

複数主体による交通ネットワーク運営における費用分担・評価ルール*

Rules on Cost Sharing and Performance Evaluation in Transportation Network Management Involving Plural Agents*

榎原弘之**・中嶋麻衣***

By Hiroyuki SAKAKIBARA**・Mai NAKASHIMA***

1. はじめに

本研究では、国等の上位機関（以下上位機関）、交通ネットワークを運営する複数の主体（以下運営者）、交通ネットワークの利用者（以下利用者）の3種類の主体から成るモデルにより、費用分担・評価ルールの検討を行う。また、提案したルールの下で、運営者がサービス水準を選択する非協力ゲームをモデル化し、分権的な意思決定によって上位機関の目標が達成されるための条件について分析を行う。

2. 費用分担・評価ルールの検討

(1) ルール設定上の考え方

上位機関が、交通ネットワークの運営を複数の運営者に委託するケースを想定する。その際上位機関は、交通ネットワークの運営のために必要な費用の分担方法（費用分担ルール）と、個々の運営者のパフォーマンスの評価方法（評価ルール）を事前に設定するものとする。各運営者は、評価ルールによって決定されるプロジェクト収入を獲得し、費用分担ルールによって規定される負担額を支出する。収入と負担額の差額が運営者の利得となる。運営者は、自らの利得を最大化するように、ネットワークを構成する各リンクのサービス水準に関する意思決定を行う。さらに利用者は、決定されたサービス水準の下で、OD交通需要と、利用経路を決定する。

費用分担・評価ルールの設定に当たって、上位機関は以下の政策目標を有するものとする。

ネットワーク上のOD交通需要を最大化する。

の条件下で、ネットワーク運営に要する費用を最小化する。

*キーワード：ネットワーク運営、複数主体、費用分担

**正会員，博士（工学），山口大学大学院理工学研究科

（山口県宇部市常盤台2-16-1，

TEL0836-85-9355、FAX0836-85-9301）

***学生会員，山口大学大学院理工学研究科

（山口県宇部市常盤台2-16-1）

(2) ネットワークのパフォーマンスと利用者の行動に関する設定

交通ネットワークは、 N 個のノードと L 個のリンクから構成されるものとし、個々のノード、リンクをそれぞれ i, j により表す。また、運営者の数を K とし、個々の運営者を k により表すとする。

リンク j のサービス水準を l_j により表し、2通りのサービス水準が存在するものとする。すなわち $l_j = 1$ または $l_j = 2$ とする。 $l_j = 1$ の場合のサービス水準は、 $l_j = 2$ の場合よりも高いものとする。一方サービス供給に要する費用は、 $l_j = 1$ の場合の方が大きいものとする。リンク j のサービス水準を $l_j = 2$ から $l_j = 1$ に改善するために要する費用を C_j とする。

ノード1,2間のOD交通需要を $Q_{1,2}$ とする。ノード1,2間の経路を m 、経路総数を M とする。 $Q_{1,2}$ は、次式で定義される $L_{1,2}^{OD}$ に依存して決定されるものとする。

$$L_m^r = \text{MAX}_{j=1, \dots, J} \delta_{j,m} l_j, \quad L_{1,2}^{OD} = \text{MIN}_{m=1, \dots, M} L_m^r$$

$$\delta_{j,m} = \begin{cases} 1 & (\text{経路}m\text{がリンク}j\text{を経由する場合}) \\ 0 & (\text{経路}m\text{がリンク}j\text{を経由しない場合}) \end{cases}$$

(2.1)

(2.1)式は、経路 m のサービス水準 L_m^r は経路 m を構成する各リンクのうちで最も低いサービス水準に一致し、ノード1,2間のOD交通需要はサービス水準の最も高い経路のみに依存して決定されることを意味する。さらに、利用者は、各経路のサービス水準を考慮して経路を選択するものと仮定する。

(3) 費用分担・評価ルールの設定

以上の想定に基づいて、上位機関が設定すべき費用分担・評価ルールについて検討する。(2.1)式より、ノード1,2間のOD交通需要はサービス水準が最も高い経路に依存して決定される。従って、OD交通需要を最大化するためには、ノード1,2間に少なくとも1つサービス水準の高い経路が確保される必要がある。そのため、各運営者が負担費用に応じてプロジェクト収入を獲得できるように、費用分担・評価ルールを設定する必要がある。

さらに、経路間の競合による重複投資を回避するためには、運営者の利得が利用者の経路選択から独立となる必要があると考えられる。

まず、以下のように費用分担ルールを設定する。
費用分担ルール

ノード1,2間に、リンクを共有しない経路が M 通り存在するとする。これらの経路の運営を運営者1,2に委託する場合、全経路 m ($m = 1, \dots, M$) について、一定の比率で運営者1,2に費用を分担する。すなわち、ノード1,2間の経路を構成するリンクに関する各運営者の分担費用は、以下のように決定される。

$$\text{運営者1の分担費用} = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J a \delta_{j,m} \phi_j C_j$$

$$\text{運営者2の分担費用} = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J (1-a) \delta_{j,m} \phi_j C_j$$

$$0 < a < 1$$

$$\delta_{j,m} = \begin{cases} 1 & \text{経路}m\text{がリンク}j\text{を経由する場合} \\ 0 & \text{経路}m\text{がリンク}j\text{を経由しない場合} \end{cases}$$

$$\phi_j = \begin{cases} 1 & (l_j = 1 \text{ の場合}) \\ 0 & (l_j = 2 \text{ の場合}) \end{cases} \quad (2.2)$$

(2.2)式は、ノード1,2間の経路を構成するリンク j のサービス水準を $l_j = 1$ とする場合に、運営者1,2に費用 C_j を a ： $(1-a)$ の比率で配分することを意味する。運営者1の費用の分担率 a は、任意の経路について一定であるとする。

次に、運営者のパフォーマンスの評価ルールを検討する。上位機関はOD交通を最大化する政策目標を有していることから、評価ルールによって決定される運営者の利得は、交通量に対して単調増加となる必要がある。経路 m の交通量を q_m とする。また交通量 q_m に対する上位機関の評価値は関数 $f(q_m) = gq_m$ ($g > 0$)により与えられるとする。運営者に対する評価ルールは次式で与えられる。
評価ルール

ノード1,2間の経路の運営を運営者1,2に委託する場合、運営者のプロジェクト収入は次式で決定される。

$$\text{運営者1のプロジェクト収入} = \sum_{m=1}^M a f(q_m)$$

$$\text{運営者2のプロジェクト収入} = \sum_{m=1}^M (1-a) f(q_m)$$

$$(2.3)$$

(2.3)式中の a は、(2.2)式中の a と同一である。以下では a を、費用・収入分担比率と呼ぶこととする。(2.2),(2.3)式で規定される費用分担・評価ルールの下では、各リンク

のサービス水準維持に要する費用と、交通量に比例したプロジェクト収入が、同じ比率で運営者1,2に配分される。さらに、本ルールでは任意の経路に同じ配分比率を適用している。これにより、OD交通需要が一定の場合、利用者の経路選択に関わらず、各運営者が獲得するプロジェクト収入 ((2.3)式) は一定となる。

3. 運営者の行動の分析

(1) ネットワーク運営のモデル化

本章では、筆者らの既往研究¹⁾を基にしつつ、より一般的な交通ネットワーク運営に対応したモデルを提示する。2. で提案した費用分担ルールにおいては、ノード1,2間の全経路について、運営者1,2に対する費用分担の比率を一定としている。運営者間の別払い (side payment²⁾) を行うことなく(2.2)式の費用分担を実現するためには、各運営者の管轄領域で要する費用の比率が、費用分担比率と一致するように管轄領域を決定する必要がある。すなわち、任意の経路 m について次式が成立する必要がある。

$$\sum_{j=1}^J \phi_j^1 \delta_{j,m} \phi_j C_j = \sum_{j=1}^J a \delta_{j,m} \phi_j C_j$$

$$\sum_{j=1}^J \phi_j^2 \delta_{j,m} \phi_j C_j = \sum_{j=1}^J (1-a) \delta_{j,m} \phi_j C_j \quad (3.1)$$

ここで $\phi_j^k = 1$ のとき、リンク j は運営者 k のみが管轄する

ものとする。このとき運営者 k はリンク j のサービス水準を自らの意思決定のみで選択することができる。また

$\phi_j^k = 0$ のときは、運営者 k はリンク j の運営に全く関与でき

ないものとする。一方 $0 < \phi_j^k < 1$ の場合は、リンク j は

運営者 k を含めた複数の運営者によって管轄されている。リンク j のサービス水準は、 j を管轄する各運営者が選択したサービス水準のうち、最も低いサービス水準に一致するとする。

$\phi_j^k > 0$ となるリンクの集合を Γ_k とする。各リンクに

ついて、運営者は2通りのサービス水準 ($l_j = 1, 2$) を選択することができる。従って、分権的な交通ネットワーク運営における各運営者の意思決定は、次のような戦略形非協力ゲーム)としてモデル化することができる。

分権的ネットワーク運営モデル

プレイヤー：運営者 k ($k = 1, \dots, K$)

戦略： $l_j = 1$ or 2 $j \in \Gamma_k$

利得関数：運営者のプロジェクト収入 ((2.3)式) と分担費用 ((2.2)式) の差額

戦略形非協力ゲームのプレイヤーである運営者 k は、プロジェクト収入と分担費用の差額として定義される利得関数を最大化するように、 $j \in \Gamma_k$ に含まれるリンク j のサービス水準を選択する。

上記の非協力ゲームにおいて、ナッシュ均衡³⁾となる戦略の組によって実現する、ネットワーク上の各リンクのサービス水準の組 $\{l_1, \dots, l_J\}$ を、ネットワークの「均衡サービス水準」と呼ぶこととする。均衡サービス水準は、費用分担・評価ルールの下で、分権的交通ネットワーク運営によって達成され得る安定的なサービス水準の組み合わせである。

上述の分権的交通ネットワーク運営モデルにおいて、次の定理が成立する。

定理 1

均衡サービス水準において、任意の経路 m を構成するリンクのサービス水準は、すべて $l_j = 1$ であるか、すべて $l_j = 2$ であるかのいずれかである。

定理1は、均衡サービス水準において、各経路を構成するリンクのサービス水準は同一となることを意味している。

あるネットワークにおいて、均衡サービス水準は複数存在し得る。そこで、すべての運営者の利得が、他の均衡サービス水準における利得を上回る均衡サービス水準を、「優位均衡サービス水準」と呼ぶこととする。優位均衡サービス水準は、ナッシュ均衡となる戦略の組のうち、他を利得支配³⁾する戦略の組によって実現するサービス水準である。優位均衡サービス水準が実現したとき、各運営者は、ネットワークの状態を他の均衡サービス水準に遷移させようとする動機が存在しない。

上位機関が集権的にネットワークを運営した場合は、各運営者の利得関数の総和を最大化するようにサービス水準を選択すると考えられる。このときに選択されるサービス水準の組を、「集権的サービス水準」と呼ぶこととする。優位均衡サービス水準と、集権的サービス水準が一致するとき、費用分担・評価ルールによって、上位機関の政策目標が実現されると判断できる。

(2) 単一ODペアにおける運営者の行動

図1のように、ノード1,2間に、経路が M 通り存在し、このネットワークを運営者1,2が運営する状況を想定する。2.で提案した費用分担・評価ルールの下では、各

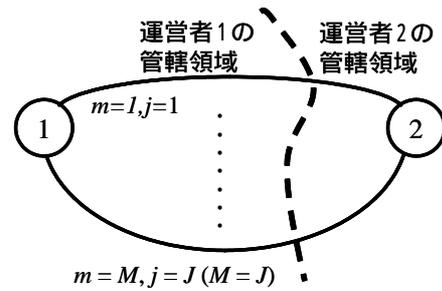


図1 単一ODペアの場合

運営者の利得は次のように決定される。

$$\begin{aligned} \text{運営者1の利得} &= \sum_{m=1}^M af(q_m) - \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J a\delta_{j,m}\phi_j C_j \\ &= a \left\{ gQ_{1,2} - \sum_{j=1}^J \phi_j C_j \right\} \end{aligned}$$

$$\text{運営者2の利得} = (1-a) \left\{ gQ_{1,2} - \sum_{j=1}^J \phi_j C_j \right\} \quad (3.2)$$

各運営者の利得は、ノード1,2間のOD交通需要 Q_{12} に依存し、各利用者の経路選択によって実現する経路交通量 q_m からは独立であることが分かる。このとき、集権的サービス水準において、 $l_j = 1$ となる経路が少なくとも1つ確保され、OD交通需要 Q_{12} が最大化される場合、優位均衡サービス水準は次式で与えられる。

$$\phi_j = \begin{cases} 1 & (C_j = \min_{j=1, \dots, J} C_j \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{その他のリンク}) \end{cases} \quad (3.3)$$

(3.3)式は、 J 本のリンク (M 通りの経路)のうち、 C_j が最小となるリンクにおいて $l_j = 1$ を選択し、その他のすべてのリンクにおいては $l_j = 2$ を選択することを意味する。すなわち、必要費用が最小となる経路のみ高いサービス水準を実現することにより、最少の費用でOD交通需要を最大化している。

以上より、単一ODペアにおいては、2.で提案した費用分担・評価ルールの下で実現する均衡サービス水準は、上位機関の政策目標を達成可能である。

(3) 複数ODペアにおける運営者の行動

一般に、同一リンクにおいて複数経路が重複するケースにおいては、外部性により、集権的サービス水準と、優位均衡サービス水準が一致しない可能性が高まると考えられる。そこで、図2に示すようなネットワークに費用分担・評価ルールを適用し、運営者の選択を分析する。

図2のネットワークにおいて、3つのノード1, 2, 3が存在し、そのうちノード1, 2間及びノード1, 3間にOD交通需要が存在するとする。またリンクは $j = 1, 2, 3, 4, 5$ の5本存在する。それぞれのODペアにおける経路を構成する

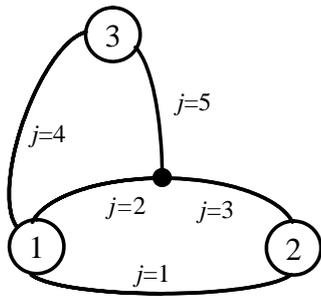


図2 複数ODペアのネットワーク例

表1 各経路の構成リンク

ODペア	経路1の構成リンク	経路2の構成リンク
1,2	$j=1$	$j=2,3$
1,3	$j=4$	$j=2,5$

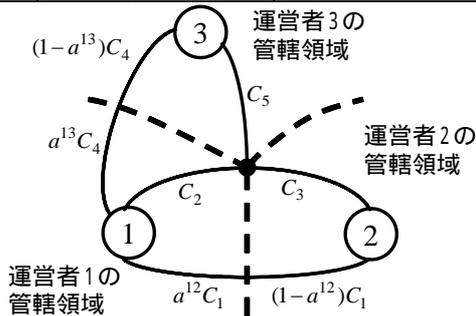


図3 運営者の管轄領域の設定

リンクを表1に示す。リンク2はノード1,2間及びノード1,3間の経路において経由されている。

図3は、費用分担・評価ルールに従って設定された各運営者の管轄領域の境界を示している。図中の a_{12} は運営者1,2間の費用・収入分担比率、 a_{13} は運営者1,3間の費用・収入分担比率である。ここで費用分担ルールより、次式が成立する。

$$\begin{aligned} C_2 &= a_{12}(C_2+C_3) = a_{13}(C_2+C_3) \\ C_3 &= (1-a_{12})(C_2+C_3) \\ C_5 &= (1-a_{13})(C_2+C_3) \end{aligned} \quad (3.4)$$

集権的サービス水準は、図4に示す4パターンのいずれかとなる。太線は、サービス水準が高い($l_j=1$)リンクを示している。I,II,IIIにおいては、ODごとにサービス水準の高い経路が1つつづ独立に確保されている。一方IVにおいては、サービス水準の高い経路は、リンク2を共有している。

一方、分権的ネットワーク運営モデルにおいては、I~IVのいずれのパターンにおいても、評価ルールに基づいたプロジェクト収入は一定である。従って、各運営者は分担費用が小さくなるようサービス水準を選択する。各パターンにおける、費用分担ルールに基づいた運営者の負担額を表2に示す。II及びIIIにおける運営者1の費用負担額は、IVにおける負担額を上回っている。従って、IIまたはIIIが集権的サービス水準である場合も、これらのパターンは優位均衡サービス水準とは成り得ない。

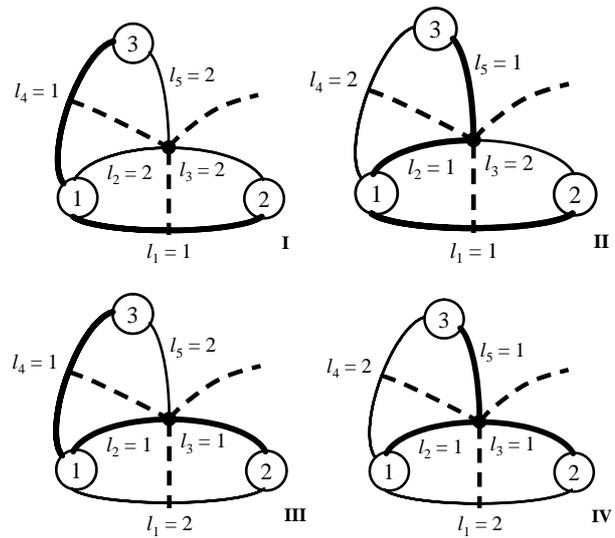


図4 集権的サービス水準のパターン

表2 各運営者の費用負担額

	運営者1	運営者2	運営者3	総費用
I	$a_{12}C_1+a_{13}C_4$	$(1-a_{12})C_1$	$(1-a_{13})C_4$	C_1+C_4
II	$a_{12}C_1+C_2$	$(1-a_{12})C_1$	C_5	$C_1+C_2+C_5$
III	$C_2+a_{13}C_4$	C_3	$(1-a_{13})C_4$	$C_2+C_3+C_4$
IV	C_2	C_3	C_5	$C_2+C_3+C_5$

以上より、複数ODペアの下では、費用分担・評価ルールによって上位機関の政策目標を達成できるとは限らない。

4. おわりに

本研究で提案した費用分担・評価ルールによって実現される均衡サービス水準の数値例については、講演時に譲る。

付録 定理1の証明

経路 m を構成するリンクについて、サービス水準が $l_j=1$ のリンクと $l_j=2$ のリンクが混在しているとす。 (2.1)式より、経路 m のサービス水準は $L_m^r=2$ となる。このとき、リンクのサービス水準として $l_j=1$ を選択している運営者は、このリンクのサービス水準を $l_j=2$ に変更することによって、OD交通需要を変化させることなく、分担費用を軽減させることができる。すなわち、この運営者は一方的な戦略の変更により自らの利得を改善することができるため、 $l_j=1$ のリンクと $l_j=2$ のリンクが混在した状況はナッシュ均衡と成り得ない。

参考文献

- 1) 榊原弘之・高橋啓介・坂元鉄兵：道路ネットワークの分権的運営モデル，土木計画学研究・論文集，Vol.22, No.1, pp.19-30, 2005.
- 2) 鈴木光男：新ゲーム理論，劉草書房，1994.
- 3) 岡田章：ゲーム理論，有斐閣，1996.

