

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

A STUDY ON THE MULTI-CLASS TRAFFIC ASSIGNMENT METHOD
WITH SEPARATION OF CAR AND TRUCK LINK FLOWS

河上省吾*、広島康裕**、徐志敏***

By S. KAWAKAMI, Y. HIROBATA and Z. XU

A traffic assignment method is discussed with which the separation of passenger car link flows and truck link flows becomes possible. By considering the multi-class traffic flows(cars and trucks) as two single class traffic flows and establishing a BPR type link performance function with asymmetric interaction between cars and trucks, we are able to show a sufficient condition to get a unique solution for this problem. Then a numerical experiment is performed to test the applicability of the diagonalization algorithm to the problem, and the convergence and effectiveness of the algorithm are shown.

1. はじめに

道路網における交通量の配分問題に関しては、従来より数多くの理論的、実証的な研究の成果が積み重ねられてきており、既にいくつかの実用的な配分手法が開発されている。これらは、道路計画における道路網の各区間の容量面での検討のためや道路交通サービス水準の評価のために必要な情報を与えるという目的にとっては一定のレベルに達していると考えられる。

しかしながら、従来の配分手法の適用の多くは、

配分対象交通需要を一律に扱っており、実際の道路交通流においては異なった車種が混在しているという事実に対する考慮の仕方が極めて不十分である。このことは、得られた配分結果の現象記述の正確さ及びその評価情報としての有用性という2つの面において問題があると考えられる。

まず、現象記述の正確さという面に関しては、次の理由から問題がある。すなわち、同一の道路リンクを走行する場合でも大型車が普通車かといった車種によってその走行特性は異なるし、車種によってルート選択基準も異なると考えられる。また、現実の道路網においては、大型車通行禁止など、ある車種は通行できないといった区間が存在する。したがって、同一のODペアであっても、その利用経路は車種によって異なるはずである。さらに、一般には地域内各ゾーンごとの土地利用状況の相違により、ODペアが異なればそれらの車種構成も異なっているは

-
- | | | |
|----------|-----|--------------------------|
| * 正 会 員 | 工 博 | 名古屋大学教授
工学部土木工学科 |
| ** 正 会 員 | 工 博 | 豊橋技術科学大学助教授
建設工学系 |
| *** 学生会員 | 工 修 | 名古屋大学大学院博士後期
課程土木工学専攻 |

ずである。これらのことを考慮するとき、配分対象交通需要を一律に扱うというのでは、現実における配分交通量を十分正確に記述することはできないと考えるのは妥当であろうと思われる。

次に、従来の配分手法による配分結果の評価情報としての有用性に関しては以下の点で問題がある。すなわち、一般に都市内の道路計画においては、道路交通量が沿道環境や沿道土地利用に及ぼす影響を考慮することが不可欠となるが、その影響の大きさは大型車と普通車とでは大きく異なるので、その影響を評価するためには、配分交通量を車種別に求めなければならない。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配分交通量の変化の予測が不可欠であり、交通需要を一律に扱うのは不十分である。

以上のことより、本研究では、大型車と普通車を分離した車種別配分交通量をできるだけ合理的に求めることができるような配分手法の開発を目的とする。以下2. では従来の研究をレビューし、本研究の特徴を述べる。3. では車種別配分問題を大型車と普通車との相互干渉を考えた決定論的な利用者均衡配分問題として定式化する。4. と5. では大型車と普通車の特性とその相互干渉を反映できるリンク走行費用関数を設定し、その場合における唯一な均衡解の存在条件を求める。6. ではFrank-Wolfe法を基礎とした対角化法を仮想的なネットワークに適用し、アルゴリズムの有効性を確かめる。

2. 従来の研究と本研究の特徴

交通量配分によく使われているWardrop等時間原則（決定論的な利用者均衡配分原則）での交通均衡状態とは、経路変更することによって自分の旅行時間を短縮できるドライバーがいない状態である。ただし、ここでの等時間原則は車種別の走行特性の違いをいっさい考慮せず、全ての車両を同じものとしている。このため、従来のWardrop等時間原則をベースとする配分手法もすべての車種を乗用車交通量に換算した等価交通量を配分し、等価リンク交通量を求めているのである。しかし、ここでの「等価」は走行特性に関して等価ということを意味しており

、異なる車種の経路選択基準の相違や沿道環境影響評価を考えるときにはこの「等価」の概念はもはや妥当ではない。

ところで、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構成が分ること、すなわち、OD別経路交通量が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的に決められるが、経路交通量は唯一的に決められないという性質があるため、この様な考えでは問題は解決できない。

そこで、Dafermos^{11,2)}は以下のような車種別の交通量配分法を提案している。そこでは、まず、実際の交通システムを $S = (G, D, T)$ によって表す。ここに、 $G = (N, L)$ はネットワークを表し、 N はノード集合を、 L はリンク集合を表す。 D はOD交通需要集合で、 T はリンク費用関数集合である次に、利用者を大型車(T)と普通車(C)のようにクラス別に分け、大型車と普通車はそれに対応するネットワークコピー G_T, G_C だけを利用すると仮定する。そうすることによって、大型車と普通車が混合している実際の交通システム S を等価な単車種仮想交通システム $S = (G, D, T)$ ($S =$ 普通車システム S_C + 大型車システム S_T)に変換できる。いま、実際の交通システム S における車種別のリンク走行費用関数は以下のように考えられる。

$$l_a^c = l_a^c(x_a^c, x_a^T) \quad \forall a \in S \quad (2.1a)$$

$$l_a^T = l_a^T(x_a^T, x_a^c) \quad \forall a \in S \quad (2.1b)$$

ここに、添字 c は普通車、 T は大型車を表し、 t_a^c 、 t_a^T はそれぞれリンク a を走る普通車と大型車の走行費用で、 x_a^c 、 x_a^T はそれぞれリンク a の普通車交通量と大型車交通量である。

一方、変換された後の等価システム S におけるリンク走行費用関数は以下のように表される。これはリンク相互作用がある場合のリンク走行費用関数に他ならない。

$$l_{ac} = l_{ac}(x_{ac}, x_{aT}) \quad \forall ac \in S \quad (2.2a)$$

$$l_{aT} = l_{aT}(x_{aT}, x_{ac}) \quad \forall aT \in S \quad (2.2b)$$

ここに、 ac は普通車リンク、 aT は大型車リンクを表

し、 t_{ac} 、 t_{aT} はそれぞれの仮想のリンクの走行費用、 x_{ac} 、 x_{aT} はそれぞれの仮想リンク交通量である。明らかに、 S と S が等価となるためには

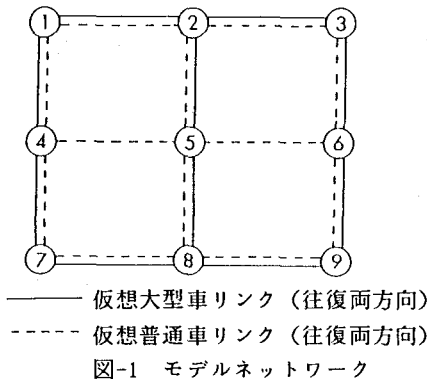
$$t_{ac} = t_a^c ; \quad t_{aT} = t_a^T \quad (2.3)$$

でなければならない。すなわち、式(2.3)を満たすように、リンク走行費用関数が設定されなければならない。

以上のように、変換されたシステムに対してリンク相互干渉のある利用者均衡モデルを適用すれば、車種別のリンク交通量を求めることができるわけである。

この方法が有する問題の一つは、大型車と普通車の混合流の場合、その相互干渉は非対称でかつ普通車リンク ac のコスト t_{ac} に対する大型車リンク交通量 x_{aT} の影響は主影響 x_{ac} よりも大きいため、一般的な場合に唯一の均衡解が存在する保証がないことである。Mahmassani³⁾は上記の手法を用いて車種別の交通量配分テストを行い、唯一の均衡解が得られたと報告しているが、どの様な場合に唯一の均衡解が保証されるかについての議論は十分でない。

そこで、本研究はDafermosの考え方を基本にし、車種別配分問題をリンク間相互干渉のある均衡問題に変換して解くことにするが、以下のようにこの方法の改善と問題点の解決に努める。(1)実際のネットワーク(図-1参照)を仮想ネットワークに変換する際に、交通規制を組込むようにする。たとえば、図-1におけるノード4-5、5-6間のリンクは大型車通行が禁止されていると想定し、そのリンクは大型



車ネットワークコピーに現れないようにする。(2)大型車と普通車といった車種別配分を行う際に、車種別の走行特性だけでなく、経路選択基準の違い

をも考慮する。たとえば、ネットワークに有料道路が含まれている場合、大型車と普通車とでは料金抵抗は異なると考えられるので、本研究では車種別のリンク走行費用関数の設定において大型車と普通車と異なる料金抵抗を考慮することにする。(3)今まで明確にされていなかったこの種の問題の均衡解の唯一性について、本研究で設定するリンク走行費用関数の場合における唯一の均衡解の存在条件を示し、テストネットワークに対する数値計算により、その有効性を確かめるものとする。

3. 問題の定式化

上述したように車種別配分問題はリンク相互作用のある単車種配分問題に変換できるが、大型車と普通車の走行特性や経路選択基準はそれぞれ異なるため、均衡状態に達したとき、大型車と普通車はそれぞれ等時間原則に従っているとしても、同じOD間の最短所要時間は必ずしも一致するとは限らない。このような均衡状態は以下のような数式で表現できる

(1)大型車均衡状態

$$(C_{kT}^{rs} - \mu_T^{rs}) \cdot f_{kT}^{rs} = 0 \quad \forall r, s, k_T \quad (3.1a)$$

$$C_{kT}^{rs} - \mu_T^{rs} \geq 0 \quad \forall r, s, k_T \quad (3.1b)$$

$$f_{kT}^{rs} \geq 0 \quad \forall r, s, k_T \quad (3.1c)$$

$$\sum_{k_T} f_{kT}^{rs} = q_{rs}^T \quad \forall r, s \quad (3.1d)$$

$$C_{kT}^{rs} = \sum_{aT} t_{aT} \cdot \delta_{aT, kT}^{rs} \quad \forall r, s, k_T \quad (3.1e)$$

$$t_{aT} = t_{aT}(x_{aT}, x_{ac}) \quad \forall aT \quad (3.1f)$$

$$x_{aT} = \sum_r \sum_s \sum_{k_T} f_{kT}^{rs} \cdot \delta_{aT, kT}^{rs} \quad (3.1g)$$

$$r, s, k_T, aT \in S_T$$

ここに

C_{kT}^{rs} : 大型車ODペア r, s 間の k_T 経路の所要時間

μ_T^{rs} : 大型車ODペア r, s 間の最短所要時間

f_{kT}^{rs} : 大型車ODペア r, s 間の経路 k_T のフロー

q_{rs}^T : ODペア r, s 間の大型車交通需要量

t_{aT} : リンク aT の所要時間

x_{aT} : リンク aT 上の交通量

$$\delta_{ac, kT}^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{リンク} aT \text{ がパス} kT \text{ 上にあるとき} \\ 0, & \text{リンク} aT \text{ がパス} kT \text{ 上にないとき} \end{cases}$$

(2) 普通車均衡状態

$$(C_{kc}^{rs} - \mu_c^{rs}) \cdot f_{kc}^{rs} = 0 \quad \forall r, s, kc \quad (3.2a)$$

$$C_{kc}^{rs} - \mu_c^{rs} \geq 0 \quad \forall r, s, kc \quad (3.2b)$$

$$f_{kc}^{rs} \geq 0 \quad \forall r, s, kc \quad (3.2c)$$

$$\sum_{kc} f_{kc}^{rs} = q_{rs}^c \quad \forall r, s \quad (3.2d)$$

$$C_{kc}^{rs} = \sum_{ac} t_{ac} \cdot \delta_{ac,k}^{rs} \quad \forall r, s, kc \quad (3.2e)$$

$$t_{ac} = t_{ac}(x_{ac}, x_{aT}) \quad \forall ac \quad (3.2f)$$

$$x_{ac} = \sum_r \sum_s \sum_{kc} f_{kc}^{rs} \cdot \delta_{ac,k}^{rs} \quad (3.2g)$$

ここに

$$r, s, kc, ac \in S_c$$

C_{kc}^{rs} : 普通車OD ペア r, s 間の kc 経路の所要時間

μ_c^{rs} : 普通車OD ペア r, s 間の最短所要時間

f_{kc}^{rs} : 普通車OD ペア r, s 間の経路 k のフロー

q_{rs}^c : OD ペア r, s 間の大型車交通需要量

t_{ac} : リンク ac の所要時間

x_{ac} : リンク ac 上の交通量

$$\delta_{aT,kT}^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{リンク } aT \text{ がパス } kT \text{ 上にあるとき} \\ 0, & \text{リンク } aT \text{ がパス } kT \text{ 上にないとき} \end{cases}$$

4. 走行費用関数の設定

本研究ではBPR型リンク走行費用関数を参考に大型車と普通車の走行特性と料金抵抗の相違および車種間の相互作用を考慮できるよう走行費用関数を以下のように設定する。

$$t_{aT} = t_{aT}^0 \left[1.0 + \alpha_T \left(\frac{x_{aT} + \eta x_{ac}}{C_{aT}} \right)^{\beta_T} \right] + \frac{F_{aT}}{\gamma_T} \quad (4.1a)$$

$$t_{ac} = t_{ac}^0 \left[1.0 + \alpha_c \left(\frac{x_{ac} + \xi x_{aT}}{C_{ac}} \right)^{\beta_c} \right] + \frac{F_{ac}}{\gamma_c} \quad (4.1b)$$

ここに t_{aT}^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所要時間である。 C_{aT} 、 C_{ac} はそれぞれ大型車を単位としたリンク容量と普通車を単位としたリンク容量である。 F_{aT} 、 F_{ac} はリンク a が有料道路である場合の普通車と大型車の通行料で、 γ_c 、 γ_T はそれぞれ普通車と大型車の時間価値である。 η 、 ξ はそれぞれ大型車システムに対する普通車の影響度と普通車システムに対する大型車の影響度を反映する係数である。 α_T 、 β_T

α_c 、 β_c は大型車と普通車の走行費用関数のパラメータである。なお、式(4.1a)、(4.1b)に示したリンク走行費用関数では $\frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{aT}} \neq \frac{\partial t_{aT}}{\partial x_{ac}}$ であるため、大型車リンクと普通車リンクの相互作用は対称なものではないが、 $t_{aT}(\cdot)$ 、 $t_{ac}(\cdot)$ 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。

5. 均衡解の唯一性の検討

Sheffi⁴⁾ は Dafermos, Smith⁵⁾ の研究成果を踏まえ、リンク相互作用が存在する場合の均衡解の存在性と唯一性の一般的な議論を行い、唯一の均衡解が存在する十分条件を以下のように与えている。

1) ネットワークのリンク走行費用関数 $t_a(\cdot)$ がリンク交通量に対して単調増加で連続微分可能であること。すなわち $\frac{\partial t_{aT}}{\partial x_{aT}} > 0$ 、 $\frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{ac}} > 0$

2) リンク走行費用関数のヤコビ行列 $\nabla_X \vec{t}$ が正定であること。

4章で設定したリンク走行費用関数が1)の条件を満足しているのは明らかであるが、2)の条件(リンク走行費用関数のヤコビ行列の正定性)を一般に満すとはいえない。そこで以下には走行費用関数が式(4.1a)と(4.1b)のように定義される場合にヤコビ行列が正定となる条件を示すことにする。

いま、 $S = (G, D, T)$ を対象に、相互干渉のあるリンクが隣接するように番号付けると、リンク走行費用関数のヤコビ行列 $\nabla_X \vec{t}$ は次のように書くことができる。

$$\nabla_X \vec{t} = \begin{bmatrix} \nabla_{1c,1T} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \nabla_{ac,aT} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \nabla_{nc,nT} \end{bmatrix} \quad (5.1a)$$

ただし、ここに $\nabla_{ac,aT}$ は 2×2 の小行列で

$$\nabla_{ac,aT} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{ac}} & \frac{\partial t_{ac}}{\partial x_{aT}} \\ \frac{\partial t_{aT}}{\partial x_{ac}} & \frac{\partial t_{aT}}{\partial x_{aT}} \end{bmatrix} \quad (5.1b)$$

$\nabla_X \vec{t}$ が正定となる条件は、

$$Y^T \cdot \nabla_X \vec{t} \cdot Y > 0 \quad (5.2)$$

が任意の非零ベクトル Y に対して成立することである。

る。式(5.1a)から明らかであるように、 $\nabla_X \bar{l}$ の対角線上以外のブロックマトリックスはすべて0マトリックスとなっているため、対角線上のブロックマトリックス $\nabla_{ac,aT}$ がすべて正定であれば、式(5.2)が成立することになる。 $\nabla_{ac,aT}$ の正定性の判定に次の式を用いる。

$$Y_a^T \cdot \nabla_{ac,aT} \cdot Y_a > 0 \quad (5.3a)$$

式(5.3a)を展開すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} (y_1, y_2) \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}} & \frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} \\ \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} & \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \\ = \frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}} y_1^2 + \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}} y_2^2 + \left(\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} + \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} \right) y_1 y_2 \end{aligned} \quad (5.3b)$$

ここで、絶対不等式 $2y_1 y_2 > -(y_1^2 + y_2^2)$ (5.3c) を式(5.3b)に代入すると、次式となる。

$$\begin{aligned} Y_a^T \cdot \nabla_{ac,aT} \cdot Y_a > \left[\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} + \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} \right) \right] y_1^2 \\ + \left[\frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} + \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} \right) \right] y_2^2 \end{aligned} \quad (5.4)$$

式(5.4)から $\nabla_{ac,aT}$ が正定となる条件は

$$\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} + \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} \right) \quad (5.5a)$$

$$\frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} + \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} \right) \quad (5.5b)$$

式(5.5a, b)は $\nabla_X \bar{l}$ が正定となる厳密な十分条件であるが、これらの式から均衡解が唯一となるためのリンク走行費用関数の条件を導くのは困難である。そこで、以下では一つの近似的条件を示すことにする。いま、式(5.5a)と(5.5b)をかけて、また絶対不等式(5.3c)を利用し整理すると、次の式が得られる。

$$\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}} \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}} > \frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} \frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} \quad (5.5c)$$

ここで、リンク走行費用関数が式(4.1a), (4.1b)で与えられるとき、各々の偏微分は以下ようになる

$$\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}} = \frac{\alpha_c \beta_c t_{ac}^0}{C_{ac}} \left[\frac{x_{ac} + \xi x_{aT}}{C_{ac}} \right]^{\beta_c - 1} \quad (5.6a)$$

$$\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{aT}} = \xi \frac{\alpha_c \beta_c t_{ac}^0}{C_{ac}} \left[\frac{x_{ac} + \xi x_{aT}}{C_{ac}} \right]^{\beta_c - 1} \quad (5.6b)$$

$$\frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{ac}} = \eta \frac{\alpha_T \beta_T t_{aT}^0}{C_{aT}} \left[\frac{x_{aT} + \eta x_{ac}}{C_{aT}} \right]^{\beta_T - 1} \quad (5.6c)$$

$$\frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}} = \frac{\alpha_T \beta_T t_{aT}^0}{C_{aT}} \left[\frac{x_{aT} + \eta x_{ac}}{C_{aT}} \right]^{\beta_T - 1} \quad (5.6d)$$

従って、(5.5c)が成立する条件は以下ようになる

$$\begin{aligned} (1 - \eta \xi) \frac{\alpha_c \alpha_T \beta_c \beta_T t_{ac}^0 t_{aT}^0}{C_{ac} C_{aT}} \times \\ \left[\frac{x_{ac} + \xi x_{aT}}{C_{ac}} \right]^{\beta_c - 1} \left[\frac{x_{ac} + \eta x_{aT}}{C_{ac}} \right]^{\beta_T - 1} > 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

上式から式(5.5c)が成立する条件は $1 - \eta \xi > 0$ となる。一般に $\xi > 1.0$ であるが、 $\eta < 1.0$ であるから、 $\eta \xi < 1.0$ という条件はかなり現実的であると考えられる。

ところで、式(5.5c)は(5.5a)と(5.5b)が同時に成立する必要条件で、十分条件ではない。しかし、ここでの偏微分は全て正であるし、 $\frac{\partial l_{aT}}{\partial x_{aT}}$ と $\frac{\partial l_{ac}}{\partial x_{ac}}$ の差はそれほど大きいとは考えられない。したがって、(5.5c)の左辺が右辺より十分に大きいときには(5.5a)と(5.5b)が同時に成立する可能性が高いと考えられるため、(5.7)は均衡解の唯一性を保証するための条件として用いることができる。

6. 計算アルゴリズム及び数値計算例

6.1 対角化法

3章で示した均衡式ではリンク間の相互干渉が非対称であるため、それを直接的にBeckmann型の等価数理最適化問題に変換し、Frank-Wolfe法を適用することによって解くという方法を採用することができない。このような問題を解くためのアルゴリズムは対角化法(緩和法)、線形化法、単純化分解法の三つあるが、このうち、対角化法は計算効率の良いFrank-Wolfe法を利用できるため使いやすいという特徴がある³⁾。よって、本研究でもそれを用いることにする。

対角化法は大型車と普通車の相互干渉を段階的に固定しながら、Beckmann型数理最適化問題を利用して均衡解へアプローチする手法である。つまり、大型車と普通車との相互干渉を考慮した均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、大型車システム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作用のない利用者均衡問題に変換し Beckmann型モデルを利用するのである。

大型車均衡問題は普通車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。

$$\text{Min } Z_T^n(X_T) = \sum_a \int_0^{x_{aT}^n} t_{aT}(\omega, x_{aT}^n) d\omega \quad (6.1a)$$

subject to

$$\sum_k f_{kT}^s = q_{rs}^T \quad \forall r, s \in S_T \quad (6.1b)$$

$$f_{kT}^s \geq 0 \quad \forall r, s, k \in S_T \quad (6.1c)$$

$$x_{aT} = \sum_r \sum_s \sum_{kT} f_{kT}^s \cdot \delta_{aT}^{rs, kT} \quad (6.1d)$$

ここに、 x_{aT}^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、普通車均衡問題は大型車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。

$$\text{Min } Z_C^n(X_C) = \sum_a \int_0^{x_{aC}^n} t_{aC}(\omega, x_{aC}^n) d\omega \quad (6.2a)$$

subject to

$$\sum_k f_{kC}^s = q_{rs}^C \quad \forall r, s \in S_C \quad (6.2b)$$

$$f_{kC}^s \geq 0 \quad \forall r, s, k \in S_C \quad (6.2c)$$

$$x_{aC} = \sum_r \sum_s \sum_{kC} f_{kC}^s \cdot \delta_{aC}^{rs, kC} \quad (6.2d)$$

ここに、 x_{aT}^n はステップnにおいて固定された大型車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。

STEP1: 可能な大型車及び普通車の交通量ベクトル $\{X_T\}$ 及び $\{X_C\}$ を探し出し、

これらを初期値とし、 $n=1$ とする。

STEP2: $\{X_C\}^n$ を固定のまま、Frank-Wolfe法で $\{X_T\}^{n+1}$ を求め、また $\{X_T\}^n$ を固定のまま $\{X_C\}^{n+1}$ を求める。

STEP3: $\{X_C^{n+1}\} = \{X_C^n\}$ 、 $\{X_T^{n+1}\} = \{X_T^n\}$ を満足すれば、計算を終了し、満足しなければ $n=n+1$ としてSTEP2へ戻り、計算を継続する。

6.2 数値計算例

車種別に分離した配分アルゴリズムの収束性と有効性を確かめるために、本研究では図-1に示したテストネットワークを対象として数値計算を行う。

6.2.1 リンク走行費用関数のパラメータ

現段階では走行費用関数のパラメータ推定に必要なデータが乏しいため、本研究では従来の研究を参考にしつつ、いくつかの仮定に基づき、以下のようにパラメータを設定する。式(4.1b)の普通車走行費用関数のパラメータ α_c 、 β_c としては、BPR関数と同じ値を与えるものとし、 $\alpha_c=0.15$ 、 $\beta_c=4.0$ とする。一方、大型車のリンク走行費用関数のパラメータは以下のように設定する。

- 1) 自由流の場合の普通車と大型車の走行速度はそれぞれ60km/hr、50km/hr⁷⁾であるとする。

これより、 $t_{aT}^0 = 1.2 t_{aC}^0$ となる。

- 2) リンク交通量が容量の1.2倍に達したときに完全拘束状態（大型車と普通車の走行速度が等しい状態なる）になると仮定する。すなわち、 $x_{aC} + \xi x_{aT} = 1.2 C_{aC}$ あるいは $x_{aT} + \eta \cdot x_{aC} = 1.2 C_{aT}$ となる場合、 $t_{aC} = t_{aT}$ となると仮定する。この二つの条件を式(4.1a)あるいは(4.1b)に代入すると $\alpha_T = 0.06$ が得られる。

β_T はBPR関数と同じ値として、4.0とする。 ξ は大型車の普通車への換算率に近いものであり、いまその値を1.50⁸⁾とする。一方、 η は普通車の大型車への換算率に近いものであり、その値を1/ ξ としてもよいが、4章に示された均衡解の唯一性条件を満たすよう $\eta = 0.45$ とする。この場合、 $1 - \eta \xi = 0.33 > 0$ である。

6.2.2 テストネットワーク

テストネットワークに関する諸元を表-1と表-2に

表-1 テストネットワークデータ

	No. of O-D pairs	No. of Nodes	No. of Links
G_C	2 (1, 9) (3, 7)	9	24
G_T	2 (1, 9) (3, 7)	9	20
G	4	18	44

示す。大型車ネットワーク G_T も普通車ネットワーク G_C もノード数は9で、 G_C のリンク数は24であるが、ノードペア4-5と5-6の間のリンクは大型車通行

禁止の道路と想定しているため、 G_T のリンク数は20となる。また、ノード2-5の間のリンクは有料道路であると想定し、この有料道路における普通車の料金抵抗の時間換算値 F_{ac}/γ_c の設定は表-2の通りとし、 $F_{aT}/\gamma_T=1.5F_{ac}/\gamma_c$ とする。

表-2 リンク番号とリンクデータ

Link No.	Node		$\frac{F_{ac}}{\gamma_c}$ min	自由流所要 時間(min)		リンク容量 (台/hr)	
	From	To		t_{ac}^0	t_{aT}^0	C_{ac}	C_{aT}
1	1	2	0.0	10.0	12.	1800	1000
2	2	3	0.0	10.0	12.	1800	1000
3	1	4	0.0	10.0	12.	1800	1000
4	2	5	2.0	8.0	10.	1800	1000
5	3	6	0.0	10.0	12.	1800	1000
6	4	5	0.0	9.8	-	1800	-
7	5	6	0.0	9.8	-	1800	-
8	4	7	0.0	10.0	12.	1800	1000
9	5	8	0.0	10.0	12.	1800	1000
10	6	9	0.0	10.0	12.	1800	1000
11	7	8	0.0	10.0	12.	1800	1000
12	8	9	0.0	10.0	12.	1800	1000

なお、同じノードペア間の両方向の道路リンクは同規格と仮定しているため、表-2には片方向リンクのデータのみを示している。

6.2.3 0-D 交通需要量

数値計算例では大型車も普通車も1-9、3-7の2つの0-Dペアの間に次のような交通需要があると仮定する。

$$q_{19}^T = 1000 \text{ 台}, q_{37}^T = 1000 \text{ 台 (大型車)}$$

$$q_{19}^c = 1500 \text{ 台}, q_{37}^c = 1500 \text{ 台 (普通車)}$$

6.2.4 数値解析結果

本研究では各ステップにおけるFrank-Wolfe法の繰返し回数を5回として計算し、対角化法の繰返し回数が20~30回くらいではほぼ安定した解が求められた。なお、この均衡解が唯一性をもつことは初期値を変えた計算によって確認している。結果としての車種別リンクフローと所要時間及びリンク交通量の構成比を表-3に示す。これより、リンク間で車種

別構成比が異なることがわかり、本方法の有用性を示している。また、均衡解が等時間原則を満たしているかどうかは図-2と図-3でチェックできる。例として普通車ネットワークが均衡状態に達したとき、0-Dペア1-9間の最短経路(1-2-5-8-9)所要時間は $\mu_{19}^c = 45.3$ であり、0-Dペア1-9間の利用されている経路の所要時間もほぼそれに等しく、利用されていない経路の所要時間はそれより大きくなっている。

表-3 車種別のリンクフローとリンク所要時間

No. link	x_{ac}	x_{aT}	$\frac{x_{aT}}{x_{ac}}$	t_{ac}	t_{aT}
1	792	545	0.7	11.5	12.4
2	0	453	-	10.0	12.1
3	707	907	1.3	12.7	13.6
4	1585	184	0.1	11.3	14.5
5	707	907	1.3	12.7	13.6
6	707	0	0	9.9	-
7	732	0	0	9.9	-
8	732	907	1.2	12.7	13.7
9	1535	184	0.1	11.5	12.4
10	732	907	1.2	12.7	13.7
11	0	454	-	10.0	12.1
12	767	546	0.7	11.0	12.5
13	0	453	-	10.0	12.1
14	792	545	0.7	11.0	12.5
15	0	0	-	10.0	12.0
16	0	0	-	10.0	12.0
17	0	0	-	10.0	12.0
18	732	0	0	9.9	-
19	707	0	0	9.9	-
20	0	0	-	10.0	12.0
21	0	0	-	10.0	12.0
22	0	0	-	10.0	12.0
23	767	546	0.7	11.0	12.5
24	0	454	-	10.0	12.0

一方、大型車ネットワークが均衡状態に達したとき、最短経路所要時間(1-2-3-6-9)は $\mu_{19}^T = 51.9$ となっている。すなわち、ネットワーク上の交通流が均衡状態に達したとき、同じOD間でも大型車と

普通車の最短所要時間は異なっている。また、2-5間の有料道路リンクは大型車交通量が少なく、普通車交通量が多いというように、大型車と普通車のルート選択基準の相違が現れている。

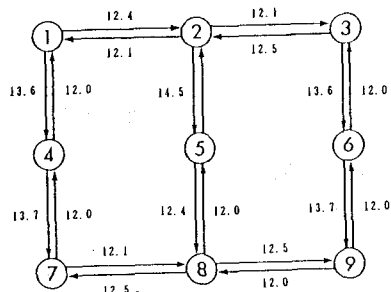


図-2 大型車リンク所要時間

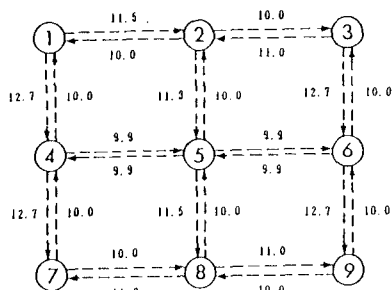


図-3 普通車リンク所要時間

7. おわりに

本研究ではリンク交通量を大型車と普通車の車種別に予測するために、車種による走行特性および経路選択基準の差異を考慮し、実際の交通流を相互干渉のある大型車と普通車の混合流と考え、その場合の利用者均衡原則を示した。そして、大型車と普通車の間の相互干渉を反映できるように修正したBPR型リンク走行費用関数を設定し、リンク走行費用関数が一定の条件を満たせば、唯一の均衡解が存在することを明らかにした。また、本手法は実際の都市道路網での交通規制、有料道路の料金体系の車種別配分交通量への影響をも考慮できることを示した。最後にテストネットワークに対して、対角化法を適用し、その有効性と均衡解の存在性を確かめた。

本研究では車種を大型車と普通車の2種類しか考えなかったが、本研究の概念を拡張すれば、全車種別の配分も可能である。本研究では等時間原則が成り立つことを前提にしたが、実際の現象を詳しく記

述し、車種別の交通量をより正確に予測するためには、大型車と普通車の走行特性と相互干渉を反映できるリンク走行関数の設定や異なるルート選択基準の利用者均衡の定式化に関してさらに工夫を加える必要があると思われる。しかし、本研究で示した手法は沿道環境の評価のために車種別交通量の予測が必要な場合に現時点では利用可能な手法の一つであると考えられる。

謝辞： 本研究を行う際、名古屋大学林良嗣助教授に有益な示唆をいただいたことを記し、謝意を表す。また、研究費の一部として文部省科学研究費補助金（重点領域研究：代表者・東京大学中村英夫教授）の援助を受けたことに謝意を表す。

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, 1971, pp. 366-389.
- 2) Dafermos, S.C.: The Traffic Assignment Problem for Multiclass User Transportation Networks. Trans. Sci., Vol. 6, No. 1, 1972, pp. 73-87.
- 3) 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., B. Vol. 22B, 1988, pp. 275-293.
- 4) Sheffi, Y.: Urban Transportation Networks 1985 pp. 203-229
- 5) Smith, M. J: The Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria. Transpn. Res. Vol. 13B, 1979, pp. 295-304.
- 6) Friesz T.L.: Transportation Network Equilibrium, Design, and Aggregation: Key Developments and Research Opportunities. Transpn. Res. 19A, 1985, pp. 413-428.
- 7) 社団法人 交通工学研究会編： 交通工学ハンドブック. 1984, pp. 137-147.
- 8) 平形、片倉、大蔵： 自動車交通流における大型車の影響。土木学会第40回年次学術講演会演概要集, 1985, pp. 443-444