

乗用車起源 CO₂ 排出量の将来予測

大西 輝明、島野 圭司*

*) 温暖化防止うらやす
(2017年2月)

自家用乗用車利用による将来の CO₂ 排出量の予測方法を提示した。一般家庭が保有する普通および小型乗用車、および軽乗用車について、その各々による排出量の全国平均値および東京都値を提示方法論に従って算出した。世帯毎の乗用車購入数および走行距離を決定づける因子は、過去の統計量の重回帰分析によって選定した。これら因子の将来の時間挙動を推算して購入数等の将来値を得、それらを用いて将来の CO₂ 排出量の経年挙動とその信頼範囲とを算出した。これによれば、我が国全体として 2030 年での排出量の 2013 年比を 75% 程度に低減するには、環境対応型車種の積極的導入をはかる必要があるが、東京都に代表される都市部ではそうした必要性は薄いことなどがわかった。

乗用車起源 CO₂ 排出量の将来予測

FUTURE PROSPECT OF THE AMOUNT OF CO₂ EMISSION ORIGINATED FROM PASSENGER CARS

自家用乗用車利用による将来の CO₂ 排出量の予測方法を提示した。一般家庭が保有する普通および小型乗用車、および軽乗用車について、その各々による排出量の全国平均値および東京都値を提示方法論に従って算出した。世帯毎の乗用車購入数および走行距離を決定づける因子は、過去の統計量の重回帰分析によって選定した。これら因子の将来の時間挙動を推算して購入数等の将来値を得、それらを用いて将来の CO₂ 排出量の経年挙動とその信頼範囲とを算出した。これによれば、我が国全体として 2030 年での排出量の 2013 年比を 75%程度に低減するには、環境対応型車種の積極的導入をはかる必要があるが、東京都に代表される都市部ではそうした必要性は薄いことなどがわかった。

キーワード：自家用乗用車、CO₂ 排出量、将来予測、経年挙動、重回帰分析

1. はじめに

わが国における 2014 年度の CO₂ 排出量は 12 億 6500 万トンである。運輸部門ではこのうちの 17.2%を排出し、さらに自動車は当該部門の 86.0%を、自家用乗用車は自動車中の 47.5%を排出しており、これは我が国全体の約 7%の排出量に相当する。¹⁾ 2015 年の気候変動枠組条約第 21 回締約国会議 (COP21) において、我が国は 2030 年度におけるエネルギー起源 CO₂ 総排出量を 2013 年度の 74%に、運輸部門でのそれも同様な割合だけ削減することを宣言している。²⁾ 運輸部門での 2013 年度 CO₂ 排出量は 2005 年度の約 94%に低減しているが、実際に 2030 年度において 2013 年度比の 74%にまで削減可能かどうかは不明である。多くの自治体においても温暖化対策に係っては上記 COP21 に従って、2030 年度における自家用乗用車一台あたりの燃料消費量を 2013 年度比の 75%に削減する目標などを設定している。³⁾ しかしこれは車社会の変容を考慮することなく目標値をそのまま採用したに過ぎないものであり、その妥当性は明らかではない。当報文では一般家庭などの民生部門が保有する自家用乗用車に注目し、それに起源する CO₂ 排出量の将来予測を行うための方法論を提示する。

乗用車起源の CO₂ 排出量を決定付ける要因の一つは車の燃費であるが、その改善は車種改良による寄与、エコドライブの促進などの車社会での生活スタイル変更による寄与、および交通流改善からの寄与などによってもたらされる。しかし現在、こうした要素が将来、どのような値をとるかについての定量的予測はない。CO₂ 排出量はこれらの不確定な要素を考慮して燃費を予測し、さらに社会全体での乗用車保有数を算出して、これらと単位時間当りの走行距離との積をとることによって得ることができる。しかし、このような保有数や走行距離の将来

値がいかなる因子に左右されるかについても明確ではなく、このため多くの場合、それらの予測は単純な外挿とならざるを得なかった。したがってこのような不確かな影響因子が同定され、将来にわたるそれら個々の時間挙動が推算されるならば、将来の CO₂ 排出量もある一定の精度内で予測することが可能となろう。過去に CO₂ 排出要因の分析は行われてきたが、^{4,5)} それらは将来予測を目的としたものではない。当報文では CO₂ 排出量の将来予測を目的として自動車統計量の分析を行い、それによって影響因子を見出すことを試みる。さらにそうした因子の将来値を推計し、それらの一次結合として保有数や走行距離を算出する。

乗用車に係る統計量の経年挙動は車種や地域によって異なる。当報文では簡単のために乗用車を普通および小型乗用車 (以下ではこれらを「普通乗用車」と記す)、および軽乗用車の 2 種類に大別し、同一の方法論であるが、それぞれ別個にその将来値を検討する。さらにこれらの統計量としては、我が国全体の統計量 (全国値、全国平均値) と都市部の代表としての東京都の値の 2 種類を採用することとする。統計量の全国値と東京都値の経年挙動は異なり、人々の自動車に対する反応が地域 (地方と都市部) によって異なることを示唆している。従って以下では普通乗用車と軽乗用車、全国と東京都の 4 組の将来予測を行うことになるが、最終的には普通と軽の両乗用車の和で地域の乗用車起源 CO₂ 量を算出する。

新規購入車はある時間経過後に「中古車」か、または廃車のいずれかとなるが、当報文では「中古車」状態を変数とはせず、新規購入車から中古車への移転時に時間的な遅れはなく、これらを総称して乗用車として取り扱うものとする。また中古車の海外輸出入による統計量の変動効果 (次章で述べる国内保有車の平均使用年数など) は自動車統計には既に含まれているものとして、中古車

輸出入数も変数としては取り扱わない。当報文で用いる排出量単位は（乗用車の保有いかんにかかわらず全世界帯を平均して）、考慮する地域の一世帯が排出する年間 CO₂ 量 [kgCO₂/年/世帯] とし、時間単位は年、距離単位は km とする。利用する統計量は 1970 年以降の記録開始時刻から 2015 年に至る最長 46 年間のものである。

次章では乗用車起源 CO₂ 排出量の支配要因を検討し、重回帰分析によってそれら要因の変動がいかなる因子によって左右されるかを検討する。第 3 章ではいくつかの前提下でこれら因子の時間依存性を検討し、それをを用いて将来の乗用車起源の CO₂ 排出量予測とその信頼範囲を算出する。こうした値から導出した CO₂ 排出量の 2013 年値に対する比も示し、乗用車利用者レベルでの排出量削減策も考察する。第 4 章はまとめである。

2. 乗用車起源 CO₂ 排出量に係る要因

時刻 t 、世帯数が $H(t)$ である地域において、当該地域の乗用車が単位時間に排出する CO₂ 量 $W(t)$ [kgCO₂/年/世帯] は以下の式で表される。

$$W(t) = \frac{1}{H(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} c_i \xi_i(t) \ell_i(t) \quad (1)$$

$$= \frac{CL(t)}{H(t)} \int_{t'=0}^t \Xi(t') n(t') w(t; t') dt' \quad (2)$$

$$\approx \frac{CL(t)}{H(t)} \sum_{j=1}^J \Xi(t_j) n(t_j) w(t; t_j) \quad (3)$$

ここで添字 i は個々の乗用車を表し、 N は乗用車総数、 ξ は単位距離走行のために消費する燃料の体積（これは燃費の逆数であり、以下で燃料消費率と記す）、 ℓ は年間走行距離、 c （および、その平均値 C ）は単位体積の燃料消費によって排出される CO₂ 量（通常ガソリンでは $C=2.32$ kgCO₂/ℓ）である。また L は走行距離の平均値、 $n(t')$ は過去の時刻 $t' (\leq t)$ において当該地域で購入された乗用車数、 $\Xi(t')$ は全乗用車で平均した t' における燃料消費率、 $w(t; t')$ は時刻 t' で購入された乗用車が時刻 t においてもなおかつ残存し、保有されている割合（以下では残存率と記す）とする。さらに、 j は離散時刻を表す添字とし、 $t_j = t$ である。式(3)では時刻 t_j で導入された乗用車の燃料消費率は、 $t > t_j$ においても不変であるとしている。また時 t_j での値は、個々の乗用車を「微視的」に見て区別するものではなく、乗用車全体としての平均値である。量 $N(t)$ と $n(t)$ および $w(t; t')$ との間には、以下の関係が成り立つ。

$$N(t) = \int_{t'=0}^t n(t') w(t; t') dt' \approx \sum_{j=1}^J n(t_j) w(t; t_j) \quad (4)$$

当報文の問題では、上式(1)~(4)中では既知の量 C および $H(t)$ を除いて未知の残存率 $w(t; t')$ 、および統計量 $L(t)$ 、 $n(t)$ 、 $\Xi(t)$ および $N(t)$ の全ての将来値予測が要請される。しかしこれらの経年変化挙動^{6~10)}（は後述の Fig.4, 5 に示すとおり、特に量 $n(t)$ ）は極めて特異的であり、将来予測は困難であるかに見える。

次節では残存率 $w(t; t')$ の関数型を検討する。第 2.2 節において、統計量 $n(t)$ および $L(t)$ を支配する因子を重回帰分析によって探索する。さらに第 2.3 節でこうした因子の時間挙動について検討する。

2.1. 乗用車残存率

関数 $w(t; t')$ に関する直接のデータはないが、時刻 t において保有される乗用車全体に対する平均車齢 $T(t)$ と、廃車に至る迄の使用年数の平均値である平均使用年数 $\tau(t)$ とからそれを推算することができる。^{11, 12)} 関数 $w(t; t')$ に関しては種々の型が考えられるが、^{13, 14)} ここでは簡単のため以下の Weibull 関数型を仮定する。

$$w(t; t') \equiv \exp\{-\alpha(t-t')^\beta\} \quad (5)$$

ここで係数 α および β は、 $T(t)$ および $\tau(t)$ とそれぞれ以下のように関連付けられる。

$$T(t) = \frac{\sum_{t'=0}^t n(t') w(t; t') (t-t')}{\sum_{t'=0}^t n(t') w(t; t')} \approx \alpha^{-1/\beta} \Gamma(2/\beta) / \Gamma(1/\beta) \quad (6)$$

$$\tau(t) = \frac{\sum_{t'=0}^t n(t') (t-t') \frac{\partial w(t; t')}{\partial t'}}{\sum_{t'=0}^t n(t') \frac{\partial w(t; t')}{\partial t'}} \approx \alpha^{-1/\beta} \Gamma(1/\beta) / \beta \quad (7)$$

ただし $\Gamma(x)$ はガンマ関数、 $n(t')$ は時刻 t' で新規購入された新車数であるが、上 2 式最右辺は、 $n(t')$ は t' によらず一定であるとして算出した近似値である。統計量 $T(t)$ および $\tau(t)$ が与えられれば上 2 式から時刻 t での α および β が算出でき、最終的に $w(t; t')$ が導出できることになる。

1975 年以降分に関して公開されている普通乗用車に対する $T(t)$ および $\tau(t)$ の値¹¹⁾ は全国平均値であり、特定地域や東京都のみに対する公表値はない。また、軽乗用車については 2005 年以降分についてのみ公表値¹²⁾ が利用できる。こうしたことのため、以下の事柄を仮定して 1970 年以降の各年度における普通および軽乗用車の平均の車齢と使用年数を推算し、それによって残存率を算出する。

- 1) 1970~1974年の統計値は、1975年の値と同一であるとする。
- 2) 軽乗用車での2004年以前の平均車齢は、年度に無関係に小型乗用車のそれより（2005年における小型乗用車と軽乗用車の平均車齢の差である）0.64年だけ小さい値であるとする。
- 3) 同様の方法で、2004年以前の軽乗用車の平均使用年数は、年度にかかわらず小型乗用車のそれよりも0.33年だけ大きいとする。
- 4) 平均車齢および平均使用年数に対する東京都の値は、全国平均値に比していずれの年、車種についても各々、0.5年および1.0年だけ小さいとする。¹⁵⁾
- 5) 普通乗用車の平均車齢と平均使用年数を時間に関してプロットする場合、1990~2015年の区間については以下の学習曲線（Sigmoid 曲線） $\zeta(t; a, b, c, t_0)$ によくフィットする。

$$\zeta(t; a, b, c, t_0) \equiv 0.5a [1 + \tanh\{b(t - t_0)\}] + c \quad (8)$$

したがって $t \geq 2016$ 年での平均車齢および平均使用年数の変化傾向を、上式 (8) によって外挿するものとする。この場合、普通乗用車の平均車齢に関しては $\zeta(t \geq 2016; a=6.72, b=0.056, c=2.80, t_0=2002)$ 、軽乗用車のそれについては $\zeta(t \geq 2016; a=10.9, b=0.03, c=1.512, t_0=2009)$ 、普通乗用車の平均使用年数については $\zeta(t \geq 2016; a=7.56, b=0.065, c=5.80, t_0=1998)$ 、軽乗用車については $\zeta(t \geq 2016; a=9.90, b=0.048, c=6.30, t_0=2003)$ が採用できる。これらの外挿式は1990~2015年で修正 χ^2 乗値が最小となるように決定したものである。

Fig.1 にこれらの仮定のもとで算出した式(5)中の $\alpha(t)$ および $\beta(t)$ の経年変化挙動を示す。

こうして算出される $w(t; t')$ 、量 $n(t')$ および $N(t)$ との間には関係式(4)が成立する。しかし単純化した残存率型(5)や諸仮定の導入、式(6),(7)での近似的な取り扱い、実測値相互間での統計的な誤差などのため、式(4)が常に正確に成立するとは限らない。ここでは式(4)が満足されるよう、単純な weibull 関数(5)を以下のように変更する。

$$w(t; t') \equiv \exp\{-\alpha(t - t')^\beta + \varepsilon(t')\} \quad (9)$$

ここで $\varepsilon(t')$ は補正因子であり、普通乗用車の全国平均値については $t' \leq 1983$ および $1995 \leq t' \leq 2004$ で $\varepsilon=0.262$ 、東京都値では $t' \leq 1978$ および $1995 \leq t' \leq 2009$ で $\varepsilon=0.336$ 、軽乗用車の全国平均値では $1995 \leq t' \leq 2007$ で、東京都でのそれは $1989 \leq t' \leq 2009$ でいずれも $\varepsilon=0.262$ とし、これら以外の時間範囲では $\varepsilon=0$ とする。

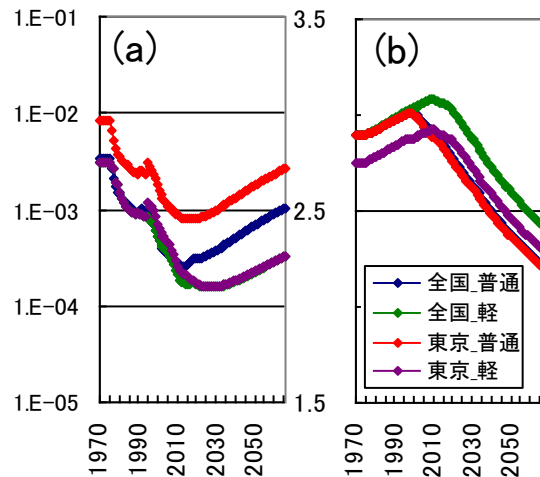


Fig.1 Weibull 関数の定数 (a) $\alpha(t)$, (b) $\beta(t)$. 軽乗用車の α 、普通乗用車の β については全国値と東京都値はほぼ同値。(a) の線種は(b)に示した凡例と同一

2.2. 乗用車購入数および年間走行距離の支配因子

式(3)によって CO_2 排出量を予測するには、量 $\Xi(t)$ の他に乗用車購入数 $n(t)$ と走行距離 $L(t)$ の情報が必要となる。後二者の変数を一般に $X(t)$ で表し、ここでは簡単にこれら $X(t)$ がいくつかの因子 $x_k(t)$ ($k=1, K$) の一次線形結合で与えられとする。

$$X(t) = \gamma_0 + \sum_{k=1}^K \gamma_k x_k(t - t_k) \quad (10)$$

ただし γ_0 および γ_k は定数であり、 t_k は時間遅れを表す定数である。右辺第一項は趣味や楽しみ、社会的ステータスなどとしての車に対する、時間に依存しない人々の意識や態度に起源する成分、第二項は時間変動する成分である。こうした関係の可否を検証し因子 $x_k(t)$ を同定するため、[1970, 2015] 年の期間で重回帰分析を行う。因子 $x_k(t)$ の候補として以下の乗用車関連、代替交通手段関連、家庭経済および社会経済関連、人々の意識変化や社会変化関連などの各変数（説明変数）^{6~10, 16~29)} の組み合わせを検討し、最良の重回帰結果、すなわち補正寄与率 R^{*2} が最大となる説明変数を因子 $x_k(t)$ とする。

検討した説明変数は各種の代替交通機関の延長キロ数、年間旅客数および旅客キロ数、総人口に対する乗車人数比、高速道路延長キロ数、駐車場面積、自動車販売平均価格、自動車関連物価指数、ガソリン価格、自動車関連経費が生計支出に占める割合、日経平均株価、賃上げ率、(若年層、生産年齢層、高齢者層)の総人口に対する比、人口密度、世帯数、ライフスタイルの変化を暗示する各種の世論調査や統計量、女性の有業率、女性の免許保有率、および社会変容因子、などである。次項で「社会変容因子」について検討し、それを定義する。

(1) 社会変容因子

参考文献³⁰⁾によれば近年、普通乗用車の国内販売数はしだいに減少し、逆に軽乗用車のそれはしだいに増加している。また、地方における世帯あたりの軽乗用車購入数が、東京都などの都市部に比してかなり高い値ともなっている。³⁰⁾ 近年における軽乗用車購入や利用に係る特徴的傾向の一つは、中年女性、特に50歳代女性の有業率の上昇と、それに伴うこの層での軽乗用車利用者数の着実な上昇であり、また、こうしたことに基づく購入数の増加である。これは地方の有業女性層が通勤や買い物などのために軽乗用車の利用者となる割合が増大したことによる。さらにこの傾向は、女性の運転免許取得者の全取得者数に対する割合の時間の上昇傾向に極めてよく類似している。

地方における軽乗用車利用者の第二の特徴的傾向は高齢者の増大である。軽乗用車は今や『地方』の『女性』および『高齢者』にとっての『必需品』なのである。³¹⁾ 我が国全体では2013年において軽乗用車の主運転者が女性である比率は4割強、60歳以上の高齢者のそれはほぼ1/3であるが、これらの割合は地方ではより高く、さらに時間の経過とともにしだいに増大している。地方では交通不便、アクセス困難など、公共交通機関の自由な利用は容易ではなく、車は地方での生活を支えるための必需品であると言える。

このように時代の変化とともに、軽乗用車保有の必然性が特に地方で高まったことや、女性や高齢者など、利用者の属性に変化が生じたことなどは、換言すれば、こうした変化が社会変容に伴う必然的な生活スタイルの変化や人々の価値観や意識の変化に起因するものであり、これはさらに換言すれば、時間とともに緩やかに変わるこのような因子(変数)が乗用車購入数を決定づける一つの重要な要因となっていることを意味していると言える。すなわち、人々の乗用車購入動機を左右する因子(すなわち式(10)中の変数 $x_k(t)$)を考慮する場合、経済活動による景気変動や燃料費の変動、保守整備費、税、保険等の社会経済的因子だけではなく、時代や社会情勢とともに変容する利用者自身の特性(属性)変化や生活スタイル、社会システムの変化に伴う価値観の変化などにも注目する必要があることになる。

Fig.2 に利用者のこうした諸特性の時間的変化傾向を表す統計量、すなわち(全体に対する)女性の運転免許取得割合、²⁷⁾ 女性の有業率、²⁶⁾ 65歳以上の高齢者率、²⁹⁾ ライフスタイルに関する意識(「これからは物の豊かさよりも心の豊かさ」(価値観)、「毎日の生活を充実させて楽しむ」(ライフスタイル)などの賛成割合)²⁵⁾ の経年変化を示す。これらの統計量の経年変化は相互に類似した時間挙動を示しており、いずれも時間とともにゆるやかに

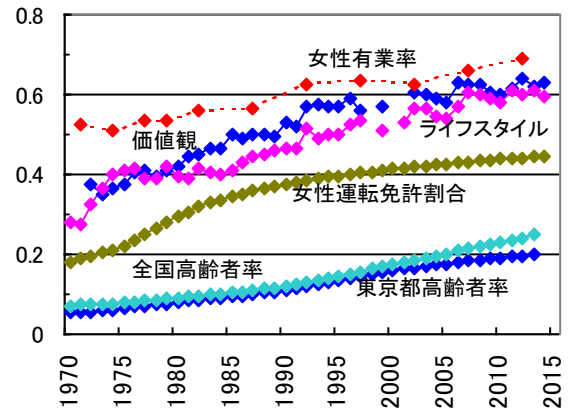


Fig.2 社会変化や生活スタイル変容を示唆する統計量

上昇してある値に漸近する傾向を持つ。従ってそれらを統合して一つの代表関数として表現できれば、それを上記の複数の変数に代替し得る新たな一つの説明変数として導入することもできよう。ここでは便宜的に1982年の値が0.0となるようにFig.2の変数群を縦軸方向に平行移動し、さらに各時点でこれらを単純に平均して新変数値を作成する。このような変数群の選定法には任意性が残るが、当報文ではこうして得た新変数値を式(8)のSigmoid関数にフィットさせ、以下の新変数(「社会変容因子」とする) x_s を得る。

$$x_s \equiv \zeta(t; 0.381, 0.0305, -0.165, 1987) \quad (11)$$

当関数(11)を $t > t_0$ へ外挿して、その将来値を推算する。上式の χ^2 平方根値は $(\langle \chi^2 \rangle)^{1/2} = 0.123$ である。上式(11)において重要な定数は式(8)中の b および t_0 に対応する0.0305および1987の2値であり、 a および c に対応する値は、それらで過不足する量は重回帰分析によって決まる γ_k および γ_0 によって自動的に補償されることになるので、重要な定数ではない。

(2) 重回帰分析による支配因子の決定

乗用車新規購入数に係る重回帰分析結果をTable 1に、走行距離に関するそれをTable 2に示す。ここで乗用車購入数に関しては1970~2015年の期間の[車両数/年/世帯]単位で、走行距離に関しては1980~2009年の期間の[km/年/車両]の単位でそれぞれ表した実測値を変数 $X(t)$ として採用し、(各年6月最終日の終値を当該年度の値とする)日経平均株価は $t \leq 2015$ の期間での、(各年の6月、東京での値を当該年の値とする)ガソリン価格は $1970 \leq t \leq 2015$ 年の期間での各々の最大値を1.0と規格化した値を説明変数 $x_k(t)$ として採用している。社会変容因子の値は式(11)による。多数の説明変数候補を検討したが、説明変数として採用し得る統計量は極めて少数の、限定されたものに限ることが判明した。すなわち、日経平均株価とガソリン価格、および社会変容因子のみにすぎない。これらのうち日経平均株価は株価そのものが購

Table 1 乗用車購入数に係る説明変数

地域	車種	γ_0	x_k	t_k (年)	$\gamma_k \pm$ 標準偏差	R^{*2}
全国	普通	0.05837	日経平均株価	1	0.04205±0.01155***	0.7742
			日経平均株価	0	0.02165±0.01161*	
社会変容因子			0	-0.16048±0.01949***		
東京	軽	0.01095	日経平均株価	1	0.01158±0.00695*	0.8183
			日経平均株価	0	-0.01547±0.00699*	
東京	普通	0.04620	日経平均株価	1	0.02044±0.00967*	0.8629
			日経平均株価	0	0.03975±0.00972***	
社会変容因子			0	-0.22608±0.01633***		
東京	軽	0.00819	日経平均株価	0	-0.00162±0.00084*	0.7920
			ガソリン価格	1	-0.00662±0.00134***	
			社会変容因子	0	0.03634±0.00296***	

***) p<0.001, **) p<0.01, *) p<0.1, ただし p は有意確率 (Table 1, 2 に共通)

Table 2 乗用車走行距離に係る説明変数

地域	車種	γ_0	x_k	t_k (年)	$\gamma_k \pm$ 標準偏差	R^{*2}
全国	普通	11440.71	ガソリン価格	0	-1618.31±303.92***	0.7324
			社会変容因子	0	-5759.18±699.50***	
東京	軽	6342.79	日経平均株価	0	-699.37±328.09*	0.8648
			社会変容因子	0	9688.41±1559.38***	
東京	普通	13279.19	ガソリン価格	0	-3117.99±529.28***	0.9194
			社会変容因子	0	-23430.40±1218.19***	
東京	軽	3934.75	ガソリン価格	0	-329.67±158.36*	0.5865
			社会変容因子	0	2656.35±520.60***	

入数などを支配しているということでは必ずしもなく、それが景気の動向や変動を間接的に表す指標であり、各家庭での年間収入や乗用車購入のための経済裕度などの目安となっていることを示すものである。また、ガソリン価格の上下変動が直接、年間走行距離等に影響を与えることも容易に想像できるところである。一方、社会変容因子は乗用車購入数と走行距離の両変数に関与し、その係数値 γ_k の相対的な大きさからも、乗用車起源 CO₂ 量推算のための重要因子であることがうかがわれる。係数 γ_k の符号から、普通乗用車購入数と軽乗用車のそれとは当該因子の変動に関して逆方向の依存性を持つことがわかる。これは当該因子の増大、すなわち今後の時間経過とともに、軽乗用車がその数およびその役割上、普通乗用車にしたいに置き換わることを意味している。

2.3. 諸因子の将来値

(1) 新型車種普及率

将来、どの時点でいかなる新型車種がどれほど普及するか情報は、乗用車全体としての燃費の決定に直接関連し、乗用車起源 CO₂ 量を予測するうえで不可欠のものである。しかし新型車種 (ハイブリッド車 (HV)、プラ

グインハイブリッド車 (PHV)、電気自動車 (EV)、燃料電池車 (FC)、クリーンディーゼル車 (CD) など) の中長期的な普及率やそれら個々の将来燃費に関しては不確実な部分が多い。従ってここでは、これら全体の傾向を「次世代自動車戦略 2010」³²⁾ などによる 2020~2030 年の乗用車車種別普及目標に従って三種のシナリオ (シナリオ 1 は「民間努力ケース」、2 は「政府目標ケース」にそれぞれ近い) を導入し、それらに従って推計を行うこととする。これを Table 3 に示す。当報文で算出するこれらのシナリオによる排出量は、シナリオ 1, 2 が計画通りに達成されたとする前提に立つものであり、こうしたシナリオの妥当性や達成可能性についての検討は、当報文とは別種の問題となる。^{43,44)}

各シナリオでの値はその時点での普及割合であり、その年間で新規に購入される新車に対する各車種の分率を与えるものではない。また普通乗用車および軽乗用車の各々に対して、各車種の分率総和を 100%としている。さらに軽自動車の次世代車としては、電気自動車のみが普及するものとしている。シナリオ 1 の 2046 年およびシナリオ 2 の 2035 年は、従来型の普通乗用車普及率がそれぞれ 40% および 30% となる時点である。これらの時点以降の普及率は一定であるとし、さらに、各年の間での普及率は線形に変化するものとする。

Table 3 車種普及シナリオ

シナリオ1				
車種		2020年	2030年	2046年
普通	従来型	80%	65%	40%
	HV	12.5	20	32
	PHV	3.75	7	13
	EV	3.75	7	13
	FC	~0	1	2
	CD	~0	~0	~0
軽	従来型	96.25	93	87
	EV	3.75	7	13
シナリオ2				
車種		2020年	2030年	2035年
普通	従来型	60%	40%	30%
	HV	20	33	40
	PHV	9.5	12	13
	EV	9.5	12	13
	FC	1	3	4
	CD	~0	~0	~0
軽	従来型	90.5	83.5	80
	EV	9.5	16.5	20
シナリオ3				
2015年での値（普通乗用車では従来型が91.5%、HV車が8.5%、軽乗用車では従来型が100%）が将来もそのまま維持される場合				

(2) 燃費

燃費の良否に関しては車両重量に負うところが大きい。しかし、(2010年迄の燃費測定方式の)10.15モードによる燃費変化の時間依存性は車両重量にはほとんど依存せず、1990年代からは時代とともにしだいに良好化し、2000年代後半にはいずれの重量車両についても急速な改善が見られる。³³⁾ここでは2015年までの過去の時点での「ガソリン乗用車全体」(平均重量1420kg)の値を普通乗用車の平均燃費として採用し、重量が828kg以上1016kg未満の車両に対応する値を軽乗用車の平均燃費として採用する。 $t \geq 2015$ 年では、従来のガソリン車燃費は2010~2015年の傾向を直線的に外挿した傾向で改善されるとし、2020年以降は一定値になるとする。2020年における普通乗用車および軽乗用車の従来型ガソリン車の燃費基準値はそれぞれ25 km/l、および30 km/lである。また、導入される時期にはよらずHV車の燃費は35~45(平均40) km/l、PHV車のそれは60~80(平均70) km/l、CD車は25 km/lで、一定であるとする。^{33,34)}次章のモデル計算では、HV車およびPHV車についての燃費は各試行ごとに燃費の不確定範囲内の値を均一に、かつランダムに選んで決定するものとする。これら全ての

燃費はいわゆるカタログ値であり、混雑した道路や悪路などでの、実際の走行条件下の実燃費ではない。実燃費の10.15モード燃費に対する比、すなわち10.15モード燃費到達度を μ とする。当因子 μ にはエコドライブや共用乗用車システムの導入、交通流改善の効果なども含まれているが(これらについては後述する)、ここでは μ を定数パラメータとして $\mu=0.7$ を採用する。前項2.3.(1)のシナリオの一つを選択する場合、式(3)における時刻 t' での燃料消費率 $\Xi(t')$ は以下の式で与えられる。

$$\Xi(t') = \left(\mu \sum_{k=1}^K p_k(t') e_k(t') \right)^{-1} \quad (12)$$

ただし $p_k(t')$ は時刻 t' における(普通、軽乗用車の全乗用車数に関する)車種 k の新規購入数割合、 $e_k(t')$ は k のカタログ燃費である。

(3) 日経平均株価およびガソリン価格

これらの変数はその時々々の社会、経済状況の影響を受けて一見、無秩序に大きく変動し、しかもこれらは我が国からのみではなく、世界的規模からの影響下で変動することになる。このためこれらの変数の将来値を予測することは実質的には不可能であるが、ここではこれら変数がマルコフ過程にしたがって連続する離散時刻間を変移すると仮定し、多数回の試行の平均値(アンサンブル平均値)としてこれら変数の将来値とこれらの値の信頼幅(標準偏差)を算出するものとする。以下では時刻 t での日経平均株価、またはガソリン価格を一般に $Z(t)$ で表し、 $Z(t)$ の過去の時間変動挙動が将来に亘っても継続するものとして将来推計を行う。

過去の任意の時点 t' 、現時点を T とし、 $[t', T]$ における $Z(t)$ の変動範囲を $[Z_{min}, Z_{max}]$ とする。この範囲 $[Z_{min}, Z_{max}]$ を m 区分(m 等分)し、これらの区分点を $Z_0(\equiv Z_{min}), Z_1, Z_2, \dots, Z_m(\equiv Z_{max})$ とする。また、区間 $[Z_{i-1}, Z_i] \equiv \Delta Z_i$ とする。過去の離散的な時刻 $t \in [t', T-1]$ における $Z(t)$ 値と $Z(t+1)$ 値との関係から、時間が1だけ経過する場合、 ΔZ_i の範囲にある $Z(t)$ が ΔZ_j の範囲にある $Z(t+1)$ へ移る確率、すなわち遷移確率 $S_{ij} \equiv \Pr\{Z(t+1) \in \Delta Z_j | Z(t) \in \Delta Z_i\}$ が算出できる。ただし $\Pr\{X_2 | X_1\}$ は X_1 から X_2 へ移行する確率である。こうした過去の遷移確率 S_{ij} が将来に亘っても維持されるとすれば、将来のある離散時点 $t (\geq T)$ で $Z(t)$ が ΔZ_i の範囲の値を持てば、次に続く時刻 $t+1$ では S_{ij} の確率で $Z(t+1)$ は ΔZ_j の範囲の値を持つことになる。この場合、その値は以下で与えられるものとする。

$$Z(t+1) = q \cdot \delta Z_j + Z_{j-1} \quad (13)$$

ただし q は $[0, 1]$ の区間での乱数であり、 $\delta Z_j = Z_j - Z_{j-1}$ である。こうした過程を時間的に繰り返すことで、将来の任

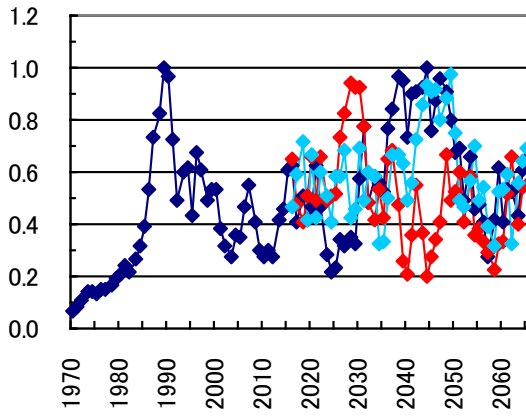


Fig.3 日経平均株価指数推算の3 試行例. 2015 年以前の値は実測値

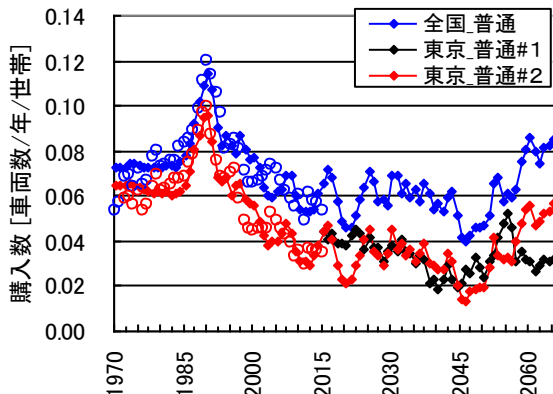


Fig.4 普通乗用車購入数の経年変化. 白丸は実測値

意の時刻までの $Z(t)$ を推算できることになる。以下では $m=10$ とし、日経平均株価は 1980~2015 年の範囲の、ガソリン価格は 1975~2015 年の範囲の値を用いて S_{ij} を決定する。それを用いて 2065 年までの規格化した日経平均株価予測値を 3 回、試行計算した結果を Fig.3 に例示する。これらの将来値は試行毎に大きく変動し、確かな推算は不可能であることを示唆している。

3. モデル計算結果と考察

当方法論は大別して二種の、方法論固有の不確定性を持つ。その第一は日経平均株価やガソリン価格の推算に関するものであり、第二の不確定性は、こうした説明変数を用いて乗用車購入数や走行距離の将来値を推算する場合の回帰係数の不確定性である。後者の不確定性については、回帰係数値が Table 1 および 2 に与えた標準偏差をもって正規分布すると仮定し、モデル計算では、この分布関数に従って回帰係数値をランダムに設定するものとする。第一の不確定性に対する試行回数を m_1 回、第二のそれに対して m_2 回の試行を行うとし、新型車普及の各シナリオについて $m_1 \times m_2$ 回の試行を行って最終的な平均をとるものとする。以下では $m_1=1000$, $m_2=100$ と

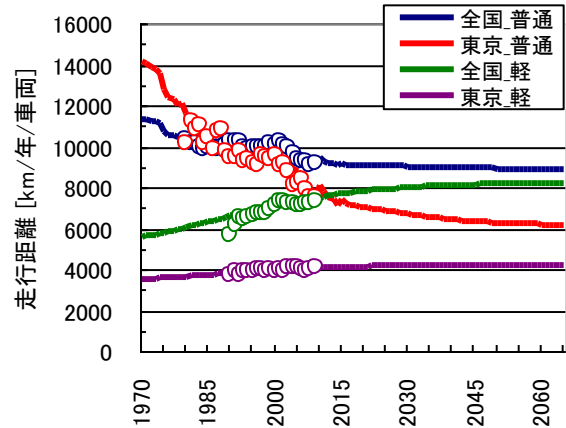


Fig.5 乗用車走行距離の経年変化. 白丸は実測値

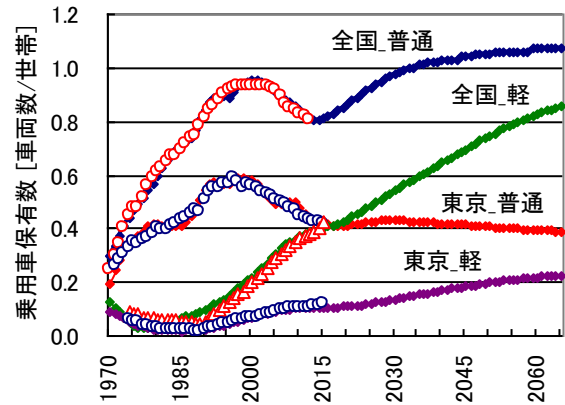


Fig.6 乗用車保有数の経年変化. 白丸は実測値

する。第 2.3.(2)項で述べた燃費については、各試行ごとに与えられた範囲内でランダムに決定する。

Fig.4 に普通乗用車購入数の、全国値については 1 試行、東京都値については更に 1 試行だけの経年変化挙動例を示す。モデル計算値は過去の経年挙動を再現できると言えるが、将来値は試行毎に異なり、多数回試行の平均値のみが意味を持つことを示唆している。以下の図での将来値は全て、 $m_1 \times m_2$ 回試行のアンサンブル平均値である。

Fig.5 に車両当たり年間走行距離の経年変化を示す。一般に走行距離の将来値は~2040 年以降、一定の値に漸近する傾向を持つ。

Fig.6 に世帯あたりの乗用車保有数の経年変化を示す。全国平均の普通乗用車保有数は過去の 2001 年近傍で極大値 (0.954)、2014 年で極小値 (0.803) をとり、その後、漸増傾向が続く。東京都では 2029 年に極めてゆるやかな第二の極大値 (0.430) が出現するが、その後、保有数は時間とともにゆるやかに減少する。一方、軽乗用車数は着実に増加するが、全国平均の増加率は東京都のそれを常に凌駕する。普通乗用車保有数の将来予測例³⁵⁾ は存在するが、2030 年迄は時間とともに漸減するとしており、当報文の傾向とは異なる。当報文での全国平均の普通乗用車保有数の今後の増大は、主として乗用車の長寿命化

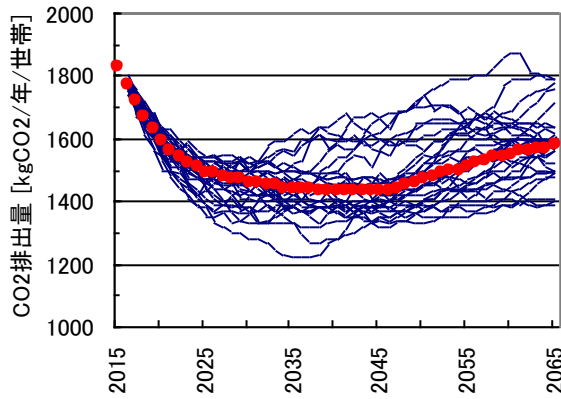


Fig. 7 乗用車起源 CO₂ 排出量経年変化の 30 試行例 (青線) およびアンサンブル平均 (赤丸)

によるものであり、この効果は参考文献³⁵⁾では考慮されていない。

Fig. 7 にケース 1 シナリオにおけるアンサンブル中から、ランダムに選んだ 30 試行の CO₂ 排出量、およびアンサンブル平均値の経年変化を示す。これは普通および軽乗用車の両者の和に対する全国平均値であり、その 2014、2015 年における値は各々 1.85×10^3 、および 1.83×10^3 kgCO₂/年/世帯である。また、(図示はしないが) 2015 年の東京値は 567 kgCO₂/年/世帯となる。国土交通省のデータ¹⁾では、2014 年における自家用乗用車起源の CO₂ 排出量は 1 億 303 万トンであり、これは全国の世帯数および乗用車保有数を考慮すれば 2.01×10^3 kgCO₂/年/世帯に相当する。したがって当報文値は国土交通省値の 92% 程度となる。当図によれば、将来の排出量は日経平均株価などの予測不確かさや回帰係数の不定性などのため、試行ごとに大きく変動する。しかしその変動幅は時間とともに大きく成長することはなく、t>2040 年ではアンサンブル平均の不確定幅はほぼ一定であり、試行値の任意時刻における分布は正規分布に近いものとなる。これを正規分布とみなせば、t=(2020, 2030, 2040, 2050, 2060) 年における全国平均値に対するシナリオ 1 の CO₂ 排出量の標準偏差 σ は $\sigma=(28, 63, 75, 73, 78)$ kgCO₂/年/世帯、また東京値については $\sigma=(29, 50, 49, 46, 46)$ kgCO₂/年/世帯の程度となる。以下ではアンサンブルの平均値と標準偏差とで計算値を記述する。

Fig. 8 に 2013 年の排出量で規格化した、3 シナリオによる全国の乗用車起源 CO₂ 総排出量の経年変化挙動を示す。シナリオ 1, 2, 3 の各々について、2030 年における総排出量の 2013 年比はそれぞれ 76.3 ± 3.30 , 63.8 ± 2.9 , および 85.7 ± 4.5 % である。CO₂ 排出量はシナリオに依存して 2025~2045 年に緩やかな極小値をとるが、それ以降で何らの規制のない場合にはしだいに増加することとなる。2030 年以降のシナリオ 1 と 2 との CO₂ 排出量の差は、乗用車の電気自動車化率の違いによるところが大きい。

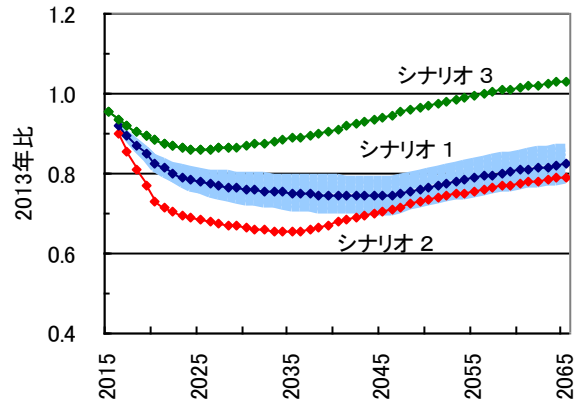


Fig. 8 2013 年比による全国平均の乗用車起源 CO₂ 総排出量の経年変化. シナリオ 1 のみ標準偏差幅を薄青色で着色. シナリオ 2, 3 についても同程度の標準偏差幅を持つ

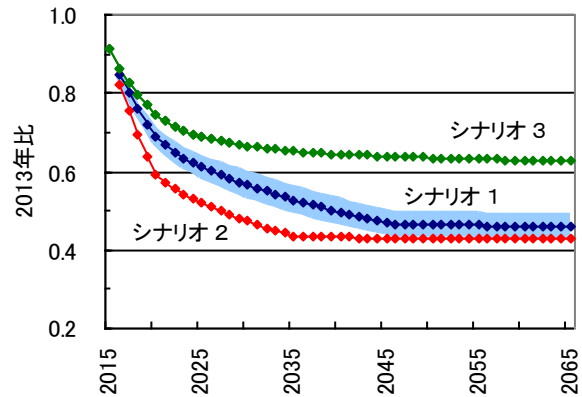


Fig. 9 Fig. 8 と同一、ただし東京都値の場合

排出量削減のためには、全乗用車の電気自動車化への継続した改良努力が今後とも重要となる。我が国の 2030 年度における排出低減目標値は中期的目標と言えるが、長期的には 2050 年を目処にさらに 2013 年度比で 80% の削減を目指している。²⁾ 今後、乗用車の電気自動車化はより一層、求められるところであり、エコカー減税や補助金の継続、自治体独自のエコカー補助金制度の確立がさらに重要となる。しかし中期的な 2030 年を目標とする限りでは、HV 車などの環境対応型車種の導入を (シナリオ 1 程度に) 積極的に推進する限り、削減目標の 74% は信頼誤差の範囲で概ね達成可能であることになる。

Fig. 9 に東京都値に対する乗用車起源 CO₂ 総排出量の 2013 年比の経年変化を示す。2030 年における総排出量の 2013 年比はシナリオ 1, 2 および 3 について各々、 58.8 ± 8.1 , 49.1 ± 5.7 , および 68.4 ± 9.7 % であり、2030 年以降においても排出量が増加する傾向はない。東京都に代表される大都市圏のみについて言えば、現状を維持する場合 (シナリオ 3) においてさえも 2030 年ではわが国の排出量削減計画には十分合致することになる。

以上の予測は一般の人々の直接の CO₂ 排出量削減行動を考慮に入れたものではない。以下では人々の直接行動による排出量削減策やその可能性、削減達成のための要

件などを検討する。この場合、式(1), (3), (12) 等からも明らかとなり (i) 乗用車購入の抑制, (ii) 購入の場合には環境対応型車種の採用, および (iii) 乗用車走行距離の削減, の3項目の検討が重要となる。Fig.6に見るとおり, 我が国では今後, 普通, 軽乗用車ともに, 保有量が減ることはない。項目 (i) については, 人々の意識やライフスタイルが公共交通機関の利用, 徒歩, 自転車の利用など, 車社会から距離を置き, それから離脱する方向へ変化することが重要となる。こうした変化は地域の公共交通機関や自転車などの利用環境が整備され, 地域の人口密度に依存して, それらと乗用車とが最適な状態で「役割分担」するシステムと文化が確立されることが重要となる。

一方, 項目 (ii) については既述のとおり, エコカー減税や補助金制度がすでに2009年以降, 実施されてきて, こうした制度が環境対応型車種の選択やCO₂排出量の少ない小型車, 軽乗用車への買換えの大きな誘引となっている。しかし, インフラ整備の不十分さや高価な車両価格のため, 電気自動車や燃料電池車の普及は十分ではない。この種の車種の普及のためには, さらに特別の減税や一層のインセンティブが必要となる。また, 太陽エネルギー利用発電による電気自動車の自給自足型充電所の成功例³⁵⁾ など, この方面では参考とすべき諸外国の先例も少なくない。

項目 (iii) については Fig.5 に見るとおり, 一車両当たりの年間走行距離は今後, 普通乗用車ではしだいに減少, 軽乗用車では漸増する傾向にある。走行距離の抑制は既述の公共交通機関の利用や徒歩, 自転車利用の推進などによってある程度, 達成されるが, さらにカーシェアリングや相乗り制度³⁷⁾ の採用など, 一車両当たりの乗車人数を増やすことによっても可能となろう。しかし, こうした制度の適用は走行する乗用車数を最大, ファクター10だけ減らす一方, 走行距離を10%以上増大させるとする報告³⁸⁾ もあり, 今後, 我が国での効果の詳細を明らかにする必要がある。その他, 企業における自転車通勤, 相乗り通勤の勧めなどのモビリティマネジメントなども, 利用量削減「文化」構築のためには重要な事柄となる。さらに運転時でのエコドライブは消費燃料を減じ, 間接的には走行距離抑制につながる。参考文献³⁹⁾ によれば, 種々のエコドライブ法の適用で燃費は約14%改善されるとしている。また一般に, 交通問題に係っては情報提供やパブリックリレーションズが有効な訴求効果を得ることが多い。^{40~42)} こうした観点から, 排出量削減のためには種々の媒体や方法を利用する広報活動の有効性や, それによる人々の態度の変容効果にも着目する必要がある。例えば各種の広報によって上記のエコドライブ法を普及させれば, 10%のオーダーの排出量削減が可

能となることになる。

4. おわりに

当報文では乗用車起源 CO₂ 排出量の将来予測を行い, その2013年比の経年変化挙動を3ケースの新型車種普及シナリオにしたがって推算した。過去の統計量を重回帰分析し, その関係を将来方向へも適用することで乗用車購入数や保有量, 走行距離などの将来値を算出した。将来, 人々が適切に環境対応型車種の選定を行い, 真摯な「エコドライブ文化」を構築する場合には, 乗用車からの排出量の中期的削減目標の達成は困難ではないことがわかった。すなわち, わが国の乗用車起源 CO₂ 排出量に限定する限り, 既述のシナリオ1 (および2) に従う場合には, 2030年における CO₂ 削減目標の74% は不確定性の範囲内で達成可能であるように見える。こうした可能性は居住地が都市型であるほど大きく, 東京都では現在の状況と変わらない車種選定を続ける場合であっても, 十分に排出量の削減が可能となることになる。ところで, 家庭での電力消費に関する都市と地方との傾向差はこうした乗用車に関するそれとは逆のものであり, 今後, 都市部では電力使用量削減推進の困難さが指摘されている。⁴³⁾ こうした観点からは, 電力, 乗用車等の細分化された小部門毎の削減目標ではなく, 世帯毎に排出する CO₂ 総量の, 世帯単位での削減目標の設定が, 民生部門にあってはより望ましいとも思われる。

当方法論による計算は今後, 東京都などの大都市と地方とのあいだでは乗用車利用傾向の違いがしだいに顕著となることを示唆している。大都市での将来の乗用車利用は現在の半分程度に減少するに対し, 地方での乗用車依存度は依然として高く, 環境対応型の新型車種の導入によって2030年近傍では排出量は一時, 極小となるが, ~2040年以降, 再び上昇に転ずることになる。長期的な削減のためには徐々に目標を厳しくし, 不断の努力を払う必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省『運輸部門における二酸化炭素排出量』
www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_TK_000007.html [(2016, June 8)].
- 2) 環境省 (2016年5月13日閣議決定)『地球温暖化対策計画』。
- 3) たとえば千葉県の場合「千葉県地球温暖化対策実行計画素案」pref.chiba.lg.jp/shigen/iken/2016/documents/soan.pdf [2016, August].

- 4) 岡田啓(2008) 「日本における自家用車起因の CO₂ 排出の要因分析: 茅の式を応用した一考察」『運輸と経済』68(11), 50-58.
- 5) 三科善則, 室町泰徳 (2011) 「自家用乗用車および貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の変動要因分析」『土木学会論文集 D3 土木計画学』67(5), I_89-I_100.
- 6) 国土交通省『自動車輸送統計調査年報』各年度版.
- 7) 運輸省『陸運統計年報』各年度版.
- 8) 一般社団法人日本自動車販売協会連合会『自動車登録統計情報 (新車編)』各年月版.
- 9) 同上『新車登録台数年報』各年度版.
- 10) 同上「自動車統計データブック」各年度版
- 11) 一般財団法人自動車検査登録情報協会『車種別平均車齢推移表』『車種別平均使用年数推移表』www.airia.or.jp/publish/statistics/trend.html [2016, Aug].
- 12) 軽自動車検査協会『軽自動車の平均車齢・平均使用年数バックナンバー』www.keikenkyo.or.jp/information /information_000150.html [2016, April].
- 13) 山本俊行(2000)『連続時間軸上における世帯の自動車保有更新行動及び世帯内での配分・利用行動に関する研究』京都大学大学院博士論文.
- 14) 佐野雅之(2008)『自動車の残存率の簡便推計』ITEC Working Paper Series 08-06.
- 15) 社団法人日本自動車工業会『乗用車市場動向調査』2013年版など.
- 16) 国土交通省鉄道局『鉄道統計年報』各年度版.
- 17) 国土交通省『鉄道便覧』各年度版.
- 18) 同上『鉄道輸送統計年報』各年度版.
- 19) 東京都『東京都統計年鑑』各年度版.
- 20) 総務省統計局『小売物価統計調査 (動向編)』各年度版.
- 21) 東京都総務局統計部社会統計課『東京都生計分析調査年報』各年度版.
- 22) 一般社団法人東京自動車販売協会『統計データ』tokyojihana.jp/tj/data.html [2016, August].
- 23) 日本労働組合総連合会「値上げ率と賃金水準上昇率推移表」『連合賃金レポート 2014』.
- 24) 一般社団法人日本自動車販売協会連合会『自動車登録統計情報』各年度版.
- 25) 内閣府大臣官房政府広報室『国民生活に関する世論調査』平成 27 年 6 月調査.
- 26) 総務省(2013)『平成 24 年就業構造基本調査』.
- 27) 警察庁交通局運転免許課『運転免許統計』平成 26 年版.
- 28) 日経平均プロフィール『ヒストリカルデータ』indexes.nikkei.co.jp [2016, August].
- 29) 総務省統計局『高齢者人口及び割合の推移』www.stat.go.jp/data/topics/topi721.htm [2016, August].
- 30) 一般社団法人日本自動車販売協会連合会 (2014)『2013 年乗用車市場動向調査』.
- 31) 一般社団法人日本自動車販売協会連合会 (2016)『軽自動車の使用実態調査報告書』.
- 32) 経済産業省次世代自動車戦略研究会(2010)『次世代自動車戦略 2010』.
- 33) 国土交通省『自動車燃費一覧 (平成 27 年 3 月)』www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000024.html.
- 34) 経済産業省製造産業局自動車課(2014)『自動車産業戦略 2014』.
- 35) 野村総合研究所 (2015) 「乗用車 (除軽) 保有は世帯減少を上回り, 15 年後には 9% 減少」『News Release』2015 年 6 月 5 日付.
- 36) Mwasilu, F., Justo, J. J., Kim, K., Do, T. D. and Jung, J. W. (2014). Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 34, 501-516,
- 37) 平石浩之, 中村文彦, 大蔵泉 (2002) 「通勤利用における自動車共同利用の需要推定に関する考察」『土木計画学研究論文集』19(3), 473-479.
- 38) Fagnant, D. J. and Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios, *Transp. Res. C Emerg. Technol.*, 40, 1-13.
- 39) エコドライブ普及協議会『エコドライブ 10 のすすめ』www.ecodrive.jp/eco_10.html (2016, July).
- 40) 藤井聡, 谷口綾子編 (2008)『モビリティ・マネジメント入門』学芸出版社.
- 41) 山岡淳 (2014) 「救急車利用方法に関する広報活動の効果測定のための課題」『医療経済研究機構レター』No.230, 40-44.
- 42) 藤井聡 (2009) 「エコカー, モーダルシフト, そしてエコドライブ—クルマをめぐる省エネ・エコ行動」『環境情報科学』36(4), 19-24.
- 43) 大西輝明, 島野圭司, 岡田修身 (2016) 「民生部門における将来の家庭用電力需要と省エネルギーの限界」『社会技術研究論文』13, 43-52.

FUTURE PROSPECT OF THE AMOUNT OF CO₂ EMISSION ORIGINATED FROM PASSENGER CARS

A methodology was proposed to estimate the amount of CO₂ emission originated from private passenger cars. The average amount of the emission in Japan together with the amount in Tokyo was calculated for the ordinary and small cars and light cars according to this methodology. Factors affecting the purchase number of cars and the traveling distance by cars both per household are determined by the multiple recurrent analyses. From the secular behaviors and their reliable ranges of the CO₂ emission calculated for the future region, it was found that the so-called eco-type cars must be positively introduced to realize the reduction of the emission in 2030 to 75% the value in 2013 throughout our country though such requirement is not so severe in great urban areas as in Tokyo.

Key Words: *private passenger car, CO₂ emission, future prospect, secular variation, multiple recurrent analysis*