

市街地を走行する自動車の 二酸化炭素排出量のシミュレーション

村上 肇^{*}, 山崎 智博^{**}

(平成 20 年 10 月 31 日受理)

A simulation study of the carbon dioxide emission from a vehicle in a city

Hajime MURAKAMI^{*} and Tomohiro YAMAZAKI^{**}

Emission gases, especially the carbon dioxide, from vehicles should be reduced in order to construct the Low-Carbon Society. In this study, the amount of the carbon dioxide from a running vehicle is calculated with the theoretical model of fuel consumption. The results of a computer simulation show that both the carbon dioxide emission and the trip time during the driving can be reduced according to the geometric design of a road.

Key words: fuel consumption, carbon dioxide emission, trip time, computer simulation, vehicle

1. はじめに

近年、環境に関するさまざまな問題に注意が払われるようになってきており、特に二酸化炭素排出量の削減が喫緊の課題となっている。2006 年度の我が国の二酸化炭素排出量は 12 億 7000 万トンであり、そのうち自動車が排出する量は 2 億 2200 万トンで、全体の 17.4% に相当する¹⁾。したがって、社会の低炭素化を進める上で、自動車からの排出量削減が重要であると言える。本研究では、ある幾何構造の道路を走行する自動車が排出する二酸化炭素の量をシミュレーションによって求める。そして、道路の線形を変えることによる速度変化に伴う排出量の変化を検討する。

2. 理論

自動車からの二酸化炭素排出量を計算する方法として、たとえば輸送人キロあたりの単位排出量を定め、輸送する人数や距離数を乗じる方法がよく用いられる。しかしこの方法は一定条件での走行を仮定しており、本研究のように自動車の速度を変化させる場合は論じられない。そこで、道路走行時の自動車からの二酸化炭素排出量の理論値に基づいてシミュレーションを行う。自動車の理論的な瞬時燃費 f_t [cc/s] は次式のように表現される²⁾。

^{*} 情報電子工学科 (大学院工学研究科自然・社会環境システム工学専攻) 教授

^{**} 情報電子工学科 4 年生

$$f_t = f(\text{idle}) + \frac{(\mu + \sin \theta)Mg}{\varepsilon\eta H}v + \frac{\kappa}{\varepsilon\eta H}v^3 + \frac{M + m}{\varepsilon\eta H}\alpha v \quad (1)$$

ここで， μ ：転がり摩擦係数， θ ：路面勾配（上り坂を正）， M ：搭乗者等を含む車両質量[kg]， g ：重力加速度[m/s²]， ε ：正味熱効率， η ：総伝達効率， H ：ガソリンの熱当量[J/cc]， v ：車速[m/s]， κ ：空気抵抗に相当する抵抗係数[kg/m]， m ：加速時回転部分相当質量[kg]， α ：車両加速度[m/s²]である．

式(1)右辺の第 1 項 $f(\text{idle})$ は，アイドリング維持に必要な基礎消費であり，停止時にも走行時にも一定量消費する．第 2 項は路面の転がり抵抗と勾配抵抗に相当する．第 3 項は空気抵抗に，第 4 項は車両を加速させる場合（すなわち $\alpha > 0$ の場合）のみに生じる加速抵抗に相当する．式(1)によって求められた瞬時の燃料消費 f_t を，解析対象時間について積分することで，燃料（ガソリン）の総消費量 Q [cc] が得られる．これに変換係数 K_c [kg-CO₂/cc-gasoline] を乗じることで，二酸化炭素排出量 E [kg-CO₂] に換算される．

式(1)の定数として，Table 1 のような 2,000[cc] 乗用車の概算値を用いる²⁾． K_c の値は，環境省資料に基いて 0.00232[kg-CO₂/cc-gasoline] とする³⁾．式(1)による計算値は，都市部の比較的低速な実証実験の結果と概ね一致することが知られている²⁾．

3. シミュレーション

3. 1 . 道路と速度の設定

本研究では，Fig.1(a)(b)に示すような逆 L 字形の道路を解析区間とし，前章の特性を有する自動車が行走する際の二酸化炭素排出量をシミュレーションで求める．

(a) 直角道路の場合

Fig.1(a)の道路は，一辺が 200[m]の逆 L 字形である．自動車は手前から当該区間に進入し，屈曲部を徐行で通過し，左側へ走り去る．その際の自動車の速度設定を Fig.2 に示す．自動車は時刻 0[s]において基本走行速度 40[km/h]（=11.1[m/s]）で当該区間に進入し，時刻 t_1 [s]において屈曲部の手前から減速度 α_d [km/h/s]で減速を始め，時刻 t_2 [s]において徐行速度 v_s [km/h]で屈曲部に自動車前部が

入る．そして時刻 t_3 [s]において自動車後部が屈曲部を抜けるとともに加速度 α_u [km/h/s]で加速を始め，時刻 t_4 [s]において基本走行速度 40[km/h]に達すると定速を保ち，時刻 t_e [s]において当該区間から走り去る．

(b) 曲線道路の場合

Fig.1(b)の道路は，Fig.1(a)の屈曲部を半径 r [m]の 1/4 円である曲線部で置き換えたものである．なお緩和曲線は考慮していない．この道路での自動車の走行は，直角道路でのそれと同様であり，速度設定も Fig.2

Table 1 Constants of the simulation

$f(\text{idle})$	0.3	[cc/s]
μ	0.015	[]
$\sin \theta$	0	[]
M	1,500	[kg]
g	10	[kg・m/s ²]
ε	0.3	[]
η	0.9	[]
H	3.4×10^4	[J/cc]
κ	0.5	[kg/m]
m	$0.2M$ (=300)	[kg]

と同様である．ただし Fig.1(a) のような直角の左折ではなく，緩やかな曲線の走行となることから，曲線部の徐行速度 v_s を Fig.1(a) の場合よりも引き上げることが可能である．道路の曲線半径と速度との関係については，道路構造令第 15 条に規定があるが⁴⁾，これは最小の値であり，余裕のある設計のために「最小曲線半径の望ましい値」も示されている⁵⁾．

3.2. シミュレーション方法

本研究のシミュレーションでは，解析区間の走行による二酸化炭素排出量，ならびに解析区間の移動に要するトリップ時間をシミュレーションによって計算する．二酸化炭素排出量は，Fig.2 の速度設定について，第 2 章で示した計算を行うことによって求められる．トリップ時間は，Fig.2 の t_e [s] として求められる．

シミュレーションのパラメータである減速度 α_d [km/h/s]，徐行速度 v_s [km/h]，加速度 α_u [km/h/s]，曲線部半径 r [m] を与え，そこから Fig.2 の $t_1 \sim t_e$ を求め，そして時間積分することにより，二酸化炭素排出量が計算される．シミュレーションは MKS 単位系で実施することとし，上述の減速度と加速度については [m/s²] に，徐行速度については [m/s] に換算する．走行する自動車は乗用車を想定しているので，その長さは道路構造令第 4 条（設計車両）第 2 項の小型自動車の設定に基づいて 4.7[m] と定める⁴⁾．自動車の加速度 α_u と減速度 α_d についてはいずれも 5[km/h/s] とする．なお，減速時はエンジンの実効出力ゼロと仮定し，式(1)の第 2，3 項を計算に含めない．

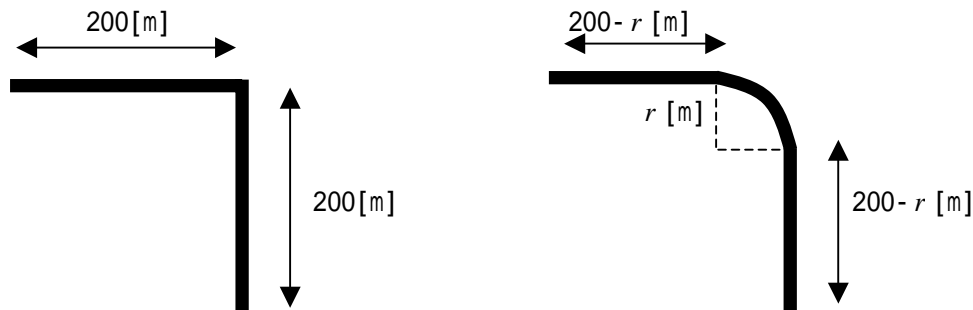


Fig.1(a) Road model (rectangle type) Fig.1(b) Road model (curve type)

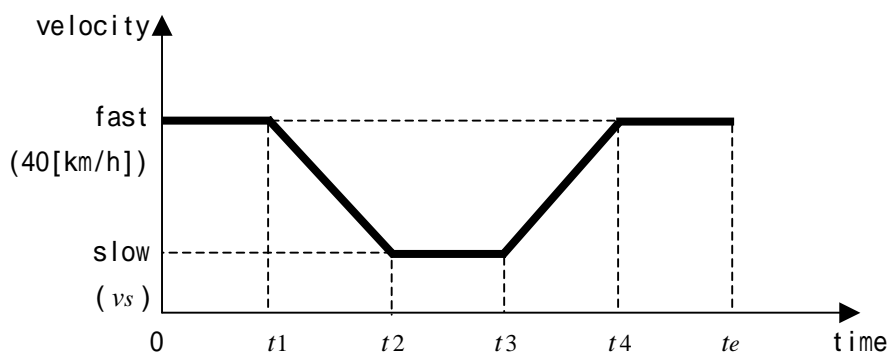


Fig.2 Velocity of the vehicle

直角道路での徐行速度 v_s は 10, 20[km/h] の 2 通りとする．また曲線道路での半径 r は, 30, 65, 100, 150[m] の 4 通りとし, これらを「曲線半径の望ましい値」⁵⁾として当てはめ, 対応する設計速度を, 曲線部における徐行速度 v_s [km/h] とする．ただし解析区間の基本走行速度を 40[km/h] と定めていることから, 徐行速度 v_s は最高でも 40[km/h] とする．以上のパラメータ設定を Table 2 に示す．なお, 直角道路の場合は $r=0$ と記す．

3.3. シミュレーション結果

Table 2 に示した 6 種類の条件について, 燃料総消費量 Q [cc], 二酸化炭素排出量 E [kg-CO₂], トリップ時間 t_e [s] のシミュレーション結果を Table 3 に示す．また, 二酸化炭素排出量について, 式(1)の各項による排出量を Fig.3 に示す．

Table 3 を見ると, 直角道路に比べて曲線道路が, また曲線部の半径が大きくなると, 二酸化炭素排出量, トリップ時間とも減少していることが分かる．すなわち, 道路の線形を変えることで, 二酸化炭素排出量の削減とトリップ時間の短縮とが可能となった．

このシミュレーションでは直角道路
(r [m], v_s [km/h])=(0, 10)に比較して曲線道路(150, 40)では, 二酸化炭素排出量は 0.0356

Table 2 Simulation parameters

r [m]	0	0	30	65	100	150
v_s [km/h]	10	20	20	30	40	40

Table 3 Simulation results

(r [m], v_s [km/h])	(0, 10)	(0, 20)	(30, 20)	(65, 30)	(100, 40)	(150, 40)
Fuel consumption Q [cc]	35.0	32.0	32.3	27.3	21.0	19.7
CO ₂ emission E [kg-CO ₂]	0.0813	0.0743	0.0749	0.0636	0.0486	0.0457
trip time t_e [s]	42.2	38.8	41.8	37.7	32.6	30.7

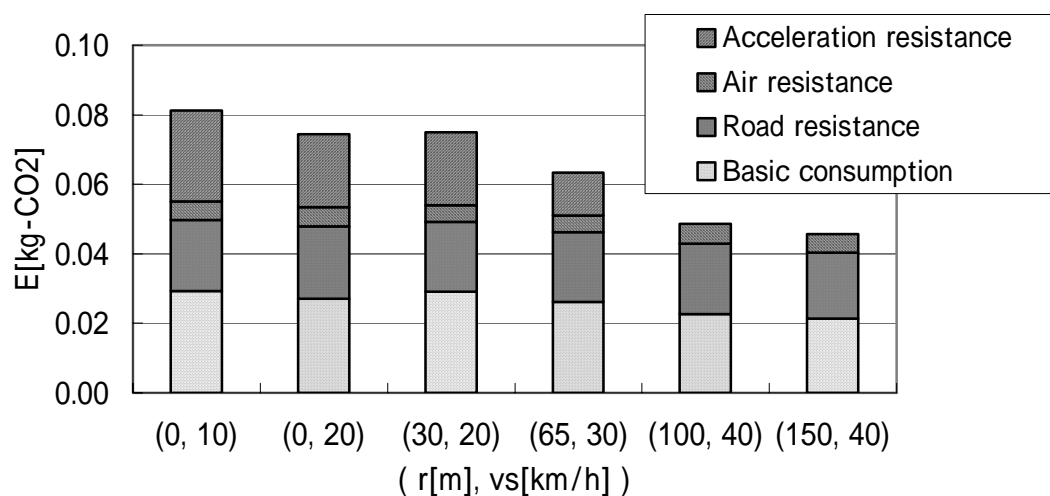


Fig.3 Factors of the carbon dioxide emission

[kg-CO₂]の削減，トリップ時間は11.5[s]の短縮となった．

Fig.3において，直角道路である(r [m], v_s [km/h])=(0,10)の場合を見ると，式(1)第1項の基礎消費による成分，第2項の路面抵抗による成分，第4項の加速抵抗による成分が大きく，第3項の空気抵抗による成分が小さいことが分かる．同じく直角道路である(0,20)の場合も，同様の傾向である．曲線道路である(30,20)の場合，曲線部の半径が小さく，徐行速度も小さいことから，直角道路の場合と大きな差はない．一方，(65,30)，(100,40)，(150,40)の場合には，徐行速度を引き上げることにより，加速抵抗成分が減少している．特に(100,40)，(150,40)の場合は，徐行速度と基本走行速度が一致していることから，走行時の加減速がなく，加速抵抗成分は0となった．

4. 考察

4.1. シミュレーション結果の検討

燃料消費において空気抵抗成分は特に高速走行時に影響が大きくなることが知られており²⁾，本研究のように市街地の走行では速度が比較的低いことから影響が小さくなっている．そのことはまた，二酸化炭素排出量削減に当たり，空気抵抗以外について重点的に対応すべきであることを示している．

Fig.3の基礎消費成分は，式(1)第1項の時間積分に比例する． $f(idle)$ は定数であるから，この成分は単純にトリップ時間に比例する．徐行速度を引き上げることによってトリップ時間が減少し，基礎消費成分も減少する．

Fig.3の路面抵抗成分は比較的大きい値ではある．路面抵抗成分は，式(1)第2項の時間積分であり，速度の時間積分，すなわち走行距離に概ね比例する．直角道路の総延長が400[m]であるのに対し，たとえば曲線部半径150[m]の場合には336[m]といったように，曲線道路を採用することによって走行距離は短くなるものの，その効果は小さい．

加速抵抗成分については，3.3.で述べたとおりである．

前述のように，道路の線形を変えることにより，二酸化炭素排出量は0.0356[kg-CO₂]の削減、トリップ時間は11.5[s]の短縮が可能であることを示した．この削減量は，1台の乗用車が400[m]程度を1回走行する際の数値である．この区間の交通量が1日1万台であったとすると，二酸化炭素排出削減量は約360[kg]となる．それが1年間継続すれば，削減量は約130[t]となる．対象となる道路の交通量が多いほど，線形改良による二酸化炭素排出量削減効果はさらに高まるものと考えられる．また二酸化炭素排出量と燃料総消費量とは比例関係にあり，前者の130[t]の削減は，後者の約56,000[l]の削減に相当することから，道路の線形改良は石油資源の無駄な使用を省くこととなる．さらにガソリン価格を150[円/l]と仮定すれば，約840万円の節約に相当する．そして普通乗用自動車の時間評価値は27[円/分]であることから⁶⁾，11.5[s]の短縮に交通量1万台，1年を乗じると，1890万円の価値に相当する．このように道路の線形改良は経済効果をも与える．

4.2. 解析対象とした道路の設定

Fig.1(a)で示した解析区間は，新潟県柏崎市内の中央跨線橋（市道2-3号線）から左折

して駅前方向へ向かう道路（市道 2-45 号線）を想定している。同区間は、柏崎市を貫く国道 8 号線や駅南方面から市街地中心部へ向かう代表的な経路となっている。また駅前公園に隣接する日本石油加工跡地（柏崎市日石町）に新たな市民会館を建設する計画が⁷⁾、中央跨線橋南西の小松エースト柏崎工場跡地（柏崎市宝町）には商業・医療施設が建設される計画がある⁸⁾。これらのことから同区間を通行する自動車は今後も増えることが予想される。したがって、同区間について二酸化炭素排出量の抑制を検討することは、柏崎地域の低炭素化を進める上で重要と考える。前節で述べたように、道路を曲線で構成すれば、二酸化炭素排出量を削減しつつトリップ時間を短縮できることから、今後の道路計画においては、環境への配慮という視点を持つことが望まれる。

5. まとめ

本研究では、道路の線形を変えることによって、走行する自動車の速度設定を変化させ、排出する二酸化炭素の量をシミュレーションによって求めた。そして、屈曲部を曲線化することにより、二酸化炭素排出量、トリップ時間とも減少できることを定量的に明らかにした。本研究の解析区間の条件では最大で、二酸化炭素排出量は 0.0356[kg-CO₂]の削減、トリップ時間は 11.5[s]の短縮となった。

文献

- 1) 日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2006 年度）；国立環境研究所球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィスウェブページ，
http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/data/2008/n001_6gas_2008-gioweb_J1.4.xls
- 2) 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/ -54，pp.125-136，2002 年 1 月
- 3) 地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第3条排出係数一覧表；環境省ウェブページ，
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santei_keisuu/keisuu.pdf
- 4) 道路構造令；法令データ提供システムウェブページ，
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S45/S45SE320.html>
- 5) 日本道路協会（編）：道路構造令の解説と運用（改訂版）；日本道路協会，pp.309-320，2004 年 2 月
- 6) 鈴木道雄（編著）：道路（ ）；技法堂出版，pp.116-117，1980 年 5 月
- 7) （仮称）柏崎市新市民会館建設基本計画（案）；柏崎市ウェブページ，
http://www.city.kashiwazaki.niigata.jp/data/info/file001037172_6.pdf
- 8) 小松エースト柏崎工場跡地土地譲渡事業における優先交渉権者の決定について；柏崎市ウェブページ，
http://www.city.kashiwazaki.niigata.jp/data/info/file001004371_6.pdf