

# 運輸部門におけるエネルギー消費構造の分析と対策

## Structural Analysis of Energy Consumption and Measurements in Transport Sector

東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻  
安全評価工学研究室 修士二年 36270 中塚 史紀  
指導教官 高橋 淳 助教授

今後 50 年間のエネルギー消費推移に目を向けると先進国においては今後人口・一人当たりエネルギー消費量ともに大きな変化はない。一方途上国においては人口・エネルギー消費量ともにこの 50 年間で最も伸び率の高い時期であることがわかる。また、予測から、運輸部門における化石燃料の消費が環境問題・エネルギー問題を危うくすることがわかる。そこで運輸部門における省エネ対策について個別に検討し、その検討結果を踏まえて、いつ・どの技術が必要とされていくか提言を行う。

### 1. 序 論

近年、地球規模での環境破壊が問題になっており、環境を保全しながらエネルギーの安定供給を図ることが求められている。そのためには、私たちの意識や行動を変えていくことはもとより、技術開発によって環境負荷を低減させることが必要である。環境・エネルギー対策の新技術には、産業部門の省エネ技術や太陽光発電・風力・バイオマスなどのエネルギー変換技術があげられるが、本研究では対策が遅れている運輸部門についてそのエネルギー消費構造の分析および将来予測を行いどのような技術がいつ必要とされていくのかについて提言およびシミュレーションを行う。

### 2. エネルギー需給分析

#### 2.1 地域ごとのエネルギー需給

Fig.1 は世界における地域ごとの一人当たり 1 次エネルギー供給量ならびに部門別最終エネルギー消費量を示したものである。0 のラインより右側は最終エネルギー消費量を産業・運輸・民生・非エネルギーの部門ごとに示し、左側は発電時などに生じるロスを表す。棒グラフの全体で 1 次エネルギー供給量を示す。1971 年から 2001 年の 30 年間のデータであるが、この図から以下のようなことが読み取れる。

- この 30 年間で南北問題はほとんど解決されてはいない。1971 年および 2001 年の OECD 諸国の一人当たり 1

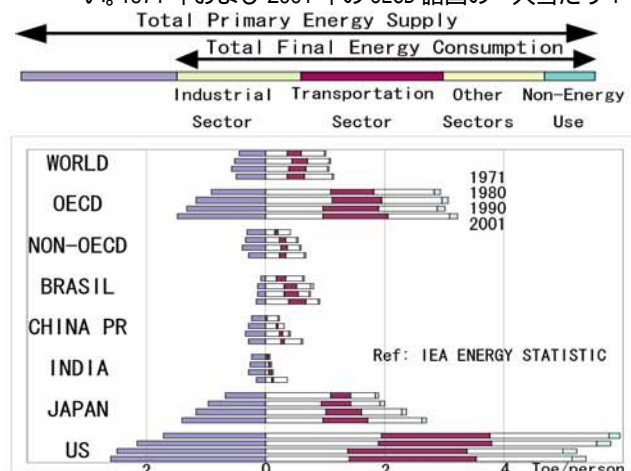


Fig.1 一人あたりの一次エネルギー供給量ならびに部門別最終エネルギー消費量 (IEA 統計等をもとに著者ら作成)

次エネルギー供給量と非 OECD 諸国のそれを比べるとほとんどその比が変化していない。これはこの 30 年間南北の格差がほとんど縮まっていないことにほかならない。

- OECD 諸国は非 OECD 諸国に比べて運輸部門におけるエネルギー消費割合が大きい。これは自家用乗用車の普及率の差に起因するところが大きい。
- 中国・インドのエネルギー消費の伸びが非常に大きい。1971 年と 2001 年のデータを比較すると非 OECD 諸国の平均ではこの 30 年間の最終エネルギー消費量の伸び率は 31%であるが、中国・インドはそれぞれ 92%、57%であり、非 OECD 諸国の平均を大きく上回っている。現在人口が世界一の中国と今世紀前半には中国を抜いて人口世界一になると予測されているインドのエネルギー消費量がこのまま成長したとすると、今世紀中にもエネルギー需給が逼迫することは容易に想像がつく。

#### 2.2 部門別省エネポテンシャルと難易度

Fig.2 は全世界における部門別のエネルギー消費割合とエネルギー源を示す図である。運輸部門はほとんど石油のみに依存していることがわかる。また、Fig.3 は日本の例ではあるが運輸部門でのエネルギー消費のほとんどが自家用乗用車

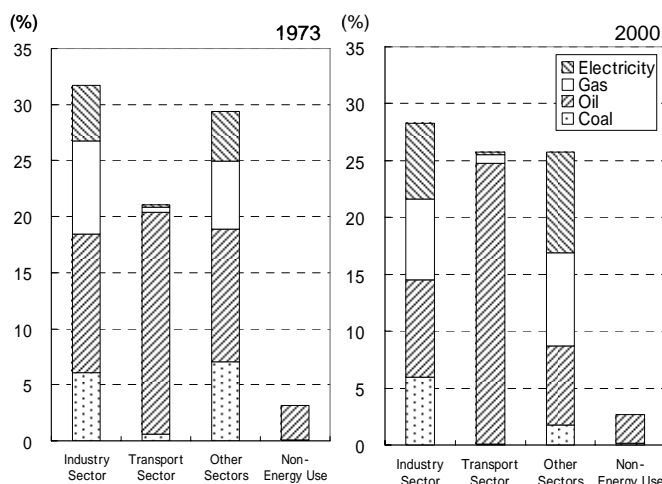


Fig.2 エネルギー源別に見た世界の部門別消費割合 (IEA 統計等をもとに著者ら作成)

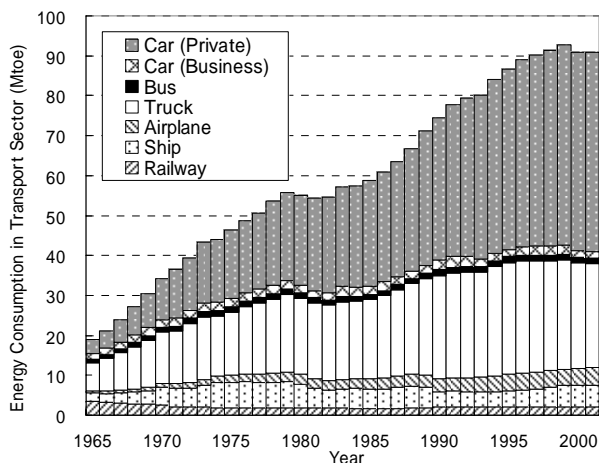


Fig.3 エネルギー源別に見た世界の部門別消費割合 (IEA 統計等をもとに著者ら作成)

とトラックによることがわかる。すなわち、非 OECD 諸国のモータリゼーションにより石油はまず間違いなく供給不足になり、天然ガスも同様であって、自動車の燃費向上が緊急の課題であることが理解できよう。

そこで、将来、再生可能エネルギーが豊富に利用できるようになったとして、究極的にはどこまで化石燃料の使用を抑制することができるのかを日本を例にとって考える。

#### 民生部門

まず 2001 年度の日本の民生(家庭・業務)部門でのエネルギー消費量は 99Mtoe (一人平均約 0.8toe、Fig.1 参照)で、その内訳は主に LPG として使用される原油が 36%、ガスが 16%、電力(エネルギー変換効率約 40%)が 48%となっている。ガス・LPG は給湯や暖房に利用されているがこれらは容易に電化が可能なるものであり、民生部門においては 100%の電化(家庭用燃料電池によるエネルギー変換率は約 40%だが、低温の熱を給湯・暖房に使用できるので、総合効率は約 70%)が可能であると言える。よって、暫定的には天然ガスを約半分に節約しながら使用し、将来再生可能エネルギーが豊富に利用できるようになれば、民生部門での化石燃料の使用量は(すなわち二酸化炭素排出量も)ほぼゼロにすることが可能である。

#### 産業部門

2001 年度の日本の産業部門でのエネルギー消費量は 171Mtoe (一人平均約 1.3toe、Fig.1 参照) この部門においても多くの分野で電化とコージェネレーション(総合効率を約 1.5 倍に向上)を行うことが可能であると考えられ、高温で作動する高効率燃料電池(エネルギー変換効率 50~60%)の利用が可能であることから、総合効率は従来の発電の 2 倍以上となって天然ガスを半分以上に節約しながら使用でき、再生可能エネルギー社会を待つことが出来る。

ただし、鉄鉱石を還元するためにコークスを用いざるを得ない鉄鋼業、プラスチックの原料として原油を用いざるを得ない化学工業に関しては、OECD 諸国では廃棄物や既存人工物による高炉還元やマテリアルリサイクルも可能であるが、非 OECD 諸国では新規製造のための化石燃料の使用はやはり免れない。日本の 2001 年度のデータでは、鉄鋼業と化学工業の総エネルギー使用量はそれぞれ産業部門の 24%、30%であるが、原料の化石資源だけでもエネルギー換算でそれぞれ産業部門

の 18%、24%を消費していることから推定できるように、この 2 分野(すなわち金属の還元とプラスチックの製造という基礎素材分野)における非 OECD 諸国の化石燃料の使用だけは大幅削減が困難と考えられる。

#### 運輸部門

運輸部門の石油依存度の高さ自動車によるエネルギー消費の割合の大きさは Fig.2, Fig.3 で見たとおりである。内燃機関のエネルギー変換効率(現在約 16%)は、将来的には軽油ハイブリッド車で約 41%(天然ガスハイブリッド車で約 38%)が可能とされている。なお、燃料電池車については、家庭用燃料電池よりも技術的ハードルが高いことに加え、低温の熱が利用できないため、総合エネルギー変換効率はそれほど期待できない(石油起源で約 40%、天然ガス起源で約 50%、再生可能エネルギー起源で約 50%)が、二酸化炭素排出量は現行のガソリン車よりも大幅に削減可能(石油、天然ガス、再生可能エネルギー起源でそれぞれ現行の約 31%、28%、0%)となる。

すなわち、当面、温暖化対策の観点からは、軽油化、ハイブリッド化で石油を節約しつつ、CNG に切り替え、水素社会を待つというシナリオが妥当と思われるが、省エネの観点からは、石油起源のエネルギー効率の高さと価格の安さを考えれば、需給バランスが崩れ石油価格が高騰するまではエネルギー転換の動きは遅いと考えられる。

#### まとめ

以上、全部門を通して化石燃料消費量削減の可能性と化石資源枯渇の影響度を考えると、石油の残存量減少や価格高騰は自動車の原因となり、その影響を最も受けるのも自動車であることがわかる。なお、石油の次には天然ガスについても全く同じ事が言える。

また、逆に、以上では各部門において現行のエネルギー消費の数分の 1 にできることも明らかとなったが、石油枯渇と温暖化対策を考えると、さらなる効果的かつ即効的な技術が必要であると言える。次章では人口推移予測および今世紀最初かつ最大のモータリゼーションを遂げるであろう中国を例にとって乗用車保有台数の予測を行い、いつまでに抜本的な省エネ技術が必要とされるかを明らかにする。

### 3. 将来予測

2 章で述べたように、地球温暖化問題およびエネルギー問題の最大の要因は運輸部門における化石燃料の使用である。本章では世界人口の今後の推移および今世紀最初かつ最大のモータリゼーションを遂げるであろう中国の乗用車保有台数について論じる。

まず、国連の人口部会が 2002 年、2003 年に相次いで発表した世界人口推移の長期予測について分析を加える。2002 年の報告書では 2050 年までの、2003 年の報告書では 2300 年までの人口の推移に関する超長期予測が行われている。これらの推計では出生率の仮定などにより何通りかのシナリオが予測されているがここでは主に中位推計を取り扱うものとする。

#### 3.1 世界人口の推移予測

2002 年に国連人口部会が 2050 年までの人口推移予測に関する報告書を発表した。この報告によれば世界人口は 2000 年現在の 60 億人から 2050 年には 90 億人まで増加する。また、報告書の要点をまとめると以下ようになる。

- 出生率は低下するものの、今後 50 年間の間に人口は現在の 63 億人から 90 億人にまで増加する(中位推計)

また、現在の人口増加率を維持した場合 2050 年の世界人口は 128 億人、出生率を中位推計の半分と仮定した下位推計では 74 億人である。

- ▶ 世界人口の増加分は現在年間約 7700 万人だが、その半分はインド・中国・バングラディシュ・パキスタン・ナイジェリア・アメリカ合衆国の六国によるものである。
- ▶ 先進国においては今後 50 年人口はほとんど変化しない。中には減少することが予測されている国もあり、日本は 14%、イタリアは 22%、東欧や旧ソビエト連邦の国々には 30~50%の減少が予測されている国もある。
- ▶ 一方、途上国では着実に人口は増加し、現在の 49 億人から 77 億人にまで達する。
- ▶ 全体的に出生率は低下するが、2050 年時点において人口を維持するためのレベルである出生率 2.1 を上回る国は依然として多い。
- ▶ 平均余命は現在の 65 歳から 74 歳に上昇する。しかし、先進国・発展途上国・後発発展途上国ごとの平均余命の差はそれほど縮まらない。特に後発発展途上国においては HIV の影響が大きい。
- ▶ 60 歳以上の高齢者は現在約 6 億人だが、2050 年にはその 3 倍を超える 19 億人まで上昇する。世界人口に占める割合では、現在 8%であるが 2050 年には 20%近くまで上昇する。

また 2003 年には 2300 年までの人口推移予測に関する報告書も出された。この予測の中位推計によると世界人口は 2075 年にピークの 93 億人に達した後出生率の低下により 2175 年には 83 億人まで一時的に低下する、その後平均寿命の増加により 2300 年には 90 億人になるとされる。このことから今世紀前半がもっとも世界人口の増加率が大きい時期であり、エネルギー利用形態の転換が迫られる期間であると言えよう。

### 3.2 中国における乗用車保有台数予測

前節において今世紀前半が最も人口増加率の高い時期であることが明らかとなった。21 世紀初頭の現在、多くの OECD 諸国ではモータリゼーションがほぼ完了もしくは後期にさしかかっており、エネルギー需要の大幅な増加があるとすれば、その大半は途上国に起因する。そこで本節では今世紀最初かつ最大のモータリゼーションを遂げるであろう中国の乗用車の保有台数の予測を行う。

乗用車保有台数の年次変化を説明する関数として、本研究では(1)式のようなロジスティック関数を用いる。式中、 $Y$  は 1000 人あたりの乗用車保有台数、 $t$  は時間(年) は飽和台数、 $\mu$  は普及速度に対応したパラメータ、 $t_0$  は普及開始年を表す。

$$Y(t) = \frac{\chi}{1 + (\chi - 1)e^{-\mu(t-t_0)}} \quad (1)$$

Fig.4 は中国の乗用車保有台数の予測結果である。予測の条件として、 $\chi=500$ 、 $t_0=1988$ 、 $\mu=0.142$  とし、人口の推移については国連の人口推計を用いた。ここで  $Y$  は既にモータリゼーションが進行している国の統計データから、 $t_0$  は中国の自動車保有台数の統計データから、 $\mu$  は日本のデータから、それぞれ最小二乗法によって求めたものである。

同図は、2040 年には現在の世界の乗用車保有台数 (5.5 億台)と同数の乗用車を中国だけで保有することを表している。なお、これは中国だけの計算結果であり、続いてインド、ア

フリカとモータリゼーションが進めば、世界の乗用車保有台数は 2050 年には現在の 3 倍以上になると言えよう。

本章の分析から今世紀前半は人口増加および乗用車普及による一人当たりエネルギー消費量の増加の相乗効果により、人類史上最大のエネルギー消費量の伸び率をもたらすことは間違いのない。そこで次章以降では運輸部門における省エネルギー技術を紹介し、それらの技術がいつ・どのような順番で導入されるべきかについて考察を行う。

## 4 . 運輸部門における省エネ技術

2 章におけるエネルギー需給分析から、運輸部門における化石燃料の消費がこれからの世界的な環境問題・エネルギー問題にとって脅威となることがわかった。また、3 章の将来予測から現在から 2050 年ごろまでが最もエネルギー需要が伸びる時期であり、この時期に有効な省エネルギー策を実施しなくてはならない。そこで本章では考えうる省エネルギー策についてその効果、実現可能性などについて考察を行う。省エネルギー策として現在様々な技術が考案され一部実現されているが、ここでは 5 章の結論部においてシミュレーションに反映させた内燃機関の向上と車体軽量化による燃費向上技術のみを紹介する。

### 4.1 自動車の内燃機関の効率向上

現在使用されている自動車の動力源のほとんどはガソリンまたはディーゼル機関である。しかしエネルギー問題・二酸化炭素排出による温暖化問題に加え、石油需給の逼迫が取り上げられる昨今、エネルギーの採掘から走行までの燃料サイクルで自動車のエネルギー消費や CO2 排出量を評価する必要がある。そこで、本項では自動車のエネルギー効率を燃料サイクルで考え、さまざまな内燃機関に関して WTW(Well-to-Wheel)分析を行い、評価する。

Fig.5、Fig.6 に示したのは現行のガソリン自動車を 1 とした場合の各内燃機関の 1 次エネルギー消費量と CO2 排出量である。従来のガソリン車を除いて各自動車の走行段階における効率は全てハイブリッド化されたものを想定している。

現行のガソリン車に対し、ほとんどの自動車で燃費性能が 2 倍以上に向上している。また、石油を 1 次エネルギーとする将来の HEV(ハイブリッド仕様車)や FCEV(燃料電池電気自動車)で燃費性能が 3 倍を超えるポテンシャルが示されている。また、Fig.6 を見るとほとんどの自動車で CO2 排出量が半分以下に低減するポテンシャルが見られる。天然ガスを 1 次エネルギーとするいくつかの自動車では CO2 排出量が現行の三分の一以下に低減するポテンシャルが見られる。また、当然ではあるが再生可能エネルギー起源の水素を燃料として用いる FCEV では CO2 排出量は 0 である。

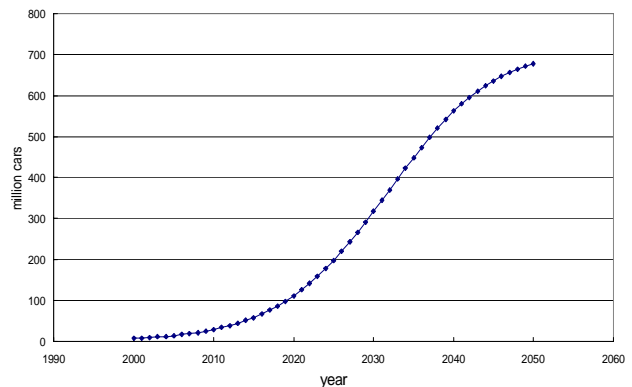


Fig.4 中国の乗用車保有台数予測



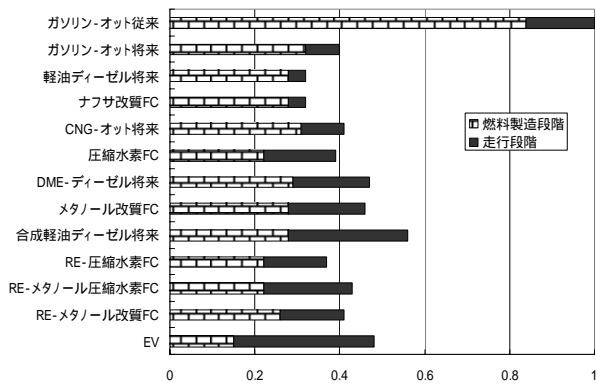


Fig.5 燃料サイクルでの燃費性能(エネルギー消費)

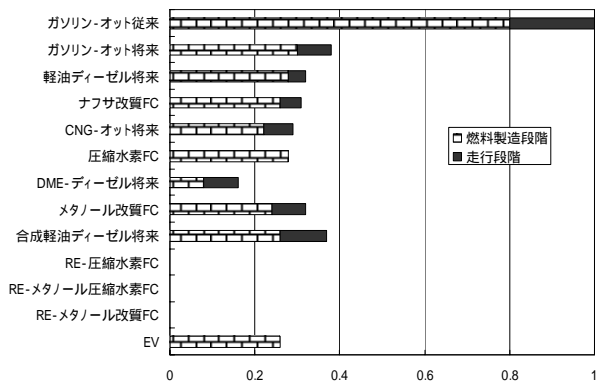


Fig.6 燃料サイクルでのCO2排出量

ここで注目すべきは各 FCEV のエネルギー効率である。たしかに FCEV のエネルギー効率は現行のガソリン車と比較すると非常に高いものである。しかしハイブリッド化したガソリン車やディーゼル車と比較すると特に優位性を持つわけではない。運輸部門における化石燃料消費量・CO2 排出量を抜本的に低減させるためには再生エネルギー起源の水素が安価に入手可能であることが必須である。

さらに普及の展望について述べる。短・中期的には直噴エンジンなどを搭載し燃費性能が改善された現行車とともに燃費性能が現行車の 2 倍くらいのハイブリッド自動車(すでに市販されている)が普及していくと思われる。これらの自動車の動力性能は現行車とほぼ変わらず、現行のエネルギーであるガソリンや軽油を用いることができるので燃料のインフラが整っており普及の可能性は高い。

中・長期的にはエネルギーの保全、地球温暖化防止などの環境安全性がさらに要求されることになる。そこで燃費性能が現行ガソリン車の 3 倍に改善された石油を 1 次エネルギーとする HEV や CO2 排出量が三分の一に低減される天然ガスを 1 次エネルギーとする HEV、そしてさらには高効率でよりクリーンな FCEV などの普及が期待される。途上国の工業化や人口増加等による世界全体で見た自動車普及の急速な進展により 21 世紀中には石油の需給が逼迫することは間違いのない。水力発電、太陽光発電、そしてバイオマスなどの再生可能エネルギーから製造された水素を用いる FCEV が究極の自動車としてその実現と普及が期待される。

#### 4.2 CFRP による車体軽量化の燃費向上効果

Fig.7 は現在国内で走行している乗用車の車体重量と燃費

をプロットしたものである。この図もわかるが、自動車の低速・定速走行時は空力抵抗の影響は小さく、転がり抵抗が支配的なので車体重量と燃費はほぼ比例の関係にあるといえる。また、Fig.8 には軽量化シナリオの 1 例を示す。軽量化率が 30%になる際、エンジン・ミッション部が軽量化されているが、これは車体の軽量化に伴いより小型のエンジンでも動力をまかなえることによる副次的な軽量化効果である。

### 5. 結論

2 章で紹介したように現在、一人当たりの年間最終エネルギー消費量は世界平均で人当たり 1toe(石油換算トン)である。OECD 諸国と非 OECD 諸国に分けて見ると前者の最終エネルギー消費量は約 3toe、後者は約 0.5toe であり、依然として南北問題が存在していることを示す。しかし、この南北問題が今世紀中に解消していくとするならば、先進国が現在の生活水準を落とすことにより南北の格差が縮まることは現実的ではないので、途上国が工業化するようになり現在の先進国並みのエネルギーを消費するようになるであろう。つまり、今世紀中に南北問題が完全に解決したならば、一人当たりの最終エネルギー使用量が現在の 3 倍かそれ以上にまで増加することを意味する。そして問題はこれだけではない。3 章で紹介したように国連の人口部会の予測によれば現在約 60 億人の世界人口は 2050 年には 1.5 倍に相当する 90 億人まで増加するとされる。この人口増加の効果を考え合わせると、一人当たりの最終エネルギー消費量が 3 倍、人口が 1.5 倍になれば今世紀中に現在の 4.5 倍ものエネルギーが消費されるようになる可能性がある。

これは数%や数十%ではなく、数倍のエネルギーの効率利用が必要とされていることを意味する。2.2 において部門別の省エネポテンシャルについて検討したが、民生部門において

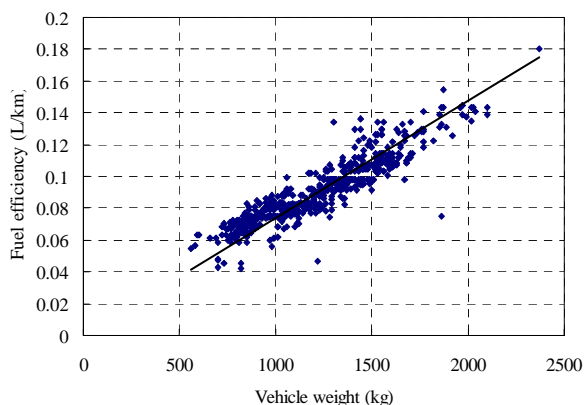


Fig.7 車体重量と燃費の関係

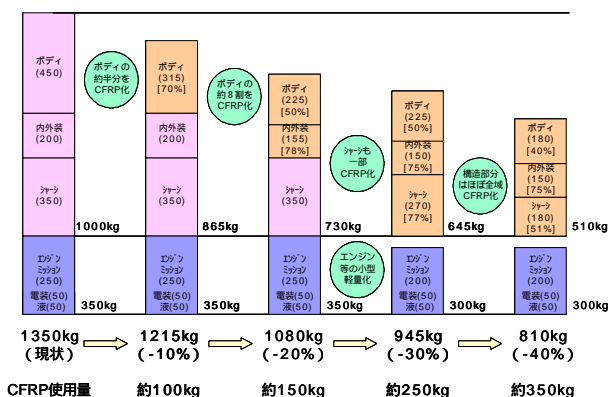


Fig.8 軽量化シナリオ例

は家庭用の定置型燃料電池の普及、産業部門においては大幅な電化により化石資源、特に石油の使用量を大幅に節約することができる。しかし、運輸部門においては現在の石油依存度の高さを考慮すれば他のエネルギーに転換することは非常に困難であると言わざるを得ない。よって石油の残存量減少や価格高騰は自動車の原因となり、その影響を最も受けるのも自動車であることがわかる。

本章では2章・3章でなされてきた検討を踏まえて、4章で紹介した省エネ技術をいつ、どのように必要とされていくべきであるか、提言を行う。また、ここで検討する省エネ技術は効果の大きい車体軽量化技術、内燃機関の効率向上のみとする。

### 5.1 省エネ技術導入シナリオ

3.2 で述べたようにこれからの数十年間が最もエネルギー消費量の伸び率が高い時期であり、この期間いかに石油を節約することができるかが重要である。そのためにはまず、軽量化と軽油化・ハイブリッド化で石油を節約しつつCNGに切り替え、再生可能エネルギー起源の水素で走る燃料電池車の登場を待つ、というのが合理的なシナリオである。

このシナリオは先進国における導入を念頭においたものであり、発展途上国では先進国より5~10年遅れて起こると考えられる。しかし今世紀前半のエネルギー消費量増加のほとんどは途上国によるものである。これらの技術を実用化し、安価に途上国に提供することは先進国の義務である。

### 5.2 省エネ技術導入シミュレーション

本項では5.1で検討した省エネ技術が世界の運輸部門における消費エネルギーおよび運輸部門からのCO2排出量にどのような効果をもたらすかを検討する。導入開始年度、導入率を変化させた際の影響を調べる。シミュレーションの前提を以下に示す。

- ▶トラック・自家用車を含む自動車全体で消費するエネルギーの変化を対象とする。
- ▶軽油化・ハイブリッド化は導入開始年を2010年もしくは2015年とし、自動車全体に占める割合が年間20%または5%ずつ増加する
- ▶車両軽量化技術の導入開始年は2010年もしくは2020年とし、自動車全体に占める割合が年間20%または5%ずつ増加する。軽量化率は導入開始年度が10%で5年ごとに10%ずつさらに軽量化され、最終的に50%になる。

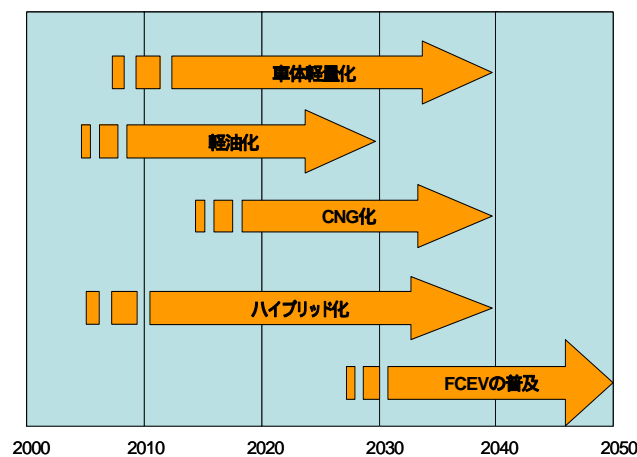


Fig.9 省エネ技術導入シナリオ

- ▶ FCEV の導入開始年は2030年もしくは2040年とし、自動車全体に占める割合が年間10%または5%ずつ増加する。初年度は100%天然ガス由来の水素で走行し、年間5%ずつ再生可能エネルギー起源の水素に置き換わるとする。
- ▶ 上記の仮定はOECD諸国におけるものであり、非OECD諸国では5年もしくは15年遅れて導入される。
- ▶ 新技術の導入に関して、早い場合は初年度は新規登録台数(保有台数の10%とする)の20%、2年目は40%と導入割合が上昇し5年目に100%となるとし、遅い場合は初年度が10%でその後10%ずつ導入率が上昇、10年目に新規登録される全ての自動車にその技術が適用されるとする。
- ▶ 以上に関して、最も早く導入が進んだ場合と最も遅い場合の2通りのシミュレーションを行う。

Fig.10 Fig.11 に結果を示す。2000年~2050年までに自動車によって消費される総エネルギーはリファレンスケース、楽観ケース、悲観ケースがそれぞれ162Gtoe、57Gtoe、97Gtoeである。現在、石油の確認埋蔵量が約135Gtoeであることを考えると省エネ技術導入による効果の大きさがわかる。また、同じ技術を導入するとしても楽観ケースと悲観ケースの違いからわかるように普及開始年度、普及速度が非常に大きく総エネルギー消費量を左右することがわかった。無対策の場合にはもちろん、悲観ケースでこれらの技術を導入したとしても石油の需給は逼迫するだろう。ここで示した楽観ケースに近い形で各技術を導入しなければ世代間・南北間の不公平が生じ、持続可能な発展とはかけ離れていってしまうのではないだろうか。

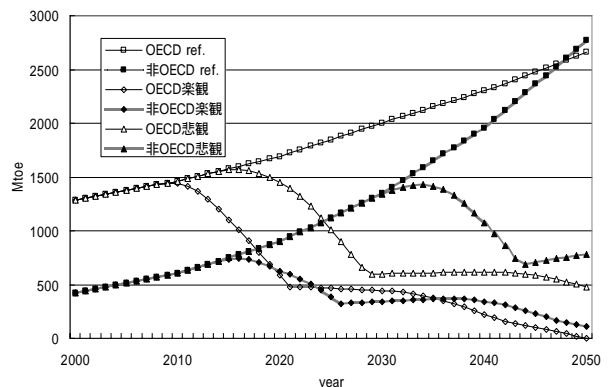


Fig.10 シミュレーション結果 OECD・非OECD別

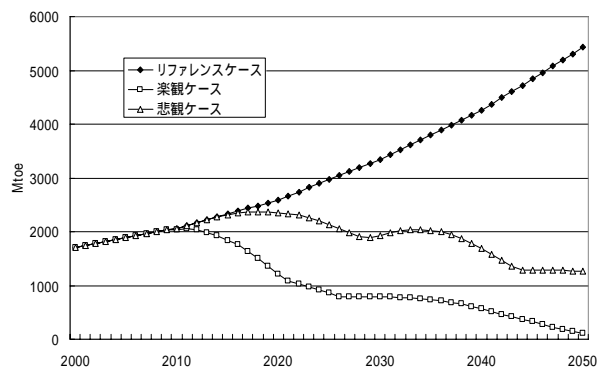


Fig.11 シミュレーション結果 世界計  
(紙面の都合上参考文献は省略する)