

# 鉄道を他輸送機関と比較する

浮上式鉄道開発本部 技師長

澤田 一夫

## 1. はじめに

21世紀は「環境の世紀」と言われており、地球温暖化防止をはじめ、循環型社会の実現、環境汚染物資の削減など、地球環境問題への対応はますます重要性を増している。2002年6月、日本は京都議定書を批准し、地球温暖化防止に向け、温室効果ガス排出抑制に一層の努力が求められることとなった。

しかしながら、我が国の温暖化ガスの排出は増加を続けており、とりわけ輸送部門の伸びが大きい。この部門における省エネ化、温暖化ガス排出量削減が急務と考えられることから、ここに各輸送機関のエネルギー消費、温暖化ガス排出の比較を行った。

なお、各輸送機関の建設・製造、運用から廃棄に至るまでに消費される全エネルギーの過半は運用時におけるものであることが、これまでの論文に示されており、かつ筆者はLCAの専門家ではないため、本稿では運用時に焦点をあてて論ずることとさせていただいた。

## 2. 地球温暖化問題

### 2.1 地球温暖化問題の現状

人類はエネルギーを得るために化石燃料を燃やし、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)等を大気中に放出してきた。大気中に存在するCO<sub>2</sub>等の一部の気体は、太陽からの光の大部分を透過させる一方で、地表面から放出される赤外線吸収して大気を暖める性質を有する。あたかも温室のガラスのように作用して地球を暖める気体を温室効果ガスと称する。近年、大気中に排出される温室効果ガスが急激に増加し、温室効果も強まっており、気温もそれだけ高くなると懸念されている。これが地球温暖化問題である。

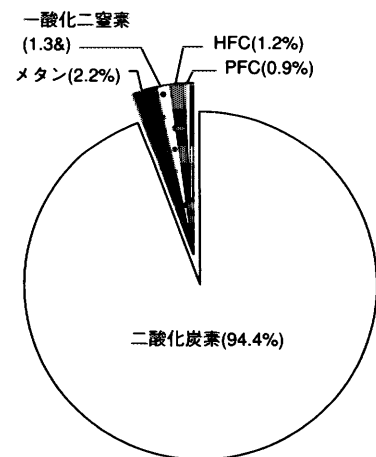
温暖化を防止するための施策が実施されなければ、温室効果ガスの大気中濃度が増加を続け、21世紀末には1990年に較べて地球全体の気温が約1.4～5.8℃、海面が9～88cm上昇し、豪雨や渇水の回数の増加、熱帯・亜熱帯地域での食料生産の低下、マラリアの患者数の増加、地球の全森林の3分の1での現存の植物種の生育が困難になる等の被害が生ずる、と指摘されている。

### 2.2 温室効果ガス

地球温暖化の原因となっている温室効果ガスには、CO<sub>2</sub>以外にも、メタン、一酸化二窒素、フロン等が挙げられる。しかし、メタン、一酸化二窒素、フロン等の一定量当たりの温室効果はCO<sub>2</sub>に較べはるかに高いものの、CO<sub>2</sub>の排出量が膨大であるため、結果として、我が国におけるCO<sub>2</sub>の地球温暖化への寄与度は、温室効果ガス全体の94% (1993年)と極めて高くなっている。(図1)

### 2.3 気候変動枠組条約と京都議定書

「大気中の温室効果ガス濃度を気候系に危険な人為的干渉を及ぼすことのない範囲に安定化させる」ことを目的として、1992年5月に気候変動枠組み条約が採択され、同年6月の地球サミットで各国首脳により署名式が行われた。



資料：環境省

図1 我が国が排出する温室効果ガスの地球温暖化への寄与度(1995年)

1997年12月には同条約第3回締約国会議（COP3）が開催され、同条約の目的の実現を図るため、京都議定書が採択された。

同議定書の中で、我が国は、2008年から2012年までの間にCO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガスを1990年比で6%削減という数値目標が定められた。

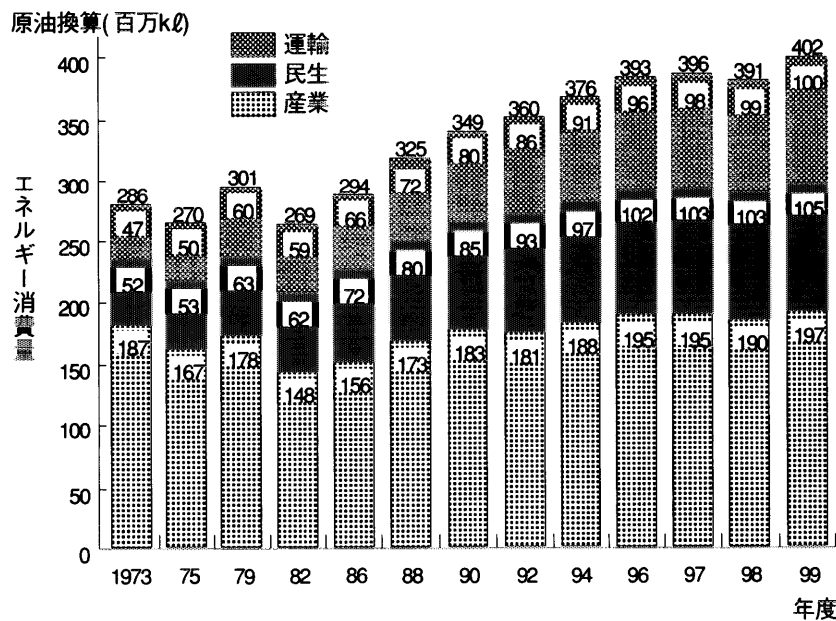
### 3. 日本におけるエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出

#### 3.1 日本の最終エネルギー消費

地球温暖化の主因は、化石燃料消費の急激な増加によるものであり、地球温暖化問題とエネルギー消費との間には密接不可分な関係がある。

日本の最終エネルギー消費は1960年代には経済成長を背景に大幅な増加を続けたが、1次、2次の石油危機のあとに一旦減少傾向で推移した。しかし、1983年以降は再び増加傾向に転じている。

1999年度の最終エネルギー消費量を部門別に見ると、産業部門は、なお全体の約半分を占めているものの、1973年比5%の増加にとどまっている。これに対し、民生、運輸部門はそれぞれ全体の消費量の4分の1を占め、また、1973年比でそれぞれ102%増、113%増と大幅に増加している。（図2）



資料：総合エネルギー統計

図2 最終エネルギー消費（部門別）の推移

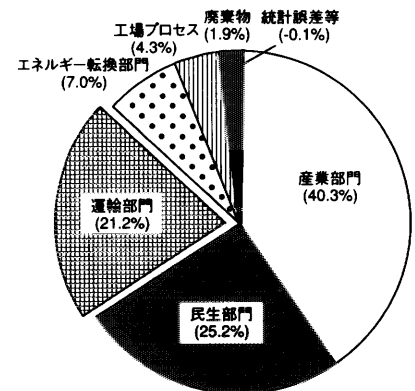
#### 3.2 日本におけるCO<sub>2</sub>排出

日本の1999年のCO<sub>2</sub>排出量は12億2,500万トンで、米国、中国、ロシアに次ぎ世界第4位である。

日本のCO<sub>2</sub>排出量のうち産業部門は40.3%、民生部門は25.2%、運輸部門は21.2%を占めている。（図3）

運輸部門からの排出量は、自動車の保有台数や走行量が大幅に上昇したことにより、1990年から1995年の間に約17%増加した。1995年以降も、特に自家用乗用車からのCO<sub>2</sub>排出量の増大が続き、1999年には1990年比23%増となっている。

なお、今年7月19日の地球の環境保全に関する関係閣僚会議において、我が国の2000年度のCO<sub>2</sub>排出量は過去最高となり、1990年比8%増であることが発表されている。



資料：地球環境保全に関する関係閣僚会議

図3 日本のCO<sub>2</sub>排出量（部門別）1999年度

## 4. 各輸送機関のエネルギー消費及びCO<sub>2</sub>排出

### 4.1 エネルギー消費の推移と現状

旅客部門におけるエネルギー消費量は、1991～2000年の10年間で見ると全ての輸送機関において増加している。特に自家用乗用車におけるエネルギー消費量の増加が著しく、この間に49%増加している。(図4)

旅客輸送全部門の消費エネルギー増加分の実に99.8%は自家用乗用車によるものである。

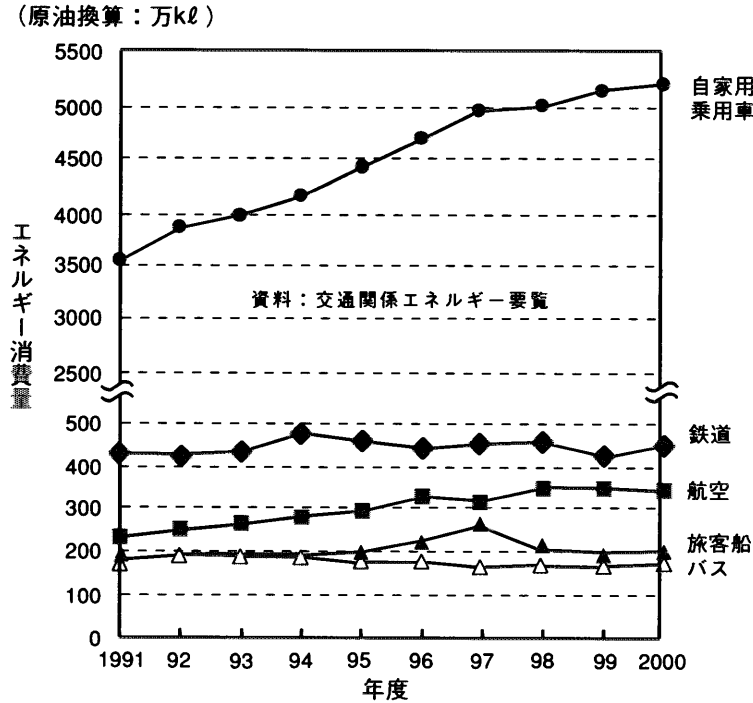


図4 旅客部門における輸送機関別エネルギー消費量の推移

自家用乗用車が全旅客輸送機関に占めるエネルギー消費量の割合は73%に達するが、輸送量における分担率は51%にとどまる。

これに対し鉄道は、消費エネルギーは全体の6%に過ぎないが、全輸送量の27%を分担しており、非常に効率の良い輸送機関と言える。

航空は、エネルギー消費量は全体の5%、輸送量は6%となっている。(図5)

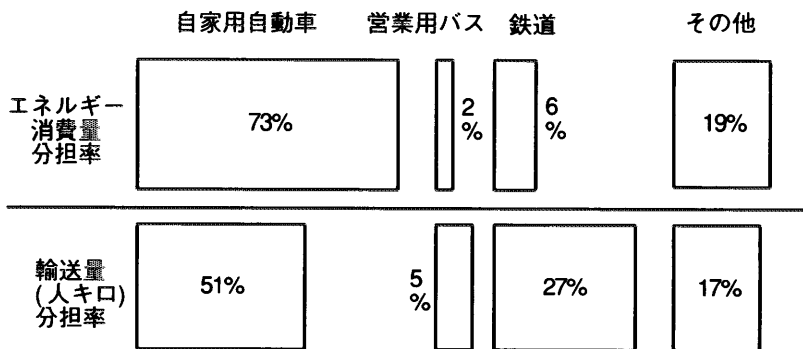
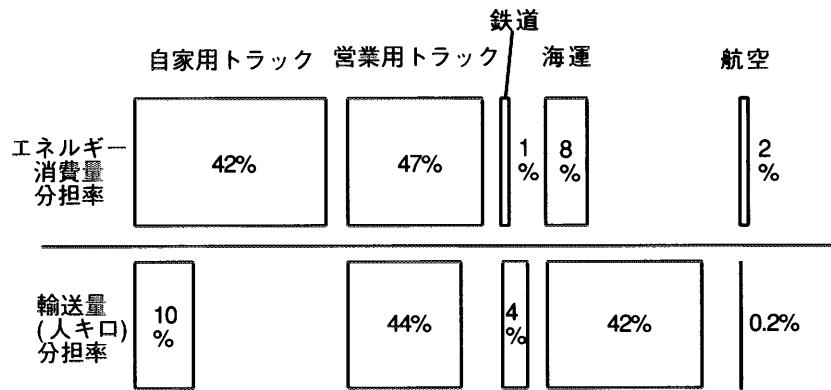


図5 旅客部門におけるエネルギー消費量及び輸送量の分担率

輸送部門の全消費エネルギーのうち、貨物部門は3分の1強を占める。貨物輸送部門のエネルギー消費量は、1991～2000年の10年間で約9%増加している。増加したのは自動車、航空である。この間のトンkmベースの輸送量の伸びは3%である。

自動車の全貨物輸送機関に占めるエネルギー消費量の割合は89%に達するが、輸送量における分担率は54%にとどまる。

これに対し内航海運は、消費エネルギーは全体の8%に過ぎないが、全輸送量の42%を分担しており、非常に効率の良い輸送機関と言える。鉄道も1%のエネルギー消費量で4%の輸送を分担している。(図6)



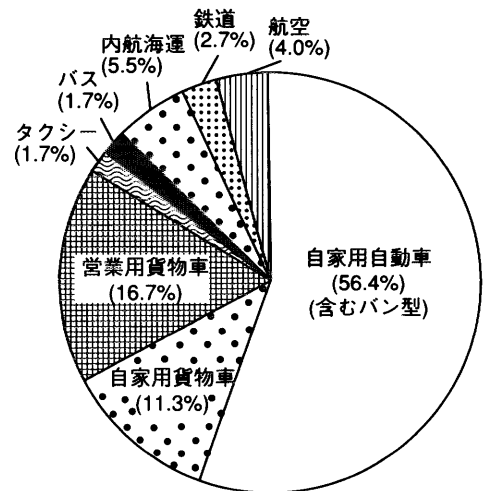
資料：交通関係エネルギー要覧

図6 貨物部門におけるエネルギー消費量及び輸送量の分担率

### 4.2 運輸部門のCO<sub>2</sub>排出の現状

運輸部門全体からのCO<sub>2</sub>排出量のうち、自動車から排出されるCO<sub>2</sub>の割合は、1999年度においては87.8%にのぼる。そのうち、自家用乗用車からの割合は56.4%である。

鉄道の全輸送機関に占める割合は、エネルギー消費よりもさらに低く、2.7%にすぎない。(図7)

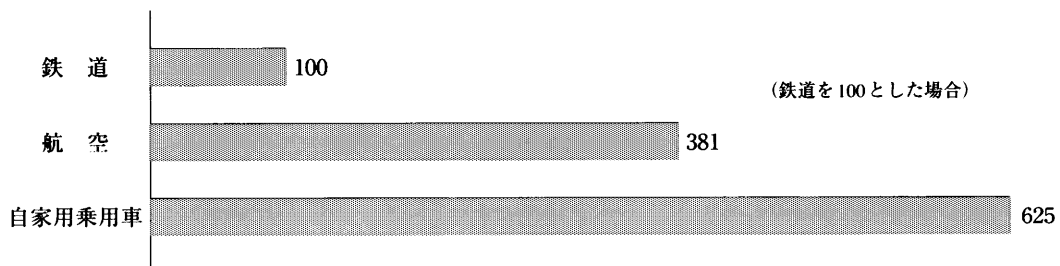


資料：交通関係エネルギー要覧

図7 輸送機関別CO<sub>2</sub>排出量

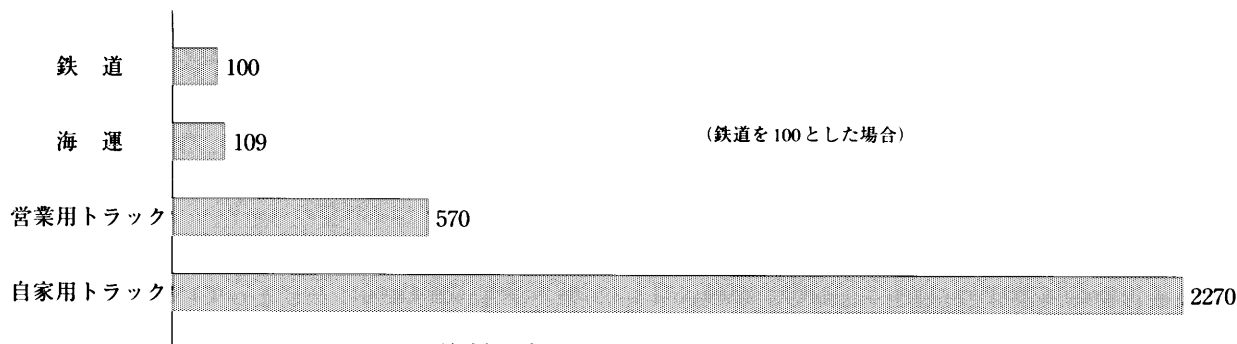
### 4.3 各輸送機関の単位輸送量当たりの比較

各輸送機関の単位輸送量当たりの消費エネルギー比較を図8および図9に示す。



資料：交通関係エネルギー要覧

図8 1人1km運ぶのに消費するエネルギーの比較

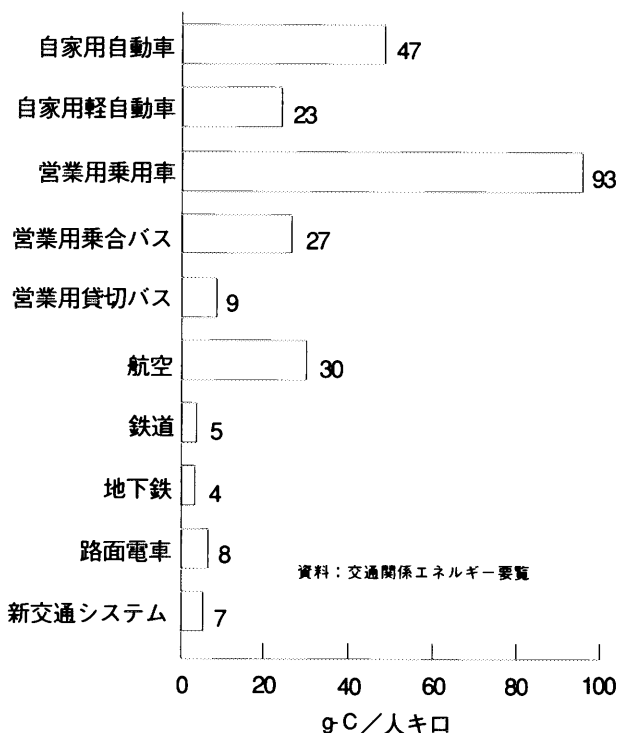


資料：交通関係エネルギー要覧

図9 1トンの荷物を1km運ぶのに消費するエネルギーの比較

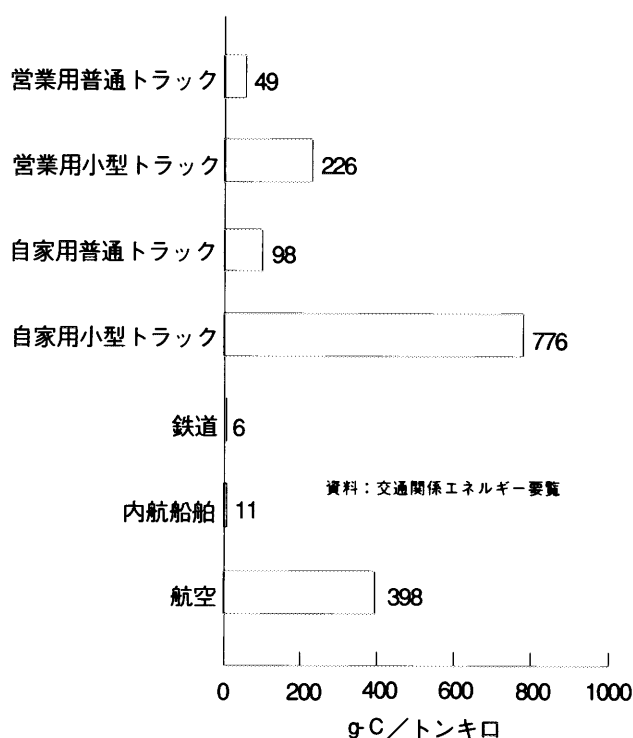
貨物輸送において、自家用トラックから営業用トラックへ、さらに鉄道・内航海運への転換の必要が説かれているのは、上記のように単位輸送量当たりの消費エネルギーに大きな差異があるからである。

一方、単位輸送量当たりのCO<sub>2</sub>排出量比較では、図10、図11のように、電力を主たる動力源とする鉄道が一段と有利になる。



資料：交通関係エネルギー要覧

図10 1人を1km運ぶのに排出するCO<sub>2</sub>の比較



資料：交通関係エネルギー要覧

図11 1トンの荷物を1km運ぶのに排出するCO<sub>2</sub>の比較

## 5. 輸送部門のCO<sub>2</sub>排出に関する一考察

上述のように、鉄道はエネルギー効率が良く、とりわけ単位輸送量当たりのCO<sub>2</sub>排出の少なさにおいて他を圧倒している。国全体としてCO<sub>2</sub>の排出量削減が急務な折、鉄道の貢献を確認するため、2例の計算を試みた。

### 5.1 東京圏の鉄道旅客輸送を自動車で行ったら

国土交通省監修の都市交通年報では、東京駅から50km圏を東京交通圏としている。ただし、房総半島の市原市以南や水海道市など東京との移動が少ない行政区域は除外している。該当地域の面積は6,448km<sup>2</sup>、人口は平成7年時点で2,930万人である。この地域の平成11年度の鉄道輸送量は1,710億人km（うちJRは900億人km）である。これを全て自家用乗用車が分担したらどうなるであろうか。

J R 東日本のCO<sub>2</sub>排出輸送原単位は全国の鉄道平均より良く14g-CO<sub>2</sub>/人kmである。

一方、自家用自動車は47g-C/人km、すなわち172g-CO<sub>2</sub>/人kmである。

この原単位の差に総輸送量を掛けると

$$(172 - 14) (\text{g-CO}_2/\text{人km}) \times 1,710 (\text{億人km}) = 2,700 \text{ 万トン-CO}_2$$

すなわち、我が国のCO<sub>2</sub>排出量が2.2%増加してしまうことになる。

## 5. 2 鉄道貨物輸送のシェアが西欧並になれば

日本の鉄道貨物輸送量は221億トンkmで、全輸送量5,780億トンkmの3.8%にとどまっている。(平成12年度) ちなみに、トラックによる輸送量は3,131億トンkmで全体の53.8%である。

一方、西欧諸国の鉄道貨物輸送は英国、ドイツ、フランスの平均で15%のシェアを確保している。

日本においても、トラックから鉄道へのモーダルシフトが進展し、鉄道貨物のシェアが15%に上昇するとCO<sub>2</sub>の排出はどれだけ削減されるであろうか？

- ・トラックによる輸送量は現在の3,131億トンkmが、鉄道への転移により21%削減される。
- ・トラックからのCO<sub>2</sub>排出量は図7より輸送機関全体の28%であり、輸送機関は図3より国全体の排出量12億2,500万トンの21.2%を占めている。
- ・従って、この転移によるトラックからのCO<sub>2</sub>削減量は  
12億2,500万トン × 0.212 × 0.28 × 0.21 = 1,527万トン-CO<sub>2</sub> となる。
- ・鉄道からの排出量の増加は、鉄道の原単位6g-C/トンkm、すなわち22g-CO<sub>2</sub>/トンkmより  
(5,780 × 0.15 - 221) (億トンkm) × 22 (g-CO<sub>2</sub>/トンkm) = 142万トン  
1,527万トン - 142万トン = 1,385万トン

すなわち、この転移により約1,400万トンのCO<sub>2</sub>排出が抑制されることになる。

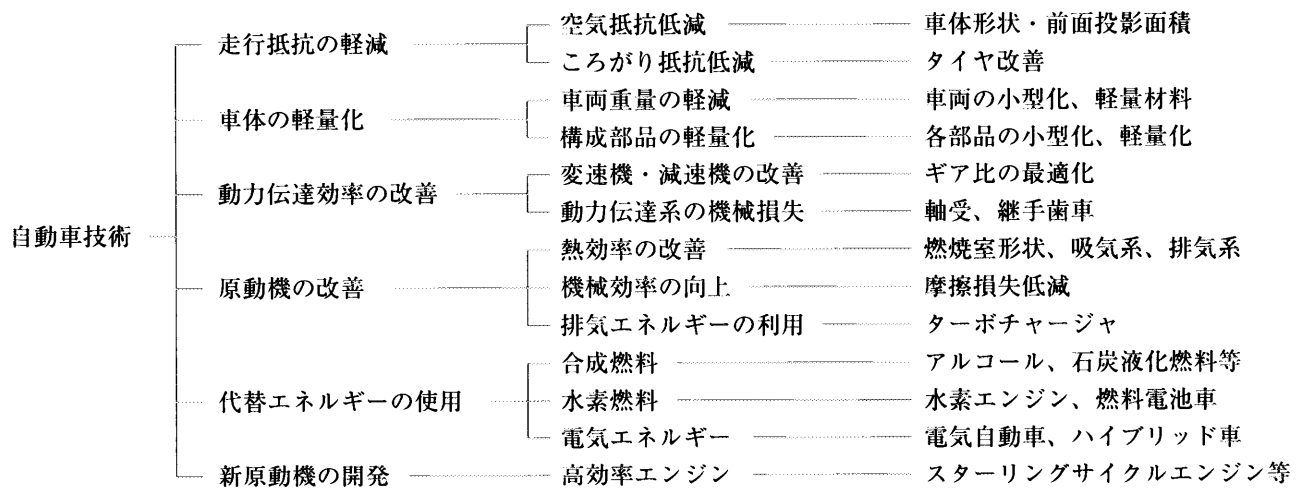
これは日本の森林8万km<sup>2</sup>のCO<sub>2</sub>吸収量に相当する。

## 6. 各輸送機関の省エネ性能向上

各輸送機関共、省エネルギー化を目指して技術開発を進めている。ここでは、乗用車、航空機、鉄道車両の省エネ化の進展を比較する。

### 6.1 乗用車

軽量化やエンジンの改良など省エネ化に向けて改善がなされてきた。今後も下記のように幅広く改善を目指す。



総合エネルギー調査会省エネルギー基準部会は、これらの技術開発により、出荷車両の重量区分比率が1995年度と同じと仮定した場合、10・15モードによる乗用自動車の燃費は1995年度の12.3km/Lから2010年度には15.1km/Lに改善されると推定している。

しかし、過去10年を見ると、車両の大型化等のため乗用車の単位輸送量当たりの燃費は悪化の傾向にある。(図1.2)

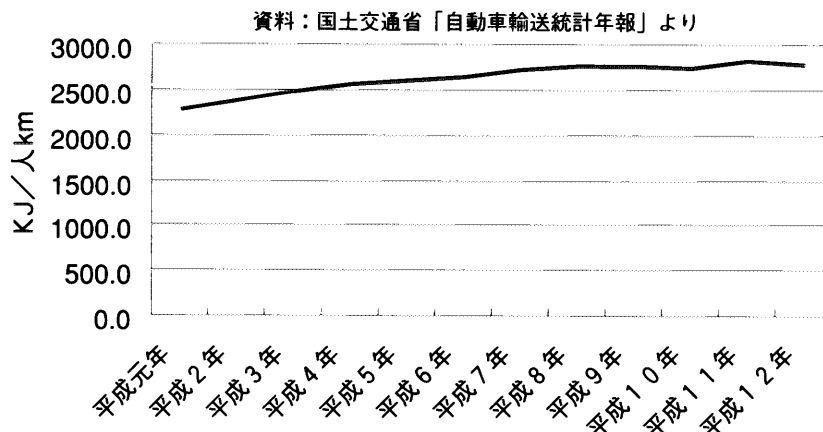


図1.2 乗用車の単位輸送量当たり消費エネルギーの推移

## 6.2 航空機

航空機は

- ・ターボファンエンジンの高バイパス化
- ・合理的設計、複合素材採用による軽量化
- ・翼形等の改善
- ・フライト・マネジメント・システムの高度化
- ・駐機中、APU（補助動力装置）に代え、地上電源設備を使用
- ・エンジンブレードの頻繁な研磨

等により燃費の向上を進めてきた。

下表は全日空の、同社運用条件による単位座席キロ当たりの燃料消費効率改善例である。

表1 新型機への更新による燃費改善 全日空ホームページより

比較機種 (括弧内は初就航年)	燃費改善率
B 727 (1964) → B 777-200 (1995)	約38%
B 747 SR (1973) → B 777-300 (1997)	約19%
B 747 LR (1971) → B 747-400 (1988)	約16%

全日空によれば、同社の座席キロ当たりの燃費はこの10年間で8.4%減少した、とのことである。

## 6.3 鉄道車両

省エネ化の個々の改善点は本稿では省略するが、JR東日本を例にとると、通勤型車両の消費エネルギーは表2のように大幅に改善されている。(103系を100とした相対比較)

表2 運転用消費エネルギーの比較 JR東日本 環境報告書2001より

車両	登場年	消費エネルギー
103系	1963年	100
205系	1985年	66
231系	1999年	47

省エネ車両の投入により、JR東日本の単位輸送量当たりの消費エネルギーは1996～2000年の4年間で4.4%減少している。新幹線車両においても省エネ化が進んでいる。東海道新幹線を例にとると、0系を100とした相对比较は下記の通りである。

表3 車種別消費電力量の比較 JR東海 ホームページより

車 両	登 場 年	消費エネルギー
0系	1964年	100
100系	1985年	79
300系	1992年	73
700系	1999年	66

鉄道（電気車）のCO<sub>2</sub>排出量低減に関しては、車両の消費電力の低減に加え、電力の排出原単位の改善も寄与する。発電効率の向上や電源の多様化により、単位電力当たりのCO<sub>2</sub>発生量は年々減少している。（図13）

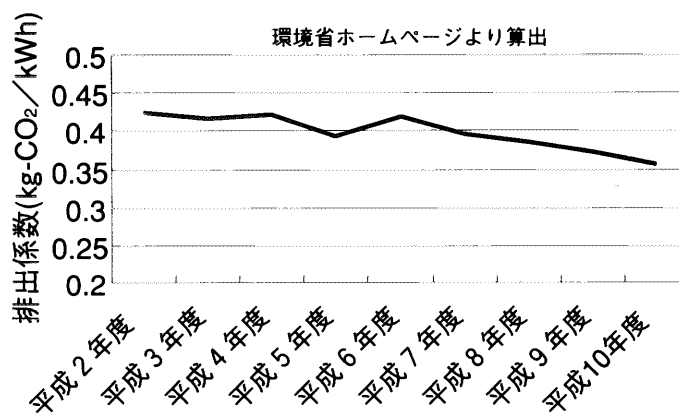


図13 単位電力量当たりの発生CO<sub>2</sub>の推移

## 7. リニアモーターカーと航空機、新幹線の比較

### 7.1 消費エネルギーの比較

#### 7.1.1 リニアモーターカーの消費エネルギー

リニアモーターカーの営業線列車の消費電力は、列車の編成両数や車両・電力供給系の諸元、線形、運転条件等様々な要因により影響を受ける。従って、営業線の仕様が決まっていない現時点では、これを精度良く示すことはできないが、仕様を想定し、山梨実験線のこれまでの実験結果に基づき試算すると、500km/hを巡航速度とするシステムの消費電力は90～100Wh/座席kmになると推定される。石油換算するために電力の発送電効率0.351（環境省）を用いると、

$$(90 \sim 100) (\text{Wh} / \text{座席 km}) \times 3.6 (\text{kJ} / \text{Wh}) \div 0.351 = 920 \sim 1,020 (\text{kJ} / \text{座席 km}) \text{ である。}$$

#### 7.1.2 新幹線の消費エネルギー

新幹線「のぞみ」700系の座席km当たりの消費電力は、JR東海ホームページの値、

CO<sub>2</sub>排出量：2.7g-C/座席km、電力原単位（1997年）：0.089kg-C/kWh、送配電ロス：5.5%

より算出すると、29Wh/座席km である。

石油換算をすると約300kJ/座席km となる。

のぞみは最高速度270km/hであるから、同じ車両が仮に500km/hで走行したとすると、空気抵抗（≒走行抵抗）は約3.4倍になる。 $[(500/270)^2 = 3.4]$   $29 \times 3.4 = 99 \text{Wh} / \text{座席 km}$  であるから、リニアモーターカーの90～100Wh/座席kmという値は、最新の新幹線車両に匹敵する速度相応の値と言えよう。



### 7.1.3 航空機の消費エネルギー

航空機は距離により、座席km当たりの燃費等は変化するので、ここでは、リニア、新幹線にあわせ東京～大阪間で比較する。特定機体、特定区間の信頼性の高い燃費実績は入手困難であるため、ここでは、入手可能なデータより推計することとした。機体はB747-400とする。

「高度3000フィートからの降下からタキシング・アイドリング～離陸～高度3000フィートまでの上昇」は、LTOサイクル (Landing / Take-Off) と称し、表4、表5のように燃料消費量に関するデータが公表されている。空港周辺の環境影響評価にはLTOサイクルを用いることが定められている。

表4 国内主要空港におけるLTOサイクル時間の実測値

環境省総合環境政策局資料より

	継続時間 (秒)			
	アプローチ	アイドル	テイクオフ	クライム
ICAO	240	1560	42	132
東京国際空港	270	903	45	60
新東京国際空港	270	1387	45	60
大阪国際空港	270	934	45	60
関西国際空港	270	1072	45	60

表5 機種別燃料流量推計

環境省総合環境政策局資料より抜粋 (原典: ICAO EMISSION INDEX)

	機種名	定格離陸推力 (kN)	エンジン基数	燃料流量 (kg-燃料/秒)			
				アプローチ	アイドル	テイクオフ	クライム
1	B727	71.17	2	0.27	0.11	0.92	0.75
2	B733	104.6	2	0.34	0.13	1.20	0.98
3	B737-400	104.6	2	0.34	0.13	1.20	0.98
4	B737-500	104.6	2	0.34	0.13	1.20	0.98
5	B747SR	202.8	4	0.55	0.19	2.01	1.64
6	B747-400	254.3	4	0.66	0.22	2.44	1.98
7	B757-200	176.1	2	0.49	0.17	1.79	1.46
8	B767-300	231.35	2	0.61	0.20	2.25	1.83
9	B777-200	333.2	2	0.82	0.26	3.09	2.51
10	B777-300	395	2	0.95	0.30	3.61	2.92

一方、3000フィートより上空での、上昇～巡航～降下については、実測が難しく、条件によって値の変動も大きいので、公式な原単位は存在しない。そこで、ここではWebよりデータを収集することにより、東京～大阪間におけるB747-400の燃料消費量の試算を行った。

一般に、巡航時のエンジン出力は離陸時の60%程度であるが、燃費はそれ以下に減少する。複数サイトの値に基づき、ここでは巡航時燃費は離陸時の35%とした。

その結果、東京～大阪間におけるB747-400の燃料消費量は約12トンと計算された。(なお、Webには、B747-400の東京→大阪の燃料消費量を直接示したのものもあるが、筆者の調べた範囲でも8.6～14.6トンと差が大きく、信頼性に疑問がある。)

ジェット燃料は約46.5MJ/kgであるから、B747-400の消費エネルギーは1,900 kJ/座席kmと計算される。

以上より、座席km当たりの消費エネルギーは、およそ、リニアモーターカーは新幹線の3倍、航空機は6倍である。

## 7.2 CO<sub>2</sub>排出量の比較

リニアモーターカーの消費電力は 90～100 (Wh/座席 km) である。電力のCO<sub>2</sub>排出係数は0.375kg-CO<sub>2</sub>/kWh (環境省) であるから、

34～38g-CO<sub>2</sub>/座席 km となる。

新幹線「のぞみ」700系は29Wh/座席 km より、11 g-CO<sub>2</sub>/座席 km である。

B747-400は、上記の推定燃料消費量とジェット燃料のCO<sub>2</sub>排出係数2.4kg-CO<sub>2</sub>/L (環境省) に基づき計算すると130g-C/座席 kmとなる。

すなわち、リニアモーターカーのCO<sub>2</sub>排出量は、新幹線700系の約3倍、航空機B747-400の1/3～1/4程度である。

## 7.3 リニアモーターカー新型車体による改善

平成14年7月、山梨実験線にて新型車両が走行試験を開始した。新たに製作したのは2両で、空力的には、先頭車のノーズ部の延伸、車体下半部の角形化による列車全長に亘る車両断面積の変化の縮小、が主な変更点である。既に551km/hまでの走行を実施しており、現在、データの解析を進めているが、走行抵抗のかなりの低下を確認している。前述のリニアモーターカーの消費エネルギーは従来車両に基づく値であり、今後、新車両のデータの解析を進め、営業線の予測に反映させてゆく予定である。なお、この新型車両をはじめ、リニアモーターカーの開発は国の補助金をいただいて進めている。

## 8. おわりに

鉄道が消費エネルギー、CO<sub>2</sub>排出の面で、他の輸送機関に較べ極めて優れた特性を有していることを、改めて明らかにした。それぞれの輸送機関が省エネ化、CO<sub>2</sub>削減の努力をすることは勿論重要であるが、それだけでは、輸送機関全体としてCO<sub>2</sub>を1990年レベルマイナス6%まで削減するのは困難に思われる。各輸送機関の間にはそれぞれの努力の範囲を超えた本質的な差がある。CO<sub>2</sub>の削減は我が国の喫緊の課題であり、国全体として、より省エネ、低CO<sub>2</sub>排出の輸送機関に需要をシフトさせる強力な施策が求められている。