

回生エネルギーを考慮した自動車のエネルギー効率変化に関する研究

九州大学工学部 学生会員 和田 翔
 九州大学大学院 工学研究院 正会員 大枝 良直
 九州大学大学院 工学研究院 正会員 角 知憲

1. はじめに

近年、地球温暖化が世界各国の抱える大きな課題の1つとなり、世界全体で二酸化炭素排出量削減の動きが本格化している。また、昨今の石油価格の上昇や、自動車による多量の二酸化炭素排出の実態もあり、各自動車メーカーによって代替エネルギー自動車の開発が積極的に行われている。これら代替エネルギー自動車は動力源によって多様な種類に分類されるが、中でも近年一般発売が進められているのがHV車と電気自動車である。これらのメリットとしてよく挙げられるものとして「走行中の二酸化炭素排出量の軽減」「回生ブレーキによるエネルギー回収」の2点がある。しかし、回生ブレーキが走行性能に及ぼす影響を定量的に評価した研究はこれまでなされていない。よって本研究では、回生ブレーキによりエネルギー回収を行う現行の代替エネルギー自動車のエネルギー効率評価を行うことを目的とする。

2. 内容

2-1. 車両の運動モデル

自動車走行時の運動方程式は以下の式で表すことができる。

$$T_f = \mu Mg + kv^2 + Mg \sin \theta + (M + m)\alpha \cdots (1)$$

T_f は車両の推進力[N]、 μ は転がり摩擦係数、 k は空気抵抗係数、 m は加速時の回転部分相当質量[kg]である。また、これを用い、瞬時燃費 f_t [cc/s]を車速 v [m/s]について解くと以下のようなになる¹⁾。

$$f_t = f_{(idle)} + \frac{(\mu + \sin \theta)Mg}{\varepsilon \eta H} v + \frac{k}{\varepsilon \eta H} v^3 + \frac{M+m}{\varepsilon \eta H} \alpha v \cdots (2) (R_t > 0)$$

$f_{(idle)}$ はアイドリング中の消費燃料[cc]、 ε はエンジンの正味熱効率、 η は総伝達効率、 H はガソリンの熱当量[J/cc]である。また、第4項は加速度 $\alpha > 0$ のときのみ定義される加速抵抗を表す。ただし、(2)式は $T_f > 0$ のときのみ成り立ち、 $T_f \leq 0$ では $f_t = f_{(idle)}$ となり、推進力及びエンジンの実効出力はゼロとなる。

2-2. 回生エネルギーを考慮した燃料消費量

車両3, 4に用いられる回生ブレーキは、加速抵抗のエネルギーを減速中に回収する働きを持つ。そこで、回生率を β とし、トリップで消費される燃料 Q [cc]について以下のように定式化を行った。

$$Q = f_{(idle)}T + \sum_{j=1}^J \int_{t_{js}}^{t_{je}} f_t(t) dt - \beta \cdot \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \frac{M+m}{\varepsilon \eta H} (v_{je}^2 - v_{js}^2) \cdots (3)$$

T はトリップ時間、 J は実効出力がゼロとなる回数である。また、アクセルを踏んでいる間は「実効出力 >0 」の状態が連続して現れることから、 j 回目の「実効出力 >0 」の状態の開始時刻を t_{js} 、終了時刻を t_{je} とする。 v_{js} 、 v_{je} はその時刻における速度である。

2-3. 検討車両

本研究では、調査対象として普通自動車(車両1)、軽自動車(車両2)、HV自動車(車両3)、電気自動車(車両4)を1台ずつ取り上げる。ここで取り上げた車両1は、車両3と近い形状、大きさを持つ車両を選定し、車両2は車両4と同型の車両を選定した。各車両の諸元を表2~4に示す。

表2 検討車両諸元

車種	車両1	車両2	車両3	車両4
車両重量(kg)	1240	900	1585	1100
定員	5	4	5	4
排気量(cc)	1797	659	1797	
空気抵抗係数	0.32	0.36	0.25	0.36
前面投影面積(m ²)	2.04	1.90	2.08	1.89
転がり抵抗係数	0.01	0.01	0.01	0.01
変速機	6速 無段変速	4速A/T	電気式 無段変速	

表3 検討車両諸元

	電池種類	モーター種類
車両3	ニッケル水素電池	永久磁石式

表4 検討車両諸元

	バッテリー	総電圧(V)	総電力量(kWh)
車両4	リチウムイオン電池	330	16

2-4. 条件により変化する値の取り扱い

(1) 熱効率

内燃機関の熱効率は出力と回転数に依存することが明らかとなっている。しかし、詳細な燃料消費率試験結果は公開されないことが多い。そのため本研究では、角ら²⁾が測定データによって示した近似式である、以下の(4)式を用いる。

$$\varepsilon = 0.9516P_a^3 - 1.9921P_a^2 + 1.3273P_a \cdots (4)$$

P_a は平均有効圧力[kgm]であり、トルク/排気量で表す。

(2) 変速比

自動車車両は用いるギアを変えることで加速及び減速を行う。しかし、変速時の速度は厳密に定義されているわけではなく、ある程度の幅をもって行われる。そこで本研究では、4速モード車両の測定データを基にシフトチェンジ発生時の走行速度を求め、その走行速度に達した時点でシフトチェンジが起こると仮定した。ここで得られた結果が表5である。また、得られたデータより3速、4速開始時のエンジン回転数は共に2500(rpm)程度と推定できるため、5速、6速開始時の回転数も同程度であると仮定し、6速モードの速度データの推定も同様に行った。この結果を表6に示す。

表5 各速開始時における速度データ(4速モード)

	1速	2速	3速	4速
v(m/s)	0.0	6.3	10.0	12.4

表6 各速開始時における速度データ(6速モード)

	1速	2速	3速	4速	5速	6速
v(m/s)	0.0	6.3	10.0	12.4	15.3	19.9

また、近年ではCVTなど無段変速機も多数の自動車に搭載されている。本研究で扱う車両1は無段変速を行うため、その考慮が必要である。そこで、表5の結果、及び車両1のマニュアル時の各速の変速比を基に、速度におけるギア比の推定を行った。この結果を以下の図1に示す。

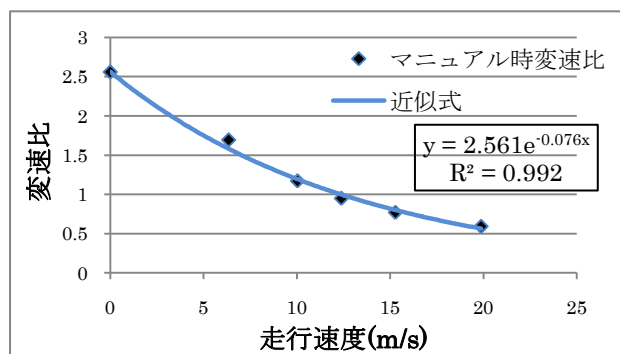


図1 走行速度における変速比

車両1は、上記の近似曲線にそって変速を行うと仮定する。ただし、得られた近似曲線は $y \geq 0.427$ のときに適用され、それ以上の車速では $y=0.427$ で一定である。なお、車両3に用いられている無段変速機は車両1と異なり減速比が一定であるため、この仮定は用いないこととする。

2-5. 計算方法

計算の流れを以下に示す。

- (1)JE05 モードを用い、走行速度と変速比よりエンジン回転数を求める。
- (2)エンジンの実効出力を求める。
- (3)実効出力と回転数より実効トルクを求める。
- (4)実効トルクよりエンジントルクを求める。
- (5)エンジントルク、排気量より平均有効圧力を求める。
- (6)平均有効圧力より熱効率を求める。
- (7)瞬間燃料消費量を求め、そこからトリップ燃料消費量を求める。また、車両4に関しては必要電力量を求める。
- (8)発電効率、充放電効率、送電ロスを検討し、エネルギー効率の評価を行う。

3. 終わりに

今後、本研究では上記の方法により自動車車両のエネルギー効率の比較を行う。また、その後の課題として、バスや地下鉄など他の交通機関との比較が挙げられる。一般に公共交通機関は環境に優しいと言われるが、それはある一定以上の顧客がある場合に限られる。そのため、エコカーの参入により公共交通機関の環境における優位性に影響を与える可能性があると考えられる。

4. 参考文献

- (1)大口敬, 片倉正彦, 谷口正明(2002): 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木学会論文集
- (2)角知憲, 広松新, 厲国権, 大枝良直(2000): 交通機関のエネルギー効率に関わる技術的性格に関する検討, 運輸政策研究 Vol.3 No.1