモデル計算結果の比較

表2 主要項目に対する実験結果と計算結果の比較

Item	Unit	Phase	Exp.	Sim.	Diff. [%]
UBE	Wh	-	35363.6	35353.6	0.0
PER	km	4 phase	220	219	-0.3
		3 phase	264	265	0.1
		city	285	293	2.7
		L	286	315	9.9
		M	286	281	-1.7
		H	247	241	-2.4
		ExH	170	168	-1.1
EC _{DC}	Wh / km	4 phase	161	161	0.3
		3 phase	134	134	-0.1
		city	124	121	-2.6
		L	123	112	-9.0
		M	124	126	1.7
		H	143	146	2.4
		ExH	208	211	1.1

4.モデルにおける計算機能拡張の検討

上述の同定した車両モデルに対してモータおよびバッテリーに関する熱マネジメント計算機能の追加を検討する。整備書⁹⁾を参考にモータおよびバッテリーの熱・流体回路を簡易的にモデル化し、制御モデルと併せてベースモデルに統合した。図3に熱マネジメント計算機能を追加したPEVモデルのダイアグラムを示す。

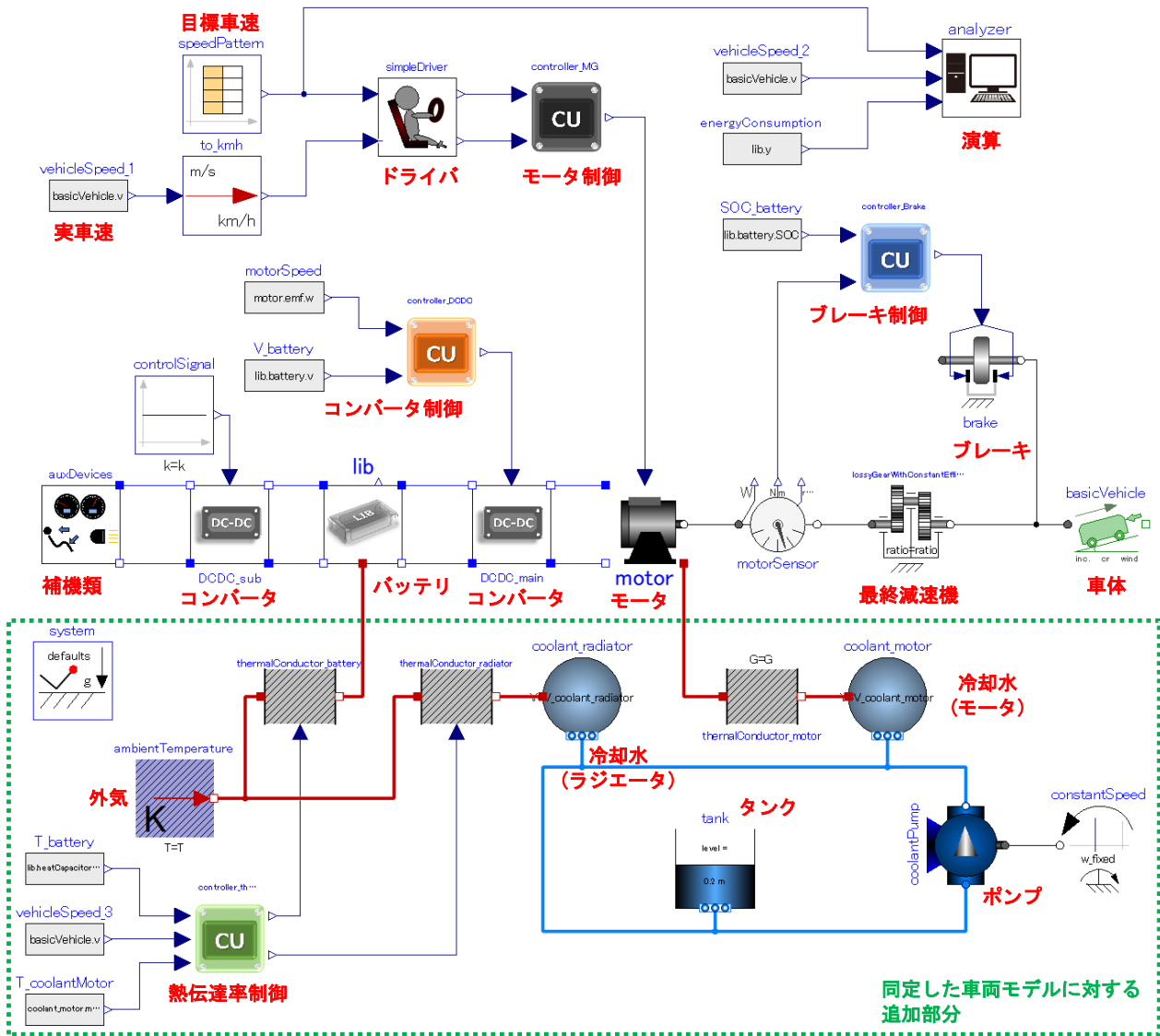


図3 熱マネジメント計算機能を追加した電気自動車モデルのダイアグラム

図4に、連続サイクル試験におけるモータ冷却水温度およびバッテリー温度を対象とした実験結果と計算結果の比較をそれぞれ示す。なお、バッテリー温度について実験結果はバッテリーパックの表面温度であり、計算結果はバルクの温度である。実験結果をもとに熱伝達率制御モデルのパラメータである制御温度や熱伝達率値を同定することで、モデルにおいてもおおむね同程度のオーダで温度挙動を再現することができた。本モデルをベースにバッテリーやモータといった各コンポーネントにおける温度依存特性を考慮することで、環境温度の違いによる航続距離や電費への影響を評価可能なモデルへと計算機能を拡張することが可能と考えられる。

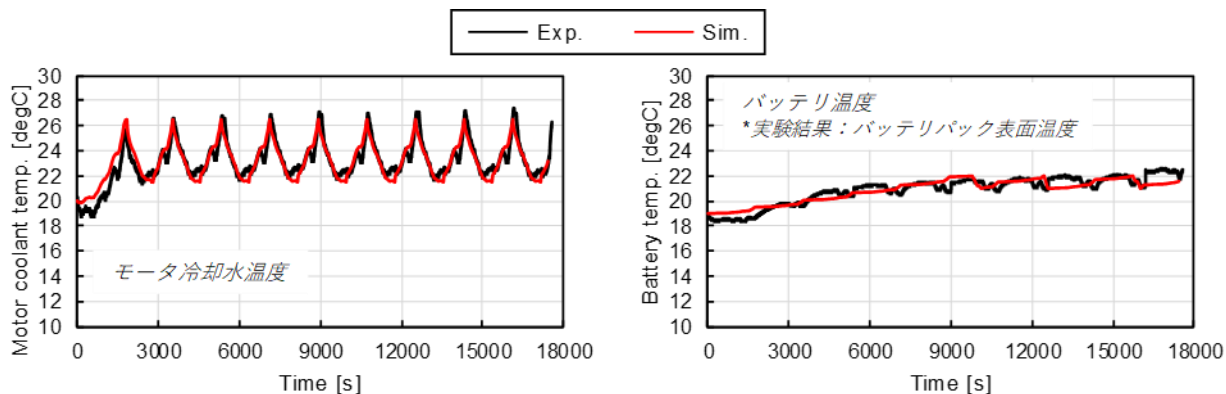


図4 連続サイクル試験を対象とした実験結果と計算結果の比較
(モータ冷却水温度とバッテリー温度)

5. まとめ、今後の展望

5.1 まとめ

- ✓ オープンソースソフトウェアである OpenModelica を用い、標準ライブラリに格納されたモデルや新たに構築した不足分のモデルを組み合わせることで PEV のベースモデルを構築することができた。
- ✓ 車両試験において得られた各種測定データや公開情報をもとに PEV ベースモデルのパラメータを同定することで、一充電走行距離や電費についておおむね実験結果を再現可能なモデルが得られた。
- ✓ 構築したモデルに対して、モータおよびバッテリーに関する熱マネジメント計算機能の追加が可能であることが確認された。

5.2 今後の展望

昨今、PEV ではシステム全体のエネルギーマネジメントが重要性を増している。とりわけ、環境温度が変化した場合の実用電費においては、ヒータやエアコンシステムの寄与度が大きくなるため、モータやバッテリーと併せて車両全体でのエネルギー消費量を最小化するシステムの検討が求められる。このような事例に対して、不足するコンポーネントモデルについて継続的に拡充することに加えて、具体的なモデル活用事例を創出することが MBD の活用推進に繋がると考えられる。

また、さまざまな事例に対してモデルを構築するために必要となるデータの取得方法やパラメータ同定手順といったノウハウの蓄積や人材の育成にも継続的に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 伊藤貴之 ほか: JARIにおけるAICE研究成果の紹介, JARI Research Journal, JRJ20191204 (2019), <https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=33273>, (参照 2024-5-27)
- 2) 松本雅至 ほか: OpenModelicaを用いた車両燃費シミュレーションモデルの構築, JARI Research Journal, JRJ20221202 (2022), <https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=46531>, (参照 2024-5-27)
- 3) OpenModelica: 導入, 公式サイト, <https://openmodelica.org/>, (参照 2024-5-27)
- 4) MBD推進センター: ガイドライン/モデル, 公式サイト, <https://www.jambe.jp/system/download>, (参照 2024-5-27)
- 5) FAINES: FAINES (ファイネス) とは?, 公式サイト, <https://www.jaspa.or.jp/member/faines/guide01.html>, (参照 2024-5-27)

東日本大震災被災地での活動を振り返って (2)*

鎌田 実*¹

Minoru KAMATA

(1) に続いて、(2) では釜石での交通の取り組みについて記すことにいたします。

釜石でも大槌と同様、津波被害による仮設住宅が、不便な所にたくさん建設されました。市では路線バスをしばらくは無料で運行するようにしましたが、それだけではカバーできない所もあり、トヨタ自動車からのデマンドバスの提案にのることになり、2012年に鶴住居から奥地側の栗林方面で運行する計画が作られました。混乱期が続いていて、しっかりとした需要調査に基づくものではなく、ハイエース10人乗り2台で、目一杯走らせるとこれくらいになるというのを目安に運行が始まりました。(写真1) しかしながら、仮設住宅の住民でもマイカーが入手できた人はデマンドバスを使わないので、利用は極めて限られていました。そこで、トヨタ自動車の担当者の一人が旧知の方だったので、東大に協力要請があり、私は東大 IOG 機構長の身のため十分な貢献ができない可能性があることから、当時東大の社会基盤の講師だった鳩山紀一郎先生にも加わっていただき、チームを組んで釜石のデマンドバスや路線バスなどの検討を始めることにしました。2012年の終わりの頃です。



写真1 釜石市のデマンドバス「にこにこバス」

交通計画の基本は需要が明確になり、それに合った運行を計画することなので、まずは真の需要がわかることが必要なことより、仮設住宅に住んでいる人のどれくらいが利用者と想定できるかの調査をすることとしました。そこで市から情報をいただき、釜石北部の仮設住宅の全戸調査を実施することになりました。学生を十数名動員し、手分けして各戸を訪問し、デマンドバスの説明をして利用可能性を得ていくこととしました。(2013年8月、2014年2月と8月で、北部の仮設住宅、北部の非仮設、そして南部とまわりました) 1戸に3分~5分程度と見込んで計画をたてましたが、高齢者宅は若い子が来ることは珍しく、話し相手として菓子とお茶が出てきて10分以上かかってしまうことも度々であり、予定時間を相当オーバーしてしまいましたが、何とか所定の目的を果たすことができました。学生は東大の工学部の者が中心ですが、体験学習として釜石に来ていた者もあり、被災地に行ったら仮設住宅訪問

* 2024年4月2日受理

*1 一般財団法人日本自動車研究所 研究所長、東京大学 名誉教授 工学博士

をやれと言われて面食らったかと思えますけれど、後で聞いたらいい経験ができたと言ってきて、文系学部の学生が工学部の学生と親しくなって話が弾むという側面もありました。（写真2）



写真2 東大の学生による仮設住宅調査チーム

そういった調査で分かったのは、当初デマンドバスの設計をしていた想定値の1/6くらいしか需要は無いこと。それなら運行領域を別の地域に広げられるだろう、その地域の普通の路線バスをデマンドバスに切り替えることで、より利便性を向上させられないかといった議論が進みました。この2台のデマンドバスの活動領域を広げることで、路線バスの運行を止めることによる経費削減、ドライバ不足対応に貢献できるだろうということで、この話は即座に進めることになりました。（箱崎地区の定時定路線の路線バスを廃止してデマンド化して利便性向上へ）

こういったことで、東大チームの貢献が市役所内でも認められることになり、市全体の交通再編に向けての議論を、われわれも入って行っていくことになりました。そのため、南部地域でもデマンドバス化の可能性を探るために、上記のように南部での仮設・非仮設の全戸調査を実施しましたし、市での大きなトピックであるイオンの開業（2014年3月）によって、交通利用がどのように変わるかというのを市内バス全便での乗客の乗降調査をイオン開業前後で実施することになりました。これについてはさすがに東大の学生を集めての実施は大変だったので、岩手のNPOに頼んで県内の学生を集めて対応していただきました。

この全便調査は、市内でのバス利用の状況がよくわかり、その後の交通再編の議論に非常に役立ちました。交通事業者と市とのやり取りでは、全路線が赤字で、赤字補填を行政が行うという図式になってしましますが、細かく見ると、市内中心部では利用は多く、その部分を抜き出して、かかった経費と収入を比べると（当時は割引運賃でしたが、それを正規に運賃に戻るとして）なんと黒字で動かすことが可能ということがわかりました。バス路線の端部で乗客が少数かゼロで走っている便が多く、収入がほとんど無く経費は膨大にかかっているのです。端部の需要はマイクロバスかワゴン車でも十分であり、幹線部分は特に学生利用が多い便は大型バスが必要でした。このため、市内の路線バス網を、幹線と支線に分けて、幹線部分は既存交通事業者が黒字で運営してもらい、支線部はタクシー事業者や貸切バス事業者が市がお金を用意して委託するような形態が、望ましい姿として描くことができました。

しかし、それは机上での話なので、実際にやるとなると、乗り継ぎが発生する所で利用者の受容性はどうか、乗り継ぐ場合の運賃設定をどうするかといった課題があります。そこでまずは乗り継ぐことを体験していただき、その受容性をみるような実験を行うことにしました。（2016年12月）乗り継ぎは手間がかかりますが、端部の車両を小型化することで、大きなバスでは入れないところまで行くことができ、道が狭い所では折り返し場所の確保のために集落のずっと手前が終点になっていて、利用者は終点のバス停からかなり歩かないといけない状況だったのを解消できるとか、車両が小さいのできめ細

かくバス停を用意できることでの利便性向上がはかれるはずなので、そういったメリットと乗り継ぐ手間を実際に経験して意見招集することにしました。大学の研究費でやるため、小規模になるので、買い物ツアー的な形を組み、自治会長さんに宣伝していただいたの实施となりました。既存のバスの運行を変えずに、運賃を大学側で持ち、端部だけ別にマイクロバスやミニバンを用意して乗車してもらい、乗り継ぎ点で通常運行のバスに乗り換える（逆はそこまで通常バスで、そこからマイクロバス等へ乗り換え）形にしました。マイクロバスやミニバンでは自宅近くまでの送迎とし、毎回10名弱の人が参加するような実証実験になりました。

参加者は運転免許を持たない女性が圧倒的に多く、車内でおしゃべりが始まると終わらない感じで、乗り継ぎ点でも話が続き、路線バスでも、行先のスーパーでも楽しくおしゃべりしながら買い物をしてくださりました。帰日も、買ったものを見せ合い、いろいろな話題での話が続き、楽しく過ごせた実験になりました。アンケート調査すると、乗り継ぎの抵抗は、他の人と一緒にあれば小さくできる、一人だけだと不安になる、みんなで一緒に行動することは楽しい、といった意見が多く得られ、交通の状況だけでなく、イベント的に外出促進をすることの重要性がわかりました。（写真3）



a) 左手前の中型バス（緑色）から
中央奥のマイクロバス（黄色）への乗換え



b) マイクロバス（黄色）は中型バスの折返し場所より
奥地までの運行が可能

写真3 乗継ぎ実験風景

こういったことを踏まえ、釜石市内全体の交通再編に向けての検討が進みました。コンセプトは幹線・支線の体制、幹線は黒字経営を目指す、支線は小型車両によりきめ細かくニーズに応え、一部はデマンドバス化を実施、といったことがまとめられました。

そういう方向で、具体的なダイヤなども考えて議論を進めていましたが、2018年7月に交通事業者からドライバ不足による大幅な減便の要請がきました。震災前は、釜石中心部でのバス便は本数も多く（釜石駅前から釜石中央方向へは日に95本あった）、時刻表を見なくてもすぐにバスが来るという状態で、乗客数も多かったですが、震災後には66本になり、それがさらに55本なるという変更案でした。利便性が高いとバスへの信頼が強く利用も多いですが、それを減便で利便性低下になると乗客は離れていくのが各地で見られており、端部を切り離してでも中心部の運行本数を確保すべき、そのために交通再編を早めたらと市に提案しましたが、却下され、地域公共交通会議にかけられることになりました。私は減便提案に異議を申し上げ、地域の交通の持続性のためにはうまく交通再編をやるべきとの意見を言ったのですが、同調してくれる委員は誰もおらず、地域の足のことをしっかり考えようとする委員がいないことに落胆し、決を採る前に退席し、委員を辞任することになりました。それまで相当な時間をかけて調査や議論を重ねてきたのに、事業者のドライバ不足の悲鳴に、どう工夫して、利用者の利便性確保に

も応えていこうかと考えようとする人がいないことに、これまでの苦勞が水の泡になってしまいそうではなりました。補助の仕方、事業者の黒字運行のための努力、再編への利用者の理解の呼びかけなど、いろいろなことを重ね合わせてやっと実現できるものと考えていましたが、自分たちの役割は終わったと実感しました。その後、交通再編による幹線・支線化は予定通り実施されましたが、幹線部の本数はさらに削減されていて（現在は45本）、利便性の確保は達成されず、利用者数のデータは不明ですが、おそらく当初のコンセプトのようにはまわっていないように思われます。（写真4、5）



写真4 「幹線；大型バス（緑色）」と「支線；マイクロバス（黄色）」との乗継ぎ場所（鶴住居地区）



写真5 支線化による車両小型化で集落内まで運行可能へ（花露辺地区）

釜石での震災復興は、市内中心部の利便性のいいところ（歩ける範囲にスーパーなどがあるとか、バス便の利便性の良さなど）に復興住宅やサービス付き高齢者向け住宅などを建設し、見守りの必要な人を中心部ならびに近いところに集めるような政策がとれるといいと感じていましたが、住民は震災前のように戻りたいという強い意見が多く、行政も住民の声を無視できないので、中心部に復興住宅が数多く建てられましたが、周辺部にもそれなりの数の復興住宅ができました。釜石は元々新日鉄が華やかな頃には9万人の人口があったので、国道沿いのバスの幹線部に土地はあるはずで、もっとそこへ人を誘導するようになっていくとよかったです。そうはなりません。利便性のよくない復興住宅は空きも目立つようすし、幹線部のバス便も相当削減されてしまい、人口はとうとう3万人を割ってしまいました。

他の地方地域もそうですけれども、人口減少は加速していて、それは少子高齢化で避けられないものですが、そういう人口規模での持続性のあるまちづくりが求められています。震災被災地では被災という大きな不幸がありました。復興に莫大な予算が投下されたので、それを機に人口減少下における持続性のあるまちづくりを目指してほしかったです。しかし、そういう形が取れた事例は少なく、空き地・空き家が多くあるなかで、箱物の維持にも費用がかかり、将来の見通しはなかなか厳しいものになりそうです。

大槌・釜石と、復興プロセスに関与させていただき、できたこと・できなかったことが多々ありますが、いい経験をさせてもらったと思っております。住民に寄り添いながら、一方で人口減少という厳しい現実を見据えて、持続性のあるコミュニティを作ることが大切であり、そこにおいてモビリティの果たす役割は大きいものだと強く実感しました。

JARI Research Journal 掲載区分

掲載区分	記載概要
研究速報 Research Report	背景, 目的, 方法, 結果, 考察といった一般的な研究論文の体裁を持った記事。
技術資料 Technical Report	一般的な研究論文の体裁ではないものの, 新たな知見または価値あるデータを報告する記事。
調査資料 Survey Report	他機関より得られた資料, データを元に, 新たな知見を報告する記事。
解説 Review	特定の分野やテーマに関して, 「現状の最新動向」や「研究・開発状況」などをまとめ, 要約・説明する記事。
研究活動紹介 Research Activity	JARI の研究活動を紹介・報告する記事。
トピックス* Topics	JARI の「研究活動」以外の「活動」等についての記事。また上記の分類外の記事。 *トピックス=「話題」「出来事」