

Segway® PTの 温室効果ガスの 削減への取り組みとエネルギー 消費について

John David Heinzmann and B. Michael Taylor,
Segway Inc.

2001年12月、著名な発明家Dean KamenがSegway® Personal Transporter (PT)を発表しました。それ以降、交通手段に関する社会の見方は大きく変化しています。燃料価格が高騰し、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出による悪影響への意識も高まり、また、環境と政治の影響で世界的に石油供給が不安定になっています。

Segway PTは、海外からの石油への依存を減らし、既存のエネルギー源をより効率的に利用

して、汚染を削減します。米国では、自動車の利用頻度が毎日およそ9億回に及びますが、その半数は走行距離が5マイル(約8km)未満で乗員数が1人であるとEPA(環境保護局)は推測しています。これは、Segway PTにもっとも適した利用条件です。現在利用できる交通手段の動力源は様々であり、ここでは温室効果ガス排出量と消費エネルギーの両面からそれぞれの環境に対する相対的な影響を比較しています。

算出方法については以降の各項で詳しく説明しますが、Segway PTと他の代表的な交通手段における相対的な温室効果ガス排出量およびエネルギー効率に関する統計の概要について、最初に示します。

Segway PTの走行中の温室効果ガス排出量はゼロです。充電中にはバッテリーが電力を消費するので、発電と送電の際に発生する排出量を分析の基礎データとして利用します。これを、自動車燃料の精製、輸送、および燃料燃焼の際に発生する排出量と比較すると、Segway PTと従来の内燃エンジンを比較できます。また、この分析から燃料資源の相対的な効率も測定できます。

排出量の概要

Segway PT動作中の温室効果ガス排出量:

- ・ 走行距離当たりの温室効果ガスの排出が一般的なハイブリットカーに比べて5.6倍少ない(82%の削減)。
- ・ 温室効果ガスの排出が平均的な米国製車両に比べて14倍少ない(93%の削減)。
- ・ 温室効果ガスの排出が大型のスポーツ・ユーティリティ車(SUV: Sport Utility Vehicle)に比べて20倍少ない(95%の削減)。

エネルギー消費の概要

Segway PTのエネルギー消費:

- ・ エネルギー効率が一般的なハイブリットカーに比べて4.5倍高い。
- ・ エネルギー効率が平均的な米国製車両に比べて11倍高い。
- ・ エネルギー効率が大型のSUVに比べて17倍高い。

注: すべて、1台につき乗員1名として計算

I. Segway PTと排出量削減

Segway PTの電源は、独自設計されたリン酸ベースのリチウムイオン・バッテリーであり、安全性と安定性が高く日常的な使用に適しています。Segway PTの動作中の温室効果ガス排出量はゼロですが、バッテリーを充電するときには電力供給網からエネルギーを消費するため、ここでの評価は充電中に消費される電力を生産するときの排出量に基づいて算定しています。

内燃エンジンとハイブリッド・エンジンについては、動作中の排出量だけでなく自動車燃料の生産および輸送中の排出量も考慮しなければなりません。EPAは、すべての乗用車およびトラックに関する排出データを発行しており、それらの排出量がCO₂等価量の形で示されています。CO₂等価量では、CO₂に加えてメタンや一酸化窒素など他の温室効果ガスも考慮されます。各種車両別の排出量は、図表1に示したとおりです(商標は各社が所有)。

図表1

Segway PTに移行した場合のCO₂温室効果ガスの排出量削減

Vehicle	走行燃費 (MPG)	CO ₂ 等価排出量 (lb/mi)	Segway PTに移行した場合のCO ₂ 温室効果ガスの排出量削減
平均的な米国製車両	22	1.14 ²	93%
米国製大型SUV車	15	1.61 ³	95%
国産ハイブリッドカー	55	0.45 ⁴	82%
欧州製ディーゼルエンジン車	37	0.72 ⁵	89%
オートバイ	50	0.39 [*]	81%
スクーター	70	0.28 [*]	71%
Segway PT	20 miles/charge	0.081	

* オートバイとスクーターの排気ガスについては、ほとんどデータがないため、ここでは報告されたMPGに基づいて燃料の燃焼で発生する実際のCO₂を算出します。ガソリン1ガロン(約3.8リットル)当たりの炭素質量は2,421グラム⁶、CO₂の分子量は44、炭素の分子量は12です。したがって、ガソリン1ガロンからのCO₂排出量=2,421グラム/ガロン×0.997×(44/12)=8,788グラム/ガロン=19.4ポンド/ガロンとなります。これを、オートバイとスクーターについて報告された走行燃費(マイル/ガロン)で割ると、1マイル当たりのCO₂排出量がポンド単位で得られます。燃料の生産や輸送、または他の排出気体の等価量が考慮されていないため、これはオートバイとスクーターにより発生する実際の排出量より少なくなります。

1 CO₂等価量の計算では、メタンの相対重量を21倍にして合計に加算、一酸化窒素の場合は301倍にします。これは、気候変動に対する影響が相対的に大きいためであり、複数の温室効果ガスを1つの数値に定量化する方法として広く認められています。

2 米国環境保護庁

3 <http://www.fueleconomy.gov>

4 <http://www.fueleconomy.gov>

5 <http://www.fueleconomy.gov>

6 <http://www.epa.gov/oms/climate/420f05001.htm>

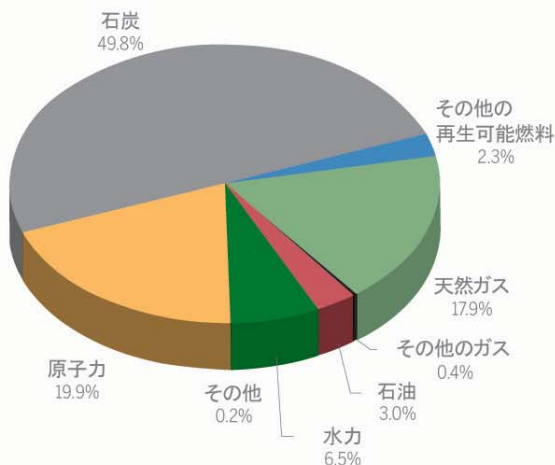
7 0.99は酸化係数です。つまり、燃料に含まれる炭素のうち1%は酸化しません。

電力生産による排出

電力の生産による温室効果ガスの排出量は、燃料資源によって地域差があります。米国における電気生産用の燃料の平均構成率(2004年のデータ)は、図表2のとおりです⁸。Segway PTの利用率が高い多くの地域では、クリーンな燃料の割合が高くなっています。たとえばカリフォルニア州では、燃料資源のうち天然ガス(37.6%)と地熱(8.4%)の構成率が高く、石炭の比率が低くなっています⁹。

図表2

電力生産用の燃料構成率



この燃料構成率に対するCO₂の平均排出量は、1kWh当たり1.55lb(約703g)¹⁰です。つまり電気自動車は、充電中に消費する1kWh当たり1.55lb(約703g)のCO₂等価量¹¹について、その生産の責任を負っているということになります。

The Segway PT

Segway PTの電源は2台のリチウムイオン・バッテリーです。充電には8時間から10時間を要し、完全充電までにコンセントから1.04kWhの電力を消費します¹²。1回の充電による航続距離は16~24マイル(26~39km)です。実際の航続距離は、地形や積載重量、乗り方など様々な要因によって異なります。

航続距離の平均をとると、Segway PTの燃費は0.052kWh/マイル(1.04 kWh/20マイル)です。米国における電力生産の燃料構成率の平均に基づいて計算すると、この52ワット時で排出されるCO₂量は、(0.052kWh/マイル) × (CO₂ 1.55lb/kWh)となり、1マイル当たり0.081ポンド(約37グラム)です。これは、米国の平均的な自動車と同じ距離を走行した場合より14倍も温室効果ガスの排出が少ないことになります。

II. Segway PTとエネルギー効率

真のエネルギー効率とは何か？

排出量の削減はきわめて重要ですが、エネルギー資源の効率的な利用もそれに劣らず重要です。利用者には運用コストの削減、社会全体に対しては全体的なエネルギー需要と石油への依存度を減らすことによって利益をもたらします。

エネルギー効率の算出は複雑で、1ガロン当たりの走行マイル(MPG)あるいは100km当たりのリットル数(l/100km)といった形で極端に単純化されることも少なくありません。エネルギー効率を正しく理解するためには、燃料自体のエネルギー含有量だけでなく、燃料の生産と輸送中に消費されるエネルギーも考慮しなければなりません。配電される電力の場合には、動作中に消費される電力に加えて、発電所から家庭のコンセントに届くまでのエネルギー損失も計算に入れる必要があります。

8 エネルギー情報局, <http://www.eia.doe.gov/fuelelectric.html>

9 カリフォルニア州エネルギー委員会 Jim Boydによるスピーチ, 2006年12月7日, カリフォルニア州サンディエゴ

10 www.energystar.gov

11 化石燃料の燃焼時には、気候変動の一因となる他の気体も排出されます。CO₂は電力生産による気体排出の中では群を抜いて大きな要素であり、他の気体(メタン、一酸化窒素など)の影響はごくわずかにすぎません。

12 Segway社による内部試験

異なる燃料は、キログラム当たりエネルギーのメガジュール(MJ/Kg)を使ってエネルギー密度を比較できます。自動車とパーソナル・トランスポートの燃料効率、消費燃料メガジュール当たりの走行距離(マイル/MJ)で表せるようになります(この値が高いほど燃料効率は良い)。

ガソリン自動車

ガソリンスタンドで市販されているガソリンのエネルギー密度は、46.7MJ/Kg¹³です。生産および配送プロセスの効率は、等級と組成によって83~86%¹⁴です。したがって、ガソリン1キログラムを生産するには54~56メガジュールの原油が必要です。ガソリン1ガロンの重量は約2.72キログラム¹⁵なので、1ガロンのガソリンをガソリンスタンドへ配送するには、およそ150MJ相当の原油が必要になります。

ディーゼル燃料のエネルギー密度は45.9MJ/Kgです¹⁶。ディーゼル燃料の生産および配送プロセスの効率は87~89%¹⁷であり、1ガロンの重量は約3.23Kgです。したがって、ディーゼル燃料1ガロンをガソリンスタンドに配送するには、およそ168MJ相当の原油が必要になります。

電気自動車のエネルギー効率

電気の生産には化石燃料の燃焼、水力発電、原子力、風力発電など様々な方法があります。電力生産プロセスの効率は燃料資源によって異なりますが、米国の平均的な構成率では平均効

率は34.3%¹⁸です。言い換えれば、343Whの電力を生産するために1kWh相当の燃料資源が消費されているということです。また、電力供給網をめぐる送電プロセスの効率は92%¹⁹なので、「産油地から家庭まで」の生産と配送の効率は31.6%となります($0.92 \times .343=0.316$)。

1kWhのエネルギーは3.6MJ相当です。効率を31.6%として計算すると、1kWhの電力を一般家庭のコンセントまで配送するためには、 $(1\text{kWh}/31.6\%) (3.6\text{MJ}/\text{kWh}) = 11.4\text{MJ}$ の燃料資源が必要です。電気自動車のエネルギー使用効率は、1回の充電による航続距離(マイル)を充電中の電力消費量測定値(kWh)で割り、その結果をさらに11.4MJ/kWhで割ると算出できます。

乗用車とトラックのエネルギー効率

米国の乗用車の燃費は平均で22.4MPG²⁰です。1ガロンのガソリンがガソリンスタンドに届くまでに必要なエネルギー(150MJ)に基づいて計算すると、米国の平均的な自動車の航続距離は1メガジュール当たり0.15マイル(約241メートル)になります。乗員数が複数の場合はエネルギー効率が高くなることに注意してください。

乗員1名の場合の自動車の種類別エネルギー効率は、図表3に示すとおりです。

13 『Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle』、2003年10月29日、Ulf Bossel著

14 『Well-to-Tank Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Transportation Fuels - North American Analysis』、General Motors社アルゴンヌ国立研究所、p.159

15 『Fuel From Farms: a Guide to Small Scale Ethanol Production』米国エネルギー省、1980年5月、D-3ページ

16 『Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle』、2003年10月29日、Ulf Bossel著

17 『Well-to-Tank Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Transportation Fuels - North American Analysis』、General Motors社アルゴンヌ国立研究所、p.159

18 ローレンス・リバモア国立研究所、2001年

19 『Well-to-Tank Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Transportation Fuels - North American Analysis』、General Motors社アルゴンヌ国立研究所、Vol 3、p.33

20 USDOT、米国運輸統計局、2004年

図表3

車種別のエネルギー効率

Vehicle	走行距離(短距離)		走行距離(中距離)		走行距離(長距離)	
	市内程度の走行距離 ²¹ 、またはバッテリーでの最低航続距離	エネルギー効率 (マイル/MJ)	複合の走行距離 ²² 、またはバッテリーでの平均航続距離	エネルギー効率 (マイル/MJ)	ハイウェイ利用の走行距離 ²³ 、またはバッテリーでの最高航続距離	エネルギー効率 (マイル/MJ)
米国製大型SUV車	13	0.09	15	0.10	17	0.11
平均的な米国製車両	n/a	n/a	22	0.15	n/a	n/a
欧州製ディーゼルエンジン車	33	0.20	37	0.22	44	0.26
オートバイ	40	0.27	50	0.33	60	0.40
国産ハイブリッドカー	51	0.34	55	0.37	60	0.40
スクーター	60	0.40	70	0.47	80	0.53
Segway PT	16	1.35	20	1.69	24	2.02

たとえば、低燃費カーとして広く知られている一般的なハイブリッドカーの場合、燃費は平均55MPGです。1ガロンのガソリンの生産と配送に150MJが必要とした場合、最終的なエネルギー効率は0.37マイル/MJ(55÷150)になります。

オートバイ

オートバイの燃費は平均50.1MPG²⁴で、最終的なエネルギー効率は0.33マイル/MJです。オートバイとスクーターの大多数は1人乗りであることに注意してください。

スクーター

ガソリン・スクーターの航続距離は様々ですが、現在の4ストローク・スクーターの航続距離は一般的に60~80MPG²⁵です。この範囲の上限から計算すると、最終的なエネルギー効率は0.53マイル/MJになります。

Segway PT

標準的な条件下でSegway PTのリチウムイオン・バッテリーを完全充電すると、1.04kWh²⁶の電

力を消費します。完全充電したSegway PTの航続距離は、地形や乗り方などの要因によって異なりますが、16~24マイルです。その平均をとると、Segway PTは16マイルを走行するためにコンセントから1040Whの電力を消費することになり、最終的なエネルギー効率は(16マイル/1.04kWhの送電)/(11.4MJの燃料資源/kWhの送電)=1.69マイル/MJになります。

この平均値によれば、燃料資源1MJ当たりの航続距離は、Segway PTの方が一般的なハイブリッドカーの4.5倍長く、また最も低燃費なガソリン・スクーターと比べても3.6倍長いことになります。

結論

1人乗り短距離走行という用途に即して使用すれば、Segway PTは温室効果ガスの排出を劇的に削減し、エネルギー効率も大幅に向上します。コンパクトかつ堅牢な設計によって、様々な日常使用から商用利用にまで広く適応し、今までは普通の自動車を使わねばならなかったような距離にも手軽に利用することができます。

21 <http://www.fueleconomy.gov>

22 <http://www.fueleconomy.gov>

23 <http://www.fueleconomy.gov>

24 USDOT、米国運輸統計局、2003年

25 各メーカーから申請された走行距離

26 Segway社による内部試験

John David Heinzmann, Segway社 Propulsion Engineerは、機械工学の学士号および修士号を取得しています。1995年からDEKA Research and Development社に勤務し、2000年にSegwayプロジェクトに移動しました。Segway社では、Segway Personal Transporterのホイールモータを駆動するパワー・エレクトロニクスの開発を主導し、Deka社では、Independence™ iBOT™ Mobility System(自己バランス型車椅子)用のパワー・エレクトロニクスと制御アルゴリズムの開発に携わりました。それ以前には、Pacific Gas and Electric社R&Dセンターのエンジニアリング・コントラクターとして、太陽光発電の試験施設とその電力変換機器、超伝導磁気エネルギー貯蔵システム、BART (Bay Area Rapid Transit)湾岸地下鉄用の交流および直流配電システム、40トンのAC Batteryシステムなど最新エネルギー・システムのテストと分析に当たりました。また、小規模な無停電電源装置のための超大型コンデンサも開発しています。

B. Michael Taylorは、Segway社のProduct Managerです。2001年にSegway社に入社し、都市部での通勤に焦点を当てたPersonal Transportersの製品マーケティング活動を率いています。Segway社入社以前には、Reebok International社やPuma AG社などの企業で最新のスポーツシューズ技術のマーケティングならびに開発に携わっていました。