

トライボロジー技術の進展による自動車の省エネ

中村 隆*

Improvement of Fuel Efficiency of Passenger Cars by Taking Advantage of Tribology

Takashi NAKAMURA*

Key Words : tribology, passenger car, fuel efficiency, improvement, power train, retroactive effect

1. はじめに

日本政府は2030年までの温暖化ガス排出量を2013年比で26%削減する新たな目標を2015年のG7で打ち出した。東京電力福島第一原発事故以降の混乱があるものの、温暖化ガス排出削減の努力は続ける必要がある。トライボロジストが排出削減に貢献できるのは生産加工分野と輸送機器分野が主な対象であろうが、ここではトライボロジー技術の進展による普通乗用車の省エネについて議論する。本報告は日本トライボロジー学会の第1種研究会「自動車のトライボロジーによる省資源・省エネルギー予測調査研究会」（以後、研究会）の成果である。研究会は2011年度から2013年度まで自動車メーカー、自動車部品メーカー、大学の研究者が集まり、2010年に発売された乗用車（2010車）に対し、2020年に発売される乗用車（2020車）の燃費がトライボロジー技術の進展によりどれだけ向上するかを予測した¹⁾。予測は巷の未来予測などとは異なり、各要素メーカー技術者が技術的だけでなく市場的にも実現可能な動力伝達各要素の摩擦損失削減率を出した。これだけならば研究会は1年もあれば終了したであろうが、各要素の損失削減が燃費向上に及ぼす影響の議論が錯綜した。最も紛糾したのはエンジンの伝熱損失、排気損失であり、最終的には全摩擦損失削減率と同率でそれらの損失も削減できるとした。また研究会では遡及効果（動力伝達下流

の損失削減が上流の損失に影響するとした考え）を考案した²⁾。その結果として、動力伝達各要素の損失を削減した時の燃費に及ぼす影響を簡便に計算することのできる「寄与率」が得られた。

2. 2010年基準乗用車

2011年にスタートした研究会は、国内においてその時点で最も平均的でポリュームゾーンの基準車として表1のガソリン乗用車を選んだ。現在からみればトランスミッションはCVTが主流となっている事、またエンジンオイルも0W-20が中心となっていることなど変化があるが、あくまで2010年車に対してトライボロジー的な進展による2020年車の燃費改善を予測することとした。表1には基準走行条件も併記する。平坦な舗装道路を60 km/h一定速度で走行（定地走行と呼ぶことにする）、見積もり燃費を20 km/L（5 L/100km）とし、以後の近似実走行、損失削減による2020年車の燃費計算では、この見積もり燃費を基準として予測した。

表1 2010年基準乗用車の仕様と基準走行条件

[出典：文献1)]

仕様	小型車, 排気量: 1 800 cc, 5速AT 重量: 1 500 kg, エンジンオイル: SAE5W-30
基本走行条件	舗装道路(傾斜0) 60 km/h 定速走行, エンジン回転数: 1 500 rpm, エンジン油温: 90°C, ATF油温: 80°C, 見積もり燃費: 20 km/L, エアコン不使用

名古屋工業大学 機械工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology (Gokisocho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555)

* Corresponding author : E-mail: tnakamur@nitech.ac.jp

3. 定地走行での負担割合と寄与率

3.1 定地走行での各要素負担割合と削減率

自動車のエンジンからタイヤまでの動力伝達において、定地走行におけるガソリン消費量に対する各要素の負担割合を研究会で算出した結果を表 2 に示す。定地走行ではタイヤの損失が最も大きく、またエンジンの負荷率が小さいことから吸気ポンピングロス 7.0 の占める割合が次に大きい。これをエンジンの排気・冷却損失、空力損失を含めてグラフで表すと図 1 となる。燃料消費全体を 100 とすると、空力損失が 5、動力伝達の摩擦損失が 35、排気・伝熱損失が 60 である。動力伝達各要素の損失を 2010 年車と比べ 2020 年車ではどれだけ削減できるかを研究会メンバーの自動車部品メーカー、および自動車メーカーから出してもらい、同じく表 2 に削減手法とともに示す。ただし、ブレーキ（走行中もディスクとパッドが接触していることによる引きずり抵抗）についてはブレーキメーカーが不在であったため、主査の私の責任で算

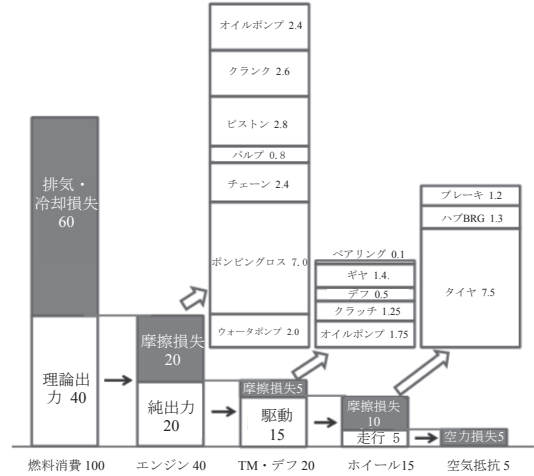


図 1 定地走行での摩擦損失負担割合 (%) [出典：文献 1)]

出した (H27 年度採択の科研テーマは「引きずり抵抗を限りなくゼロとするディスクブレーキの開発研究」)。ここまでは、これまでの経験と少しの勇気で完成したが、研究会の名称からすればそれにより燃費がどれだけ良くなるかを示すことなく

表 2 動力伝達各要素の定地走行負担割合、登坂時負担増加率、近似実走行寄与率、2020 年車損失削減率および損失削減方法 [出典：文献 1, 2)]

コンポーネント	要素	定地走行負担割合, %	5%傾斜登坂負担増加率, %	近似実走行寄与率, %	2020 年車損失削減率, %	損失削減方法
エンジン	オイルポンプ	2.4	86	4.7	17	オイル低粘度化
	クランクベアリング	2.6	96	5.3	50	幅狭化, テクスチャ, 表面処理, 低粘度化
	ピストン	2.8	180	7.2	71	低面積, リング張力低減, 表面性状
	バルブ	0.8	180	2.0	75	表面性状, 転がり化, シール改善
	チェーン・ベルト	2.4	180	6.2	50	ガイド材料改善, チェーンリンク平滑化, 幅狭化
	ポンピングロス	7.0	-7	9.9	29	排気再循環, ミラーサイクル
	ウォーターポンプ	2.0	87	4.0	25	シール改善, 電動化
トランスミッション・デフ	ベアリング	0.1	43	0.3	50	小型化, 低粘度化, 玉軸受化
	ギヤ	1.4	200	5.6	50	高精度化, 低粘度化
	デフ	0.5	100	1.5	50	高精度化, 低粘度化
	クラッチ	1.25	87	3.9	20	低粘度化
	オイルポンプ	1.75	87	5.1	14	低粘度化
ホイール	ブレーキ	1.2	0	2.5	92	非接触化
	ハブベアリング	1.3	5	2.7	62	シール改善, グリース改良
	タイヤ	7.5	10	16.1	35	材料分子設計, トレッド改善

終わることはできない。

3.2 タイヤの転がり損失削減と寄与率

日本自動車タイヤ協会ではそのHPで、タイヤの転がり損失を低減した時の燃料消費削減率を「寄与率」として、表3に示す寄与率の値を示している³⁾。たとえば寄与率が10%の時、タイヤの転がり損失を20%低減すれば燃料消費は2%削減できることになる。表3の一定速度走行では、20~25%と示されているが、20%は空力損失の占める割合が大きい高速道路での寄与率であり⁴⁾、研究会が想定する60km/hの一定速度では寄与率を25%とするのが妥当である。ところが表2に示すとおり、定地走行でのタイヤの負担率は7.5%であり、タイヤ損失の燃費への寄与率25%には遠く及ばず、他の影響があると推定できる。

3.3 HOLMBERGの結論

研究会がスタートした年度の年明けに、K. HOLMBERGらは全世界を対象に自動車利用において摩擦損失でどれだけの燃料を浪費しているかの報告を出した⁵⁾。彼らはその報告の中で平均速度60km/hの実走行での分析を行い、燃料消費削減に関し以下の結論を得ている。

- ①燃料エネルギーの33%はエンジン、変速機、タイヤ、ブレーキでの摩擦損失に打ち勝つために使われている。
- ②全摩擦損失(空気抵抗5%を含む)の削減は三重に燃料消費の削減に寄与し、排気損失と冷却損失の両方を同じ割合で削減する。
- ③平均速度60km/hの実走行において、2010年車と比べ、2020年車は52%の燃料消費削減が可能。

HOLMBERGらの分析は市街地から高速道路までの平均車速を60km/hとしているが、①の結論では定地走行とした研究会とほぼ同じ(研究会では35%)負担率を示している。注目すべきは②

表3 日本自動車タイヤ協会が示すタイヤの寄与率
〔出典：文献3〕

走行条件	タイヤ燃費への寄与率
一定速度走行	20~25%
モード燃費試験	10~20%
一般市街地走行	7~10%

の結論であり、空気抵抗を含む全摩擦損失の削減は図1の排気・冷却損失を同じ割合で削減している(HOLMBERGの三重効果)。エンジンの専門家には異論もあると思われるが、摩擦損失削減前後で燃焼効率が大きくは変わらないとすると、最大限の見積もりとして受け入れることが可能である。そこで、タイヤの損失削減の例に適用すると、図1より全摩擦損失は40であるから $7.5 \div 40 = 0.1875 = 18.75$ (%)がタイヤ損失の全摩擦損失(空気抵抗を含む)に占める割合となる。タイヤ損失を0にしたとすると、冷却・排気損失も同じ割合で削減されるとしたことから、全燃料消費も18.75%の削減となり、これが定地走行でのタイヤの燃費に対する寄与率となる。しかしながら最大限の見積もりであるこれでも日本自動車タイヤ協会が示すタイヤの寄与率25%には及ばない。

3.4 遡及効果

ここまでの寄与率推定では、たとえばタイヤの転がり損失を削減した場合、他の動力伝達各要素の摩擦損失は変化がないとして計算した。確かにエンジン回転数が変わらない限り、オイルポンプやクラッチでの摩擦損失には変化がない。しかし、歯車や軸受などの要素では、タイヤの転がり損失が減れば伝達すべき動力も少なくなり、摩擦損失も減ると考えられる。そこで図2に示すように、タイヤの転がり損失を10%削減した時の影響を、各コンポーネントでの損失削減率を動力伝達上流の一部の要素(影響のある)の損失から差し引き、最終的な燃料消費を計算した。ここで、表示の数値は燃費(L/100km)換算とし、またクランクシャフト軸受では軸回転数依存度が大きいことから影響量を少なくした。計算結果は燃料消費が2.77%削減され、寄与率としては27.7%となった。上記の計算は最大限の見積もりであることから、日本タイヤ協会が示す25%に対し、寄与率27.7%は極めて良い推定であると言える。動力伝達川下要素の損失削減が川上要素の損失に影響することを遡及効果と呼ぶことにする。

4. 近似実走行

古くは自動車の燃費も60km/h定地走行での燃料消費で表していた。しかし、実用時の燃費と

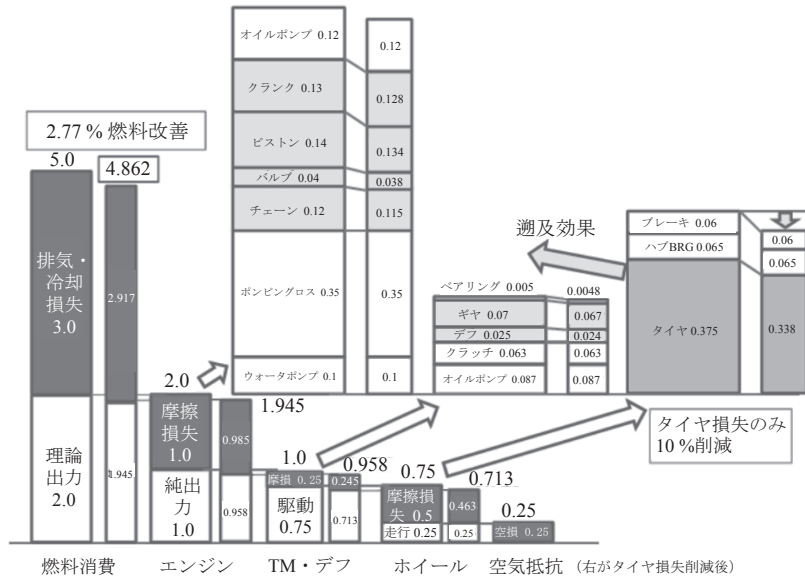


図2 2010年基準乗用車のタイヤ損失を10%削減した時の他要素に及ぼす影響：
 波及効果，図中の右側が削減後の燃料消費 (L/100km) [出典：文献1, 2)]

の差が大きいことから，現在は複雑な走行パターンを模擬した試験によりモード燃費（国内ではJC08）で示している．トライボロジー技術の進展による2020年車の燃費向上は，定地走行では後述するように35%と予想されたが，やはり実走行での燃費向上の予測が必要である．JC08はコールドスタートも含み幅広い速度での走行パターンを規定しているため，計算で予測することは困難である．そこで，簡便に計算できる次の走行パターンを設定し，近似実走行とする．

4.1 走行パターン

自動車は加速時と登坂時に多くの燃料を消費する．加速はエンジン回転数も逐次変化し燃料消費は複雑なため，登坂で代表することとした．登坂は定地走行と同じ60 km/hの一定速度で5%傾斜の坂道を登るものとする．一般幹線道路での5%傾斜坂道は登坂車線を設置する必要のない最大傾斜の坂道であり，車でこれを下る時（降坂）はアクセルを離しても加速する傾斜である．近似実走行の走行パターンは100 kmの距離を走行する中で30%は登坂，40%は定地走行，30%は降坂とした．

4.2 登坂での各要素負担と燃費

5%傾斜の坂道を登坂する時は，純粋な登坂仕

事だけでなく，各要素の損失も増大する．増大した損失を表2に示す．エンジンでの損失はエンジン回転数が1500 rpmから2800 rpmに増大することの影響が大きい．これをグラフで表すと図3となる．登坂純仕事はガソリンの燃焼により得られる熱量から発生水蒸気の潜熱を除いた低位発熱量で計算した．エンジンまでの燃料消費5.38 L/100kmの1.5倍が排気・伝熱損失となるので，2.5倍の13.45 L/100kmがトータルの燃料消費であり，定地走行の3倍近い燃料を消費する．

4.3 近似実走行での各要素寄与率

2010年車の近似実走行燃費は，登坂での燃費13.45 L/100km，定地走行5.0 L/100km，降坂0 L/100km（フューエルカットのため）から，

$$13.45 \times 0.3 + 5.0 \times 0.4 + 0 \times 0.3 = 6.04$$

(L/100km)

と計算できる．これは燃費16.6 km/Lに相当し，2010年車が郊外を安全走行する燃費として妥当な値である．先の定地走行でのタイヤ損失の寄与率を計算した時と同じように，動力伝達各要素の損失を10%削減した時の定地走行と登坂での燃料消費を計算し，上記の近似実走行の燃費を計算することで，各要素の寄与率が得られる．近似実走行での各要素寄与率を表2に示す．タイヤの寄

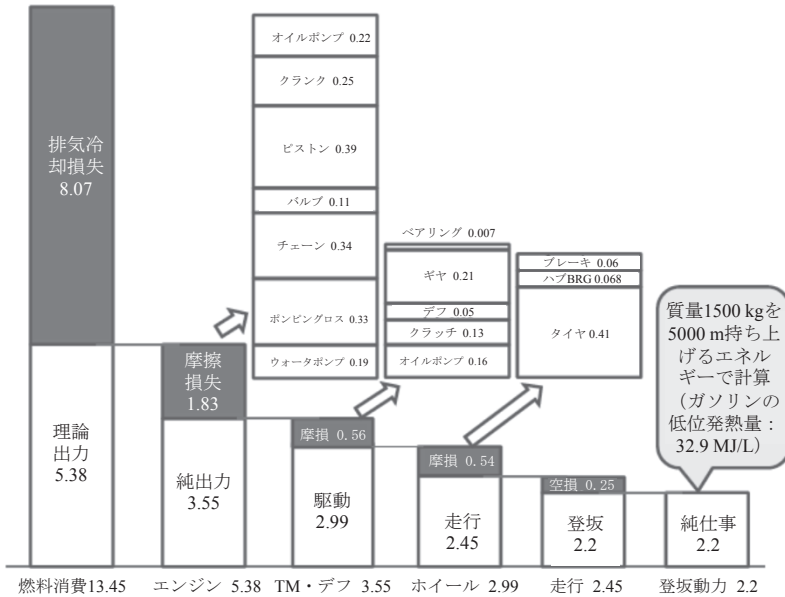


図3 傾斜5%の坂を登坂する時の燃料消費 (L/100km) [出典：文献2])

与率は16.1%となり、表3の日本タイヤ協会が示すモード走行の10~20%のほぼ中央値を算出している。また定地走行での寄与率27.7%よりも小さくなるのは表2に示すように登坂でのタイヤ負担増加割合が小さいためである。

ここで注意していただきたいのは、表2に示す寄与率は2010年車における各要素の燃料消費負担率から計算したものであり、表右の2020年車の各要素損失削減率予測値は全く使っていないことである。次ではこの予測値を基に2020年車の近似実走行燃費を計算するが、この予測が気に入らないのであれば自分の予測値を入れて上記の計算をしていただければ燃費改善率が求まる。

5. 2020年車の近似実走行燃費

HOLMBERGの三重効果と研究会の週及効果を考慮し、表2に示す各要素の損失削減から燃料消費を計算すると2020年車の定地走行では3.25 L/100kmとなり、35%の燃費向上が得られた。また登坂での燃費を加えた2020年車の近似実走行での燃料消費は4.30 L/100kmとなり、2010年車の6.04 L/100kmと比べ29%の燃費向上となった。年度は異なるものの、自動車についてはトライボロジー技術で温暖化ガス排出削減目

標をクリアできそうである。

6. 車体軽量化の寄与率とHEV

近似実走行の燃費計算では車体重量が考慮されている。そこで、車体重量を削減した時の燃料消費改善から、車体軽量化の寄与率を計算したところ55.8%となった⁶⁾。一方、定地走行において35%を占める動力伝達損失を各要素同一割合で削減した時の寄与率は、削減率が大きくなるほど値が小さくなるものの、削減率50%で寄与率71%であ

り、車体軽量化よりも効果的であることがわかった。

現在、エコカーの主流となっているハイブリッド車(HEV)の将来性については様々な議論がなされている。研究会では大胆な仮定を置いてではあるがトライボロジーの進展によるHEVの燃費向上についても計算を行った²⁾。結果は図4に示すように2010年HEVに比べ2020年HEVは近似実走行において32%の燃費向上が見込まれた。これを一般車と比較するならば2010年ではHEVが25%燃費が良いのに対し、2020年には一般車

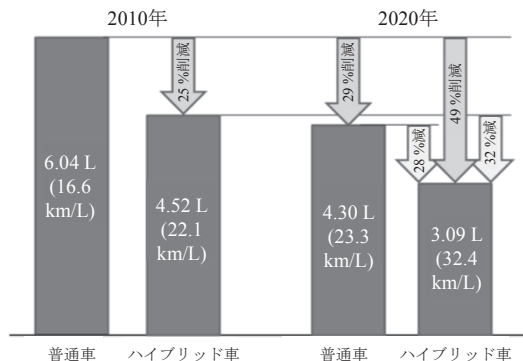


図4 近似実走行での一般車とハイブリッド車との燃費向上比較 [出典：文献2])

よりも 28% 燃費が良くなり、その差が大きくなる事がわかった。

7. おわりに

発電機などとは異なり、貨物車も含め自動車は右から左に移動しているだけで何の仕事もしていない。燃料は摩擦損失と空気の攪拌だけに使われている。であるから摩擦損失の削減は極めて効果的に燃費向上に繋がる。HEV での摩擦削減効果が一般車よりも良いのは、ブレーキ（エンジンブレーキ含む）で消費するエネルギーを回収利用しているため、空力損失を除けば動力伝達の摩擦損失だけが残されているからである。ここまでの解説をまとめると以下の結論となる。

- (1) 空気抵抗を含む全摩擦損失の削減率は排気・冷却損失を同率で削減する HOLMBERG の説、および動力伝達川下要素の損失削減が川上要素の損失に影響する遡及効果を考慮することで、各要素の損失削減が燃料消費削減に与える影響を推定することが可能である。
- (2) 60 km/h 一定速度走行において傾斜 5% の坂道登坂 30%、定地走行 40%、降坂 30% とした近似実走行は、簡便な計算で実用に近い燃料消費量を推定することができる。またこれにより 2010 年普通乗用車の近似実走行での動力伝達各要素の燃費に対する寄与率を得ることができた。
- (3) 研究会が予測した動力伝達各要素の損失削減により、2020 年車の燃費は近似実走行において 2010 年車と比べ 29% の燃料消費削減となった。
- (4) 車体空力損失を除く動力伝達損失全体の、燃料消費に対する寄与率は、損失削減率が大きくなるに従い低下するが、車体重量を削減した時の燃料消費寄与率よりも高い値を保ち、摩擦損失削減の方が効果的であることがわかった。
- (5) 2020 年の HEV は、摩擦損失の削減により 2010 年の HEV と比べ近似実走行燃費が

32% 改善し、一般車との燃費差が開くことが予想された。

温暖化ガス排出削減に対するトライボロジーの重要性を社会にアピールするには自動車が最も適したツールである。これまでにも各社は各要素の損失削減に務めてきたが、個々の要素が燃費に与える影響をシステム全体で議論することが少なかった。本稿を参考にして、トライボロジー学会を盛り上げる提言をお願いしたい。

自動車のトライボロジーによる省資源・省エネルギー予測調査研究会メンバー：中村 隆（名工大）、糸魚川文広（名工大）、木村好次（東大名誉）、足立幸志（東北大）、三原雄司（東京都市大）、熊田喜生（大豊工業）、鈴木 厚（トヨタ自）、岡崎雅之（本田技研）、芥川恵造（ブリヂストン）、出崎 亨（大豊工業）、山本英継（元TPR）、今井淳一（協同油脂）、星野耕治（JX）、三田修三（豊田中研）、佐田 隆（ジェイテクト）、馬淵 豊（日産自）、村上洋一（デンソー）

文 献

- 1) 中村隆：自動車のトライボロジーによる省エネルギー（中間報告）、トライボロジー会議予稿集、2013 春東京 (2013) F1.
- 2) 中村隆：自動車のトライボロジーによる省エネルギー、トライボロジー会議予稿集、2014 春東京 (2014) F1.
- 3) 日本自動車タイヤ協会：転がり抵抗の低減の効果、<http://www.jatma.or.jp/labeling/faq02.html>.
- 4) National Research Council: Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy, 2006, Transportation Research Board Special Report 286.
- 5) K. HOLMBERG, P. ANDERSSON & A. ERDEMIR: Global Energy Consumption due to Friction in Passenger Cars, Tribology International, **47** (2012) 221.
- 6) 中村隆、三原雄司、木村好次：タイヤの転がり損失削減に見る燃費向上の効果、自動車技術会 2014 年秋季大会 学術講演会講演予稿集、仙台、260-20145714.

■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■

中村 隆



1953 年生まれ。名古屋工業大学機械工学科卒業。名古屋大学にて工学博士取得。現在、名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻教授。主として機器のトライボロジーおよび切削加工におけるトライボロジーの研究開発に従事。他に日本機械学会、精密工学会、電気加工学会に所属。