

都市別自動車CO₂排出量の長期的動向の精査 - 全国都市交通特性調査の28年に及ぶ 追跡から -

越川 知紘¹・谷口 守²

¹非会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:s1620465@sk.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学大学院 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:mamoru@sk.tsukuba.ac.jp

炭素税や立地適正化計画制度の導入等、環境関連政策を巡る重要な局面で都市構造と自動車CO₂排出量の関係が注目されてきた。特にNewman-Kenworthyタイプの散布図はその最も基礎をなす情報である。わが国では同図を作成する上で、全国都市交通特性調査(旧名称は全国パーソントリップ調査)が活用されてきた。しかし算定過程での年次別の燃費の扱いや調査項目の違いは、検討期間が長期に及ぶと結果に少なからぬ影響を及ぼす。本研究では2015年に6回目の調査がなされ、関連する指標値も過去に遡って改められていることも踏まえ、都市別自動車CO₂排出量を28年に渡って精査する。その結果、28年前の都市別一人当たり自動車CO₂排出量は先行研究よりも実際は低い数値であった。また近年になるに従って一人当たり自動車CO₂排出量の都市間格差が拡大していることが改めて確認された。

Key Words : *Automobile CO₂ emissions, Low carbonization, Compact city, Secular change*

1. はじめに

都市構造とそこでの居住者の自動車利用量、ひいては自動車CO₂排出量の関係が着目されるようになって久しい。後述するように、その関係性を活用し、低炭素化を進める上で都市構造を効果的にコンパクト化・高密度化したり、炭素税を導入する上での検討が加えられており、この両者の関係を正確に知っておくことは環境システム研究を進め、的確な政策展開を行う上で極めて重要な課題となっている。

この両者の関係性は1989年に初めてNewmanらによって定量的に示され¹⁾、その成果は横軸にその都市の人口密度、縦軸に居住者一人当たりの燃料消費量を示したいわゆるNewman-Kenworthyタイプの散布図(以下「N.K.散布図」と呼ぶ)として広く活用されてきた。ただ、継続的に同一都市で同様のデータを得ることは極めて困難であるため、その内容は1999年に一度改訂されて以降情報アップデートされていない²⁾。一方、わが国では同様の試みとして、都市の交通実態を調査するために実施されてきた全国都市交通特性調査(旧名称は全国パーソントリップ調査)を活用することで、1987年から2010年

に至る5回の調査時点での散布図が公表、アップデートされてきた^{3,5)}。後述するように、その成果は一人当たり自動車CO₂排出量(以下、「自動車CO₂排出量」と略記)への変換も進み、政策決定の様々な場面で直接活用される重要な役割を果たしてきた。

これらわが国での全国都市交通特性調査を活用した自動車CO₂排出量は、算出条件を都市間で完全に統一し、個々の自動車トリップの走行速度をCO₂排出量算出に反映するなど、Newmanらの算出方法よりもミクロでかつ精密な特性を有している。また、2015年には第6回目の同調査が実施されたことにより、最新の散布図を提示することが期待されている。しかし追跡範囲が28年と長期に及ぶことになり、短期間の比較では大きな問題とならなかった算出方法、諸パラメータ、調査範囲の変化等の影響を、改訂された過去の情報も含めてアップデートし、総合的・抜本的に見直すことが求められる。具体的には下記の事項を見直して、過去に遡って正確な散布図を提示し直す必要がある。

- 1) 自動車の実燃費の経年的な変化
- 2) 速度別自動車CO₂排出係数値の精度向上に伴う影響

- 3) 過去の調査におけるトリップ距離、および運転率補完方法の見直し
- 4) 調査範囲拡大(合併市町村、および市街化区域外地域)の影響排除

以上の4点の改善がもたらす影響を明らかにし、初回調査時の1987年まで遡って、それ以降累計6時点の都市構造と自動車CO₂排出量の関係を精査することを本研究の目的とする。

2. 本研究の位置付け

(1) 研究成果の政策への活用状況

わが国におけるN.K型の散布図として、全国都市交通特性調査を活用した都市構造と自動車CO₂排出量の一連の都市別散布図³⁵⁾が挙げられる。それらは2000年以降議論の俎上に乗せられるようになり、2005年頃を境に環境政策の転換をはかる上で実際に大きな役割を果たしてきた。

具体的には、環境省関連では、2006年にまちづくりの中で低炭素化をはかる意義を示すために用いられたのが最初であった⁹⁾。直近では2017年の中央環境審議会において、炭素税導入に関する審議に供せられ、長期低炭素ビジョンを構築する上での参考資料となっている⁷⁾。また、国土交通省関連では2007年の社会資本整備審議会第2次答申のための資料として活用され⁸⁾、以降のコンパクトな都市づくりの意義を裏付けるための強力な基礎資料となった。最終的には都市コンパクト化実現のための2014年に都市再生特別措置法の改正に至るが、その国会での最終審議(国土交通委員会)の場面でもこの図が根拠資料とされている⁹⁾。現在では空き家問題などより幅広い都市構造問題の解決に向けて、社会資本整備審議会の中に設けられた都市計画基本問題の検討委員会の中でもこの図が直接活用されている¹⁰⁾。

なお、活用される際は上記の長期低炭素ビジョンのように過去からの推移として参照される場合が多く⁷⁾、その意味でも過去の図も含めて精査し直す必要がある。

(2) 関連研究の整理と本研究の位置づけ

1989年にN.K.散布図が世界の各都市を事例にして初めて公表¹¹⁾されてから、海外では現在までに北欧¹²⁾やオランダ¹³⁾などでも同様の試みがなされている。わが国で初めてN.K.散布図を作成したのは鳴井ら¹⁴⁾で、全国都市交通特性調査(当時の名称は全国都市パーソントリップ調査)を用いて1998年に都市ごとのマクロレベルでの結果を公表している。翌1999年以降は同調査の個人データ(ミクロレベル)を活用し、1987年の第1回の調査以降の結果が経年的に図化され、年次ごとに居住者一人当たり

自動車CO₂排出量が、都市部に比べて地方部で増加傾向にあることが示された³⁵⁾。その成果は海外でも公表されるとともに¹⁴⁾、本課題に関する研究者間の交流も活発になされるようになっていった¹⁵⁾。

このように多くの研究蓄積が本分野では既になされているが、同一基準によるデータを複数都市で経年的に確保することは至難の業であるため、一貫性のある経年的な検討が実は十分ではないこと、あわせてコンパクトな都市構造が自動車依存を減じることが完全に証明されているとはまだ言い難いことが指摘されている¹⁶⁾。

一方、全国都市交通特性調査を用いた検討での分析対象期間が長くなるにつれ、エネルギー消費量に関わる実燃費の変化による影響を考慮する必要が出てきた。自動車CO₂排出量の算出過程に燃費を組み込む検討は個別の研究では成果が見られる¹⁷⁾¹⁸⁾が、散布図の作成においては実燃費の反映がまだできていない状況にある。関連するパラメータも、後述するように新たな測定結果が公表されている。また長期間の蓄積を有する全国都市交通特性調査も時代に応じて調査方法が部分的に変更されているため、その影響も無視出来なくなっている。この長期間の間には市町村合併や直近のWEB調査の導入なども含め、調査のサンプリング対象自体に変化があることにも注意が必要である。

そこで本研究では、長期的なデータ蓄積を有する全国都市交通特性調査を用いて、先行研究³⁵⁾が示す自動車CO₂排出量を、上記の改善や留意が必要な諸点をすべて考慮し、第1回の調査時点(1987年)まで遡って抜本的な精査を行う。あわせて2015年に実施された第6回の調査データを加え、28年間に渡る自動車CO₂排出量と市街化区域人口密度の関係を同一の対象地区、調査条件のもとで一貫したN.K.散布図の提示を行い、関連する考察を加える。

(3) 本研究の内容

上記の目的を達成するため、本研究ではまず実燃費の経年的な変動の実態を把握する。次に算出パラメータを推定するために、求めた実燃費を基にして各調査年次ごとに自動車旅行速度ごとの燃料消費率を算出し、最小二乗法より旅行速度と燃料消費率の関係式のパラメータを独自に推定する。更に、調査年次ごとの分析条件を統一するために、過去の全国都市交通特性調査で一部未調査であるトリップ距離、および運転率(回答者が自分で運転している自動車トリップの割合)を補完する。加えて、市町村合併や市街化区域外の調査地区追加に伴う調査地区の拡大による自動車CO₂排出量の算出結果への影響を把握する。以上の検討を踏まえ、2015年に実施された第6回目にあたる全国都市交通特性調査を加えた6時点、延べ28年間の居住者一人当たり自動車CO₂排出量と市

街化区域人口密度の関係を新たな散布図として提示し、過去に提示された結果との差異について考察する。

(4) 本研究の特長

本研究の特長を以下に示す。

- 1) 28年にも及ぶ全国都市交通特性調査の蓄積を追跡することで、累計6時点に渡る自動車CO₂排出量と都市構造の関連の推移を示しており、その統一された継続的成果という面で世界でも全く類の無い独自性、新規性を有している。
- 2) コンパクトシティ制度の考案から炭素税導入の審議に至るまで、多様な政策討議の基礎となってきた情報の抜本改訂および最新結果であり、ここで提示される散布図が持つ有用性は極めて高い。また速やかに新たな結果を提示すべきであり、緊急性も同時に求められている。
- 3) 個々のトリップ情報を算出に反映する計算方法に加え、今回新たに諸パラメータの改善を過去に遡って加えることで、極めて信頼性の高い結果を提示している。
- 4) パリ協定において我が国は2030年度に2013年度比-26.0%のCO₂削減を目標として掲げ、特に運輸部門では-28.0%削減を目指していることから、引き続き自動車CO₂排出量の追跡が求められることは明白である。加えて、その過程において燃費等の自動車性能の向上や自動運転等の新たな自動車技術の登場といった要素を推計手法へ組み込む検討への発展可能性も極めて高い。

3. 使用データの概要

(1) 全国市交通特性調査の概要

自動車利用状況によってエネルギー消費量が大きく変

動することを考慮するために、居住者ごとのトリップを分析単位とすることが可能である全国都市交通特性調査を用いる。表-1に示す様に、全国都市交通特性調査は1987年から2015年までに計6回実施されている。しかし設問項目の追加や調査対象の拡大など、その間に調査内容が変化している。分析結果の連続性を保つには、調査内容の変化による影響を考慮する必要がある。そこで後述する様に、必要に応じて変数の補完を検討する。

(2) 分析対象都市

自動車CO₂排出量を経年的に分析するために、過去6回の都市交通特性調査が全て実施されている41都市を抽出する。更に、市街化区域における分析として内容を統一するため、非線引き都市である3都市(湯沢・山梨・人吉)を除外し、残った38都市を分析対象都市とする。先行研究の都市分類³⁾に従い整理した調査対象都市の一覧を表-2に示す。

(3) 自動車CO₂排出量の算出手順

(a) 自動車トリップの抽出

本研究では、先行研究³⁾の手順に則って自動車CO₂排出量を算出する。本節ではまず全国都市交通特性調査から自動車トリップを抽出する方法を解説し、次節で各トリップから居住者一人当たり自動車CO₂排出量を算出する方法を整理する。

自動車CO₂排出量を算出するために、まず全国都市交通特性調査から自動車トリップを抽出したうえで、各トリップの旅行速度を求める。しかし本調査では各トリップの交通手段構成は把握されているが、その中から自動車利用に伴うトリップ距離のみを抽出することが出来ない。そのため、まず自動車単独トリップ及び徒歩・自動車混合トリップを抽出したうえで、混合トリップについては式(1)(2)の制約式³⁾を追加することで旅行速度を別途推計している。なお、徒歩速度は4km/h、自動車速度

表-1 全国パーソントリップ調査の概要

年次 内容	第1回 (1987年)	第2回 (1992年)	第3回(1999年)		第4回(2005年) ：全国都市交通特性調査		第5回(2010年) ：全国都市交通特性調査		第6回(2015年) ：全国都市交通特性調査	
調査形態	全国PT	全国PT	全国PT	新都市0D※1	都市調査	町村調査	都市調査	町村調査	都市調査	町村調査
調査対象都市	全国131都市	全国78都市	全国70都市	全国28都市	全国62都市	全国60町村	全国70都市	全国60町村	全国70都市	全国60町村
調査対象者	市街化区域を対象に1都市あたり300世帯の5歳以上の構成員全員	市街化区域を対象に1都市あたり300世帯の5歳以上の構成員全員	1都市あたり500世帯の5歳以上の構成員全員	調査対象世帯の5歳以上の構成員全員	1都市あたり500世帯の5歳以上の構成員全員	1町村あたり50世帯の5歳以上の構成員全員	1都市あたり500世帯の5歳以上の構成員全員	1町村あたり50世帯の5歳以上の構成員全員	1都市あたり500世帯の5歳以上の構成員全員	1町村あたり50世帯の5歳以上の構成員全員
調査方法	訪問配布留置き訪問回収法	訪問配布留置き訪問回収法	訪問配布留置き訪問回収法	訪問配布留置き訪問回収法	訪問配布留置き訪問回収法	郵送配布・郵送回収	郵送配布・郵送回収	郵送配布・郵送回収	郵送配布・郵送またはWEB回収	郵送配布・郵送またはWEB回収
調査票	世帯票 個人票	世帯票 個人票	世帯票 自動車票 個人票 アンケート票	世帯票 自動車票 個人票 アンケート票	世帯票 個人票 意識票※2	個人票	世帯票 個人票 意識票※2	個人票	世帯票 個人票 意識票※2	個人票
回収結果	41,365世帯 122,958人	25,009世帯 67,067人	38,658世帯 休日98,619人 平日99,207人	73,371世帯 196,431人	31,969世帯 80,564人	3,096世帯 7,779人	46,541世帯 80,564人	4,683世帯 80,564人	38,459世帯 79,356人	4,683世帯 80,564人

※1：新都市0Dとは、従来の自動車0Dを全国PTと同時にしようとしたもの。基本的には通常と同様の選定で、サンプル抽出率は全国PTの10倍以上を抽出している。調査票としては全国PTと同形式のものを使っているため、全国PTと一貫した分析が可能である。

表-2 調査対象都市の一覧

大都市圏都市	札幌	仙台	千葉	東京区部	横浜
	川崎	名古屋	京都	大阪	神戸
	広島	福岡	北九州		
大都市周辺都市	塩竈	所沢	松戸	春日井	宇治
	堺	奈良	呉		
地方圏都市	弘前	湯沢	盛岡	郡山	宇都宮
	上越	金沢	山梨	静岡	岐阜
	松江	安来	海南	徳島	今治
	高知	南国	熊本	人吉	鹿児島

※1 全国パーソントリップ調査が過去6回実施されている都市を抽出

※2 非線形都市の湯沢・山梨・人吉は分析対象外

は各都市の自動車単独トリップから求めた平均旅行速度であるという仮定を置いている。

なお、自動車利用を含む総トリップに対して自動車単独トリップが占める割合は1987年(第1回)から2015年(第6回)まで順に 91.8%, 92.4%, 93.3%, 94.4%, 94.2%, 94.0%となっている。徒歩・自動車混合トリップ割合は全年次を通じて少ないため、式(1)および式(2)の制約条件を適用することで算出結果が大幅に変動することはないといえる。

$$\begin{cases} s_w + s_c = S \\ s_w/v_w + s_c/v_c = T \end{cases} \quad (1)$$

ただし

$$\begin{cases} S/T < 4.0[\text{km/h}] \Rightarrow s_w = S, s_c = 0 \\ 4.0[\text{km/h}] \leq S/T \leq v_{cc} \Rightarrow s_w = 0, s_c = S, v_c = v_{cc} \\ v_{cc} < S/T \Rightarrow s_w = 0, s_c = S, v_c = S/T \end{cases} \quad (2)$$

s_w : 徒歩移動距離, s_c : 自動車移動距離, v_w : 徒歩速度

v_c : 自動車速度, v_{cc} : 各都市平均旅行速度

S : トリップ距離, T : トリップ時間

(b) 自動車 CO₂ 排出量の推計

エネルギー利用に伴う CO₂ 排出量は、一般的に燃料消費量に対して CO₂ 排出係数を乗じることで算出される。そのため自動車利用時の CO₂ 排出量は燃費と走行距離の情報を用意することで算出可能であるが、この際自動車の速度次第で燃費効率が変化することに注意が必要である。具体的には先行研究¹⁹⁾の自動車走行実験結果からも確認できる様に、自動車速度と燃料消費量は反比例の関係にある。ただし線形対称ではないものの、一定の速度よりも高速状態になると再び燃料消費量が増加する。これらの関係性は数学的には前者が双曲線、後者が二次曲線で表現することが出来る。そこで双曲線および二次曲線を組み合わせた式(3)¹⁹⁾を用いて、前節で算出した各トリップの旅行速度を代入することで、まず単位距離当たりの自動車燃料消費量を求める。

そして式(4)を用いて、燃料消費の際に発生する熱量を基に、式(3)で得られた結果を単位距離当たりの自動車 CO₂ 排出量へ換算する。さらにトリップ距離を乗じる

ことでトリップ当たりの自動車 CO₂ 排出量を求めて各都市で集計したうえで、トリップの重複を除くために各都市における自動車トリップのうち回答者本人が運転するトリップが占める割合(以下「運転率」と呼ぶ)を乗じる。最後に各都市の規模による影響を除外するために、集計結果を都市別の居住人口(拡大係数の総和)で除することで居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量を算出する。以降で登場する「居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量」という表記は、この分析過程を経て算出した居住者一人当たりに換算した自動車 CO₂ 排出量の値を指す。

$$FC = a_1/v_c + a_2v_c + a_3v_c^2 + a_0 \quad (3)$$

FC : 単位距離当たり自動車燃料消費量(cc/km)

v_c : 自動車速度, a_0, a_1, a_2, a_3 : パラメータ

$$EF = EF_0 \times HV \times FC \quad (4)$$

EF : 単位距離当たり自動車 CO₂ 排出量(g - CO₂/km)

EF_0 : 発熱量当たり CO₂ 排出量(g - CO₂/J)

HV : 平均発熱量(J/cc)

FC : 単位距離当たり自動車燃料消費量(cc/km)

4. 燃料消費率算出パラメータの推定

(1) 自動車実燃費の推移

運輸部門における CO₂ 排出量の削減には、自動車利用の抑制だけではなく自動車燃費の変動も考慮しなくてはならない。そのために、まず本節では自動車実燃費の変動を把握する。実際の総自動車走行距離と総燃料消費量を基に、全国都市交通特性調査の実施期間内における自動車実燃費の推移を算出したところ、図-1の様に明確に変化していることがわかった。その差の最大値は1.88km/lにも及んでおり、自動車 CO₂ 排出量を経年的に比較するうえでは無視することの出来ない燃費変動である。そのため、自動車 CO₂ 排出量の推計においては燃費の変動を考慮したパラメータを各年次で用意する必要がある。

(2) 実燃費の変化を考慮したパラメータの推定

自動車 CO₂ 排出量の算出において、式(3)を通じて燃費の変動が反映される。従来の研究では燃費の変動を考慮せずに、統一したパラメータを全時点で用いていた。これは先行研究が引用しているパラメータが単年度分しか公表されていなかったためである。一方でパラメータの算定根拠となる旅行速度別の燃料消費率原単位¹⁹⁾は既に公開されている。燃料消費率原単位とは、自動車走行実験より求められた自動車旅行速度別(20km/h～110km/h の範囲で 10km/h 毎の燃料消費率原単位が提供されている)

の距離当たり燃料消費量を示している。そのため、同様に距離と燃料消費量の関係を示している燃費の変動を燃料消費率原単位¹⁹⁾に組み合わせることによって、各年次毎の燃料消費率原単位を求めることが出来る。

そこで本研究では、前節で算出した自動車実燃費を基に、都市交通特性調査の調査年次毎に式(3)のパラメータを推定する。具体的には、まず、2010年を基準とした各調査年次の実燃費の変動率を求める。次に自家用車の燃料消費率原単位を先ほど算出した実燃費変動率で除することで各年次における自家用車の燃料消費率原単位を求める。そして、最小二乗法より式(3)の燃料消費率算出パラメータを推定する。以上の結果として得られたパラメータの一覧を表-3に示す。各年次で推定されたパラメータは統計的に有意な結果となった。ただしパラメータ推計に用いた旅行速度別の燃料消費率原単位のサンプル数が10と少ないことが大きく影響していることに留意が必要である。

なお、この燃料消費率原単位は16台の自動車での走行実験結果を平均することで求めた値であり、個別の自動車の実験結果では総じて速度が上がるにつれ急激に燃料消費量が減少し、一定の高速状態になると燃料消費量が増加するという特徴を確認することが出来る¹⁹⁾。そのため、表-3に示したパラメータには前述した自動車速度と燃料消費量の安定した関係が反映されており、本分析で自動車CO₂排出量を推定するには支障はないといえる。以降、このパラメータを各調査年次ごとに割り当てることによって、実燃費変動を考慮した自動車CO₂排出量を算出する。

5. 欠損データの補完による変数の統一

(1) 欠損データの内容と過去の対応

全国都市交通特性調査では、調査年次毎に部分的に設問内容が変更されているところがある。本分析に直接関わる箇所としては、1987年(第1回)では運転率が、1999年(第3回)では一部都市でトリップ距離が調査されていない。ちなみに、運転主体を尋ねる設問は1992年(第2回)の調査以降に設けられている。また、1999年(第3回)では本調査は国の予算ではなく、対象都市の予算で実施されたため、一部都市が独自に調査項目を削除したことによる。

そのため先行研究³⁹⁾は、1992年(第2回)の運転率を他の調査時点においても不変であるという仮定を用いて補完している。また、1999年(第3回)において一部の都市でトリップ距離が調査されていない点については、1992年(第2回)の結果から算出した都市別平均旅行速度から変化が無いという仮定を置いて分析を行っている。これ

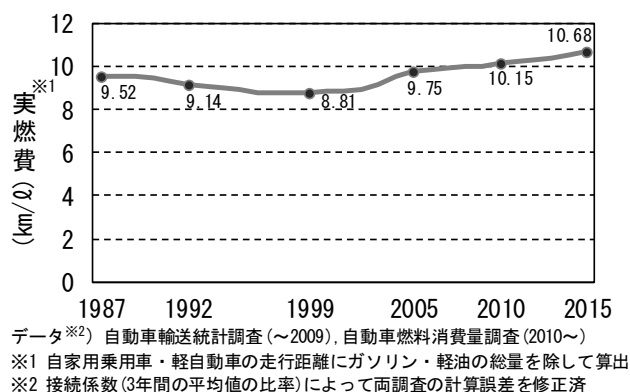


図-1 自動車実燃費の推移

表-3 年次別の自動車燃料消費率算出パラメータ

年次	a_1	a_2	a_3	a_0
1987	7.226E-01***	-5.292E-04**	5.424E-06***	4.421E-02***
1992	7.571E-01***	-5.440E-04**	5.638E-06***	4.559E-02***
1999	7.832E-01***	-5.204E-04**	5.533E-06***	4.587E-02***
2005	6.727E-01***	-5.681E-04**	5.620E-06***	4.546E-02***
2010	6.840E-01***	-4.749E-04**	4.935E-06***	4.123E-02***
2015	6.080E-01***	-5.375E-04**	5.237E-06***	4.221E-02***

※最小二乗法より燃料消費率算出パラメータを推定 ***: p<0.0001 **: p<0.01
 ※各年次の推定には自家用車の旅行速度別燃料消費率原単位 (n=10)¹⁹⁾を使用

らは自動車CO₂排出量の算出に影響を及ぼす不可欠な変数であるため、本章ではこれら欠損している変数を補完する方法を検討する。

(2) 運転率の補完

自動車の普及によってマイカー利用者が増加しているという社会背景を踏まえると、自動車トリップのうち回答者が自分で運転しているトリップ割合を示す運転率は年々上昇傾向にあることが推察できる。実際に1992年(第2回)以降の都市規模別に集計した運転率は2005年頃までは年々高くなる傾向にあることが図-2から読み取れる。特に自動車依存度の高い地方圏都市では2005年(第4回)頃を境に自動車普及がピークを迎え、以降運転率が横ばいとなっている。

本研究ではこの運転率の変動傾向を踏まえて1987年(第1回)の運転率を補完する。具体的には、運転率が単調増加傾向を示している1992年(第2回)～2005年(第4回)の3時点における各都市の運転率に着目し、運転率の経年変化を最小二乗法より線形回帰する。そして、それぞれの都市で算出された線形式より、1987年(第1回)の運転率を補完する。

(3) トリップ距離の補完

1992年(第2回)と2005年(第4回)の都市別平均旅行速度を比較すると、図-3に示す様に旅行速度が明確に改善していることが読み取れる。都市内の道路交通実態の把握

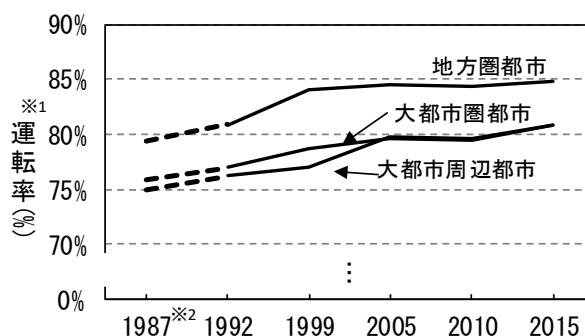
を目的とした道路交通センサスによれば、1997年の調査を境に一般道路での混雑度(交通量と道路容量の比)は年々緩和傾向にある²⁾。そのため、道路交通の渋滞緩和が進んだことによって図-3の様に旅行速度が改善されたのだと推察される。そこで、旅行速度の改善を踏まえ、1992年(第2回)と2005年(第4回)の都市別平均旅行速度を内分した値を1999年(第3回)のトリップに割り当てる。そこにトリップ時間を乗じることで各トリップ距離を補完する。

6. 調査対象の変化による影響の除去

以上の検討によって居住者一人当たり自動車CO₂排出量を算出する手順は整った。しかし、経年的に同一対象に対する比較を行うという視点から、調査範囲が経年的に広がっているという問題がある。具体的には表-1に示す様に、調査対象者として1999年(第3回)以降に市街化区域外の居住者が追加されている。また、平成の大合併によって一部都市では行政区域が拡大しており、空間的に同一対象地域に対する比較が厳密にできていたとはいえない。なお、調査方法として2015年(第6回)に従来の質問紙回収に加えてWEB回収方式が追加されており、そのような調査方法の変化がもたらした影響も検討に値する。

これらの影響を把握するため、後から追加された調査対象が自動車CO₂排出量にどれだけ影響を与えているかを把握する。そのために、まず調査対象の拡大を考慮して表-4に示す4つの分析条件を設定する。具体的には、全6回で共通している回答者を①共通条件と設定し、更に市街化区域外、合併市町村、WEB回答を条件に加えた回答者をそれぞれ②都市全域、③合併後市町村、④WEB追加と設定し、それぞれの居住者一人当たり自動車CO₂排出量を算出する。この際、全時点で共通する条件との自動車CO₂排出量の違いを比較すべく、②都市全域、③合併後市町村、④WEB追加の結果から①共通条件の結果を引いた値をそれぞれa)市街化区域外、b)合併市町村、c)WEB回答によるサンプルがもたらした影響として分離する。なお同一時点で結果を比較するために、4つの分析条件が含まれている2015年(第6回)の全国都市交通特性調査を用いて分析を行う。ここから得られた都市別別の分析結果を図-4に示す。ここから以下の様な考察が出来る。

- 1) a)市街化区域外では、特に地方都市において居住者一人当たり自動車CO₂排出量が総じて高くなるのが伺える。特に傾向が顕著であるのが海南、松江、南国であり、その影響は約300g-CO₂人・日にも及ぶ。距離に換算すると、自動車トリップ距離が一人あたりおよそ1.8km増加することになる。



※1 運転率：自分で運転をしている自動車トリップの割合

※2 1987年の運転率は1992年以降の運転率を線形回帰して算出

図-2 運転率の推移

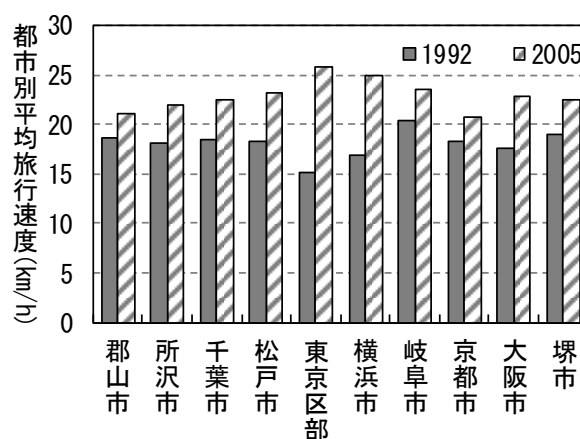


図-3 都市別平均旅行速度の推移

表-4 分析条件の設定

分析条件	調査対象	区域区分		市町村合併		回答方法	
		市街化区域	市街化区域外	旧行政区域	合併市町村	質問紙回答	WEB回答
① 共通条件		○	×	○	×	○	×
② 都市全域		○	○	○	×	○	×
③ 合併後市町村		○	×	○	○	○	×
④ WEB追加		○	×	○	×	○	○

- 2) b)合併市町村では殆ど共通条件での計算結果との間に差が見られず、熊本での61.2g-CO₂/人・日の増加が最大となっている。サンプルを確認すると、合併市町村内で調査が行われた町丁目の半数以上が市街化区域内に含まれているために共通条件との乖離が小さく算出されたのだと推察される。
- 3) インターネット利用と自動車利用量には正の相関があることが過去の研究より明らかにされており²⁾、その観点からはc)WEB回答はプラス側に触れることが予測された。しかし実際は、まだWEB回答者のサンプル数が少ないこともあってこの図だけからは十分に傾向は読み解けない。
- 4) 以上の考察を通じて、これまで調査対象が変化し

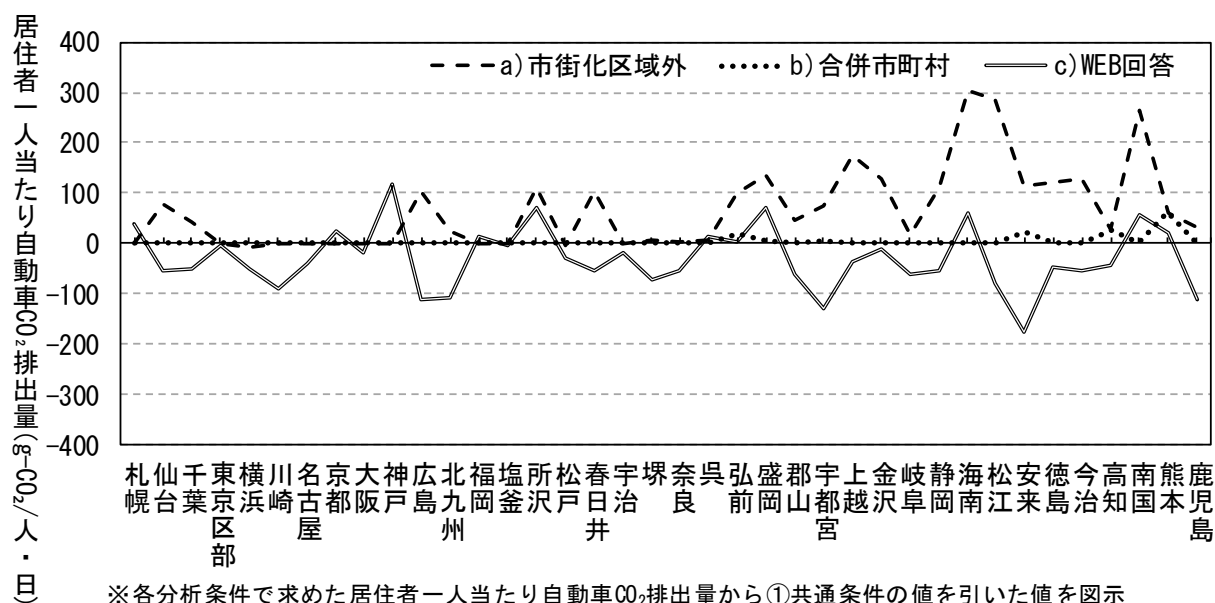


図4 分析条件の違いによる自動車CO₂排出量の差(2015年)

たことは居住者一人当たり自動車CO₂排出量の算出に少なからぬ影響を及ぼしていることが示された。以降ではこれら図-4で示した影響を除去した①共通条件に該当するトリップを対象に、28年に及ぶ居住者一人当たり自動車CO₂排出量の推移を精査した結果を示す。

7. 自動車CO₂排出量の推移の精査

最後に、①共通条件に該当するトリップを抽出し、過去6時点における居住者一人当たり自動車CO₂排出量の推移を精査した結果を図-5に示す。更に都市構造の観点からコンパクトシティを測るひとつの指標として、横軸には都市計画現況調査より求めた各都市の市街化区域人口密度を設定した。また、結果を比較するために先行研究で算出されている結果の一部を図-6に示す。

更に、計算手順を見直す前後での居住者一人当たり自動車CO₂排出量と市街化区域人口密度の経年的な変動をみるために算出した基本統計量を表-5に、更に両評価指標に関する絶対量と変化量の関係性について統計分析を実施した結果を表-6と表-7に示す。これらの結果から以下のことが読み取れる。

- 1) 本研究を通じて分析手順の見直しをおこなった結果、居住者一人当たり自動車CO₂排出量の算出結果が過去の結果よりも総じて低い数値を取ることが示された。これは表-5に示した基本統計量からも客観的な事実として確認することが出来る。特に先行研究⁴⁾から引用した図-6(その1)の1987年(第1回)の分布状況を比較すると、最大値である静岡と最小値である東京区部の差分は192g-CO₂/人・日

小さくなり、都市部と地方部での乖離は初期の頃より小さかったことが示された。

- 2) 都市部と地方部での乖離が小さくなったのは従来の計算よりも高い実燃費が反映された影響が大きい。先行研究⁴⁾では2000年時点で算出された燃料消費率パラメータを全調査時点に適用していたが、図-1からもわかる通り、これは最も実燃費が低かった時期の値である。1987年(第1回)と2000年での実燃費の差は0.66km/lとなっている。この実燃費の変化を考慮することで、1)で示した東京区部では136.6g-CO₂/人・日、静岡では350.0g-CO₂/人・日低い値を取る様になっている。
- 3) 図-6(その2)に示す1999年(第3回)の結果⁴⁾と図-5(その3)を比較すると、トリップ距離が欠損していた都市の居住者一人当たり自動車CO₂排出量が低くなっている。本分析では旅行速度が向上したことを考慮しており、燃料消費の効率が高まったことによって環境負荷低減につながっている。特に顕著な傾向を示すのが東京区部であり、その差は395.4g-CO₂/人になる。
- 4) 一方で、所沢のように居住者一人当たり自動車CO₂排出量が以前より高まった例もある。これは運転率の上昇が影響している。具体的には、従来の計算で用いられていた1992年(第2回)の値に比べ、1999年(第3回)の運転率は8%上昇している。そのため、先行研究⁴⁾に比べて、自動車が普及したことによる影響を反映した居住者一人当たり自動車CO₂排出量を示すことが出来たといえる。
- 5) また、調査対象を統一したことで、一部都市の居住者一人当たり自動車CO₂排出量に増減が見られる。図-6(その2)と図-5(その3)を比較すると、特に

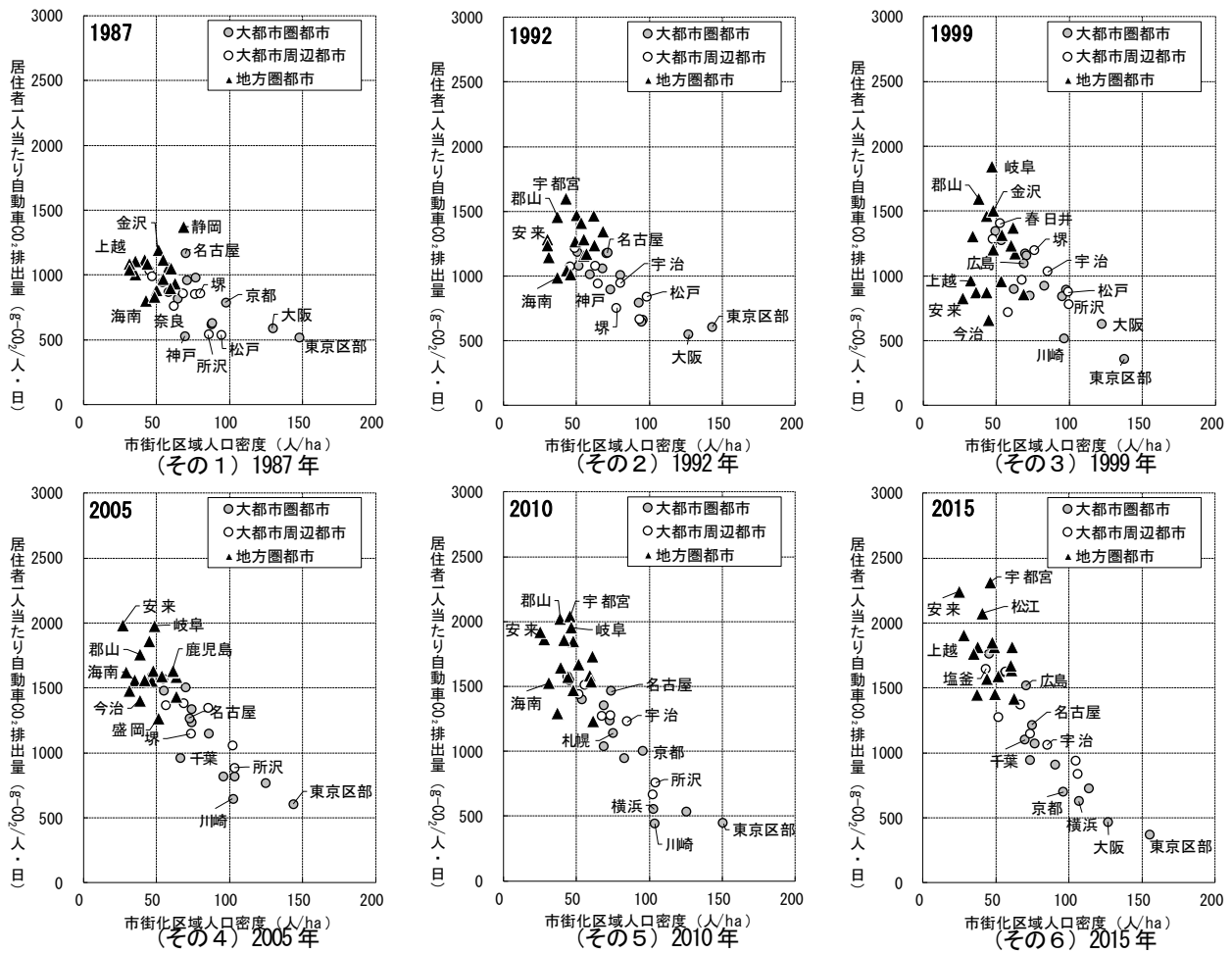


図-5 自動車CO₂排出量と市街化区域人口密度の関連（精査後）

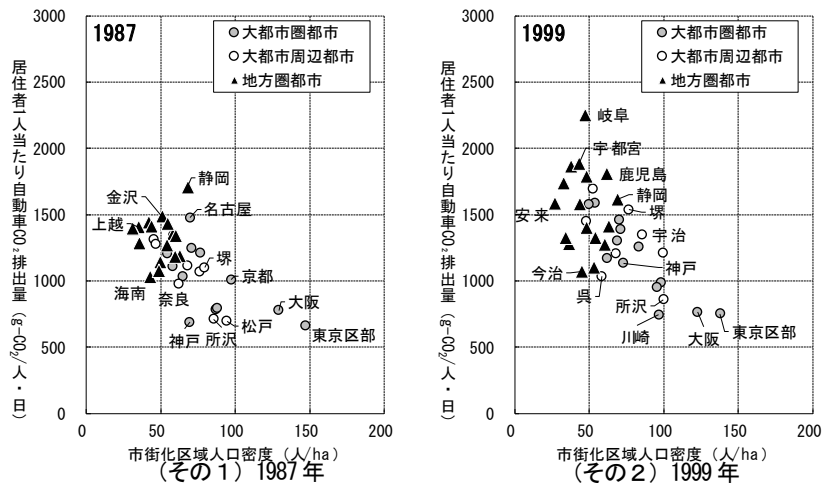


図-6 先行研究(改訂前)での自動車CO₂排出量と市街化区域人口密度の関連（抜粋）⁴⁾

安来が顕著な変化を示しており、その差は 713.5g-CO₂/人・日にも及ぶ。これは1)の様に実燃費変動を考慮したことに加え、自動車依存が特に高い市街化区域以外の地区を分析から除外したためである。

6) 図-5 を新たに計算した 2015 年の結果まで通してみると、大都市と地方都市との間の居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量の乖離が一貫して拡大している。表-5 に示す基本統計量からも特に平均値、最

大値ともに調査年次毎に高くなっており、都市間での標準偏差も拡大傾向にあることから都市間での乖離が統計的な数値として何うことが出来る。

7) 更に市街化区域人口密度との関係性を考慮するために回帰分析を実施した結果が表-6 であり、近年になるにつれて回帰係数が低くなること、定数項が高くなることから、特に市街化区域人口密度の低い地方部で居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出

量が増加しやすい傾向にあることが分かる。

- 8) また表-7 より市街化区域人口密度の経年的な変化量は居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量の変化と比較すると相対的に小さいことが確認される。それは、図-5 が示すとおり両変数はおよそ一桁スケールが異なることを考慮しても明白である。ちなみに両変化量の相関を分析すると、1987 年から 1992 年の地方圏都市を除いて統計的有意性は確認されなかった。低炭素化という目的に照らすと、図-5 を静的に観察した場合には高密度なコンパクトシティの優位性が高いことは間違いない。ただし動的に観察した場合には、特に地方圏都市において市街化区域人口密度によらず居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量が増加傾向にあるという実態が明らかになったといえる。

8. おわりに

本研究で得られた主要な成果は以下の通りである。

- 1) 政策検討上きわめて重要であるにも関わらず、世界のどこにおいても作成されていない、長期間で比較可能な(28年間、6時点)N.K.散布図の作成を精査のうえ行った。
- 2) この結果、現在考えられているよりも、1987年時点では居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量の値は低く、また都市間での格差も小さかったことが明らかになった。
- 3) 調査対象が経年的に変化してきたことについても補正を行い、市街化区域外の地区を算入することの影響が大きいことを示した。これらの地域については別途、十分な精度を有する調査を行うことが今後期待される。
- 4) 2015 年の調査より追加的に導入された WEB 調査については、まだそのサンプル数が少ないこともあり、都市ごとの傾向を把握するには至らなかった。WEB 調査の比重は今後高まることが予想されるため、他のパーソントリップ調査で行われている WEB 調査の結果も含め、継続的な観察が必要である。
- 5) 精査の結果、都市間での居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量の格差は経年的に拡大している。今後の低炭素化促進などの政策提案については、一時点の静的結果だけに頼ることなく、このような経年的な動的結果をも踏まえた対応が求められる。具体的には地方都市については都市コンパクト化のひとつの施策である居住誘導が進むことで変化すると考えられる市街化区域人口密度には殆ど変化が見られない

表-5 居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量および市街化区域人口密度の年次別基本統計量

項目	年次	1987	1992	1999	2005	2010	2015
パラメータ変更前の居住者一人当たり自動車 CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /人・日)	平均	1161.5	1306.2	1361.0	1517.9	1464.0	1463.2
	標準偏差	260.0	315.7	343.1	451.1	522.6	564.4
	最小	661.1	664.2	743.6	628.8	443.4	335.4
	最大	1708.2	1939.3	2250.0	2326.1	2205.8	2726.8
パラメータ変更後の居住者一人当たり自動車 CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /人・日)	平均	906.4	1078.3	1056.4	1369.6	1355.2	1397.1
	標準偏差	207.2	260.9	312.6	349.5	444.4	483.0
	最小	517.0	548.6	355.4	605.6	440.7	370.2
	最大	1372.2	1598.8	1841.4	1984.6	2041.6	2314.7
市街化区域人口密度 (人/ha)	平均	64.4	65.0	65.1	65.1	65.3	66.9
	標準偏差	24.7	25.3	25.2	27.0	27.9	29.2
	最小	30.8	30.4	27.1	26.5	25.6	24.7
	最大	147.3	143.3	137.7	143.5	150.7	155.5

表-6 居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量および市街化区域人口密度に関する回帰分析結果

項目	年次	1987	1992	1999	2005	2010	2015
回帰係数		-5.57**	-7.77**	-7.08**	-11.18**	-14.15**	-14.98**
定数項		1265.01**	1583.89**	1517.24**	2097.40**	2278.60**	2389.83**
相関係数		0.66**	0.75**	0.57**	0.86**	0.89**	0.90**

従属変数：居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量 (g-CO₂/人・日) **：p<0.01

独立変数：市街化区域人口密度 (人/ha)

表-7 居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量および市街化区域人口密度の平均変化量の推移

項目	年次	1987 -1992	1992 -1999	1999 -2005	2005 -2010	2010 -2015	全期間 平均
大都市圏都市	居住者一人当たり自動車 CO ₂ 排出量の平均変化量 (g-CO ₂ /人・日)	109.3	4.1	174.0	-85.4	-2.6	39.9
	市街化区域人口密度の平均変化量 (人/ha)	1.1	-0.1	2.2	1.0	2.4	1.3
大都市周辺都市	居住者一人当たり自動車 CO ₂ 排出量の平均変化量 (g-CO ₂ /人・日)	136.0	90.0	261.0	-78.4	25.8	86.9
	市街化区域人口密度の平均変化量 (人/ha)	2.4	1.6	0.1	-0.3	0.1	0.8
地方圏都市	居住者一人当たり自動車 CO ₂ 排出量の平均変化量 (g-CO ₂ /人・日)	236.7	-94.4	444.3	69.9	83.5	148.0
	市街化区域人口密度の平均変化量 (人/ha)	-0.4	-0.6	-1.6	-0.4	-2.2	-1.0

ものの、居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量が経年的に増加しているという事実をよく踏まえ、お題目としてのコンパクト化を唱えるのではなく、自動車保有と利用の両面からの対策が求められる。

なお本研究で用いた全国都市交通特性調査は各都市の町丁目ランダムに抽出して調査を実施しているため、合併市町村で調査がなされた町丁目数が少ないといった課題が挙げられる。今後より多くの調査地区を蓄積することで、都市内での居住者一人当たり自動車 CO₂ 排出量の偏在をより詳細に確認することも必要であろう。

謝辞： 本論文の執筆にあたって、土木研究所の並河良治氏より有益な情報をいただいた。また分析を行うにあたって全国都市交通特性調査を使用する機会を得た。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費(課題番号 26289170)の助成を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Peter Newman and Jeffrey Kenworthy: Cities and automobile dependence, An international sourcebook, Gower technical, 1989.
- 2) Peter Newman and Jeffrey Kenworthy: Sustainability and cities : overcoming automobile dependence, 1999.
- 3) 谷口守, 村川威臣, 森田哲夫: 個人行動データを用いた都市特性と自動車利用量の関連分析, 都市計画論文集, No.34, pp.967-972, 1999.
- 4) 谷口守, 松中亮治, 平野全宏: 都市構造からみた自動車 CO2 排出量の時系列分析, 都市計画論文集, No.43, pp.121-126, 2008.
- 5) 谷口守, 肥後洋平, 落合淳太: 地方分権時代における自動車 CO2 排出量低減政策の可能性ー都市計画マスタープランを対象にー, 土木学会論文集 D3, No.69, Vol.5, pp.613-620, 2013.
- 6) 環境省: 地球温暖化対策とまちづくりに関する検討会, 2006.2.15.資料.
- 7) 中央環境審議会地球環境部会: 長期低炭素ビジョン, 参考資料 p.83, 平成 29 年 3 月.
- 8) 国土交通省: 社会資本整備審議会都市計画・歴史的風土分科会, 都市計画部会, 2007.2.1.資料.
- 9) 参議院: 国土交通委員会, これからの都市の「形」, 国会参考人対応, 2014.5.8.開催.
- 10) 国土交通省: 社会資本整備審議会, 都市計画・歴史的風土分科会, 都市計画基本問題小委員会, 2017.2.15.資料.
- 11) Petter Næss, Synnve L. Sandberg and Per Gunnar Røe: Energy Use for Transportation in 22 Nordic Towns, Scandinavian Housing and Planning Research, Vol.13, No.2, pp.79-97, 1996.
- 12) M. E. Bouwman: Changing mobility patterns in a compact city: Environmental impacts. Compact Cities and Sustainable Urban Development, Ashgate, pp.229-240, 2000.
- 13) 鳴井聡, 中村隆司, 岩崎征人: 家庭のガソリン消費と都市の形態に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.267-274, 1998.
- 14) Taniguchi, M. and Ikeda, T.: The Compact City as a Means of Reducing Reliance on the Car; A Model-Based Analysis for a Sustainable Urban Layout, (Ed. By K. Williams) Spatial Planning, Urban Form and Sustainable Transport, pp.139-150, Ashgate, 2005.
- 15) 松橋啓介, ジェフリー・ケンワースー: エネルギー消費と人口密度, 都市計画, Vol.54, No.3, pp.20-23, 2005.
- 16) Reid Ewing and Robert Cervero: "Does Compact Development Make People Drive Less?" The Answer Is Yes, Journal of the American Planning Association, 2017.
- 17) 大口敬, 片倉正彦, 谷口正明: 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木学会論文集, No.695, pp.125-136, 2002.
- 18) 工藤祐揮, 松橋啓介, 森口祐一, 近藤美則, 小林伸治: ガソリン乗用車の実燃費マクロ推計式の構築, 土木学会論文集, No.793 IV-68, pp.793_41-793_48, 2005.
- 19) 土肥学, 曽根真理, 瀧本真理, 小川智弘, 並河良治: 道路環境影響評価等に用いる自動車排出係数の算定根拠 (平成 22 年度版), 国土技術政策総合研究所資料, 第 671 号, 2012.2..
- 20) 国土交通省道路局: 道路交通センサスからみた道路交通の現状, 推移 (データ集), https://www.mlit.go.jp/road/ir-data/data_shu.html (最終閲覧日 2017 年 6 月 12 日) .
- 21) 谷口守, 橋本成仁, 植田拓磨: 個人行動特性に配慮した買物行動のサイバー空間への潜在的な移行性把握, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.2, pp.290-299, 2010.

(2017.8.25 受付)

LONG-TERM TRENDS IN AUTOMOBILE CO₂ EMISSIONS BY CITY: 28 YEAR TRACKING OF NATIONWIDE PERSON-TRIP SURVEYS

Tomohiro KOSHIKAWA, Mamoru TANIGUCHI

Relations between urban structure and automobile CO₂ emissions have attracted attention as important aspects of environmental policy, with respective introduction of urban facility location planning systems and carbon taxes. Particularly, Newman–Kenworthy type scatter plots provide fundamentally important information. Nationwide person-trip surveys have been used in Japan to accumulate these data. However, differences in annual fuel consumption and survey items during the calculation process strongly affect results over long examination periods. This study investigates city-specific automobile CO₂ emissions over 28 years, using data from the sixth survey administered in 2015 along with retroactively changed index values. Results show that automobile CO₂ emissions per city 28 years ago were actually lower than those reported from earlier research. Results also show that inter-city disparity in automobile CO₂ emissions per person has been expanding recently.