

車種別均衡配分モデルに関する 実証的な研究

河上省吾*・徐 志敏**・広嶋康裕***

本研究は2車種均衡配分モデルの実用性の検討を行ったものである。まず、交通調査データにより提案した大型車と普通車の2車種のBPR型リンクコスト関数のパラメータの推定を行い、著者らの示した均衡解の唯一条件が現実性をもつことを示す。次に車種別均衡モデルを実際の交通配分問題に適用し、アルゴリズムの収束性と均衡解の唯一性および現況再現性を有することを確認している。さらに、本モデルが変動需要の場合にも拡張できることを示している。

Keywords : two-vehicle class traffic assignment, user equilibrium with fixed demands, link performance function, elastic demand

1. はじめに

交通均衡理論を利用した交通量配分手法に関しては理論的な面と実証的な面から数多くの研究がなされてきて、かなり実用的な段階に達しているといえる。しかし、既存の均衡交通量配分手法のほとんどは走行特性と経路選択基準が異なる大型車と普通車などの多車種交通量を等価交通量(PCU)に換算し、配分対象の自動車交通量を均一車種と考えている。その考え方は均衡配分手法を簡略化し、道路計画における道路網の各区間の容量面での検討や道路交通サービス水準の評価に際してある程度正確な情報を提供できるが、大型車と普通車といった車種別の走行特性や経路選択基準の相違および道路の大型車通行禁止のような交通規制を正確に反映できない。このため交通均衡モデルの配分精度の向上をさらに追求するには、異なる車種クラスを同じように扱う従来の配分方法は妥当ではなくなる。また、大型車の経路選択に影響を及ぼすような交通規制や大型車の分布パターンを変えるような土地利用規制など、沿道環境あるいは貨物輸送環境の改善を直接の目的とした対策の評価のためには、それらの実施に伴う車種別道路リンク交通量および所要時間の変化の予測が必要不可欠であり、換算率で交通需要を一律に扱う従来の配分方法では不十分である。

このように車種別配分は交通現象の正確な記述の面でも評価情報の利用の面でも有意義であるが、車種別配分交通量を求めるために、従来の配分手法の適用に際して、車種別OD交通量を等価交通量に換算せずに、車種が異なれば別のOD交通量であると考えて配分を行うことが考えられる。これらが可能であるためには、特定の

リンク交通量のOD構成がわかること、すなわち、OD別経路交通量が唯一に求められることが必要である。しかし、利用者均衡配分問題ではリンク交通量は唯一に決められるが、経路交通量は唯一に決められないという性質があるため、唯一の均衡車種別リンク交通量が求められず、このような考えでは問題を解決できない。

Dafermos^{1),2)}, Daganzo³⁾らは車種別のリンクコスト関数を設定することによって、多車種が同一道路リンク共用すること(車種間の相互作用ともいうが)を単車種のリンク相互作用に置き換えて均衡問題として解く手法を提案した。ただし、車種間の相互作用が一般的に非対称であるため、リンク間相互作用のある均衡問題に変換した場合、リンクコスト関数も非対称的となり、均衡解の唯一性が問題となる。その後の研究(Smith⁴⁾, Dafermos⁵⁾, Fisk⁶⁾, Braess⁷⁾)によって相互作用が相対的に弱いものであれば、均衡解が唯一となることが明らかにされた。しかし、車種間の相互作用は一般的に強い非対称性をもつため、この条件は常に満足されないのである。この条件はかなり厳しすぎる十分条件で必要条件ではないことがその後の研究⁸⁾によって明らかにされている。相互作用が強い非対称性をもって、唯一の均衡解が求められたとの報告もいくつかある⁹⁾。車種別均衡モデルの解が唯一となる必要かつ十分条件は明確にされていないため、リンクコスト関数が強い非対称性をもつ場合、均衡解が唯一となるかどうか個々に確かめるしかないのが現状である。

前述のように、車種別の配分は重要な意味をもつが、今の段階では交通現象の正確な記述および実用面から、車種を大型車と普通車といった2大クラスに分ければ十分と考えられる。このようなことを考慮して、著者¹⁰⁾らは大型車と普通車の2車種だけの場合においては、均衡解の唯一性の十分条件は緩くできることを理論的に明らかにしている。

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工博 (株)建設技術研究所

*** 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系

こうして、Dafermos らの定式化以来、非対称リンクコスト関数の均衡問題およびその車種別均衡配分問題への適用に関して主に理論的な面から数多くの研究がなされてきた。これらの研究成果は車種別の均衡配分問題の解決に一步近づいたといえるが、これまでの車種別均衡配分モデルの研究は、このようにすれば車種別の配分交通量が求められるとか、車種別リンクコスト関数をこのように設定すれば、均衡解が唯一となるとかという理論的あるいは数値テストなどの検討にとどまっているものが多い。車種別の均衡配分モデルを実用化するためには、どのように車種別のリンクコスト関数を設定すれば、実際の交通現象を正確に記述でき、かつ均衡解が唯一となり、モデルの現況再現性がよくなるかということに関する実証的な研究にもっと力を入れなければならない。

そこで、本研究では大型車と普通車の2車種配分問題を考え、交通実態調査を通じて著者らが提案した大型車と普通車の2車種のリンクコスト関数のパラメーターの推定を行い、著者らによって明らかにされた緩和された均衡解の唯一条件が現実性のあるものであることを示す。そして、車種別均衡モデルを実際配分問題に適用し、アルゴリズムの収束性と均衡解の唯一性を確認するとともにモデルの現況再現性を確かめることを目的としている。さらに本モデルは変動需要の場合にも拡張できることを示す。

2. 車種別均衡配分モデルの定式化と解の性質

本論文が用いる車種別均衡配分モデルの基本的な考え方は、多車種が混合している道路を車種の数だけの単車種リンクに分解し、同一リンクを走る車種間の相互影響を単車種のリンク間の相互影響とみなし^{1),2)}、リンク間の相互影響を考慮した単車種均衡モデルを修正することによって、モデルを定式化するものである。こうして、車種別均衡配分はリンク間相互影響の存在する単車種均衡配分の研究成果を利用できるが、ここで両者の区別を明確にしておく必要があると思われる。単車種のリンク間相互影響のある均衡状態では、あるリンク a のコスト t_a がそのリンクの交通量 x_a だけではなく、信号交差点で各方向の交通流の相互影響や対向車の影響によって、他のリンク交通量 x_i にも依存するが、一車種の均衡の場合、ある OD 間のすべての利用者が経験するコストは同一となる。一方、リンク間の相互影響のない車種別均衡の場合は、多車種が共用しているリンク a を車種の数だけの車種別専用リンクに分解し、それらの車種別専用リンク間の相互影響を考えることを通じて、多車種の道路リンク共用を反映できると仮定している。そうすることによって、車種別の均衡問題をリンク間に相互影響のある単車種均衡問題に変換できるが、ここでの「リンク間の相互影響」とは真のリンク間の相互影響ではなく、

走行特性や経路選択基準が異なる数々の車種が同一の道路リンクを共用することの一つの表現に過ぎない。したがって、均衡状態に達したとき、ある OD 間では、同じ車種のすべての利用者が経験するコストは同じだが、異なる車種の利用者が経験するコストはそれぞれ異なるのである。つまり、車種別に Wardrop 均衡原則が成り立っていると仮定しているのである。なお、本研究の最初の目的は車種別の配分方法を開発することであるから、モデルが複雑になりすぎないために現段階では信号交差点での交通流の相互影響や対向車の影響によるリンク間の相互作用といった本来的な意味でのリンク相互作用は考慮しないことにしている。

上述の考え方に基づいて2車種別の均衡状態を数式で表現すれば、次のようになる。

$$(C_{kj}^s - \mu_j^s) \cdot f_{kj}^s = 0 \quad \forall r, s, k, j \dots\dots\dots (1a)$$

$$C_{kj}^s - \mu_j^s \geq 0 \quad \forall r, s, k, j \dots\dots\dots (1b)$$

$$f_{kj}^s \geq 0 \quad \forall r, s, k, j \dots\dots\dots (1c)$$

$$\sum_{kj} f_{kj}^s = q_{rs}^s \quad \forall r, s, j \dots\dots\dots (1d)$$

$$C_{kj}^s = \sum_{aj} t_{aj} \cdot \delta_{aj, kj}^s \quad \forall r, s, k, j \dots\dots\dots (1e)$$

$$t_{aj} = t_{aj}(x_{aj}, x_{ai}) \quad \forall a, j \dots\dots\dots (1f)$$

$$x_{aj} = \sum_r \sum_s f_{kj}^s \cdot \delta_{aj, kj}^s \quad \forall a, j \dots\dots\dots (1g)$$

ここに

- C_{kj}^s : 車種 j の OD ペア rs 間の経路 k_j の所要時間
- μ_j^s : 車種 j の OD ペア rs 間の最短所要時間
- f_{kj}^s : 車種 j の OD ペア rs 間の経路 k_j のフロー
- q_{rs}^s : OD ペア rs 間の車種 j の交通需要量
- t_{aj} : リンク a 上の車種 j (あるいはリンク aj) のコスト (所要時間)
- x_{aj} : リンク a 上の車種 j (あるいはリンク aj) の交通量
- $\delta_{aj, kj}^s = \begin{cases} 1, & \text{リンク } aj \text{ がパス } kj \text{ 上にあるとき} \\ 0, & \text{リンク } aj \text{ がパス } kj \text{ 上にないとき} \end{cases}$

$\forall j, i \in T, C \quad j \neq i$ (T は大型車 C は普通車を表す)
 本研究では大型車と普通車の2車種しか考えていないため、式 (1f) で示しているようにリンクコスト t_{aj} は車種別交通量 x_{aj} , x_{ai} だけの関数となる。

このように、車種別の均衡配分問題を非対称リンクコスト関数をもつ単車種均衡配分問題に変換することができ、これ以後均衡解の存在性、唯一性および計算法に関する議論はすべてこの単車種の非対称リンクコスト関数をもつ均衡問題と同様に扱うことになる。

非対称リンクコスト関数をもつ固定需要型確定均衡問題における解の存在性と唯一性に関する今までの研究成果を整理すると以下ようになる。

- (I) リンクコスト関数が単調増加で連続微分可能で

あれば、均衡解が存在する⁷⁾。

(II) 解の唯一性の十分条件は以下のとおりである：

$$\frac{\partial t_a(x)}{\partial x_a} > \frac{\partial t_a(x)}{\partial x_b} \quad \forall b \neq a \dots\dots\dots (2)$$

ここで、不等式の左辺の偏微分は主限界影響といい、右辺の偏微分は副限界影響という。この条件はつまり副限界影響が主限界影響よりはるかに小さくしなければならないことを意味している¹¹⁾。

一般にリンクコスト関数は単調増加で、連続微分可能となるように設定されているから、(I) の条件は簡単に満足されるが、問題となるのは (II) の条件である。後者は単車種のリンク間相互作用が存在する場合においては満たされる可能性があるが、車種別の均衡問題において、この条件を満足するためには、普通車のリンクコストに対する大型車の限界影響、すなわち、大型車交通量の1単位増加に対する普通車の平均コスト(所要時間)の増加比が普通車交通量のそれより大きくなってはいけなことを意味し、その条件は明らかに非現実的である。

これに対し、著者ら¹⁰⁾は2車種配分問題の場合において、(II) が以下のような条件まで緩和できることを明らかにしている。

$$\frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{ac}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{ar}} + \frac{\partial t_{ar}}{\partial x_{ac}} \right) \dots\dots\dots (3a)$$

$$\frac{\partial t_{ar}}{\partial x_{ar}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{ar}} + \frac{\partial t_{ar}}{\partial x_{ac}} \right) \dots\dots\dots (3b)$$

この条件はすべての副限界影響が主限界影響よりはるかに小さくならなければならないことを要求せず、副限界影響の平均がすべての主限界影響より小さければよいので、(II) よりも緩くなっていることがわかる。

式(3a)と(3b)は大型車と普通車といった2車種均衡配分において均衡解が唯一的に存在する一つの十分条件であるが、必要条件ではなく、この条件が満足されないことは均衡解が唯一でないことを意味しない。式(3a)と(3b)が満足されていない場合でも唯一の均衡解が存在する可能性があるのである。しかし、その場合には均衡解が唯一になるかどうかは個々に調べるしかない。現時点では車種別均衡配分問題における均衡解が唯一となる必要かつ十分条件はまだ明確になっていないのである。また、式(3a)と(3b)にはリンク交通量が含まれているため、配分を行う前に均衡解が唯一かどうかの判断基準として使えない。唯一均衡解がどうかの判断基準として(3a)と(3b)からリンク交通量が含まれない簡略な判断条件式を求める必要がある。

これまでの議論からわかるように、車種別の均衡モデルの実用化において最も重要なのはリンクコスト関数の設定であると考えられる。リンクコスト関数の設定が実際の交通現象を十分に反映しなければならぬと同時に、均衡解が唯一に存在しなければ問題の解決につな

がらない。次に車種別のリンクコスト関数の設定およびパラメーターの推定について述べることにする。

3. 車種別リンクコスト関数の設定およびパラメーターの推定

(1) 車種間相互影響を考慮した車種別リンクコスト関数

本研究では著者ら¹⁰⁾が提案したBPR型車種別リンクコスト関数を用いることにしている。

$$t_{ar} = t_{ar}^0 \left[1.0 + \alpha_r \left(\frac{x_{ar} + \eta x_{ac}}{C_{ar}} \right)^{\beta_r} \right] + F_{ar} \dots\dots\dots (4a)$$

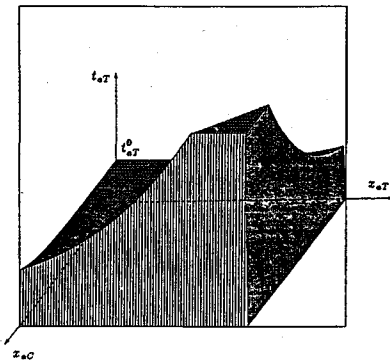
$$t_{ac} = t_{ac}^0 \left[1.0 + \alpha_c \left(\frac{x_{ac} + \xi x_{ar}}{C_{ac}} \right)^{\beta_c} \right] + F_{ac} \dots\dots\dots (4b)$$

ここに t_{ar}^0 , t_{ac}^0 はそれぞれ大型車と普通車がリンク a を自由走行で通過するときの平均所要時間である。 C_{ar} , C_{ac} はそれぞれ大型車および普通車を単位としたリンク容量である。 η , ξ はそれぞれ大型車の走行に対する普通車の影響度と普通車の走行に対する大型車の影響度を反映する係数である。 α_r , β_r と α_c , β_c はそれぞれ大型車と普通車のリンクコスト関数のパラメーターである。そして、 F_{ar} , F_{ac} はそれぞれ有料道路の場合の大型車と普通車の料金抵抗である。ご承知のように、この関数は信号交差点で遅れも考慮した一種の経験的なリンクコスト関数である。単車種のBPR型リンクコスト関数と違って、車種別リンクコスト関数は曲線ではなく、曲面になる。式(4a)のイメージ図を図-1に示す。

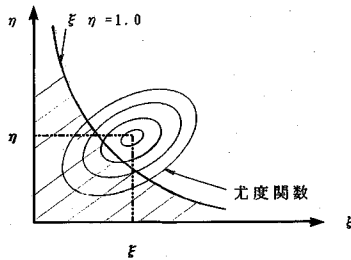
なお、式(4a), (4b)に示したリンクコスト関数 $t_{ar}(\cdot)$, $t_{ac}(\cdot)$ はリンク交通量に対して単調増加関数で連続微分可能であるため、均衡解が存在することになるが、大型車リンクと普通車リンクの相互影響は対称なものではない ($\partial t_{ar} / \partial x_{ac} \neq \partial t_{ac} / \partial x_{ar}$)。参考文献10)により、車種別リンクコスト関数が式(4a)と(4b)のような形である場合には、式(3)の唯一均衡解の十分条件はさらに近似的に簡略化でき、車種間の相互影響パラメーターだけと関係することになり $\eta \xi < 1.0$ となる。すなわち、 $\eta \xi < 1.0$ という近似十分条件が満足される場合には、式(3)の均衡解の唯一条件も近似的に満足され、ネットワークのすべてのリンクに対して式(3)が満足されることになる。次には実際の道路交通流調査を通じて η , ξ の値を推定し、この近似十分条件が現実的であるかどうかを確かめることにする。

(2) 車種間の相互影響を考慮した車種別リンクコスト関数のパラメーター推定¹²⁾

本研究では式(4a)と(4b)の車種別リンクコスト関数の中のパラメーター α_r , β_r , η と α_c , β_c , ξ を決定するために、名古屋市で大型車の混入率の高い道路区間である国道23号線浜田一大高間(延長3.0km, 信号交差点4つ)を調査区間とし、平日十数時間にわたって



図一 車種別リンクコスト関数のイメージ図



図二 $\eta\xi < 1.0$ の確率説明図

調査を行った。調査においては2台のビデオカメラを区間の起点と終点に設置して、カメラ内蔵の時計を同調させ、時間帯別の交通流の実態を撮影し、車両が起点と終点を通過する時刻を記録した。それと同時にその時間帯の大型車と普通車の交通量をカウンターで記録した。車種の分類は大型車=(4t以上の貨物車+バス+大型特殊車)で、それ以外の車両を普通車とした。実験によって $t_{ar}^0=4.0$ 分、 $t_{ac}^0=3.2$ 分であると測定した。そして、ビデオ映像から14時間帯におき、大型車と普通車それぞれ70台ずつをランダムにサンプリングし、14時間帯の交通量 x_{ar} 、 x_{ac} およびそれに対応した車種別平均走行時間 t_{ar} 、 t_{ac} を表一に示している。ここでは、ある時間帯の車種別平均走行時間は5台の同一車種車両の実測走行時間の平均値を用いた。サンプル数5台は必ずしも多くないが、交通状況の変化の少ない短い時間帯を選んでいるので、5台の測定結果から得られた平均所要時間の信頼性は十分高いと考える。また、昭和60年度の道路交通センサス報告書¹³⁾から、国道23号大高一浜田3.0km間の平均的な時間交通容量は $C_{ac}=3000$ 台/hであるので、沿道条件を考慮して大型車を単位とした交通容量は $C_{ar}=1500$ 台/hであると推定した。

実測の大型車、普通車別の交通量 x_{ar} 、 x_{ac} と走行時間 t_{ar} 、 t_{ac} のサンプリング14ペアのデータを用いて非線形回帰分析¹⁴⁾により式(4a)と(4b)のパラメーター α_r 、 β_r 、 η と α_c 、 β_c 、 ξ を同時に推定した結果を表二

表一 車種別平均交通量と走行時間の観測値

No	x_{ac} (台/h)	t_{ac} (min)	x_{ar} (台/h)	t_{ar} (min)
1	1320.0	10.09	1392.0	8.58
2	1557.0	9.61	1260.0	9.59
3	2130.0	9.54	1025.0	9.22
4	1836.0	9.49	1410.0	9.44
5	1785.0	9.41	1401.0	9.97
6	1473.0	9.37	1422.0	8.61
7	2058.0	9.24	936.0	10.86
8	1848.0	9.03	1332.0	9.09
9	1404.0	6.13	1236.0	5.82
10	1254.0	4.47	993.0	5.21
11	1515.0	4.41	1116.0	5.72
12	1212.0	4.40	1197.0	4.51
13	1290.0	4.22	1260.0	4.72
14	1239.0	4.18	1197.0	4.56

表二 パラメーターの推定結果

車種	パラメータ	推定値	確率95%の信頼区間	相関係数
普通車	α_c	0.70	0.50~0.90	0.81
	ξ	1.50	1.40~1.60	
	β_c	4.00	3.70~4.30	
大型車	α_r	0.17	0.14~0.20	0.79
	η	0.65	0.45~0.85	
	β_r	4.50	4.00~5.00	

に示す。この表にはパラメーターが互いに独立な正規分布していると仮定した場合の信頼区間をも示している。相関係数はそれぞれ0.81、0.79であり、ほぼ良好な値となっている。

アメリカ道路局によって与えられた等価交通量のBPR関数では α 値が0.15で、 β 値が4.0となっているが、今回の調査で推定した大型車と普通車の α 値はそれとは異なっているが、 β 値はいずれも4.0に近い値が得られている。すなわち日本の道路に対してBPR型リンクコスト関数を採用する場合、少なくとも β 値に関してはアメリカと同じ4.0前後となっていることが今回の実態調査結果から確認されたわけである。

非線形回帰分析で得られた η と ξ の推定値 η と ξ はそれぞれ1.50、0.65で、 $\eta\xi=0.975 < 1.0$ となっている。しかしながら、これらの推定値は、いうまでもなく確率変数である標本統計量(推定量)の一つの実現値ではない。したがって、これだけでは母数が $\eta\xi < 1.0$ の条件を満足しているか保証はない。そこで、本研究では η および ξ に関する推定量の組合せを考えると、それらは二変量正規分布に従うと仮定することができる。そして、表二に示した推定値 η および ξ はそれらの1つの実現値である。これより、 η および ξ という推定値が得られたとき、母数が η および ξ という値である尤度は、期待値が η および ξ で非線形回帰分析の結果から得られた分散共分散の推定値を分散共分散とする二変量正規分布に従うといえる。したがって、この二変量正規分布の密

度関数を図一2に示すような $\eta\xi < 1.0$ の領域について積分すれば、母数が $\eta\xi < 1.0$ である尤度、すなわち確率が求められることになる。

以上の計算をモンテカルロ・シミュレーションによって行った結果、 $\eta\xi < 1.0$ となる確率は 53% となり、車種別交通均衡の唯一解が存在する近似十分条件はある程度現実性をもつことがわかった。4. ではこの調査結果の推定値を用い、車種別均衡モデルを名古屋市の実際配分問題に適用する。それによって、 $\eta\xi < 1.0$ の場合、アルゴリズムが唯一の均衡解に収束するかどうか、そして車種別均衡配分モデルが現況再現性があるかどうかを調べることにする。

4. 名古屋市への適用

(1) 入力データ

本節では著者らが提案した車種別リンクコスト関数と車種別均衡配分モデルを名古屋市主要幹線道路ネットワークに適用し、モデルの現況再現性および実用性を検討する。配分に際しては、自動車起終点調査 (OD) における名古屋市の 75 の小ゾーンを区ごとに集約して 16 ゾーンとした。また通過交通量および市域外流入交通量を考慮するために、それらの交通量をまとめて、市域外ゾーンとして 9 ゾーンに集約した。したがって、配分対象ゾーンは 25 ゾーンとなる。ただし、ここでは主要幹線道路以下の道路は配分対象ネットワークに含まれていないため、ゾーン内々交通量は主要幹線道路以外の道路を利用していると考え、配分対象から外している。

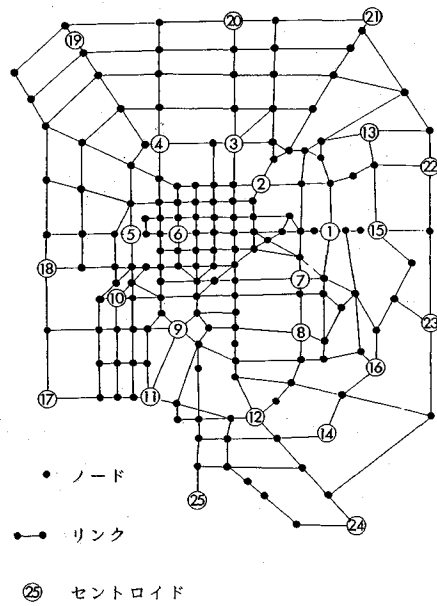
配分対象道路ネットワークの設定においては、ネットワークを簡略化するために平行している何本かの道路を一本のリンクにまとめた場合もある。また、域外セントロイドと市域とを結ぶリンクをアクセスリンク (仮想) として設定した。簡略化したネットワークの概略図は図一2のとおりである。道路ネットワークはノード数 181、リンク数 634 であり、名古屋市の主要幹線道路網にほぼ対応している。

この実証分析においては、昭和 60 年に実施された道路交通センサス自動車起終点調査¹³⁾車種別 OD データを利用している。車種別 OD の分類は乗用車+小型貨物車=普通車、普通貨物車+バス=大型車としている。ここで、路線バスはルートが決められているが、その交通量は相対的に小さいため、その影響を無視できると考えている。

本モデルの出力は全車種リンク交通量と大型車混入率である。そして、配分結果と主要幹線道路の交通センサスの実測値を比較してモデルの現況再現性を検討する。

(2) 計算アルゴリズム

本研究では計算手法としていわゆる対角化法を用いている。これは大型車と普通車との相互干渉を考慮した均



図一3 簡略化した名古屋市道路ネットワーク

衡解に至る各ステップにおいて、問題を 2 つの小問題に分割し、大型車交通システム S_T においては普通車リンク交通量を固定し、また普通車交通システム S_C においては大型車リンク交通量を固定することによって、通常のリンク間相互影響のない利用者均衡問題に変換し Beckmann 型モデルを利用するものである。

大型車の均衡は普通車リンク交通量が一定の場合、以下のような Beckmann 型数理最適化問題として定式化できる。

$$\text{Min } Z_T^n(X_T) = \sum_a \int_0^{x_{aT}^n} t_{aT}(\omega, x_{aC}^n) d\omega \dots \dots \dots (5a)$$

subject to

$$\sum_k f_{kT}^n = q_{rT}^n \forall r, s \in S_T \dots \dots \dots (5b)$$

$$f_{kT}^n \geq 0 \forall r, s, k \in S_T \dots \dots \dots (5c)$$

$$x_{aT}^n = \sum_r \sum_s \sum_{kT} f_{kT}^n \cdot \delta_{aT, kT}^n \dots \dots \dots (5d)$$

ここに、 x_{aC}^n はステップ n において固定された普通車のリンク交通量である。

同様に、普通車の均衡は大型車リンク交通量が一定の場合、以下のような数理最適化問題として定式化できる。

$$\text{Min } Z_C^n(X_C) = \sum_a \int_0^{x_{aC}^n} t_{aC}(\omega, x_{aT}^n) d\omega \dots \dots \dots (6a)$$

subject to

$$\sum_k f_{kC}^n = q_{rC}^n \forall r, s \in S_C \dots \dots \dots (6b)$$

$$f_{kC}^n \geq 0 \forall r, s, k \in S_C \dots \dots \dots (6c)$$

$$x_{aC}^n = \sum_r \sum_s \sum_{kC} f_{kC}^n \cdot \delta_{aC, kC}^n \dots \dots \dots (6d)$$

ここに、 x_{aT}^n はステップ n において固定された大型車

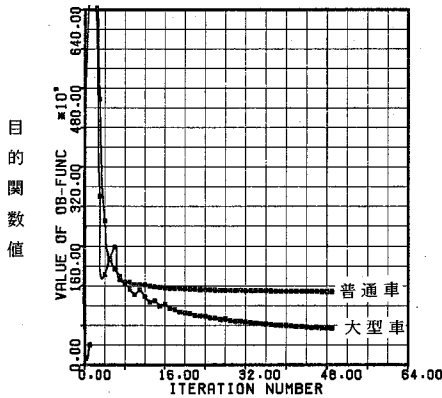


図-4 繰り返し計算の収束状況

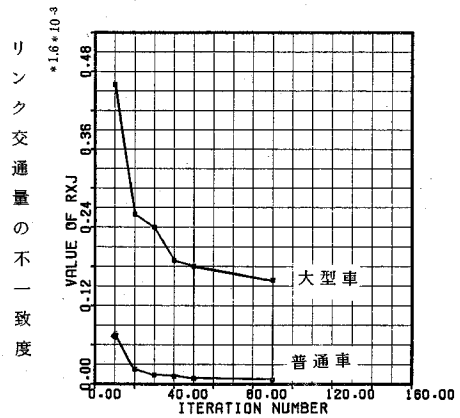


図-5 均衡解の唯一性の検討結果

のリンク交通量である。

この計算アルゴリズムの流れは以下のようにまとめられる。

STEP 0: 可能な大型車および普通車の交通量ベクトル $\{x_{aT}\}$ および $\{x_{aC}\}$ を探し出し、これらを初期値とし、 $n=1$ とする。

STEP 1: リンクコストを更新する。

$$t_{aj} = t_{aj}(x_{aj}^n, x_{ai}^n) \\ \forall j, i \in T, C \quad j \neq i$$

STEP 2: 修正方向を決定する。

車種別 OD フロー $\{q_{rs}^T\}, \{q_{rs}^C\}$ をリンクコスト $\{t_{aT}\}^n, \{t_{aC}\}^n$ に基づいて All-or-nothing 法でそれぞれ大型車と普通車ネットワークに負荷し、仮リンクフローパターン $\{y_{aT}\}^n, \{y_{aC}\}^n$ を求める。

STEP 3: move size を決定する。

以下のような目的関数が最小になるように α_{nj} を決める

$$\text{Min } Z_j(\alpha_{nj}) = \sum_{aj} \int_0^{x_{aj}^n + \alpha_{nj}(y_{aj}^n - x_{aj}^n)} t_{aj}(\omega, x_{aj}^n) d\omega, \quad 0 \leq \alpha_{nj} \leq 1$$

STEP 4: リンクフローの修正を行う。

$\{x_{aj}\}^{n+1} = \{x_{aj}\}^n + \alpha_{nj}(\{y_{aj}\}^n - \{x_{aj}\}^n)$ で車種別のリンク交通量を修正する。

STEP 5: 収束判定を行う。

$\{x_{aj}\}^{n+1} \approx \{x_{aj}\}^n$ となれば、計算を終了し、そうでなければ $n=n+1$ として STEP 1 へ戻り、計算を継続する。

本研究では計算の効率化を図るために、対角化法の外部繰り返し計算 1 回ごとに Frank-Wolfe 法の内部繰り返し計算 (STEP 2) としては All-or-nothing 法の繰り返し回数を 1 回とした。

(3) 適用結果

繰り返し計算の収束状況を示す車種別目的関数値の変

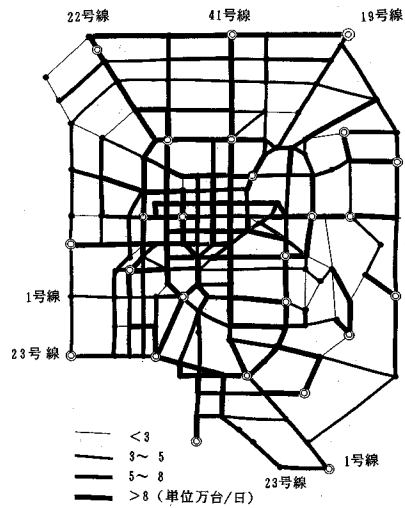


図-6 全車種配分交通量図

化と繰り返し計算回数との関係を図-4 に示す。本研究の配分対象となった名古屋市の主要幹線道路網において車種別均衡配分は外部繰り返し計算が 30~40 回くらいで目的関数値がほぼ安定しており、繰り返し計算が収束したとみてよいと思われる。

そして、均衡解が唯一になっているかどうか調べるために、本研究では対角化法の STEP 2 での move size α_n を Frank-Wolfe 法で決める場合を手法 1 とし、 $\alpha_{n1} = 1/n$ (n は繰り返し計算回数、この場合の対角化法の収束性が証明されている) とする場合を手法 2 として、両手法で得られた車種別リンク交通量が繰り返し計算回数の増加につれて一致する傾向がみられるかどうかを調べてみた。両手法で求めたリンク交通量の差を示す指標を以下のように定義した。

$$RXJ = \sum_{aj} \frac{(x_{aj}^{(1)} - x_{aj}^{(2)})^2}{(x_{aj}^{(1)} \cdot x_{aj}^{(2)})} \cdot \frac{1}{\text{リンク数}} \dots \dots \dots (7)$$

$RXJ \sim n$ の関係は図-5 に示されている。式 (7) は異

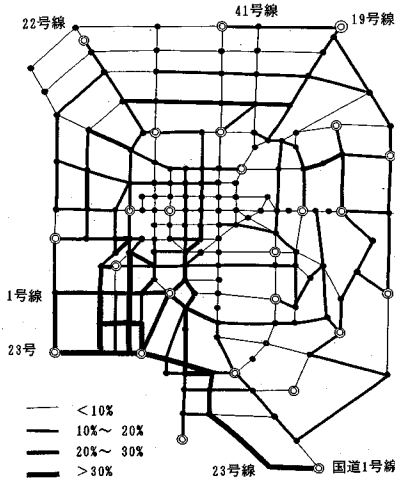


図-7 リンク別大型車混入率図

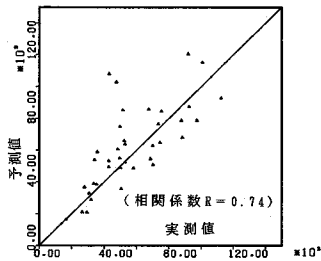


図-8 全車種交通量の実測値との適合度

なる初期条件と計算方法で求めたリンクフローを比較しているもので、収束判定基準とは違うのである。両ケースにおいて収束するまでにたどる経路は異なるが、車種別予測リンク交通量の差を示す指標 RXJ 値が繰り返し計算回数の増加に伴って着実に小さくなっていることがわかる。この結果だけでは均衡解が唯一であるとは断定できないが、均衡解が唯一でなければ、このような結果が得られないと思われる。

配分結果の車種別リンク交通量を合計したリンク全車種交通量と大型車混入率を図-6と図-7に示す。

図-6では配分日リンク交通量が3万台以下、3~5万台、5~8万台、8万台以上の4段階に分けて線の太さでリンク交通量を示している。この図により市中心部と主要幹線道路に沿ったリンクでの線が太く、交通量が集中していることがわかる。本モデルの配分結果は名古屋市の道路交通実態とほぼ合っているといえよう。また、図-7は予測大型車混入率を10%以下、10~20%、20%~30%、30%以上の4段階に分けてリンクの太さで示したものである。この図より、市中心部のリンクが細くて、大型車の混入率が低いことを示しており、逆に国道23号、1号線の港区、熱田区付近のリンク（セントロイド9、10、11、12周辺）が太く、大型車の混入率が高

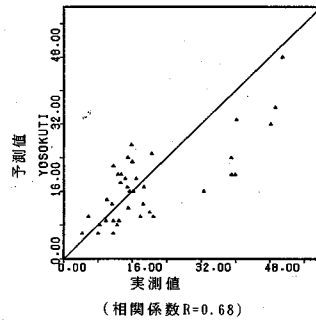


図-9 大型車混入率の実測値との適合度

いことを示していることが読みとれる。これより、この結果も名古屋の交通実態とほぼ合っているといえよう。

さらに、名古屋市域を通る主要幹線道路国道1号線、19号線、22号線、23号線、41号線など全車種交通量と大型車混入率の実測値が入りできる38リンクについて全車種リンク交通量と大型車混入率の予測値と実測値を比較した。図-8の全車種リンク交通量の実測値と予測値を示す点はほぼ45°線に沿って均一的に散らばっているのに対して、図-9の大型車混入率の実測値と予測値を示す点は混入率の大きい区域で45°線の下方向へ偏る傾向がある。つまり、実測混入率の大きい道路において予測リンク大型車混入率は実測値を過小予測する傾向がある。この現象は現在の大型車経路選択基準において大型車の幹線志向性が十分に反映されていないことに原因があると考えられる。ただし、相関係数はそれぞれ0.74と0.68となっており、全体的にみればある程度の再現性をもっているといえる。

なお、本研究では換算率を用いた従来の均衡配分法をも名古屋市幹線道路網に適用したが、大型車の換算率を2.0とした場合の配分結果と実測値（前述の38本の主要幹線道路リンク）の相関係数は0.75となっている。全車種リンク交通量の相関係数をみただけでは車種別の均衡配分は従来の均衡配分と比べてほぼ同じ数字になっている。これは、多車種ネットワークを単車種ネットワークに等価的に分解して処理する本車種別均衡モデルの基本的な考え方は従来の交通均衡モデルの現況再現性を損なっていないことを示している。さらに、車種別均衡配分モデルは走行特性や経路選択基準および料金抵抗における車種別の相違を反映できることから、モデルを改良することによって予測精度の向上を図ることがまだ可能と思われる。

以上、固定需要の車種別均衡モデルの理論体系と現況再現性について検討し、モデルが一定の実用性があることを明らかにしてきたが、以下では、このモデルは変動需要の場合にも拡張できることを示すことにする。

この変動需要型の車種別均衡モデルは車種別のOD

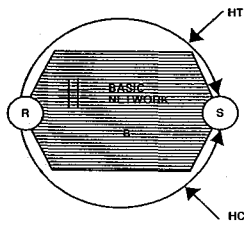


図-10 仮想ネットワーク概念図

フローがわからない場合あるいは社会経済環境の変化に伴う車種別の交通需要を予測する場合に重要である。

5. 変動需要型の車種別均衡配分への拡張に関する検討¹⁵⁾

まず、図-10のような一 OD ペアのネットワークを考え、枠内のネットワークを基本ネットワーク B とする。いま、OD ペア rs 間に 2 本の仮想的な大型車超過交通量リンク HT および普通車交通量リンク HC を設定することによって、変動需要型の車種別均衡問題を仮想ネットワーク H における固定需要型車種別均衡問題に変換する。

基本ネットワーク B の車種別リンクコスト関数は式 (4a), (4b) によって定義されるとし、大型車と普通車の交通需要は式 (8) に示す指数型関数で与えられるとする。

$$q_{rs}^T = k_T^r \exp(\theta_T t_{HT}^T) \forall r, s \dots (8a)$$

$$q_{rs}^C = k_C^r \exp(\theta_C t_{HC}^C) \forall r, s \dots (8b)$$

ここに k_T^r, k_C^r は発ゾーン r の大型車と普通車の発生交通量で、 θ_T, θ_C は OD ペア rs 間の大型車と普通車に対するゾーン間交通魅力度を示す正の係数である。 t_{HT}^T, t_{HC}^C は OD ペア rs 間の大型車と普通車の最小コストであるが、交通均衡状態においては、次のように考えることによって仮想リンク HT, HC のリンクコストでもあると解釈することができる。すなわち、OD ペア rs 間の車種別交通需要量の上限をそれぞれ $\bar{q}_{rs}^T, \bar{q}_{rs}^C$ とすると、仮想リンク HT, HC のリンク交通量 x_{HT}, x_{HC} を以下のように表すことができる。

$$x_{HT} = \bar{q}_{rs}^T - q_{rs}^T \dots (9a)$$

$$x_{HC} = \bar{q}_{rs}^C - q_{rs}^C \dots (9b)$$

そして、式 (8) と式 (9) により、次式が得られるが、

$$t_{HT}^T = -\frac{1}{\theta_T} \ln \left(\frac{\bar{q}_{rs}^T - x_{HT}}{k_T^r} \right) \dots (10a)$$

$$t_{HC}^C = -\frac{1}{\theta_C} \ln \left(\frac{\bar{q}_{rs}^C - x_{HC}}{k_C^r} \right) \dots (10b)$$

ここでは一般的に $k_T^r > \bar{q}_{rs}^T, k_C^r > \bar{q}_{rs}^C$ となっているため、 $t_{HT}^T, t_{HC}^C > 0$ となる。

また、式 (10) を微分すれば式 (11) が得られるが、

$$\frac{\partial t_{HT}^T}{\partial x_{HT}} = \frac{1}{\theta_T} \left(\frac{k_T^r}{\bar{q}_{rs}^T - x_{HT}} \right) > 0 \dots (11a)$$

$$\frac{\partial t_{HC}^C}{\partial x_{HC}} = \frac{1}{\theta_C} \left(\frac{k_C^r}{\bar{q}_{rs}^C - x_{HC}} \right) > 0 \dots (11b)$$

この式の 2 つの偏微分は常に正であるため、式 (10) はリンクコストがリンク交通量の増加関数で与えられることを表しており、仮想リンク HT, HC のコスト関数であると解釈できるわけである。ただし、ここでは同じ OD 間の車種別の交通需要間には相互影響がないと仮定している。こうすることによって、仮想ネットワーク H における固定需要 ($\bar{q}_{rs}^T, \bar{q}_{rs}^C$) の車種別交通均衡問題「経路を変更することによって自分のコストを削減できる利用者がいない状態」は基本ネットワーク B における変動需要型の車種別均衡問題と等価になるのである。

式 (4) と式 (10) で定義されたリンクコスト関数は厳密に単調増加であり、均衡解の存在性に問題はない。一方、唯一性の条件は等価仮想ネットワーク H において、固定需要の場合と同様にリンクコスト関数のヤコビ行列 $\nabla_x T$ が正定となる条件を示せばよいのである¹⁰⁾。

$$\nabla_x T = \begin{bmatrix} \nabla^2 t & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial t_{HT}}{\partial x_{HT}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial t_{HC}}{\partial x_{HC}} \end{bmatrix} \dots (12)$$

ここに小行列 $\nabla^2 t$ は式 (13) に示される基本ネットワーク B のリンクコスト関数のヤコビ行列である。

$$\nabla^2 t = \begin{bmatrix} \nabla_{1c,1r} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \nabla_{ac,ar} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \nabla_{nc,nr} \end{bmatrix} \dots (13)$$

式 (12) に示しているように $\nabla_x T$ の対角線上の最後の 2 つの偏微分は常に正であるため、 $\nabla_x T$ の正定条件は小行列 $\nabla^2 t$ のそれと同じになることが分かる。参考文献 10) から、その十分条件は式 (3) となる。すなわち、交通需要が式 (10) のような指数関数で与えられる場合、変動需要型の車種別均衡解が唯一的に存在する十分条件は固定需要の場合と同じになる。そして、車種別リンクコスト関数が式 (4) で与えられる場合には、参考文献 10) に従うと、その十分条件は近似的にさらに簡略化でき、 $\eta_\xi < 1.0$ となる。

ここでは一 OD ペアのネットワークを例に変動需要の場合の車種別交通均衡の解が唯一的に存在する条件を示したが、この結果は多 OD の場合まで拡張することができる。また、需要関数も指数型関数だけでなく、それ以外にも重力モデル、弾性モデルなど図-10 のよう

な仮想ネットワークを作れるような需要関数でさえあれば、本研究に示された十分条件が成り立つことも容易に証明できる。

6. おわりに

本研究では、従来の車種別均衡配分モデルを整理したうえで、実際の交通流についての調査を行い、車種別リンクコスト関数のパラメーターの非線形最小二乗法推定とその信頼区間を推定した。その結果、BPR型のリンクコスト関数を採用した場合、日本の道路でも指数 β 値が4.0前後になっていることがわかった。しかも、著者らによって明らかにされた車種別均衡モデルの唯一解が存在する十分条件が一定の現実性をもつことが実証された。そして、車種別均衡モデルを名古屋市の実際配分に適用し、対角化法の収束性を確かめるとともに、全車種交通量と大型車の混入率の予測値を実測値と比較し、車種別均衡モデルは一定の現況再現性をもっていることを示した。さらに、大型車と普通車といった2車種別均衡モデルを変動需要の場合に拡張し、需要関数が一定の条件を満足すれば、唯一解の十分条件は固定需要の場合と同じであることを明らかにした。

実際の交通現象をさらに詳しく記述し、車種別の交通量をより正確に予測するための今後の課題として、理論的な面では車種別の経路選択特性に関してさらに研究を行い、大型車と普通車の走行特性の相違やそれらの相互干渉をさらに的確に反映できるリンク走行関数を設定し、車種別利用車均衡の定式化を修正することと、本モデルを半動的（時間帯別）なモデルに改造して予測精度の向上を図ることなどが挙げられる。また、モデルの実用化についてはさらに多くの事例についての調査を通じて、車種別リンクコスト関数のパラメーターの推定を行うなど、実証的な研究を通して、モデルの実用性を確かめたり、モデルを改善したりする必要があると思われる。

謝辞：本研究のまとめに際して、林良嗣名古屋大学助教授、松井寛名古屋工業大学教授、荻野弘豊田工業高専教授をはじめとする名古屋交通問題研究会（座長：河上省吾）に貴重な指摘と助言を頂いたことに対して深く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Dafermos, S.C.: An extended traffic assignment model with applications to two-way traffic, *Trans. Sci.*, Vol. 5, No.4, pp.366~389, 1971.
- 2) Dafermos, S.C.: The traffic assignment problem for multiclass user transportation networks, *Trans. Sci.*, Vol.6, No.1, pp.73~87, 1972.
- 3) Daganzo, C.F.: Stochastic network equilibrium with multiple vehicle types and asymmetric, indefinite link cost jacobians, *Transp. Sci.*, Vol. 17, No. 3, pp.282~300, 1983.
- 4) Smith, M.J.: The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria, *Transpn. Res.*, Vol.13 B, pp.295~304, 1979.
- 5) Dafermos, S.: Relaxation algorithms for the general asymmetric traffic equilibrium problem, *Transp. Sci.*, Vol. 16, No. 2, pp.231~240, 1982.
- 6) Fisk, C. and Nguyen, S.: Existence and uniqueness properties of an asymmetric two-mode equilibrium model, *Transpn. Sci.*, Vol.15, No.4, 1981.
- 7) Braess, D. and Koch, G.: On the existence of equilibria in asymmetrical multiclass-user transportation networks, *Trans. Sci.*, Vol.13, pp.56~63, 1979.
- 8) Nagurney, A.: Computational comparisons of algorithm for general asymmetric traffic equilibrium problems with fixed and elastic demand, *Transpn. Res.*, Vol.20 B, No. 1, pp. 78~84, 1986.
- 9) Mahmassani, H.S. and Mouskos, K.C.: Some numerical results on the diagonalization algorithm for network assignment with asymmetric interactions between cars and trucks, *Transpn. Res.*, Vol. 22 B. pp.275~293, 1988.
- 10) 河上・広島・徐：大型車と普通車を分離した車種別均衡交通量配分法に関する検討，土木計画学研究・論文集，No.7, pp.243~250, 1989.12.
- 11) Sheffi, Y.: *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, Inc., pp.203~229, 1985.
- 12) 陸・徐・河上：車種間の相互作用を考慮した車種別リンクコスト関数パラメータの同定に関する実証的な研究，第45回土木学会年次大会講演概要集。
- 13) 建設省中部地方建設局編：昭和60年度道路交通センサス報告書，昭和62年1月。
- 14) 小柳・中川：SALS入門，東京大学出版会，1990。
- 15) 徐・河上・広島：変動需要の場合の車種別均衡モデル，第45回土木学会年次大会講演概要集。

(1990.8.2受付)

A PRACTICAL STUDY ON THE APPLICATION OF TWO-CLASS EQUILIBRIUM TRAFFIC ASSIGNMENT METHOD

Shogo KAWAKAMI, Z. M. XU
and Yasuhiro HIROBATA

A fixed demand two-vehicle class traffic assignment method with which the separation of passenger car link flows and truck link flows becomes possible is discussed. The parameters of link performance function with asymmetric interaction between cars and trucks are determined by practical investigation. Then the application characteristic of the method is investigated by applying it to the assignment problem of Nagoya city. Furthermore, the model is extended to the elastic demand case, and a sufficient condition for unique solution is shown.
