

ハイブリッド自動車の充放電収支補正と駆動制御実装
による燃費・排出ガス評価精度向上

2024年 9月

森田 賢治

ハイブリッド自動車の充放電収支補正と駆動制御実装
による燃費・排出ガス評価精度向上

森田 賢治

理工情報生命学術院
システム情報工学研究群
筑波大学

2024年 9月

目次

第1章 序論.....	1
1.1 自動車の環境・エネルギー上の課題と解決への取組み.....	1
1.1.1 自動車の環境問題.....	1
1.1.2 自動車のエネルギー問題.....	3
1.1.3 自動車による地球温暖化問題.....	4
1.2 様々なクリーンエネルギー自動車.....	5
1.2.1 メタノール自動車.....	5
1.2.2 バッテリ電気自動車.....	6
1.2.3 ハイブリッド電気自動車.....	9
1.2.4 燃料電池自動車.....	14
1.3 クリーンエネルギー自動車毎の特徴.....	16
1.4 HEV の意義.....	21
1.5 燃費・排出ガス評価手法.....	22
1.5.1 燃費・排出ガス評価手法の必要性.....	22
1.5.2 ドライビングサイクル.....	23
1.5.3 様々な評価手法.....	24
1.5.4 HEV 評価上の課題.....	29
1.5.5 HD-HEV 用に想定したエンジンベンチへの変換手法.....	32
1.6 本研究の目的.....	33
1.7 本論文の構成.....	34
第2章 車両ベース評価法の確立.....	35
2.1 はじめに.....	35
2.2 課題解決のための補正手法の仮説.....	35
2.2.1 RESS の充放電収支の補正手法.....	35
2.2.2 実路上と C/D 上の回生エネルギーの相違の補正手法.....	36
2.3 実験方法.....	36
2.3.1 供試車両.....	36
2.3.2 実験装置.....	39
2.3.3 実験条件.....	40
2.4 実験結果.....	43
2.4.1 充放電収支補正手法の検証.....	43
2.4.2 路上とシャシダイナモメータ上の回生エネルギーの相違の補正手法.....	53
2.5 第2章のまとめ.....	58
第3章 HILS法の確立.....	60
3.1 はじめに.....	60
3.2 HILS の構築.....	60
3.2.1 供試 HEV.....	60

3.2.2 HILS 構築方法	62
3.2.3 HEV モデル	63
3.2.4 ドライバモデル	67
3.3 HILS の実車再現性検証	67
3.3.1 検証手順	67
3.3.2 実車データの取得方法	68
3.3.3 検証結果	68
3.3.4 HILS 法の実車再現性検証のまとめ	78
3.4 HEV モデル標準化	79
3.4.1 概要	79
3.4.2 対象車種	79
3.4.3 使用 ECU の決定	80
3.4.4 標準 HEV モデル構築	81
3.4.5 標準 HEV モデル検証	85
3.4.6 HEV モデル標準化のまとめ	89
3.5 HILS 模擬走行の精度検討	90
3.5.1 精度検討の目的	90
3.5.2 調査方法	90
3.5.3 調査結果	90
3.5.4 考察	91
3.5.5 HILS 模擬走行の精度検討のまとめ	92
3.6 SILS 用基準 ECU モデルの作成	93
3.6.1 基準 ECU モデル作成の目的	93
3.6.2 SILS 用基準 ECU モデル	93
3.6.3 SILS 検証の許容値 (案)	102
3.6.4 SILS 用基準 ECU モデルの作成のまとめ	102
3.7 HILS 試験手順確立	103
3.7.1 概要	103
3.7.2 要素試験法 (案)	104
3.7.3 SILS による HEV モデルおよび動作環境の検証	105
3.7.4 HILS 模擬走行精度の検証	105
3.7.5 燃費試験	106
3.7.6 排出ガス試験	107
3.7.7 HILS 試験手順確立のまとめ	109
3.8 第 3 章のまとめ	109
第 4 章 研究成果の活用	110
4.1 活用目的と提案先	110
4.2 提案結果	112

4.2.1 直線回帰法	112
4.2.2 HILS 法	112
4.3 第 4 章のまとめ	113
第5章 結論	114
5.1 本研究のまとめ	114
5.2 評価手法の改良と展望	116
5.3 本論文のおわりに	117
謝辞	118
参考文献	119
論文リスト	125

第 1 章

序論

1.1 自動車の環境・エネルギー上の課題と解決への取り組み

1.1.1 自動車の環境問題

20 世紀におけるグローバルな産業・技術および経済の発展と人口増加に伴い、自動車の使用台数も爆発的に増加し、それに伴い自動車からの排出ガスが大気汚染をもたらした。モータリゼーションの進行が早かった米国は公害も早くから問題となり、ロサンゼルスでは 1940 年代から光化学スモッグによる健康被害が報告されるようになった。最初に排出ガスを規制したのはそのロサンゼルス州都とするカリフォルニア州で、1962 年にクラックケース・エミッションを、1965 年にはテールパイプからの一酸化炭素 (CO) と炭化水素 (HC) を規制した。その後 1971 年には窒素酸化物 (NO_x) についても規制するようになった。全米としての規制は 1963 年の大気浄化法に始まり、1968 年に全米排気規制が、さらに 1970 年にはマスキー上院議員が提出した「大気浄化法改正法」が成立するなど段階的に厳しさを増した。その後 1994 年に「Tier 1」、2004 年に「Tier 2」、2014 年に「Tier 3」と規制強化が進んだ[1]。またカリフォルニア州は独自に、より厳しい排出ガス基準やゼロエミッション自動車 (ZEV) 規制を設けている。ZEV には、バッテリー電気自動車 (BEV)、燃料電池自動車 (FCV)、そして、BEV としての航続距離が一定値以上のプラグインハイブリッド電気自動車 (PHEV) が含まれる。

日本の排出ガス規制は、1966 年のガソリン車に対する CO 濃度規制から始まった。1973 年には HC と NO_x が加わり、1978 年には「日本版マスキー法」と呼ばれる、当時世界で最も厳しいと言われた「昭和 53 年排出ガス規制」が開始した。その後も段階的に厳格化され、2009 年より「ポスト新長期規制」が施行[1]された結果、CO、HC、NO_x は 1973 (昭和 48) 年度規制の 1/100 前後のレベルまで強化された (図 1.1.1-1) [2]、ディーゼル車の排出ガスについては、1972 年にまず黒鉛の規制が導入され、1974 年には CO、HC、NO_x の濃度規制が導入された[3]。その後段階的に規制強化され、2009 年のポスト新長期規制では 1974 (昭和 49) 年度規制に対し NO_x が 5%、粒子状物質 (PM) が 1%まで強化された (図 1.1.1-2) [4]。

欧州では 1992 年の「Euro 1」に始まり、2014 年からは「Euro 6」が適用され、米国と同様段階的に排出ガス規制が強化されている。2022 年には「Euro 7 案」が公表されたが、その背景には、EU の内の合意事項「2035 年までに全ての新車を ZEV にする」が存在する。Euro 6 までは継続生産車に対する猶予期間が設定されていたが、Euro 7 では全ての機種が対象となる[5]。

都市部における大気汚染が深刻な中国においても排出ガス規制は厳格化が進んでいる。中国では 2020 年 1 月から「国 6」という自動車排出ガス基準を a、b の 2 段階に分けて定められているが、2023 年 7 月 1 日に「国 6a」から「国 6b」に移行した。国 6a は EU の「Euro 6」よりも厳しく、国 6b は米国の「Tier 3」の定める 2020 年の平均値に相当するレベルとされる[6]。

このように世界的に排出ガス規制が強化された結果、多くの国々や地域において大気環境の劇的な改善が見られつつある[7]。

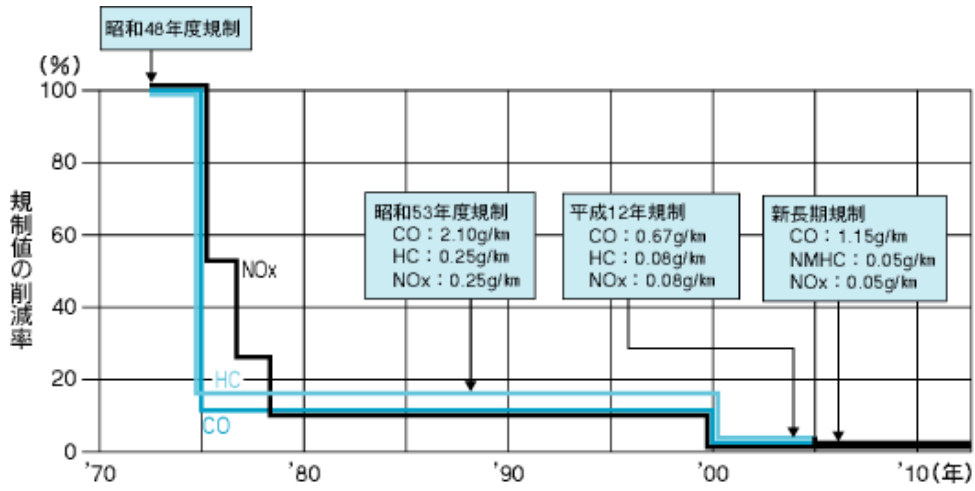


図 1. 1. 1-1 ガソリン乗用車の国内排出ガス規制値の強化 [2]

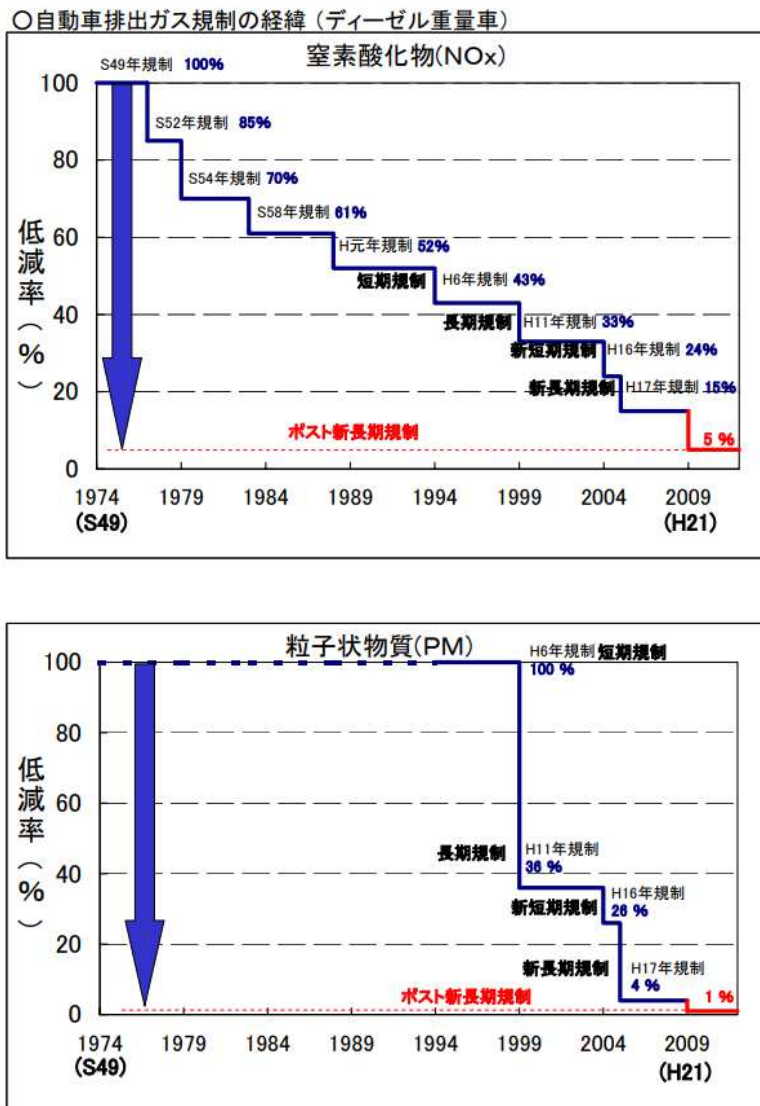


図 1. 1. 1-2 ディーゼル車の排出ガス規制値の強化 [4]

1.1.2 自動車のエネルギー問題

1973（昭和48）年10月に勃発した第4次中東戦争をきっかけに第1次オイルショックが始まった。石油輸出国機構（OPEC）が原油の供給制限と輸出価格の大幅な引き上げを行ったことで、国際原油価格は3カ月で約4倍に高騰したのである（図1.1.2-1）[8]。これにより、石油消費国である先進国を中心に世界経済は大きく混乱した。エネルギーの8割近くを輸入原油に頼っていた日本も例外ではなく、原油の値上がりはガソリンなどの石油関連製品の値上げに直結し、急激なインフレに陥った。それまで旺盛だった日本経済は、1974年度に戦後初めてマイナス成長に転じた。日本政府は「石油節約運動」として国民に、日曜ドライブの自粛や高速道路での低速運転などを呼びかけた[9]。なお、1973年には当時の通商産業省内に資源エネルギー庁が設置され、鉱物資源やエネルギーの安定的かつ効率的な供給や適正な利用に関する業務を開始している。

1979年から1980年代初頭にかけて、第2次オイルショックが発生した。OPECが1978年末以降段階的に大幅値上げを実施していたが、同時期の1978年1月から1979年2月にかけてイラン革命が生じており、また1980年9月にイラン・イラク戦争が勃発し、これらの影響が重なった結果である。国際原油価格は約3年間で約2.7倍にも跳ね上がった（図1.1.2-1）[8]。

日本は2度のオイルショックを経験する中、エネルギーを安定的に確保することが国の将来を左右する最重要課題であると改めて位置づけ、1970年代から1980年代に次の三つの施策を打ち出した。

- 石油の安定的な確保を図る：昭和48年（1973年）に「石油需給適正化法」を制定。石油の大幅な供給不足が起こった場合、需給の適正化を図るため、国が石油精製業者などに石油生産計画などの作成を指示できるといったことを定めた。
- 貴重な資源である石油を大切に効率的に使う：昭和54年（1979年）に「エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）」を制定。工場や輸送、建築物や機械などについて、効率的なエネルギーの利用に努めるよう求めた。
- エネルギー源の多様化を進め、石油依存率を下げる：昭和55年（1980年）には「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律（代エネ法）」を制定。石油に代わるエネルギーの開発・導入を打ち出した。

具体的な施策としては、1974年にスタートした「サンシャイン計画」において、太陽、地熱、石炭、水素エネルギーという石油代替エネルギー技術にスポットを当て、重点的に研究開発が進められた。1980年には新エネルギー総合開発機構（現新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO））が設立され、技術開発が推進された。省エネの技術開発については、1978年に策定された「ムーンライト計画」に基づき、エネルギー転換効率の向上、未利用エネルギーの回収・利用技術の開発などが1993年度まで進められた[9]。

自動車についても同様であり、省エネ法に基づき1979年に乗用車の燃費基準が策定された。米国では日本より早い1975年に、エネルギー政策・保存法（Energy Policy and Conservation Act）の下で、乗用車と小型トラック（Sport Utility Vehicle（SUV）、ピックアップトラックなど）に対して1985年を最終目標年度として企業別の平均燃費の改善目標が設定された[10]。

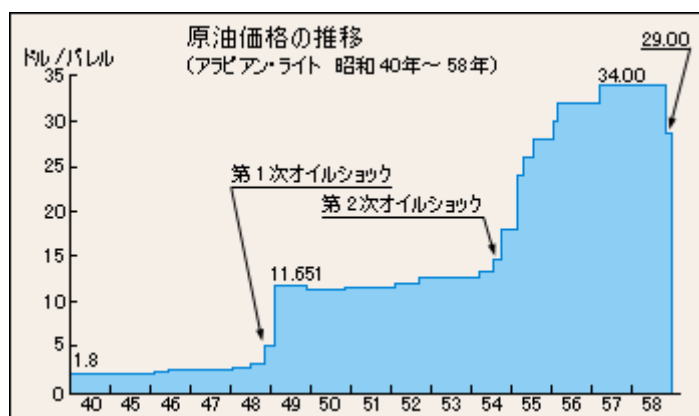


図 1.1.2-1 オイルショックによる原油価格の高騰 [8]

1.1.3 自動車による地球温暖化問題

自動車に関わる問題はエネルギー枯渇だけでは済まなかった。1985年国連環境計画（UNEP）主催のフィラハ会議で科学者から警告が発せられ、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設立された。従来から様々な懐疑論も主張されてきたが、それらは事実誤認や科学的な説明がなされていないとされ、現在は IPCC の評価報告書をはじめとする「地球温暖化の原因は二酸化炭素（CO₂）を中心とした温暖効果ガスである」という見解に集約されている[11]。1850年から2020年までの世界平均気温（図 1.1.3-1）[12]を見ると 1℃以上上昇しており、これを 1.5℃までに抑えることで、多くの気候変動の影響が回避できるとされている[13]。

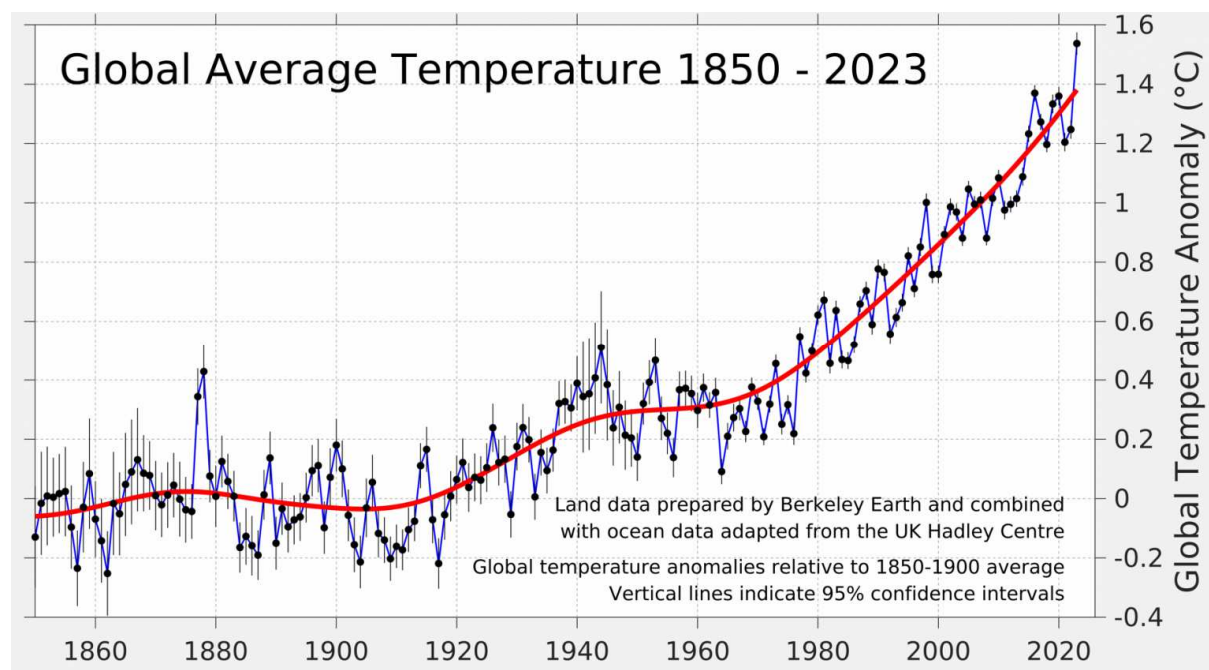


図 1.1.3-1 世界平均気温の変化 [12]

世界全体のセクター別 CO₂ 排出割合 (図 1.1.3-2) [11]を見ると、「発電・熱生産」と「輸送」, 「工業」で総排出量の 8 割以上を占めている. このうち、「輸送」が全体の 24.64 %を占めている. さらに輸送部門の内訳 (図 1.1.3-3) [11]を見ると, 乗用車と貨物輸送車の合計で 7 割以上を占めており, 自動車からの排出量削減が重要であることがわかる.

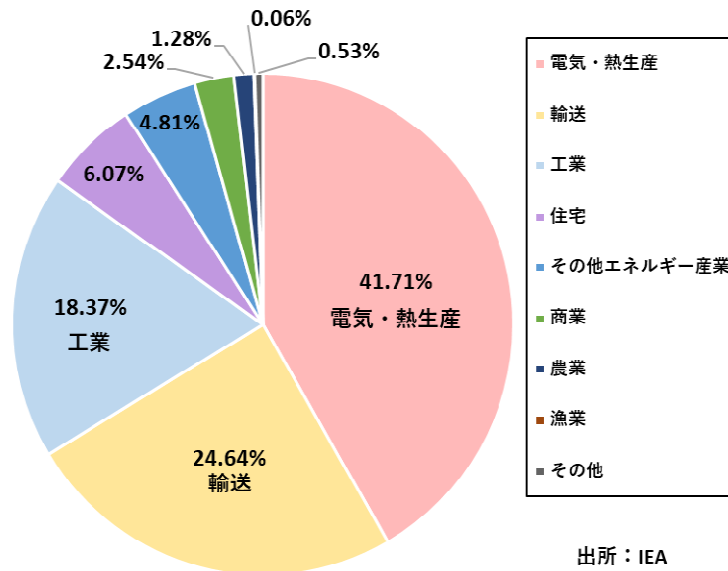


図 1.1.3-2 世界全体のセクター別 CO₂ 排出割合 [11]

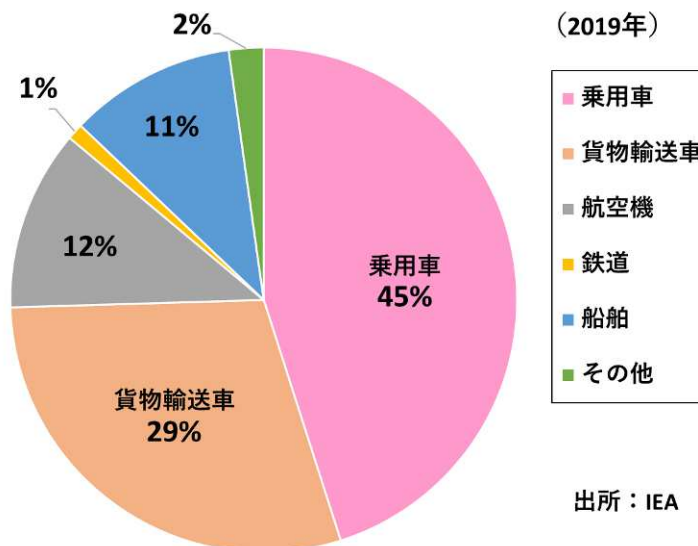


図 1.1.3-3 輸送部門におけるセクター別 CO₂ 排出量 [11]

1.2 様々なクリーンエネルギー自動車

1.2.1 メタノール自動車

この中我が国では, 当初低公害燃料として研究が進められていたメタノールについて, 1980 年より石油代替燃料としてのフイージビリティスタディを開始した. 1985 年にはメタノールを 3 %

混合した低濃度メタノール混合ガソリン (M3) を国産ガソリン自動車 22 台に用い、公道での実走行による長期的な耐久性や信頼性に関する調査を開始した[14]。また、1989年にはメタノールを 85 %混合した高濃度メタノール混合燃料 (M85) と、燃料系統部品等にメタノール用の対策 (図 1.2.1-1) [15]を施した国産の試験自動車 8 型式 12 台について運輸大臣認定を受け、公道での実走行試験を開始した[16]。さらに 1994 年度になると、ガソリンとメタノールの任意の混合燃料で走行可能な外国製 Flexible Fuel Vehicle (FFV) に M85 燃料を用いた実走行試験を開始した[17]。これらメタノール自動車に関する実走行試験は 2000 年代初頭まで続いたが、一般に普及することはなかった。その原因として、燃料インフラの整備が進まなかったこと、安価で安定的な燃料供給体制が確保できなかったこと等が挙げられている[18]。

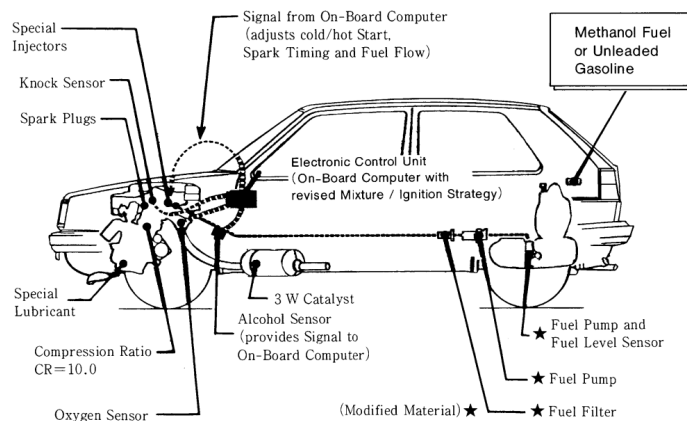


図 1.2.1-1 ガソリン車をメタノール自動車へ改造する際の変更部品 [15]

1.2.2 バッテリー電気自動車

バッテリー電気自動車 (BEV) の歴史は内燃機関自動車より古く、1832 年～1837 年のどこかでスコットランドの Robert Anderson が最初の BEV を開発したとされている (図 1.2.2-1) [19]。ただし、当時はまだ二次電池が開発されておらず一次電池を搭載していたことから、実用性は極めて低かったと予想される。その後 1859 年にフランスの Gaston Plante が二次電池を発明すると、これを自動車に使うことがすぐに検討され、フランス、イギリスや米国などで様々な電気自動車が開発された[20]。1886 年になると、カール・ベンツにより世界初のガソリン自動車 (図 1.2.2-2) [21]が造られたが、BEV はガソリン自動車のような振動、音、臭いがなく、当時ガソリン自動車の運転でもっとも難しかった変速操作の必要がなかった。さらにエンジン始動のために人力でクランクシャフトを回す必要もないなど取扱いが簡単なことから、自動車の黎明期においてはガソリン自動車と覇権を争っていた。しかし、1908 年ヘンリー・フォードによる「T 型」の成功によりガソリン自動車が自動車市場を完全に支配するようになり、BEV は市場から姿を消した [20]。

その後、1970 年になって制定された米国のマスキー法と 1973 年に発生したオイルショックが引き金となり、排出ガスを出さず火力以外にも自然エネルギーなど多様なエネルギー源から電気を製造可能な BEV が再び注目された。しかし、当時はまだ鉛電池の時代で電池性能が自動車の要求レベルを満足せず、ブームは一旦下火となった。1990 年になると米国で Zero Emission Vehicle (ZEV) 法が制定され、市場投入が不可欠な車両と位置付けられた[22]。しかしながら、1990 年

代の BEV はまだ鉛電池，ニッカド電池，ニッケル水素電池が主流であったため，車両質量に占める電池質量の割合が 30 %前後を占め，バッテリー自体を運搬するためのエネルギー消費量が大きくならざるを得なかった（図 1.2.2-3）．その後リチウムイオン電池の時代になるとエネルギー密度は上昇を続け，20 年間で約 3 倍まで向上している（図 1.2.2-4） [23]．このため，車両質量に占める電池質量の割合も減少し，2010 年頃になると 20%以下となっている（図 1.2.2-3）．

リチウムイオン電池パックのコストもこれまでのところ減少傾向にあり，kWh 当たり 150 ドル以下のレベルまで低減されている（図 1.2.2-5） [24]．各国政府による BEV の購入補助金等優遇政策もあり北米，欧州，中国を中心に普及が進展したが，米国での販売台数を見ると 2023 年に鈍化し，HEV の方が売れている（図 1.2.2-6） [25]．この理由として，アーリー・アダプターによる需要の一段落に加えて，BEV 特有の課題である a) 充電時間の長さ，b) 航続距離の短さ（特に空調装置稼働時），c) バッテリーの劣化，d) 新車価格の高さ，そして e) 充電インフラ不足といった課題がユーザに認知されたことも考えられる [25]．



図 1.2.2-1 Robert Anderson による世界初の BEV [19]



図 1.2.2-2 カール・ベンツによる世界初のガソリン自動車 [21]

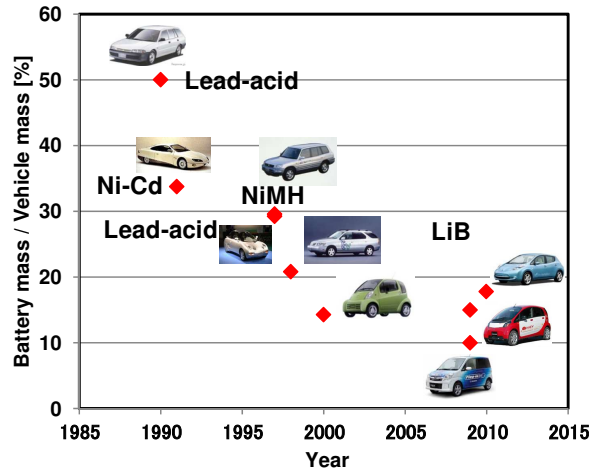


図 1. 2. 2-3 BEV における車両質量に占める電池質量の割合の推移
(出典：各社公表仕様を基に著者作成)

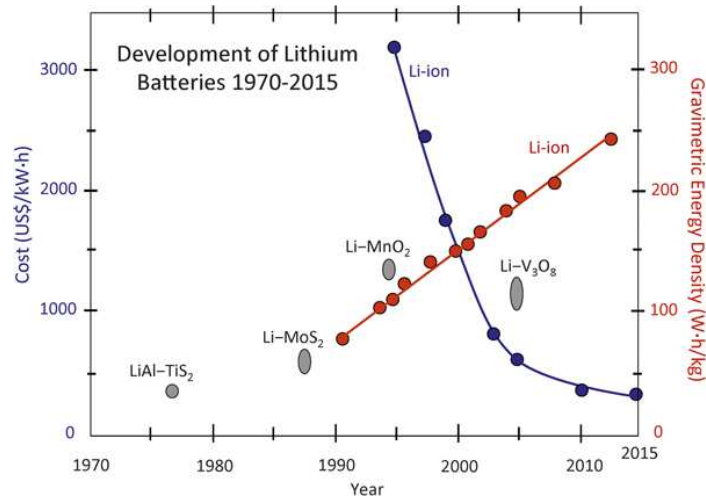
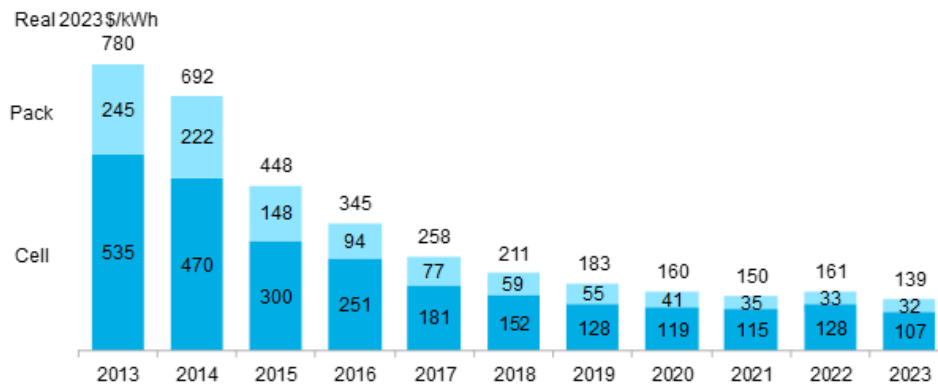


図 1. 2. 2-4 リチウムイオン電池の質量エネルギー密度の推移 [23]

Figure 1: Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split, 2013-2023



Source: BloombergNEF. Historical prices have been updated to reflect real 2023 dollars. Weighted average survey value includes 303 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles, and stationary storage.

図 1. 2. 2-5 リチウムイオン電池パックのコストの推移 [24]

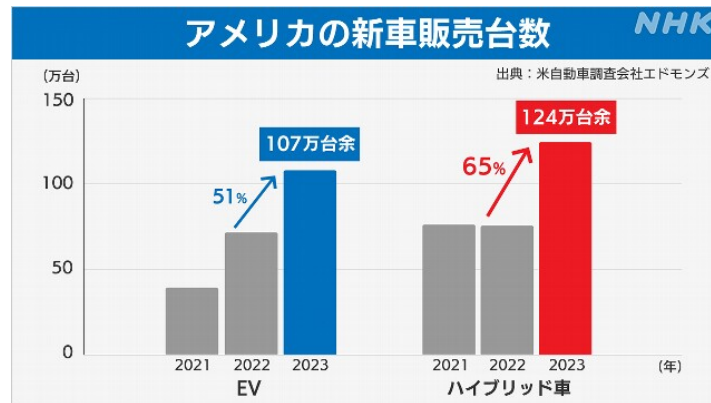


図 1.2.2-6 米国での EV と HEV の新車販売台数 [25]

1.2.3 ハイブリッド電気自動車

ハイブリッド電気自動車 (HEV) の歴史は古く、BEV と同様自動車の黎明期に登場している。1899 年のパリ自動車ショーに 2 台の HEV が展示された。そのうちの 1 台がベルギーの Henri Pieper 氏が製作した「Petrole et electricite」で、1 機のモータを用いた平行式 HEV であり、既に回生ブレーキの機能を備えていたとされる[26]。このシステムはライセンスが供与され、ベルギーの Herstal 社より「Auto-mixte-Pescatore」と呼ばれる大型車が 1915 年まで量産されたという。1899 年のパリ自動車ショーに展示されたもう 1 台が、フランスの Vendevelli & Priestly 社の「Handsom」と呼ばれる三輪車である[26]。この車両は、エンジン発電機により航続距離を延長するレンジエクステンダーであると考えられている[26]。つまり、外部充電が可能なプラグインハイブリッド電気自動車 (PHEV) であった。

1901 年のパリ自動車ショーには、Ferdinand Porsche 博士により開発された「Lohner-Porsche Mixte」(図 1.2.3-1) [27]が出典された[26]。これは、同じくポルシェ博士が開発した BEV である「Lohner-Porsche」にエンジンと発電機を搭載したシリーズ式の HEV で、バッテリーが大きく重いため登坂性能が低く航続距離が短い BEV の欠点を補うためであった[28]。車両総重量 (GVW) は「ローナー ポルシェ」が 4,000 kg 以上に対し、「Lohner-Porsche Mixte」では 1,200 kg に抑えられていたという[28]。

このように 19 世紀から 20 世紀へ切り替わる時期に、現在にもつながる考え方が登場した HEV と PHEV であるが、1908 年ヘンリー・フォードによる手頃な価格のガソリン自動車「T 型」の登場により、BEV と同様一旦市場から姿を消した[29]。その後、自動車による排出ガスやエネルギー、渋滞などの問題が顕在化した 1969 年になって、ゼネラルモーターズ (GM) から超小型 PHEV の「XP-512H」(図 1.2.3-2) [30]が発表され、その 30 年後の 1989 年 Audi から前輪をエンジン、後輪をモータで駆動する「Duo」(図 1.2.3-3) [31]が発表されたものの、いずれも試作車レベルに留まっていた。

現代の自動車市場に初めて HEV を投入したのは 1991 年日野自動車で、内燃エンジンの出力軸にモータ・ジェネレータが直結された平行式 HEV の「HIMR (HINO Inverter Controlled Motor Retarder System)」バス (図 1.2.3-4) [32]であった[33]。その後 1997 年にはトヨタ自動車が、内燃エンジンを発電専用にするシリーズ式ハイブリッド機構を採用した「コースター・ハイブリッド EV」(図 1.2.3-5) を少数販売開始した[34]。そして同年トヨタ自動車が、シリーズ

式と平行式を組み合わせたシリーズ・平行式と呼ばれるハイブリッド機構を採用した初代「プリウス」(図 1.2.3-6) [34][35]の販売を開始し、HEV の本格普及が始まった。さらに 1999 年には本田技研工業が平行式ハイブリッド機構の初代「インサイト」(図 1.2.3-7) [36][37] を販売開始し、2000 年には日産自動車シリーズ・平行式ハイブリッド機構の「ティノ ハイブリッド」を 100 台限定で販売(図 1.2.3-8) [38][39]するなど、世界に先駆けて国内自動車メーカー各社から乗用車の HEV が出揃うことになった。

GVW 3.5 トン超の重量車に関しては、NEDO の事業として 1997 年度から 2003 年度までの 7 カ年で実施された「高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発」(通称 ACE プロジェクト) が開発を大いに促進した[40]。前述の日野自動車の「HIMR」以降では、2002 年日産ディーゼル(現 UD トラック)が ACE プロジェクトで開発したキャパシタを世界で初めて市販車に搭載し、「キャパシター ハイブリッドトラック」(図 1.2.3-9) [41]として発売した。その後、2003 年には日野自動車が 2 トン積クラストラックの「デュトロ ハイブリッド」(図 1.2.3-10) [42][43]を、2004 年には三菱ふそうトラック・バスが「エアロノンステップ HEV」(図 1.2.3-11) [44]を、2005 年にはいすゞ自動車が「エルフ ディーゼル ハイブリッド」(図 1.2.3-12) [45]を、2006 年には三菱ふそうトラック・バスが「キャンター エコ ハイブリッド」(図 1.2.3-13) [46][47]を発売するなど、国内大型車メーカーから相次いで小型トラックやバスなどの HEV が発売された。

現代の HEV は、車載の再充電可能エネルギー貯蔵装置 (RESS) を活用することで燃料消費率を低減する技術である。HEV の基本的エネルギーフロー(図 1.2.3-14) は、アイドリングではエンジンを停止させモータのみで発進、加速する(同図 A)。加速途中でエンジンを始動、最高効率点近傍で運転し、不足する出力は RESS から供給される(同図 B)。定速走行に移り要求出力が減少すると、エンジンは最高効率点近傍で運転したまま余剰出力で RESS を充電する(同図 C)。制動時はエンジンを停止し、回生ブレーキで RESS を充電する。これらの動作によってエンジンの仕事を削減し、その作動を狭い領域に制御することから、燃料消費率だけでなく排出ガスの大幅低減が期待できる。

HEV が普及していった理由は、このように燃料消費率と排出ガスを大幅に低減可能なポテンシャルを有しながら、従来の内燃機関自動車 (ICEV) と同様燃料 (ガソリン、軽油) を給油するだけで走れるため、新たにインフラを整備する必要がなく、ICEV とほぼ同等の実用性を有していたからである。しかし HEV は、化石燃料を給油している以上カーボンニュートラル (CN) を実現できない。また NO_x や PM などの排出ガスをゼロにすることも不可能であり、今後は更なる高効率化と共に、石油代替燃料への転換が求められている。

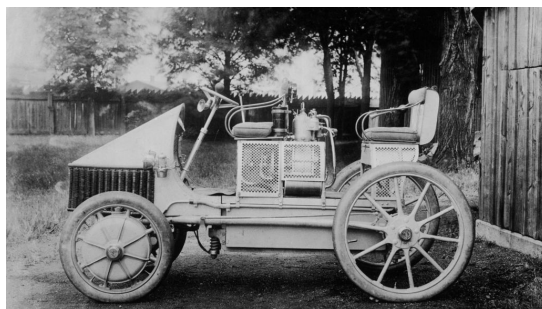


図 1.2.3-1 世界初の HEV「ローナー ポルシェ ミクステ」[26]



図 1. 2. 3-2 GM XP-512H [30]



図 1. 2. 3-3 Audi Duo [31]

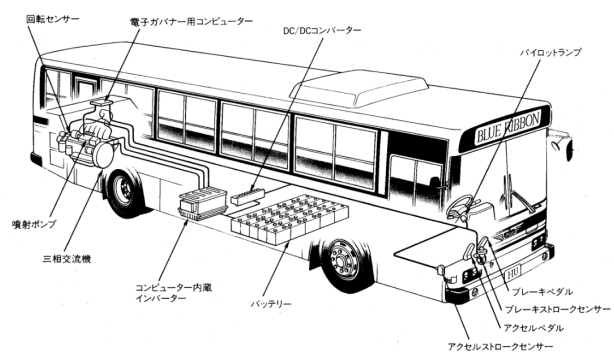


図 1. 2. 3-4 日野自動車 HIMR バス [32] [33]



図 1.2.3-5 トヨタ自動車「コースター ハイブリッド」 [34]

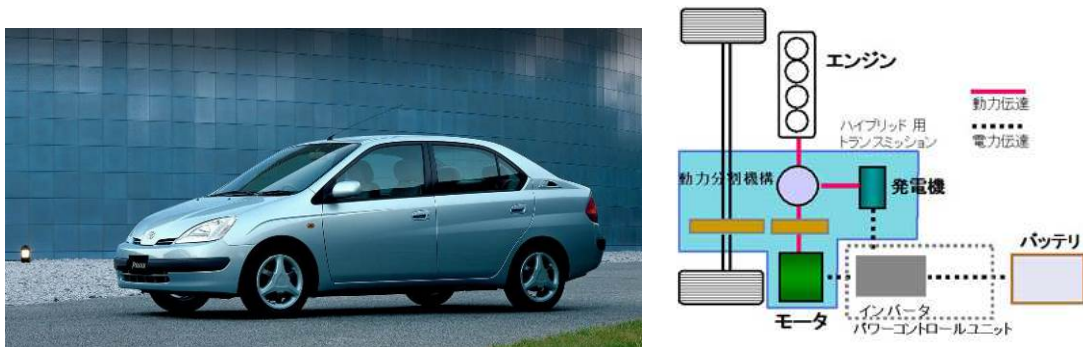


図 1.2.3-6 トヨタ自動車初代「プリウス」 [34] [35]

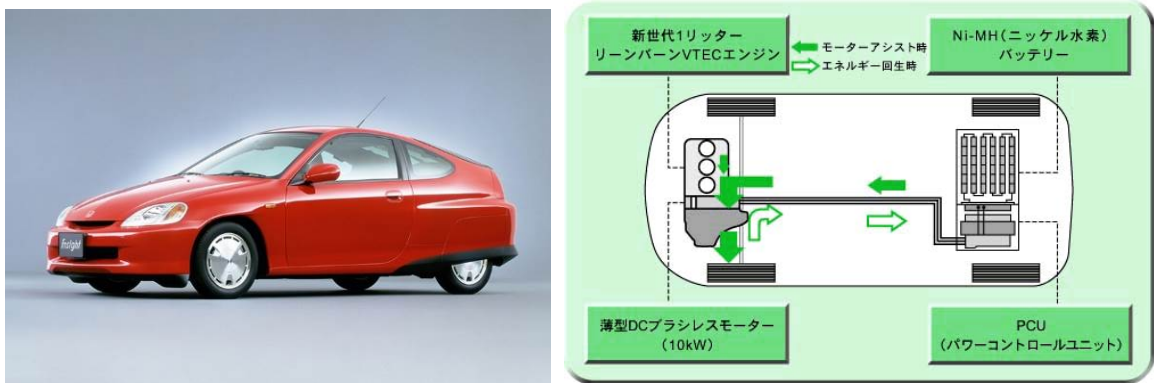


図 1.2.3-7 本田技研工業初代「インサイト」 [36] [37]

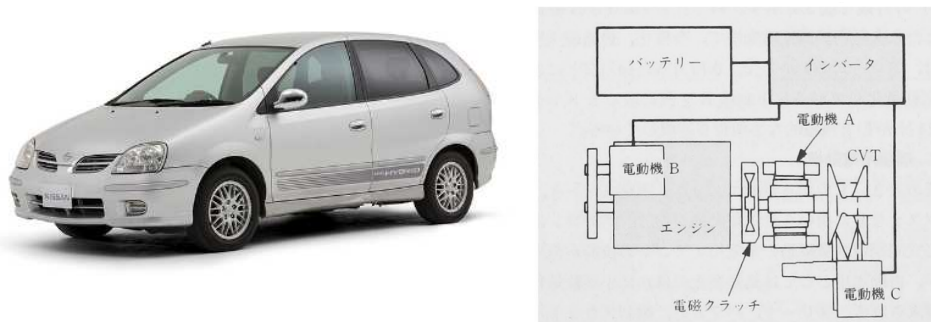


図 1.2.3-8 日産自動車「ティーノ ハイブリッド」 [38] [39]

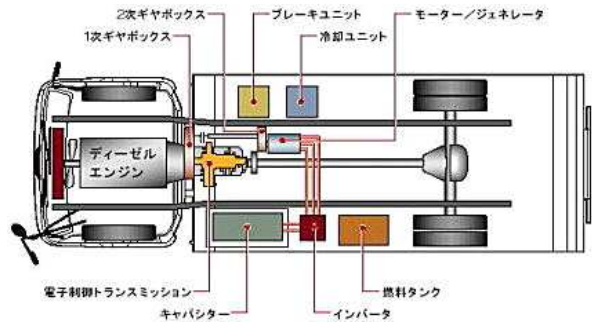


図 1.2.3-9 日産ディーゼル「キャパシター ハイブリッド トラック」 [41]

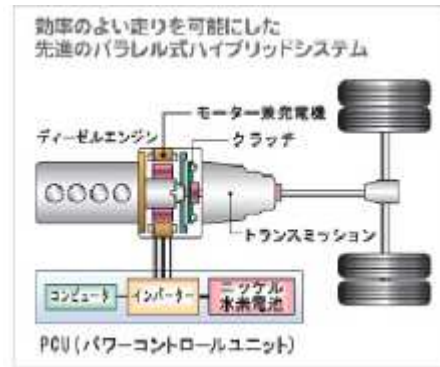


図 1.2.3-10 日野自動車「デュトロ ハイブリッド」 [42] [43]



図 1.2.3-11 三菱ふそうトラック・バス「エアロノンステップ HEV」 [44]

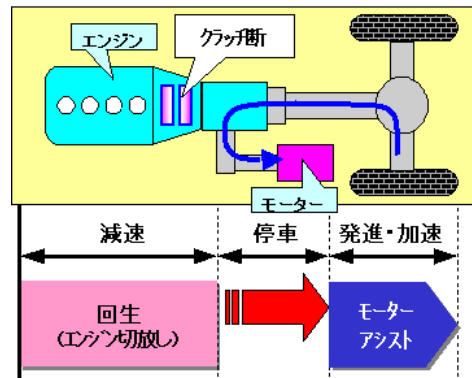


図 1.2.3-12 いすゞ自動車「エルフ ディーゼル ハイブリッド」 [45]

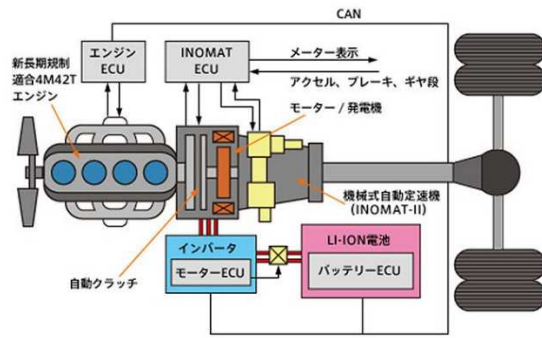


図 1. 2. 3-13 三菱ふそうトラック・バス「キャンター エコ ハイブリッド」 [46] [47]

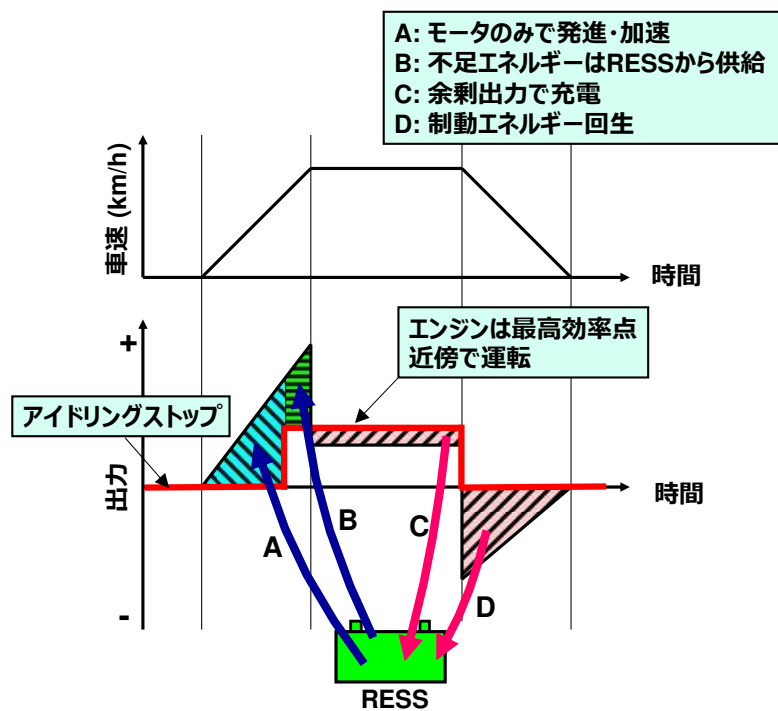


図 1. 2. 3-14 HEV のエネルギーフロー

1.2.4 燃料電池自動車

HEV は自動車の燃料消費率を大幅に削減し、排出ガスの低減にも寄与できる技術であるが、内燃機関を搭載し化石燃料を燃焼させている以上、CO₂や排出ガスはゼロにはならない。一方 BEV は走行時にゼロエミッションであるものの、充電時間、航続距離、車両重量、バッテリーの耐久性、トータルコスト、などに課題があり、すべての乗用車や重量車を代替することは極めて困難である。そこで、ゼロエミッションを実現しつつ BEV の課題に対応可能な燃料電池自動車 (FCV) が「究極のエコ車両」として研究を進められている。

燃料電池 (FC) の歴史は長く、1801 年にイギリスの Humphry Davy 卿が原理を発見し、1839 年に同じくイギリスの William R. Grove 卿が発電実験に成功した[48]。その後、100 年ほど埋もれたままになっていたが、1952 年にイギリスの F. T. Bacon が燃料電池の特許を取得し、発電用の燃料電池の開発に成功した[48]。これが燃料電池の実用化の始まりである。1965 年には米国の

宇宙船「ジェミニ5号」にプロトン交換膜形燃料電池が搭載され、1969年には月面歩行で有名な「アポロ11号」にアルカリ形燃料電池が搭載された[49]。国内では、1974年に発足した新エネルギー技術開発計画（サンシャイン計画）において燃料電池やアルカリ水電解の開発が[50]、1982年からのムーンライト計画においてりん酸形、熔融炭酸塩形燃料電池の開発が行われた[51]。

1983年になるとカナダのバラード社が新しい高分子膜を用いた固体高分子形燃料電池の開発に成功し、1989年には同社とドイツのダイムラー社が車載用燃料電池の共同開発を開始した[51]。1992年になるとマツダが「FC Golf Cart」の走行実験を行い[52]、1994年にはダイムラー社がバラード社の固体高分子形燃料電池（PEFC）を搭載した試作車「NECAR1」（図1.2.4-1）[53]を、1996年にはトヨタが同社の「RAV4」ベースの試作FCVを発表した。トヨタ自動車のFCVは、1996年大阪で開催された第13回国際電気自動車シンポジウム（EVS13）において、御堂筋をパレード走行している（図1.2.4-2）[54]。FCV開発の動きには、他にゼネラルモーターズ、日産自動車、ホンダ、フォード、フォルクスワーゲンなどが続き、それぞれ各社から試作車が発表された[55]。そして、2014年トヨタ自動車から「MIRAI」（図1.2.4-3）[54]が世界で初めて市販され、2018年には同じくトヨタ自動車からFCVの大型バス「SORA」（図1.2.4-4）[56]の販売を開始するなど、徐々にではあるが普及が進みつつある。



図 1. 2. 4-1 NECAR1 [53]



図 1. 2. 4-2 EVS13 でパレード走行を行ったトヨタ自動車初のFCV [54]

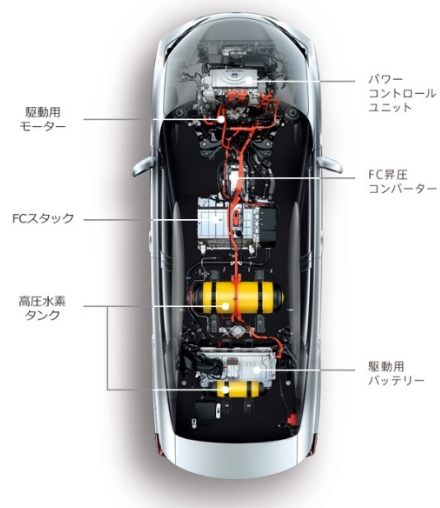


図 1. 2. 4-3 トヨタ自動車 FCV「MIRAI」 [54]



図 1. 2. 4-4 トヨタ自動車 FC バス「SORA」の透視図 [56]

1.3 クリーンエネルギー自動車毎の特徴

メタノール自動車、HEV、FCV、PHEV および BEV の各システムの比較を表 1.3-1 に示す。メタノール自動車は燃料系統部品の材質変更や火花点火機構の追加など若干の変更はあるものの、基本構成はベースとなるガソリン自動車やディーゼル自動車と同じである。HEV、PHEV および BEV は RESS を搭載しており、回生ブレーキにより駆動エネルギーを再利用する点が従来の ICEV と大きく異なる。FCV は RESS を用いなくてもシステムとして成立するため、NECAR1 など初期の FCV では RESS を搭載しない車両も存在したが、RESS を搭載した方が FC の高効率領域を使えば回生ブレーキも利用し全体として燃費向上につながるため、現在ではほとんどの FCV が RESS を搭載している。

なお、ISO/TR 8713「Electrically propelled road vehicles — Vocabulary」によると、HEV と FCHEV は次のように定義されている。

- HEV: vehicle with both a rechargeable energy storage system and a fueled power source for propulsion
EXAMPLE Internal combustion engine or fuel cell systems are typical types of fueled power sources.

- FCHEV: electrically propelled vehicle with an RESS and a fuel cell system as power source for vehicle propulsion

つまり、RESS を搭載した FCV は HEV の一種であり、FCHEV であると言える。

表 1.3-1 各クリーンエネルギー自動車のシステム

種類	ICEV	HEV (広義)			BEV
	メタノール自動車	HEV (NOVC-HEV)	FCV (FCHEV)	PHEV (OVC-HEV)	
構成					
燃料	搭載	搭載	搭載	搭載	—
RESS	—	有り	有り	有り	有り
充電	—	—	—	有り	有り
主な例	● 1989年よりJARIにて各社メタノール自動車をフリート試験	● 1991年日野HIMR ● 1997年トヨタプリウス	● 1996年トヨタRAV4 FCV ● 2014年トヨタMIRAI	● 2011年トヨタプリウス PHV	● 2009年三菱 iMiEV ● 2010年日産 LEAF

BEV: Battery Electric Vehicle
 FC: Fuel Cell
 FCV: Fuel Cell Vehicle
 GE: Generator
 HEV: Hybrid Electric Vehicle
 ICE: Internal Combustion Engine

ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle
 MG: Motor/Generator
 NOVC: Not off-vehicle charging
 OVC: Off-vehicle charging
 RESS: Rechargeable Energy Storage System
 TM: Transmission

メタノール自動車、HEV、FCV、PHEV および BEV について、比較基準となるガソリン/ディーゼル自動車を加えて、環境性能と実用性に関わる評価項目をまとめ表 1.3-2 に示す。

ガソリン/ディーゼル自動車は、乗用車において内燃エンジンを低負荷領域で使う頻度が多いが、商用車では高負荷領域の頻度が増えることから、車両効率を「低～中」とした。また排出ガスは近年の規制強化に伴い浄化が著しいが、NO_x や PM_{2.5} などの問題が残ることから「低～中」とした。航続距離、燃料の充填時間、車両重量、耐久性、インフラおよびトータルコストすなわち実用性に関わる項目は高い評価となる。

メタノール自動車は、車両効率においてはガソリン/ディーゼル自動車と同等程度であるため「低～中」とした。排出ガスはディーゼル代替の場合 PM を低減できるが、一方で未燃メタノールやホルムアルデヒドの問題[57]が生じるため、現在の低排出ガス化が進んだガソリン/ディーゼル自動車と比べ特に優位とも言えない。航続距離は、メタノールの発熱量がガソリン/軽油の約 1/2 となることから、やや低い評価となる。燃料の充填時間と車両重量はガソリン/ディーゼル自動車と同等である。また耐久性は、燃料ポンプやインジェクタ、噴射ポンプ等の燃料系統部品に問題

が出易く[58]，インフラは液体燃料であるため比較的容易ではあるものの，メタノール燃料専用に整備する必要がある．以上よりトータルコストはガソリン/ディーゼル自動車より少し高くなると予想されるが，他の方式と比べると低いと言える．

HEV は ISO/TR 8713 で定義を示したとおり，どのような内燃エンジンかあるいは FC でも RESS と組み合わせれば HEV と言うことができるが，ここではガソリンもしくはディーゼルエンジンと RESS を組み合わせた HEV を想定する．車両効率の観点では，HEV はドライビングサイクルによっては燃料消費率をガソリン/ディーゼル自動車の 1/2 以下に低減できることから，「中～高」の評価とした．排出ガスは，回生エネルギーの有効利用等によりエンジン仕事が増加するため特に NO_x 低減に有効と考えられるが，ゼロエミッションではないため「低～中」とした．航続距離は燃費向上分長くなるため「長」とした．充電・充填時間はガソリン/ディーゼル自動車と同等であるため「短」とした．また，車両重量は一般に重くなる傾向があるが，路線バス等ではエンジンとモータの出力や RESS の容量の設定次第では従来の ICEV と同等にすることも可能なため「軽～中」とした．また，耐久性については，当初 ICEV に比べてバッテリー劣化の課題があったが，現在はほぼ問題無いレベルとなっている．車両価格は高いものの，燃料代を削減できることから，トータルコストは「低」とした．

FCV は燃料として水素以外にメタノールやガソリンを用いる方式も存在するが，ここでは水素 FCV のみを対象に論述する．トヨタ自動車公表している同社「MIRAI」の LCA レポート[59]によると，初代「MIRAI」のライフサイクルでの CO₂ 排出量は，水素を天然ガスから製造したケースでは HEV と同等に止まるが，苛性ソーダの副生ケースでは HEV の約 2/3，再エネによる水電解で製造したケースでは HEV の約 1/2 まで低減できることが示されている．また，FC システムは内燃エンジンよりも最高効率が 20% 前後高いことから，車両効率の評価は「中～高」とした．走行時排出ガスはゼロとなる．航続距離は水素燃料の搭載量によって大きく変わるが，2020 年二代目「MIRAI」の一充填走行距離が 820 km あることから[60]，「中」とした．充填時間は満タンまで 3 分程度であるため[61]，評価は「短」とした．車両重量は，初代「MIRAI」が 1,850 kg，二代目「MIRAI」が 1,930 kg あることから「中」とした．耐久性については，FC スタックが使用につれて劣化する課題がある[62]．インフラについては，2024 年 4 月 30 日現在，水素ステーション運用数が日本全国で僅か 152 カ所[63]に過ぎず，大きな課題となっている．トータルコストは，トヨタ自動車「MIRAI」の新車価格が 700 万円以上であり[60]，燃料費も HEV に比べて安くない[64]ことから「高」とした．

PHEV も，HEV や FCV と同様色々な動力源や燃料を搭載したケースが考えられるが，ここではガソリンもしくはディーゼルエンジンと RESS を組み合わせた PHEV を想定する．PHEV は，実使用においては BEV として走行する頻度が高いため，車両効率を「高」，排出ガスを「低」とした．航続距離は，ガソリンもしくは軽油を搭載するため「長」となる．充電・充填時間は，BEV に比べてバッテリー容量が小さいことから「中」とした．車両重量は，バッテリー重量が HEV より重く BEV より軽くなることから「中」とした．耐久性については，BEV と同様バッテリー劣化の課題がある．インフラについては，PHEV の性能をフルに発揮するためには出先での充電も

必要となる。トータルコストは、バッテリー容量が大きい分 HEV より車両価格が高くなるが、外部充電したエネルギー主体で走行すれば燃料費を低減できる。そのため利用方法次第で変動するが、ここでは評価を「中」とした。

BEV はバッテリー製造時のエネルギー消費量が大きいため、車両製造時に ICEV の 2 倍程度の CO₂ を排出することが知られている[65]。また、車両走行時の化石燃料消費量と CO₂ 排出量は、発電所の電力構成によって大きく変動する。具体的には原子力と再エネの導入比率に大きく依存するが、それら導入比率は国によって大きく異なる(図 1.3-1) [66]。したがって、BEV の脱化石燃料と CO₂ 低減の評価は国によって異なるが、車両効率はバッテリー、MG 共に 90%前後と高いことから、「高」とした。排出ガスは、テールパイプからの排出がゼロとなる。航続距離(BEV では一充電走行距離)は 2023 年のデータで見ると 500 km 以上の車両も少なくなく最も長い車両は 830 km を誇るが(表 1.3-3) [67]、一方で 200 km 未満の車両も多いことから(図 1.3-2) [68]、「短～中」とした。充電時間は例えば高出力急速充電器(90 kW)を用いた場合でも数 10 分を要する[69]ことから「中～長」とした。車両重量は大量のバッテリーの搭載によりどうしても重くなる傾向があることから(例：三菱自動車のガソリン軽自動車「i」は 900 kg、BEV の「iMiEV」は 1,090 kg)、「重」とした。耐久性については、リチウムイオン電池が充放電の繰り返しおよび保存において劣化(それぞれ「サイクル劣化」と「保存劣化」)することが課題[70]として残っている。インフラは、急速充電器や充電器の普及を目指し補助金支給等の政策が取られているものの、特に国内においては 2010 年代に設置した充電器が耐用年数を迎え撤去されるケースも出てきており、公共の充電スタンドの普及基数が約 3 万基で横ばいになるなど十分とは言えない状況である[71][72]。トータルコストは、従来の ICEV に比べて新車購入が高額な一方で中古車の下取り価格の下落が大きく[73]、燃料費削減だけではペイしないことから「中～高」評価とした。

表 1.3-2 各クリーンエネルギー自動車の環境性能と実用性

評価項目	ICEV		HEV (広義)			BEV
	ガソリン/ディーゼル	メタノール	HEV (NOVC-HEV)	FCV (FCHEV)	PHEV (OVC-HEV)	
車両効率	低～中	低～中	中～高	中～高	高	高
走行時排出ガス	低～中	低～中	低～中	ゼロ	低	ゼロ
航続距離	長	中	長	中	長	短～中
充電・充填時間	短	短	短	短	中	中～長
車両重量	軽	軽	軽～中	中	中	重
耐久性	熟成	燃料系統に課題	バッテリー劣化	FC・バッテリー劣化	バッテリー劣化	バッテリー劣化
インフラ整備	既存	液体燃料	既存	水素ステーション	充電器必要	充電器必要
トータルコスト	低	低	低	高	中	中～高
備考	長年の対策により排出ガスは大幅に改善されたが、ゼロエミッションではない。 各国が2030年頃から販売禁止の政策を打ち出している。	燃料系統の耐久性やインフラ整備に課題があり、ゼロエミッションでもないため、従来車を代替するほどのメリットを見いだせず普及しなかった。	ICEVと比較して大きな短所がなく、燃費メリットがあるため普及した。 e-fuel や bio-fuel と組み合わせも可能なため見直されている。	水素インフラが少なく、車両価格も高いことから普及には至っていない。	HEVよりもBEVに近い使い方が可能であり、内燃エンジン搭載の安心感から再び注目されている。	バッテリー技術の進歩や優遇政策により2020年頃から普及が加速したが、航続距離、充電時間、バッテリー耐久性、インフラ不足などの問題が露呈し減速。

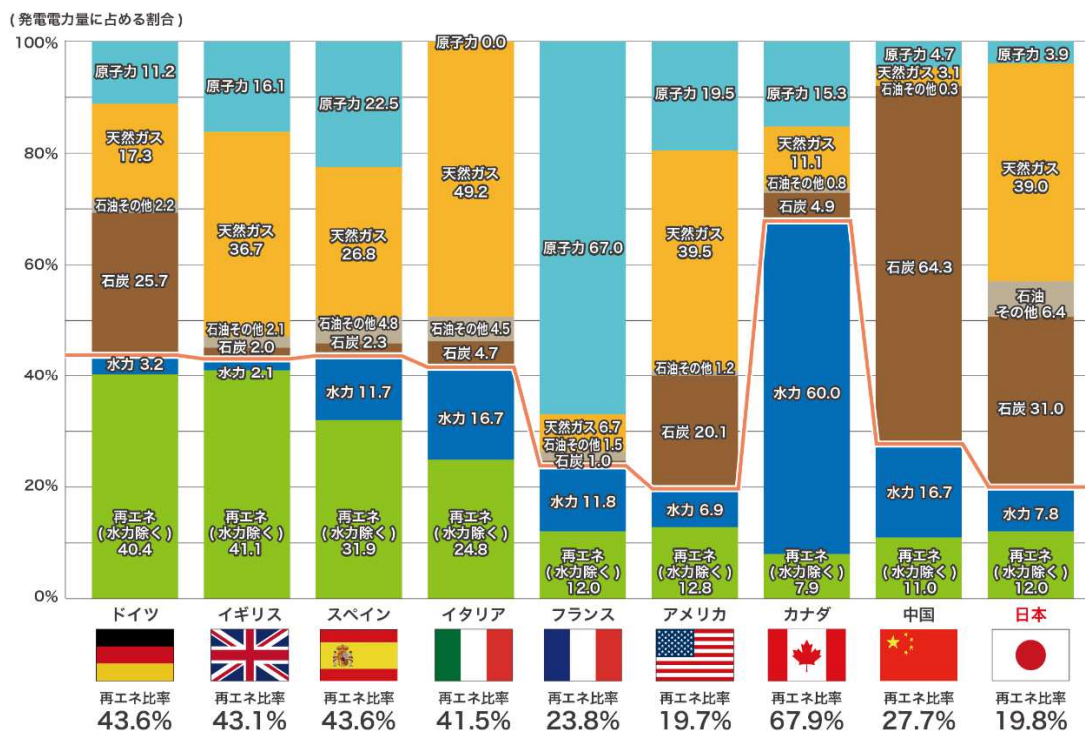


図 1.3-1 主要国の 2020 年度電力構成 [66]

表 1.3-3 一充電走行距離の長い BEV 上位 10 台 (2023 年) [67]

Model	EPA Combined Driving Range	Price
Lucid Air	516 mi (830 km)	\$138,000
Tesla Model S	405 mi (652 km)	\$84,990
Hyundai Ioniq 6	361 mi (581 km)	\$45,500
Tesla Model 3	358 mi (576 km)	\$55,990
Mercedes-Benz EQS	350 mi (563 km)	\$104,400
Tesla Model X	348 mi (560 km)	\$94,990
Tesla Model Y	330 mi (531 km)	\$52,990
GMC Hummer EV Pickup	329 mi (529 km)	\$110,295
Rivian R1T	328 mi (528 km)	\$74,800
BMW iX	324 mi (521 km)	\$87,100

Electric-Car Boom

Models by style and range available through 2020

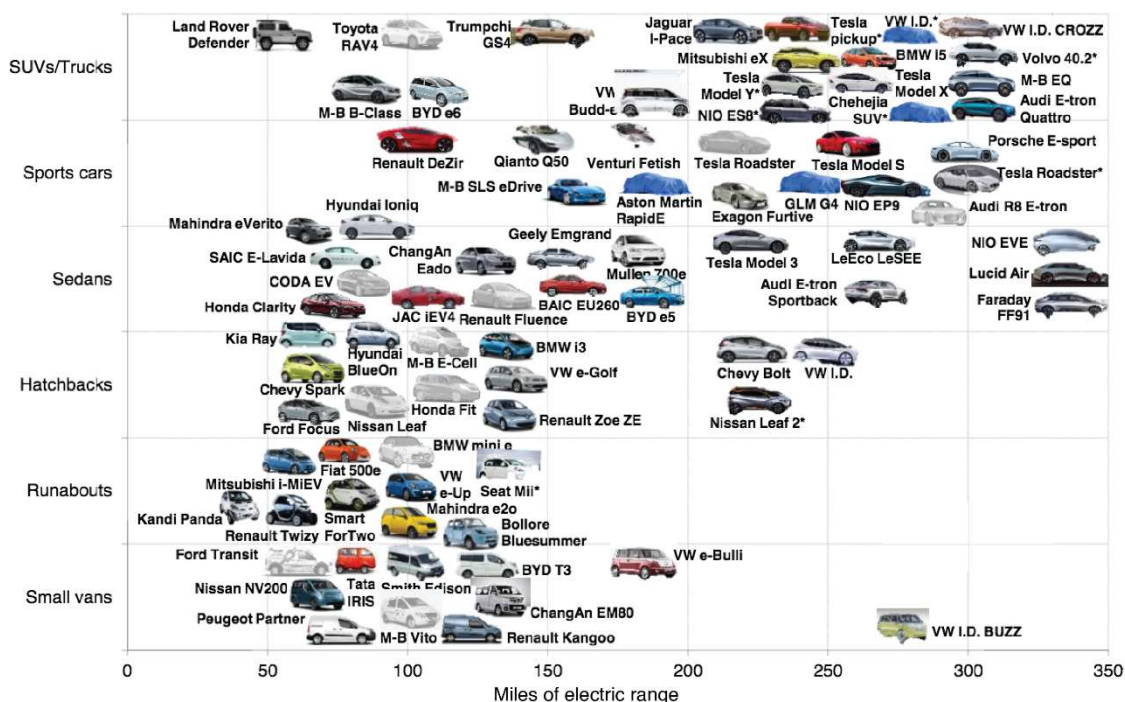


図 1.3-2 BEV の車両サイズ毎の一充電走行距離 [68]

1.4 HEV の意義

前節では各クリーンエネルギー自動車の特徴について述べた。これまでのところ、国によらず普及に成功しているのは HEV だけである。その理由はいくつかあるが、第一に既存インフラがそのまま使えること、第二に燃料の補給時間も含めて従来の ICEV と同等の実用性を有すること、第三にトータルオーナーズコスト (TCO) が ICEV に比べて遜色なく安くなる可能性もあることである。HEV が現代の市場に登場した初期は ICEV に比べて車両価格が高額であり、バッテリーの不具合なども少なくなかったが、HEV 投入から 27 年目を迎え、信頼性・耐久性の問題は特に乗用車カテゴリにおいては解決したと考えられる。

また、ISO/TR 8713 の定義を述べたとおり、RESS と燃料を消費する動力源を搭載する車両は全て HEV に分類される。メタノール自動車や天然ガス自動車、LPG 自動車など全ての ICEV が HEV となり得る。FCV についても、出来るだけ高効率領域で FC システムを作動させ、且つ回生ブレーキを利用するためには RESS 装備による HEV 化が必須であり (図 1.4-1) [74]、研究開発の極初期に発表された試作車を除けば全ての FCV が FCHEV となっている。

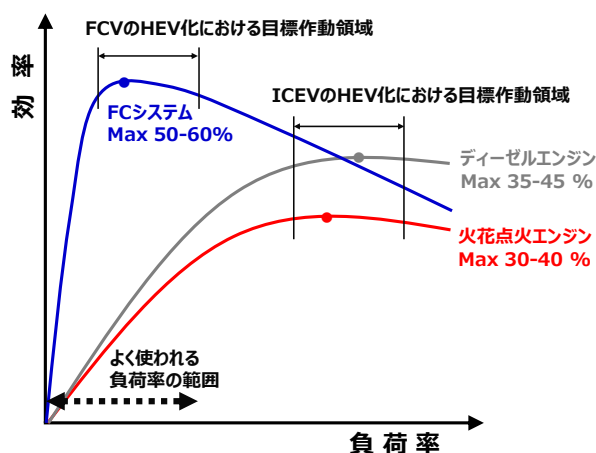


図 1.4-1 ICEV と FCV の HEV 化における目標作動領域
(出典：参考文献[74]を基に著者作成)

BEV は HEV と同様 RESS を搭載し回生ブレーキが使える、且つ全てのエネルギーを RESS で賄うため、式 (1-1) で定義される車両効率¹⁾は 90%前後と極めて高いが[75]、前述のとおり実用には多くの課題がある。重量車特に GVW 25 トンクラスなどの長距離トラックにおいて一充電走行距離を十分に長く取ろうとした場合、RESS 搭載重量が 7 トンにも及び、その分積載量が減少するため実用に耐えられないとの試算結果もある[76]。この問題を避けるためには、交換式バッテリーシステムの導入や、電気道路システム (ERS) と呼ばれる、走行中に道路から車両へ給電する仕組みの導入が考えられるが[77]、どちらも新たなインフラの整備が必要になることから普及のハードルは高い。

$$\text{車両効率(\%)} = \text{理論駆動仕事 (J)} / \text{消費エネルギー (J)} \times 100 \quad (1-1)$$

ガソリン自動車やディーゼル自動車を HEV に転換する際の大きな課題として、化石燃料を用いる点は変わらないため、例え燃費が向上したとしても脱化石燃料にはならないことが挙げられる。しかし、近年再び注目を集めている e-fuel[78]やバイオ燃料[79]あるいは水素[80]を用いることで、内燃エンジンの利用を継続しながらも CN を達成できる可能性が(絶対的な燃料供給量が足りるのか否かの問題を除けば)ある。電力の安定供給が期待できない地域や交通量の少ない地域では、インフラに高額な投資が必要な ERS は導入困難であり、そのような地域で CN 化を図る手段としても、「CN 燃料の内燃エンジン+HEV」の組合せは検討する価値がある。

このように HEV は世界的に電動化が進展中の現在、そして CN 燃料の内燃エンジン HEV や FCHEV が普及しているだろう未来においても大変重要な技術であると言える。

1.5 燃費・排出ガス評価手法

1.5.1 燃費・排出ガス評価手法の必要性

自動車メーカーが開発した車両を市場に出すためには、その基本性能を表す指標として、燃費がどの程度の実力を有するのか、そして排出ガスが国の規制値を満足するのか否か正しく評価する必要がある。自動車の型式認定においては、所定のドライビングサイクル (DC) を走行した際の

燃費・排出ガスが計測される。ガソリン自動車やディーゼル自動車の燃費・排出ガス試験は日本工業規格（JIS）や、新型自動車審査関係基準集「新型自動車の試験方法」（TRIAS）に規定されている。

1.5.2 ドライビングサイクル

乗用車などライトデューティ（LD）車の型式認証のドライビングサイクルは、国内の1990年代～2011年3月までは10・15モードと呼ばれる台形パターンが使われていた（図1.5.2-1）。米国では高速のHighway Fuel Economy Driving Schedule（HFEDS）とUrban Dynamometer Driving Schedule（UDDS）、欧州ではNew European Driving Cycle（NEDC）が使われていた（図1.5.2-1）。その後2011年4月から、国内ではより実走行に近いJC08モード（図1.5.2-2）に変更となり、2018年10月からは世界共通のWorld wide-harmonized Light vehicles Test Cycle（WLTC）（図1.5.2-3）が使われている。

GVW 3.5トン超のヘビィデューティ（HD）車は、型式認証において当初、6モードやD13モードと呼ばれるエンジン単体の定常運転試験により排出ガスのみが評価されており、車両としての型式認証のドライビングサイクルは存在せず、M15モード（図1.5.2-4）と呼ばれる台形パターンが主として研究用に使われていたが、2005年からはJE05モード（図1.5.2-5）と呼ばれるドライビングサイクルによる評価に移行した。

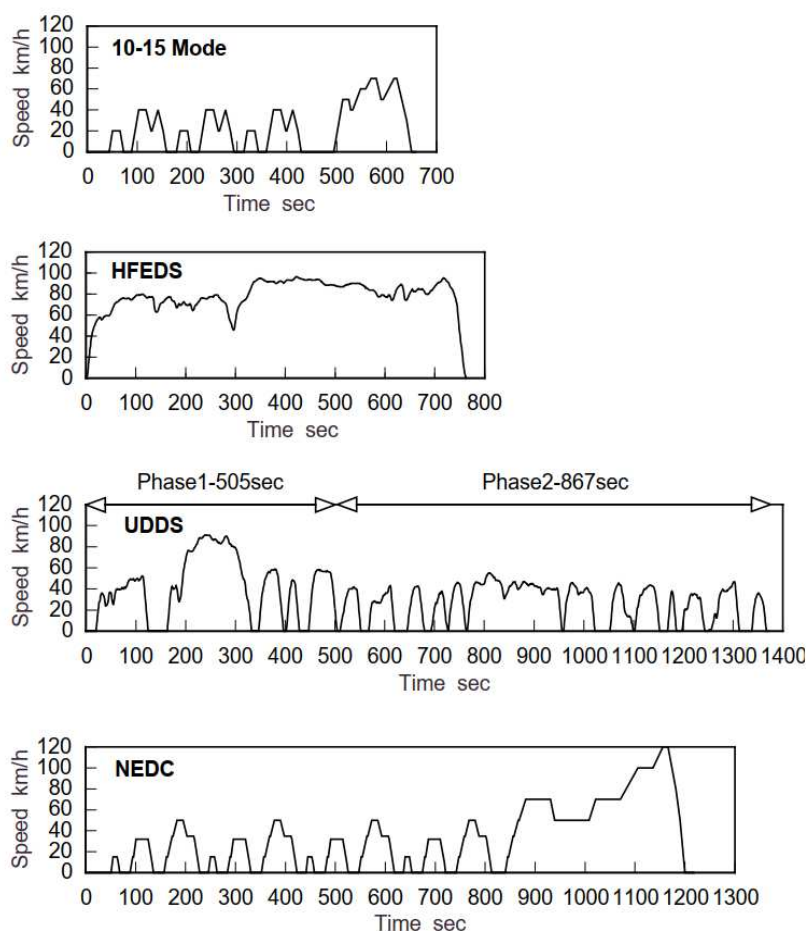


図 1.5.2-1 2010 年頃まで使われていた LD 車用ドライビングサイクル

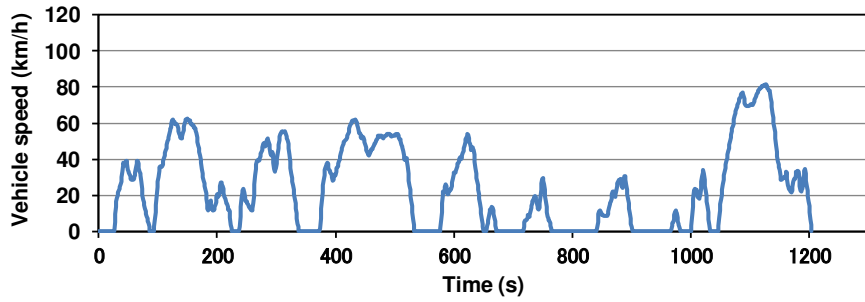


図 1.5.2-2 JC08 モード

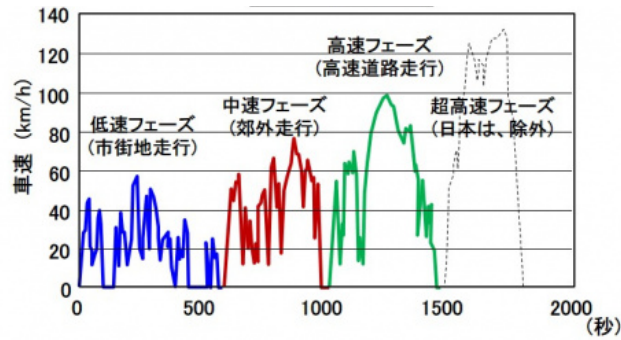


図 1.5.2-3 WLTC モード

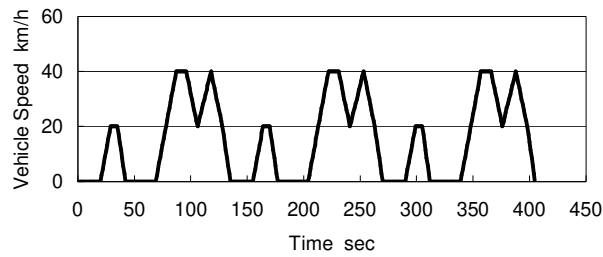


図 1.5.2-4 M15 モード

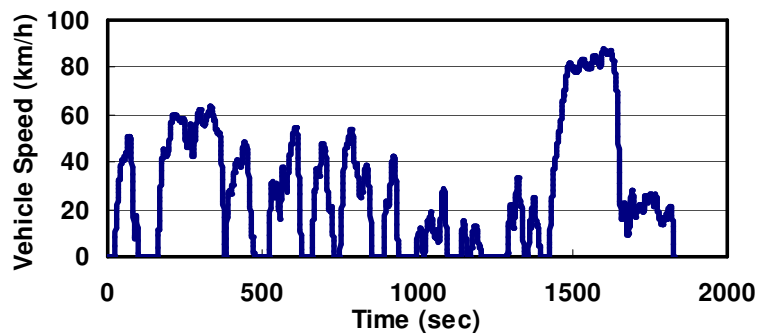


図 1.5.2-5 JE05 モード

1.5.3 様々な評価手法

評価手法は、主として (1) 車両ベース評価法と、(2) シミュレーション法の 2 種類がある。

1.5.3.1 車両ベース評価法

実車をシャシダイナモメータ上に設置し、実路の走行抵抗をシャシダイナモメータ上で再現して燃費・排出ガスを計測する手法である（図 1.5.3-1） [81]。計測手順は以下のとおりである。

- (1) 実路上で試験車両を十分に暖機した後、実路の直線部分において、変速機をニュートラルに入れた状態で、使用するドライビングサイクルの最高速度よりも 5 km/h 以上高い速度から 5 km/h 以下までの惰行時間を計測し、式 (1-2) より車速 10 km/h 毎の走行抵抗を算出する。なお、平坦な実路を用いるため、 $\theta = 0$ となる。

$$R_v = \mu_r mg + \mu_a AV^2 + (m + m_r)a + mg \cdot \sin\theta \quad (1-2)$$

R_v	: 走行抵抗	N
μ_r	: 転がり抵抗に関わる係数	
μ_a	: 空気抵抗に関わる係数	N/m ² /(km/h) ²
m	: 車両質量	kg
m_r	: 回転部分相当質量	kg
A	: 全面投影面積	m ²
V	: 車速	km/h
θ	: 勾配	rad
g	: 重力加速度	m/s ²

- (2) シャシダイナモメータに試験車両を設置し、試験自動車質量相当の慣性質量を設定した後、使用するドライビングサイクルの最高速度よりも 5 km/h 以上高い速度から 5 km/h 以下までの惰行時間を計測する。シャシダイナモメータ上の走行抵抗が実路と等しい走行抵抗になるまで、シャシダイナモメータの吸収力を調整する。
- (3) 所定のドライビングサイクルを目標として、アクセルとブレーキの操作、並びにマニュアルトランスミッションの場合はクラッチとシフト操作を行い、目標車速に沿うように車両を走らせる。目標車速に対する許容誤差は、各走行モードのあらゆる時点において、速度については±2.0 km/h 以内、かつ、時間については±1.0 秒以内で、図 1.5.3-2 に示す塗りつぶしの範囲内と規定されている。
- (4) 排出ガスは、上記ドライビングサイクル走行中のテールパイプガスを、定容量型サンプリング装置 (Constant Volume Sampler: CVS) にて収集し、CO₂、CO、THC、NO_x の濃度を分析の上、排出された質量を求める。これを走行距離で除して排出率 (g/km) とする。
- (5) 燃費は、カーボンバランス法 (JIS D1012, TRIAS 5, TRIAS 5-3) により算出する。これは、燃料中の炭素量と排出ガス中に含まれる炭素量が等しいことを利用した手法で、排出された CO₂、CO、THC の質量から燃料消費量を求める。この燃料消費量で走行距離を除して燃費 (km/l) とする。

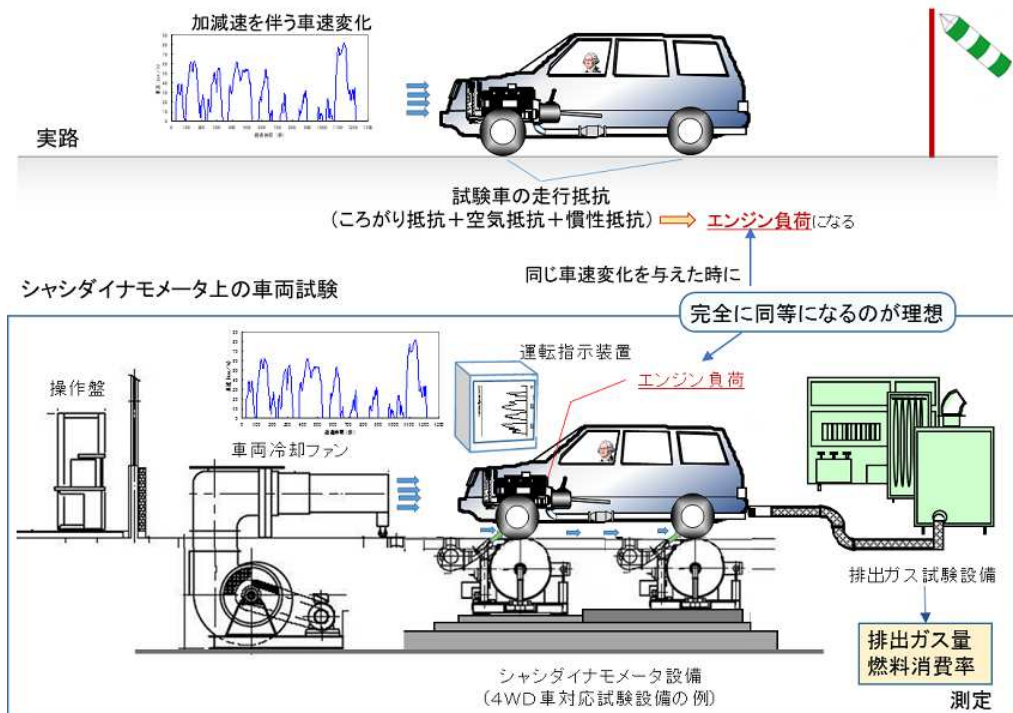


図 1.5.3-1 車両ベース評価法概要 [81]

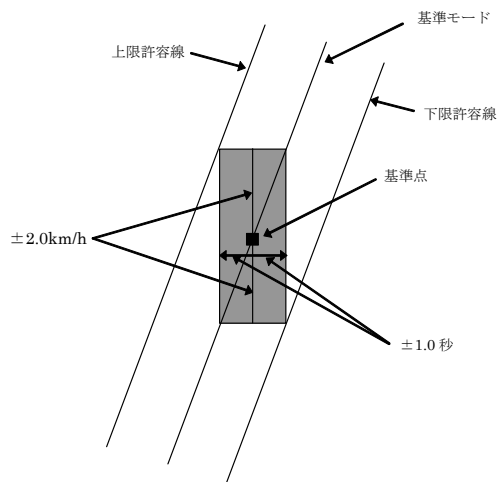


図 1.5.3-2 走行時の速度及び時間の許容誤差

1.5.3.2 シミュレーション法

シミュレーション法は GVW 3.5 トン超の HD 車に適用される。重量車の排出ガスは、車体及び車両重量が大きく、諸元（重量、ギヤ比）が多種多様等の理由から、車両ベースでの実測とすると、大型のシャシダイナモメータを備えた実験室が必要となり膨大なコストが掛かるため、採用が困難である。そのため、排出ガス規制が始まった当初はエンジンダイナモメータにエンジン単体を設置し、定常運転にて排出ガスを計測する手法（6 モード、D13 モード）が採用されていた[82]。しかし、2005 年 10 月から始まった新長期規制より、車両ベースのドライビングサイク

ル走行時のエンジン回転速度とトルクを「変換プログラム」と呼ばれるシミュレーションソフトにて算出し、それをエンジンダイナモメータ（E/D）上で再現することで過渡運転時の排出ガスを評価する「シミュレーション法」（図 1.5.3-3）が導入された[83]。追って 2006 年 4 月からは燃費についても、同じく「変換プログラム」で算出した車両ベースのドライビングサイクル走行時のエンジン回転速度とトルクに、エンジン単体の定常運転にて計測した燃料消費率マップを組み合わせ合わせて算出する「シミュレーション法」（図 1.5.3-4）が導入された[84]。

これは、「変換プログラム」を通じてエンジン毎にドライビングサイクルに沿ってエンジン回転速度及びトルクを決定し、エンジンを運転させる。この変換は、個々のエンジンが使用する回転速度・トルクの違いが反映できるよう、エンジン及び車両の諸元並びに一定の原則に従って設定される変速位置及び変速段から計算で求められる（図 1.5.3-4）[85]。

エンジン回転速度およびエンジントルクは次式から算出する。

<エンジン回転速度>

$$N_e = \frac{1000}{120\pi} \cdot \frac{i_m \cdot i_f}{r} \cdot V \quad (1-3)$$

N_e	: エンジン回転速度	rpm
V	: 車速	km/h
i_m	: 変速機ギヤ比	
i_f	: 終減速機ギヤ比	
r	: タイヤ動的負荷半径	m

<エンジントルク>

$R \geq 0$ の場合

$$M = \frac{r}{\eta_m \cdot \eta_f \cdot i_m \cdot i_f} \cdot R \quad (1-4)$$

$R < 0$ の場合

$$M = \frac{r \cdot \eta_m \cdot \eta_f}{i_m \cdot i_f} \cdot R \quad (1-5)$$

ただし、

$$R = \mu_r W + \frac{s}{100} W + \mu_a A V^2 + (W + \Delta W_1 + \Delta W_2) \frac{a}{g} \quad (1-6)$$

ここで、

M	: エンジントルク	Nm
R	: 走行抵抗	N
η_m	: 変速機の動力伝達効率	
η_f	: 終減速機の動力伝達効率	
μ_r	: ころがり抵抗係数	N/N
μ_a	: 空気抵抗係数	N/m ² /(km/h) ²
s	: 縦断勾配	%

- A : 前面投影面積 m^2
 W : 試験時車両重量 N
 ΔW_1 : エンジン, フライホイール等の回転部分相当重量 N
 ΔW_2 : エンジン以外の回転部分相当重量 N
 a : 車両加速度 m/s^2
 g : 重力加速度

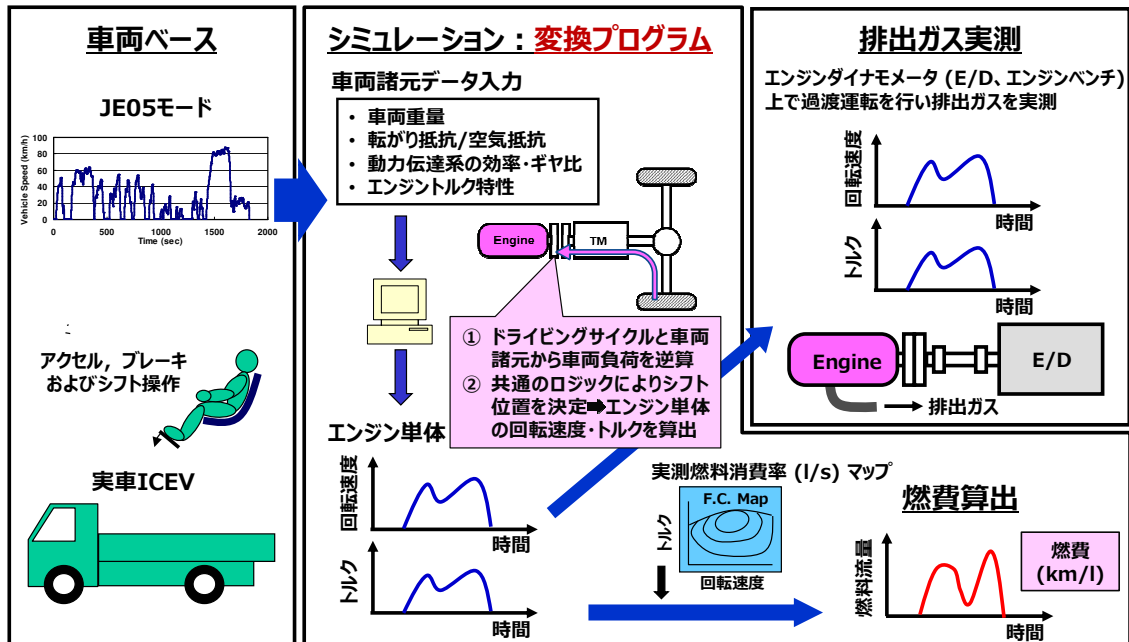


図 1.5.3-3 シミュレーション法概要

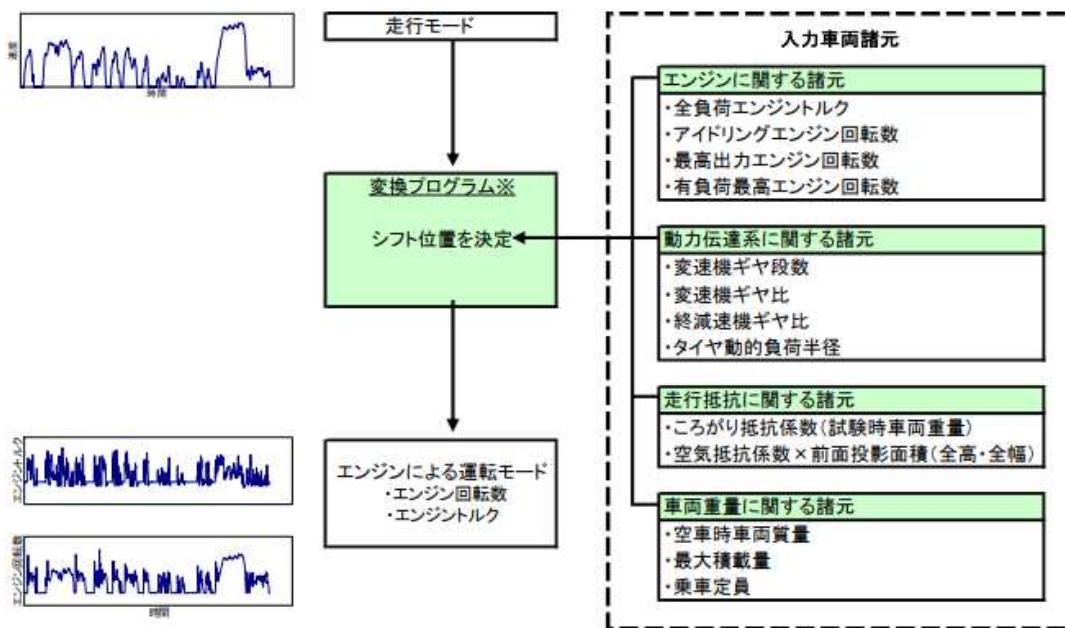


図 1.5.3-4 変換プログラム概要 [85]

1.5.4 HEV 評価上の課題

1.5.4.1 充放電収支の影響と既存 HEV 評価手法

HEV の燃費・排出ガス評価に当たっては、二つの課題が想定される。第一に、試験の開始時と終了時のバッテリーやキャパシタ等 RESS の充電状態 (SOC) が一致しない、すなわち Δ SOC が生じることである。試験終了時の SOC が開始時より低下している場合、それはエンジンの代わりに RESS が仕事をしていることを意味し、実力よりも優れた燃費 (km/l) が記録される。逆に試験終了時の SOC が開始時よりも高くなった場合、それはエンジン出力を利用して RESS を充電したこととなり、実力よりも低い燃費が記録されることになる (図 1.5.4-1)。 Δ SOC ゼロ時が真の燃費であることから、何らかの補正手法が必要となる。

第二の課題は、制動エネルギーの回生量が、車両の使われる実路上と燃費計測に用いられる通常の二輪駆動 (2WD) 用シャシダイナモメータ (C/D) 上で異なる可能性のあることである。これは、路上では前後輪の摩擦ブレーキが作動する一方で、二輪駆動用 C/D 上では非駆動輪を固定することから、非駆動輪の摩擦ブレーキが作動しない。そのため路上よりも回生エネルギーが増大する可能性があり、燃費の過大評価につながる恐れがある (図 1.5.4-2)。以下、特に断りがない限り C/D とは 2WD C/D を指すこととする。

これらの問題に対し国内の研究段階では、「発電補正法」と呼ばれる手法により Δ SOC の補正が行われていた。これは、SOC が制御上の最大レベルから試験を開始し、ドライビングサイクルでの燃料消費量 A (l/test) に、ドライビングサイクル終了後の停車発電によって Δ SOC がゼロになるまで回復させた際の燃料消費量 B (l/test) を加えて補正する手法 (図 1.5.4-3) である [86]。また 1999 年には米国自動車技術会 (SAE) から、HEV 燃費・排出ガス評価手法として J1711 「Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles」が発行された。この「SAE J1711」では、事前に SOC を調整した後単発の試験を行い、式 (1-7) のクライテリアを満足した場合は試験が成立する。成立の場合、燃費のばらつきを $\pm 3\%$ 以内に収めることができるとしている。

$$| \text{蓄電量差} / \text{消費燃料のエネルギー} | \leq 1\% \quad (1-7)$$

ここで、

$$\text{蓄電量差} = \text{電気量収支 (Ah)} \times \text{バッテリーの定格電圧 (V)} \times 3600 \quad (1-8)$$

$$\text{消費燃料のエネルギー} = \text{燃料消費量 (L)} \times \text{比重 (kg/L)} \times \text{低位発熱量 (J/kg)} \quad (1-9)$$

なお、本報告では簡便化のため、式 (1-7) の左辺の値を蓄電量差割合と呼ぶことにする。

しかしながら、「発電補正法」については、その補正精度を実証した例が無く、手法の妥当性が不明であった。「SAE J1711」についても実証例が無く、クライテリアを満足させることが簡単なのか困難なのか、満足した際に燃費がどれ程ばらつくのか不明であった。

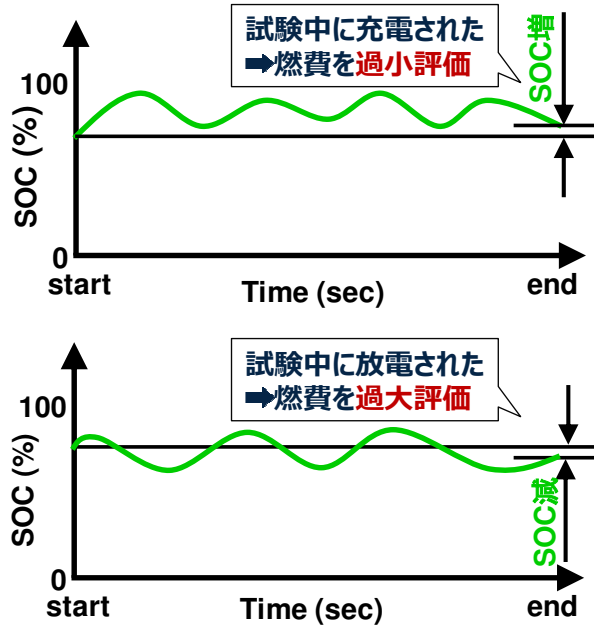


図 1.5.4-1 Δ SOC が燃費に及ぼす影響

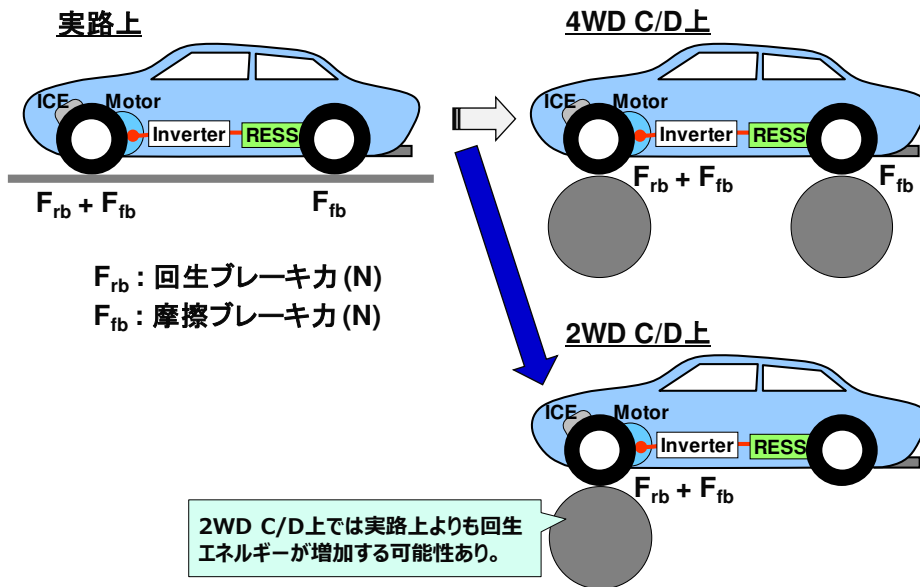


図 1.5.4-2 2WD C/D 上での回生エネルギー増大の可能性

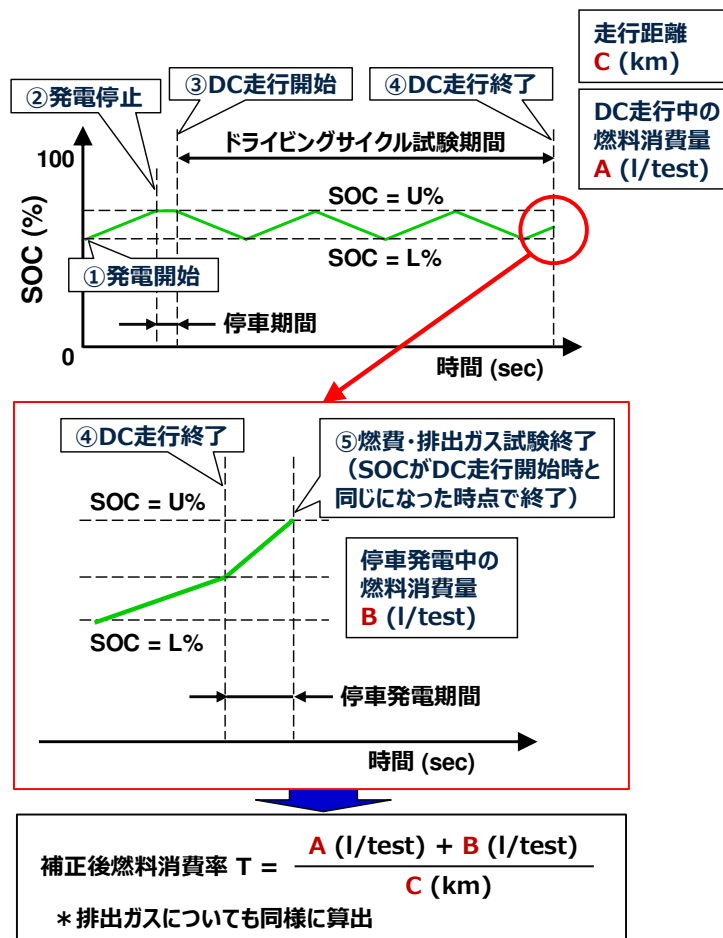


図 1.5.4-3 発電補正法による燃料消費量の補正方法 [86]

1.5.4.2 HD-HEV でのエンジンベンチへの変換上の課題

第 1.5.3.2 目で述べたとおり，HD-ICEV の燃費・排出ガスは「シミュレーション法」を用いてエンジンベンチに変換して評価される．これは，ICEV の動力源が内燃エンジンのみであり，そのエネルギーフローが内燃エンジン→変速機→終減速機→車輪の単純なものであるため可能となる．また，変速機と終減速機や完成された技術であるため，その動力伝達効率は製造メーカーや型式が異なっても同一と見なすことが出来る．そのため，共通の「変換プログラム」に車両諸元やエンジンの回転速度・トルク特性を入力し，一定の原則の下に変速を行う位置を決定することで，ドライビングサイクル走行時のエンジン単体の負荷条件（回転速度・トルク）を時系列で求めることが出来る．

しかしながら HEV においては，車両固有の駆動制御ロジックすなわちハイブリッド ECU によってエンジンと MG の使い分けやトルク配分を統合制御している．したがって，共通の「変換プログラム」でトルクを算出できるのは，図 1.5.4-4 に示すパラレル HEV の例では A) の変速機入口すなわちクラッチ軸端までである．B) のエンジン出力軸端のトルクを算出するためには，何らかの手法を用いてハイブリッド ECU の駆動制御を反映する必要がある．

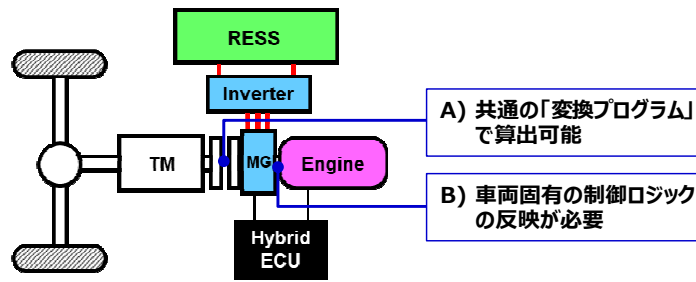


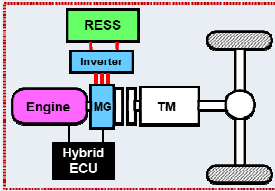
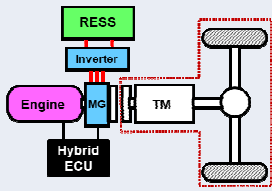
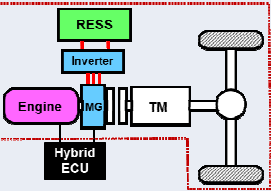
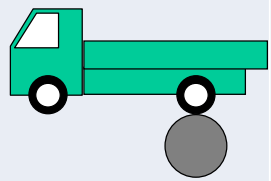

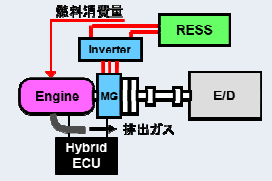
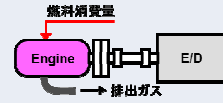
図 1.5.4-4 シミュレーションでトルクを算出する際の課題（パラレル HEV の例）

1.5.5 HD-HEV 用に想定したエンジンベンチへの変換手法

ハイブリッド ECU の駆動制御ロジックを反映可能な評価手法として、システムベンチ法、HEV シミュレーション法、Hardware in the loop simulation (HILS) 法の 3 種を想定し、車両ベース評価法をリファレンスとして比較検討を行った（表 1.5.5-1）。

- 車両ベース評価法：実車を用いてシャシダイナモメータ（C/D）上で実測するため、最も高い精度が得られるが、多様な仕様が存在する場合試験コストが膨大となる。また、大型用の C/D は一般に 2WD のみにしか対応していないため、将来前輪をモータで駆動する等の新たな HEV システムが出て来た場合は対応できない。
- システムベンチ法：HD-ICEV 用の「変換プログラム」を流用し、HEV システム出力軸端の回転速度・トルクを算出する。計算対象が HEV システム出力軸端であるため、ハイブリッド ECU の制御とは無関係に精度よく算出可能となる。HEV システム全体を E/D（ベンチ）に設置し運転するため、ハイブリッド ECU の制御を反映した実測評価が可能となる [87][88][89]。ただし、通常のエンジン単体試験と異なり、正側だけでなく負側も目標トルクに沿うように制御できる E/D が必要になる。多様な仕様が存在する場合も全て実測となるため、コスト面では不利である。また、システム出力軸が後輪だけでなく前輪にもあるなど複雑なシステムには対応が困難である。
- HEV シミュレーション法：HD-ICEV 用の「変換プログラム」と同様の考え方を基に HEV 用に改変した「HEV 用変換プログラム」を用いる [90]。ハイブリッド ECU も同プログラム内で再現する必要があるが、ハイブリッド ECU はブラックボックスであるため実車の駆動制御を完全には実装できない。エンジン単体の回転速度・トルクを算出後は HD-ICEV と全く同じ実測形態となるため、一般的な E/D を利用可能である。どんな HEV にもプログラム開発により対応可能である。
- HILS 法：ECU 開発などに用いられる HILS システムにより、実ハイブリッド ECU を用いたリアルタイムシミュレーションすなわち模擬走行を行い、エンジン単体の回転速度・トルクを算出する手法である。模擬走行の精度は HEV モデルの構造や HEV モデルに入力する各要素特性データの取得精度によって左右される。エンジン単体を E/D 上で運転する部分は HD-ICEV と全く同じ実測形態となるため、一般的な E/D を利用可能である。HEV の仕様が多数ある場合でも燃費は HILS で算出できるためコストを抑えることが可能である。また、複雑なシステム構成の HEV にも HEV モデルの構成を変更することで対応可能である。ただし、新規に HILS を構築した場合は模擬走行の精度を検証する必要がある。

表 1.5.5-1 HD-HEV 用に想定したエンジンベンチへの変換手法

手法	車両ベース評価法	HEVシミュレーション法	システムベンチ法	HILS法
模擬範囲	-	ハイブリッドECUを含む HEVシステム全体 	システム出力軸端以降 	ハイブリッドECUを除く HEVシステム全体 
変換方法	-	HEV用シミュレーション プログラム	変換プログラム	HILSシステム
実測形態	実車 	エンジン単体 	HEVシステム全体 	エンジン単体 
精度	● 実車	● 制御ロジックが異なる	● 制御ロジックの影響なし	● ハイブリッドECUを実装
コスト	● 大規模な試験装置が必要	● 従来のE/Dを利用可能	● 車種毎に実測する必要あり	● 従来のE/Dを利用可能
汎用性	● 4WDには対応不可	● プログラム開発で対応可	● 対応困難なHEVあり	● HEVモデル開発で対応可

ここでシステムベンチ法については、エンジン出力軸にモータが直結された単純な平行 HEV を対象に E/D 上での運転精度検証を行い、認証試験法として耐える精度を有することを確認し、試験手順を国に提案済み[87][88][89]であったため、本研究では検討対象外とした。また、HEV シミュレーション法については、「HEV 用変換プログラム」のベースとなるプログラム自体は開発済みであったものの[90]、認証試験のエキスパートに相談の結果、認証対象そのものと言えるハイブリッド ECU の駆動制御を完全には実装できない評価手法は認証試験法には成り得ないと判断され、本研究の検討対象外とした。

HILS 法は、認証試験法として HILS が利用された実績が無かったが、模擬走行の精度、コスト、汎用性の面で非常に高いポテンシャルがあると判断し、本研究で開発することとした。また、車両ベース評価法は、HILS 模擬走行の精度検証用リファレンスデータの取得に必要な基準となる評価手法であることから、本研究の対象とした。

1.6 本研究の目的

HEVは自動車の電動化そしてCN化を進める上で現在だけでなく将来においても大変重要な技術であり、既に多種多様なモデルが市場に投入されている。自動車メーカーが開発した車両を市場に出すためには、その基本性能を表す指標として、燃費がどの程度の実力を有するのか、排出ガスが国の規制値を満足するの否か評価する必要がある。しかし、本研究を開始した 1998 年当時、妥当性が証明された HEV 用車両ベース評価法が存在しなかった。また HD 車の評価に必要なエンジンベンチへの変換手法についても存在しなかった。

そこで本研究では、まず基本となる車両ベースでの燃費・排出ガス評価手法を確立するべく、当時既に市販されていた方式の異なる HEV を主として供試し、HEV 特有の作動形態である

RESS への充放電が燃費・排出ガスへ及ぼす影響やその補正手法を検討した。次に、HD 車用として、HILS によるエンジンベンチへの変換手法について開発した。どちらの手法も、公平、公正且つ合理的であることを開発目標とした。以上により、LD/HD 双方の HEV の普及に間接的に寄与することで、CO₂をはじめとする自動車からの排出ガス低減に貢献することを目的とした。

1.7 本論文の構成

本論文は五つの章から成り立っている。

第 1 章では「序論」として、まず、自動車に関わる三つの問題すなわち大気汚染、エネルギー枯渇および温室効果ガスの排出について述べた後、その解決策としてのクリーンエネルギー自動車（メタノール自動車、BEV、HEV 並びに FCV）について開発の歴史と現状を述べた。次に、各クリーンエネルギー自動車の得失を比較した上で、HEV の意義について述べた。さらに、「燃費・排出ガス評価手法」として、主に LD 車に適用される「車両ベース評価法」と HD 車に適用される「シミュレーション法」の概要、並びにそれを HEV に適用する際の課題についても述べた。最後に本研究の目的として、主に LD-HEV 用の「車両ベース評価法」と HD-HEV 用の HILS 法を開発し、LD/HD-HEV の普及に間接的に寄与することで、CO₂をはじめとする自動車からの排出ガス低減に貢献することを述べた。

第 2 章では「車両ベース評価法」を確立するために、充放電収支補正手法の仮説「直線回帰法」を既存の評価手法と比較実証した結果を中心に、実路上と C/D 上において回生電気量と燃費を実測し比較した結果について述べる。

第 3 章では「HILS 法」を確立するために、まず、シリーズ HEV とパラレル HEV をそれぞれ 1 種ずつ供試して HILS システムを構築し、その模擬精度を実測値と比較した。次に、HEV モデルを各社システムに適合するように標準化した上で、重量車メーカー各社の協力を得てその模擬精度を検証した結果について述べる。併せて、HILS 模擬走行の精度確保に向けて、RESS や MG など要素効率がエンジン仕事すなわち燃料消費率を及ぼす影響について述べる。さらに、HILS 動作環境の確認手法として、シリーズとパラレルの各標準 HEV モデルに使用する基準 ECU モデルを作成し、Software in the loop simulation (SILS) を行った結果について述べる。最後に、これらの成果を基に作成した試験手順（案）について述べる。

第 4 章では「研究成果の活用」として、「直線回帰法」が国内外のほぼ全ての技術基準や国際基準に採用されたこと、また、HILS 法が国内技術基準と国際技術基準（GTR）に採用されたことを中心に述べる。

第 5 章は「結論」として本研究の成果を総括した上で、確立した HEV 燃費・排出ガス評価手法が改良・発展を続けている内容について述べる。

第2章

車両ベース評価法の確立

2.1 はじめに

自動車の燃費・排出ガスは車両ベースでの評価が基本となる。また、HILS 模擬走行の精度を検証するためには、その比較基準となる車両ベースでのデータ、特に燃費を精度よく計る必要がある。そこで本章では、前章で述べた HEV の燃費・排出ガス評価に当たって想定される二つの課題すなわち (1) 試験における RESS の ΔSOC の発生、(2) 実路上と C/D 上における回生エネルギーの相違の可能性、について実車データを取得し、その影響度を定量化した上で補正手法について検討を行った。

2.2 課題解決のための補正手法の仮説

2.2.1 RESS の充放電収支の補正手法

HEV に搭載されるニッケル水素電池やリチウムイオン電池等 RESS は、そのクーロン効率 (Ah 効率) がほぼ 100 % と仮定できることから、 ΔSOC は式 (2-1) および式 (2-2) によって表現できる。ここで、同じドライビングサイクルにおいては、MG の回生電気量 e_{re} (Ah)、MG の放電電気量 e_{dis} (Ah)、エンジンの発電時平均熱効率 η_{ICE} 、発電機の平均効率 η_{gen} および RESS の平均電圧 V_{RESS} はほぼ一定と考えられる。HEV 制御が充電モードか放電モードかによって発電電気量 e_{gen} (Ah) が変化する。式 (2-2) より、発電電気量 e_{gen} (Ah) に比例して燃料を消費することから、ドライビングサイクル 1 回走行当たりの燃料消費量は RESS の電気量収支に対し直線関係になると予想される。つまり、電気量収支によって燃料消費率を補正できるはずである。これを「直線回帰法」と呼ぶこととする (図 2.2.1-1)。

$$\Delta SOC = e_{balance} = e_{re} + e_{dis} + e_{gen} \quad (2-1)$$

$$e_{gen} = E_{fuel} \times \eta_{ICE} \times \eta_{gen} \div V_{RESS} \quad (2-2)$$

$e_{balance}$: 電気量収支 (Ah)

e_{re} : 回生電気量 (Ah)

e_{dis} : 放電電気量 (Ah)

e_{gen} : 発電電気量 (Ah)

E_{fuel} : 消費燃料のエネルギー (J)

η_{ICE} : エンジンの発電時平均熱効率

η_{gen} : 発電機効率

V_{RESS} : RESS の平均電圧 (V)

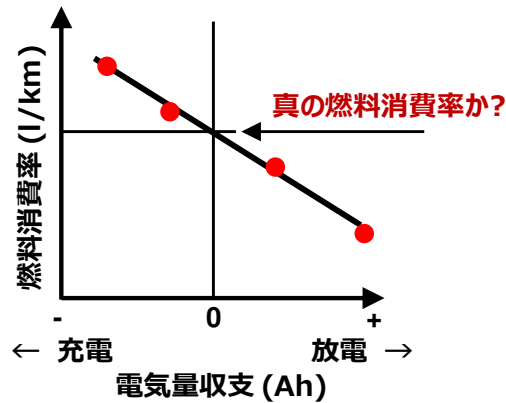


図 2.2.1-1 直線回帰法のイメージ

なお、縦軸が燃料のエネルギーであることから、ディメンションを合わせるために横軸は電気量収支 (Ah) ではなく電力量収支 (Wh) とすべきではないかと思われるかも知れない。しかし、電力量収支とした場合は RESS の充放電効率 (Wh 効率) の影響を大きく受けるため、収支ゼロ Wh 点が Δ SOC ゼロとはならず補正が必要になる。しかも充放電効率は電流の大きさによって変化することから、精度よく補正するためには車両試験の電流の大きさに応じて時系列で補正する必要が生じ、多大な工数が発生する。一方電気量収支を用いた場合は、電流の大小に因らずクーロン効率 (Ah 効率) がほぼ 100 % 一定となるため効率補正不要であり、且つ HEV における RESS の SOC が一定の範囲内で制御されていることから、電圧変動を無視しても大きな誤差要因にはならないと考えられる。以上の理由により充放電収支は電気量を用いて補正することとした。

また、縦軸は自動車メーカーのカタログ表示等に使われる燃費 (km/l) ではなく燃料消費率 (l/km) であることを付記する。固有名詞の一部を抜き出して略語を作る日本語の特性上、燃費と燃料消費率を混同されるケースも少なくないが、本論文では厳密に区別することとする。

2.2.2 実路上と C/D 上の回生エネルギーの相違の補正手法

実路と C/D 上の回生エネルギーが異なる場合、その差分は式 (2-1) における MG の回生電気量 e_{re} (Ah) の増減となるため、その増減に応じて電気量収支が充電側あるいは放電側にずれることになる。したがって、図 2.2.1-1 に示した回帰直線上で電気量収支をその「ずれ」分だけ補正することとする。

2.3 実験方法

2.3.1 供試車両

本研究を開始した当時既に市販されていた HEV 4 車種を中心に供試した。主要諸元は表 2.3.1-1 に示すとおりで、車両記号を HEV-A, HEV-B, HEV-C, HEV-D とした。また、研究の後半では、NEDO「高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発」事業で開発されていた HD-HEV の試作車 4 台が出来上がって来たことから、このうちの 1 台 (図 2.3.1-1) も供試した。これは表 2.2.1-2 に主要諸元を示す都市バスであり、車両記号を ACE-B2 とした。さらに、主要諸元を表 2.2.1-3 に示す DPF 付ディーゼルエンジン搭載シリーズ HEV の都市バス 1 台 (HEV-E) も供試した。

充放電収支が燃費や排出ガスに及ぼす影響は、HEV方式、RESS、エンジンの種類などによって変わってくる可能性もあるが、本研究ではHEV方式として、シリーズ、パラレル、シリーズ/パラレルの3種、RESSの種類が、鉛電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、キャパシタの3種、エンジンは火花点火式と圧縮着火式の2種を網羅することになり、評価手法の妥当性の総合的な検証が可能となった。

表 2.3.1-1 車両ベース評価法の主たる供試車両

車両記号		HEV-A	HEV-B	HEV-C	HEV-D
ハイブリッド方式		シリーズ	シリーズ/パラレル	パラレル	シリーズ/パラレル
車種		マイクロバス	乗用車	乗用車	乗用車
重量	車両重量	kg	3,990	1,240	850
	車両総重量	kg	5,220	1,515	960
	定員	人	24	5	2
エンジン	型式	5E-FE	1NZ-FXE	ECA	QG18DE
	排気量	cc	1,496	1,496	995
	最大出力	kW/rpm	49 / 3,100	43 / 4,000	51 / 5,700
	最大トルク	Nm/rpm	111 / 3,100	102 / 4,000	92 / 4,800
	排出ガス浄化装置		三元触媒	三元触媒	三元触媒
	燃料		ガソリン	ガソリン	ガソリン
MG	定格出力/ 電圧	kW/V	—	21 / 288	7.7 / 144
	最大出力	kW/rpm	70 / 1,650~4,500	30 / 940~2,000	9.2 / 2,000
	最大トルク	Nm/rpm	405 / 0~1,000	305 / 0~940	49.0 / 1,000
RESS	種類		鉛電池	ニッケル水素電池	ニッケル水素電池
	容量/ 時間率-電圧	Ah/HR-V	58 / 3	6.5 / 3-7.2	6.5 / 3-7.2
	搭載個数		24	40	20
	定格電圧	V	288	288	144

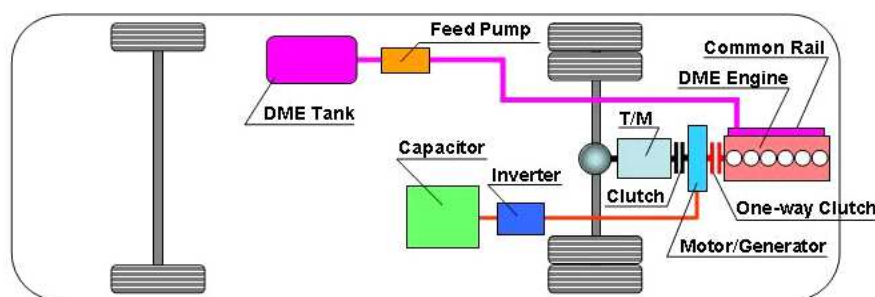


図 2.3.1-1 車両ベース評価法の供試車両 (ACE-B2)

表 2.3.1-2 車両ベース評価法の供試車両 (ACE-B2)

Manufacture		Hino
Symbol		ACE-B2
Body	Vehicle Category	City Bus
	Vehicle Mass kg	11,610
	Vehicle Mass at Test kg	12,825
Fuel		DME
Engine	Engine Type	Compression Ignition
	Displacement cc	7,961
	Cylinder	6
	Intake	Natural Aspiration
	Fuel Injection	Common Rail
	Fuel Supply System	Direct Injection
	Compression Ratio	18.0
	Combustion	Compression Ignition
	Catalyst	Oxidation Catalyst
Max. Power kW/rpm	129/2,500	
Hybrid Type		Indirect Series/Parallel
Transmission		5 Speed
MG	Type	PM
	Quantity	1
	Max. Power kW/rpm	70/3,250
RESS	Type	Capacitor
	Capacity	25F
	Weight kg	319
	Total Voltage V	600

表 2.3.1-3 車両ベース評価法の供試車両 (HEV-E)

Hybrid Type		Series
Body	Vehicle Mass kg	11,775
	Total Vehicle Mass kg	15,515
	Vehicle Mass at Test kg	13,645
Fuel		Light Oil
Engine	Engine Type	Compression Ignition
	Displacement cc	8,201
	Cylinder	6
	Intake	Natural Aspiration
	Fuel Injection Pump	In-line Type
	Max.Power kW/rpm	147/2,900
	Max.Torque Nm/rpm	539/1,700
Transmission		Single Speed
MG	Type	Induction
	Quantity	2
	Rated Power kW/rpm	67/5,000
	Max.Torque Nm/rpm	360/4,000
GE	Type	PM Synchronous
	Rated Power kW/rpm	40/1,400
RESS	Type	Li-ion Battery
	Quantity	170
	Capacity	24Ah
	Total Voltage V	612

2.3.2 実験装置

(1) ションダイナモメータ (C/D)

LD 車である HEV-B, HEV-C および HEV-D には, 明電舎製の機械慣性式, 200 kW クラスの 2WD C/D を用いた. HD 車である HEV-A, ACE-B2 および HEV-E には, 明電舎製の電気慣性式, 370 kW クラスの 2WD C/D を用いた (図 2.3.2-1).

(2) 高速周回路

実路試験には, 当時日本自動車研究所 (JARI) つくば研究所に保有されていた一周 5,500 m, 幅 12 m, コーナー半径 400 m の高速周回路 (現在は城里町に移転) を用いた (図 2.3.2-2)) [91].

(3) 速度計

実路試験における車速は, 主に小野測器製の非接触速度計を用いて計測した. 車両によっては, 車載 ECU の CAN データを利用し計測した.

(4) 燃料流量計

実路試験においてはカーボンバランス法が使えないため, 低圧力損失の小野測器製容積式デジタル流量計を車載し, 直接燃料流量を計測した. C/D 試験ではカーボンバランス法により燃料流量を計測した.

(5) パワーメータ

RESS の電流および電圧は, 日置電機製 3193 AC/DC パワーハイテスタにクランプ式の 200 A クラス電流計を組み合わせ計測した.



図 2.3.2-1 ACE-B2 の C/D への設置状況



図 2.3.2-2 JARI 高速周回路 [91]

2.3.3 実験条件

2.3.3.1 充放電収支補正手法の検証

以下に示す4手法を用いて実測データを取得した。

(1) 連続繰り返しモード法

HEVにおいてRESSのSOCは一定の狭い範囲内に制御されていることから、ドライビングサイクルを繰り返し走行し燃料消費量を大きくすることで、 ΔSOC の燃費への影響を無視できるレベルに抑えられると想定した評価手法である。

(2) 直線回帰法

本研究で提案する評価手法である。RESSの電気量収支が異なる複数のデータを取得し、それらデータを電気量収支に対して直線回帰し、0 Ah点のデータを真の燃費・排出ガスとする手法である。

(3) 発電補正法

国内の研究段階で用いられて来た ΔSOC の補正手法である。SOCが制御上の最大レベルから試験を開始し、ドライビングサイクルでの燃料消費量A (l/test)に、ドライビングサイクル終了後の停車発電によって ΔSOC がゼロになるまで回復させた際の燃料消費量B (l/test)を足して補正する手法である。

(4) SAE J1711

複数のデータを取得する上記(1)や(2)の評価手法と異なり、事前にSOCを調整した後単発の試験を行い、式(1-7)で示した蓄電量差割合が1%以内であれば試験成立とする評価手法である。

試験法と走行モードとの組み合わせを表2.3.3-1に示す。連続繰り返しモード法はコールドスタートには適用できないため、ホットスタートのM15モード、10-15モードおよびHFEDSについてのみ試験を実施した。直線回帰法およびSAE J1711はホット/コールドによらず適用できるため5種のモード全てについて試験を実施した。また、直線回帰法とSAE J1711とでデータを共用した。発電補正法は、HEV-AのM15モードとHEV-Bの10-15モードのみに適用した。なお、SAE J1711によるHFEDSおよびUDDSの実際の試験手順は図2.3.3-1に示すようになる。HFEDS試験の場合、SOC調整後にプリコンディショニングとしてHFEDSを1回走行するため、試験前にSOCを振ってもその振れ幅がキャンセルされ本番の試験に反映されない可能性がある。10-15モードおよびNEDCについては、それぞれTRIASおよびECEに準じて試験を行い、SAE J1711の試験成立基準のみを適用した。

表 2.3.3-1 評価手法とドライビングサイクルの組合せ

	連続繰り返しモード法	直線回帰法	発電補正法	SAE J1711
M15モード	HEV-A	HEV-A	HEV-A	HEV-A
10-15モード	HEV-B, C, D	HEV-B, C, D	HEV-B	HEV-B, C, D
HFEDS	HEV-B, C, D	HEV-B, C, D	-	HEV-B, C, D
UDDS	-	HEV-B, C, D	-	HEV-B, C, D
NEDC	-	HEV-B, C, D	-	HEV-B, C, D

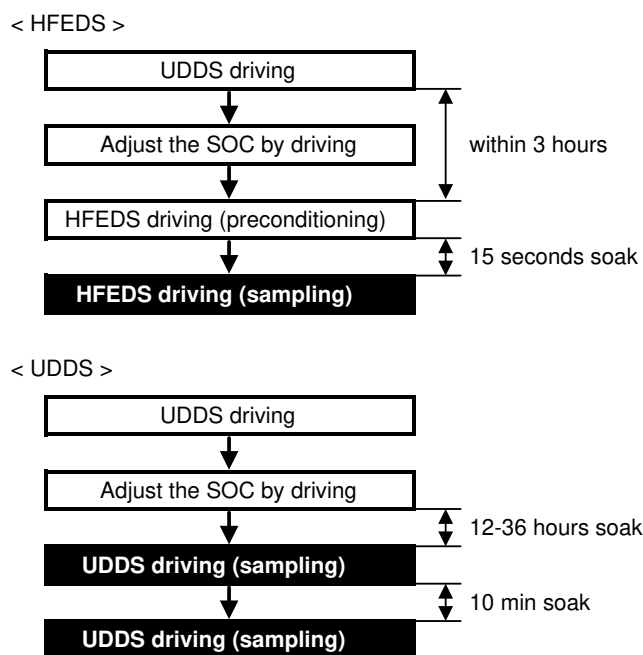


図 2.3.3-1 SAE J1711 の試験手順

2.3.3.2 実路上と C/D 上の回生エネルギーの相違の補正手法

回生エネルギーは、車両のモータ出力や RESS の充電受入れ性に加えて、ドライビングサイクルの車速や減速度によって変化する。そこで本研究では、HEV-A では M15 モードの 3 種の減速パターン（図 2.3.3-2）のみ実測したが、HEV-B と HEV-C では 10・15 モードの 6 種の減速パターン（図 2.3.3-3、最高速度 70 km/h、最大減速度 0.08 g）と、より高速・高減速度として車速 100 km/h から停止するまでの 0.10 g、0.15 g、0.20 g での減速パターン（図 2.3.3-4）において、実路上と C/D 上の回生エネルギーを実測・比較した。さらに、HEV-A については M15 モード、HEV-B については 10・15 モードの燃費も実測し、回生エネルギーの相違が実際に燃費に影響を与えているか否か比較した。

なお、ドライバは、C/D 試験においてはドライバーズエイド（走行モニタに表示される目標車速と実車速点データ）のみを注視し、ドライビングサイクルに沿うようにアクセルとブレーキを操作するだけでよいが、実路試験においては車両が高速周回路から飛び出したり蛇行したりしないよう、車両前方をよく見てステアリングホイールを中立に保つ必要が生じる。一人のドライバがドライバーズエイドと前方の両方を注視するのは困難であるため、本研究では助手席にも副ドライバが座り、副ドライバがステアリングホイール操作を担うことで、運転席の主ドライバはアクセルとブレーキの操作に専念できる形とした。また、速度計、ドライバーズエイド、燃料流量計、パワーメータなど多数の試験計測機器を搭載することから、それらに電力を供給するための大型 12V 鉛電池とインバータを搭載した（図 2.3.3-5）。これらの重量増により、国によって定められている試験自動車重量（空車重量+110 kg）を優に超過するため、C/D に設定する等価慣性重量は実路試験の総重量に合わせた数値とした。

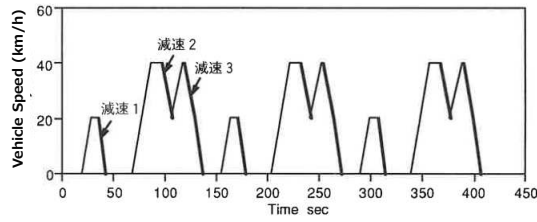


図 2.3.3-2 M15 モードの 3 種の減速パターン

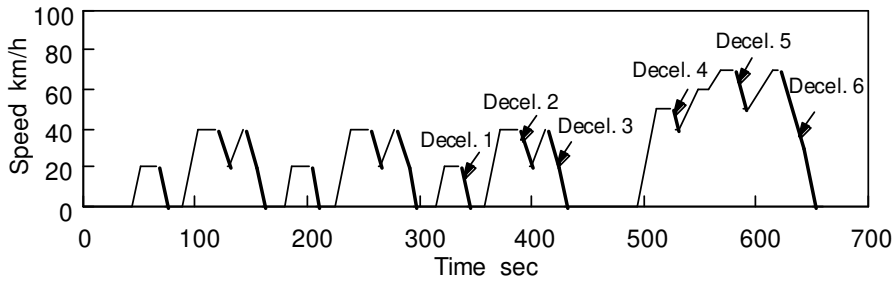


図 2.3.3-3 10・15 モードの 6 種の減速パターン

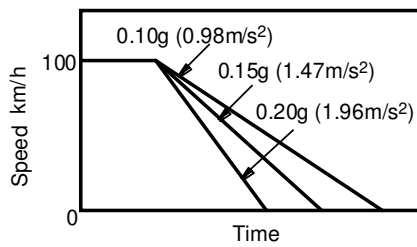


図 2.3.3-4 高速・高減速度の減速パターン

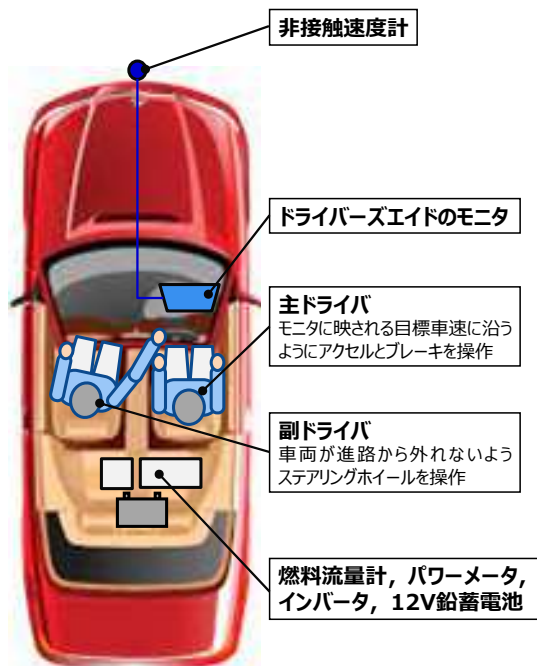


図 2.3.3-5 実路試験の方法

2.4 実験結果

2.4.1 充放電収支補正手法の検証

2.4.1.1 四つの評価手法

(1) 連続繰り返しモード法

連続繰り返しモード法の適用例として HEV-A の M15 モードおよび HEV-B, C, D の 10・15 モードの試験結果を図 2.4.1-1 に示す。この試験では、バッテリーの SOC が比較的高いレベルから開始している。図中の各サイクル毎の電気量収支および第 1 サイクルから各サイクルまでの平均電気量収支は、放電側を正、充電側を負とした。また、各サイクル毎の燃費および各サイクルまでの平均燃費は、平均電気量収支が 0 Ah に最も近づいたサイクル（図中の*1）までの平均燃費を 100 とし、それに対する比で示した。その理由は、クーロン効率を 100% と仮定した場合、平均電気量収支 0 Ah における平均燃費が真の燃費であると考えられるためである。この試験では、繰り返し回数が 6~10 回で第 1 サイクルからの平均電気量収支がほぼ 0 Ah に収束した。他のドライビングサイクルの場合も同様の結果が得られており、ドライビングサイクルを連続して繰り返すことによって、平均電気量収支がほぼ 0 Ah における燃費を計測できることがわかった。

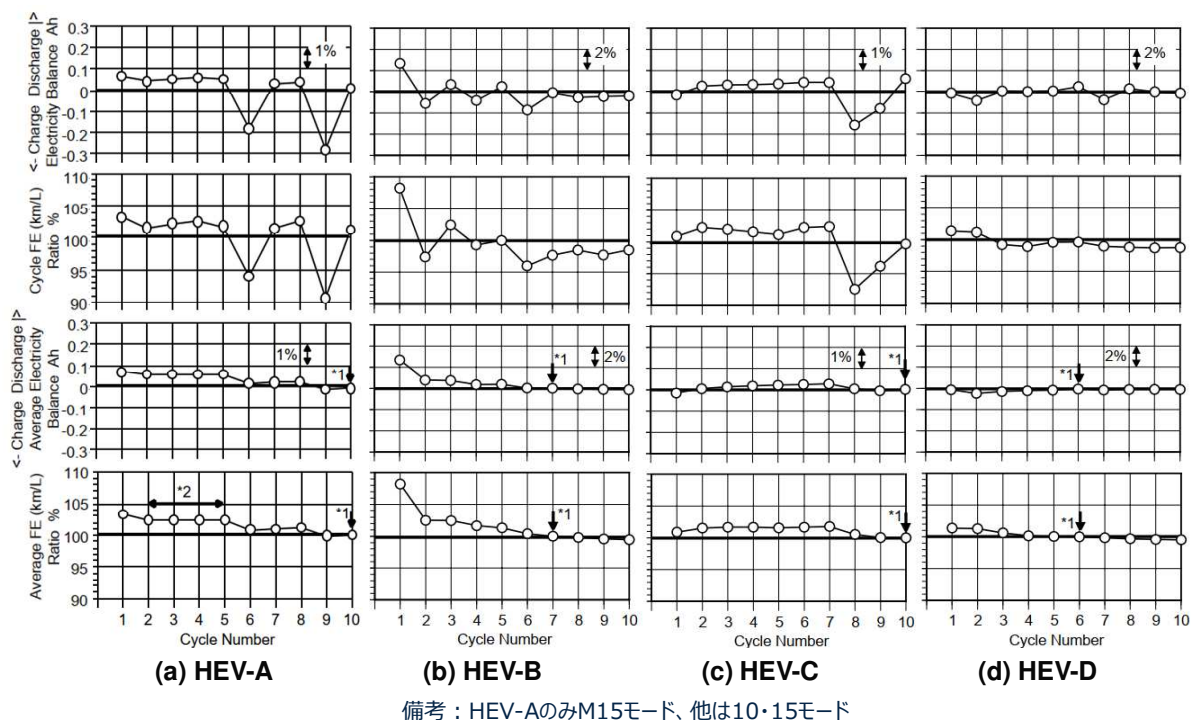


図 2.4.1-1 連続繰り返しモードによる燃費計測例

(2) 直線回帰法

電気量収支と燃料消費率 (l/km) との関係例として、HEV-A の M15 モードと HEV-B, C, D の 10・15 モードの試験データを図 2.4.1-2 に示す。燃料消費率は一定の範囲内では電気量収支に対してほぼ一直線上にのり、直線回帰が可能であった。そこで、連続繰り返しモード法の場合と同様、クーロン効率を 100% と仮定し、電気量収支 0 Ah における燃料消費率を直線回帰法の計測

値とした。他の走行モードの場合も同様の結果が得られた。

なお、図 2.4.1-2 の HEV-C において、電気量収支が放電側に大きく振れたデータが無いことに気付かれたかも知れない。これは、図 2.4.1-3 に示すように電気量収支が放電側に大きめに振れた際に燃料消費率が増大し回帰直線上から外れたため、そのデータを除外したためである。燃料消費率が増大した原因として、電気量収支が放電側となるデータの取得を意図して試験前のバッテリー SOC を強制的に高めたため、回生エネルギーが減少した可能性が考えられた。そこで、同車両について時系列データを分析し、電気量収支と回生電気量との関係を調査した。結果を図 2.4.1-4 に示す。電気量収支が連続繰り返しモードでの範囲（通常の制御範囲とする）よりも放電側になると、回生電気量は著しく減少していることがわかった。また、図 2.4.1-5 は、図 2.4.1-3 の代表点 3 点 (a, b, c) についてバッテリー電流を時系列で示したものであるが、電気量収支が通常の制御範囲のデータ (b) に比べ、放電側のデータ (c) では減速時に回生せず逆に放電していることがわかる。また、充電側のデータ (a) では、加速時にバッテリーによる正常な補助が得られていないことがわかる。以上の結果から、直線回帰法を適用する場合、電気量収支は適切な範囲で振る必要があり、適切か否かはバッテリー電流の時系列データから判別できることがわかった。

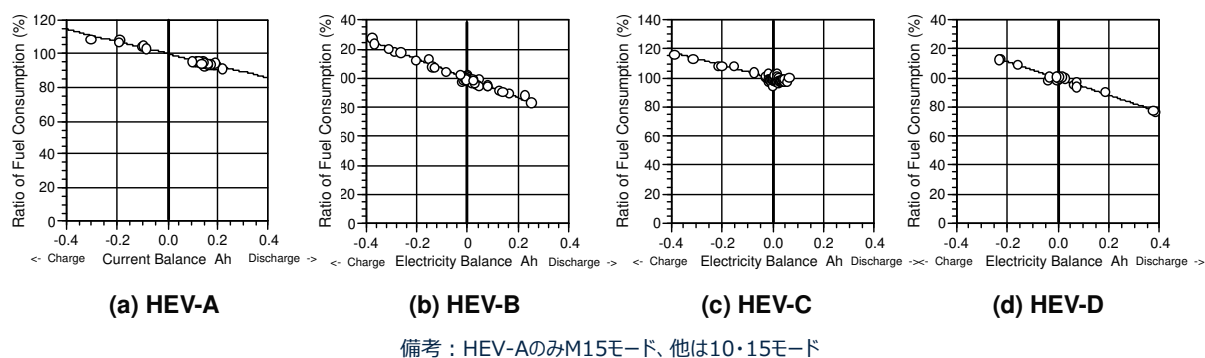


図 2.4.1-2 直線回帰法による燃料消費率計測例

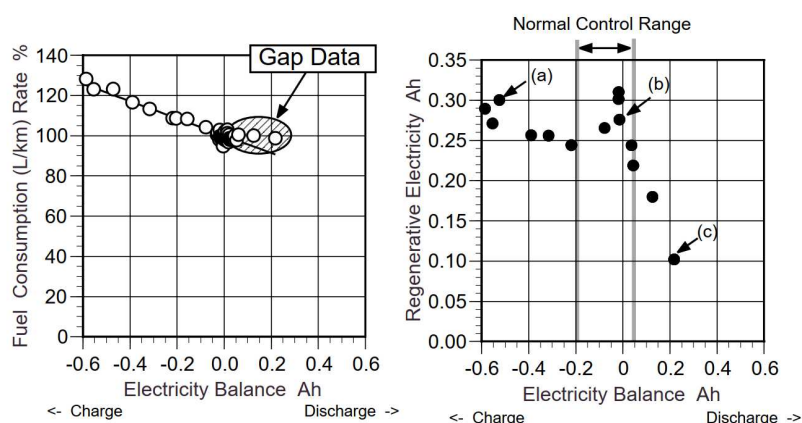


図 2.4.1-3 電気量収支と燃料消費率
(HEV-C, 10・15 モード)

図 2.4.1-4 電気量収支と回生電気量
(HEV-C, 10・15 モード)

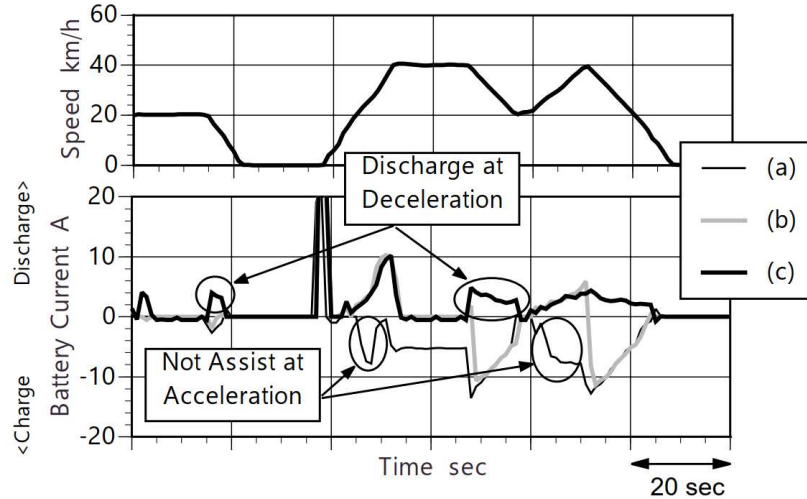


図 2.4.1-5 走行開始時 SOC を振った際のバッテリー制御への影響 (HEV-C, 10・15 モード)

(3) 発電補正法

図 2.4.1-6 は、HEV-A の M15 モードと HEV-B の 10・15 モードについて、電気量収支に対する燃料消費率を発電補正法で補正する前と後で示したものである。補正前の回帰直線が右肩下がりであるのに対し、補正後は右肩上がりとなっていることが分かる。補正後は回帰直線の傾きがゼロとなる状態が正しいため、これは過剰補正となっていることが分かる。補正後燃料消費率の真値からのずれは、今回の試験では-11%~+3%の範囲であった。

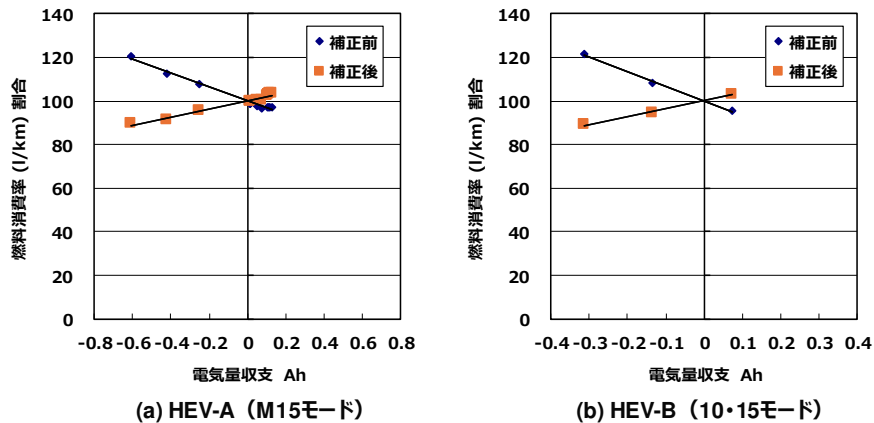


図 2.4.1-6 発電補正法による燃料消費率の補正例

(4) SAE J1711 およびその適用基準

図 2.4.1-7 は、図 2.4.1-2 に示した 10・15 モードにおける電気量収支と燃料消費率との関係 (HEV-B) の右縦軸に、蓄電量差割合を追加したものである。

同図において、SAE J1711 の試験成立基準を適用した際の燃費値の取り得る範囲は次のようにして求めた。まず、蓄電量差割合が±1%となる電気量収支 2 点にそれぞれ垂直線を引く。次に、この垂直線と燃料消費率の回帰直線とが交差した 2 点から平行線を引く。この 2 本の平行線間の幅が SAE J1711 の燃料消費率値の取り得る範囲となる。

ただし、実際にはデータのばらつきがあるため、多数のデータを取得した 10・15 モードについては、回帰直線に対する燃料消費率値の取り得る範囲だけでなく回帰直線±標準偏差 σ に対しても求めた。SAE J1711 の試験成立基準内の燃料消費率値の最大最小差は、車両によって約 6~8% となった。この差は、標準偏差± σ を考慮すると約 9~13%と拡大した。

HFEDS の電気量収支と燃料消費率および蓄電量差割合の関係例を図 2.4.1-8 に示す。SAE J1711 では、車両のプリコンディショニングとして試験前に HFEDS を 1 回走行するため、そのデータ (○印) も試験データ (●印) に加えた。また、連続繰り返しモード試験のデータ (△印) も加えた。同図の条件 A, B, C が、試験前の SOC をそれぞれ通常よりも低下させた場合、特に調整しなかった場合、通常よりも増大させた場合のプリコンディショニング走行時データである。試験前に SOC を大きく振ってもそれがプリコンディショニング走行で吸収され、本番ではほとんどの条件で試験成立基準を満足した。その場合の燃料消費率の最大最小差は、車両によって約 6~8%であった。

UDDS の電気量収支と燃料消費率および蓄電量差割合の関係例を図 2.4.1-9 に示す。同図において、条件 D は試験前の SOC を通常よりも低下させた場合、条件 E, F は特に調整しなかった場合、そして条件 G は通常よりも増大させた場合のデータである。SOC を特に調整しなかった場合は試験が成立した。その場合の燃料消費率の最大最小差は、車両によって約 4~6%であった。

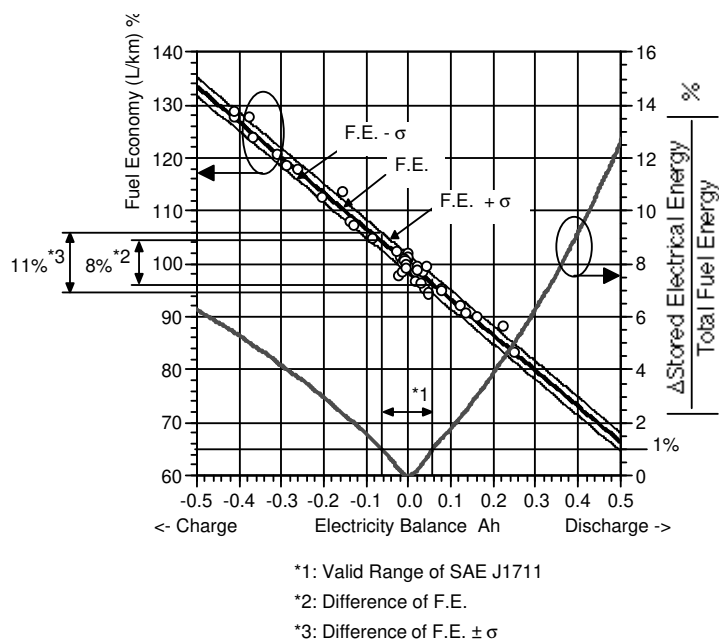


図 2.4.1-7 電気量収支と燃料消費率および蓄電量差割合 (HEV-B, 10・15 モード)

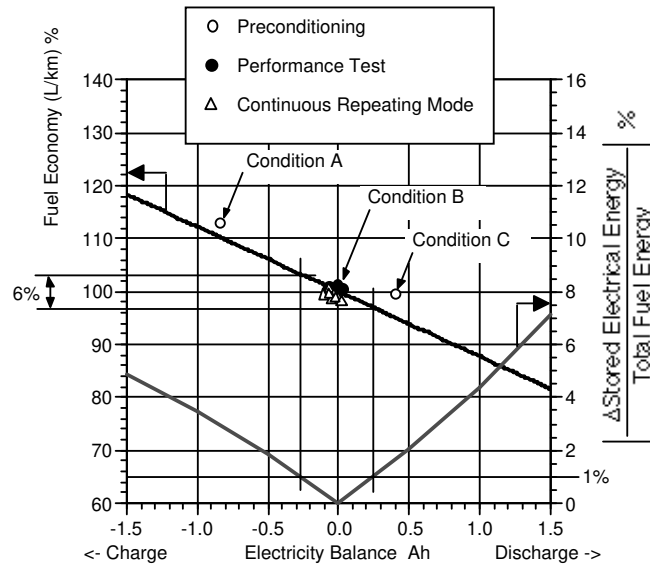


図 2.4.1-8 電気量収支と燃料消費率および蓄電量差割合 (HEV-D, HFEDS)

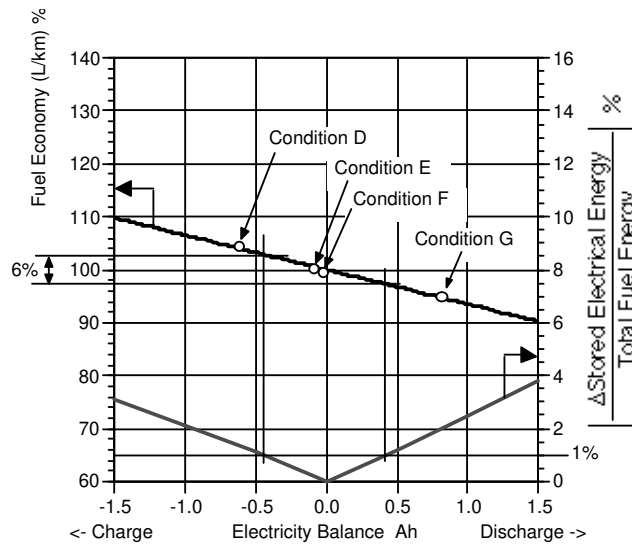


図 2.4.1-9 電気量収支と燃料消費率および蓄電量差割合 (HEV-D, UDDS)

2.4.1.2 四つの評価手法の燃費比較

各評価手法による燃費測定値のまとめを表 2.4.1-1 に示す。直線回帰法による燃費を 100 としてそれに対する割合で示すと、連続繰り返しモード法の燃費は 97～101 の範囲であった。発電補正法は過剰補正となるため、電気量収支が 0Ah から外れるほど補正後燃料消費率も真値から外れる結果となり、今回の試験では 97～112 の範囲でばらついた。SAE J1711 およびその試験成立基準の場合、HFEDS では試験前にプリコンディショニング走行を行うため、試験前の SOC によらずほぼ常に試験成立基準 (±1%以内) の蓄電量差割合を満足した。UDDS および NEDC では、試験前に SOC を意図的に振らなかつた場合は試験が成立し、その場合の燃費は 98～102 の範囲であった。また、試験成立基準内における燃費値の取り得る範囲は、データのばらつき分を除いても最大で 96～104 に及んだ。

表 2.4.1-1 各評価手法で取得した燃費値

M15モード/10・15モード燃費

		HEV-A	HEV-B	HEV-C	HEV-D
連続繰り返しモード法		99	100	101	100
直線回帰法		100	100	100	100
発電補正法		97 - 112	97 - 112	-	-
SAE J1711	取り得る範囲	97 - 103	96 - 104	96 - 104	97 - 103
	実測値	-	-	-	-

HFEDS燃費

		HEV-A	HEV-B	HEV-C	HEV-D
連続繰り返しモード法		-	97	98	100
直線回帰法		-	100	100	100
SAE J1711	取り得る範囲	-	97 - 103	96 - 104	97 - 103
	実測値	-	99	98	99

UDDS燃費

		HEV-A	HEV-B	HEV-C	HEV-D
直線回帰法		-	100	100	100
SAE J1711	取り得る範囲	-	98 - 102	97 - 103	97 - 103
	実測値	-	-	99, 102	100, 100

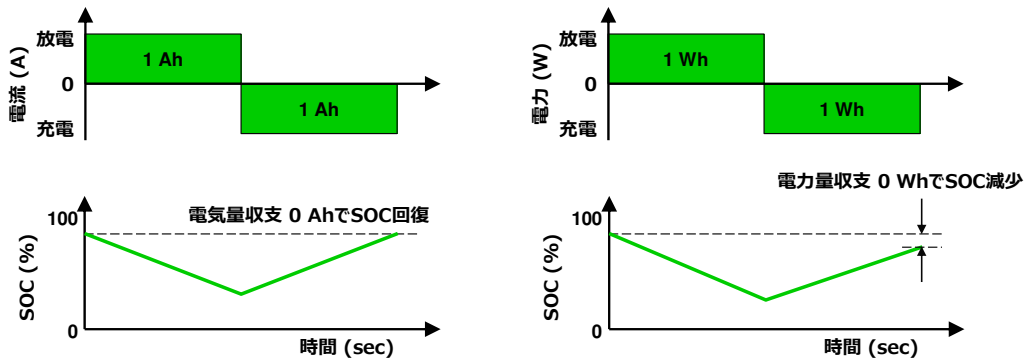
NEDC燃費

		HEV-A	HEV-B	HEV-C	HEV-D
直線回帰法		-	100	100	100
SAE J1711	取り得る範囲	-	97 - 103	97 - 103	97 - 103
	実測値	-	99	101	98

2.4.1.3 電力量収支を用いた直線回帰法

直線回帰法の横軸に電気量収支を用いる理由は、バッテリーのクーロン効率がほぼ 100 %であることから、電気量収支 0 Ah にて SOC 一致と見なせるためである (図 2.4.1-10(a)). 電気量収支に替えて電力量収支を用いた場合、バッテリーのワットアワー効率が 100 %ではないことから、電力量収支 0 Wh は SOC 減少となる (図 2.4.1-10 (b)). しかし、縦軸を燃料消費率 (燃料のエネルギー) としていることから、ディメンションを合わせる意味では横軸は電力量収支が正しい。そこで、横軸に電気量収支を用いた場合と電力量収支を用いた場合の燃料消費率を比較した。

HEV-A, B, C の 10・15 モード燃費を図 2.4.1-11 に示す。電気量収支で補正した燃費を 1.000 とすると、電力量収支で補正した燃費は 1.007~1.018 となり、過大評価となる事が分かった。ニッケル水素 (NiMH) 電池を搭載した HEV-B と HEV-C で比較すると、電気駆動比率の大きい HEV-B の方が、より過大評価となった。また、電気駆動比率がどちらも大きい HEV-B と HEV-D を比較すると、リチウムイオン電池を搭載した HEV-D の方が電力量収支で補正した場合の差が小さかった。これは、ニッケル水素電池よりもリチウムイオン電池の方が高いワットアワー効率 (図 2.4.1-12) [92] を有するためと考えられる。



(a) 電気量収支 0 Ah (b) 電力量収支 0 Wh

図 2.4.1-10 電気量収支と電力量収支の比較イメージ

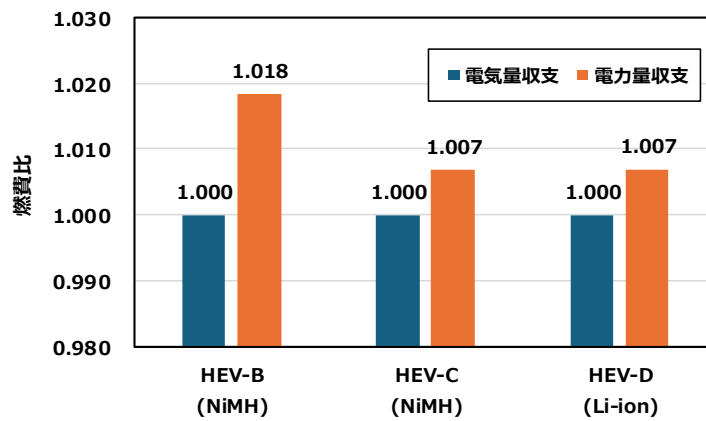


図 2.4.1-11 直線回帰法に電気量収支と電力量収支を用いた場合の燃費の比較 (10・15 モード)

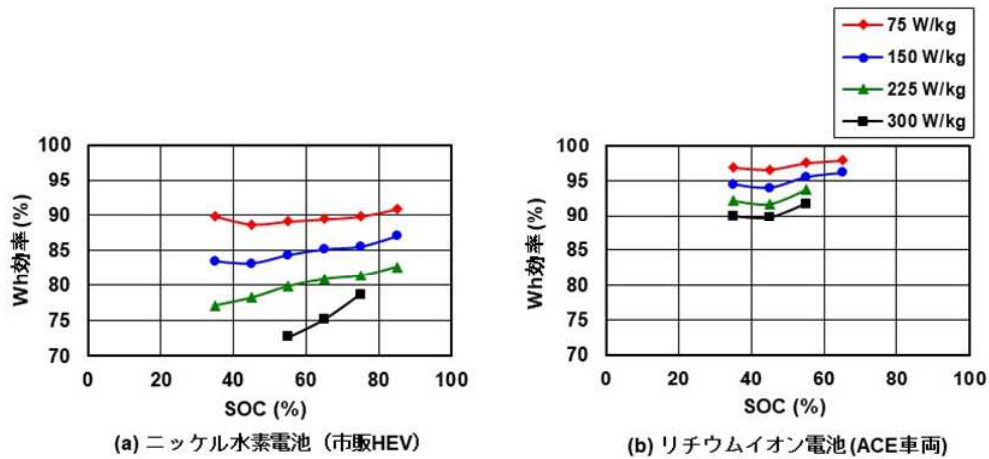


図 2.4.1-12 ニッケル水素電池とリチウムイオン電池のワットアワー効率の例 [92]

2.4.1.4 直線回帰法のキャパシタ HEV への適用

電気量収支を用いて直線回帰する手法は、測定対象が RESS にバッテリーを使用した HEV で、SOC が変化しても電圧の変化が少ない場合のみ、電気量収支が Δ SOC すなわちエネルギー変化を代表し有効となる。しかし、RESS としてはバッテリー以外にも種々のものが開発されており、大電力で充放電可能なため HEV に適しているとされるキャパシタの開発例がある。キャパシタ

は SOC 変化による電圧変動が大きいいため、放電あるいは充電の電流量が同じ場合でも、放電あるいは充電のエネルギーは SOC が高いほど大きくなる。そのため、従来のように電流量収支で Δ SOC を代表した場合、原理的にはばらつきが生じると予想される。

このばらつきを抑えるには、電流量収支 (Ah) ではなく電力量収支 (Wh) で Δ SOC を代表させる方法が考えられるが、その場合は前述のとおり充放電の損失が無視できないため充放電効率の補正が必要になり、現実的には困難である。そこで、キャパシタに蓄えられるエネルギーが式 (2-3) で表されることから、試験前後のキャパシタの開放電圧を測定することにより、式 (2-4) によって Δ SOC を求めることが有効と考えられる。

$$E = 0.5 \cdot CV^2 \quad (2-3)$$

ここで、

E : キャパシタに蓄えられるエネルギー (J)

C : キャパシタの静電容量 (F)

V : キャパシタの開放電圧 (V)

$$\Delta SOC = 0.5 \cdot C (V_i^2 - V_f^2) \quad (2-4)$$

ここで、

V_i : 試験開始時の開放電圧 (V)

V_f : 試験終了時の開放電圧 (V)

ここでは、試験前後の開放電圧から Δ SOC を補正する手法と、電流量収支で Δ SOC を補正する従来の手法の 2 種を用い、キャパシタハイブリッドバス (ACE-B2) のエネルギー消費率を求めた。その結果を図 2.4.1-13 に示す。電流量収支を利用した場合 (同図 (b)) も開放電圧を利用した場合 (同図 (a)) と同等の相関が得られた。エネルギー消費率もこの例では 0.1% 以内の差であり、同等の結果が得られた。電流量収支を利用してもばらつきが特に大きくならなかった原因として、供試車両の M15 モードにおける SOC 使用範囲が概ね 60%~80% と狭く、電圧の変動が大きくなかったことが考えられる。

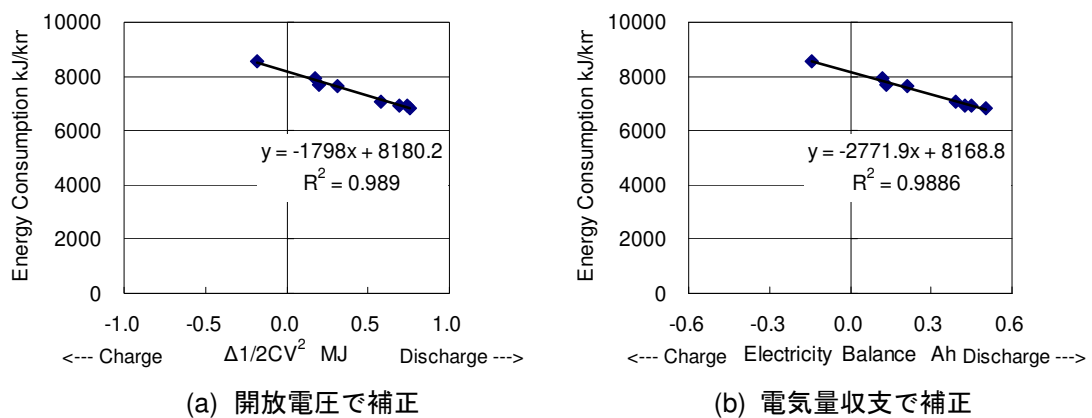


図 2.4.1-13 キャパシタハイブリッドバスへの直線回帰法の適用例 (ACE-B2, M15 モード)

2.4.1.5 蓄電量差割合の燃費への影響度検討

本研究において、式 (1-7) に示した SAE J1711 の試験成立基準 (1%以内) を満たした際の燃費の取り得る幅は、±3%～±4%であった。この理由について考察する。式 (1-7) において、左辺は分子が蓄電量差、分母が消費燃料のエネルギーであるが、これは燃料から発電して RESS を充電するまでの効率と同義となる。したがって、式 (1-7) を満たした時の燃費の取り得る幅は、エンジン (ICE) の効率、発電機の効率、RESS の充電効率によっても変化する。そこで、ここでは次の三つのケースを想定し、燃費の変動幅を予測した。

- a) HEV 最低ケース：ガソリンエンジン熱効率 0.3, 発電機効率 0.9, RESS 充電効率 0.9
- b) HEV 最高ケース：ディーゼルエンジン熱効率 0.45, 発電機効率 0.95, RESS 充電効率 0.95
- c) FCV 最高ケース：FC システム効率 0.6, RESS 充電効率 0.95

予測結果を表 2.4.1-2 に示す。今回の試験結果は、a) HEV 最低ケースに近いことが分かる。また、今後エンジン、発電機、RESS の効率が上がるにつれて、あるいは高効率の FC システムを採用したケースでは、同じ試験成立基準内でも燃費の取り得る幅は±2%程度まで減少することが分かった。これは、システムの効率によって試験成立時の燃費の取り得る幅が異なってくるという事であり、検討の余地があると思われる。

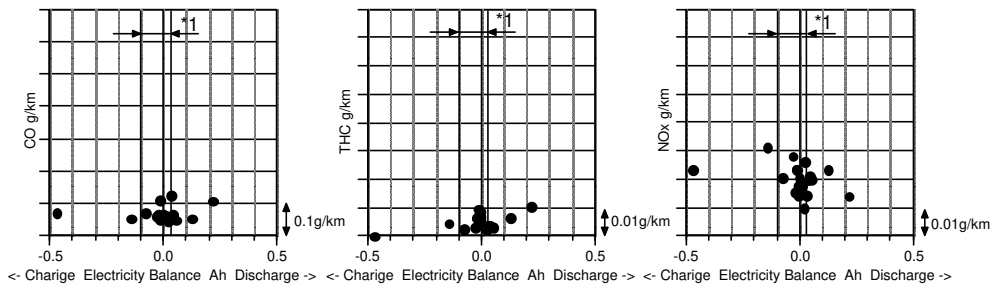
表 2.4.1-2 蓄電量差 1%の燃料消費率への影響

	ICE/FC 効率	発電機 効率	RESS 充電効率	燃料からの RESS充電効率	蓄電量差1%の燃料 消費率への影響度 (%)
a) HEV最低ケース	0.30	0.90	0.90	0.24	4.1
b) HEV最高ケース	0.45	0.95	0.95	0.41	2.5
c) FCV最高ケース	0.60	—	0.95	0.57	1.8

2.4.1.6 充放電収支が排出ガスに及ぼす影響

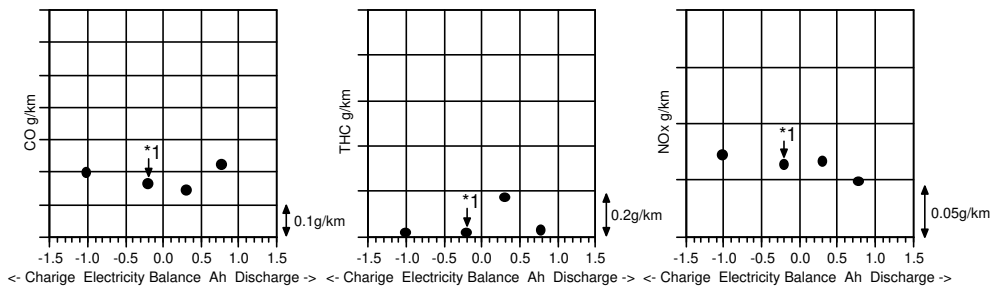
ΔSOC が排出ガスに及ぼす影響の例として、10-15 モードおよび UDDS における HEV-C の電気量収支と排出ガスとの関係をそれぞれ図 2.4.1-14 および図 2.4.1-15 に示す。排出ガスはばらつきが大きく ΔSOC との相関性が低かった。また、ΔSOC が通常の制御範囲 (連続繰り返しモード試験あるいは試験前に SOC を意図的に変化させなかった場合の制御範囲) を超えた際に増加傾向となる場合があったが、超えない場合はコールドおよびホットモードによらず大きな変化が見られなかった。これは、ガソリンエンジンの排出ガスは、ΔSOC の影響よりも三元触媒のウィンドウ[93]を維持できるか否かによる影響の方が大きいためと考えられる。

一方ディーゼルエンジンを搭載した HEV-E の場合、THC, NOx および PM の排出率は、図 2.4.1-16 に示すとおり電気量収支と明らかに相関性が見られた。



*1 Control Range for the Continuous Repeating Mode

図 2.4.1-14 電気量収支と排出ガス (HEV-C, 10·15 モード)



*1 Data when the SOC was not specially adjusted before the test

図 2.4.1-15 電気量収支と排出ガス (HEV-C, UDDS)

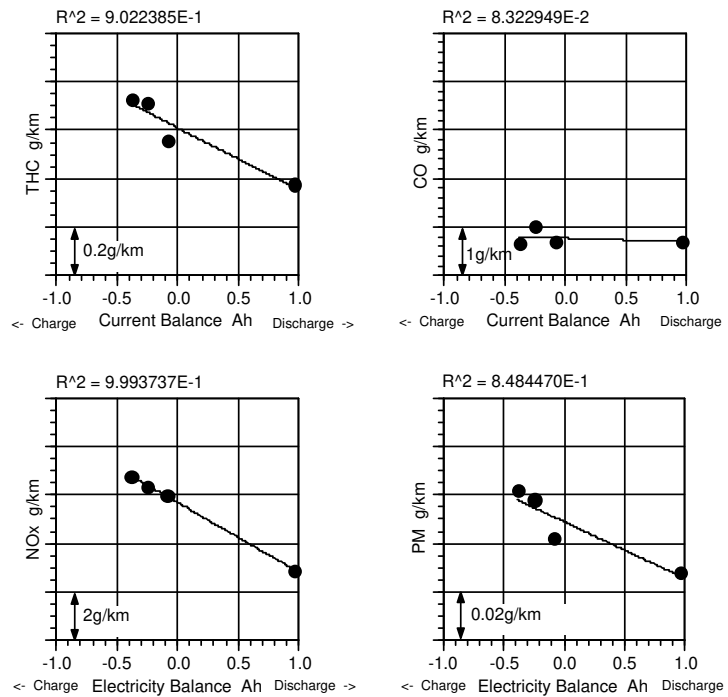


図 2.4.1-16 電気量収支と排出ガス (HEV-E, M15 モード)

2.4.1.7 まとめ

HEV の Δ SOC の影響を補正する燃費・排出ガス評価手法として、直線回帰法の有効性を検証し、以下の知見を得た。

- 連続繰り返しモード法：ドライビングサイクルを連続して 10 回程度繰り返し走行することで、全体の電気量収支は収束した。積算される燃料消費量 (l) が増大することもあり、 Δ SOC の影響を無視できる燃費を計測可能であった。この連続繰り返しモード法で取得した燃費をリファレンスとした。
- 直線回帰法：燃料消費率 (l/km) は、ホット/コールドのドライビングサイクルによらず、電気量収支に対して直線回帰が可能であった。クーロン効率を 100 % と仮定して電気量収支 0 Ah 点を Δ SOC ゼロ点とすると、得られた燃費 (km/l) はリファレンスに対して 100/101 (0.99 倍)~100/97 (1.03 倍) の範囲であった。
- 発電補正法：停車発電の補正係数を用いると過剰補正となった。補正後燃費は、直線回帰法の燃費に対し 0.97 倍~1.12 倍の範囲であった。
- SAE J1711:UDDS や HFEDS 等の燃料消費量が多いドライビングサイクルで試験前に SOC を意図的に振らなかった場合、容易に試験成立基準 (蓄電差割合 ≤ 1 %) を満足した。試験成立基準を満たした際の燃費の取り得る範囲は、試験のばらつき分を除いても直線回帰法の燃費に対し 0.96 倍~1.04 倍と大きくなった。
- 排出ガス：ガソリン HEV の排出ガスは、 Δ SOC が通常の制御範囲内の場合、ホット/コールドのモードによらず電気量収支の影響は明確には見られなかった。一方ディーゼル HEV の排出ガスは電気量収支と明らかな相関がみられた。

2.4.2 路上とシャシダイナモメータ上の回生エネルギーの相違の補正手法

2.4.2.1 M15 モードでの比較

HEV-A を供試し、M15 モードの三つの減速パターンにおける回生電気量を実路上と C/D 上で 6 回ずつ計測した (図 2.4.2-1)。実路上と C/D 上の差は、減速 1 では 0.009 Ah あったが、M15 モード全体では $((0.029+0.123+0.164) - (0.038+0.117+0.160)) \times 3 = 0.003$ Ah となり、微小であることが確認できた。

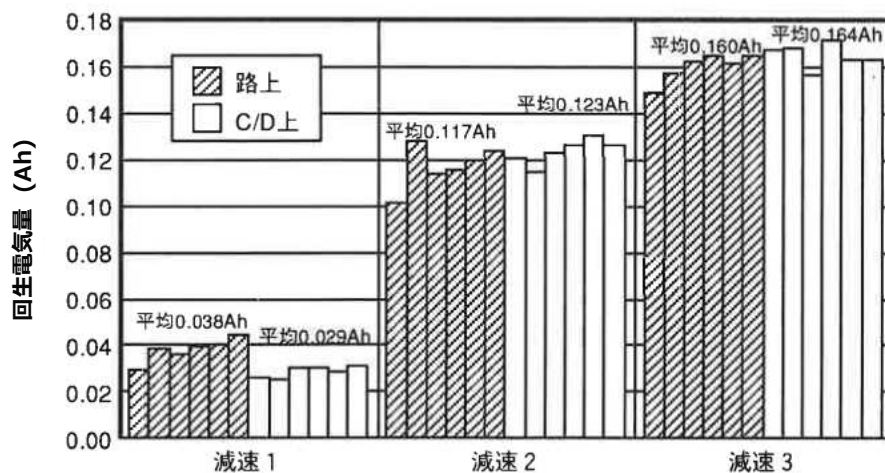


図 2.4.2-1 M15 モードにおける実路上と C/D 上の回生電気量 (HEV-A)

2.4.2.2 10・15モードでの比較

HEV-BとHEV-Cを用い、10・15モードの六つの減速パターンにおける回生電気量を実路上とC/D上で計測した。図2.4.1-2は、HEV-Bについて実路上とC/D上で計測した回生電気量を単純に計測順に並べたものである。各計測値はばらつきが大きいものの、実路上とC/D上で明らかな相違は見られなかった。図2.4.2-3はHEV-Cの計測値で、回生電気量はバッテリーSOCによっても変化すると考えられることから、バッテリーを放電させてエンジン発電機が作動し始めた瞬間からの電気量収支を横軸に取った。つまり、0 Ah点が制御範囲における最低SOCであり、左側に行くほどSOCが高くなる。縦軸は回生電気量で、○が実路上、●がC/D上のデータである。電力量(Wh)ではなく電気量(Ah)であるためエネルギーの単位ではないが、同一のSOCすなわち横軸が同じ点ではバッテリー開放電圧も等しくなることから、回生電気量の大小で回生エネルギーの相違を判別できる。同図において、Decel. 2の一点だけばらついたデータ(何らかのバッテリーマネジメントが作動したと思われる)を除けば、同じ横軸上(同一SOC上)では実路上とC/D上の回生電気量に差が無いことが分かった。

2.4.2.3 高速・高減速度パターンでの比較

HEV-BとHEV-Cを用い、高速・高減速度パターン(100 km/hから0 km/hまで減速)における回生電気量を実路上とC/D上で計測した。図2.4.2-4において、HEV-Bでは、0.10 gで2点だけばらついたデータを計測したが(上記と同様バッテリーマネジメントが作動したと思われる)、それを除くと実路上の方がC/D上よりも0.01~0.02 Ahほど回生電気量が大きかった。0.15 gにおいては、実路上よりもC/D上の方が約0.02 Ah大きな回生電気量を記録した。0.20 gにおいては、実路上とC/D上でほぼ同等の回生電気量であった。HEV-Cでは、0.10 g、0.15 g、0.20 g共に、実路上とC/D上で有意な差が見られなかった。

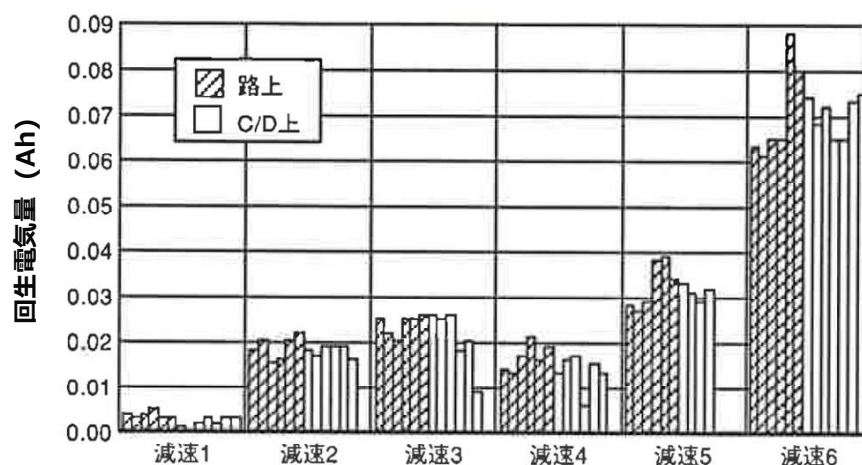


図 2.4.2-2 10・15モードにおける実路上とC/D上の回生電気量 (HEV-B)

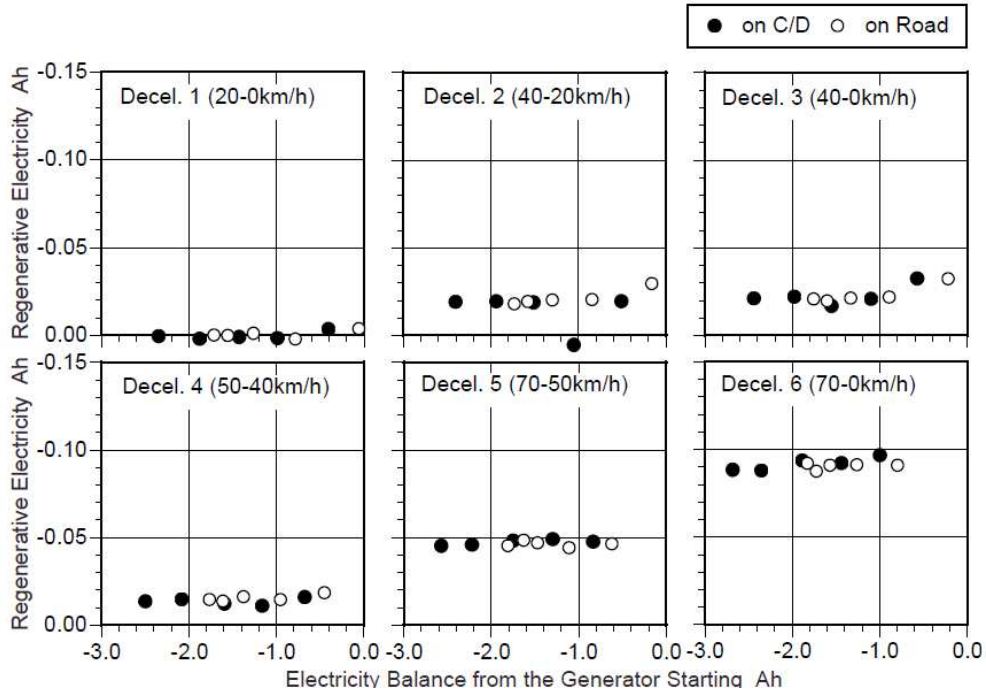
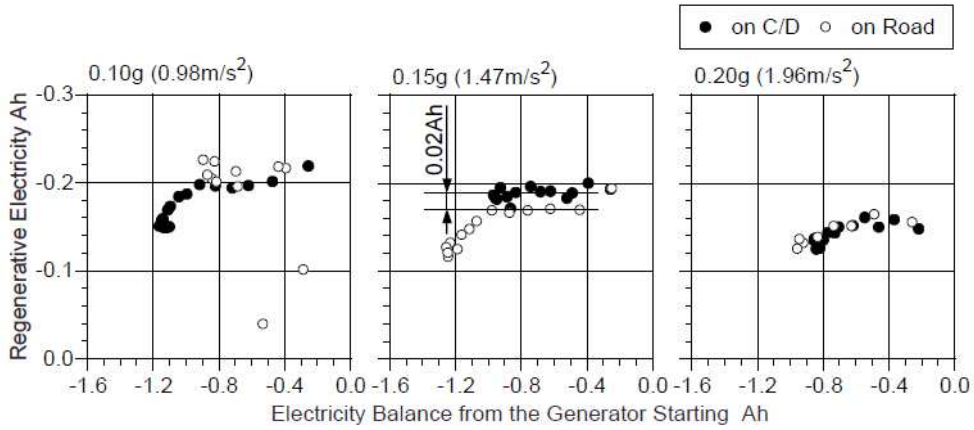
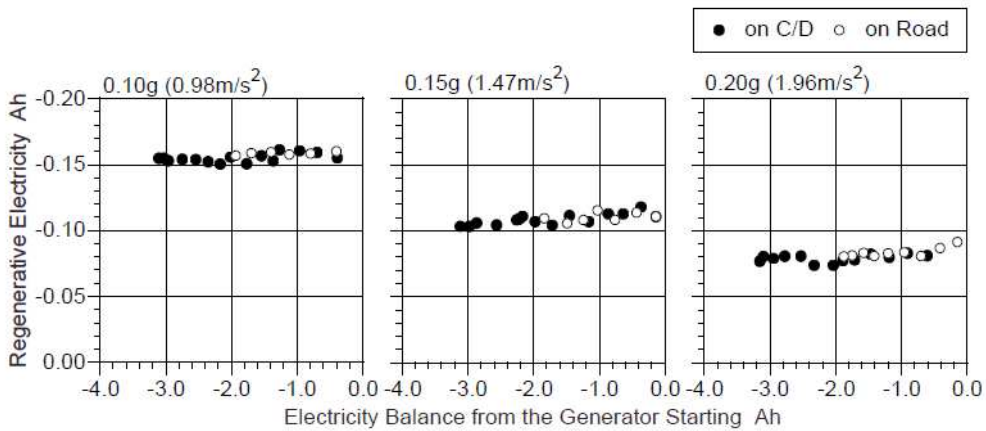


図 2.4.2-3 10・15 モードにおける実路上と C/D 上の回生電気量 (HEV-C)



(a) HEV-B



(b) HEV-C

図 2.4.2-4 高速・高減速度パターンにおける実路上と C/D 上の回生電気量

2.4.2.4 回生エネルギーの相違の燃費影響度の検討

HEV-B の実路上と C/D 上の回生電気量の差が高速・高減速度パターンで最大 0.02 Ah 生じたことから、この差が燃費に対してどの程度影響を及ぼすのか、10・15 モードにおける電気量収支に対する燃料消費率の回帰直線の傾きから推測した。式 (2-1) より、回生電気量の差がそのまま電気量収支の差になることから、0.02 Ah は燃料消費率に 2% 弱の影響度となった (図 2.4.2-5)。

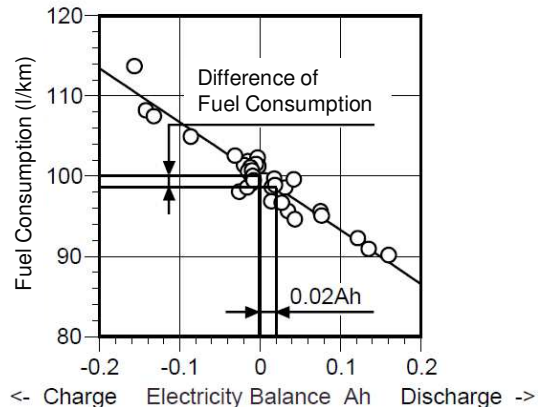


図 2.4.2-5 実路上と C/D 上の回生電気量の相違が燃料消費率に及ぼす影響 (Vehicle A, 10・15 モード)

2.4.2.5 実路上と C/D 上の燃費の比較

実路上と C/D 上の回生エネルギーの相違による燃費への影響の最終確認として、HEV-A と HEV-B を用い、それぞれ M15 モードと 10・15 モードにおいて、実路上と C/D 上の燃費を連続繰り返しモード法にて計測・比較した。C/D 試験においては、室温と湿度並びに転がり抵抗と空気抵抗に関わる係数を試験法に定められた範囲内に設定した上で計測するため、ばらつきの少ないデータを取得できるが、実路試験においては、試験を行う季節や時間帯によって気温、湿度、風速および大気圧が大きく変動し、転がり抵抗と空気抵抗に影響を及ぼす。

- 転がり抵抗：気温低下に従って増加
- 空気抵抗：気温低下、湿度低下および大気圧増加に従って空気密度が増加するため空気抵抗も増加する。また、風速が増えるに従い増加する。

また、内燃エンジンの熱効率は、気温の上昇に従って比熱比が減少するため低下するが、一方でポンピング損失が減少するため向上する傾向となる。総合的には、気温低下による転がり抵抗と空気抵抗の増加、そして風による空気抵抗増加の影響が大きいと考えられる。

HEV-A の実路試験は冬季に実施したため、気温 8～12 °C、風速 4～8 m/s のあまり良好とは言えない条件下での計測となった。一方 C/D には、別の日に気温 6 °C、進行方向と平行成分の風速 0 m/s で計測した転がり抵抗と空気抵抗を、TRIAS 23-4-1991 に従い気温 20 °C に補正した上で設定した。結果、実路の燃費を 1.00 とすると C/D 上の燃費は 1.12 となり、大きな差が生じた (図 2.4.2-6)。気温 20 °C に補正前の転がり抵抗は 13.7%、空気抵抗は 5.2% 大きいことから、これが主因と考えられた (表 2.4.2-1)。そこで、補正前の値を C/D に設定し燃費を計測した結果、実路

の 1.00 に対し 1.05 まで近づいた。それでもなお実路の燃費が低い要因としては、次の 3 点が考えられる。

- 高速周回路コーナー部（半径 400 m）での転がり抵抗増加
- 風による空気抵抗増加
- 修正舵によるタイヤのスリップ角増大とパワーステアリングポンプによる損失

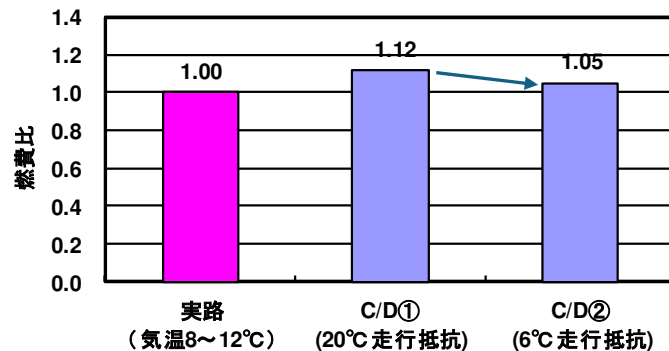


図 2.4.2-6 実路上と C/D 上の燃費比較 (HEV-A, M15 モード)

表 2.4.2-1 20℃相当への補正後と 6℃での実測値の走行抵抗 (HEV-A)

		20℃	6℃	増加率
転がり抵抗に相当する値	kgf	35.19	40.01	13.7%
空気抵抗係数に相当する値	Kgf/(km/h) ²	0.01247	0.01312	5.2%

HEV-B については実路試験を 2 回実施したが、最初の試験は冬季であったため、C/D より 7% 低い燃費が計測された (図 2.4.2-7)。この時の気象は、定量的なデータが残っていないが、気温が低く数 m/s の風が吹く条件であった。そこで、春季になって理想に近い気象条件下 (表 2.4.2-2, C/D 試験室の設定温度 25℃に近い気温 27℃, 風速 0.5 m/s) で再度実路試験を行った。結果、連続繰り返しモード法の燃費 (km/l) は、C/D より 2% だけ低い値が得られた (図 2.4.2-7)。実路試験では、高速周回路コーナー部 (半径 400 m) 走行による転がり抵抗増加や風 (0.5 m/s) による空気抵抗増加など燃費低下要因が存在したことを考慮すると、回生エネルギーの相違による燃費への影響は、今回の供試車両では無視できるレベルと考えられる。

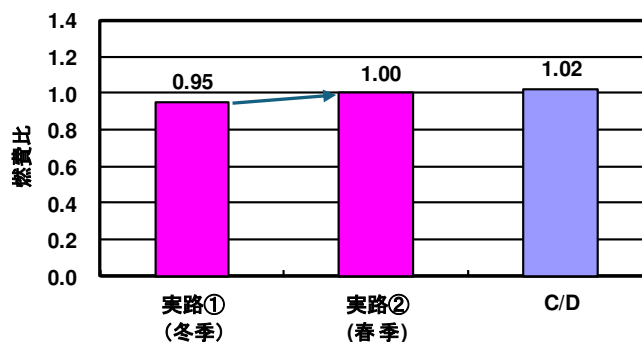


図 2.4.2-7 実路上と C/D 上の燃費比較 (HEV-B, 10・15 モード)

表 2.4.2-2 実路試験と C/D 試験の大気条件 (HEV-B)

		実路①	実路②	C/D
季節		冬季	春季	—
風速	m/s	—	0.5	—
大気圧	hPa	—	1013	1004
気温	°C	—	27	25
湿度	%	—	63	55

2.4.2.6 まとめ

実路上と C/D 上において回生電気量と燃費を実測し、回生エネルギーの相違とその燃費への影響度を明らかにした。

- 減速度の小さい M15 モードと 10・15 モードの回生電気量は、実路上と C/D 上で大きな差が見られなかった。
- 10・15 モードより高速・高減速度条件 (100 km/h から 0 km/h まで最大 0.20 g で減速条件) では、C/D 上の回生電気量が実路上よりも約 0.02 Ah 大きいケースが存在した。この 0.02 Ah の燃料消費率への影響度は 2 %弱程度と推察された。
- マイクロバスの M15 モード燃費 (km/l) は実路上を 1.00 とすると C/D 上が 1.05、乗用車の 10・15 モード燃費 (km/l) は実路上を 1.00 とすると C/D 上が 1.02 となった。実路試験では、高速周回路コーナー部 (半径 400 m) 走行による転がり抵抗増加や風による空気抵抗増加、修正舵によるタイヤのスリップ角増大とパワーステアリングポンプによる損失など燃費低下要因が存在したことから、回生エネルギーの相違による燃費への影響は、今回の供試車両では無視できるレベルと考えられる。

2.5 第 2 章のまとめ

車両ベース評価法について LD-HEV を中心に一部 HD-HEV を供試して検討した。得られた成果を以下にまとめる。

(1) HEV の Δ SOC 補正手法

- 連続繰り返しモード法：ドライビングサイクルを連続して 10 回程度繰り返し走行することで、全体の電気量収支は収束した。積算される燃料消費量 (l) が増大することもあり、 Δ SOC の影響を無視できる燃費を計測可能であった。この連続繰り返しモード法で取得した燃費をリファレンスとした。
- 直線回帰法：燃料消費率 (l/km) は、ホット/コールドのドライビングサイクルによらず、電気量収支に対して直線回帰が可能であった。クーロン効率を 100 % と仮定して電気量収支 0 Ah 点を Δ SOC ゼロ点とすると、得られた燃費 (km/l) はリファレンスに対して 100/101 (0.99 倍)~100/97 (1.03 倍) となり、その有効性が確認できた。
- 発電補正法：停車発電の補正係数を用いると過剰補正となった。補正後燃費は直線回帰法の燃費に対し 0.97 倍~1.12 倍となり、あまり有効とは言えない結果となった。

- SAE J1711:UDDS や HFEDS 等の燃料消費量が多いドライビングサイクルで試験前に SOC を意図的に振らなかった場合、容易に試験成立基準（蓄電量差割合 $\leq 1\%$ ）を満足した。試験成立基準を満たした際の燃費の取り得る範囲は、試験のばらつき分を除いても直線回帰法の燃費に対し 0.96 倍～1.04 % 倍と大きくなった。
- 排出ガス：ガソリン HEV の排出ガスは、 Δ SOC が通常の制御範囲内の場合、ホット/コールドのモードによらず電気量収支の影響は明確には見られなかった。一方ディーゼル HEV の排出ガスは電気量収支と明らかな相関が観られた。

(2) 実路上と C/D 上の回生エネルギーの相違とその燃費への影響度

- 減速度の小さい M15 モードと 10・15 モードの回生電気量は、実路上と C/D 上で大きな差が見られなかった。
- 10・15 モードより高速・高減速度条件（100 km/h から 0 km/h まで最大 0.20 g で減速条件）では、C/D 上の回生電気量が実路上よりも約 0.02 Ah 大きくケースが存在した。この 0.02 Ah の燃料消費率への影響度は 2 %弱程度と推察された。
- マイクロバスの M15 モード燃費 (km/l) は実路上を 1.00 とすると C/D 上が 1.05、乗用車の 10・15 モード燃費 (km/l) は実路上を 1.00 とすると C/D 上が 1.02 となった。実路試験では、高速周回路コーナー部（半径 400 m）走行による転がり抵抗増加や風による空気抵抗増加、修正舵によるタイヤのスリップ角増大とパワーステアリングポンプによる損失など燃費低下要因が存在したことから、回生エネルギーの相違による燃費への影響は、今回の供試車両では無視できるレベルと考えられる。

第 3 章

HILS 法の確立

3.1 はじめに

第 1 章で述べたとおり，HEV の燃費・排出ガスを正しく評価するためにはハイブリッド ECU の制御ロジックを反映する必要がある，具体的にはシステムベンチ法と HILS 法の 2 種が候補となる．しかし，システムベンチ法においては，(a) 通常のエンジン単体試験と異なり，正側だけでなく負側も目標トルクに沿うように制御できる E/D が必要，(b) 多様な仕様が存在する場合も全て実測となるため試験コストが高い，(c) システム出力軸が後輪だけでなく前輪にもあるなど複雑なシステムには対応困難，といった課題がある．一方 HILS 法は，模擬走行の精度が HEV モデルの構造や HEV モデルに入力する各要素特性データの取得精度によって左右されるものの，(a) エンジン単体を E/D 上で運転する部分は HD-ICEV と全く同じ実測形態となるため，一般的な E/D を利用可能，(b) HEV の仕様が多数ある場合でも燃費は HILS で算出できるためコストを抑えることが可能，(c) 複雑なシステム構成の HEV にも HEV モデルの構成を変更することで対応可能，といった利点がある．HILS 法が模擬走行の精度，試験コスト，汎用性の面で高いポテンシャルを有することから，本研究では，その模擬走行の精度を実証した上で評価手法としての確立を目指した．

3.2 HILS の構築

3.2.1 供試 HEV

HILS 法を国の認証試験として提案するためには，HILS 模擬走行の精度が異なる方式の HEV にも対応可能との普遍性を示す必要がある．そこで，システム構成と主要諸元をそれぞれ図 3.2.1-1 並びに表 3.2.1-1 に示すシリーズ HEV (GVW 16 トンクラス的大型バス，自然吸気 6 気筒ディーゼルエンジン，リチウムイオン電池搭載，減速比固定，SOC 一定管理型制御で，エンジン GE は，SOC が低下すると一定の回転速度・トルクで運転) と，システム構成と主要諸元をそれぞれ図 3.2.1-2 並びに表 3.2.1-2 に示すパラレル HEV (GVW 8 トンクラスの配送トラック，自然吸気 6 気筒ディーゼルエンジン，キャパシタ，機械式自動変速機 (AMT) 搭載) の 2 車種を供試した．前者は，図 2.4.1-16 に排出ガスを示した車両と同一である．

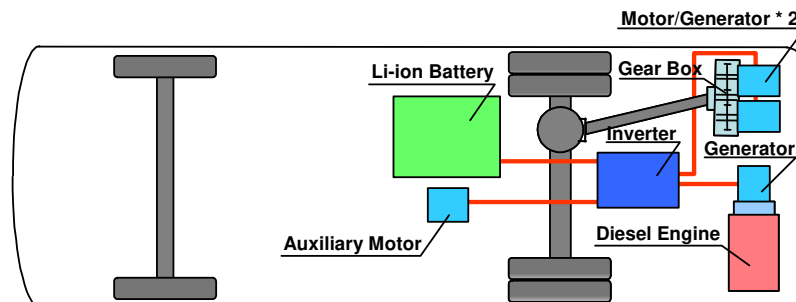


図 3.2.1-1 供試シリーズ HEV のシステム構成

表 3.2.1-1 供試シリーズ HEV の主要諸元

Hybrid Type		Series	
Body	Vehicle Mass	kg	11,775
	Total Vehicle Mass	kg	15,515
	Vehicle Mass at Test	kg	13,645
Fuel		Light Oil	
Engine	Engine Type	Compression Ignition	
	Displacement	cc	8,201
	Cylinder	6	
	Intake	Natural Aspiration	
	Fuel Injection Pump	In-line Type	
	Max. Power	kW/rpm	147/2,900
	Max. Torque	Nm/rpm	539/1,700
Transmission		Single Speed	
MG	Type	Induction	
	Quantity	2	
	Rated Power	kW/rpm	67/5,000
	Max. Torque	Nm/rpm	360/4,000
GE	Type	PM Synchronous	
	Rated Power	kW/rpm	40/1,400
RESS	Type	Li-ion Battery	
	Quantity	170	
	Capacity	24Ah	
	Total Voltage	V	612

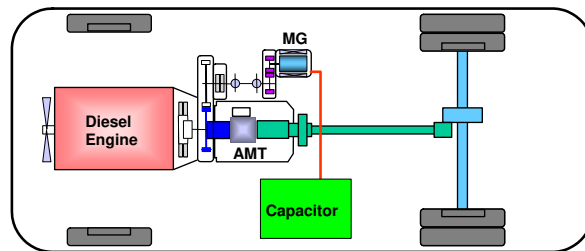


図 3.2.1-2 供試パラレル HEV のシステム構成

表 3.2.1-2 供試パラレル HEV の主要諸元

Hybrid Type		Parallel	
Mass	Vehicle Mass	[kg]	4,580
	Max. Loading Mass	[kg]	3,300
	Total Vehicle Mass	[kg]	7,990
	Vehicle Mass at Test	[kg]	6,300
Engine	Type	Diesel, 6 Cylinder, NA	
	Max. Power	[kW/rpm]	152/3,000
	Max. Torque	[Nm/rpm]	500/1,400
TM	Type	Mechanical Automatic	
MG	Type	PM Synchronous	
	Max. Power	[kW/rpm]	55/4,060~9,000
	Max. Torque	[Nm/rpm]	130/0~4,060
RESS	Type	Electric Double Layer Capacitor	
	Capacitance	[F]	36
	Max. Voltage	[V]	346

3.2.2 HILS 構築方法

HILS は、シリーズ HEV、パラレル HEV 共に実 ECU としてハイブリッド ECU とエンジン ECU を使い、デジタルシグナルプロセッサ (DSP) との間でインターフェース (I/F) を構築した (図 3.2.2-1 および図 3.2.2-2)。HILS の外観写真とシステム構成をそれぞれ図 3.2.2-3 (a), (b) に示す。DSP (表 3.2.2-1) 内では、ドライバモデルが基準車速に追従するようアクセルおよびブレーキの操作を行い、その操作信号が実 ECU に入力される。HEV モデルは、実 ECU から制御信号を受けて、実機の各要素と同じ動作を行うと共に制御信号を返す。

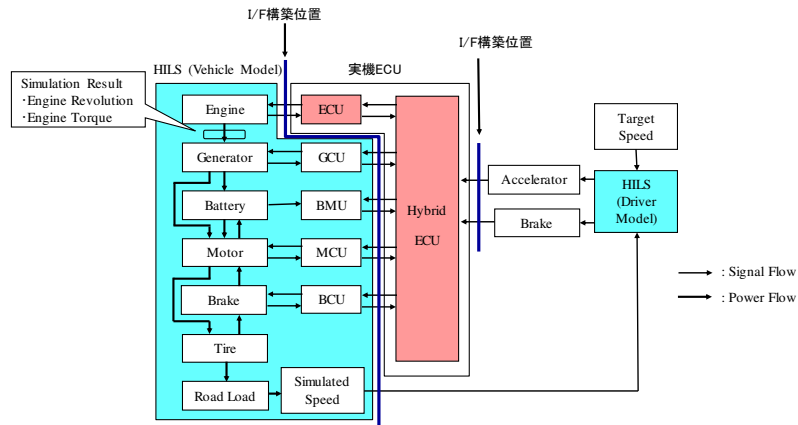


図 3.2.2-1 HILS 構築時の使用 ECU と I/F 位置 (シリーズ HEV)

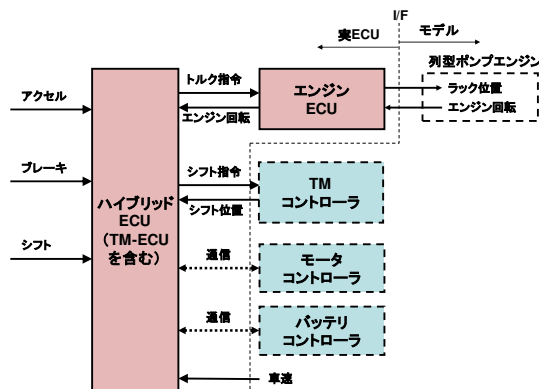
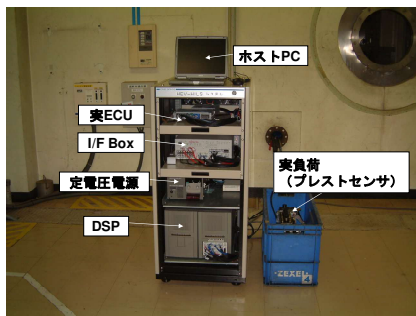
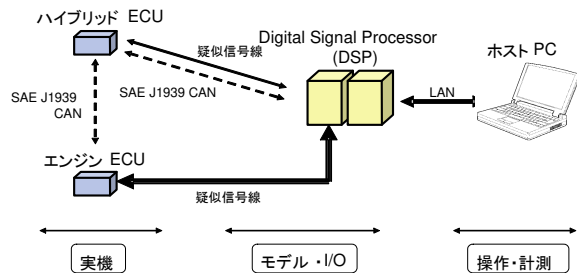


図 3.2.2-2 HILS 構築時の使用 ECU と I/F 位置 (パラレル HEV)



(a) HILS システム概観



(b) HILS システム構成概要

図 3.2.2-3 HILS システム

表 3.2.2-1 HILS システムの DSP の仕様

Manufacturer	FUJITSU TEN
CPU board	Pentium4 2GHz, 256MB memory equipped
CAN board	2ch
ADIO board	12bit, 32ch
CORE board	FPGA equipped, DIO 56ch
Quantity	2node
OS	RT-Linux

3.2.3 HEV モデル

HEV モデルは、車両、MG、減速機、終減速機、バッテリーあるいはキャパシタ、エンジン、GE などの各要素モデルから構成され、エンジンモデルの例(図 3.2.3-1)のように MATLAB/Simulink を用いて作成した。各要素についてトルク、燃費、効率などのマップや慣性モーメントをパラメータとして入力することにより、それらの性能を表現することができる。計算ステップは $500 \mu s$ である。

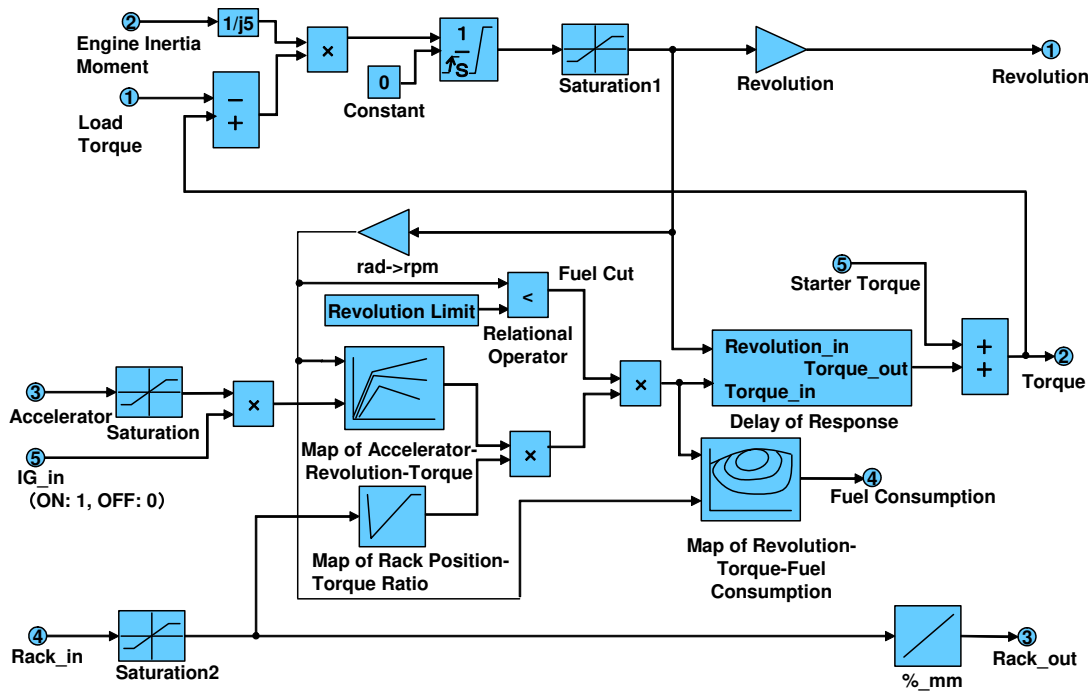


図 3.2.3-1 MATLAB/Simulink によるモデル例 (エンジンモデル)

(1) 車両モデル

平坦路を一定速度で走行する際の走行抵抗 R_r および加速抵抗 R_a はそれぞれ式 (3-1) および (3-2) で表される。式 (3-3) に示すように、駆動力 F と走行抵抗 R_r との差は加速に費やされ、その加速度 a は式 (3-4) から算出される。

$$R_r = \mu r m g + \mu a A V^2 \quad (3-1)$$

$$R_a = (m + m r) a \quad (3-2)$$

$$R_a = F - R_r \quad (3-3)$$

$$\alpha = \frac{F - (\mu_r mg + \mu_a A V^2)}{m + m_r} \quad (3-4)$$

ここで、

R_r	: 走行抵抗	N
R_a	: 加速抵抗	N
μ_r	: 転がり抵抗係数	
μ_a	: 空気抵抗係数	N/m ² /(km/h) ²
m	: 車両総質量	kg
m_r	: 回転部分相当質量	kg
A	: 前面投影面積	m ²
V	: 車速	km/h
α	: 車両の加速度	m/s ²
F	: 発生する駆動力	N
g	: 重力加速度	m/s ²

(2) MG モデル

MG の特性は、ミリ秒オーダーでは過渡と定常の効率に差が生じるが、0.1 秒オーダーでは差が生じない。したがって、(a) 定常運転試験によって測定された回転速度とトルク指令値、電圧に対する実力行/回生トルクマップおよび (b) 実消費/回生電力マップ、(c) 慣性モーメントおよび (d) 時定数をパラメータとして入力することによって、実車走行時の MG の挙動を再現する(図 3.2.3-2)。GE モデルも同様の構成となる。なお、制動時はブレーキ開度に対する摩擦ブレーキ力をパラメータ入力することによって、その残りである回生ブレーキ力を精度よく再現可能である。

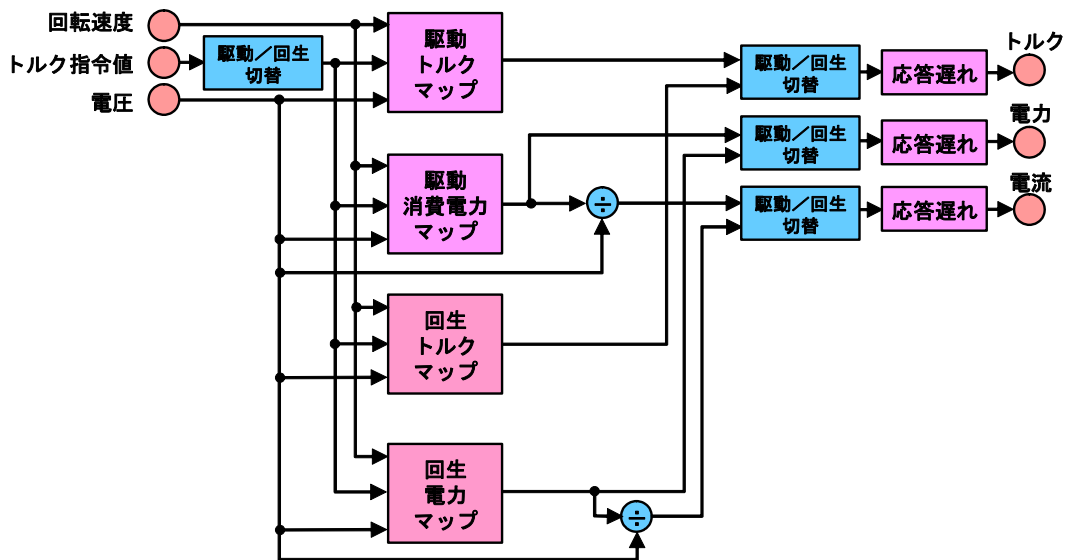


図 3.2.3-2 MG モデル概念図

(3) 変速機モデル

クラッチモデルは、入力側と出力側の回転速度差およびクラッチストロークにより伝達トルクを算出する。このトルクに、ギヤ比と伝達効率を乗ずることによって入力側の負荷トルクが算出される。また、このトルクをMGと各ギヤ段の慣性モーメントで除すことにより、入力側の回転速度が算出される。伝達効率はトップギヤが0.98、それ以外は0.95とした。これらの値は、細井らの研究[94]によってその妥当性が確認されており、従来型重量車の燃費・排出ガス試験法における計算プログラムにも使用されている[94][95]。

(4) バッテリモデル

バッテリーの充放電電力は式(3-5)によって、SOCはクーロン効率を100%と仮定し、式(3-6)の電流積算によって算出する。バッテリーの開放電力と内部抵抗はSOCから算出する(図3.2.3-3)。

$$P = V_s I = (V_o - R_i I) I \quad (3-5)$$

$$SOC = SOC_{initial} - \int_0^t \frac{I}{C_{nominal} \times 3600} dt \times 100 \quad (3-6)$$

P	: バッテリ充放電電力	Wh
V_s	: バッテリ端子電圧	V
I	: バッテリ電流	A
V_o	: バッテリ開放電圧	V
R_i	: バッテリ内部抵抗	Ω
SOC	: バッテリ充電状態	%
$SOC_{initial}$: 初期バッテリー充電状態	%
$C_{nominal}$: 定格容量	Ah
t	: 経過時間	s

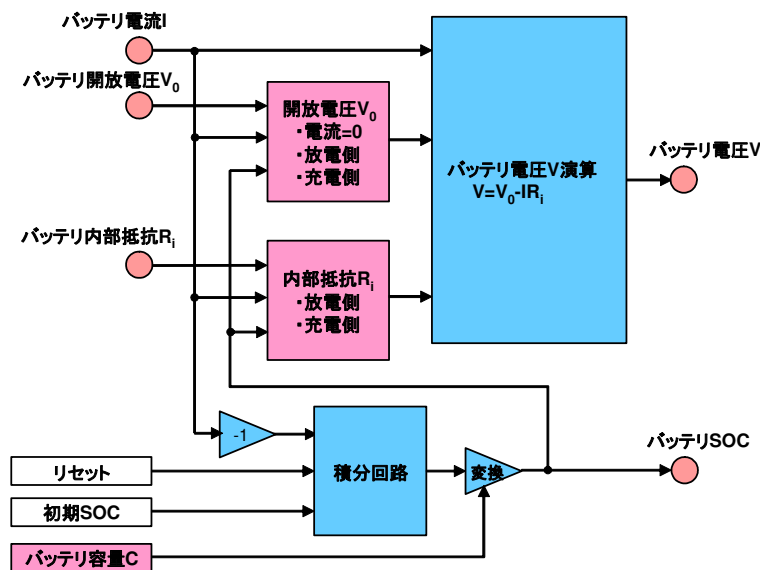


図 3.2.3-3 バッテリモデル概念図

(5) キャパシタモデル

充放電電力はバッテリーの場合と同様に式 (3-5) を用いて算出される。開放電圧は、キャパシタのクーロン効率がほぼ 100%とみなせるため、式 (3-7) によって算出される。SOC は、キャパシタのエネルギーが式 (3-8) によって表せることから、式 (3-9) によって算出する (図 3.2.3-4)。

$$V_0 = \frac{Q}{C_{nominal}} \quad (3-7)$$

$$E = 0.5 \times C_{nominal} V_0^2 \quad (3-8)$$

$$SOC = \frac{V_0^2}{V_{max}^2} \times 100 \quad (3-9)$$

P	: 充放電電力	W
V_s	: 端子電圧	V
I	: 電流	A
V_0	: 開放電圧	V
R_i	: 内部抵抗	Ω
Q	: 電気量	C
$C_{nominal}$: 電気容量	F
E	: 静電エネルギー	J
SOC	: 充電状態	%
V_{max}	: 最大電圧	V

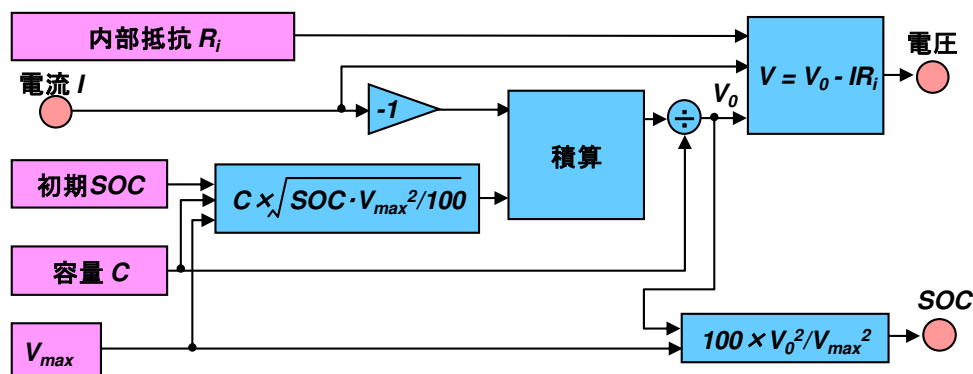


図 3.2.3-4 キャパシタモデル概念図

(6) エンジンモデル

MG モデルと同様に、(a) 定常運転試験によって測定された、回転速度とトルク指令値に対する実トルクマップ (フリクションによる負側トルクを含む) および (b) 回転速度と実トルクに対する実燃料流量マップ、(c) 慣性モーメントおよび (d) 時定数・遅れ時間をパラメータとして入力する (図 3.2.3-5)。エンジンモデル単体が慣性モーメントを再現することから、エンジン始動/停止時の過渡のエネルギーも含めて模擬可能である。時定数・遅れ時間は、実車走行データに合う値を入力する。変速時等の急激な回転・トルクの変動を伴う条件では、挙動のシミュレーション誤差が大きくなると予想されるが、エネルギーの観点からは、走行モード全体の消費エネルギー

に対して極小であり無視することができる。また、エンジンは過渡と定常の相違が MG よりも大きくなるが、定常運転で求めた燃料流量マップを用いて計算した過渡走行の燃費は、実測値と良く一致することが確認されており、その計算手法は従来型重量車の燃費認証試験法として採用されている[95].

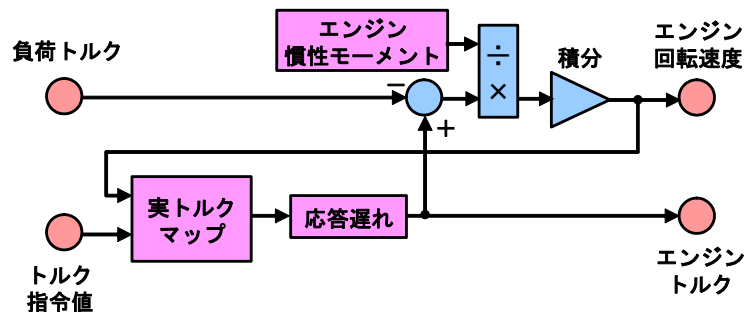


図 3.2.3-5 エンジンモデル概念図

3.2.4 ドライバモデル

基準車速，計算車速，走行抵抗，加速抵抗，タイヤ半径，減速比などから要求トルクを算出する。要求トルクとシステムの「回転速度－トルク－アクセル開度マップ」とから，駆動時のアクセル開度を予測する。そのアクセル開度を，基準車速と計算車速との差から PID 制御にて調整する（図 3.2.4-1）。制動時は，車速差の PI 値と要求減速度からブレーキ操作量を決定する。PID 制御のゲインは任意に変更可能である。

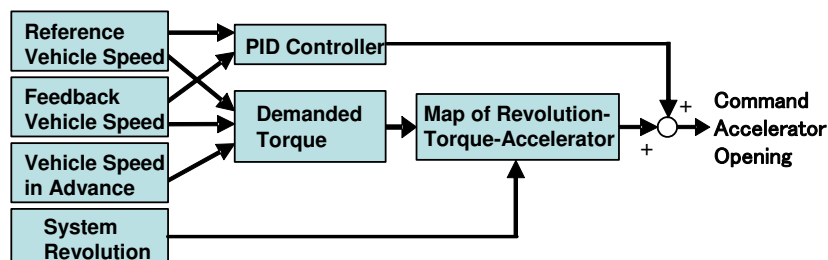


図 3.2.4-1 ドライバモデル概念図

3.3 HILS の実車再現性検証

3.3.1 検証手順

HILS の検証は，HEV が種々の要素によって構成されるため，路上の実測値との比較において，以下の手順によって段階的に行った。

(1) シリーズ HEV 大型バス

まず，惰行試験によって実車の走行抵抗値を測定し，その値を HEV モデルに入力した際の惰行時間が実車と一致することを確認した。次に，電気自動車（BEV）部分，すなわち車両，MG，減速機，終減速機およびバッテリーのモデルについて実車再現性を確認した。その後，シリーズ HEV

としての構成要素であるエンジン GE モデルの実車再現性を確認した。アクセルおよびブレーキ操作量は、実測値（以下、実車操作量という）を用いた場合と、ドライバモデルの操作による場合の 2 種類の条件で検証した。HEV モデルにパラメータとして各要素の諸元データを入力し、車速、MG 出力、バッテリー出力・電圧・電流・SOC、エンジン GE 出力を算出し、実測値と比較した。

(2) パラレル HEV 配送トラック

まず、惰行試験によって実車の走行抵抗値を算出し、その値を HEV モデルに入力した際の惰行時間が実車と一致することを確認した。次に、アクセル開度一定での定速と加速、ブレーキ開度一定での減速および JE05 モードの各走行条件において、MG トルク指令値、キャパシタ出力・電流・電圧およびエンジン回転速度・トルク指令値を比較することにより、HILS の実車再現性を確認した。その際、アクセルとブレーキ開度およびシフト信号は、実車操作量を用いることで、実車ドライバとドライバモデルにおける操作の違いの影響を除いた。燃費は、JE05 モードと市街地モード（JE05 モードの 644～1410 秒区間）について検証した。

3.3.2 実車データの取得方法

(1) 試験路

HILS 計算値を検証する際の比較基準となる実車データは、JARI 城里の高速周回路（一周 5.5km、コーナー半径 0.4km、南北に直線部 1.1km を有するオーバル形で、第 2 章で用いたつくば研究所の旧高速周回路と同一規模である）を用いて計測した。なお、データは可能な限り直線部で測定したが、JE05 モードについては走行距離が約 13.9km あるため試験路を約 2.5 周しており、コーナー部での走行も含んでいる。

(2) 車両条件

積載条件は半積載とした。また、供試車両はエアブレーキ仕様であるため、制動時にエア圧を消費することによって、エアコンプレッサが作動する恐れがある。認証試験では補機類の駆動損失を含めないことから、エアブレーキで消費したエアを窒素ボンベから補充することによって、コンプレッサの作動を防止した。

(3) データ収録方法

ハイブリッド ECU と MG やバッテリー、エンジンなど各要素 ECU 間のコントローラエリアネットワーク（CAN）通信信号をパソコンに収録し、各要素に関するデータを収録した。

3.3.3 検証結果

3.3.3.1 シリーズ HEV 大型バス

(1) 惰行時間の検証

実車惰行時間から、ころがり抵抗係数と空気抵抗係数を算出した。ここで、減速機被駆動側ギヤからタイヤまでの回転部分相当質量は、各要素の慣性モーメントから算出した。算出値を HILS に入力した結果、10km/h 毎の惰行時間は 3%以内の差で一致した（表 3.3.3-1）。

表 3.3.3-1 シリーズ HEV 大型バスの惰行時間比較

Vehicle Speed Range (km/h)	Coast Down Time		Difference	
	Actual (sec)	HILS (sec)	(sec)	(%)
65-55	21.8	21.8	0.0	0.2
55-45	25.0	25.7	0.7	2.7
45-35	29.0	29.9	0.8	2.8
35-25	34.8	34.4	-0.4	-1.2
25-15	38.1	38.5	0.4	1.0

(2) BEV 部分の検証

- **定速走行での検証**：車両速度を一定とした条件でのアクセル開度を HILS に入力することによって、動力伝達系（減速機および終減速機）モデルのギヤ効率を確認した。目標車速は、20km/h～60km/h の間を 10km/h 刻みで評価した。50km/h における実測値と計算値の比較例を図 3.3.3-1 に示す。車速は、40 秒の区間において 1km/h 以内の差で一致した。MG トルクは CAN 通信の実測値の分解能が 10 Nm であるため、詳細な比較ができなかったが概ね一致した。以上の結果から、減速機および終減速機モデルにパラメータとして入力したギヤ効率が正しいこと、また、アクセル開度に対する MG 出力の発生量が正しいことがわかった。
- **台形走行パターンでの検証**：M15 モードをベースに、より単純な検証用の台形モード（試験時間 100 秒）を作成し、一定加減速における検証を行った。その際、MG の効率データおよびバッテリーの開放電圧・内部抵抗データは実使用状態に補正した値を用いた。その結果、時系列で比較した車速、MG 出力、バッテリー出力・電圧・電流および SOC の各計算値は、実測値とほぼ一致した（図 3.3.3-2）。また、実測値と計算値との相関性（図 3.3.3-3）は、車速については非常に高く、決定係数 0.99 以上、誤差 1%以下であった。MG 出力、バッテリー出力・電圧・電流についても、決定係数 0.95 以上の高い相関性が得られた。バッテリー電圧の誤差が約 10%と大きいのは、変化の範囲が 600V～640V 程度の小さい幅であるためである。バッテリー SOC は、変化の範囲が 52%～55%の小さい幅であり、計算誤差が累積するため高い相関性を得るのは困難な計算項目であるが、決定係数 0.96 以上、誤差 1%以内で一致した。

以上の結果から、MG およびバッテリーのモデルに実使用状態のパラメータを入力することによって BEV 部分の挙動をよく再現でき、SOC によって管理されるエンジン GE の作動状態についても高い精度で模擬可能と予想された。

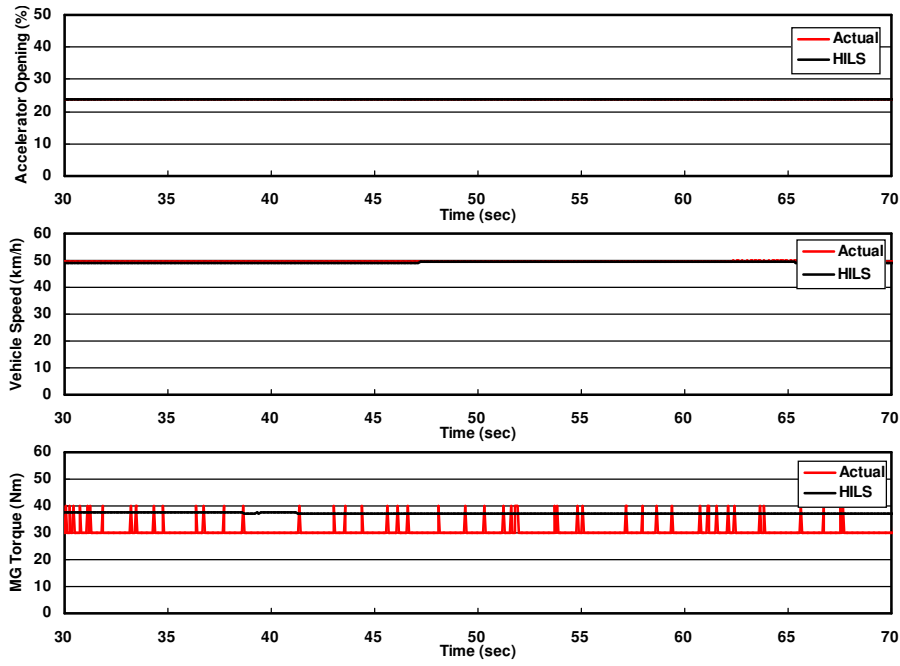


図 3.3.3-1 定速走行での検証 (シリーズ HEV)

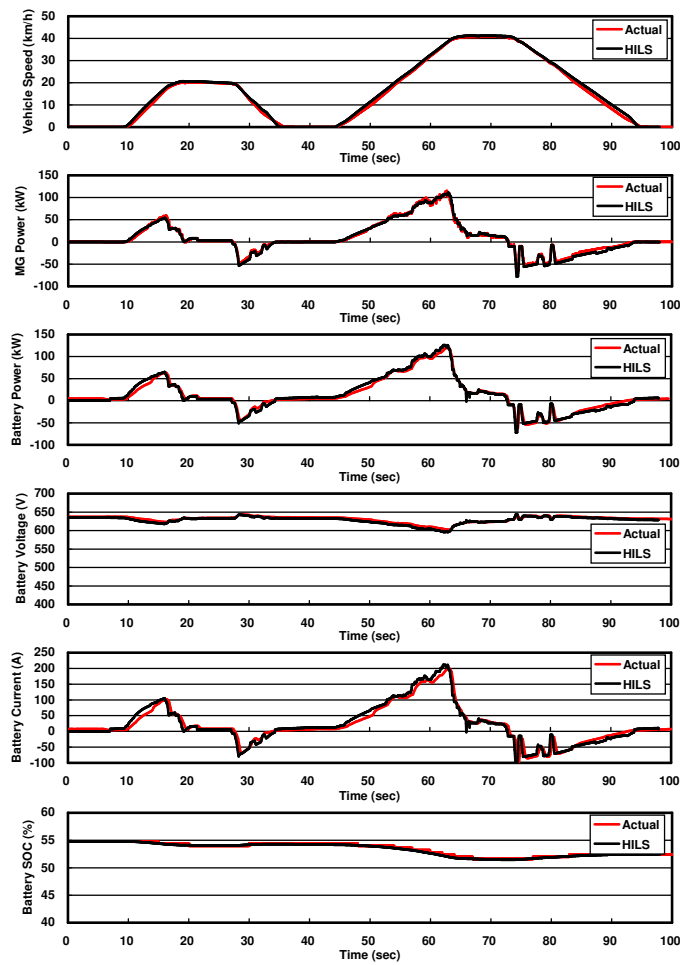


図 3.3.3-2 台形走行パターンでの検証 (シリーズ HEV)

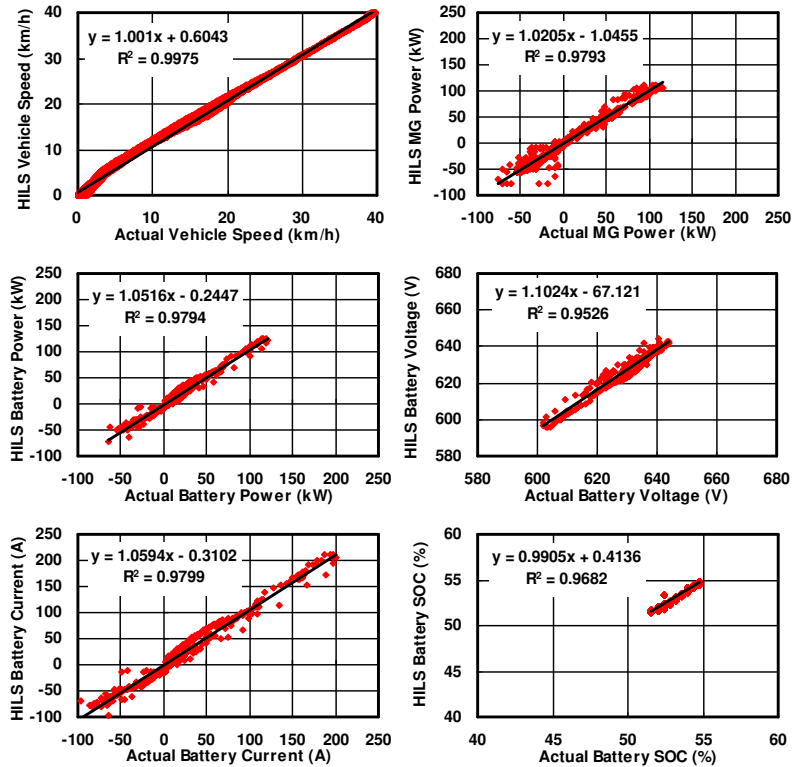


図 3.3.3-3 台形走行パターンでの検証（シリーズ HEV）

(3) エンジン GE モデルの検証

シリーズ HEV としての挙動すなわちエンジン GE の作動についての模擬精度を、JE05 モードにおいて実車操作量を入力して検証した。時系列データ（図 3.3.3-4）から、単純な台形モードではない過渡の JE05 モードにおいても、各要素の挙動は、計算値と実測値でよい一致を示している。エンジン GE の作動タイミングは SOC の計算誤差によって大きく影響を受けるが、作動タイミングも概ね一致していることがわかる。なお、1500 秒手前辺りから 1650 秒辺りまで車速が約 70 km/h で頭打ちとなっているが、これは供試車両が都市バスであるため最高速度が約 70 km/h で設計されているためである。

燃費・排出ガス試験法としての観点からは、試験モード全体のエンジン GE 仕事の計算精度が最も重要となる。GE の効率マップを基に、エンジントルクと燃料消費率を精度よく算出可能なためである（シリーズ HEV で定点運転となるため仕事＝燃料消費量と考えてよい）。エンジン GE 仕事はバッテリーの Δ SOC によって変化するため、バッテリー電力量の収支を加えて補正した値同士で比較すると、実測値 1.000 に対し HILS（実車操作量）は 1.042 となった（図 3.3.3-5）。

(4) 総合検証

ドライバモデルによって JE05 モードを走行し、HILS によるエンジン GE 仕事の計算精度を総合的に評価した。ドライバモデルは基準車速に対して極めてよく追従し、計算車速と基準車速の相関性は、傾きが 0.994、切片が 0.149km/h、決定係数が 1.000 であった（図 3.3.3-6）。エンジン GE 仕事は、実測値を 1.000 とすると HILS（ドライバモデル）が 0.987 となった（図 3.3.3-5）。

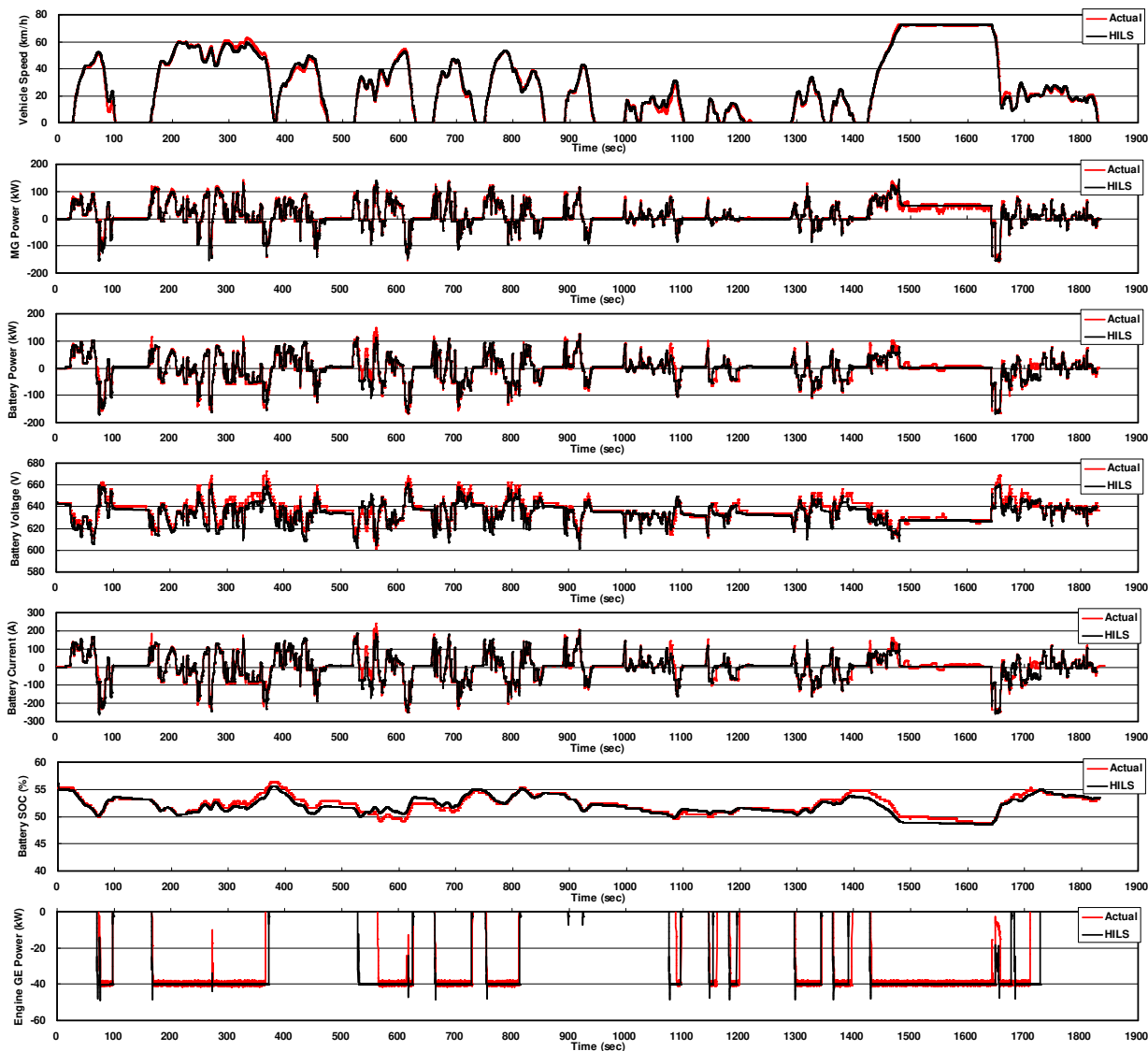


図 3.3.3-4 JE05 モードでの検証データ (シリーズ HEV)

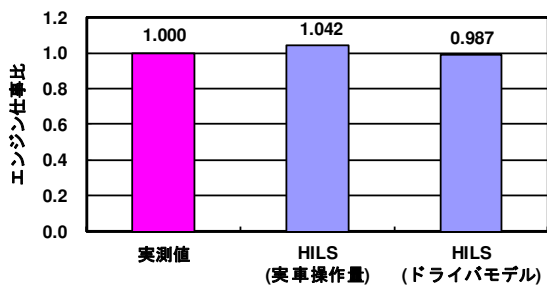


図 3.3.3-5 JE05 モードのエンジン仕事 (シリーズ HEV)

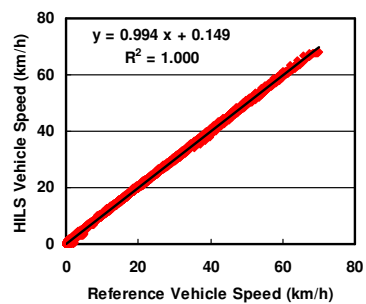


図 3.3.3-6 ドライバモデルの追従性 (シリーズ HEV)

3.3.3.2 パラレル HEV での検証

(1) 惰行時間の検証

惰行時の回転部分相当質量は、タイヤ、ブレーキドラム、終減速機、プロペラシャフト等各要素の慣性モーメントから算出した。この相当質量と試験時の車両質量および実車惰行時間から走行抵抗を算出した。その値を HILS に入力した結果、表 3.3.3-2 に示すように 10km/h 毎の惰行時間は 3%以内で一致した。

表 3.3.3-2 パラレル HEVトラックの惰行時間比較

Vehicle Speed Range (km/h)	Coast Down Time		Difference	
	Actual (sec)	HILS (sec)	(sec)	(%)
95-85	10.9	10.8	-0.1	-1.1
85-75	13.0	12.8	-0.2	-1.6
75-65	15.5	15.1	-0.4	-2.6
65-55	18.3	18.2	-0.1	-0.5
55-45	22.2	22.0	-0.2	-1.0
45-35	27.0	26.9	-0.1	-0.5
35-25	33.6	33.0	-0.6	-1.8
25-15	40.2	40.4	0.2	0.4

(2) 定速走行での検証

車速を一定とした条件でのアクセル開度を HILS に入力することにより、動力伝達系モデルの効率が確認できる。供試車両は MG のみで走行できる車速が限定されるため、基準車速を 20km/h および 30km/h の 2 条件として評価した。20km/h における実測値と計算値の比較例を図 3.3.3-7 に示す。アクセル開度が安定してからの 50 秒～90 秒区間において、実車と HILS の車速はほぼ一致した。MG トルク指令値およびキャパシタ出力については、絶対値が小さいために誤差の割合としてはやや大きい、誤差の絶対値は小さい。キャパシタ電圧の降下速度も大きな差がなかった。以上の結果から、駆動系（変速機および終減速機）の伝達効率の妥当性を確認した。また、一定車速時のアクセル開度に対する MG 出力の発生量の妥当性も確認できた。

(3) アクセル開度一定加速での検証

実測値と計算値の挙動を図 3.3.3-8 に示す。車速、MG トルク指令値、キャパシタ出力・電流・電圧ともに両者はよく一致している。エンジントルク指令値は、アイドリング時を除けばほぼ一致している。アイドリング時に差が生じた原因は、HILS の実負荷として用いた燃料噴射ポンプが停止状態のためである。また、図 3.3.3-9 に示す両者の相関性（アイドリングおよびシフト時を除く）は、0.918～0.998 の高い決定係数が得られた。

(4) ブレーキ開度一定減速での検証

実測値と計算値の挙動を図 3.3.3-10 に示す。減速途中では HILS の方が僅かに減速度が大きい傾向があるが、減速終了点は一致している。MG トルク指令値は、両者共に最大力での回生であるため、-100%で一致している。キャパシタ出力・電流・電圧の挙動もほぼ一致している。

実測値と計算値の相関性を図 3.3.3-11 に示す。車速，MG トルク指令値，キャパシタ出力・電流は，それぞれ相関性が非常に高く，決定係数 0.99 以上であった。キャパシタ電圧については，変化が 10%以下であるため，評価の対象から除外した。

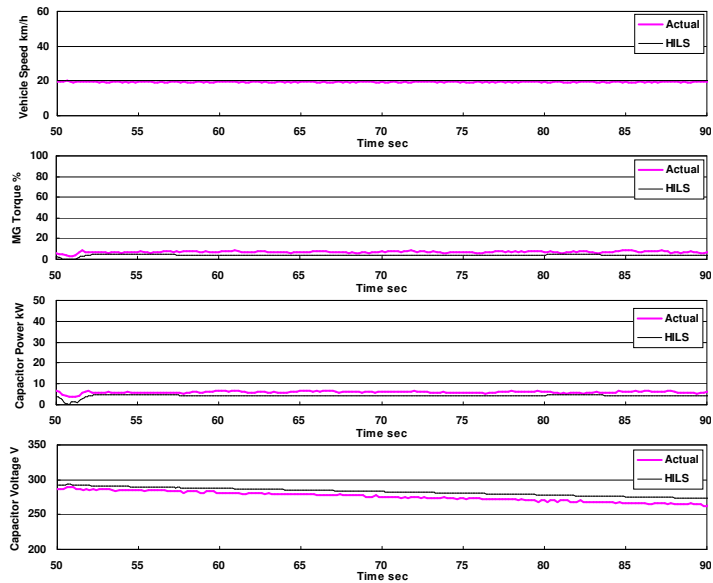


図 3.3.3-7 定速走行での検証（パラレル HEV）

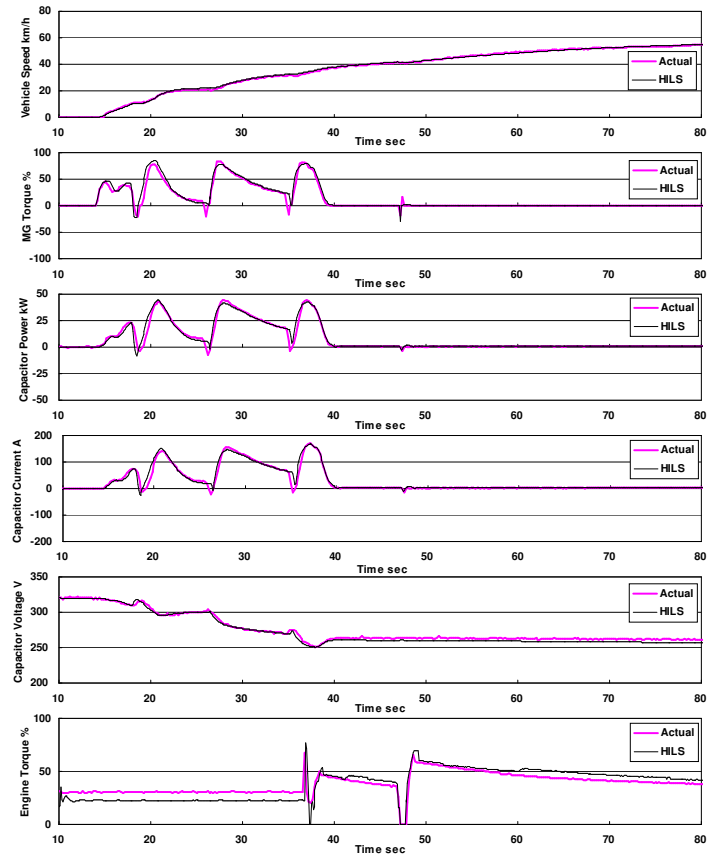


図 3.3.3-8 アクセル開度一定加速での検証（パラレル HEV）

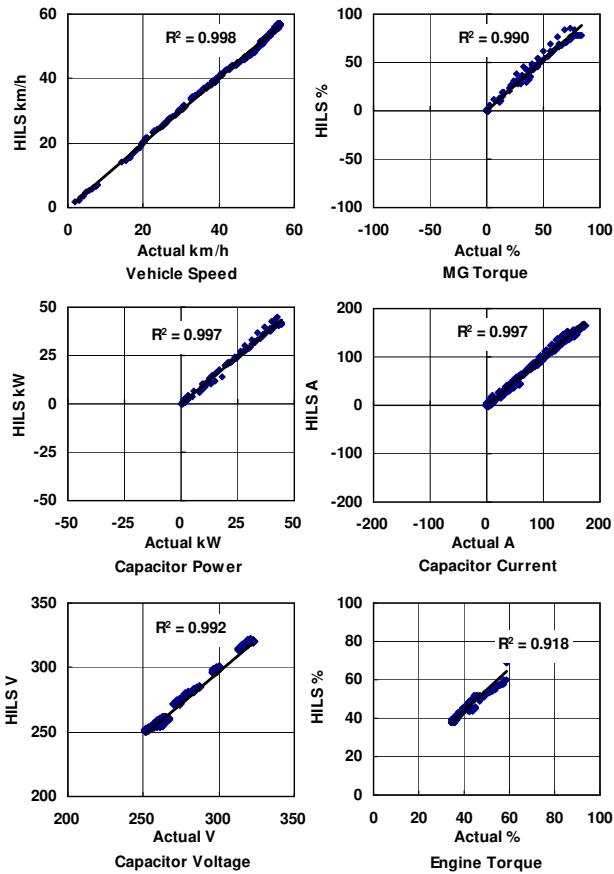


図 3.3.3-9 アクセル開度一定加速での検証（パラレル HEV）

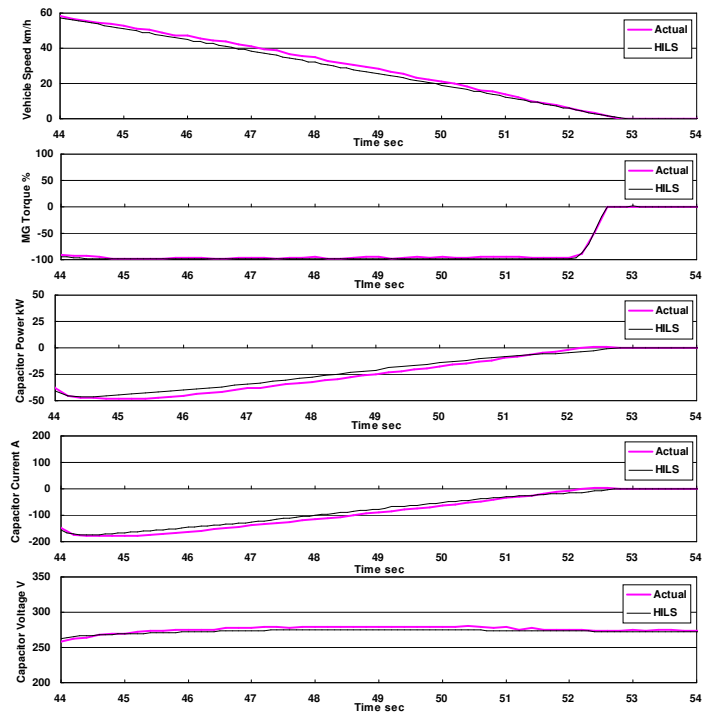


図 3.3.3-10 ブレーキ開度一定減速での検証（パラレル HEV）

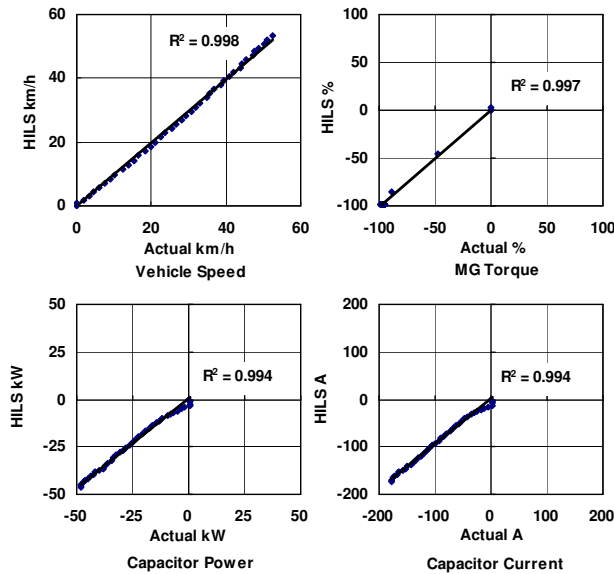


図 3.3.3-11 ブレーキ開度一定減速での検証（パラレル HEV）

(5) 総合検証

JE05 モードにおける実測値と計算値との挙動を図 3.3.3-12 に示す。ブレーキ開度の測定誤差の影響等で、MG の回生およびアシストの細かい挙動が若干異なるところも見られたが、全体的な挙動は実車とよく一致している。試験開始時と終了時のキャパシタ電圧もよく一致している。

実測値と計算値の相関性を図 3.3.3-13 に示す。アイドリング時とシフト時のデータを除外して評価すると、車速は決定係数 0.99 以上であり、過渡走行パターンにおいても高い相関性が得られた。燃費・排出ガス試験法として最も重要となるエンジン運転条件についても、エンジン回転速度が決定係数 0.94 以上、エンジントルク指令値が決定係数 0.93 以上であり、高い相関性が得られた。エンジントルクのばらつきは、MG 駆動からエンジン駆動への切替や MG のアシストのタイミングが実車と HILS で若干ずれる箇所があるためである。

最後に JE05 モードにおける実路上の実測燃費と HILS 模擬走行の燃費を比較した。燃費は実測値を 1.000 とすると、HILS（実車操作量）が 1.021、HILS（ドライバモデル）が 0.987 となり、シリーズ HEV と類似の傾向が得られた（図 3.3.3-14）。

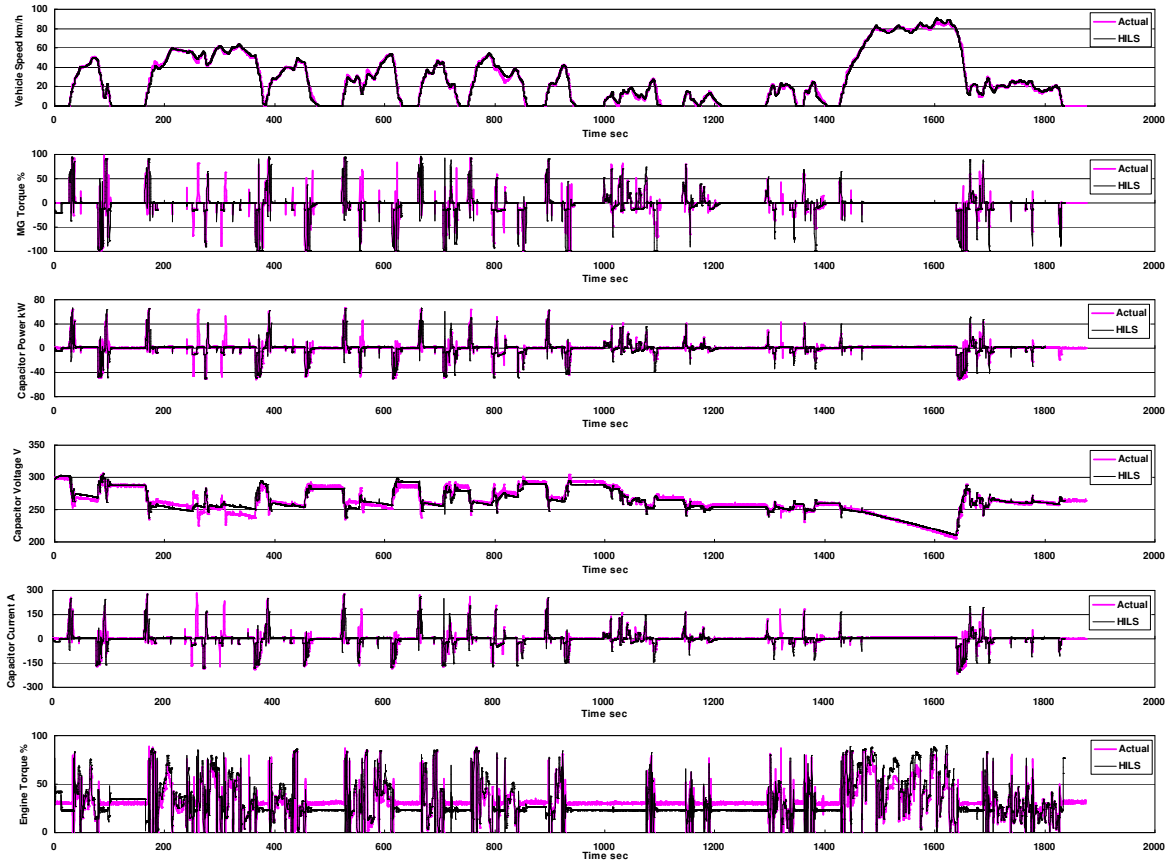


図 3.3.3-12 JE05 モードでの総合検証 (パラレル HEV)

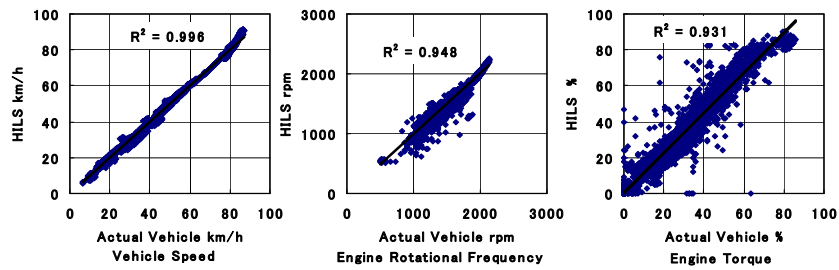


図 3.3.3-13 JE05 モードでの総合検証 (パラレル HEV)

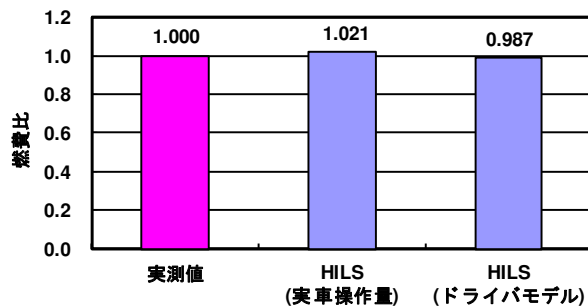


図 3.3.3-14 JE05 モード燃費の比較 (パラレル HEV)

3.3.4 HILS 法の実車再現性検証のまとめ

実機 ECU と HEV モデルを組合わせた HILS によって認証モードを模擬走行させ、エンジン回転速度・トルクおよび燃費を算出し、エンジン単体で排出ガスを測定する重量 HEV 試験法の実現可能性について、シリーズ HEV とパラレル HEV を 1 種ずつ供試して調査を行い、以下の知見を得た。

(1) シリーズ HEV

- HEV モデルの各パラメータに実使用状態の諸元データを入力し、試験時間 100 秒の台形モードにおいて、実車操作量を HILS に入力して EV 部分の検証を行った場合、車速、モータ出力、バッテリー出力・電圧・電流・SOC の計算値は実測値と良く一致し、決定係数 0.95～0.99 以上の高い相関性が得られた。
- JE05 モードにおけるエンジン GE 仕事は、実路上の実測値を 1.000 とすると、HILS（実車操作量）が 1.042、HILS（ドライバモデル）が 0.987 となった。

(2) パラレル HEV

- HEV モデルに実車操作量を入力して加速および減速を行った場合、車速、MG トルク指令値、キャパシタ出力・電流・電圧およびエンジントルクの計算値は実測値と良く一致し、決定係数 0.9 以上の高い相関性が得られた。
- JE05 モードにおける燃費は、実路上の実測値を 1.000 とすると、HILS（実車操作量）が 1.021、HILS（ドライバモデル）が 0.987 となった。

以上の結果から、HILS の利用によって、シリーズ HEV およびパラレル HEV のエンジン単体の運転条件を、認証試験に耐え得る精度で算出できることがわかった。

3.4 HEV モデル標準化

3.4.1 概要

HILS 法を認証試験法として提案するためには、HEV モデルが正しいか否かを事前に確認する必要があるが、それは共通の HEV モデルを用いることで容易になる。そこで、各社の HEV に対応するよう HEV モデルを標準化した。

3.4.2 対象車種

標準 HEV モデルは、研究当時に国内重量車メーカーから販売されていた車両および販売計画がある車両に対応することとした。対象車両は、図 3.4.2-1 に示す 4 種の平行 HEV（車両 A～D）および図 3.4.2-2 に示す 1 種のシリーズ HEV（車両 E）である。シリーズ HEV モデルは 1 種で対応できるが、平行 HEV モデルは MG 位置や RESS 種類等がそれぞれ異なっており、全ての種類に対応できるよう標準化する必要がある。

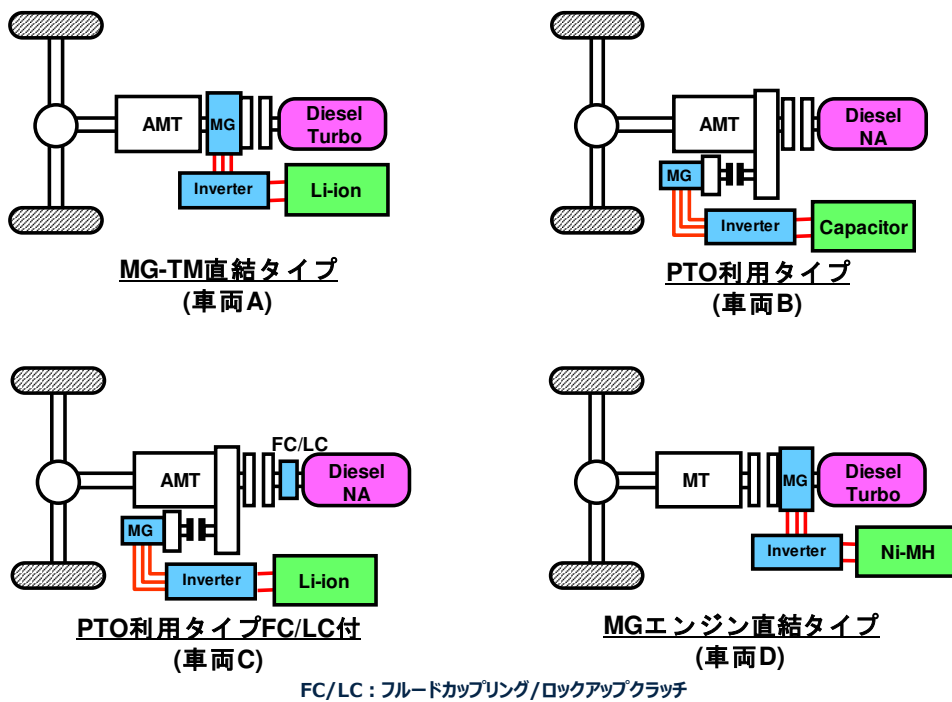


図 3.4.2-1 標準平行 HEV モデルの対象 HEV

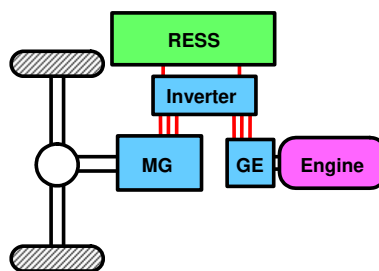


図 3.4.2-2 標準シリーズ HEV モデルの対象 HEV（車両 E）

3.4.3 使用 ECU の決定

HEV モデルを標準化するためには、HILS 構築時に使用する ECU を規定する必要がある。対象車両の ECU 構成を調査した結果、図 3.4.3-1 に示す 3 種に分類された。

- 車両 A, B, E : ハイブリッド ECU の下層にエンジン ECU が位置。アクセル開度信号はハイブリッド ECU に入力。パラレル HEV では変速機 ECU がハイブリッド ECU に一体化。
- 車両 C : ハイブリッド ECU とエンジン ECU が並列。アクセル開度信号は両 ECU に並列で入力。変速機 ECU が独立。
- 車両 D : ハイブリッド ECU とエンジン ECU が並列。アクセル開度信号は両 ECU に並列で入力。手動式変速機仕様。

HILS 模擬走行の精度、試験法としての適合性および HEV モデル標準化の観点から総合的に検討した結果、下記理由により、ハイブリッド ECU と変速機 ECU を用いることとした。

- ハイブリッド ECU : MG とエンジンの使用方法を決定する中枢である。ハイブリッド ECU からのトルク指令値によって MG モデルを制御することから、使用が必須である。
- 変速機 ECU : 変速方法は燃費に大きく影響する。また、変速機 ECU を用いない場合、変速ロジックの開示が必要になるため、用いることが望ましい。

なお、エンジン ECU については、その制御を活かしたエンジンモデルとすると、コモンレール燃料噴射方式の場合は特に膨大な量のパラメータやダミー信号が必要となる。また、パラメータを取得するための試験・計測が膨大になるにも係わらず、燃料噴射量や吸入空気量から筒内圧を求めて発生トルクを予測するモデルとなることから、エンジン動作の模擬精度が低くなる。さらに、一つのエンジンモデルで種々の燃料噴射方式に対応させることが困難である。エンジン動作は、ハイブリッド ECU からの指令値（あるいはアクセル開度信号）とエンジン回転速度に対する発生トルクマップ（正/負側）を定常で実測し、パラメータとして入力することにより、精度よく模擬可能と思われるためエンジン ECU は不要である。したがって、前節までの HILS 模擬走行の精度検証まではエンジン ECU も使用して HILS を構築していたが、標準 HEV モデルではエンジン ECU は使わないこととした。

また、ブレーキ ECU の回生ブレーキと油圧ブレーキとの配分制御機能については、実 ECU と標準 HEV モデルとの各社固有インターフェース (I/O モデル) 中に持たせることとした。

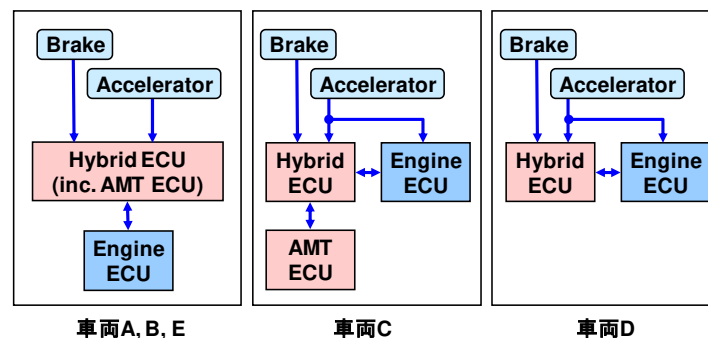


図 3.4.3-1 各社 ECU の接続方法

3.4.4 標準 HEV モデル構築

検証を行ったパラレル HEV モデル, シリーズ HEV モデルについて国内重量車メーカー各社で適合性を確認して頂いた結果, 主に下記の追加・変更を加え, 標準化することになった.

- ・ 補機消費電力加算ブロック追加
- ・ 縦断勾配抵抗負荷ブロック追加
- ・ 変速機伝達効率のシフト位置毎設定機能と駆動/制動での乗除切替機能追加
- ・ 終減速機伝達効率の駆動/制動での乗除切替機能追加
- ・ エンジンモデルに補機損失トルクマップ追加
- ・ 電動機モデルの効率マップを消費/回生電力マップに変更

I/F は, 図 3.4.4-1 に示すようにソフトウェア I/F のみを標準化し, 各社が固有に変換モデルを用意することで, ハードウェア I/F は標準化しないこととした. 使用 ECU を決定したことで, ソフトウェア I/F 仕様も決めることができる. 国内重量車メーカーと相談の結果, パラレル HEV モデルおよびシリーズ HEV モデルの標準 I/F をそれぞれ表 3.4.4-1 および表 3.4.4-2 のとおり決定した. また, パラレル HEV モデルは, MG 位置, RESS 種類 (バッテリー, キャパシタ), フルードカップリング/ロックアップクラッチ (FC/LC) 有無などが異なる様々な HEV に対応する必要があることから, それらの切換えが必要な要素部分にそれぞれ切換えスイッチを付けることとした (表 3.4.4-3).

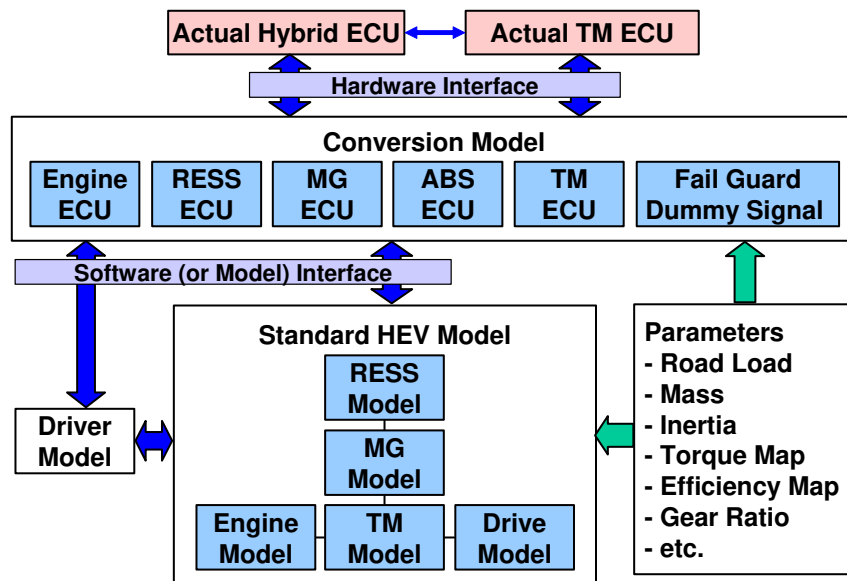


図 3.4.4-1 HILS の I/F 構成

表 3.4.4-1 標準パラレル HEV モデルの I/F

モデル	モデル側から見た入出力	記号	名称	単位	備考
駆動モデル	入力-1	BR_TQ_N	メカニカルブレーキ力	N	タイヤ接地面
	入力-2	CL_q_1	クラッチストローク	%	
	入力-3	shift_p	ギヤ位置指令	-	
	入力-4	Motor_CL	モータクラッチ	-	ON/OFF
	入力-5	Clutch_position	クラッチ(モータ)位置	-	
	入力-6	F_coup_on	フルードカップリングSW	-	ON/OFF
	入力-7	Lock_up	ロックアップSW	-	ON/OFF
	入力-8	koubai	縦断勾配	%	
	出力-1	Speed_Out	車速	km/h	
	出力-2	RL_N_Out	走行抵抗	N	
	出力-3	Distance	走行距離	km	
	出力-4	KASOKUDO	加速度	m/s ²	
	出力-5	Ni_rpm	インプット軸回転速度	r/min	
	出力-6	Nc_rpm	カウンタシャフト回転速度	r/min	
	出力-7	Eg_Fuka_Nm	負荷トルク	Nm	モータ制御込み
出力-8	No_rpm	アウトプット軸回転速度	r/min		
出力-9	Nt_rpm	タービン回転速度	r/min		
出力-10	shift_p	シフト位置	-		
RESSモデル	入力-1	RESS_change	RESS切替SW	-	
	入力-2	Accessory1_ON	補機1SW	-	ON/OFF
	入力-3	Accessory2_ON	補機2SW	-	ON/OFF
	出力-1	RESS_SOC	充電状態(SOC)	%	
	出力-2	RESS_Voltage	RESS電圧	V	
	出力-3	RESS_Current	RESS電流	A	
出力-4	RESS_Power	RESS出力	W		
エンジンモデル	入力-1	Sireikaido	トルク指令値	Nm	他に%, mm ³ /st等
	入力-2	ACCkaido	アクセル開度	%	
	入力-3	ACC_switch	トルク指令切替	-	0/1
	入力-4	IG_In	イグニッション	-	ON/OFF
	入力-5	ST_In	スタータ	-	ON/OFF
	入力-6	Fuel_cut	フューエルカット	-	ON/OFF
	入力-7	EXHB_In	排気ブレーキ	-	ON/OFF
	入力-8	Rev_demand	要求回転速度	rpm	
	入力-9	Rev_control_demand	回転制御指令	-	ON/OFF
	入力-10	Rev_limit_demand	回転制限指令	-	ON/OFF
	入力-11	Tq_limit_demand	トルク制限指令	-	ON/OFF
	入力-12	Tq_limit_rate	トルク制限率		
	入力-13	Tq_limit_switch	トルク制限SW	-	ON/OFF
	入力-14	Idle_rpm_adjust	アイドル回転調整入力		
	出力-1	Ne_out	エンジン回転速度	r/min	
	出力-2	Fuel_Consumption	燃料消費量	L	
	出力-3	EgDriveTq	エンジン発生トルク	Nm	
	出力-4	EgLossTq	フリクショントルク	Nm	
	出力-5	EgMaxTq	エンジン最大トルク	Nm	
	出力-6	Eng_Tq	エンジントルク	Nm	
	出力-7	Eng_Tq_rate	エンジントルク率		
	出力-8	Eng_Tq_rate2	エンジントルク率2		
	出力-9	Loss_Tq_rate	フリクショントルク率		
	出力-10	Loss_Tq_rate2	フリクショントルク率2		
	出力-11	Driver_demand_rate	ドライバ要求トルク率		
出力-12	DRV_demand_Inj	ドライバ要求噴射量			
出力-13	ISC	アイドル回転制御用燃料噴射量			
出力-14	EgDriveTq_woLoss	補機損失を除いたエンジントルク	Nm		
出力-15	Eg_Tq_map_sirei	エンジントルクマップ指令値			
電動機モデル	入力-1	Tq_Ref	トルク指令値	Nm	他に%等
	入力-2	Ref_Rev	指令回転速度	r/min	
	入力-3	Command_change	トルク指令方法変更	-	0/1
	入力-4	Reduction_SW	回生スイッチ	-	0/1
	入力-5	Reduction_ON	モータモード	-	0/1/2/3
	出力-1	Motor_Tq	モータ発生トルク	Nm	モータ単体
	出力-2	Motor_Tq_fb	モータフィードバックトルク	Nm	モータ単体
	出力-3	Motor_Rev	モータ回転速度	r/min	モータ単体
	出力-4	Motor_Current	モータ消費電流	A	放電+/充電-
	出力-5	Motor_Power	モータ消費電力	W	放電+/充電-
	出力-6	MotorDriveTqMax	モータ最大駆動トルク	Nm	
	出力-7	MotorRegenTqMax	モータ最大回生トルク	Nm	

合計66点(入力30点, 出力36点)

表 3.4.4-2 標準シリーズ HEV のモデル I/F

モデル	モデル側から見た入出力	記号	名称	単位	備考
駆動モデル	入力-1	BR_TQ_In	メカニカルブレーキ力	N	タイヤ接地面
	入力-2	Command_change	トルク指令方法変更	-	0/1
	入力-3	Reduction_SW	回生スイッチ	-	0/1
	入力-4	Reduction_ON	モータモード	-	0/1/2/3
	入力-5	ECU_Tq_ref_In	ECU指令トルク	Nm	
	入力-6	koubai	縦断勾配	%	
	出力-1	Motor_Current	電流	A	放電+/充電-
	出力-2	Vehicle_Speed	車速	km/h	
	出力-3	Road_Load	走行抵抗	N	
	出力-4	Distance	走行距離	km	
	出力-5	Motor_Speed	モータ回転速度	r/min	
出力-6	Motor_Tq	モータ発生トルク	Nm		
出力-7	Motor_Power	モータ消費電力	W		
出力-8	Kasokudo	加速度	m/s ²		
出力-9	MotorDriveTqMax	モータ最大駆動トルク	Nm		
出力-10	MotorRegenTqMax	モータ最大回生トルク	Nm		
出力-11	Motor_Tq_ref	モータトルク指令値	Nm		
RESSモデル	入力-1	RESS_change	RESS切替SW	-	
	入力-2	Accessory1_ON	補機1SW	-	ON/OFF
	入力-3	Accessory2_ON	補機2SW	-	ON/OFF
	出力-1	RESS_SOC	充電状態(SOC)	%	
	出力-2	RESS_Voltage	RESS電圧	V	
	出力-3	RESS_Power	RESS出力	W	
出力-4	RESS_Current	RESS電流	A		
エンジン発電機モデル	入力-1	Sireikaido	トルク指令値	Nm	他に%, mm ³ /st等
	入力-2	ACckaido	アクセル開度	%	
	入力-3	ACC_switch	トルク指令切替	-	0/1
	入力-4	Keyon_In	イグニッション	-	ON/OFF
	入力-5	ST_In	スタータ	-	ON/OFF
	入力-6	Fuel_cut	フューエルカット	-	ON/OFF
	入力-7	EXHB_In	排気ブレーキ	-	ON/OFF
	入力-8	Rev_demand	要求回転速度	rpm	
	入力-9	Rev_control_demand	回転制御指令	-	ON/OFF
	入力-10	Rev_limit_demand	回転制限指令	-	ON/OFF
	入力-11	Tq_limit_demand	トルク制限指令	-	ON/OFF
	入力-12	Tq_limit_rate	トルク制限率		
	入力-13	Tq_limit_switch	トルク制限SW	-	ON/OFF
	入力-14	Idle_rpm_adjust	アイドル回転調整入力		
	入力-15	ECU_ref.Power	発電機出力指令	kW	
	入力-16	ST_Tq	スタータトルク	Nm	
	入力-17	Engine_Start_active	エンジンスタート可SW		ON/OFF
	入力-18	Gen_ref_rev	発電機回転速度指令	rpm	
	入力-19	Eng_start_flag	エンジン始動フラグ	-	
	入力-20	Eng_stop_flag	エンジン停止フラグ	-	
	出力-1	Eng_Ne	エンジン回転速度	r/min	
	出力-2	Fuel_Consumption	燃料消費量	L	
	出力-3	EgDriveTq	エンジン発生トルク	Nm	
	出力-4	EgLossTq	フリクショントルク	Nm	
	出力-5	EgMaxTq	エンジン最大トルク	Nm	
	出力-6	Eng_Tq_rate	エンジントルク率		
	出力-7	Eng_Tq_rate2	エンジントルク率2		
	出力-8	Loss_Tq_rate	フリクショントルク率		
	出力-9	Loss_Tq_rate2	フリクショントルク率2		
	出力-10	Driver_demand_rate	ドライバ要求トルク率		
	出力-11	DRV_demand_Inj	ドライバ要求噴射量		
	出力-12	ISC	アイドル回転制御用燃料噴射量		
	出力-13	EgDriveTq_woLoss	補機損失を除いたエンジントルク	Nm	
出力-14	Eg_Tq_map_sirei	エンジントルクマップ指令値			
出力-15	Gen_Power	発電機電力	kW		
出力-16	Gen_Tq	発電機トルク	Nm		
出力-17	Gen_Current	発電機電流	A		
出力-18	Gen_speed	発電機回転速度	rpm		

合計62点(入力29点, 出力33点)

表 3.4.4-3 標準パラレル HEV モデル入カスイッチ設定事例及び出力項目

パラレルHEVモデル入力

モデル	シンボル名	名称	単位	用途	サンプル	
HEVモデル(トップ)	RESS_change	蓄電装置選択スイッチ	—	0: バッテリーモデル 1: キャパシタモデル	固定値 0	
HEVモデル(トップ) 駆動モデル	Clutch_position	モーダクラッチ	—	0: 無し 1: 有り	固定値 0	
駆動モデル	F_coup_ON	フルードカップリング	—	0: 無し 1: 有り	固定値 0	
駆動モデル	LockUp_in	ロックアップ	—	0: 無し 1: 有り	固定値 0	
	koubai	勾配情報	%	勾配パターン入力	パターン —	
	BR_N_in	メカニカルブレーキ力	N	メカニカルブレーキ	制御値 —	
	CL_p_Percent	クラッチストローク	%	クラッチ断・接	制御値 —	
	shift_p_in	シフトポジション	—	シフトパターン入力	パターン —	
	Eng_ST_in	スタータ信号	—	エンジン始動	制御値 —	
	EXHB_In	エキゾーストブレーキ	—	0: 非作動 1: 作動	固定値 0	
	EgASR_ON	回転速度制御要求	—	0: 非作動 1: 作動	固定値 0	
エンジンモデル	Rev_limit_demand	回転速度制限要求	—	0: 非作動 1: 作動	固定値 0	
	Tq_limit_demand	エンジントルク制限要求	—	0: あり 1: なし	制御値 —	
	FC	フューエルカット	—	0: カット要求なし 1: カット要求有り	固定値 0	
	ACC_switch	アクセル入力切替スイッチ	—	アクセル指令切替 0: % 1: mm3/st	固定値 0	
	Tq_limit_switch	エンジントルク制限要求 機能選択スイッチ	—	トルク制限要求設定 0: 未使用 1: 使用	固定値 1	
	EgASR_Ref	要求回転速度	rpm	回転指令	制御値 未設定	
	Acc_ref	アクセル開度指令	%	アクセル開度	制御値 —	
	Sireikaido	噴射量指令	mm3/st	噴射量	制御値 未設定	
	Tq_limit_rate	エンジントルク指令値	%	エンジントルク制限要求値	制御値 —	
	Idle rpm adjust	アイドル回転速度調整入力	—	アイドル回転速度調整	未設定	
	モータモデル	Motor_CL_In	モーダクラッチストローク	%	モーダクラッチの断・接	固定値 0
		Motor_cont_mode	モータモード	—	モーターモード設定 0: OFF 1: 力行 2: 回生 3: 回転制御	固定値 2
		Command_change	モータートルク指令値 符号選択スイッチ	—	0: signed 1: unsigned	固定値 0
Reduction_switch		回生スイッチ	—	0: 回生切替信号有効 1: モータートルク指令値自動切替	固定値 1	
MotorRev_ref rpm		モータ要求回転速度	rpm	モータ回転指令	制御値 未設定	
MotorTqRef Nm		モータートルク要求値	Nm	モータートルク指令値	制御値 —	

パラレルHEVモデル出力

モデル	シンボル名	名称	単位
駆動モデル	Speed Out	演算車速	km/h
	Nc rpm Out	カウンタシャフト回転速度	rpm
	No rpm	アウトプットシャフト回転速度	rpm
	G m_P_s2	車両加速度	m/s ²
	Ni rpm Out	インプットシャフト回転速度	rpm
	Nt rpm	タービンシャフト回転速度	rpm
エンジンモデル	Ne rpm Out	エンジン回転速度	rpm
	Fuel	燃料噴射量	L
	DemandTqDrive_1	ドライバ要求トルク率	0~1
	Q_DRV_DEM	ドライバ要求噴射量	L
	EgFrictionTq_1	フリクショントルク率	
	Eng Tqeff 1	エンジントルク率	
モータモデル	ISC	アイドル回転速度制御	
	Motor_tq_Out	モータートルク	Nm
	Motor_rev_Out	モータ回転速度	rpm
	Current_Out	電流値	A
	Motor_tq_Nm	モータートルク	Nm
	MotorDriveTqMax	モータ最大駆動トルク	Nm
バッテリーモデル	MotorRegenTqMax	モータ最大回生トルク	Nm
	Voltage_Out	電圧値	V
	BATT_SOC_Percent	SOC	%
BATT_POWER W	消費電力値	W	

3.4.5 標準 HEV モデル検証

3.4.5.1 検証方法

標準化した HEV モデルを用いて車両 A～E について実際に HILS システムを構築し、各車両への適合性について検証した。実エンジン ECU を使用しないため、HILS システムは図 3.4.5-1 に示すシンプルな構成となる。検証は、エンジン回転速度、トルク、燃費等について、実路上、CD 上あるいはシステムベンチ法で実測した値と HILS 模擬走行値を、JE05 モード1山 (0～120 秒) と JE05 モードの 2 条件で比較した。JE05 モード1 山では決定係数を、JE05 モードではエンジン仕事と燃費を主な検証対象とした。検証の許容値 (案) は、重量車排出ガス試験法の運転精度を参考に、表 3.4.5-1 および表 3.4.5-2 の値を想定した。

なお、決定係数を算出する際、変速 (クラッチ断～クラッチ接続まで) 及び変速前後それぞれ 1 秒間のデータは除外できることとした。また、実車走行及び HILS 模擬走行の電気量収支の差は、ISO 23274 「Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements - Non-externally chargeable vehicles」を基に規定した式 (3-10) を満たすこととした。同式で、右辺の 0.003 は、燃費の変動幅を±1%程度に抑えることを意図したもので、同 ISO における許容値 0.01 の 3/10 に設定した。

$$| \Delta E_{HILS} - \Delta E_{Vehicle} | / C < 0.003 \quad (3-10)$$

- ΔE_{HILS} : HILS 模擬走行の電気量収支のエネルギー換算値 (J)
- $\Delta E_{Vehicle}$: 実機試験による実車走行の電気量収支のエネルギー換算値 (J)
- C : HILS 模擬走行の積算燃料消費量エネルギー換算値 (J)

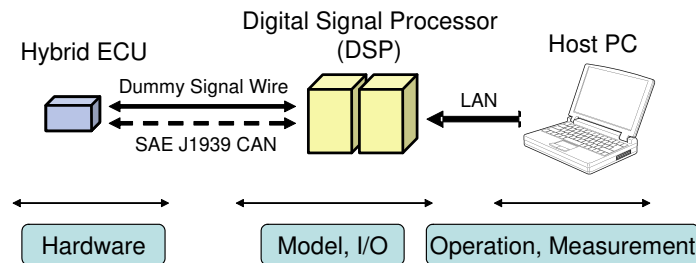


図 3.4.5-1 標準 HEV モデルを用いた場合の HILS システム構成

表 3.4.5-1 JE05 モード1山検証における実測値と模擬走行値の決定係数の許容値 (案)

調査条件	車速又はエンジン回転速度	電動機		エンジン		RESS 出力
		トルク	出力	トルク	出力	
JE05 モード1 山	0.97 以上	0.88 以上	0.88 以上	0.88 以上	0.88 以上	0.88 以上

表 3.4.5-2 JE05 モード全体検証における決定係数と仕事および燃費の許容値（案）

試験条件	車速又はエンジン 回転速度	エンジン トルク	エンジン 正側仕事	燃費値
	決定係数	決定係数	$W_{eng_HILS} / W_{eng_vehicle}$	$FE_{HILS} / FE_{vehicle}$
JE05 モード全体	0.97 以上	0.88 以上	0.97 以上	1.03 以下

W_{eng_HILS} : HILS 模擬走行のエンジン正側積算軸出力 (kWh)

$W_{eng_vehicle}$: 実機試験によるエンジン正側積算軸出力 (kWh)

FE_{HILS} : HILS 模擬走行の燃費値 (km/l)

$FE_{vehicle}$: 実機試験による燃費値 (km/l)

3.4.5.2 検証結果

(1) 車両 B

構築した HILS システムを用いて JE05 モードを模擬走行させ、実路上での実測値およびエンジン ECU 付 HILS システムの模擬走行値と比較した。車速、電動機トルク指令値、キャパシタ出力・電圧・電流およびエンジントルク指令値の時系列データを図 3.4.5-1 に示す。桃色が実測値、黒色がエンジン ECU 付 HILS の模擬走行値、黄緑色が標準 HEV モデルを用いた HILS 模擬走行値である。同図より、エンジン ECU 付と標準 HEV モデルの両 HILS は、キャパシタ電圧以外は、同様の挙動であることがわかる。キャパシタ電圧に差が生じた原因は、モデル標準化作業において、動力伝達系効率の計算を駆動/回生時で乗除切替るよう変更したためと思われる。また、実車と HILS を比較すると、電動機の挙動が異なる部分が若干あるものの、モード全体では同様の挙動であることがわかる。なお、実車と HILS とのアイドルリング時エンジントルク指令値（エンジン ECU 出力）の差は、エンジン ECU 付 HILS システムで実負荷として用いた燃料噴射ポンプが停止状態であることが原因と思われる（標準 HEV モデルを用いた HILS システムはエンジン ECU がないため、同指令値がエンジン ECU 付 HILS システムと同じになるように I/O モデルで設定している）。

図 3.4.5-2 は、実測値と標準 HEV モデルの HILS 模擬走行の JE05 モード一山について、相関を観たものである。車速、電動機およびエンジンの回転速度は決定係数 0.97 以上、また、電動機およびエンジンのトルク指令値およびキャパシタの決定係数は 0.88 以上となり、表 3.4.5-1 に示した許容値（案）を満足した。

図 3.4.5-3 は、実車の燃費を 1.000 として、HILS の燃費を比較したものである。エンジン ECU 付 HILS の燃費は、実車操作量使用時が 1.021、ドライバモデル使用時が 0.987 であったが、標準 HEV モデルを用いた HILS は、実車開度使用時が 0.980、ドライバモデル使用時が 0.979 となった。

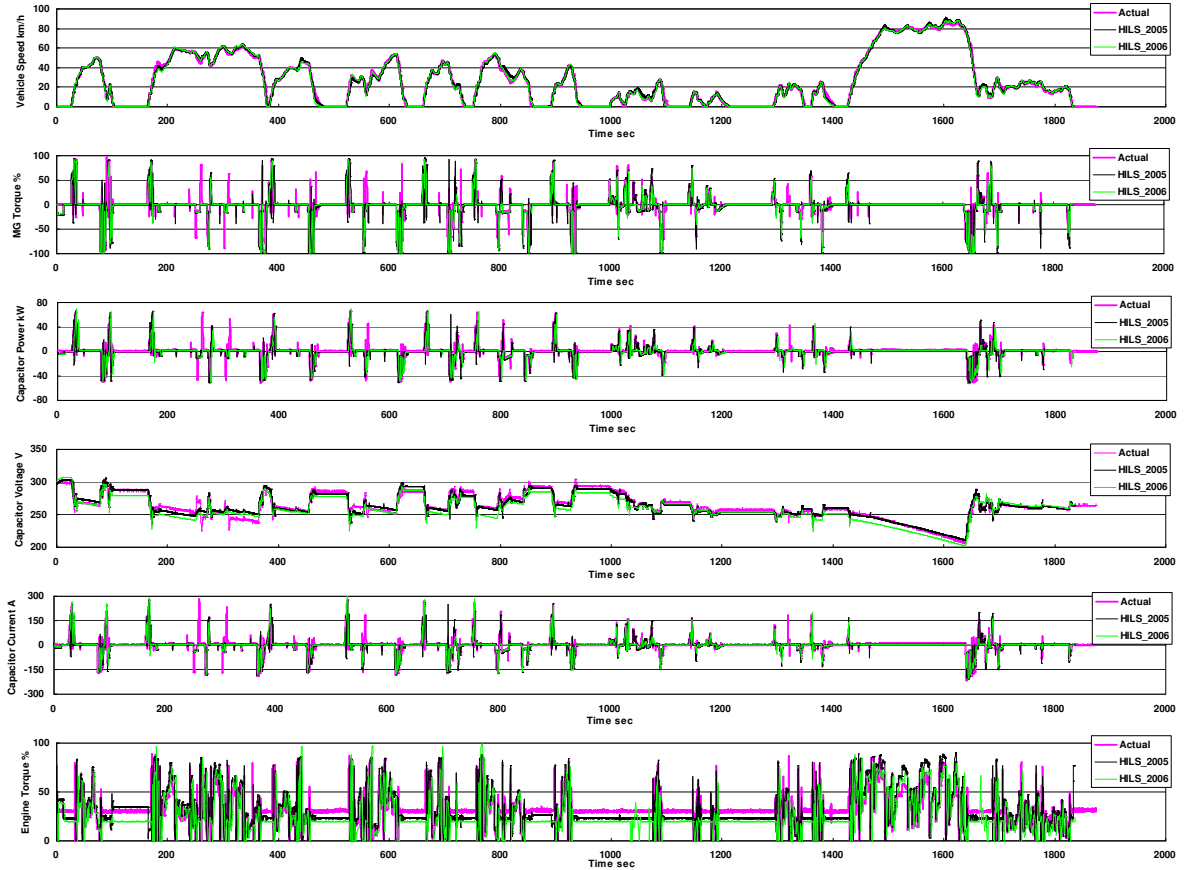


図 3.4.5-1 JE05 モードにおける HILS 模擬走行の挙動 (車両 B)

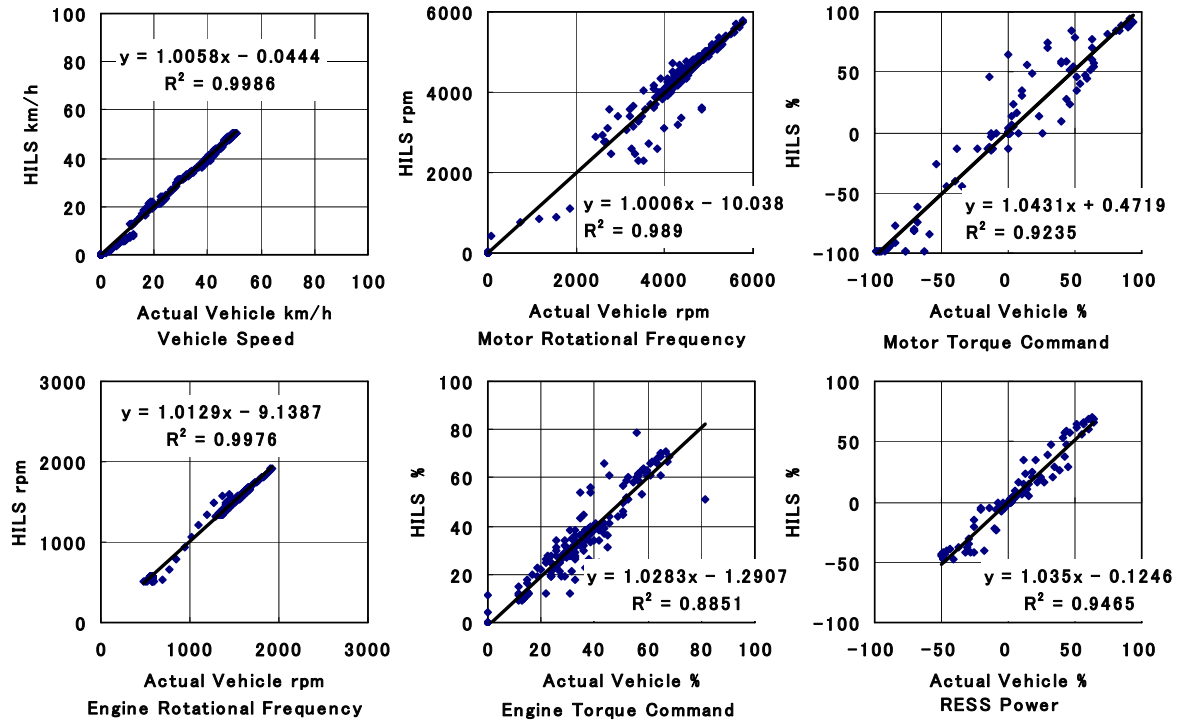


図 3.4.5-2 JE05 モード一山における実車と HILS 模擬走行の相関性 (車両 B)

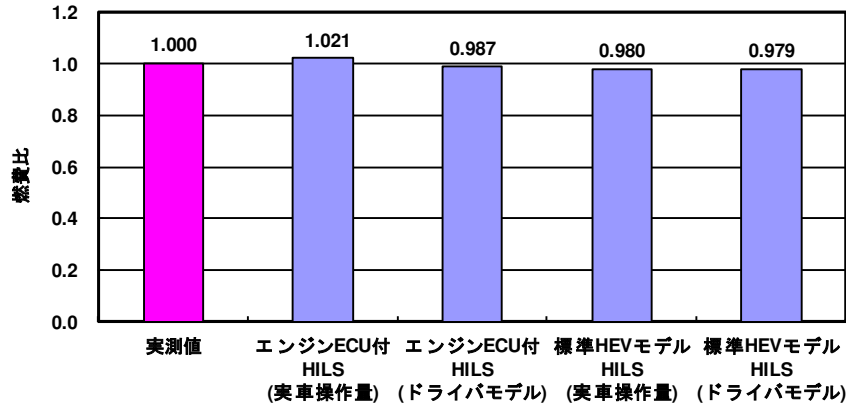


図 3.4.5-3 JE05 モードにおける HILS 模擬走行の燃費検証 (車両 B)

(2) 各社検証

重量車メーカ各社の協力を得て、車両 A、車両 C、車両 D および車両 E についても車両 B と同様に検証試験を行った。HILS の比較対照となる実車データは、車両 A、車両 C、車両 E が C/D 試験、車両 D がシステムベンチ試験により取得した。

JE05 モード一山の検証結果一覧を表 3.4.5-3 に示す。車速又はエンジン回転速度、電動機トルク・出力、エンジントルク・出力および RESS 出力の決定係数はいずれも許容値 (案) を満足した。JE05 モード全体の検証結果一覧を表 3.4.5-4 に示す。車速又はエンジン回転速度の決定係数、エンジン正側仕事および燃費の比率はいずれも許容値 (案) を満足した。エンジントルクの決定係数は許容値 (案) の 0.88 以上に足りない例があったが、アクセル開度や SOC、速度等の僅かな違いで制御が変化する HEV の特性上、試験時間が 1830 秒と長い JE05 モード全体検証では、決定係数の低下は避けられないと思われる。特に車両 E の決定係数が 0.821 と低くなっているが、この理由は車両 E がエンジン発電機を定点で作動させるタイプのシリーズ HEV であることによる。

以上より、標準パラレル HEV モデルが各車 HEV に適合し、試験法に必要であろう精度で実車を模擬可能であることを確認できた。また、ここで想定した許容値 (案) を HILS 検証試験法の許容値 (案) とした。

表 3.4.5-3 JE05 モード 1 山の決定係数の検証結果一覧

	車速又はエンジン回転速度	電動機		エンジン		RESS 出力
		トルク	出力	トルク	出力	
許容値(案)	0.97 以上	0.88 以上	0.88 以上	0.88 以上	0.88 以上	0.88 以上
車両 A	0.999	0.993	0.994	0.995	0.995	0.966
車両 B	0.999	0.924	0.947	0.885	0.908	0.947
車両 C	0.999	0.986	0.972	0.903	0.973	0.941
車両 D	0.998	0.919	—	0.914	—	0.938
車両 E	0.999	0.997	—	0.953	—	0.992

表 3.4.5-4 JE05 モード全体の決定係数，仕事および燃費の検証結果一覧

	車速又はエンジン 回転速度	エンジン トルク	エンジン 正側仕事	燃費値
	決定係数	決定係数	$W_{eng_HILS} / W_{eng_vehicle}$	$FE_{HILS} / FE_{vehicle}$
許容値(案)	0.97 以上	0.88 以上	0.97 以上	1.03 以下
車両 A	0.999	0.907	1.040	0.985
車両 B	0.997	0.831	1.028	0.979
車両 C	0.999	0.864	1.032	0.967
車両 D	0.989	0.917	0.988	1.011
車両 E	0.998	0.821	1.037	—

W_{eng_HILS} : HILS 模擬走行のエンジン正側積算軸出力 (kWh)

$W_{eng_vehicle}$: 実機試験によるエンジン正側積算軸出力 (kWh)

FE_{HILS} : HILS 模擬走行の燃費値 (km/l)

$FE_{vehicle}$: 実機試験による燃費値 (km/l)

3.4.6 HEV モデル標準化のまとめ

パラレル HEV モデルおよびシリーズ HEV モデルについて，型式認証用 HEV モデルとして提案することを前提に標準化を進めた。検討の結果，HILS システムにエンジン ECU は使用不要と判断し，ハイブリッド ECU と変速機 ECU を使用して構築することとした。国内重量車メーカー 4 社と相談・検討の上，4 種のパラレル HEV と 1 種のシリーズ HEV に対応できるよう HEV モデルを標準化した。国内重量車メーカー 4 社の協力により，標準 HEV モデル案を用いた HILS を構築して頂き，実測値との比較検証を行った結果，想定した許容値 (案) を満足した。同許容値 (案) を HILS 検証試験法の許容値 (案) とした。

3.5 HILS 模擬走行の精度検討

3.5.1 精度検討の目的

HEV においては、エンジンに加えて MG や発電機、RESS を使用するため、エネルギーパスが複雑になり、各要素の効率がエンジン仕事や燃費に及ぼす影響はそれぞれ異なってくると予想される。HILS 模擬走行の精度を確保するためには、その影響度を把握することが重要であることから、各要素の効率がエンジン仕事に及ぼす影響を調査した。

3.5.2 調査方法

各要素の効率がエンジン仕事や燃費に及ぼす影響度は HEV 方式によっても異なると予想される。そこで、表 3.5.2-1 に主要諸元を示すシリーズ HEV とパラレル HEV の重量車を対象に、バッテリー、MG、シリーズ HEV の発電機および終減速機の各要素効率の差異が JE05 モード走行時のエンジン仕事に及ぼす影響を調査した。ここでは HILS システムではなく、「HEV シミュレーション法」[90]のプログラムを用いて、MG については駆動側、回生側を単独で変化させた場合について、終減速機については、駆動側、回生側を同時に変化させた場合と、単独で変化させた場合の影響を調査した。

表 3.5.2-1 各要素効率のエンジン仕事への影響の調査対象車両

	ハイブリッド方式	シリーズ	パラレル
車両寸法	全長×全幅×全高 (mm)	10955×2490×3085	10675×2490×2900
	ホイールベース (mm)	5300	5200
車両重量	車両重量 (kg)	10953	10450
	車両総重量 (kg)	15078	14575
	半積重量 (kg)	13016	12513
	乗車定員 (人)	75	75
エンジン	燃料種類	軽油	軽油
	総排気量 (cc)	8201	7960
	最高出力 (kW/rpm)	165/2900	177/2500
	最大トルク (Nm/rpm)	588/1700	735/1200
変速機		固定段	5段手動
電動機	種類	三相交流誘動機	三相交流誘動機
	個数	2	1
	最高出力 (kW/rpm)	150/10000	41/2000
	最大トルク (Nm/rpm)	360/4000	500/600
発電機	種類	三相交流永久磁石式同期機	-
	最高出力 (kW/rpm)	100/3000	-
バッテリー	種類	Li-ion/バッテリー	NiMH/バッテリー
	積載個数	170	21
	電圧 (Ah/Hr/V)	24/5/3.6	95/5/12
	総電圧 (V)	612	252

3.5.3 調査結果

各要素部品効率の差異がシリーズ HEV およびパラレル HEV のエンジン仕事に及ぼす影響を、それぞれ図 3.5.3-1 および図 3.5.3-2 に示す。同図において、自動車メーカーより提供された効率を設定した際のデータ点を、効率の増減率 0%，エンジン仕事 100%としている。効率は、RESS、MG および発電機についてはマップで、終減速機については固定値で与えた。図中のプロットは、自動車メーカーより提供された効率を設定した際の平均効率を基準値（増減率 0%）とし、効率を

固定値で振った際のエンジン仕事の比である。同図より以下のことが言える。

- シリーズ HEV では、エンジン仕事への影響が大きい順に、RESS 効率>MG 駆動側効率>終減速機駆動側効率>発電機効率>MG 回生側効率>終減速機回生側効率であった。
- パラレル HEV では、エンジン仕事への影響が大きい順に、終減速機駆動側効率>RESS 効率>終減速機回生側効率>MG 駆動側効率>MG 回生側効率であった。
- RESS 効率の影響は、シリーズ HEV ではパラレル HEV よりも 2 倍以上大きかった。
- MG 効率の影響は、シリーズ HEV では駆動側の方が回生側よりも 2 倍以上大きかったが、パラレル HEV では大きな差がなかった。
- 終減速機効率の影響は、駆動側の方が回生側よりも大きく、シリーズ HEV では 3 倍以上、パラレル HEV では 5 倍以上であった。

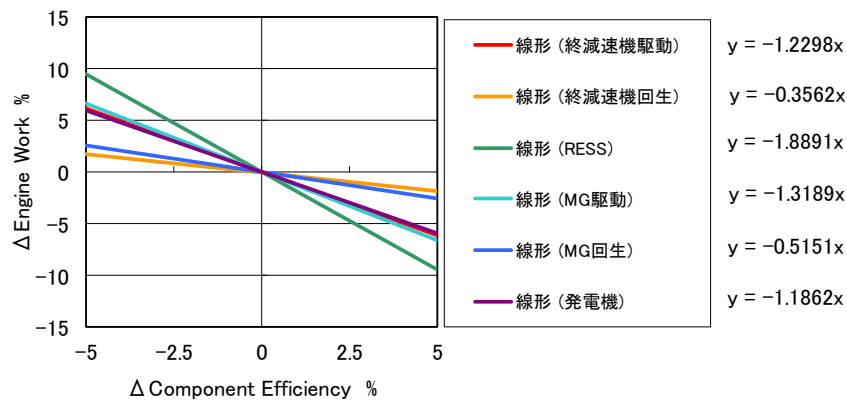


図 3.5.3-1 各要素効率がシリーズ HEV のエンジン仕事に及ぼす影響

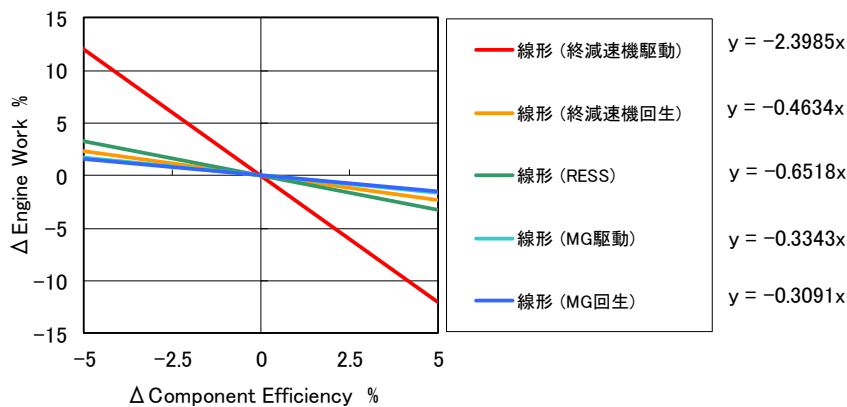


図 3.5.3-2 各要素効率がパラレル HEV のエンジン仕事に及ぼす影響

3.5.4 考察

各要素の効率がエンジン仕事に及ぼす影響は、シリーズ、パラレルの HEV 方式によって大きな差が見られた。これは、図 3.5.4-1 に示すように、それぞれの HEV 方式のエネルギーフローが大きく異なるためである。同図では、グレーの矢印が電気駆動、黒の矢印が電気回生、ハッチン

グの矢印が機械駆動のエネルギーフローをそれぞれ示している。

SOC 一定管理型制御のシリーズ HEV では、発電したエネルギーの多くを一旦バッテリーに充電した後、モータを介して駆動する。減速時は、モータおよびバッテリーの出力が大きいため、減速エネルギーの多くを回生可能である。このため、バッテリー、モータおよび終減速機を通過するエネルギー量が大きくなる。すなわち、これら 3 種の要素部品の効率がエンジン仕事に及ぼす影響が大きくなる。

一方、パラレル HEV では、モータとバッテリーの出力が小さく、エンジン出力の多くを機械的に用いて駆動する。そのため、モータとバッテリーを通過するエネルギー量はシリーズ HEV よりも少なくなり、これら 2 種の要素部品の効率がエンジン仕事に及ぼす影響は小さくなる。また、モータ出力が小さく、回生トルクの最大値がモータ出力で制限されているため、終減速機回生側効率が変化しても回生エネルギーの絶対値は大きく変化せず、エンジン仕事への影響が小さくなる。

3.5.5 HILS 模擬走行の精度検討のまとめ

以上のとおり、HEV では、通過するエネルギーの大きな要素ほど、入力するパラメータの効率がエンジン仕事すなわち燃費・排出ガスに及ぼす影響が大きくなることがわかった。シリーズ方式に代表される電気駆動比率の高い HEV ほど、RESS や MG の効率を精度良く取得し、モデルに設定する必要がある。

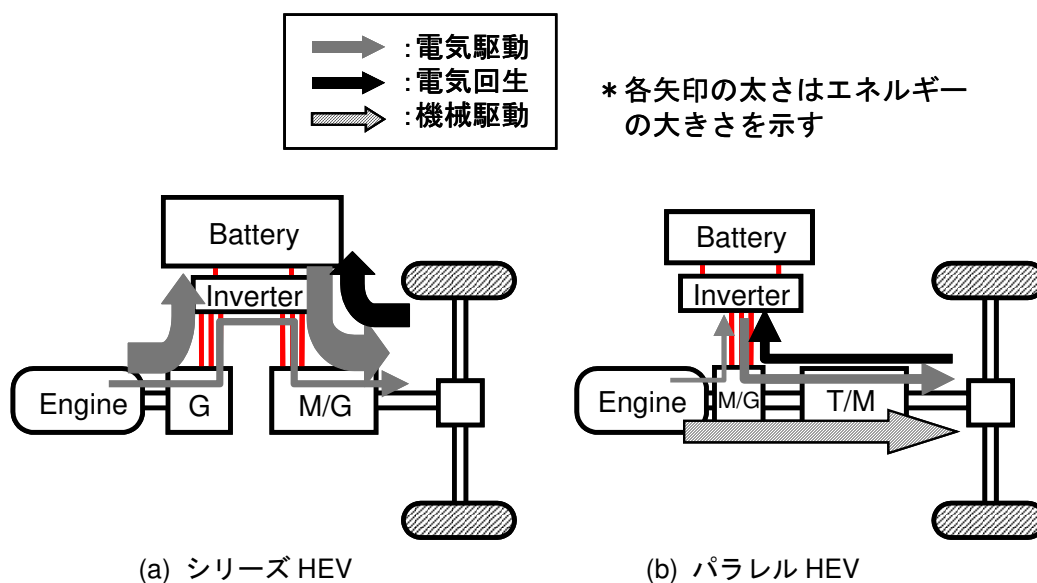


図 3.5.4-1 各 HEV のエネルギーフローイメージ

3.6 SILS 用基準 ECU モデルの作成

3.6.1 基準 ECU モデル作成の目的

HILS システムにおいては、ソフトウェア (MATLAB/Simulink) のバージョンやハードウェア (DSP) を変更した場合、標準 HEV モデルが正しく動作しない可能性がある。動作環境の確認を行うためには、標準 HEV モデルに基準 ECU モデルと基準パラメータを組合わせて Software In the Loop Simulation (SILS) を行い、その計算値がマスター HILS システムと同一となるかどうか確認する方法が良いと思われる。そこで、シリーズとパラレルの各標準 HEV モデルに使用する基準 ECU モデルを作成した。

3.6.2 SILS 用基準 ECU モデル

3.6.2.1 基準パラレル ECU モデル

(1) 基準パラレル ECU モデルの作成

基準 ECU モデルの使用目的は上記のとおりであるので、車両の基本動作を行えばよく、実 ECU のような緻密な制御は不要である。そこで、基準パラレル ECU モデルは、次のコンセプトで作成した。

- ・ PTO 利用型 (FC/LC 付) を想定 (全機能を検証する必要があるため)
- ・ 機械式自動変速機仕様 (速度基準で変速操作)
- ・ 積極的な発電による SOC 制御は行わない (長距離走行を想定していないため)
- ・ ある特定の加減速パターン (60 秒以内) が得られるよう電動機とエンジンのトルク指令値発生回路を設ける。

作成した基準パラレル ECU モデルを図 3.6.2-1 に示す。エンジン回転速度が 800rpm を超えるとクラッチを接続し、1000rpm 以上ではロックアップする。また、速度が 20, 30, 40, 50km/h を超えるにしたがって、2 速から 3, 4, 5, 6 速へとシフトアップする設定とした。

基準パラレル ECU モデルは、図 3.6.2-2 に示すように標準 HEV モデルに付属する形とし、パラメータファイルの設定によって実 ECU と切替え出来るようにした。

<ルート部>

<ABC & Shift Control部>

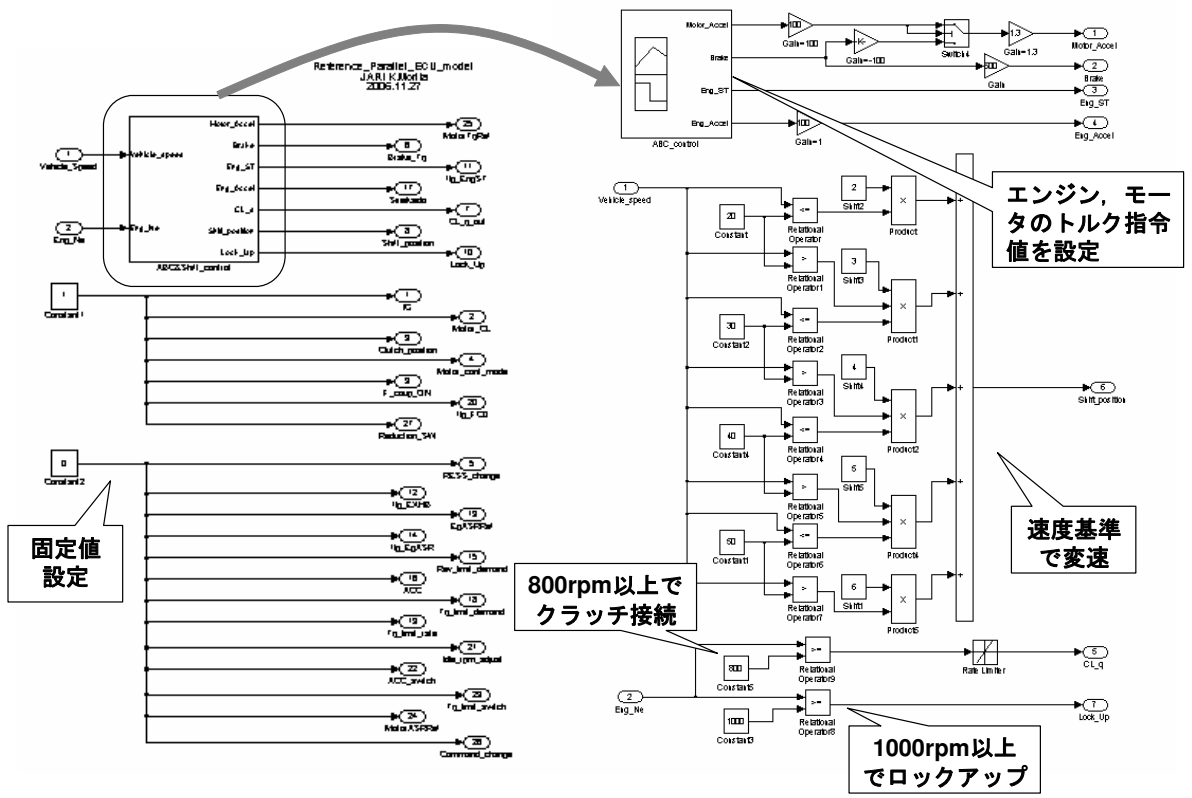


図 3.6.2-1 基準平行 ECU モデル

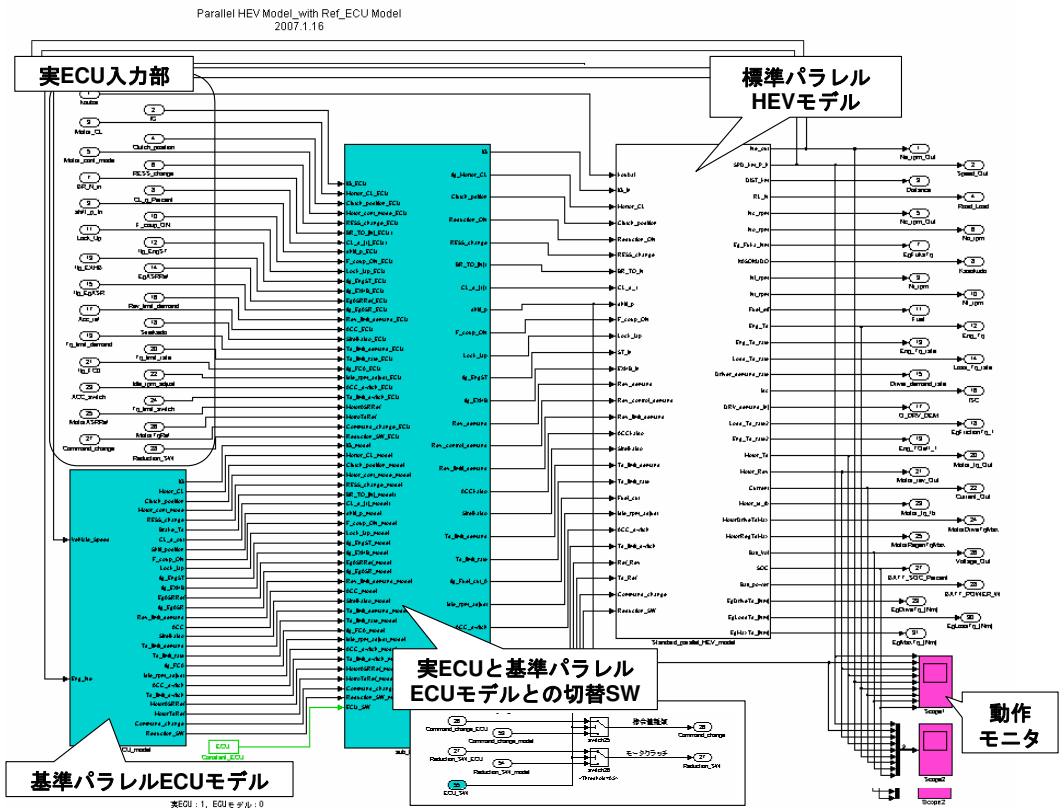


図 3.6.2-2 実 ECU と基準平行 ECU モデルの切替方法

(2) パラレル HEV モデル用 SILS 基準パラメータ

基準パラメータとしては車両質量 6 トンのバッテリー搭載 HEV を想定し、HEV モデルの各要素について現実の値からかけ離れない範囲の仮想値とした[96].

(3) パラレル HEV モデル用 SILS 計算結果

作成した基準パラレル ECU モデルと基準パラメータを標準パラレル HEV モデルに組合わせ、本研究で用いたものと同じ HILS ハードウェア（富士通テン CRAMAS）を所有する審査機関の協力を得て SILS 計算値を比較した。その時系列データを図 3.6.2-3 に示す。上から順に、車速、シフト位置、電動機回転・トルク、エンジン回転・トルク、バッテリー電流・電圧・SOC である。両者の結果は重なっていることがわかる。また、挙動としては、電動機のみで発進、途中でエンジンを始動し、エンジンで駆動。回生ブレーキによって制動している。バッテリー SOC と連動してバッテリー電圧も変化している。また、車速基準でシフトアップ/ダウンを行っており、パラレル HEV の基本動作を模擬していることがわかる。

図 3.6.2-4 は、0.1 秒から 45 秒までの 0.1 秒毎の両者データについて相関性を示したものである。両者の結果は完全に一致したため、全ての評価項目について切片がゼロで決定係数と傾きが 1.0000 となった。なお、シフト位置については、離散的なデータとなるため、相関性の評価項目から除いた。

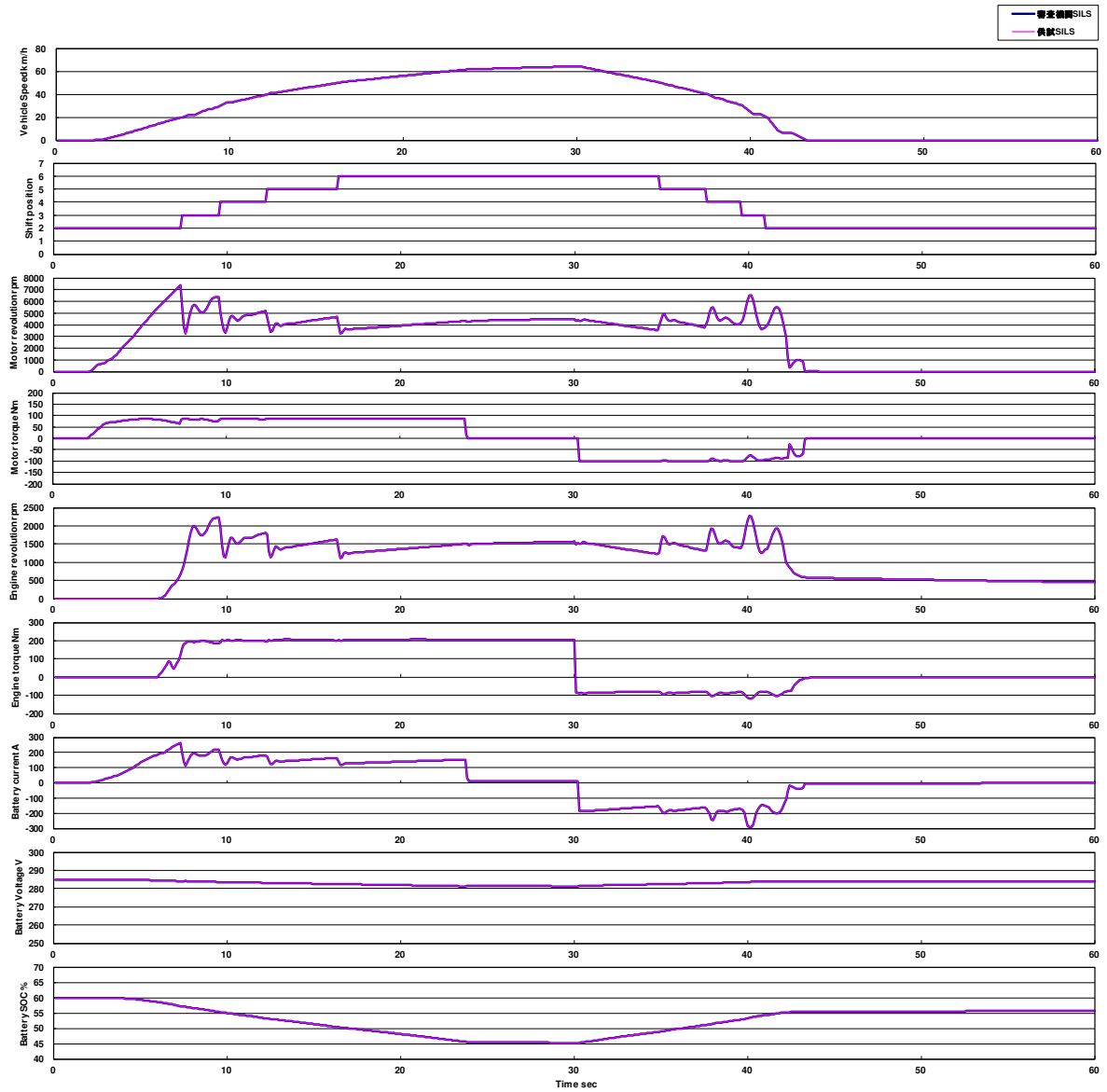


図 3.6.2-3 供試 SILS と審査機関の平行 HEV モデル SILS 計算時系列データ

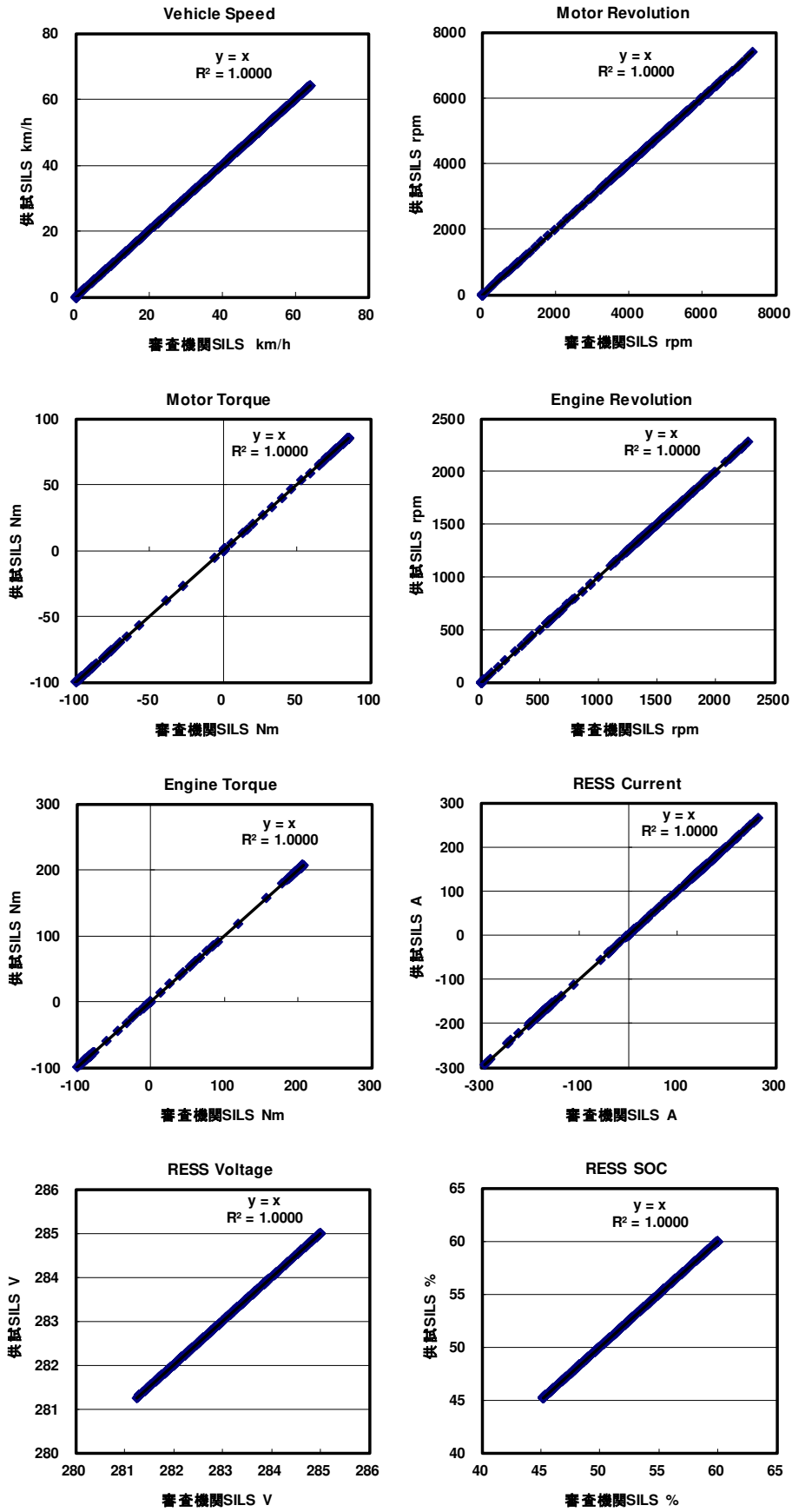


図 3.6.2-4 供試 SILS と審査機関の平行 HEV モデル SILS の相関性

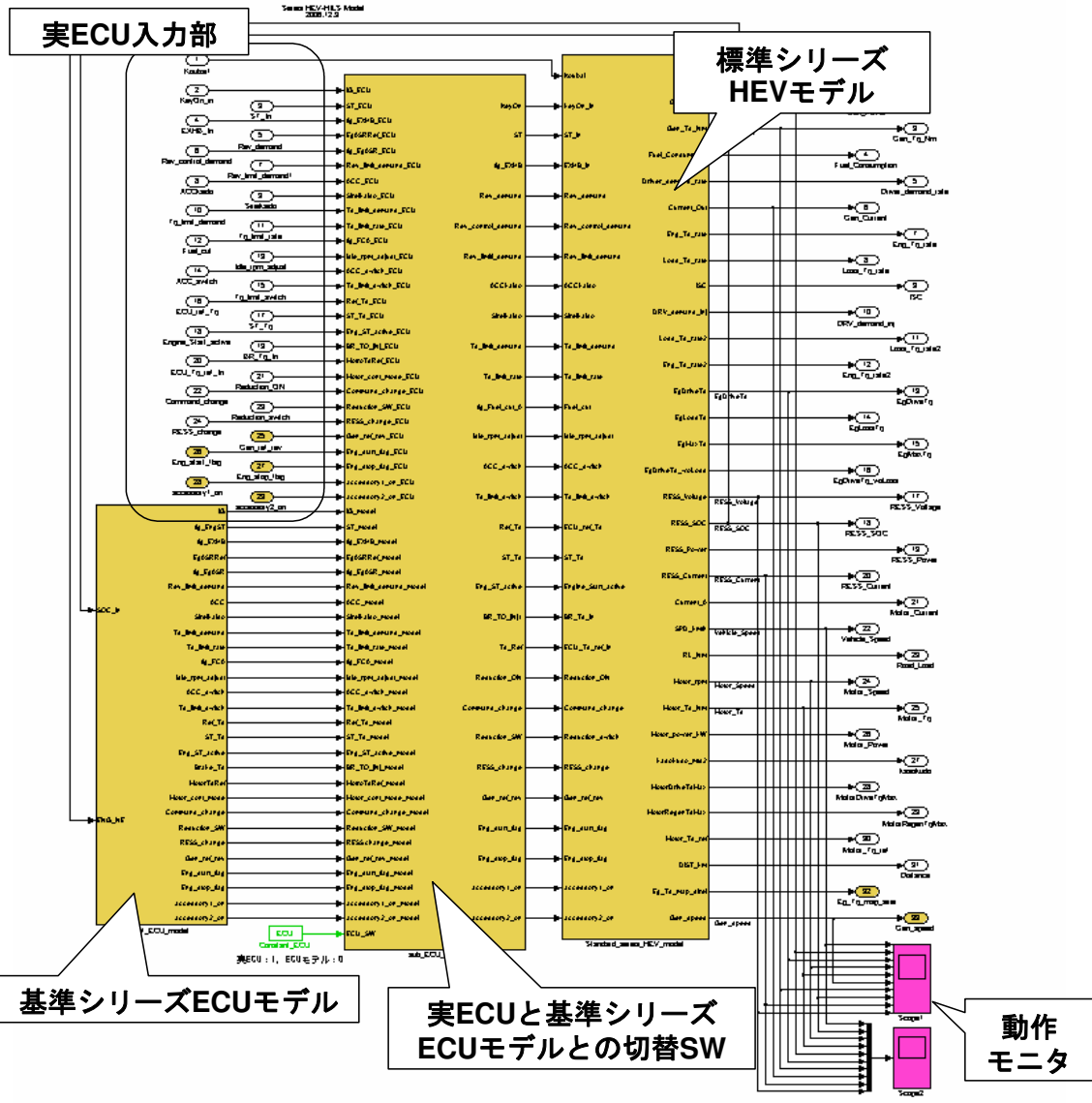


図 3.6.2-6 実 ECU と標準シリーズ ECU モデルの切替方法

(2) シリーズ HEV モデル用 SILS 基準パラメータ

基準パラメータとしては車両質量 12 トンのバッテリー搭載 HEV を想定し、HEV モデルの各要素について現実の値からかけ離れない範囲の仮想値とした[96].

(3) シリーズ HEV モデル用 SILS 基準計算結果

作成した基準シリーズ ECU モデルと基準パラメータを標準パラレル HEV モデルに組合わせ、本研究で用いたものと同じ HILS ハードウェア（富士通テン CRAMAS）を所有する審査機関の協力を得て SILS 計算値を比較した。その時系列データを図 3.6.2-7 に示す。上から順に、車速、電動機回転・トルク、エンジン回転・トルク、発電機回転・トルク、バッテリー電流・電圧・SOC である。両者の結果は重なっていることがわかる。また、挙動としては、初期 SOC を 60% に設定してあるため、バッテリーの電力のみで発進、SOC が 52% まで低下するとエンジン発電機が始動し、設定された条件（エンジン回転速度 1500rpm、発電機トルク 120Nm）で発電する。経過時

間 36 秒付近で SOC が再び 60%に上昇したため、エンジン発電機は停止している。エンジンで駆動。経過時間 44 秒付近から回生ブレーキによって制動している。バッテリー SOC の変動に伴い、バッテリー電圧も変化していることがわかる。

図 3.6.2-8 は、0.1 秒から 60 秒までの 0.1 秒毎の両者データについて相関性を示したものである。パラレルの場合とは異なり両者の結果は完全には一致せず、切片がゼロにならない要素も存在したが、誤差は最大値の 0.001%以下であった。また、決定係数と傾きは、小数点以下 4 桁までの評価では、全ての評価項目について 1.0000 となった。

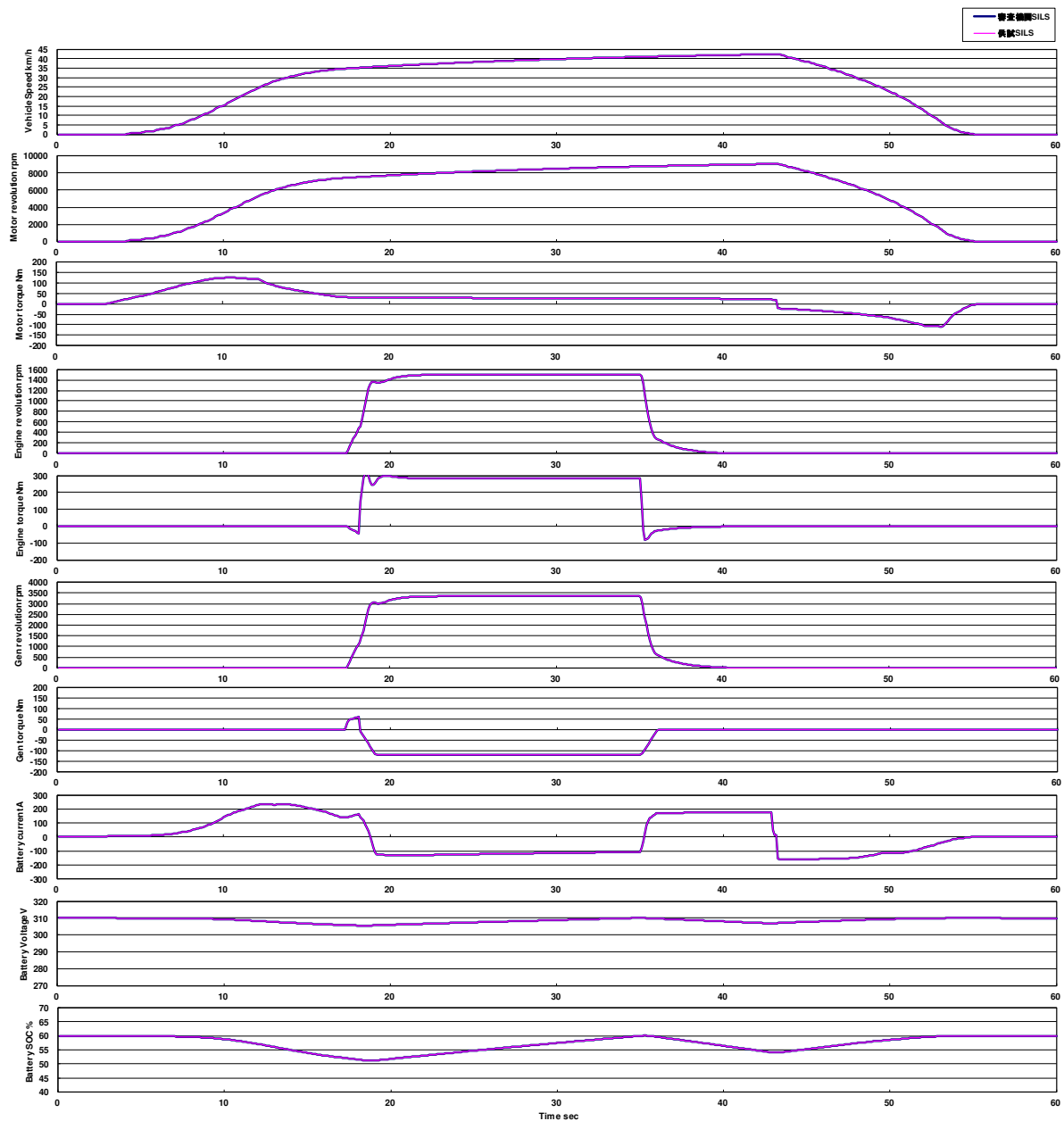


図 3.6.2-7 供試 SILS と審査機関のシリーズ HEV モデル SILS 計算時系列データ

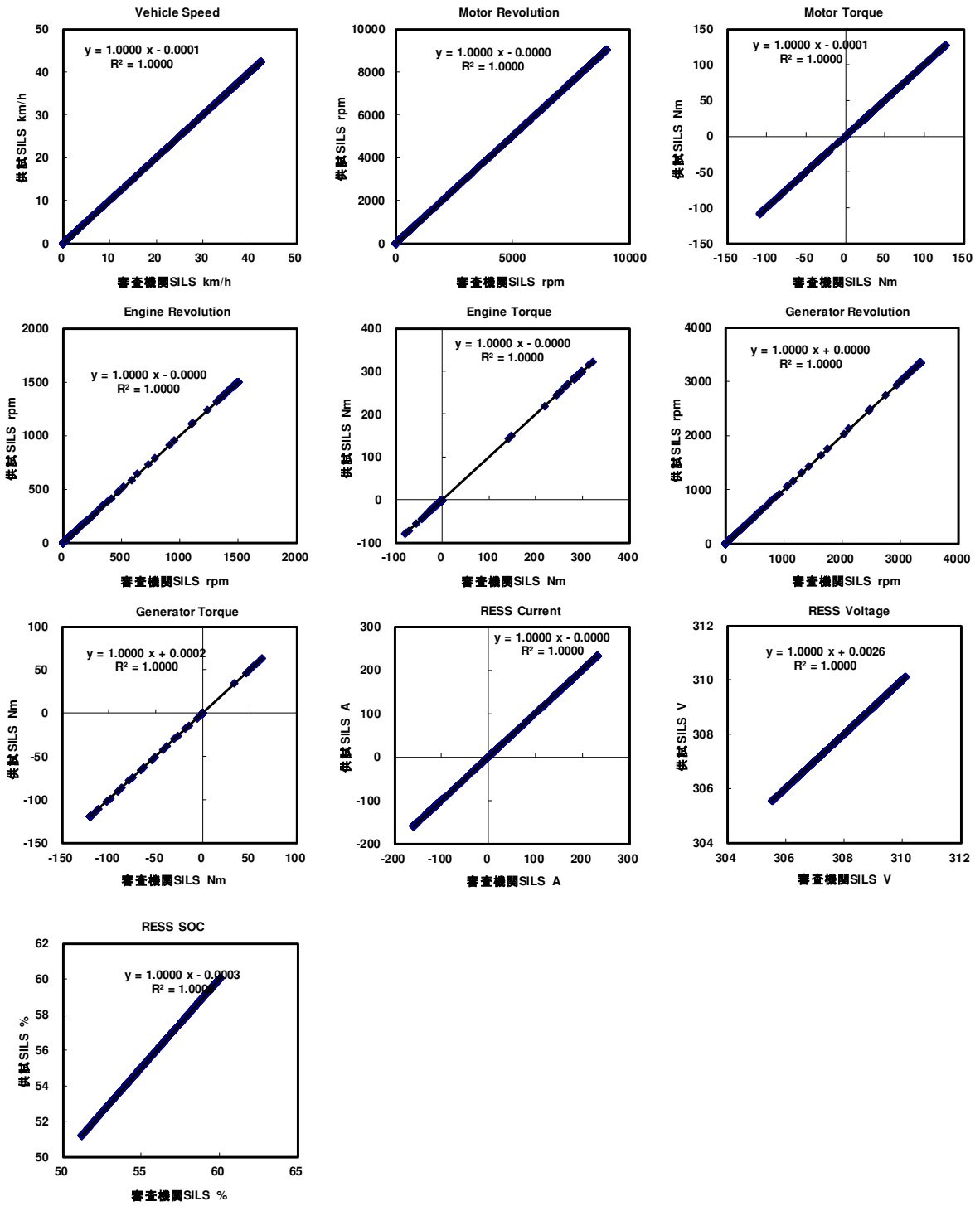


図 3.6.2-8 供試 SILS と審査機関のシリーズ HEV モデル SILS の相関性

3.6.3 SILS 検証の許容値（案）

パラレルおよびシリーズ HEV モデルの SILS 計算結果と認証試験に求められる模擬走行精度から、認証試験の際の許容値（案）を表 3.6.3-1 のように設定した。

表 3.6.3-1 SILS 用基準 ECU モデルによる認証用 HEV モデルの動作確認の許容値（案）

検証項目	判定基準		
	傾き	切片	決定係数
車速, 電動機回転速度・トルク, RESS 電圧・電流・充電状態, エンジン回転速度・トルク	0.9995~ 1.0005	最大値の ±0.05%以下	0.995 以上

3.6.4 SILS 用基準 ECU モデルの作成のまとめ

HILS 動作環境を SILS で確認するために、シリーズとパラレルの各標準 HEV モデルに使用する基準 ECU モデルを作成した。基準 ECU モデルと基準パラメータを組合わせて SILS 計算を行い、その計算値が審査機関のマスター HILS システムと同一となることを確認した上で、SILS 検証の許容値（案）を設定した。

3.7 HILS 試験手順確立

3.7.1 概要

前節までで、HILS を構築した上でその模擬走行精度を検証し、HEV モデル標準化、基準 ECU モデルを用いた SILS による HILS ハードウェア検証まで済んだことから、HILS 法を認証試験として利用するための試験手順（案）をまとめた。HILS 法の概要は図 3.7.1-1 に示すイメージで、その試験手順（案）は図 3.7.1-2 に示すフローチャートのとおりとなる。以降、フローチャートに沿って説明する。

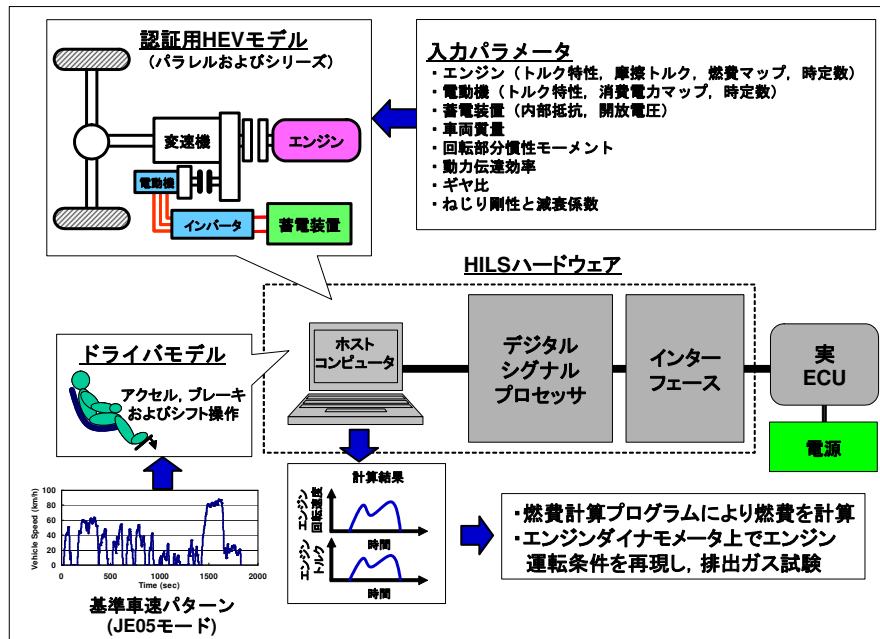


図 3.7.1-1 HILS 法の概要イメージ

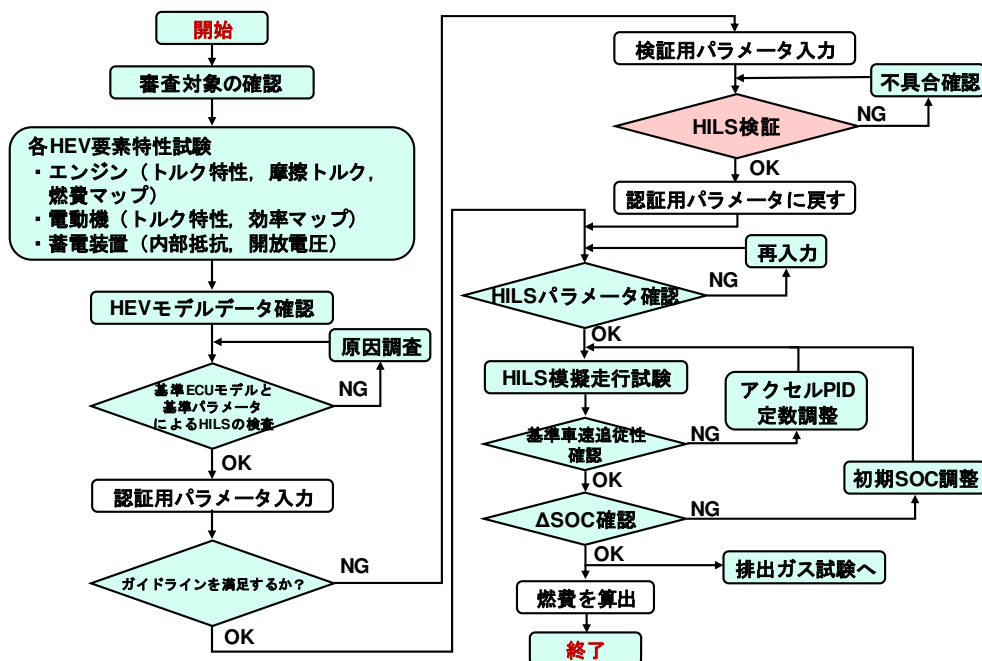


図 3.7.1-2 HILS 法を用いた認証試験のフロー（案）

3.7.2 要素試験法（案）

(1) エンジンのトルク特性・燃料消費率マップ測定

実 ECU からの指令値によってエンジンモデルを作動させる必要があることから、回転速度を 10 点以上、指令値を 8 点以上に変化させてトルクを測定し、指令値に対する実トルクマップを作成する。また、回転速度を 6 点以上、トルクを 5 点以上に変化させて燃料流量を測定し、マップを作成する（図 3.7.2-1）。試験法は、「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示」（平成 14 年国土交通省告示第 619 号）別添 41「重量車排出ガスの測定方法」を基に作成した。

(2) MG のトルク特性・電力消費率マップ測定

エンジンモデルと同様、実 ECU からの指令値によって MG モデルを作動させる必要があることから、回転速度を 6 点以上、指令値を 6 点以上に変化させてトルクおよび電力消費率を測定し、指令値に対する実トルクマップを作成する（図 3.7.2-2）。試験法は、JIS D 1302「電気自動車－電動機－最高出力試験方法」を基に作成した。

(3) RESS の内部抵抗・解放電圧特性測定

ニッケル水素電池あるいはリチウムイオン電池については、試験で使用する範囲で SOC を 3 水準以上変化させて電流－電圧特性試験を行い、直流内部抵抗と開放電圧を求める（図 3.7.2-3）。試験法は、JEVS D 713「ハイブリッド電気自動車用密閉型ニッケル水素電池の出力密度および入力密度試験方法」を基に作成した。なお、RESS モデルは切替機能により電池あるいはキャパシタのどちらにも対応するが、研究当時自動車キャパシタについては基本となる試験法が存在しないため、HILS 用の試験法を設定しなかった。

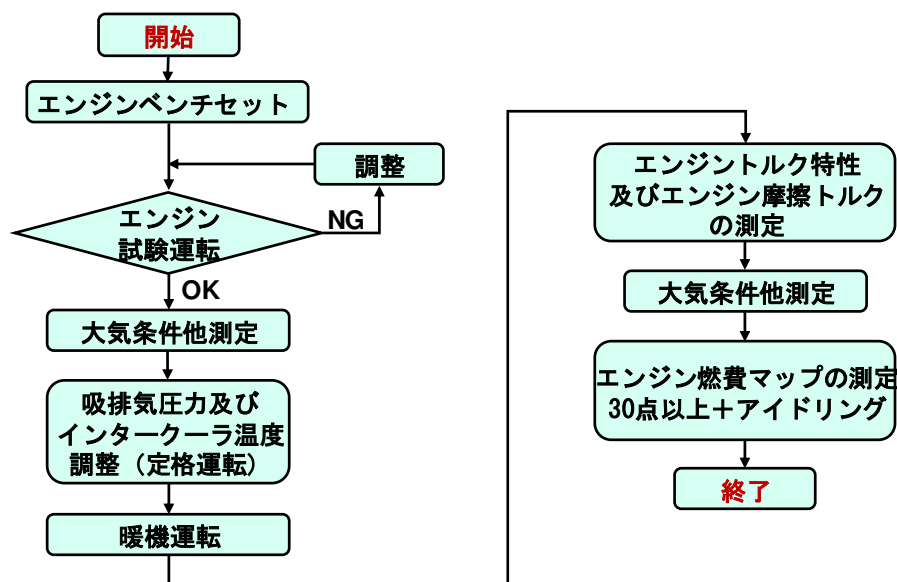


図 3.7.2-1 エンジンのトルク特性・燃料消費率マップ測定フロー

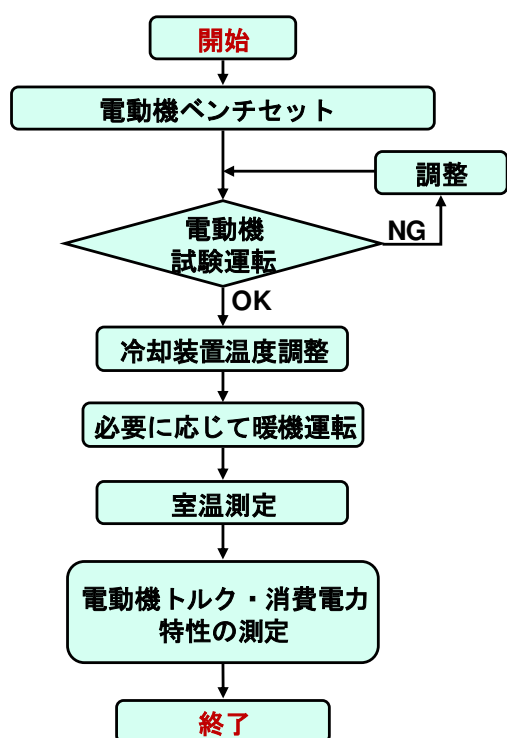


図 3.7.2-2 MG のトルク特性・電力消費率
マップ測定フロー

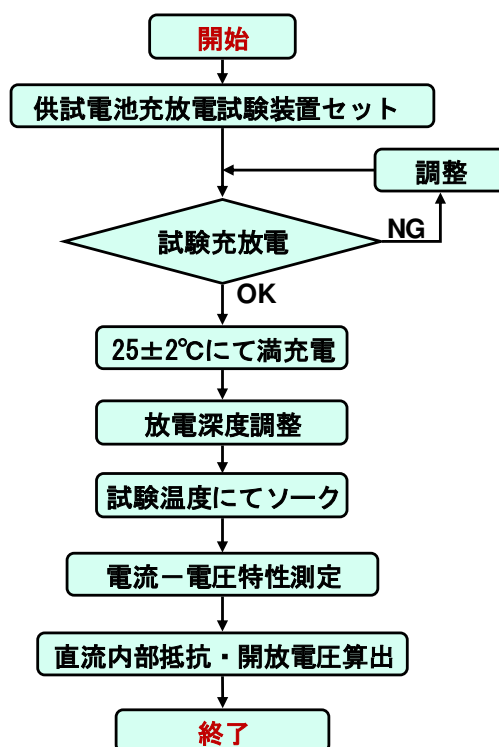


図 3.7.2-3 RESS の内部抵抗・解放電圧特性
測定フロー

3.7.3 SILS による HEV モデルおよび動作環境の検証

使用する標準 HEV モデルおよびモデル動作環境（ソフトおよびハードウェア）を検証するために、基準 ECU モデルを標準 HEV モデルに組合わせて SILS 計算を行い、得られた結果が公的機関のマスターデータと同等（表 3.6.3-1 の許容値内）であることを確認する。

3.7.4 HILS 模擬走行精度の検証

HILS システムと実機（車両あるいは HEV システム）との同等性を確認する必要がある場合、HILS 模擬走行値と実測値を比較し、第 3.4 節で設定した許容値内であることを確認する（図 3.7.4-1）。ここで、実測値は、C/D 試験、システムベンチ試験あるいはこれらと同等の他の試験方法により取得する。また、JE05 モード全体でのエンジントルクの決定係数は下記のとおり扱うものとした。

エンジントルクの決定係数は、第 3.7.6 項の排出ガス試験を用いる場合に検証の対象とし、第 3.7.5 項の燃費試験を用いる場合には検証を要しない。なお、エンジントルクの同決定係数が 0.88 未満の場合であっても、車速またはエンジン回転速度の決定係数並びにエンジン正側仕事および燃費値の許容値を満たし、かつ、次のいずれかの事項に該当する場合は、検証がなされたものとみなす。

- (1) 第 3.7.6 項の排出ガス試験により測定した排出ガス値が、次のいずれかの条件を満たす場合
- 実機試験により測定した排出ガス値と同等と認められる場合
 - 実機試験により求めたエンジン単体の負荷条件をエンジンベンチで再現して実測した排出ガ

ス値と同等と認められる場合

(2) シリーズ HEV において、発電時のエンジン回転速度及び軸トルクが定点運転の場合

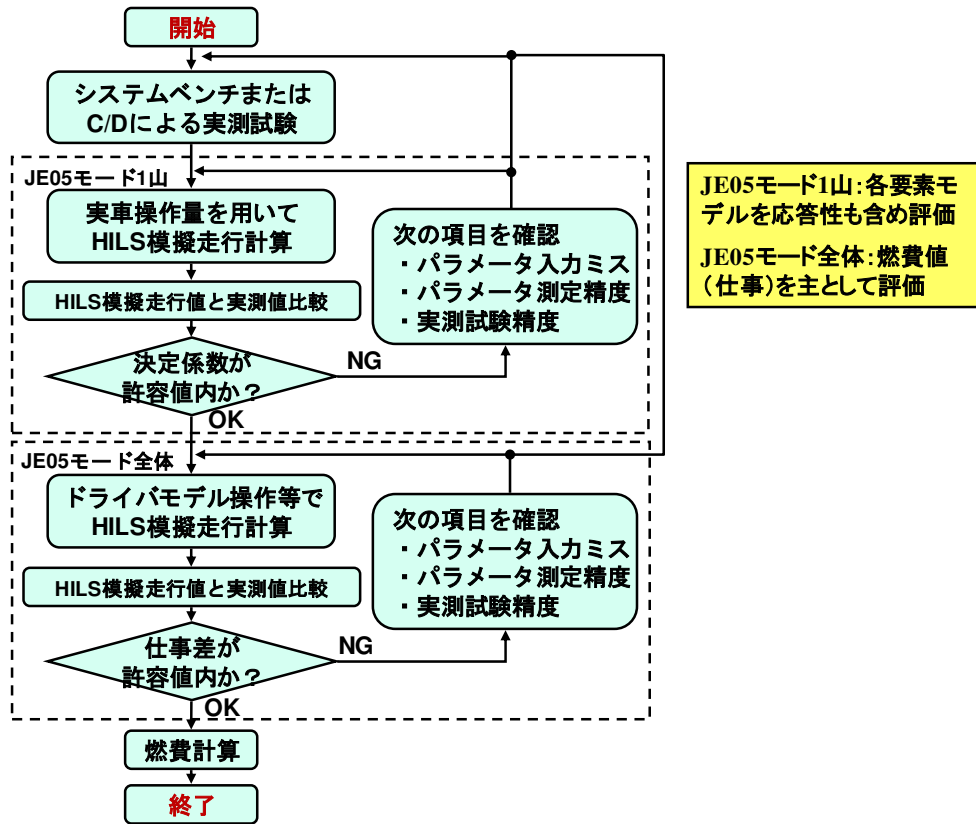


図 3.7.4-1 HILS 模擬走行の検証フロー

3.7.5 燃費試験

3.7.5.1 HILS 模擬走行

燃費試験用のパラメータを HILS に設定して模擬走行を行い、エンジン負荷条件を求める (図 3.7.1-2)。模擬走行における速度及び時間の許容誤差は、国自環第 280 号「シャシダイナモメータによる JE05 モード排出ガス測定方法」と同じ (各走行モードのあらゆる時点において、速度については±2.0 km/h 以内とし、かつ、時間については±1.0 秒以内) とした。また、 ΔSOC の影響を無視できるレベルに抑えるため、消費燃料のエネルギーに対する電気量収支のエネルギー換算値の割合が以下の式を満たすこととした。

$$|\Delta E / C| < 0.003 \quad (3-11)$$

$$\Delta E = \Delta Ah \times V_{nominal} \times 3600 \quad (3-12)$$

$$C = Q \times \rho \times Hu \quad (3-13)$$

- ΔE : 電気量収支エネルギー換算値 (J)
- C : 積算燃料消費量エネルギー換算値 (J)
- ΔAh : 電気量収支 (Ah)
- $V_{nominal}$: 定格電圧 (V)

- Q : 積算燃料消費量 (l)
 P : 比重 (kg/l)
 Hu : 低位発熱量 (J/kg)

3.7.5.2 燃費の算出

HILS 模擬走行によって得られた 0.2 秒以下毎のエンジン負荷条件と定常の燃料流量マップを、「燃費計算補助プログラム」に入力し、燃費を算出する。同プログラムは、従来車試験法の変換プログラム[93]を基に作成したもので、下記の特徴を有する。

- 車速およびエンジン負荷条件の時系列データは、任意の時間ステップ入力可。
- アイドリング燃料流量の測定値は 1 点のみであるが、HILS で求めたエンジン負荷条件は実 ECU を使用することから僅かに変動する。この変動が燃費ばらつきの原因となるのを防止するため、式 (3-14) で定義される正規化エンジン回転速度が、加速走行時は 5%未満、減速走行時は 4%未満において一律アイドリング燃料流量としている。これは、従来車燃費試験法と同様の判定基準である。
- HEV の特長であるアイドリングストップに対応するため、エンジン回転速度が閾値（現状 10 rpm に設定）以下の場合にはエンジン停止状態（燃料カット）とする。

$$\text{正規化エンジン回転速度} = (\text{エンジン回転速度} - \text{アイドリングエンジン回転速度}) / (\text{定格エンジン回転速度} - \text{アイドリングエンジン回転速度}) \quad (3-14)$$

3.7.6 排出ガス試験

3.7.6.1 HILS 模擬走行

排出ガス試験用のパラメータを HILS に設定して模擬走行を行い、エンジン負荷条件を求める（図 3.7.6-1）。模擬走行における速度及び時間の許容誤差は燃費試験と同じである。ΔSOC の許容値は、排出ガス試験では必ずしも燃費を測定しないことから、ISO 23274 を参考に式 (3-15) のように設定した。右辺を 0.03 としたのは、エンジン正側積算軸出力が、エンジン熱効率を考慮すると積算燃料消費量エネルギーの約 3 割に相当するためである。

$$|\Delta E / W_{eng_ref}| < 0.03 \quad (3-15)$$

$$\Delta E = \Delta Ah \times V_{nominal} \quad (3-16)$$

ΔE : 電気量収支エネルギー換算値 (kWh)

ΔAh : 電気量収支 (Ah)

$V_{nominal}$: 定格電圧 (V)

W_{eng_ref} : エンジン正側積算軸出力 (kWh)

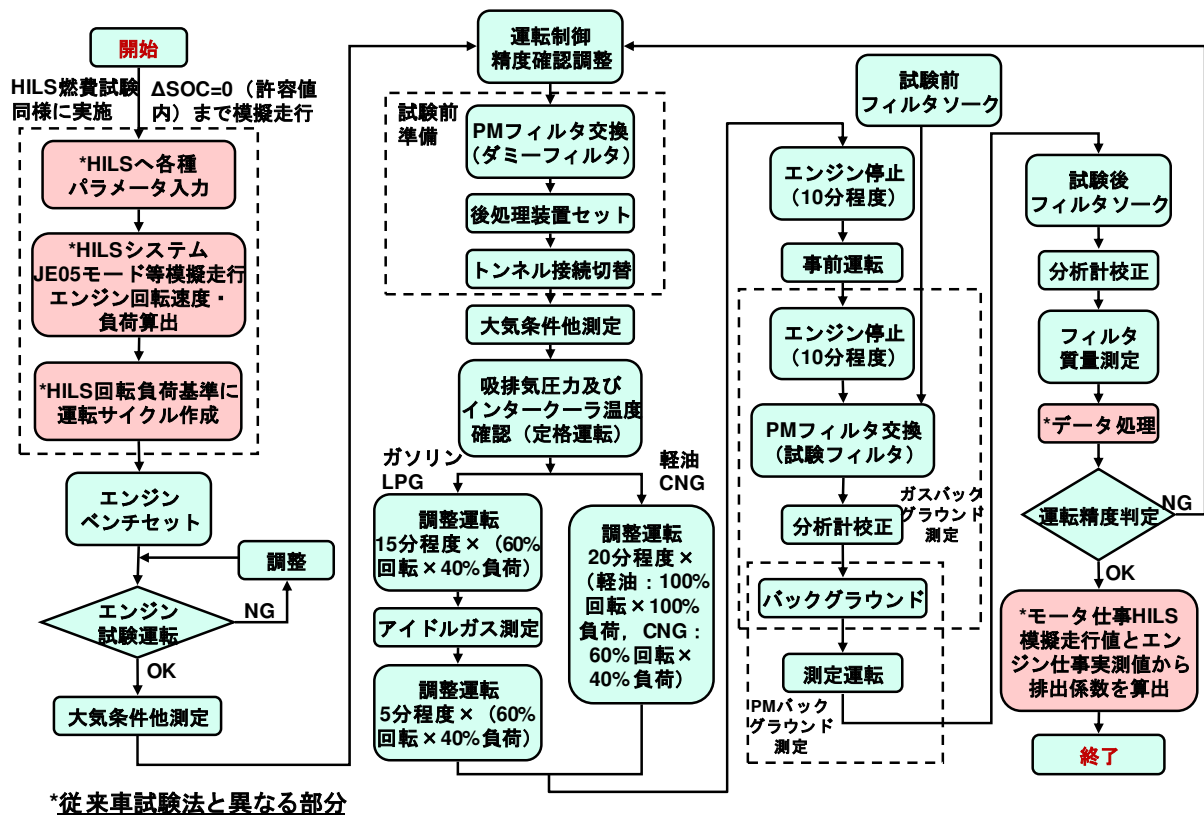


図 3.7.6-1 HILS による排出ガス試験フロー (案)

3.7.6.2 排出ガス測定

HILS 模擬走行によるエンジン負荷条件を 1 Hz で記録し、排出ガス試験の運転サイクルとする。これを E/D 上で再現し、従来車と同様、エンジン単体で排出ガス試験を行う。E/D 上で許容する運転誤差は、シリーズ HEV で発電時のエンジン回転速度および軸トルクが定点運転の場合を除き、従来車 (HD-ICEV) 排出ガス試験法と同様の値とした。

従来車の排出係数 (g/kWh) は、E/D 上で運転した際のエンジン正側積算軸出力当たりの排出ガス量で表示される。したがって、排出ガス量がエンジン正側積算軸出力に比例すると仮定した場合、E/D 上の運転誤差は打ち消される。一方、HEV の排出係数は、HEV システム正側積算軸出力当たりの排出ガス量で表示される。そこで、E/D 上の運転誤差によって実力よりも低い排出係数とならないよう、以下の式で補正することとした。

< $W_{eng_act} < W_{eng_ref}$ の場合 >

$$W_{sys} = W_{sys_ref} \times W_{eng_act} / W_{eng_ref} \quad (3-17)$$

< $W_{eng_act} \geq W_{eng_ref}$ の場合 >

$$W_{sys} = W_{sys_ref} \quad (3-18)$$

W_{sys} : ハイブリッドシステム正側積算軸出力 (kWh)

W_{sys_ref} : HILS システムによるハイブリッドシステム正側積算軸出力 (kWh)

W_{eng_act} : 測定運転におけるエンジン正側積算軸出力 (kWh)

W_{eng_ref} : 排出ガス試験の運転サイクルにおけるエンジン正側積算軸出力 (kWh)

3.7.7 HILS 試験手順確立のまとめ

HILS を用いた HD-HEV 用の燃費・排出ガス評価手順（案）を，エンジン，MG，RESS の各要素試験手順（案）や HILS 模擬走行の検証手順（案）と併せて作成した．また，電気量収支エネルギー換算値や E/D 上の運転誤差の許容値（案）についても検討し，HILS 法を認証試験法として提案する準備を整えた．

3.8 第 3 章のまとめ

HD-HEV のハイブリッド制御ロジックを実装してシミュレーションを行うことで，従来の HD-ICEV と同様にエンジン単体の運転サイクルを算出し燃費・排出ガスを評価する HILS 法について検討した．まず，シリーズ HEV とパラレル HEV をそれぞれ 1 種ずつ供試して HILS システムを構築し，その模擬精度を実測値と比較した．結果，模擬走行値は実測値と非常に高い相関が得られ，燃費は誤差約 2% に収まり，認証試験法として提案可能な精度が得られることを確認した．次に，HEV モデルを各社システムに適合するように標準化した上で，重量車メーカー各社の協力を得てその模擬精度を検証した結果，想定した許容値（案）を満足した．併せて，HILS 模擬走行の精度確保に向けて，RESS や MG など要素効率がエンジン仕事すなわち燃料消費率に及ぼす影響を調査し，要素によって通過するエネルギー量が異なるため燃料消費率に及ぼす感度も異なることを明らかにした．さらに，HILS 動作環境を SILS で確認するために，シリーズとパラレルの各標準 HEV モデルに使用する基準 ECU モデルを作成した．基準 ECU モデルと基準パラメータを組合わせて SILS 計算を行い，その計算値が審査機関のマスター HILS システムと同一となることを確認した．最後に，HILS を用いた HD-HEV 用の燃費・排出ガス評価手順（案）を，エンジン，MG，RESS の各要素試験手順（案）や HILS 模擬走行の検証手順（案）と併せて作成し，HILS 法を認証試験法として提案する準備を整えた．

第4章

研究成果の活用

4.1 活用目的と提案先

第3章までの検討で、LD-HEV および HD-HEV 用の燃費・排出ガス評価手法を確立した。確立した評価手法を国の認証試験法として採用頂くことで、これら HEV の燃費・排出ガスを公平、公正且つ合理的に認証することが可能となり、ユーザが購入を検討する際の判断材料となる他、国や公的機関などが自動車の燃料消費量や CO₂ 排出量の将来予測する際の基本データとなり得る。公平、公正且つ合理的な評価手法であることは、審査機関そして審査を受ける自動車メーカーにとっても利益となる。

また近年は経済活動がグローバル化しており、国際商品である自動車および自動車部品も例外ではない。地球温暖化や大気汚染、安全性に関わる自動車性能は地球規模でとらえる必要があることから、認証試験法の国際的な基準調和が重要となる。行政、ユーザ、メーカーの各立場での基準調和の利点は次のとおりである[97]。

- **行政**：行政コストの低減（基準作成の効率化、審査作業の効率化）、国際流通の円滑化
- **ユーザ**：自動車価格の低減、自動車性能の向上、輸入車の選択肢の拡大
- **メーカー**：生産性の向上（開発効率の向上、部品管理の向上）、コスト低減（部品の共通化）、認証取得の効率化

国際連合（UN）欧州経済委員会（ECE）の傘下の「自動車基準調和世界フォーラム（WP29）」では、自動車基準の国際的な統一を図っている。国際基準には「ECE Regulation」と「Global Technical Regulation（GTR）」の二種類がある。ECE Regulation は 1958 年に締結された「国連の車両等の型式認定相互承認協定（58 協定）」で用いられる技術基準で、自己認証制度のある米国やカナダ、中国などは同協定に加盟していない。GTR は 1998 年に締結された「国連の車両等の世界技術規則協定（98 協定）」で用いられる技術基準である。同協定には米国、カナダ、中国なども加盟している。我が国は両協定に加盟し、基準調和・認証の相互承認のための活動に積極的に参加している（図 4.1-1）[98][99]。また、我が国の基準（強制規格）の国際基準化に当たっては、標準（任意規格）の国際標準化の提案も行うなど、「基準」と「標準」の間で戦略的に連携を図っていくことが効果的である（図 4.1-2）[99]。

そこで、検討した評価手法は、提案先に応じて下記の機関を通して提案した[99]。なお、国際標準化機構（ISO）への提案に関しては、著者が所属する日本自動車研究所（JARI）が ISO/TC22/SC37（電動車両）の国内審議団体であることから、自らの組織体から直接提案できた。

- **国内認証試験法**：日本自動車工業会（JAMA）
- **ECE Regulation および GTR**：自動車基準認証国際化研究センター（JASIC）および国際自動車工業連合会（OICA）
- **SAE**：左記と協定を締結している JARI
- **ISO**：ISO/TC22/SC37（電気自動車）の国内審議団体である JARI

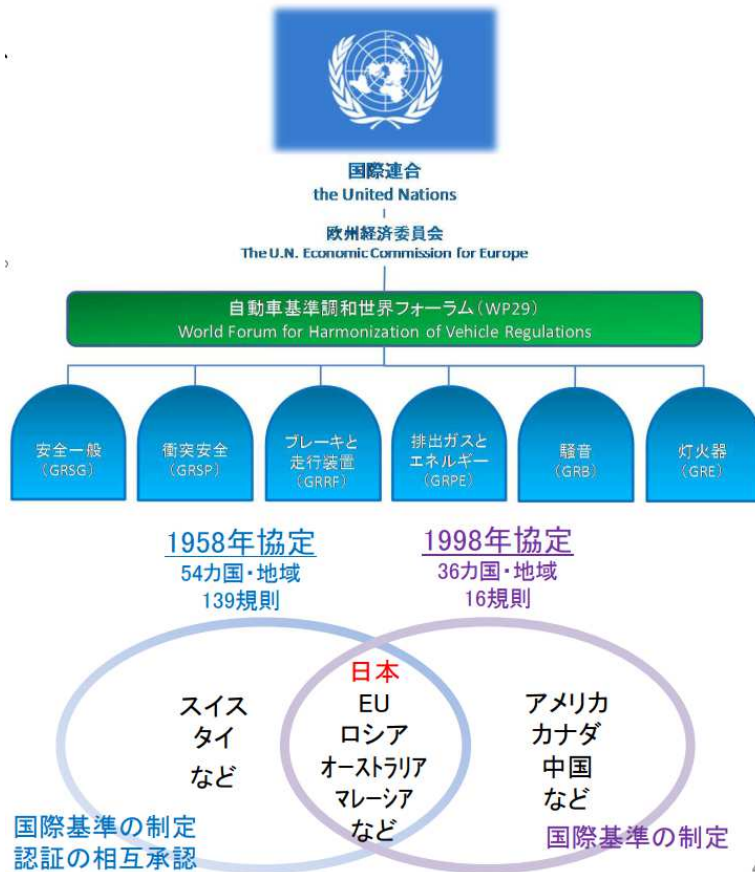


図 4.1-1 自動車基準の国際調和，認証の相互承認（国連 WP29） [98]

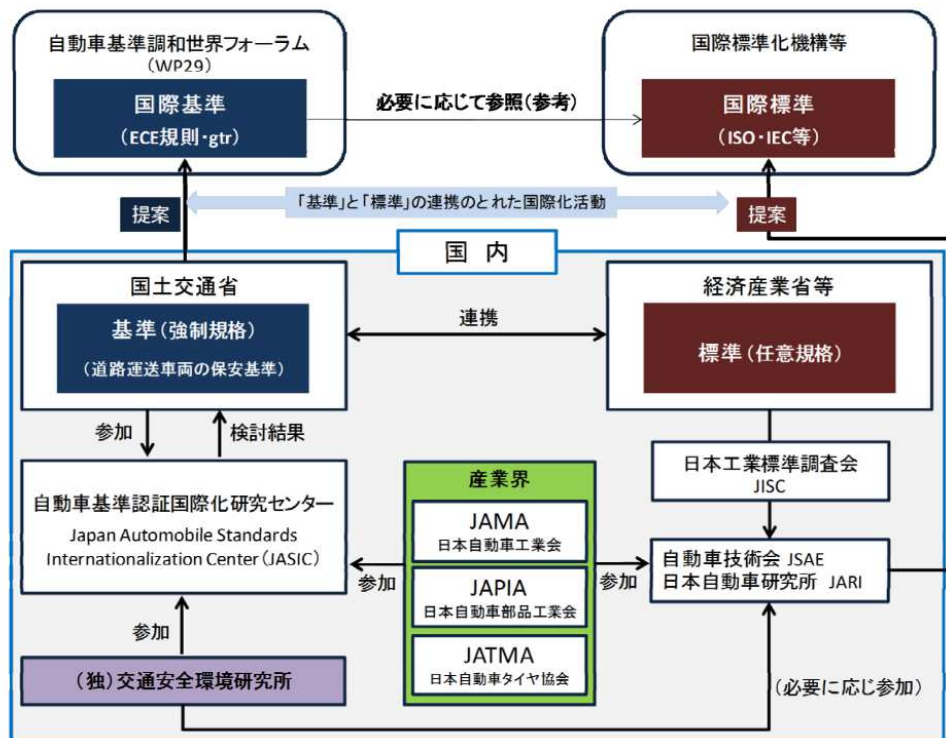


図 4.1-2 「基準」と「標準」の戦略的連携 [99]

4.2 提案結果

4.2.1 直線回帰法

本研究で実証した「直線回帰法」は、主に車両ベースやシステムベンチなど実測での燃費・排出ガス評価手法として、SAE J1711 の試験成立基準と併記する形で、国内外の認証試験法（基準）や米国標準、国際標準に採用された。また、本研究成果を応用して 2024 年 1 月 5 日付けで規定された HD-FCHEV の HILS 法（下記 c）においても、蓄電量差割合が許容値内に収まらない場合の対応として採用されることとなった。

- a) システムベンチ法：国土交通省自動車交通局，国自環 283 号「電気ハイブリッド重量車燃料消費率試験方法について」，平成 19 年 3 月 16 日
- b) 車両ベース評価法：道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2023.9.22】別添 42（軽・中量車排出ガスの測定方法）別紙 10 電気式ハイブリッド自動車の排出ガスの測定方法（8. 関係）（HEV および PHEV の Charge Sustaining (CS) 状態）
- c) HILS 法：道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2024.1.5】別添 41（重量車排出ガスの測定方法）Ⅶ JH25 モード法（燃料電池自動車）
- d) 車両ベース評価法：Regulation No 101 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train with regard to the measurement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range, and of categories M 1 and N 1 vehicles powered by an electric power train only with regard to the measurement of electric energy consumption and electric range
- e) 車両ベース評価法：SAE J1711 [Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles]
- f) 車両ベース評価法：ISO 23274-1 [Hybrid-electric road vehicles — Exhaust emissions and fuel consumption measurements — Non-externally chargeable vehicles]

4.2.2 HILS 法

HILS 法は、次に示す国内の GVW 3.5 トン超の HD-HEV 燃費・排出ガス試験法や GTR に採用された。

- a) 国土交通省自動車交通局，国自環 281 号の 2「ハードウェアインザループシミュレータシステムを用いた電気ハイブリッド重量車の燃料消費率及び排出ガスの試験方法について」，平成 19 年 3 月 16 日
- b) 国土交通省自動車交通局，国自環 281 号の 2「電気ハイブリッド重量車用 HILS システム暫定検証試験方法について」，平成 19 年 3 月 16 日
- c) 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2024.1.5】別添 41（重量車排出ガスの測定方法）Ⅳ JH25 モード法（電気式ハイブリッド車）
- d) UN/ECE/TRANS/WP.29/2021/79, Proposal for Amendment 4 to UN GTR No. 4 (WHDC)

4.3 第4章のまとめ

「直線回帰法」は、HEV、PHEVのCS状態およびFCV（実際はFCHEV）において充放電収支の影響を補正できる燃費・排出ガス評価手法として、SAE J1711の試験成立基準と併記する形で、国内外のほぼ全ての技術基準や国際基準に採用された。また、HILS法が国内技術基準とGTRに採用されたことで、LD-HEVおよびHD-HEVの燃費・排出ガス評価手法の日本主導による整備に寄与できた。さらにHILS法については、本研究終了後も重量車におけるPHEV燃費・排出ガス試験法、FCV燃費試験法、BEV電費試験法として応用され、実ECUを用いたリアルタイムシミュレーション法の先駆けとなった。

第5章

結論

5.1 本研究のまとめ

本研究では、自動車の環境負荷低減とエネルギー消費率低減を進める上で極めて重要な技術である HEV について、その燃費・排出ガスを公平、公正且つ合理的に評価する手法を検討した。ここでは、本論文で取り上げた内容について各章毎に振り返り、その成果についてまとめる。

第1章では、まず研究背景として、自動車に関わる三つの問題すなわち大気汚染、エネルギー枯渇および温室効果ガスの排出について述べた後、その解決策として、メタノール自動車、BEV、HEV 並びに FCV についてその開発の歴史と現状を述べた。その中でも特にインフラや航続距離の問題がなく、代替燃料自動車や FCV の時代になっても基本構成が活かされる HEV が、自動車の電動化そして CN 化を進める上で現在だけでなく未来においても大変重要な技術である旨を述べた。さらに、HEV を市場に出す際、公平、公正且つ合理的な燃費・排出ガス評価手法が必要であることを述べた上で、本研究では、HEV 特有の作動形態である RESS への充放電が燃費・排出ガスへ及ぼす影響やその補正手法を検討した上で、HD-ICEV の「シミュレーション法」に対応する HD-HEV 用燃費・排出ガス評価手法の確立を目的とすることを述べた。

ハイブリッド ECU の駆動制御ロジックを反映しつつ HD-ICEV と同様に車両ベース (C/D 試験) からエンジンベンチ (E/D 試験) に置き換え可能な評価手法として、システムベンチ法、HEV シミュレーション法、Hardware in the loop simulation (HILS) 法の3種を想定し、車両ベース評価法をリファレンスとして得失を比較検討した。結果、システムベンチ法については、エンジン出力軸にモータが直結された単純な平行 HEV を対象に E/D 上での運転精度検証を行い、認証試験法として耐えうる精度を有することを確認の上、国に提案済みであり [86][87][88]、また将来通常の E/D では適用できない方式の HEV が登場すると考えられたことから本研究の対象外とした。HEV シミュレーション法については、認証対象そのものと言えるハイブリッド ECU の駆動制御を完全には実装できないため認証試験法にはなり得ないと判断し、本研究の対象外とした。HILS 法は、模擬走行の精度、コスト、汎用性の面で高いポテンシャルがあると判断し、本研究で検討することとした。また、車両ベース評価法は、HILS 法だけでなく他方式も含めて、全ての置き換え手法の精度を検証する際の基準となることから、本研究の対象とした。

第2章では、燃費・排出ガス評価の基本であり、且つ、HILS 法など置き換え手法の精度検証のリファレンスとなる車両データを精度よく取得するための「車両ベース評価法」の確立を目的に、RESS の充放電収支の補正手法について「直線回帰法」を中心に検討した。結果、燃料消費率 (l/km) は、ホット/コールドのドライビングサイクルによらず、電気量収支に対して直線回帰が可能であり、クーロン効率を 100 % と仮定して電気量収支 0 Ah 点を Δ SOC ゼロ点とすると、得られた燃費 (km/l) はリファレンスとなる「連続繰り返しモード法」に対して 0.99 倍~1.03 倍の範囲であった。一方、比較用に調査した「発電補正法」は、停車発電の補正係数を用いると過剰補正となり、補正後燃費は直線回帰法の燃費に対し 0.97 倍~1.12 倍の範囲であった。また

「SAE J1711」は、容易に試験成立基準（蓄電量差割合 $\leq 1\%$ ）を満足するものの、その際の直線回帰法に対する燃費の取り得る範囲は0.96~1.04倍と大きくなることが分かった。また、排出ガスについては、ガソリンHEVの場合は、 ΔSOC が通常の制御範囲内の場合、ホット/コールドのモードによらず電気量収支の影響は明確には見られなかった。一方ディーゼルHEVの排出ガスは電気量収支と明らかな相関が観られた。

さらに、実路上とC/D上の回生エネルギーの相違とその燃費への影響度についても調査し、減速度が低いM15モードや10・15モードにおいては実路上とC/D上で回生電気量に大きな差が生じないこと、また10・15モードより高速・高減速度条件（100 km/h から 0 km/h まで最大0.20 gで減速条件）では、C/D上の回生電気量が実路上よりも約0.02 Ah大きいケースが存在し、その燃料消費率への影響度は2%弱であることを明らかにした。さらに、回生電気量に相違が生じた場合でも「直線回帰法」により補正が可能であることを論理的に示した。総合評価として、実路上とC/D上の10・15モード燃費（km/l）を測定した結果、実路上を1.00とするとC/D上が1.02となった。実路試験では、高速周回路コーナー部（半径400 m）の走行による転がり抵抗増加や風（0.5 m/s）による空気抵抗増加など燃費低下要因が存在したことから、回生エネルギーの相違による燃費への影響は、今回の供試車両では無視できることを明らかにした。

以上より、「直線回帰法」による「車両ベース評価法」を確立できた。

第3章ではHILS法について開発した。まず、シリーズHEVとパラレルHEVをそれぞれ1種ずつ供試してHILSシステムを構築し、その模擬精度を実測値と比較した。結果、模擬走行値は実測値と非常に高い相関が得られ、燃費は誤差約2%に収まり、認証試験法として提案可能な精度が得られることを確認した。次に、HEVモデルを各社システムに適合するように標準化した上で、重量車メーカ各社の協力を得てその模擬精度を検証した結果、想定した許容値（案）を満足した。併せて、HILS模擬走行の精度確保に向けて、RESSやMGなど要素効率がエンジン仕事すなわち燃料消費率を及ぼす影響を調査し、要素によって通過するエネルギー量が異なるため燃料消費率に及ぼす感度も異なることを明らかにした。さらに、HILS動作環境をSILSで確認するために、シリーズとパラレルの各標準HEVモデルに使用する基準ECUモデルを作成した。基準ECUモデルと基準パラメータを組合わせてSILS計算を行い、その計算値が審査機関のマスターHILSシステムと同一となることを確認した。最後に、HILSを用いたHD-HEV用の燃費・排出ガス評価手順（案）を、エンジン、MG、RESSの各要素試験手順（案）やHILS模擬走行の検証手順（案）と併せて作成し、HILS法を認証試験法として提案する準備を整えた。

第4章では研究成果の活用について述べた。「直線回帰法」は、HEV、PHEVのCS状態およびFCV（実際はFCHEV）において充放電収支の影響を補正できる燃費・排出ガス評価手法として、SAE J1711の試験成立基準と併記する形で、国内外のほぼ全ての技術基準や国際標準に採用された。また、HILS法が国内技術基準とGTRに採用されたことで、LD/HD双方のHEVの燃費・排出ガス評価手法を日本主導で整備できた。これにより、LD/HD双方のHEVの普及に間接的に寄与し、CO₂をはじめとする自動車からの排出ガス低減に貢献できた。なおHILS法は、本研究終了後もHDのPHEV燃費・排出ガス試験法、FCV燃費試験法、BEV電費試験法として応用されており、実ECUを用いたリアルタイムシミュレーション法の先駆けとなった。

5.2 評価手法の改良と展望

本論文は、直線回帰法については2004年頃まで、HILS法については2007年頃までに研究した内容をまとめたものである。研究を終えて本論文を執筆するまでに17年～20年が経過していることから、第4章で挙げた国内外の技術基準や国際標準以外にも以下のような追補や拡張が行われている。

直線回帰法では、クーロン効率を100%と仮定することで電気量収支ゼロ点を Δ SOCゼロと見なし、その点における燃料消費率(l/km)を真値と規定した。実際HEVに用いられるニッケル水素電池やリチウムイオン電池のクーロン効率は100%と見なすことができ、これら電池の性能試験規格[100][101][102]においても、100%と仮定している。しかし、搭載するRESSによっては100%から大きく外れるケースも想定され、その場合車両の実力よりも低い燃料消費率(l/km)を算定することになり好ましくない。そこで、国内認証試験法においては下記が追補されている[103]。

「蓄電装置への電流の充放電効率（放電電気量の充電電気量に対する比率を%で表示したものをいい、以下「アンペア・アワー効率」という。）は、通常の充電レベルの範囲内において98%以上であること。ただし、アンペア・アワー効率が98%未満の場合であっても、あらかじめ自動車製作者が提示する方法により電気量収支を補正することにより、本測定方法を適用することができるものとする。」

今後は、脱化石燃料の加速を意図して、電気駆動比率の高い「フルハイブリッド」あるいは「ストロングハイブリッド」と呼ばれるHEVが続々と登場してくると予想される。それらHEVの燃費を「直線回帰法」で正確に評価するためには、アンペア・アワー効率を100%と仮定出来るか、あるいは実際の効率値を用いて電気量収支を補正する必要が生じる。電気駆動比率が高くアンペア・アワー効率が低い車両程燃費を過大に評価することになるため、今後「直線回帰法」の適用に当たってはアンペア・アワー効率の確認がより重要になってくる。

その一方で認証用のドライビングサイクルが、本研究を行った当時の10・15モードからJC08モードを経てWLTCへ切り替わったことにより、走行距離は約3.6倍、平均車速は約1.5倍に増えている。そのため1回の試験での燃料消費量が増加し、相対的に Δ SOCの燃費への影響は小さくなっている。また電気駆動系とICEもしくはFCの効率が高くなる程 Δ SOCの影響は小さくなる。WLTC走行では Δ SOCの補正不要なケースが出てくる可能性もある。車両の進化や要求精度に応じて評価手法もアップデートが必要である。

HILS法では、HEVモデルに入力する各要素のパラメータは全て車両が暖機された状態（ホットスタート）のデータを入力している。これは、重量車の使用実態において、ホットスタートの占める時間割合がほとんどであるため、冷間状態（コールドスタート）を無視しても最終的な燃費・排出ガスへの影響度は小さいとの考えによる。しかしながら、大気環境改善の観点から実際の道路状況下で燃費や排出ガスを評価することが求められており、欧州では2018年よりディーゼルおよびガソリン乗用車についてコールドスタートの路上走行(Real Driving Emission: RDE)試験[104]が開始されている[105]。国内でも2022年よりディーゼル乗用車についてRDE試験が

導入されており[105]，今後重量車についても導入が求められることになる予想される．

HILS 法をコールドスタートに対応させる際に問題となるのは，エンジンの油温，水温，触媒温度などをどのようにして再現するかである．実ハイブリッド ECU は，排出ガス低減のためにこれらの温度を用いてエンジンの回転速度・トルクを制御している車両もあるが[105]，温度変化をモデルで精度よく再現することは極めて困難である．この対応策として，エンジン部分はモデルではなく実機を用いる「拡張 HILS」と呼ばれる手法が研究されており，将来の導入が期待される[105][106]．

5.3 本論文のおわりに

ハイブリッドとは「異種のもの混合，複合」といった意味がある．HEV においては RESS と ICE もしくは FC の組合せである．HEV の燃費・排出ガスを正確に評価するためには，ICE（あるいは FC）だけでなく RESS と MG についても考慮する必要がある．また，回生ブレーキが作動することから，駆動側だけでなく制動側についても，ICEV 以上に精度が求められる．そして，それら要素の燃費・排出ガスへの影響度はドライビングサイクルによっても変化する．したがって，評価手法を研究する側も複合的な物事の見方すなわち「頭をハイブリッドにして考えること」が必要であった．これは，自動車に関わる三つの問題など現代の社会問題の解決策を研究するにあたって必要なことと思われる．

謝辞

本研究は、1997年度～2003年度 NEDO 委託「高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発」、1998年度～2000年度 JEVA（2003年7月 JARI に統合）委託「ハイブリッド電気自動車の燃費測定法の標準化」、1999年度～2001年度 JAMA 委託「ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス試験法に関する調査研究」および2002年度～2007年度 JAMA 委託「重量 HEV の排出ガス・燃費試験法に関する調査研究」の四つの事業において、委託先の JARI 職員として10年間の長期にわたり実施した成果を中心にまとめたものである。その間に非常に多くの方々からご指導・ご支援いただいた。研究計画とその成果については、JEVA HEV 特別分科会の清水健一委員長（産業技術総合研究所）、JARI 高効率クリーンエネルギー自動車技術委員会の大聖泰弘委員長（早稲田大学理工学部機械工学科教授）、JAMA HEV 試験法 WG の池ヶ谷精二主査（トヨタ自動車）、JARI HEV 燃費 WG の佐々木正一主査（慶応大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授）、JAMA 排出ガス部会の森光信孝部会長（トヨタ自動車）、JAMA 重量 HEV 試験法合同 WG の市川順主査（日野自動車）、同山口誠一主査（日野自動車）らの指揮の下、参加された各委員にご討論いただいた。ここに記して深く感謝申し上げます。

車両実験におけるバッテリー電流の測定に当たっては、ソニー・テクトロニクスに加藤勝久氏ならびに安淳一氏に多大なるご協力をいただいた。HILS 法に関しては、HILS システムの構築およびモデル作成において小野測器の八木博行氏、石井陽志氏、瀧澤直樹氏ならびに翁志強氏にご尽力いただいた。また、認証試験法としての論理構築に当たっては自動車技術総合機構の成澤和幸氏ならびに河合英直氏らにご指導頂いた。さらに GTR 化にあたっては、三菱ふそうトラック・バスの大崎伸也氏にご尽力いただき、HILS 法を広く世界でも採用いただけることとなった。心より感謝申し上げます。

職場である JARI においては、社会人としての仕事の進め方から研究者としての心構えまでご指導頂いた歴代の上司である堀正彦氏、岩井信夫氏、瀬古俊之氏、杉山元氏ならびに渡辺正五氏、実験とシミュレーションを精力的に行ってくれた島村和樹氏ならびに黒川陽弘氏、車両実験でお世話になった安田均氏ならびに吉村昇氏、直線回帰法の国際標準化で事務局を担ってくれた吉原三智子氏に深く感謝申し上げます。また、学位取得を親身にご支援いただいたエネルギー・生活科学研究所所長の杉本一郎氏と JARI の三石洋之氏に心より感謝いたします。この他、国内外の自動車メーカー、計測機器メーカー、研究機関など多くの方々からご支援とご助言をいただきました。ここに全ての方々のお名前を記すことができず残念ですが、心よりお礼申し上げます。

そして、筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻教授 石田政義先生からは、ご専攻とは若干異なる自動車領域のテーマであったにも関わらず、指導教員として本論文を書き上げる機会を与えてくださいました。博士論文としての学術体系をまとめるにあたり、終始粘り強く的確なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。また、同教授 西岡牧人先生、同准教授 藤野貴康先生には副指導教員として、同教授 安芸裕久先生ならびに自動車技術総合機構の奥井伸宜氏には副査としてご助言とご指導をいただきました。ここに深謝の意を表します。

最後に、定年を迎えながらも、職場と区会の業務を抱えつつ本論文作成のために一つも余裕のなかった私を支えてくれた家族に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 日刊工業新聞, 排気ガス規制の歴史
(https://pubdata.nikkan.co.jp/uploads/book/pdf_file5a829353137b0.pdf)
- [2] 日本自動車工業会 HP (<https://www.jama.or.jp/>)
- [3] 国土交通省 HP, 自動車排出ガス
(<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/transport/shouwa50/ind050404/001.html>)
- [4] 国土交通省 HP, 「自動車排出ガス規制の経緯 (ディーゼル重量車)」
(<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/09/090325/02.pdf>)
- [5] TechEyesOnline, 欧州 新排ガス規制ユーロ 7 ~ 電動化を見すえた新たなルール, 2023 年 8 月 23 日
(<https://www.techeyesonline.com/article/tech-eyes/detail/TechnologyTrends-2308/>)
- [6] 日本貿易振興機構 (ジェトロ) HP, 7 月 1 日から自動車排出ガス規制「国 6b」を実施 (中国), 2023 年 05 月 11 日
(<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/05/ebde875b3b46373c.html>)
- [7] 石井素, 自動車の排出ガス規制等の動向, Journal of the JIME Vol. 47, No. 6 (2012)
- [8] 富士フィルム HP
(<https://www.fujifilm.co.jp/corporate/aboutus/history/ayumi/dai4-02.html>)
- [9] 経済産業省資源エネルギー庁 HP
(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/history4shouwa2.html>)
- [10] 西野浩介, 世界で強化される自動車燃費規制とその影響, 三井物産戦略研究所, 2015 年 7 月 6 日 (https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/1221218_10674.html)
- [11] ニュース屋台村 HP (<https://www.newsyataimura.com/ozawa-71/>)
- [12] Berkeley Earth, Global Temperature Report for 2023
(<https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/>)
- [13] 国際連合広報センターHP (https://www.unic.or.jp/news_press/info/44283/)
- [14] 日本自動車研究所, 通商産業省委託報告書 昭和 61 年度新燃料油研究開発調査 アルコールと石油製品との混合利用に関するフイージビリティ調査「低濃度メタノール混合ガソリンの現用自動車への利用に関する適合性調査」昭和 61 年 5 月
- [15] 堀正彦, メタノールエンジン最近の動向, HORIBA Technical Reports Readout No. 6 January 1993
- [16] 石油産業活性化センター,平成 4 年度新燃料油研究開発調査 (自動車用メタノール燃料の利用に関するフイージビリティ調査)「オートタイプ高濃度メタノール燃料試験自動車第一次管理下フリート走行後の分解調査」平成 5 年 3 月
- [17] 鷺山亨志, 鈴木正明, 中澤誠, フレキシブル燃料自動車 (FFV) の排出ガスについて, 神奈川県環境科学センター研究報告 第 18 号 (1995)
- [18] 総務省 HP, メーカーのメタノール自動車に関する今後の見通し等
(https://www.soumu.go.jp/main_content/000028493.pdf)
- [19] PLANET OF CARS, Electric car (1832-1890s)
- [20] 森本雅之, 最初の電気自動車についての考察, 電気学会論文誌 D, Vol. 133 No. 1 pp.105-110

- [21] トヨタ自動車 HP (<https://global.toyota.jp/kids/history/automobile/>)
- [22] 次世代自動車振興センター, 次世代自動車ヒストリー
(<https://www.cev-pc.or.jp/kiso/history.html>)
- [23] George Crabtree, Elizabeth Kócs and Lynn Trahe, The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond, Cambridge University Press: 27 November 2015
- [24] Bloomberg NEF HP, Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh, November 26, 2023
(<https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>)
- [25] NHK, EV 減速? ハイブリッド車復権? 自動車大国アメリカの実態, 2024 年 2 月 29 日
(<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20240229/k10014374191000.html>)
- [26] 森本雅之, 世界最初のハイブリッド自動車, 電気学会論文誌 D, Vol. 137 No. 1 pp. 69-74
- [27] PORSCHE newsroom, The history of Porsche begins electrically, 13/09/2019
(<https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/history-18563.html>)
- [28] 森本雅之, ポルシェ博士の電気自動車, 電学半導体電力変換自動車家電・民生合同研, SPC-13-146, VT-13-029, HCA-13-051 (2013)
- [29] U.S. Department of Energy, Timeline: History of the Electric Car
(<https://www.energy.gov/timeline-history-electric-car>)
- [30] Story Cars, 1969 GM XP-512 Concepts,
(<https://www.story-cars.com/1969-gm-xp-512-concepts>)
- [31] European Hybrid Pioneer – The Audi 100 Avant Duo
(<https://dyler.com/blog/101/european-hybrid-pioneer-the-audi-100-avant-duo>)
- [32] 日野自動車 HP : (https://www.hino.co.jp/corp/about_us/milestones.html)
- [33] 都営バス資料館 HP : (<https://toeibus.com/archives/13920>)
- [34] トヨタ自動車 HP : トヨタ自動車 75 年史, 技術開発, HV・FC
(https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/hv-fc/details.html)
- [35] トヨタ自動車 HP, 初代プリウス 1997-2003
(<https://global.toyota.jp/prius20th/evolution/1st/>)
- [36] 本田技研工業プレスインフォメーション, insight - 1999.09
(<https://www.honda.co.jp/factbook/auto/INSIGHT/199909/>)
- [37] 本田技研工業プレスインフォメーション, ホンダ新世代・超低燃費テクノロジー - 1999.07
(<https://www.honda.co.jp/factbook/auto/tech/19990706/003.html>)
- [38] 日産自動車 HP, ティーノ ハイブリッド - NISSAN HERITAGE COLLECTION
(<https://www.nissan.co.jp/HERITAGE/DETAIL/434.html>)
- [39] 石井潤市, 天野雅彦, 自動車用パワーエレクトロニクスの現状と展望, 電学誌, 122 巻 6 号, 2002 年 (https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1994/122/6/122_6_371/pdf)
- [40] K. Morita et al., R&D and Analysis of Energy Consumption Improvement Factor for Advanced Clean Energy HEVs, SAE Technical Paper 2005-01-3828, 2005
- [41] UD トラックス環境報告書 2003

- (<https://www.udtrucks.com/sites/default/files/2022-11/2003.pdf>)
- [42] 日野自動車 HP, 沿革 日野自動車の歩み
(https://www.hino.co.jp/corp/about_us/milestones.html)
- [43] 日本の自動車技術 330 選, 小型トラック用ハイブリッドシステム
(<https://www.jsae.or.jp/autotech/10-11.php>)
- [44] 三菱ふそうトラック・バス プレスリリース：三菱ふそう大型路線バスにシリーズ式電気ハイブリッドシステム搭載「エアロノンステップ HEV」を発表－既存インフラを有効活用できる低公害バス－, 2004 年 2 月 23 日
(https://www.mitsubishi-fuso.com/oa/jp/news/news_content/040223/040223.html)
- [45] いすゞ自動車 ニュースルーム：いすゞエルフディーゼルハイブリッド車を発売－CNG-MPI に加えエルフ低公害車シリーズを拡充－, 2005 年 04 月 18 日
(https://www.isuzu.co.jp/newsroom/details/20050418_01.html)
- [46] 三菱ふそうトラック・バス プレスリリース：世界一クリーンなハイブリッド小型トラック「キャンター エコ ハイブリッド」を新発売, 2006 年 7 月 5 日
(https://www.mitsubishi-fuso.com/oa/jp/news/news_content/060705/060705.html)
- [47] NEDO Web Magazine, トラックやバスにもハイブリッドの風
(<https://webmagazine.nedo.go.jp/practical-realization/articles/200907mitsubishi/>)
- [48] 岡田達弘, 燃料電池材料の歴史と現状, 太陽エネルギー, Vol. 49, No. 2
- [49] 田中裕久, ジェミニとアポロ宇宙船の燃料電池, 水素エネルギーシステム Vo1. 36, No. 2 (2011)
- [50] Hydrogen to x, 水素エネルギー100 年史
(https://note.com/hydrogen_to_x/n/nf9f3b027a187)
- [51] FC-R&D, 燃料電池について, (<http://www.nenryoudenchi.co.jp/fc-setu.htm>)
- [52] 名車文化研究所, エコロジー・マツダ 01, (<https://meisha.co.jp/?p=11890>)
- [53] メルセデスベンツ HP,
(<https://group.mercedes-benz.com/company/magazine/technology-innovation/necar1-fuel-cell-history.html>)
- [54] Gazoo, トヨタ 燃料電池自動車 MIRAI 開発責任者に聞く,
(https://gazoo.com/car/keyperson/14/11/18_1/)
- [55] 竹中啓恭, 次世代燃料電池の開発動向, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, Vol. 1 (2010) 37-44 (<https://global.toyota/jp/mobility/>)
- [56] トヨタ自動車ニュースリリース：SORA
(<https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/21862392.html>)
- [57] 伊藤献一ほか, メタノール燃焼排ガス中の未燃メタノールおよびホルムアルデヒド (火花点火エンジンによる基礎的研究), 日本機械学会論文集 (B 編) 48 巻 428 号 (昭和 57-4)
- [58] Morita, K., Iwai, N., Niwa, K., "Problems in Otto-type Methanol Vehicles and Solutions Thereto", 11th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XI), Sun City, South Africa, April 1996.
- [59] トヨタ自動車, The MIRAI LCA レポート, 2015 年 6 月 10 日

- https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/esg/challenge2050/challenge2/life_cycle_assessment_report_jp.pdf)
- [60] トヨタ自動車 HP, MIRAI 進化ポイントについて, (<https://toyota.jp/mirai/compare/>)
- [61] トヨタ自動車 HP, MIRAI と水素の FAQ,
(https://toyota.jp/mirai/station/faq/?padid=from_mirai_compare_topics_station-faq)
- [62] 窪野 薫, トヨタの新型 FCV バスが 120 万 km 走れるワケ, 日経 xTECH, 2018.04.27
(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/00392/>)
- [63] 次世代自動車振興センター, クリーンエネルギー自動車 AtoZ,
(https://www.cev-pc.or.jp/lp_clean/spot/)
- [64] 稲島剛史, 水素を大幅値上げ, エネオスに続き岩谷産も -FCV 普及に冷や水, 2024 年 4 月 17 日 (<https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2024-04-17/SC29ZPT0G1KW00>)
- [65] 石崎啓太, 中野冠, 内燃機関自動車, ハイブリッド自動車, 電気自動車, 燃料電池自動車における車内空調を考慮した量産車両 LCCO₂ 排出量の比較分析, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866, 2018
- [66] 資源エネルギー庁, 主要国の発電電力量に占める再エネ比率の比較,
(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2022/007/>)
- [67] The 10 Longest Range EVs for 2023
(<https://www.visualcapitalist.com/longest-range-evs-2023/>)
- [68] <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-04-25/electric-car-boom-seen-triggering-peak-oil-demand-in-2030s>
- [69] 日産自動車 HP, 急速充電にかかる時間
(https://faq2.nissan.co.jp/faq/show/4698?category_id=63&site_domain=default)
- [70] 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, 調査報告書「リチウムイオン電池の劣化挙動調査」, 2020 年 3 月
- [71] EV 充電エネチェンジ, 電気自動車 Q&A 「撤去される EV 充電スタンドが増えているというのは本当ですか?」 (<https://ev-charge-enechange.jp/articles/054/>)
- [72] 日本交通政策研究会, 電気自動車用充電施設整備の課題と展望, 2023 年 8 月
(<https://www.nikkoken.or.jp/pdf/project/2022/A-875.pdf>)
- [73] 四季報, マーケット速報, EV 市場で中古需要が低迷, 「脱炭素化」に新たなハードル
(<https://shikiho.toyokeizai.net/news/0/724225>)
- [74] 大聖泰弘, 「自動車用エンジンの高効率化の可能性」の図 1 を参考に著者作成, 日本燃焼学会誌 第 53 巻 163 号 (2011 年) 37-41
- [75] MOTORTREND, Electric Vehicles Are Way, Way More Energy-Efficient Than Internal Combustion Vehicles, Aug 12, 2022
(<https://www.motortrend.com/news/evs-more-efficient-than-internal-combustion-engines/>)
- [76] 森田賢治, 重量車のカーボンニュートラル技術の動向と位置づけ, JARI Research Journal, 20221001
- [77] 森田賢治, 電動重量車の充電/給電システムに関する開発動向, JARI Research Journal,

20210301

- [78] 丸田昭輝, 自動車分野における脱炭素化の展望, 日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす, 101, 181-187 (2022)
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jieenermix/101/2/101_181/pdf-char/ja)
- [79] 松田智, 環境問題に真に貢献するバイオマス利活用とは?, 環境科学会誌 24 (5) : 493-502 (2011)
- [80] 松原直義, 水素エンジンにおける異常燃焼の発生メカニズムの解析, 自動車技術会論文集 Vol. 54, No. 1, January 2023
- [81] 公益財団法人日本自動車輸送技術協会, 技術解説—シャシダイナモメータによる車両評価
(https://ataj.or.jp/technology/chdy_technology.html)
- [82] 公益財団法人日本自動車輸送技術協会, 技術解説—重量車の排出ガス規制及び試験法
(https://www.ataj.or.jp/technology/hdv_gas_kisei.html)
- [83] 国土交通省, 新車排出ガス規制の経緯 (7)
(<https://www.mlit.go.jp/common/001185984.pdf>)
- [84] 自工会 HP
(https://www.jama.or.jp/operation/ecology/fuel_efficiency_standards/pdf/weight_mileage.pdf)
- [85] 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会重量車判断基準小委員会・重量車燃費基準検討会, 最終とりまとめ, 平成 17 年 11 月
(<https://www.mlit.go.jp/jidosha/juuryoushanenpi/saishuu.pdf>)
- [86] 通商産業省委託 平成 7 年度「エネルギー使用合理化システム開発調査」報告書, 平成 8 年 9 月 日本自動車研究所
- [87] 森田賢治, 島村和樹, 市川順, 重量 HEV 排出ガス試験法に関する検討—システムベンチ法—, 自動車技術会論文集 Vol.36, No.4, P.87-92, July 2005.
- [88] TRIAS 31-J041(2)-01, 電気ハイブリッド重量車排出ガス試験 (システムベンチ)
- [89] TRIAS 08-004-01, 電気ハイブリッド重量車燃料消費率試験 (システムベンチ)
- [90] 森田賢治, 島村和樹, 杉山元, 堀正彦, シミュレーションによるハイブリッド電気自動車の燃費改善, 自動車技術会論文集 Vol.35, No.3, P.111-116, July 2004.
- [91] 日本自動車研究所 HP (<https://www.jari.or.jp/>)
- [92] Morita, K., Shimamura, K., Sugiyama, G., Hori, M. et al., "R&D and Analysis of Energy Consumption Improvement Factor for Advanced Clean Energy HEVs," SAE Technical Paper 2005-01-3828, 2005
- [93] Umicore HP, 三元触媒
(<https://www.umicore.jp/jp/our-sites/umicore-shokubai-japan/catalyst/technology/catalyst-tech/twc>)
- [94] 細井賢三ほか, 自動車用動力伝達系の摩擦損失の測定に関する研究, 日本自動車研究所報告 第 65 号
- [95] 環境省ホームページ, ガソリン及びディーゼル重量車用車速変換プログラム
(<http://www.env.go.jp/air/car/program/index.html>)

- [96] 具体的数値は、平成 19 年 3 月 16 日付けの国自環 281 号の 2「ハードウェアインザループシミュレータシステムを用いた電気ハイブリッド重量車の燃料消費率及び排出ガスの試験方法について」に記載されている。
- [97] 成澤和幸，自動車技術基準の国際調和活動
- [98] 国土交通省自動車局技術政策課自動車基準協定対策官 猪股博之，新たな課題に対応する国際基準調和活動に関する最新の動向－自動運転を中心に－，交通安全環境研究所フォーラム 2016，平成 28 年 11 月 25 日
- [99] 自動車基準認証国際化行動計画，自動車基準認証国際化ハイレベル会議，平成 23 年 6 月 6 日
- [100] JEVS D 713「ハイブリッド電気自動車用密閉型ニッケル水素電池の出力密度および入力密度試験方法」
- [101] IEC 62660-1 Ed. 2.0:2018 (b), Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 1: Performance testing
- [102] ISO 12405-4:2018Electrically propelled road vehicles —Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems, Part 4: Performance testing
- [103] 国土交通省，道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2023.9.22】別添 42（軽・中量車排出ガスの測定方法）別紙 10 電気式ハイブリッド自動車の排出ガスの測定方法（8.関係）（HEV および PHEV の CS 状態）（<https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/B042.pdf>）
- [104] 国土交通省，路上走行検査方法（<https://www.mlit.go.jp/common/001182446.pdf>）
- [105] 奥井伸宜，エンジンベンチを用いた重量車 RDE 代替評価手法の検討，自動車技術会論文集 20214426, Vol. 52, No. 4, July 2021.
- [106] 奥井伸宜，Engine in the Loop を適用したハイブリッド重量車の燃料消費率および排出ガスの評価手法に関する検討，自動車技術会論文集 20194272, Vol. 50, No. 2, March 2019.

論文リスト

1. 査読付き学術雑誌論文

- 1) Kenji Morita, Yasumasa Maeda, Akihiro Kurokawa, Daichi Imamura, Tetsuya Suzuki, Evaluation of CO2 emission of Electric Vehicles Based on Actual Measurement in Practical Use, EVTeC 2014
- 2) 隅田祐介, 松村広基, 楊イ翔, 紙屋雄史, 大聖泰弘, 森田賢治, 各種電動車両に搭載したリチウムイオン蓄電池の許容劣化度に関する検討, 自動車技術会論文集 44 (2, 20134199) 423 - 428 2013年03月
- 3) 木野戸秀将, 落合和樹, 松村広基, 紙屋雄史, 大聖泰弘, 森田賢治, プラグインハイブリッド自動車における搭載リチウムイオン蓄電池の許容劣化度についての検討, 自動車技術会論文集 43 (2, 20124254) 491 - 496 2012年03月
- 4) Conte, M., Conte, F.V., Bloom, I.D., Morita, K., Ikeya, T., Belt, J.R., Ageing Testing Procedures on Lithium Batteries in an International Collaboration Context, World Electric Vehicle Journal, 2010, 4, 335-346, wevj4020335
- 5) 森田賢治, 赤井泉明, 広瀬久士: 電動車両用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの開発ー試験プロファイル作成手法の検討ー, 自動車技術会論文集 Vol.41, No.2, March 2010. 20104239
- 6) Morita, K., Shimamura, K., Yamaguchi, S., Furumachi, K. et al., "Development of a Fuel Economy and Exhaust Emissions Test Method with HILS for Heavy-Duty HEVs," SAE Int. J. Engines 1(1):873-887, 2009
- 7) Y. Wada, S. Shimada, W. Jibin, Y. Kamiya, Y. Daisho, K. Morita, Environmental performance evaluation of plug-in hybrid electric vehicles, World Electric Vehicle Journal, WEVA 3 (ISSN 2032-6653) 1 - 8 2009年12月
- 8) 森田賢治, 島村和樹, 山口誠一, 古町圭司, 坂田邦夫, 西川省吾, 成澤和幸, 明光在, 河合英直, HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法 (第3報) - HEV モデル標準化と試験手順確立 -, 自動車技術会論文集 Vol.39, No.4, P.131-136, July 2008.
- 9) 森田賢治, 島村和樹, 土屋賢次, 市川順, HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法 (第2報) - パラレル HEV への適用 -, 自動車技術会論文集 Vol.38, No.3, P.81-86, May 2007.
- 10) Kenji Morita, Kazuki Shimamura, Jun Ichikawa, Fuel Consumption and Exhaust Emissions Test Method for Heavy-Duty HEVs by Using of HILS (First Report) - Application to a Series HEV -, Review of Automotive Engineering Vol.27, No.3, 2006.
- 11) 森田賢治, 島村和樹, HILS を用いた重量 HEV 試験法 (第1報) - シリーズ HEV への適用 -, 自動車技術会論文集 Vol.37, No.2, P.133-138, March 2006.
- 12) 森田賢治, 島村和樹, 市川順, 重量 HEV 排出ガス試験法に関する検討ーシステムベンチ法ー, 自動車技術会論文集 Vol.36, No.4, P.87-92, July 2005.
- 13) 森田賢治, 島村和樹, 杉山元, 堀正彦, 先進クリーンエネルギーハイブリッド電気自動車の燃費向上要因分析, 自動車技術会論文集 Vol.36, No.2, P.59-64, March 2005.
- 14) Morita, K., Shimamura, K., Sugiyama, G., Hori, M. et al., "R&D and Analysis of Energy Consumption Improvement Factor for Advanced Clean Energy HEVs," SAE Technical

Paper 2005-01-3828, 2005

- 15) Soma, S., Nagai, K., Morita, K., Sugiyama, G. et al., "Investigations of Impact of the Ethanol Content on Exhaust Gases, Fuel Evaporative Emissions, High-temperature Driveability, and Materials for Fuel Supply System Parts of Gasoline Vehicles," SAE Technical Paper 2005-01-3710, 2005
- 16) 森田賢治, 島村和樹, 杉山元, 堀正彦, シミュレーションによるハイブリッド電気自動車の燃費改善, 自動車技術会論文集 Vol.35, No.3, P.111-116, July 2004.
- 17) Kenji Morita, Automotive power source in 21st century, JSAE Review, Vol.24, Issue 1, P.3-7, January 2003.
- 18) Long, W., Morita, K., and Iwai, N., "Analysis of HEV Components Efficiency on Fuel Economy," SAE Technical Paper 2000-01-1542, 2000
- 19) Suzuki, J. and Morita, K., "An Experimental Study on Ignitability of Gasoline by Friction Sparks," SAE Technical Paper 920392, 1992

2. 査読無し国際会議論文・発表

- 1) Ichiro Sugimoto, Kenji Morita, Hiroyuki Mitsuishi, Masayoshi Ishida, TSUKUBA GREEN HOLONISM TOWN (II) —EXAMINING A PRELIMINARY ENERGY DEMAND—SUPPLY OUTLOOK, WHEC-2022, On-line, June 26-30, 2022
- 2) Kenji Morita, Ichiro Sugimoto, Hiroyuki Mitsuishi, Masayoshi Ishida, TSUKUBA GREEN HOLONISM TOWN (I) —BUILDING A CARBON-NEUTRAL COMMUNITY, WHEC-2022, On-line, June 26-30, 2022
- 3) Morita, K., Mitsuishi, H., Sugimoto, I., Ishida, M., "Tsukuba Holonism Town—Building A Carbon Neutral Community," 11th SOLARIS 2021, Tokyo, Sep. 2021.
- 4) Kenji Morita, Standardization of Dynamic Wireless Power Transfer System, 6th Annual Conference on Electric Roads & Vehicles (CERV 2020), Park City, UT, USA, Feb. 2020.
- 5) Kenji Morita, Japan National Project: Dynamic Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Considering Safety and Interoperability, 6th Annual Conference on Electric Roads & Vehicles (CERV 2020), Park City, UT, USA, Feb. 2020.
- 6) Yasumasa Maeda, Akihiro Kurokawa, Kenji Morita, Daichi Imamura, Analysis of Relationships between Use Conditions and Battery Performance Degradation for Real-World Electric Vehicles, JSAE EVTeC 2016, Yokohama, May 2016.
- 7) Kenji Morita, Yasumasa Maeda, Akihiro Kurokawa, Daichi Imamura, Tetsuya Suzuki, Evaluation of CO2 emission of Electric Vehicles Based on Actual Measurement in Practical Use, JSAE EVTeC 2014, Yokohama, May 2014.
- 8) Imamura, D., Myojin, M., Shimada, K., Maeda, Y., Morita, K., Tanaka, K., Saegusa, S., "Degradation factors in cycle and calendar aging of lithium ion batteries", Advanced Automobive Battery Conference (AABC) 2013, California, Feb. 2013.
- 9) Kurokawa, A., Morita, K., "Development of Open-Source HEV Model for HILS Certification Test Method", EVS 26, Los Angeles, May 2012.

- 10) Morita, K., "Standardization for fuel consumption measurement of HEV/PHEV", EVTeC 2011 Standardization Forum, Yokohama, May 2011.
- 11) Conte, M., Conte, F.V., Bloom, I.D., Morita, K., Ikeya, T., Belt, J.R., Ageing Testing Procedures on Lithium Batteries in an International Collaboration Context, EVS 25, Shenzhen, China, Nov. 2010.
- 12) Ochiai, K., Wada, Y., Kamiya, Y., Daisho, Y., Morita, K., Power System Modelling and Performance Evaluation of Series/Parallel-type Plug-in HEVs, 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010, Lille, France, Sep. 2010.
- 13) Morita, K., "Developing Cycle Life Test Profiles of Lithium-ion Batteries for Electrically Propelled Vehicles", IEA Accelerated Life Testing of Batteries for Vehicles Meeting, Hilton Waikoloa Village, Jan. 2010.
- 14) Morita, K., Hirose, H., " DEVELOPING CYCLE LIFE TEST PROFILES OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLES, 2nd International Conference on Advanced Lithium Battery for Automobile Applications (ABAA), Tokyo, Nov. 2009.
- 15) Morita, K., Akai, M., Hirose, H., Mita, Y., "Development of Cycle Life Test Profiles of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles", EVS 24, Stavanger, May 2009.
- 16) Morita, K., Shimamura, K., Yamaguchi, S., Furumachi, K. et al., "Development of a Fuel Economy and Exhaust Emissions Test Method with HILS for Heavy-Duty HEVs, SAE World Congress, Detroit, April 2008.
- 17) Myong, K., Narusawa, K., Kawai, T., Goto, Y., Shimamura, K., Morita, K., "Parameter Sensitivity Analysis of Heavy-Duty Parallel HEV on HEVs System", EVS 23, California, Dec. 2007.
- 18) Morita, K., Shimamura, K., et al., "Development of a HILS Method for Testing Heavy-duty HEVs", EVS 22, Yokohama, Oct. 2006.
- 19) Morita, K., Shimamura, K., Sugiyama, G., Hori, M. et al., "R&D and Analysis of Energy Consumption Improvement Factor for Advanced Clean Energy HEVs, SAE Powertarin & Fluid Systems Conference, San Antonio, Oct. 2005.
- 20) Morita, K., "The Advanced Clean Energy Vehicle Project -fuel Consumption and Exhaust Emissions of Gas Engine Hybrid Electric Vehicles-", 自動車技術会 ガス燃料エンジン国際ワークショップ, 工学院大学, 2004年11月
- 21) Morita, K., Shimamura, K., "Overview of the Advanced Clean Energy Vehicle Project and Status of Developments", EVS 20, California, Nov. 2003.
- 22) Morita, K., "Overview of the Advanced Clean Energy Vehicle Project", Workshop on Hybrid Vehicle Technology, Beijing, Nov. 2003.
- 23) Winkel, R., Smokers, R., Kost, R., Penney, T., Morita, K., Coenen, P., Bauner, D., Badin, F., Annex VII "Hybrid Vehicles" of the IEA Implementing Agreement "Hybrid & Electric Vehicles", EVS 19, Busan, Oct. 2002.

- 24) Morita, K., Iwai, N., "Charge and Discharge Characteristic of Capacitors for Hybrid Electric Vehicles", IEA Annex VII Hybrid Vehicles 8th Experts Meeting, Delft, Jan. 2002.
- 25) Morita, K., Shimamura, K., Iwai, N., Shimizu, K., "Test Procedure for Fuel Economy and Exhaust Emissions of Hybrid Electric Vehicles -Comparison of linear approximation and SAE J1711-", EVS 18, Berlin, Oct. 2001.
- 26) Morita, K., "National Projects Relevant to HEVs and FCVs in Japan", ESD EnV 2001: Global Solutions for Sustainable Mobility, Lawrence Technological University, Jun. 2001.
- 27) Morita, K., Shimamura, K., Iwai, N., "Fuel Economy and Exhaust Emissions Test Procedure for Hybrid Electric Vehicles", IEA Annex VII Hybrid Vehicles Experts Meeting, Lyon, April 2001.
- 28) Morita, K., Iwai, N., "Fuel Economy Test Procedure for Hybrid Electric Vehicles -Correction of State of Charge and Regenerative Energy-", EVS 17, Motreal, Oct. 2000.
- 29) Morita, K., Iwai, N., Notoya, O., "Advanced Clean Energy Vehicle Project in Japan", EVS 16, Beijing, Oct. 1999.
- 30) Morita, K., Iwai, N., Notoya, O., "Outline of the Advanced Clean Energy Vehicle Project", SAE Future Transportation Technology Conference, California, Aug. 1999.
- 31) Morita, K., Iwai, N., Niwa, K., "Practicality and Reliability of Otto-type Methanol Vehicles", 12th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XII), Beijing, Sep. 1998.
- 32) Seko, T., Morita, K., Kuroda, E., Iwai, N., Niwa, K., "Development of a Single Methanol Fuel Formulation for Otto-type and Diesel-type Vehicles", 12th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XII), Beijing, Sep. 1998.
- 33) Morita, K., Iwai, N., Niwa, K., "Problems in Otto-type Methanol Vehicles and Solutions Thereto", 11th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XI), Sun City, South Africa, April 1996.

3. 査読無し国内論文・口頭発表

- 1) 森田賢治, 杉本一郎, 三石洋之, 石田政義, 再生可能エネルギーと水素を用いた街「つくばグリーンホロニズムタウン」, FCDIC 第 29 回燃料電池シンポジウム, タワーホール船堀, 2022 年 5 月
- 2) 森田賢治, 脱炭素社会に対応したパーソナルモビリティの一提案, 自動車技術会 2022 年春季大会, パシフィコ横浜, 2022 年 5 月
- 3) 杉本一郎, 森田賢治, 三石洋之, 石田政義, 再生可能エネルギー需給型コミュニティの構成方法の検討, エネルギー資源学会, 第 38 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2022 年 1 月
- 4) 森田賢治, 杉本一郎, 三石洋之, 石田政義, つくばグリーンホロニズムタウン-カーボンニュートラルコミュニティの実現に向けて, エネルギー資源学会, 第 38 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2022 年 1 月
- 5) 前田安正, 黒川陽弘, 森田賢治, 今村大地, 大規模なデータ収集に基づく電気自動車の電池性能評価, 自動車技術会 2014 年秋季大会, 仙台国際センター, 2014 年 10 月
- 6) 前田安正, 黒川陽弘, 今村大地, 森田賢治, 木戸彰彦, 大規模なデータ収集による電気自動

- 車の利用実態分析と電池性能評価，自動車技術会 2014 年春季大会，パシフィコ横浜，2014 年 5 月
- 7) 今村大地，明神正雄，島田佳祐，前田安正，森田賢治，三枝省吾，田中謙司，リチウムイオン電池の劣化要因解析（第 1 報），自動車技術会 2013 年春季大会，パシフィコ横浜，2013 年 5 月
 - 8) 森田賢治，黒川陽弘，大野和之，明神正雄，島田佳祐，電動車両用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの開発（第 2 報）-試験プロファイルの一般化-，自動車技術会 2010 年秋季大会，西日本総合展示場，2010 年 9 月
 - 9) 落合和樹，尾山真太郎，紙屋雄史，大聖泰弘，森田賢治，プラグインハイブリッド自動車の環境性能評価 - 蓄電池の充放電試験法の検討 - ，EVS フォーラム 2009，国際連合大学，2009 年 12 月
 - 10) 関志朗，紀平庸男，宮代一，森田賢治，寺田信之，次世代自動車用リチウムイオン電池の実使用条件を模擬した連続充放電による寿命試験方法の検討，第 50 回電池討論会，国立京都国際会館，2009 年 11 月
 - 11) 森田賢治，赤井泉明，広瀬久士：電動車両用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの開発 - 試験プロファイル作成手法の検討 - ，自動車技術会 2009 年秋季大会，仙台国際センター，2009 年 10 月
 - 12) 森田賢治，赤井泉明，広瀬久士，プラグインハイブリッド電気自動車の電池寿命試験用充放電パターンの検討，第 49 回電池討論会，リーガロイヤルホテル堺，2008 年 11 月
 - 13) 森田賢治，島村和樹，山口誠一，古町圭司，坂田邦夫，西川省吾，成澤和幸，明光在，河合英直，HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法（第 3 報）-HEV モデル標準化と試験手順確立-，自動車技術会 2007 年秋季大会，京都国際会館，2007 年 10 月
 - 14) 森田賢治，島村和樹，土屋賢次，市川順，HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法（第 2 報）-パラレル HEV への適用-，自動車技術会 2006 年秋季大会，札幌，2006 年 9 月
 - 15) 森田賢治，島村和樹，市川順，HILS を用いた重量 HEV 試験法（第 1 報）-シリーズ HEV への適用-，自動車技術会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月
 - 16) 島村和樹，森田賢治，シリーズ方式 HEV の発電制御方法が燃費に及ぼす影響，自動車技術会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月
 - 17) 相馬誠一，長家慶一，森田賢治，杉山元，瀬古俊之，エタノール添加率がガソリン車の排出ガス，燃料蒸発ガス，高温運転性および燃料供給系部品材料に与える影響調査，自動車技術会 第 2 回ガソリン機関部門委員会，2005 年 6 月
 - 18) 森田賢治，島村和樹，市川順，重量 HEV 排出ガス試験法に関する検討-システムベンチ法-，自動車技術会 2004 年秋季大会，仙台国際センター，2004 年 10 月
 - 19) 島村和樹，森田賢治，HEV 要素部品の効率が燃費に及ぼす影響，自動車技術会 2004 年秋季大会，仙台国際センター，2004 年 10 月
 - 20) 森田賢治，島村和樹，杉山元，堀正彦，先進クリーンエネルギーハイブリッド電気自動車の開発，自動車技術会 2004 年春季大会，パシフィコ横浜，2004 年 5 月
 - 21) 森田賢治，島村和樹，杉山元，堀正彦，シミュレーションによるハイブリッド電気自動車の燃費改善，自動車技術会 2003 年秋季大会，名城大学，2003 年 9 月

- 22) 森田賢治, 島村和樹, 高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発プロジェクトの概要と開発状況, 日本機械学会 2002 年度年次大会「先端技術フォーラム」, 東京大学, 2002 年 9 月
- 23) 森田賢治, 島村和樹, 岩井信夫, 清水健一, ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス試験法-連続繰り返しモード平均法, 一時近似法および SAE J1711 の比較-, 平成 13 年度 JEVA 電気自動車フォーラム, 2001 年 11 月
- 24) 島村和樹, 森田賢治, 岩井信夫, ハイブリッド電気自動車用キャパシタの性能, 自動車技術会 2001 年秋季大会, 2001 年 10 月
- 25) 森田賢治, 岩井信夫, 清水健一, ハイブリッド電気自動車の燃費試験方法-バッテリー SOC と回生エネルギーの補正-, 平成 12 年度 JEVA 電気自動車フォーラム, 2000 年 12 月
- 26) 森田賢治, 動力源と動力伝達系の将来, JSAE「動力伝達系の最新技術 2000」, 東京, 2000 年 11 月
- 27) 森田賢治, 岩井信夫, 高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発プロジェクト, 平成 11 年度 JEVA 電気自動車フォーラム, 1999 年 11 月
- 28) 森田賢治, 鈴木啓, 岩井信夫, "ハイブリッド水素自動車の走行燃費シミュレーション", 日本機械学会 熱工学講演会, 筑波大学, 1997 年 11 月

4. 依頼原稿

- 1) 森田賢治, 電動重量車の充電/給電システムに関する開発動向, 月間 JETI 2022 年 1 月号 (JARI Research Journal 2021 年 3 月号原稿の転載)
- 2) 森田賢治, 日本自動車研究所における電動車両に係わる標準化活動, 自動車技術, 69 巻 2 号, 2015 年 2 月
- 3) 森田賢治, 電動車両用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの開発, 自動車技術, 65 巻 7 号, 2011 年 7 月
- 4) 森田賢治, HILS を用いた重量 HEV 排出ガス・燃費試験法の開発, エンジンテクノロジーレビュー, Vol. 1 No. 1, 2009 年 4 月
- 5) 森田賢治, 二次電池を駆動源とする自動車技術の現状と未来, 「電子材料」臨時増刊号「要点早わかりカーエレクトロニクス」, 2009 年 1 月
- 6) 森田賢治, ハイブリッド・燃料電池, 日本機械学会誌「機械工学年鑑」特集号, 2008 年 8 月
- 7) 森田賢治, ハイブリッド・燃料電池, 日本機械学会誌「機械工学年鑑」特集号, 2007 年 8 月
- 8) 森田賢治, 平野出穂, 荻野法一, ハイブリッド車・燃料電池車・電気自動車, 自動車技術会創立 60 周年記念誌「自動車技術この 10 年」, 2007 年 5 月
- 9) 森田賢治, 「高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発」事業の成果, 自動車技術, 58 巻 11 号, 2004 年 11 月
- 10) 森田賢治, ハイブリッド車・燃料電池車・電気自動車, 自動車技術, 58 巻 8 号, 2004 年 8 月
- 11) 森田賢治, ハイブリッド, 燃料電池など先進動力自動車の現状と将来, 電気製鋼, 第 72 巻 4 号, 2001 年 10 月
- 12) 森田賢治, 21 世紀の自動車用動力源, 自動車技術, 55 巻 1 号, 2001 年 1 月

5. 講演・各種講師など

- 1) 森田賢治, 今なぜ超高齢・少子化社会に対応した持続可能なモビリティが必要なのか, JSAE 2023 年度第 10 回講演会「超高齢・少子化社会における持続可能なモビリティ」, オンライン, 2024 年 3 月
- 2) 森田賢治, ホロニズム構想におけるモビリティからのアプローチ, ひとまちラボつくば, 2023 年 4 月
- 3) 森田賢治, カーボンニュートラルに向けた重量車電動化の世界動向, JSAE シンポジウム No.20-21「電動車両技術の最新動向」, オンライン, 2022 年 2 月
- 4) 森田賢治, 商用車（トラック, バス）の電動化の技術動向と将来展望, N-PLUS, 電動化技術展 2022 セミナー, 東京ビッグサイト, 2022 年 2 月
- 5) 森田賢治, 電気道路システム（ERS）の世界動向と位置づけ, JSAE シンポジウム No.15-21「ゼロエミッションに向けた OEM 視点での EV, FCV 化の実現と将来展望」, オンライン, 2021 年 12 月
- 6) 森田賢治, 加速する重量車電動化の世界動向, 東京理科大学 e モビリティシンポジウム, オンライン, 2021 年 9 月
- 7) 森田賢治, 大電力充電と走行中給電の世界動向, JSAE オンラインフォーラム, オンライン, 2021 年 7 月
- 8) 森田賢治, 商用車の電動化に関する技術動向, TECHNO-FRONTIER 2021 第 41 回モータ技術シンポジウム, オンライン, 2021 年 7 月
- 9) 森田賢治, 走行中給電システムの技術開発動向と経済成立性, アドバンスト・バッテリー技術研究会 2020 年度公開シンポジウム, オンライン, 2021 年 1 月
- 10) 森田賢治, 重量車の電動化に関する技術動向, 東京理科大学 EV シンポジウム, オンライン, 2020 年 11 月
- 11) 森田賢治, 水素を活用する新しいエネルギー社会に向けて, いばらき水素普及促進シンポジウム, 2020 年 11 月
- 12) 森田賢治, 電気道路システムが加速させる重量車の電動化, JSAE 電気動力技術部門委員会 公開委員会「走行中給電が拓げる電気自動車の未来」, オンライン, 2020 年 9 月
- 13) 森田賢治, 重量車の電動化に関する技術動向, JSAE 第 1 回蓄電システム技術部門委員会, オンライン, 2020 年 6 月
- 14) 森田賢治, 重量車の電動化に関する技術動向, キャパシタフォーラム 2020 年度年次大会・公開セミナー, オンライン, 2020 年 5 月
- 15) 森田賢治, 電気および燃料電池自動車の開発動向と標準化活動, アドバンスト・バッテリー技術研究会 第 151 回定例研究会, 大阪科学技術センター, 2015 年 2 月
- 16) 森田賢治, JARI における標準化活動と電動車両用リチウムイオン電池寿命試験方法に係わる取り組み, 工業技術研究院 (ITRI), 台北, 2014 年 9 月
- 17) 森田賢治, 環境規制と次世代自動車の動向, 電気化学セミナー1「最先端電池技術 2014」, タワーホール船堀, 2014 年 1 月
- 18) 森田賢治, 電動車両用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの開発, バッテリージャパン 第 1 回国際二次電池展 専門技術セミナー, 東京ビッグサイト, 2010 年 2 月

- 19) 森田賢治, PHEV用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験法の開発, アドバンスト・バッテリー技術研究会 第121回定例研究会, 大阪科学技術センター, 2009年10月
- 20) 森田賢治, 二次電池を駆動源とする自動車の特徴と開発動向, 最先端電池技術2009, タワーホール船堀, 2009年1月
- 21) Morita, K., "Development of the Fuel Economy and Exhaust Emissions Test Method with HILS for Heavy-Duty HEVs", HDV global meeting, Brussels, March 2008.
- 22) 森田賢治, ハイブリッドおよび電気自動車技術の現状と将来展望, 自動車技術会 ハイブリッド・電気自動車における最新技術と将来動向, 工学院大学, 2008年2月
- 23) 森田賢治, ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス試験方法, 自動車技術会 シンポジウム No. 15-01 「21世紀を担うガソリンエンジンとは?」, 2001年12月
- 24) 森田賢治, ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス試験方法, 自動車技術会 ガソリン機関部門委員会・ディーゼル機関部門委員会合同シンポジウム, 2001年10月

6. マスメディアへの記事掲載・出演など (1本)

- 1) 岩井信夫, 小口誠, 森田賢治, いよいよエコロジーカーの時代に, ニュートン, 1998年6月

7. 書籍

- 1) 森田賢治, 排出ガス・燃料消費率・電力量消費率及び動力性能試験方法, 自動車技術ハンドブック, 第7分冊「設計 (EV・ハイブリッド) 編」, 2016年1月
- 2) 森田賢治, ハイブリッド用パワートレイン, 自動車技術ハンドブック, 第1分冊「設計 (基礎・理論) 編」, 2015年10月
- 3) 森田賢治, 燃費・動力性能試験方法, 自動車技術ハンドブック, 第10分冊「設計 (EV・ハイブリッド) 編」, 2011年3月
- 4) 森田賢治, 充電状態 (state of charge, SOC), 自動車の百科事典, 2010年1月
- 5) 森田賢治, ハイブリッドシステム, 機械工学便覧, γ4編 (内燃機関), 2006年8月

8. 日本自動車研究所報 (JARI Research Journal)

- 1) 森田賢治: 重量車のカーボンニュートラル技術の動向と位置づけ, JARI Research Journal, 2022年10月
- 2) 森田賢治: 電動重量車の充電/給電システムに関する開発動向, JARI Research Journal, 2021年3月
- 3) 前田安正, 黒川陽弘, 森田賢治, 今村大地: 実使用下の電気自動車の電池性能評価および劣化要因分析, JARI Research Journal, 第38巻6号, 2016年6月
- 4) 黒川陽弘, 森田賢治: ハイブリッド重量車排出ガス試験法の国際基準調和-WHVC 負荷補正方法が排出ガス試験値へ与える影響の調査-, JARI Research Journal, 第37巻9号, 2015年9月
- 5) 森田賢治, 桑田雅敏: 電動車両の開発動向, JARI Research Journal, 第36巻9号, 2014年9月
- 6) 明神正雄, 森田賢治: 電池の性能低下がプラグインハイブリッド電気自動車の燃費性能へ与

- える影響のシミュレーション, JARI Research Journal, 第 34 卷 11 号, 2012 年 11 月
- 7) 黒川陽弘, 森田賢治: HILS 認証試験法の剛体系 HEV モデルの開発ーフルードカップリング/ロックアップクラッチモデルの開発ー, JARI Research Journal, 第 34 卷 8 号, 2012 年 8 月
 - 8) 大野和之, 森田賢治: リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの検証, JARI Research Journal, 第 34 卷 7 号, 2012 年 7 月
 - 9) 黒川陽弘, 森田賢治: HILS 認証試験法の剛体系 HEV モデルの開発, JARI Research Journal, 第 33 卷 7 号, 2011 年 7 月
 - 10) 森田賢治, 黒川陽弘: 次世代自動車用電池性能試験方法の開発 (第 4 報)ーサイクル寿命試験プロファイルの一般化ー, JARI Research Journal, 第 32 卷 7 号, 2010 年 7 月
 - 11) 黒川陽弘, 森田賢治: 次世代自動車用電池性能試験方法の開発 (第 3 報)ー簡易サイクル寿命試験プロファイル用基データの妥当性検討ー, JARI Research Journal, 第 32 卷 7 号, 2010 年 7 月
 - 12) 矢野勝, 森田賢治: プラグインハイブリッド電気自動車の燃費計測方法の検討ー排出ガス量が少ない試験サイクルの CO₂ 分析誤差の影響ー, JARI Research Journal, 第 31 卷 12 号, 2009 年 12 月
 - 13) 森田賢治, 赤井泉明, 広瀬久士: 次世代自動車用電池性能試験方法の開発 (第 2 報)ー簡易サイクル寿命試験プロファイル作成方法の検討ー, JARI Research Journal, 第 31 卷 7 号, 2009 年 7 月
 - 14) 森田賢治, 赤井泉明, 広瀬久士: 次世代自動車用電池性能試験方法の開発 (第 1 報)ープラグインハイブリッド電気自動車用電池充放電パターンの検討ー, JARI Research Journal, 第 30 卷 7 号, 2008 年 7 月
 - 15) 森田賢治, 島村和樹, 山口誠一: HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法 (第 3 報)ーHEV モデル標準化と試験手順確立ー, JARI Research Journal, 第 29 卷 6 号, 2007 年 6 月
 - 16) 森田賢治, 島村和樹, 土屋賢次, 市川順: HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法 (第 2 報)ーパラレル HEV への適用ー, JARI Research Journal, 第 28 卷 7 号, 2006 年 7 月
 - 17) 森田賢治, 島村和樹, 土屋賢次, 市川順: HILS を用いた重量 HEV 燃費・排出ガス試験法 (第 1 報)ーシリーズ HEV への適用ー, JARI Research Journal, 第 28 卷 7 号, 2006 年 7 月
 - 18) 島村和樹, 森田賢治: シリーズ方式 HEV の発電制御が燃費に及ぼす影響ー数値シミュレーションによる検討ー, JARI Research Journal, 第 27 卷 12 号, 2005 年 12 月
 - 19) 島村和樹, 森田賢治, 杉山元, 堀正彦: 数値シミュレーションによる HEV 要素部分の効率が燃費に及ぼす影響, JARI Research Journal, 第 26 卷 11 号, 2004 年 11 月
 - 20) 森田賢治, 島村和樹, 市川順: 重量 HEV 排出ガス試験法に関する検討ーシステムベンチ法の運転精度改善ー, JARI Research Journal, 第 26 卷 11 号, 2004 年 11 月
 - 21) 森田賢治, 島村和樹: ハイブリッド電気自動車の評価法に関する検討, JARI Research Journal, 第 25 卷 11 号, 2003 年 11 月
 - 22) 森田賢治: 高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発プロジェクトの概要, JARI Research Journal, 第 25 卷 11 号, 2003 年 11 月
 - 23) 島村和樹, 森田賢治: パラレル式 HEV の負荷分担率が燃費に及ぼす影響, JARI Research

- Journal, 第 25 卷 4 号, 2003 年 4 月
- 24) 森田賢治, 島村和樹: HEV 燃費・排出ガス試験法について—一次近似法の適用—, JARI Research Journal, 第 24 卷 9 号, 2002 年 9 月
 - 25) 森田賢治, 島村和樹, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の燃費性能, JARI Research Journal, 第 24 卷 1 号, 2002 年 1 月
 - 26) 森田賢治, 島村和樹, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス試験法—連続繰り返しモード平均法, 一次近似法および SAE J1711 の比較—, JARI Research Journal, 第 23 卷 10 号, 2001 年 10 月
 - 27) 島村和樹, 森田賢治, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車用キャパシタの効率と自己放電特性, JARI Research Journal, 第 23 卷 7 号, 2001 年 7 月
 - 28) 隆武強, 森田賢治, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の燃費改善要因の解析, JARI Research Journal, 第 23 卷 7 号, 2001 年 7 月
 - 29) 森田賢治, 隆武強, 岩井信夫: 高効率クリーンエネルギー自動車の燃費目標, JARI Research Journal, 第 22 卷 11 号, 2000 年 11 月
 - 30) 森田賢治, 島村和樹, 多田隆一, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス試験法—路上とシャシダイナモ上の回生電気量の比較—, JARI Research Journal, 第 22 卷 7 号, 2000 年 7 月
 - 31) 森田賢治, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス測定法—電気量収支および回生電気量の補正—, JARI Research Journal, 第 21 卷 9 号, 1999 年 9 月
 - 32) 森田賢治, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の燃費・排出ガス測定法—電気量収支および回生電気量の補正—, JARI Research Journal, 第 21 卷 9 号, 1999 年 9 月
 - 33) 黒田英二, 森田賢治: 新仕様メタノール燃料 (LN-M92) の車両への適合性, JARI Research Journal, 第 21 卷 9 号, 1999 年 9 月
 - 34) 隆武強, 森田賢治, 岩井信夫: ハイブリッド電気自動車の各要素効率の燃費影響度予測, JARI Research Journal, 第 21 卷 9 号, 1999 年 9 月
 - 35) 森田賢治, 岩井信夫: 「高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発」プロジェクトの概要, JARI Research Journal, 第 21 卷 1 号, 1999 年 1 月
 - 36) 瀬古俊之, 森田賢治, 黒田英二, 岩井信夫: ライトナフサを炭化水素基材に用いた高濃度メタノール燃料メタノール自動車への適合性について, JARI Research Journal, 第 20 卷 7 号, 1998 年 7 月
 - 37) 瀬古俊之, 森田賢治, 黒田英二, 岩井信夫: 高濃度メタノール燃料中の炭化水素成分およびメタノール濃度がメタノール自動車の性能に及ぼす影響, JARI Research Journal, 第 20 卷 7 号, 1998 年 7 月
 - 38) 森田賢治: オットータイプメタノール自動車の耐久性調査, JARI Research Journal, 第 19 卷 9 号, 1997 年 9 月
 - 39) 森田賢治: 第 11 回アルコール燃料国際シンポジウムに参加して, JARI Research Journal, 第 18 卷 9 号, 1996 年 9 月
 - 40) 森田賢治, 林誠司, 赤井泉明, 岩井信夫: オットータイプメタノール自動車に残された技術課題とその解決方法, JARI Research Journal, 第 18 卷 2 号, 1996 年 2 月

- 41) 森田賢治, 岩井信夫: 燃料添加剤の利用によるインジェクタの耐久性の向上, JARI Research Journal, 第 18 卷 2 号, 1996 年 2 月
- 42) 森田賢治, 吉村昇, 林誠司, 岩井信夫: オットータイプメタノール自動車の管理下走行試験, JARI Research Journal, 第 18 卷 2 号, 1996 年 2 月
- 43) 鈴木仁治, 森田賢治: 擦過火花によるガソリンの発火性, JARI Research Journal, 第 11 卷 9 号, 1989 年 9 月
- 44) 山口郁夫, 吉田祐作, 長家慶一, 森田賢治, 鈴木仁治, 瀬古俊之, 堀政彦: メタノール改室ガスディーゼルエンジンの開発研究－第 3 報: 燃焼の最適化とエンジン特性－, JARI Research Journal, 第 8 卷 4 号, 1986 年 4 月
- 45) 鈴木仁治, 堀政彦, 鈴木俊二, 森田賢治: メタノール・ディーゼルバスの一般耐久走行試験, JARI Research Journal, 第 8 卷 1 号, 1986 年 1 月