

二酸化炭素排出量最小化原則に基づく 均衡配分モデルの提案

内田 賢悦¹

¹正会員 北海道大学大学院 北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、二酸化炭素排出量最小化原則と等価なガソリン消費量最小化原則に基づく均衡型交通量配分モデルを提案する。具体的には、各ドライバーが消費するガソリン量、および、ネットワーク上の総ガソリン消費量を最小化するように速度選択および経路選択を行った場合に得られる交通状態を推計する2つの配分モデルの定式化を行う。テストネットワークを対象とした数値実験を行った結果、各ドライバーが自己の消費するガソリン量を最小化する場合、利用者均衡配分による結果と比較すると、ネットワーク上の総ガソリン消費量、総旅行時間は、共に約10%削減されることが示された。

Key Words : CO₂ emission, fuel consumption, equilibrium traffic assignment

1. はじめに

2008 年のガソリン価格の高騰は、道路交通に大きな影響を与えたことが多くの実証研究で明らかにされている¹⁾²⁾。たとえば、交通需要、経路選択、加減速等の運転挙動への影響が挙げられる。一方、地球温暖化問題を解決するための CO₂排出量削減は、急務の課題となっている。我が国では、運輸部門からの CO₂排出量は全体の約 20%を占めており、その約 90%が自動車交通から排出されている³⁾。したがって、道路交通からの CO₂排出量削減可能性は高いと考えられる。そのための施策としては、出発時刻、交通機関、目的地等の変更や燃費の良い自動車への買い替え等が考えられるが、走行速度や選択経路の適正化を図ることも有効である。こうした選択行動の適正化は、ITS 技術を活用することにより技術的に可能な段階にあると考えられ、さらに、ガソリン価格の高騰を経験した現在、ドライバーにも受け入れられる可能性は高いと考えられる。

これまで、自動車交通を対象とした交通量配分モデルでは、移動コストとして一般化費用が用いられてきた。一般化費用は、旅行時間と高速道路利用料金などの費用から構成される場合が多い。上述したように、ガソリン価格が高騰した場合、道路交通への影響があると考えられるが、これまで提案された交通量配分モデルでは、ガソリン消費費用が一般化費用において明示的に表現されるケースは少なかった。これは、従来のガソリン価格は、

時間費用あるいは高速道路利用料金と比較すると安価であるため、経路選択行動に影響を与えないと想定できたためと推察される。しかし、2008 年に経験したようなガソリン価格の高騰がある場合、こうした想定は成立しない可能性がある。一方、旅行時間とガソリン消費量には、一般的に正の相関があると考えられるが、旅行時間最小化原則とガソリン消費量最小化原則によってガソリン消費量がどれくらい異なるかについては、不明である。

本研究では、CO₂排出量最小化原則と等価なガソリン消費量最小化原則に基づく静的な需要固定型均衡配分（以下では、ガソリン消費量最小化配分と呼ぶ）モデルの提案を行う。第 2 章以下では、ガソリン消費量最小化に焦点を当てた議論を進めることにするが、ガソリン消費量最小化を CO₂排出量最小化に読み替えても問題は生じない。なぜなら、ガソリン 1 リットル当たりの CO₂排出量が一定であることを考えると、ガソリン消費量を最小化すると CO₂排出量も最小化されるからである。ガソリン消費量最小化原則の定義は後述することにするが、本研究では、ドライバーが消費するガソリン量を最小化するように経路と旅行速度の選択を行った状態、および、ネットワーク上で消費される総ガソリン消費量を最小化するように経路と旅行速度の選択を行った状態を計算する 2 つの均衡配分モデルを考える。前者のモデルは、旅行時間をガソリン消費量に置き換えた場合の利用者均衡タイプのモデルであり、後者は、同様な置換を行った場合のシステム最適タイプのモデルと位置付けられる。ガ

ソリン消費量の削減は、CO₂排出量の削減を志向するものであるが、これを実現するためには、主に2つのアプローチがあると考えられる。1つの目のアプローチは、ドライバーの交通行動を所与として、混雑税等の交通施策を実施することにより、CO₂排出量の削減を行うものである。こうした問題は、一般的に均衡制約付き最適化問題として定式化され、ネットワークデザイン問題⁷⁾として認知されている。もう一方のアプローチは、多様な交通施策を実施することにより、ドライバーの交通行動の自発的な変化を促し、社会に望ましいと考えられるCO₂排出量の削減を図るものである。こうしたアプローチは近年、モビリティマネジメント⁸⁾として認知されている。本研究で提案するガソリン消費量最小化配分は、最短時間経路から最小CO₂排出量経路を選択するように、ドライバーの交通行動評価基準を変化させた場合に実現する交通状況を推計するものである。したがって、モビリティマネジメントを実施した結果、実現するであろう交通状況を推計するモデルと捉えられるかもしれない。先述のように、自動車交通からのCO₂排出量を削減するためには、走行速度、経路、出発時刻、交通機関、目的地等の変更や燃費の良い自動車への買い替え等が有効である。本研究では、静的な需要固定型均衡モデルを想定し、速度および経路の変更のみを考える。この2つの要因を扱う施策は、選択行動変化による追加的な(心理的)費用が小さいという点では、それ以外の要因を扱うTDM施策よりも受容される可能性が高い。たとえば、自動車を利用している人は、交通機関変更よりも、自動車利用を維持した上でCO₂排出量を最小化する速度および経路への変更の方が受容する可能性が高いと言える。

本研究の構成は以下に示すとおりである。第2章では、ガソリン消費量最小化配分モデルの定式化を行う。ここでは、はじめに利用者均衡配分とガソリン消費量最小化配分の結果が一致しないことを示す。さらに、交通量とガソリン消費量の関係を考察した上で、この関係を定式化し、最後にガソリン消費量最小化配分モデルの定式化を行う。第3章では、ガソリン消費量データが得られた場合のガソリン消費量関数の設定法を示す。第4章では、テストネットワークを対象とした数値実験を行い、利用者均衡配分とガソリン消費量最小化配分による解の違いを考察する。ここでは、両者のガソリン消費量の比較も行う。第5章では、研究のまとめを行う。

2. ガソリン消費量最小化配分モデル

(1) モチベーション

ここでは、ドライバーが自己の旅行時間を最小化するように経路選択を行った場合の配分結果、すなわち、利

用者均衡配分による結果は、必ずしもそのドライバーが消費するガソリン量を最小化しないことを示す。例として、1つのODペアを考え、そこに2本の経路がある場合を考えることにしよう。経路1, 2の延長は、それぞれ L_1, L_2 (km) であるとする。このネットワークを対象に利用者均衡配分を行った結果、両方の経路が利用され、それらの経路の旅行時間は等しく、 $t_1 = t_2$ (h) となったとする。このとき、経路1, 2の(平均)旅行速度をそれぞれ v_1, v_2 (km/h) と表わすことにする。単位距離当たりのガソリン消費量が旅行速度のみに依存すると仮定し、経路1, 2を利用した場合の単位距離当たりのガソリン消費量は、それぞれ $c_1(v_1), c_2(v_2)$ (l/km) と表わすことにする。利用者均衡配分による結果がドライバーのガソリン消費量を最小化している場合、経路1, 2を利用したドライバーのガソリン消費量が等しくなるはずである。その場合、 $L_1 \cdot c_1(v_1) = L_2 \cdot c_2(v_2)$ が成立しなければならない。この条件は、 $t_1 \cdot v_1 \cdot c_1(v_1) = t_2 \cdot v_2 \cdot c_2(v_2)$ と書けるため、結局は、 $v_1 \cdot c_1(v_1) = v_2 \cdot c_2(v_2)$ が成立する必要がある。この恒等式は、 $c_1(v_1) = c/v_1, c_2(v_2) = c/v_2$ (c は、任意の正の定数) の場合のみ成立する。上記の条件は、単位距離当たりのガソリン消費量は、旅行速度に反比例することを示しているが、現実には、こうした関係は成立しない。したがって、利用者均衡配分とガソリン消費量最小化配分の解は、一般的には一致しないといえる。そのため、利用者均衡配分とガソリン消費量最小化配分では、ガソリン消費量あるいはCO₂排出量にどれだけの差が生じるかを検討する意義は大きいと考えられる。

(2) 交通量とガソリン消費量の関係

ガソリン消費量最小化配分モデルの定式化に先立ち、ここでは、交通状況とガソリン消費量の関係を考えることにする。本研究では、静的な需要固定型交通量配分モデルを適用した解析を前提とするため、交通状況は、交通量(q)と交通量の関数として与えられる旅行時間($t(q)$)の関係で表わされるものとする。また、これらの変量から、旅行速度($v(q)$)は、交通量の関数となり、対象とするリンクの延長を L と表現した場合、 $v(q) = L/t(q)$ として与えられる。旅行時間が交通量に関して単調増加関数となることを仮定すると、旅行速度は、交通量に関して単調減少関数となる。一方、単位距離当たりのガソリン消費量($c(q)$)は、旅行速度の関数、換言すると、交通量の関数として与えられることになり、本研究では、旅行速度に関して凸関数となることを仮定する。以上の関係を示したのが図-1である。図-1では、

実線が交通量と旅行速度の関係を表わし、点線が旅行速度と単位距離当たりのガソリン消費量の関係を表わしている。また、図中の $c_{\min}$ は、単位距離当たりのガソリン消費量の最小値を表わし、 v^* は $c_{\min}$ となる旅行速度の最小値、さらに q^* は v^* に対応する交通量を表わしている。以上の関係から、単位距離当たりのガソリン消費量は、交通量に関しても凸関数となる。そこで、延長が L のリンクを通過するときのガソリン消費量($f(q)$)を考えると、これは式(1)で与えられる。

$$f(q) = c(q) \cdot L. \quad (1)$$

図-2は、式(1)に示した交通量とガソリン消費量の関係を示している。さらに、ドライバーがガソリン消費量を最小化するように速度を制御した場合のガソリン消費量($\hat{f}(q)$)を考えると、これは式(2)で与えられ、この状態は図-3で表わされる。

$$\hat{f}(q) = \max(f_{\min}, f(q)), \quad (2)$$

$$\text{where} \quad f_{\min} = c_{\min} \cdot L. \quad (3)$$

すなわち、 $0 \leq q < q^*$ の範囲では、ドライバーは v^* 以上の旅行速度で走行可能であるが、ガソリン消費量を最小化するため、結局は、 v^* の旅行速度を選択することになることを式(2)および図-3は示している。以上から、ドライバーは、 v^* 以上の走行速度が可能な非混雑時であっても v^* を走行速度として選択し、それ以外の場合は、式(2)から計算されるガソリン消費量が最小化されるように、経路選択を行うことになる。ここで、ガソリン消費量は、走行速度と走行距離の関係で決定されるが、必ずしもガソリン消費量と走行時間は比例関係にないことに注意が必要である。速度選択と経路選択を統合した交通量配分問題は、(4)で示すことにする。また、 v^* より低い表定速度(v_r)を考える場合は、 v^* の代わりに v_r を用いたガソリン消費量関数を適用すれば良い。

一般的に、ガソリン消費量は、速度の他に速度の変動等にも依存することが知られており⁹⁾、さらに、単位距離当たりのガソリン消費量が旅行速度の関数となるという仮定では、同一車種、運転特性の等しいドライバーを前提とするため、現実的とは言い難い点は否定しない。こうした要因は、たとえば、個々のドライバーの運転挙動を表現し、単一リンクを対象とする解析を行う場合には導入可能であると考えられる。一方、本研究で対象とするネットワークレベルの解析を行う場合には、解法、解特性（一意性、安定性）等の問題から、上記は重要な影響要因であると認識しながらも、考慮していない。しかしながら、（平均）旅行速度は、不自然な運転挙動を想定しない限り、CO₂排出量を推計する上で最も重要な

要因であるため、上記の仮定を置いて推計されるCO₂排出量は、実際のものからかけ離れているとは考えにくい。

(3) 交通量とガソリン消費量の定式化

前節では、ドライバーがガソリン消費量を最小化するように速度選択を行った場合の交通量とガソリン消費量の関係を示した。ここでは、交通量と旅行時間の関係（リンクコスト関数）が式(4)に示すBPR関数で与えられた場合の交通量とガソリン消費量の定式化を行う。

$$t(q) = \frac{L}{v(0)} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{C} \right)^\beta \right). \quad (4)$$

ここで、 C は交通容量であり、 α, β はパラメータである。また、 $v(0)$ は図-1にも示した自由旅行速度である。式(4)を用いると、旅行速度は、式(5)で与えられる。

$$v(q) = \frac{L}{t(q)} = v(0) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{C} \right)^\beta \right)^{-1}. \quad (5)$$

図-3に示した関係から、単位距離当たりのガソリン消費量は、 $0 \leq q < q^*$ の範囲では $c_{\min}$ となるため、以下では、 $q \geq q^*$ の範囲のみを考えることにする。ここで、この範囲にある単位距離当たりのガソリン消費量は $v^*/v(q)$ に比例する、すなわち、式(6)に示す関係が成立すると仮定する。

$$c(q) \propto v^*/v(q) = \gamma \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{C} \right)^\beta \right), \quad (6)$$

$$\text{where} \quad \gamma = \frac{v^*}{v(0)}. \quad (7)$$

式(6)において、 $q \geq q^*$ の範囲では $v(q) \leq v^*$ となり、さらに $v(q)$ は q に関して単調減少関数となることから、 $v^*/v(q)$ は q に関する単調増加関数となる。したがって、式(6)では、単位距離当たりのガソリン消費量は、 q に関しては単調増加関数、換言すると、 v に関しては単調減少関数となることを仮定している。そこで、単位距離当たりのガソリン消費量を式(8)で表わすことにする。

$$c(q) = d_1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{C} \right)^\beta \right) + d_2. \quad (8)$$

ここで、 d_1, d_2 はパラメータである。式(1),(8)に示した関係を用いると、延長が L のリンクを通過する際のガソリン消費量は、式(9)で与えられる。

$$f(q) = f_1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{C} \right)^\beta \right) + f_2. \quad (9)$$

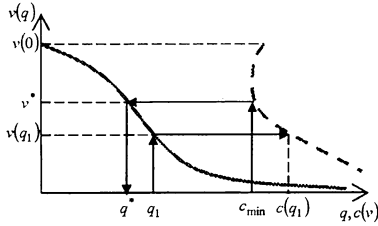


図-1 交通量と単位距離当たりのガソリン消費量の関係

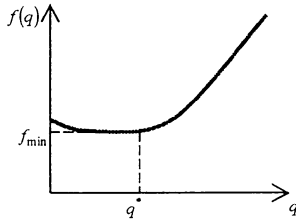


図-2 交通量とガソリン消費量の関係

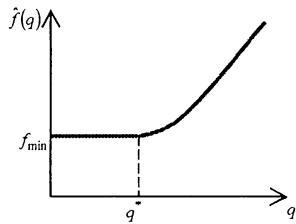


図-3 交通量と最小化ガソリン消費量の関係

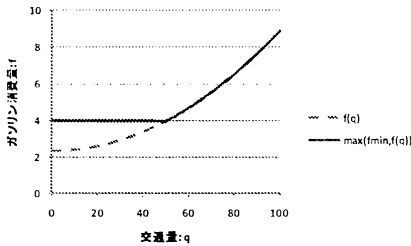


図-4 交通量とガソリン消費量の関係

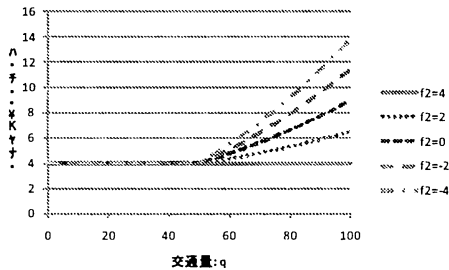


図-5 交通量と最小ガソリン消費量の関係

ここで、 f_1, f_2 はパラメータであるが、これらは、図-2 に示した関係から、式(3)によって外生的に与えられる $f_{\min}$ を用いた式(10)に示す条件、すなわち、 $q = q^*$ のときのガソリン消費量が $f_{\min}$ となる条件を満たす。

$$f_{\min} = f_1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q^*}{C} \right)^\beta \right) + f_2. \quad (10)$$

したがって、これらのパラメータには、式(11)、(12)に示す関係が成立する。

$$f_1 = (f_{\min} - f_2) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q^*}{C} \right)^\beta \right)^{-1}, \quad (11)$$

$$f_2 \leq f_{\min}. \quad (12)$$

図-4 は、 $C = 60, q^* = 50, \alpha = 1, \beta = 2, f_2 = 0, f_{\min} = 4$ として計算した交通量とガソリン消費量の関係を示している。さらに図-5 は、 f_2 を-4 から 4 まで 2 刻みで変化させた場合の交通量と最小ガソリン消費量の関係を示している。図-4 より、交通量と旅行時間の関係を BPR 関数で表現することにより、交通量とガソリン消費量の関係を表わすことができることが示された。さらに、図-5 より、交通量（あるいは旅行速度）とガソリン消費量の関係を示す実データが存在すれば、式(9)に示したパラメータ f_2 を調整することにより、こうした関係を再現できる可能性があることが示された。

(4) ガソリン消費量最小化配分

ここでは、ガソリン消費量最小化配分の定式化を行う。ガソリン消費量最小化原則は、以下に示す通りである。

「同原則下では、ドライバーは、経路あるいは旅行速度の変更を行うことによって、出発地から目的地に到着するまでに消費するガソリン量を削減できない」

換言すると、ガソリン消費量最小化原則下では、

「利用される経路のガソリン消費量はすべて等しく、利用されない経路のそれよりも小さいかせいぜい等しい」状態が成立しており、利用者均衡配分の旅行時間をガソリン消費量に置き換えた原則となっており、完全情報下の行動を前提とする。先述したとおり、ガソリン消費量最小化原則は、CO₂排出量最小化原則と等価となる。

以下では、これまでの定式化で用いた変数または関数に下付きの a を付して、リンク a に関係する変数または関数を表わすものとする。リンク $a \in A$ (A は道路ネットワークを構成するリンクの集合) のガソリン消費量関数を $\hat{f}_a(q_a)$ として、ガソリン消費量最小化配分モデルは、以下に示すように定式化できる。

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} \hat{f}_a(x) dx, \quad (13)$$

$$q_a = \sum_{od \in \Pi} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{ak}^{od} \cdot v_k^{od} \forall a \in A, \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K_{od}} v_k^{od} = v^{od} \forall od \in \Pi, \quad (15)$$

$$v_k^{od} \geq 0 \quad \forall k \in K_{od}, \forall od \in \Pi, \quad (16)$$

$$q_a \geq 0 \quad \forall a \in A. \quad (17)$$

ここで v^{od} は、OD ペア $od \in \Pi$ (Π : OD ペアの集合) 間の交通需要であり、 v_k^{od} は経路 $k \in K_{od}$ (K_{od} : OD ペア od 間の経路集合) の経路交通量である。また δ_{ak}^{od} は、OD ペア od 間の k 番目の経路にリンク a が含まれる場合に 1、それ以外のときに 0 をとる変数である。一方、通常の利用者均衡配分は、式(13)に示した目的関数を式(18)に置き換えた問題となり、ガソリン消費量最小化配分は、式(2)に示したガソリン消費量関数をリンクコスト関数とみなした場合の利用者均衡配分と等価な問題構造を有することがわかる。

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} t_a(x) dx. \quad (18)$$

式(2)に示したガソリン消費量関数は、 $q = q^*$ において微分可能ではなく、さらに、 $0 \leq q \leq q^*$ において単調増加関数とはなっていないという 2 点で式(4)に示した BPR 関数とは異なる。利用者均衡配分の標準的な解法である Frank-Wolf 法を適用する場合、前者の微分が不可能である点は、それほど問題になるとは考えにくい。一方、後者の単調増加関数とならない点は、交通需要が少なく、混雑の影響が小さい場合は、複数の均衡解が生じる可能性があることを示している。したがって、一般的には、ガソリン消費量最小化配分モデルは、解の一意性が保証されない問題となる。しかしながら、混雑影響が小さい場合は、最短移動距離の経路が選択されることになり、そうした経路が複数存在する場合を除けば、解の一意性は保証されることが期待される。また、都市部の交通需要がある程度大きいネットワークを対象とした場合も、解の一意性は保証されることが期待され、ガソリン消費量最小化原則は、むしろ、こうした混雑影響の大きいネットワークに適用されるべき原則であるとも考えることができる。

以上で示した均衡配分モデルは、各ドライバーが消費するガソリン消費量を最小化する状態を計算するものであるが、利用者均衡配分とシステム最適配分の関係のよ

うに、式(13)を社会的限界費用に置き換えることによって、ネットワーク上で消費される総ガソリン消費量を最小化する状態も計算可能である。その場合の目的関数は、式(19)で表わされることになる。

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} \hat{f}_a(x) + x \cdot \frac{d\hat{f}_a(x)}{dx} dx. \quad (19)$$

3. ガソリン消費量関数の設定

ここでは、ガソリン消費量データが得られた場合のガソリン消費量関数の設定法を示すことにする。はじめに、2 組のデータが存在する場合を考える。自由旅行速度が $v(0)$ 、交通容量が C 、延長が L のリンクの走行速度は、交通量が q であるとき、式(5)で与えられる。燃費が一番良いときの旅行速度 v^* が与えられたとき、これに対応する交通量 q^* は、式(5)に示した関係から、式(20)で与えられる。

$$q^* = C \cdot \left(\frac{v(0) - v^*}{\alpha \cdot v^*} \right)^{1/\beta} \quad (20)$$

ここで、このときの単位距離当たりのガソリン消費量は、 $c_{\min}$ で与えられているため、このリンクを通過するためには $f_{\min} = L \cdot c_{\min}$ のガソリンを消費することになる。以上の関係を用いると、 $f_{\min}$ と q^* が得られたため、式(9)に示したガソリン消費関数のパラメータ値の関係(式(11))を得ることができる。さらに、燃費が低下している旅行速度 $v^1 (\leq v^*)$ とその時の単位距離当たりのガソリン消費量 c_1 が実測データとして与えられていることを仮定する。その場合、旅行速度 v^1 に対応する交通量 q^1 は、式(21)で与えられる。

$$q^1 = C \cdot \left(\frac{v(0) - v^1}{\alpha \cdot v^1} \right)^{1/\beta} \quad (21)$$

このとき、リンクを通過するためには $\hat{f}_1 = L \cdot c_1$ のガソリンを消費することになる。一方、式(11)から、ガソリン消費量関数に関する未知パラメータは、 f_2 のみとなるが、これは、交通量 q^1 におけるガソリン消費量が $\hat{f}_1$ となる関係を利用すると、式(22)によって推計される。

$$f_2 = \frac{\hat{f}_1 - r \cdot f_{\min}}{1 - r}, \quad (22)$$

$$\text{where } r = \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q^*}{C} \right)^\beta \right)^{-1} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q^1}{C} \right)^\beta \right). \quad (23)$$

次に、燃費が低下している旅行速度と交通量の組 (v^i, q^i) に対応するガソリン消費量の実測データ $\hat{f}_i$ が複

数存在するような場合を考える。この場合、式(9)で与えられる推定ガソリン消費量を $f(q^i)$ として、以下に示す最適化問題を解くことにより、 f_2 を決定できる。

$$\min z = \sum_i (\hat{f}_i - f(q^i))^2, \quad (24)$$

w.r.t f_2 , st. (11) and (12).

自動車の燃費は、一般的に旅行速度が 70 [km/h] 位のときが一番良く、それより旅行速度が低下または上昇すると悪化することが知られている。図-6 は、この関係を示したものである¹⁰⁾。図-6 より、旅行速度が 60–80 (km/h) で燃費が最大となっており、その場合、約 14 (km/l) であることがわかる。また、旅行速度が 5 (km/h) のとき、燃費が約 5 (km/l) となっていることもわかる。以下では、上記の 2 組のデータを実測値と仮定して、ガソリン消費量関数を推計することにする。すなわち、実測データは、 $v^* = 60$ (km/h), $c_{\min} = 1/14$ (l/km) および、 $v^1 = 5$ (km/h), $c_1 = 1/5$ (l/km) である。BPR 関数が $v(0) = 80$ (km/h), $\alpha = 1, \beta = 2$ によって特徴付けられるリンクのガソリン消費量関数を考える。ここでは、交通容量とリンク延長は、変数として扱うことにする。はじめに、式(20)に示した関係から、 q^* は、式(25)で与えられる。

$$q^* \approx 0.577 \cdot C. \quad (25)$$

一方 $f_{\min}$ は、式(3)に示した関係から式(26)で与えられる。

$$f_{\min} = \frac{L}{14}. \quad (26)$$

同様に、 $q^1, \hat{f}_1$ はそれぞれ、式(27), (28)で与えられる。

$$q^1 \approx 3.873 \cdot C, \quad (27)$$

$$\hat{f}_1 = \frac{L}{5}. \quad (28)$$

したがって、 f_2 は式(22)より、式(29)で与えられる。

$$f_2 \approx 0.059 \cdot L. \quad (29)$$

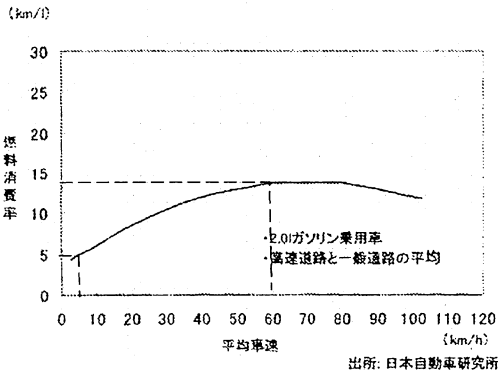


図-6 平均旅行速度と燃料消費率

式(11)に示した関係から、 f_1 は式(30)で与えられる。

$$f_1 \approx 0.009 \cdot L. \quad (30)$$

以上の関係を用いると、 $\hat{f}(q)$ は式(31)として推計される。

$$\hat{f}(q) = \begin{cases} L/14 & 0 \leq q < q^* \\ 0.009 \cdot L \cdot \left(1 + \left(\frac{q}{C}\right)^2\right) + 0.059 \cdot L & q \geq q^* \end{cases} \quad (31)$$

4. 数値実験

ここでは、札幌市における主要幹線道路（図-7 上）を参考にして作成したテストネットワーク（図-7 下）を対象に数値実験を行った結果を示す。ここでは、紙面の制約から、ガソリン消費量最小化配分モデルによる結果のみを示す。各リンクの自由旅行時間は、実際のリンク長および $v(0) = 80$ (km/h) と仮定して算出した値を用いた。また各リンクの交通容量は、一律片側 12,000 (pcu/day) としている。OD 交通量は、OD ペアの組 (1, 54), (5, 52), (8, 50), (33, 39) に対して、それぞれ双方向に 30,000 (pcu/day) とした。さらに、全てのリンクのガソリン消費量関数は、その交通容量と延長を用いて式(31)で表わされるように設定した。したがって、 $v^* = 60$ (km/h) と仮定していることになる。

図-8 は、ガソリン消費量最小化配分と利用者均衡配分 (UE) によるリンク交通量の散布図を示している。ガソリン消費量最小化配分では交通量が 0 となる多くのリンクにおいて、UE では交通量が 0 となっていないことがわかる。これは、式(31)に示したガソリン消費量関数を観察すると、 $q \geq q^*$ となる場合の右边第 2 項による影響から、交通量が多だけでなく、延長の長いリンクは、利用されない傾向があることがわかり、このことが影響したものと考えられる。利用者均衡配分では、延長が長くても、旅行時間の短い経路は選択される傾向にあるのに対し、ガソリン消費量最小化配分では、こうした経路は利用されない傾向にあることが示された。

図-9 は、ガソリン消費量最小化配分と UE による OD ペア間の自動車 1 台当たりのガソリン消費量を示している。ここで、ガソリン消費量最小化配分では、OD 間で利用される経路のガソリン消費量は全て等しくなっているが、UE ではこの条件は満たされていない。したがって、図-9 に示した UE のガソリン消費量は、OD 間の利用されるある 1 本の経路のものを示しているが、他の利用される経路のガソリン消費量はこの値と異なることに

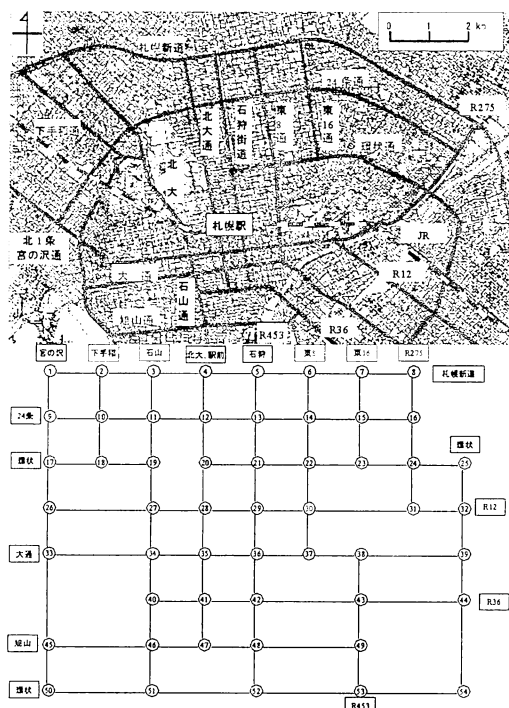


図-7 テストネットワーク

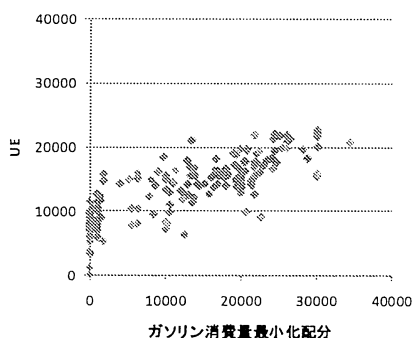


図-8 配分交通量の比較

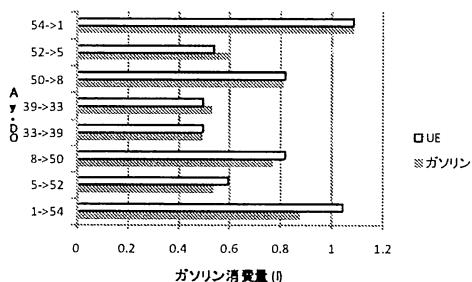


図-9 ODペア間のガソリン消費量の比較

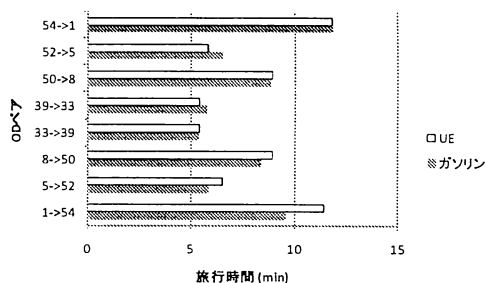


図-10 ODペア間の旅行時間の比較

注意が必要である。OD 間のガソリン消費量は、ガソリン消費量最小化配分と UE によって、それほど大きな差は得られなかったが、傾向としては、UE の方が多くなっていた。ネットワーク全体での総ガソリン消費量を計算した結果、ガソリン消費量最小化配分と UE それぞれについて、172,956 (l), 193,002 (l) と推計され、ガソリン消費量最小化配分では、UE と比較して約 10%の総ガソリン消費量削減効果があることが示された。

図-10は、ガソリン消費量最小化配分とUEによるODペア間の旅行時間を示している。上述した同じ理由から、今度は、ガソリン消費量最小化配分では、OD間で利用される経路の旅行時間が等しくなっていないことに注意が必要である。また、図-10でとりあげた経路は、図-9に示したものと同一であるため、旅行時間に関しては、図-9と全く同じ傾向があることがわかる。ネットワーク全体での総旅行時間を計算した結果、ガソリン消費量最小化配分とUEそれぞれについて、1,890,386 (min*pcu), 2,108,476 (min*pcu)と推計され、総ガソリン消費量と同様に、ガソリン消費量最小化配分では、UEと比較して約10%の総旅行時間削減効果があることが示された。この結果より、ガソリン消費量最小化配分は、UEと比較した場合、ネットワーク上の総移動時間を削減する効果があることが明らかになった。先述した通り、ガソリン消費量最小化配分では、UEと比べると、延長の長いリンクは利用されない傾向があるため、その影響から、総移動時間が削減された可能性がある。なぜなら、遠回りであっても時間最小の経路を選択した場合、他のODペア交通の所要時間を増加させる可能性があり、総移動時間はかえって増加することが考えられるからである。これに関しては、さらなる分析を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、二酸化炭素排出量最小化原則に基づく 2

つの均衡型交通量配分モデルを構築した。これらのモデルは、二酸化炭素排出量最小化原則と等価なガソリン消費量最小化原則に基づいて定式化されており、各ドライバーが消費するガソリン量、およびネットワーク全体で消費される総ガソリン量を最小化する交通状態を推計するものである。テストネットワークを対象とした数値実験を行った結果、各ドライバーが自己の消費するガソリン量を最小化するように旅行速度および経路を選択した場合、利用者均衡配分の結果と比較すると、総ガソリン消費量および総旅行時間が約 10%削減されることが明らかとなった。さらに、利用者均衡配分の結果と比較した場合、利用される経路が集約されていることも明らかとなり、ガソリン消費量最小化配分による解の特性を示すことができた。

一方、時間価値とガソリン価格を導入することにより、旅行時間とガソリン消費量を導入した一般化費用関数を構築することができる。これを用いて目的関数を再設定すると、旅行時間とガソリン消費量を考慮した均衡配分モデルを構築することができる。ただし、この場合、ガソリン消費量関数は、図-2 に示した q に関する凸関数を用いる必要性から、一般化費用関数は q に関して凸関数となる可能性がある。したがって、一般的には解の一意性が保証される問題とはならないだけでなく、凸計画問題として定式化することができない可能性もある。しかしながら、時間価値がガソリン価格に対して相対的に高い場合、一般化費用関数は q に関して単調増加関数となることが期待され、この場合は、解の一意性が保証される問題となる可能性は残される。今後、こうした検討を行う必要性は高いと考えられる。

ガソリン消費量最小化原則は、地球温暖化問題への関心が高まる中、さらには、ガソリン価格の高騰を経験した現在、決して非現実的な交通行動原則とは考えられな

い。さらに、この交通行動原則の実現を支援する ITS 技術の確立もなされていると考えられる。また、旅行時間最小化原則（利用者均衡）は、二酸化炭素排出量の観点では、どれほど最小値からかけ離れているかを調べることは重要な意味を持つため、こうした検討を行う上でも、ガソリン消費量最小化配分は有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 横山大輔, 藤井啓介, 谷口守: ガソリン価格高騰による個人の自動車利用抑制の実態, 交通工学論文集, No.28, 2008.
- 2) 谷口守, 松中亮治, 横山大輔, 藤井啓介: 運転動機の違いを配慮したガソリン価格高騰の影響分析, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), Vol. 38, 2008.
- 3) 谷口守, 藤井啓介, 安立光陽: パネルデータに基づく運転動機を考慮したガソリン価格高騰の段階的影響分析, 土木学会論文集 D, Vol. 65, No. 2, pp.129-142, 2009.
- 4) 坪井貴彦, 庭田文近, 關哲雄: ガソリン価格高騰による所得階層別家計の自動車交通トリップ需要への影響, 日本交通学会 2007 年第 66 回研究報告会.
- 5) Kagaya, S., Uchida, K.: Affects on Transport Modal Choices Due to Fluctuation of Petrol Price, a paper presented at 49th European Congress of the Regional Science Association International, 2009.
- 6) http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000006.html.
- 7) Uchida, K., Sumalee, A., Watling, D. and Connors, R.: A study on network design problems for multi-modal networks by probit-based stochastic user equilibrium, *Networks and Spatial Economics*, Vol.7, pp.213-240, 2007.
- 8) 藤井聡: 総合的交通政策としてのモビリティ・マネジメント: ソフト施策とハード施策の融合による持続的展開, 運輸政策研究, 10 (1), pp. 2-10, 2007.
- 9) 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 / IV-54, pp. 125-136, 2002.
- 10) <http://www.eccj.or.jp/fuel/97/p-07.html>.

EQUILIBRIUM TRAFFIC ASSIGNMENT MODELS BASED ON THE CO₂ EMISSION MINIMIZATION PRINCIPLE

Kenetsu UCHIDA

In this study, two equilibrium traffic assignment models based on the CO₂ emission minimization principle are presented. Since the CO₂ emission minimization principle is equivalent to the fuel consumption minimization principle, the models are formulated based on the fuel consumption minimization principle. Two models can estimate traffic situations where each driver minimizes his or her fuel consumption, and where the total fuel consumption in a road network is minimized. Numerical experiment is carried out to examine the property of the CO₂ emission minimization model where each driver minimizes his or her fuel consumption. As a result, both the total fuel consumption and the total travel time decrease by about 10% compared with those from user equilibrium assignment model.