

車両シミュレーションを活用した、電費と乗り心地の定量評価手法

Vehicle Simulation-Based Quantitative Evaluation for Power Consumption and Ride Comfort

荒井 光司*
Koji Arai

畑中 健一
Kenichi Hatanaka

藤川 裕之
Hiroyuki Fujikawa

近年、環境規制の強化を背景として自動車の電動化が推進されると共に、自動運転に代表される新機能搭載による車載システムのいっそうの複雑化が見込まれている。機能の大きな変化と追加に伴って開発工数が増大する中で、開発の効率化のため、シミュレーションを活用した開発手法が広まり始めており、自動車新領域研究開発センターでもかねてよりシミュレーションによる部品性能の検証技術開発に取り組んできた。以前に開発した電費解析技術をベースとして、乗り心地を定量化するモデルを追加することで、シミュレーション上で電費と乗り心地のトレードオフを検証する技術を開発したので紹介する。

Vehicle electrification has been proactively promoted because of environmental restrictions. At the same time, new functions, such as autonomous driving and V2X communication, have made vehicle systems more complex. As the development costs have risen following these trends, system development using simulation has come into widespread use to improve cost efficiency. We have been developing simulation techniques to identify the effects of improvements in our product performance in regard to power consumption. This paper introduces a simulation technique to verify the trade-off between power consumption and ride comfort.

キーワード：自動車、シミュレーション、モデルベース開発

1. 緒言

近年、世界各国における環境規制の強化を背景に、自動車の電動化が急激に押し進められている。同時に、自動運転やV2X通信による車車間/路車間連携、遠隔通信を利用した制御機器のプログラム更新等、搭載機能が複雑化していくことも見込まれる。こうした状況において、車両開発期間の短縮は重要課題となっており、従来車メーカー内で行われてきた、仕様書や図面の作成にサプライヤも参画し、車両目線での提案を行うことが求められている。また、ここで用いる開発手法として、「モデルベース開発」という手法に注目が集まっており⁽¹⁾、この手法への対応も必須となりつつある。

これらの要求に対し、自動車新領域研究開発センターではかねてよりシミュレーションによる部品性能の検証技術開発に取り組んでいる。2016年度までに当社電源関連部品が燃費に与える影響を解析する技術を開発しており⁽²⁾、この技術を利用することで、電気自動車における電費を解析することも可能である。ここで、電気自動車においては、車両の商品力として非常に重要な要素である電費と乗り心地の間にトレードオフの関係があるため、これらを同時に評価することが必要となる。従来、乗り心地は試作車を用いて官能評価が行われてきたが、設計段階でトレードオフを考慮したパラメータ検討を実施するべく、乗り心地を定量化して車両シミュレーションに組み込んだ。本稿では、電費と乗り心地を定量的に評価するシミュレーション技術

について紹介する。

2. 乗り心地の定量化

電気自動車において、加減速時の挙動は乗員の乗り心地とともに、電費にも影響する。例えば、減速時の回生ブレーキ^{*1}において、電費の向上を最優先で考えれば、できる限り電力を回収するため、最大限の減速力を発生させたいが、急激な減速力の発生は乗員の頭部や身体を揺さぶり、大きな不快感を与えてしまう。そこで、車両としての商品力を考慮すると、乗員に不快感を与えないように発生する加速度を制限することが考えられる。加速度を制限することは、モータやバッテリーにおける消費/発電電力も制限されるため、要求スペックも変化し、部品の設計に影響を及ぼすことになる。設計段階で乗り心地を評価できれば、試作後の部品スペックの見直しを防いで開発を効率化することにつながるが、そのためには、車両の挙動と乗り心地の関係の定量化が必要である。今回の研究では、加減速時の挙動に注目し、乗り心地の定量化に取り組んだ。

2-1 実車評価条件

自動車の加減速と乗り心地について、王ら⁽³⁾は加速度及びジャーク^{*2}を变量とした乗り心地の定量化に取り組んでいる。車両の進行方向の加速度を測定するとともに、乗員に乗り心地評価用のスイッチを持たせ、走行中不快に感じた場合にスイッチを押してもらうことで、発生加速度及び

ジャークと不快度の関係を測定している。この実験方法を参考に、実車評価による乗り心地の定量化に取り組んだ。

実験には電動パワートレイン^{※3}を持つ乗用車2台（コンパクトカー及びセダン）を使用。加速度センサを用いて車両進行方向の加速度を測定した。ジャークは直接測定できないため、加速度センサの測定値を微分して求めることとし、ノイズの影響を排除するため、ローパスフィルタを用いた。乗り心地の評定は下記に示す4段階とし、助手席と後席左右の3名が評価用スイッチを押すことで測定した。

- 評定値0：不快でない。（何も押さない）
- 評定値1：やや不快である。（1番のスイッチを押す）
- 評定値2：不快である。（2番のスイッチを押す）
- 評定値3：非常に不快である。（3番のスイッチを押す）

測定系の概要を図1に示す。

20代～50代の男性20名を被験者とし、走行中の姿勢は座位とした。実験は名古屋市内及び大阪市内の平坦な舗装路で行い、様々な加速度・ジャークを発生する速度パターンで走行した。

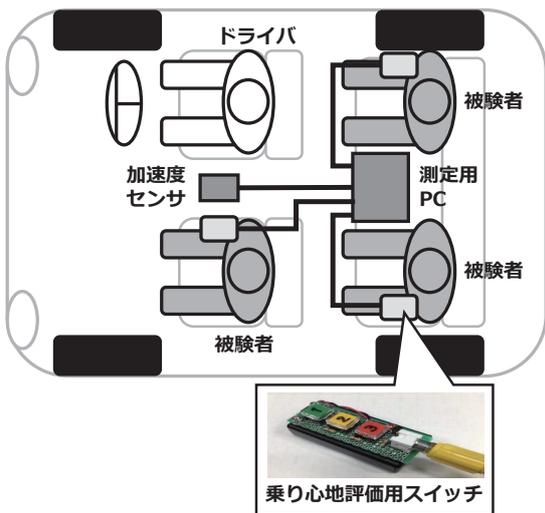


図1 実車評価測定系概要

2-2 実車評価結果

測定した不快度を、横軸を加速度、縦軸をジャークとしてマップデータ化した。各加速度・ジャークの点において、(スイッチの押された頻度) / (その加速度・ジャークの発生頻度) = 不快度数として算出し、これをプロットした結果を図2(a)～(c)に示す。図2(d)には、各評定値における不快度数の結果に重みをつけて重ね合わせた結果を示す。加速時より減速時の方が不快度が大きく、また、加速度が小さくてもジャークが大きいと不快度が大きい結果が得られている。これは乗り心地に対する影響度が減速度 > 負

ジャーク > 正ジャーク > 加速度であるとした王らの指摘⁽³⁾と一致しており、妥当な評価結果が得られたと考えられる。

なお、不快度への感度には個人差があったが、加速度・ジャークが大きいほど不快である、加速時より減速時の方が許容度が小さい、という全体傾向はどの被験者も変わらなかった。よって、不快度数マップの作成にあたっては、全被験者の測定結果を全て重ね合わせている。

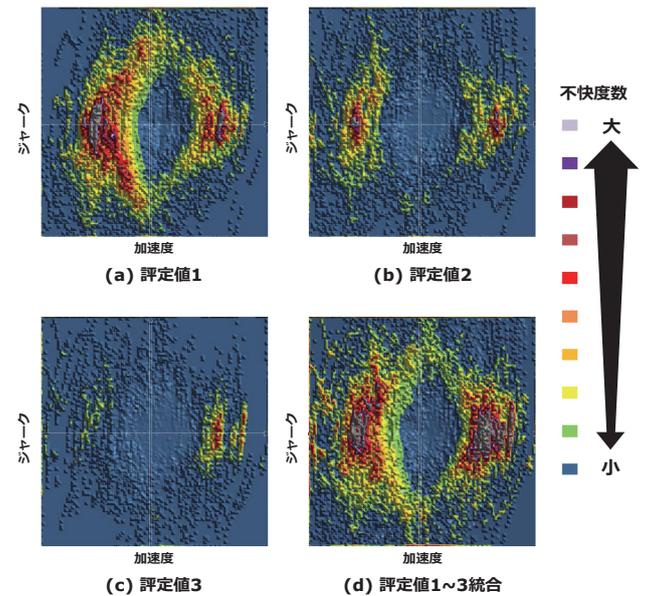


図2 不快度数マップ

2-3 シミュレーションによる不快度の評価

実験によって得られた不快度数マップを車両シミュレーションモデルに実装し、走行パターンにおいて発生する不快度の定量評価を行った。電気自動車における電費を解析するモデルに、発生した加速度・ジャークを入力として、不快度数マップから不快度を算出するモジュールを追加した。構築したモデルの概要を図3に示す。このモデルを利用し、様々な走行パターン^{※4}について、電費と発生する不快度について検証を行った結果を表1に示す。

表1 各走行パターンにおける電費と不快度

走行パターン	電費 [km/kWh]	不快度数累積 [No Unit]
JC08	10.93	4514.76
FTP	11.28	8255.45
WLTC	9.45	8802.78

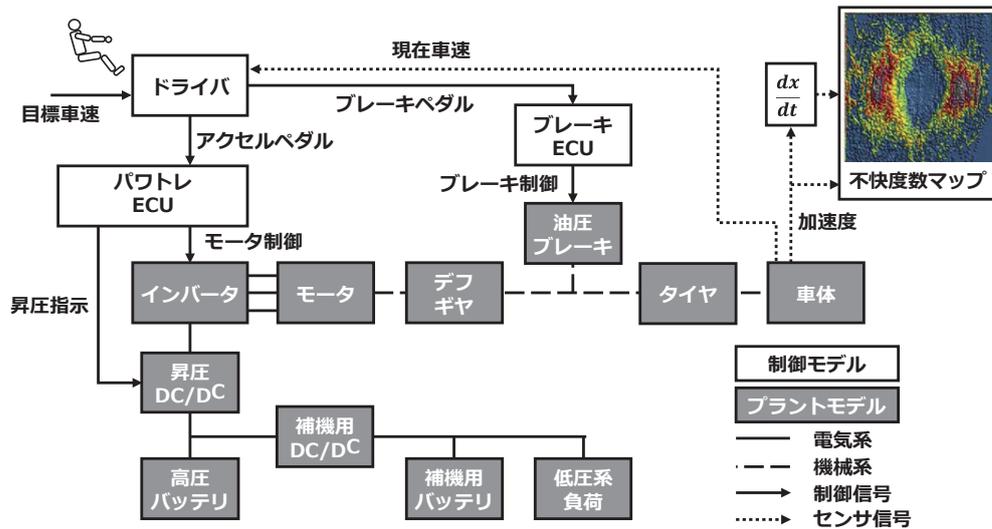


図3 車両モデル概要

3. 乗り心地と電費のトレードオフの検証

実車評価によって得られた不快度数マップを実装することで、車両シミュレーションで乗り心地を定量的に評価することができるようになった。続いて、このモデルを用いて乗り心地と電費のトレードオフの検証に取り組んだ。

3-1 乗り心地向上制御の検討

乗り心地と電費のトレードオフについて検証を行うためには、乗り心地を考慮しない制御と考慮した制御を作成し、同一の走行パターンをシミュレーションした結果を比較する必要がある。これまでに作成してきたモデルは、モード燃費/電費の解析を目的としたものであるため、走行パターンの再現を主目的とし、アクセル・ブレーキの入力通りに駆動力・制動力を発生させる仕様となっている。この制御を乗り心地を考慮しない制御とし、これに対して、乗り心地を向上させる制御の検討・実装に取り組んだ。

前述の通り、加減速・ジャークが大きい程不快度は大きくなるため、最も単純には、アクセル・ブレーキの入力と駆動力・制動力の間にローパスフィルタを設けると共に、最大加速度を制限すれば良い。しかし、このような単純な制御とした場合、例えば、緊急回避のためにドライバーがアクセルやブレーキを踏みこんだ場合にも加速度が制限されると、衝突事故を回避できなくなってしまう等、実際の車両では不都合が発生する恐れがある。また、不快度数マップに示される通り、加速度・ジャークに対する不快度の発生は非線形であるため、一定のフィルタでは、状況によって効果の大きさに差が生じてしまう。そこで、ドライバーの操作意図と道路状況に応じて、乗り心地をよくする制御はどうあるべきかを検討し、抽出した要求に従って制御を作成した。作成した制御アルゴリズムを図4に示す。

車両モデルでは、ペダルの操作量と車速からモータで発

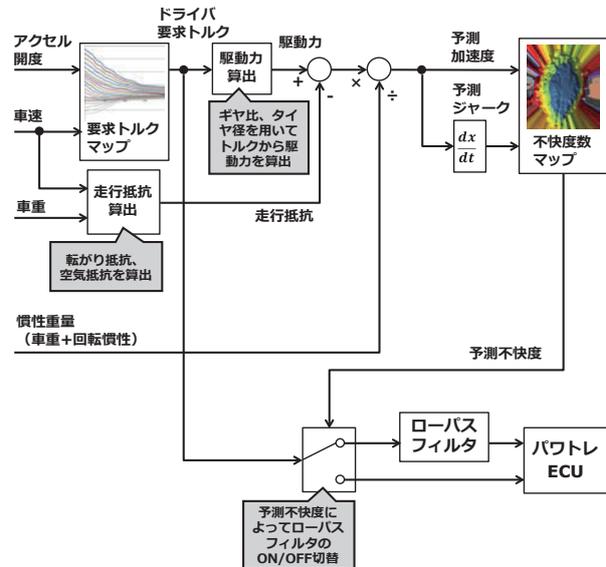


図4 乗り心地向上制御アルゴリズム

生させるトルク指示量が決定される。このトルク指示量と、車重や現在車速等から求まる走行抵抗を用いて、発生する加速度やジャークを予測できるため、これらの予測値と不快度数マップから不快度を算出する。算出された不快度が一定の閾値を超える場合はローパスフィルタ^{*5}を通してジャークが小さくなるようにした。また、電動パワートレインであることから、BMW社や日産自動車(株)の車両で採用されているワンペダル制御を前提とし、緊急回避のための操作を遅らせることの無いよう、ブレーキ操作には介入しないこととした。

3-2 未熟なドライバモデルの作成

乗り心地向上制御のアルゴリズムは作成できたが、そもそも穏やかな走行パターンや、加減速の滑らかな走行をするドライバモデルであった場合、乗り心地向上制御の効果が小さくなってしまいうため、電費と乗り心地のトレードオフについてパラメータによる効果検証を行うには不都合である。そこで、不快度が大きく発生するように、未熟なドライバモデルを作成することとした。シミュレーションモデルが直進走行のモデルであるため、カーブでの走行は考慮せず、「未熟」の定義は、「加減速を伴う直進走行において乗り心地が悪いこと」とした。乗り心地向上制御におけ

る要求分析結果に基づき、乗り心地の悪い運転と、その原因となるドライバの操作とはどんなものかを分析・検討して未熟なドライバモデルを作成した。作成したモデルを図5に示す。未熟である要因として、①ペダルの踏み具合と加速度の関係見積りが不正確で、②ペダル操作時に操作量が不必要に大きくなってしまふことと考え、これらの特性を再現するモジュールを従来のドライバモデルに追加した。

3-3 電費シミュレーション結果

作成した乗り心地向上制御及び未熟なドライバモデルを組み込んだモデルを用いて、様々な走行パターンで電費解析を行った結果を表2に示す。乗り心地向上制御によって不快度数が低減されるとともに回生電力量も減少していること、また、未熟なドライバモデルの方が乗り心地向上制御の効果が大きいことが確認できる。電費については、乗り心地向上制御の導入によってわずかな向上が見られるが、これは加速時の過大なトルクの発生が抑えられることで余剰な電力消費が低減されることによると考えられる。乗り心地向上制御を有効にした場合と無効にした場合の、モータでの発生トルク・電流及びバッテリー電流の波形を図6に示す。急激な減速時に、乗り心地向上制御が動作してトルク急変を制限し、それに伴ってバッテリー電流も低減されている様子が見て取れる。今回解析を行ったのは燃費測定用の走行パターンであり、極端な加減速の割合が少ないため、電費では大きな差異が見られなかったが、より加減速の大きい走行が多いパターンや、勾配影響の考慮、モータトルク等の車両諸元を変えての検討も行っていきたい。また、電流の低減は熱の面での効果も大きいと考えられるため、発熱の要素も考慮したモデルへの発展も有用と考えられる。

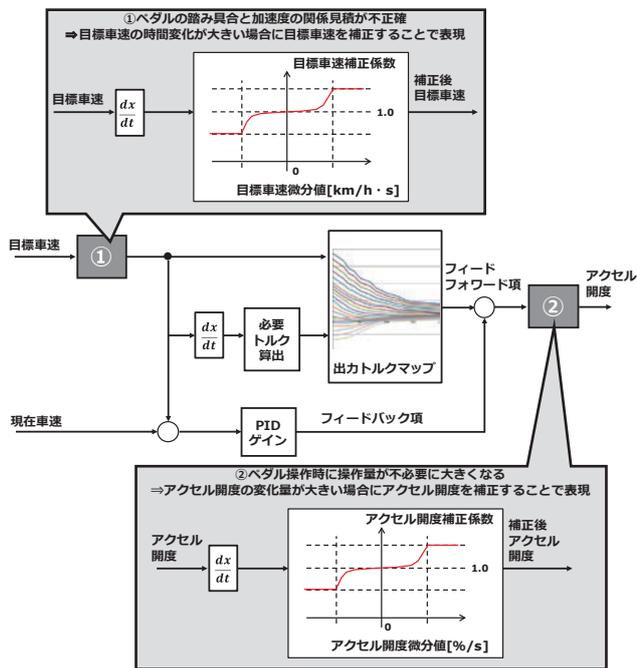


図5 未熟なドライバモデル

表2 電費解析結果

走行パターン	ドライバモデル	乗り心地向上制御	電費 [km/kWh]	回生電力量 [Wh]	不快度数累積 [No Unit]
JC08	通常	無	10.93	381.93	4514.76
		有	10.93	381.87	4393.33
	未熟	無	10.45	462.35	6537.77
		有	10.45	461.69	6341.11
FTP	通常	無	11.28	518.73	8255.45
		有	11.29	518.15	8067.88
	未熟	無	11.04	569.02	9936.94
		有	11.05	567.66	9487.94
WLTC	通常	無	9.45	801.11	8802.78
		有	9.45	800.21	8649.37
	未熟	無	9.20	962.49	11725.93
		有	9.22	957.11	11116.35

用語集

※1 回生ブレーキ

減速の際にモータで発電を行い、その負荷を減速力に利用するブレーキ。通常の油圧ブレーキでは熱に変換されて廃棄される運動エネルギーを電気エネルギーとして回収することができるため、電費向上に貢献する。

※2 ジャーク

加速度の時間微分。「加加速度」「躍度」とも。運動方程式 ($F = Ma$) より、加速度の変化は、ある物体に加わる力の変化として捉えられるため、ジャークが大きいのことは急激に大きな力を加えられることに等しくなる。

※3 電動パワートレイン

車両を走行させるための力を発生させるのがモータである駆動系。バッテリーから電力供給を受ける電気自動車だけでなく、ガソリンエンジンで発電し、その電力でモータを駆動するハイブリッド車も含まれる。

※4 走行パターン

各時間における車速を記述した数列。これを目標車速としてドライバモデルに入力し、ドライバモデルはこの入力と、実車速との偏差に従ってアクセル・ブレーキペダルを操作する。燃費の測定では、1秒ごとに車速が定められた走行パターンに従って車両を走らせ、その燃料消費量を測定する。JC08、FTP、WLTCはそれぞれ日本、米国、世界共通の燃費測定用の走行パターンの名前。

※5 ローパスフィルタ

ある信号のうち、周波数の低い成分は通過させ、周波数の高い成分は減衰させる特性を持ったフィルタ。今回の測定では、測定結果に混入するノイズは、測定対象である加速度の周波数に対してかなり高い周波数となるため、適切に設計したフィルタを用いることで、ノイズによる影響を排除することができる。

参考文献

- (1) 経済産業省、ニュースリリース「自動車産業におけるモデル利用のあり方に関する研究会今後の方針『SURIWASE2.0の深化』をとりまとめました」
<http://www.meti.go.jp/press/2018/04/20180404003/20180404003.html>
- (2) 荒井光司 他、「機械系と電源系を連携した車両電源シミュレーション技術」、SEIテクニカルレビュー第190号、P.111 (2017)
- (3) 王鋒 他、「自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究」、人間工学36巻 (2000) 4号、p.p. 191-200

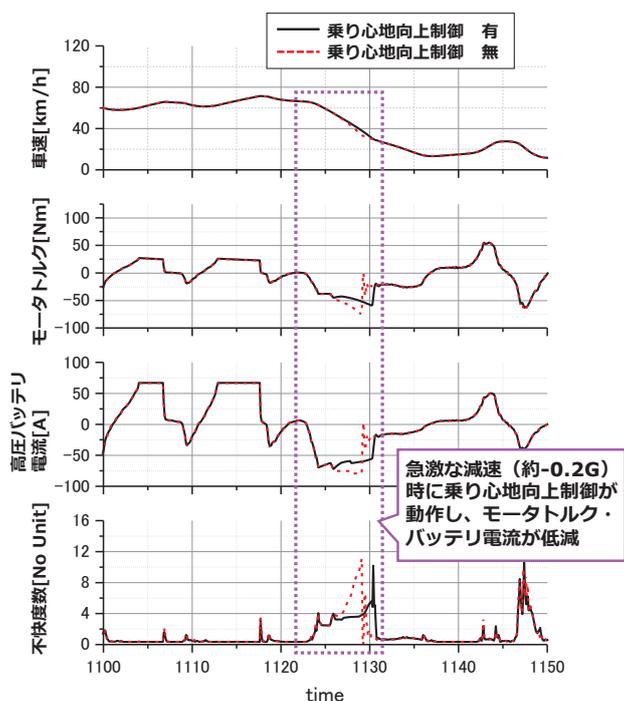


図6 乗り心地向上制御有無の波形比較

4. 結 言

自動車の商品力において重要な役割を占める電費と乗り心地について、シミュレーションによって設計段階で定量評価を行うことで開発効率化に貢献できるものと考え、そのモデル化と活用方法の検討に取り組んだ。実車評価によって加速度・ジャークに対する不快度をマップ化し、これを利用した乗り心地の向上制御を考案。乗り心地を考慮した制御を織り込んだ車両シミュレーションを実施して、電費や、各 부품の電流値等を比較すると、トルク変動が小さくなることで最大電流値が小さくなることが確かめられた。今回開発した技術により、車両目線で部品パラメータを検討する際の評価軸に「乗り心地」を加えることができた。様々な走行パターンで乗り心地・電費と部品パラメータとの検証を行い、競合他社と差別化できる提案につなげ、受注活動に貢献していきたい。

本研究はAZAPA(株)と共同で実施し、実車実験からシミュレーションモデルの作成、検証に至るまで、多大な御協力を頂いた。末尾になるが、心より感謝を申し上げる。

執筆者

荒井 光司* :自動車新領域研究開発センター



畑中 健一 :自動車新領域研究開発センター
室長



藤川 裕之 :自動車新領域研究開発センター
次長



*主執筆者