

道路ネットワークの分権的運営モデル*

Modeling Decentralized Management of Highway Network*

榊原弘之**・高橋啓介***

By Hiroyuki SAKAKIBARA**・Keisuke TAKAHASHI***

1. はじめに

一般に、道路ネットワークを構成する各リンクは、交通量配分を通じて高い相互関連性を有しており、集権的に運営することが望ましいと考えられる。しかし、意思決定の迅速化等の要請から、分権的なネットワーク運営が選択されるケースも多いと考えられる。このような場合、分割しても効率性が損なわれないような運営形態にすることが必要となる。本研究では維持管理問題を対象に、有料道路のネットワークを分割して分権的に運営した場合の個別の運営者の行動をゲーム論的に分析し、非協力ゲームの均衡解として得られた補修タイミングと、ネットワークを集権的に運営した場合の補修タイミングを比較する。

2. 道路ネットワークの分割問題

本研究における道路ネットワークの運営者（以下運営者）の行動原理は、通行料収入と維持管理に要する費用の差として定義される利得の期待値の最大化である。ネットワークを分権的に運営する場合、あるリンクの状態が低下することにより、他のリンクは以下の2種類の影響を受けると考えられる。

競合効果：あるルート上のリンクの状態が低下した場合、他のルートへ利用者が転移すること。
補完効果：あるODペアについて、あるルート上のリンクの状態が低下した場合、OD需要自体が減少すること。

*キーワード：道路ネットワーク、分権的運営、ゲーム理論

**正員、博（工）、山口大学工学部社会建設工学科
（山口県宇部市常盤台2-16-1

TEL0836-85-9355, FAX0836-85-9301）

***学生員、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）

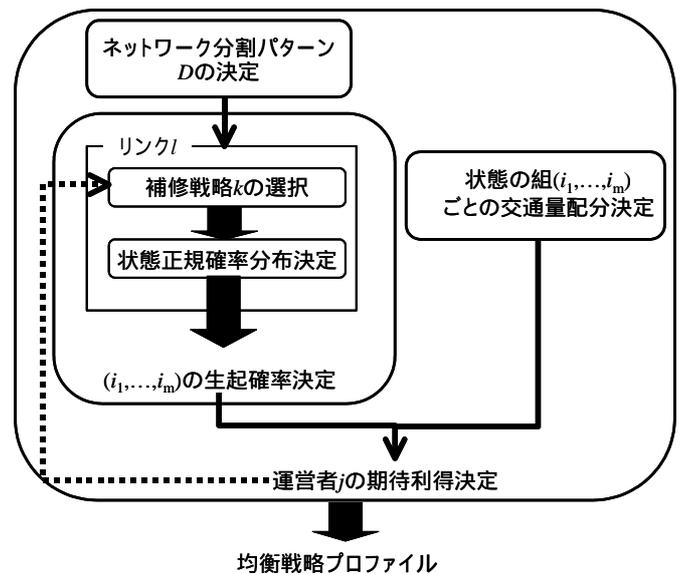


図 - 1 ネットワークの分権的運営モデル

本研究では、この双方の効果を考慮して、分権的なネットワーク運営の下での意思決定モデルを構築する。

3. ネットワークの分権的運営モデル

(1) モデルの構造

図 - 1 に有料道路ネットワークにおける補修に関する分権的な意思決定モデル（ネットワークの分権的運営モデル）の構成を示す。以下にモデルの構成要素について説明する。

・ネットワーク分割パターンの決定

有料道路ネットワークをグラフ $G=\{K,L\}$ により定義する。ここで K はネットワークの結節点となるノード（都市等）の集合、 L は道路リンク（以下リンク）の集合を指すものとする。この有料道路ネットワークにおいて、道路利用者は L の要素である各リンクを利用するごとに通行料を支払うものとする。

ここで、運営者の数を J とし、ネットワークの分割パターン D を以下のように L の分割と

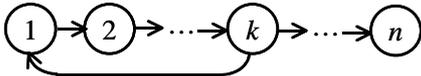


図 - 2 補修戦略 k

して定義する .

$$D = \{L_1, \dots, L_J\}, \quad \bigcup_{j=1}^J L_j = L, \\ L_{j_1} \cap L_{j_2} = \{\emptyset\} \quad \forall L_{j_1}, L_{j_2} \in D \quad (1)$$

ここで L_j は運営者 j が管理するリンクの集合を意味する .

・補修戦略の選択

ネットワークの分割パターン D を所与として、運営者 j は L_j の要素である各リンクについて「どの状態に達したら補修を行うか」に関する選択を事前に行うものとする . リンクの劣化過程をマルコフ連鎖により記述し、交通量や他のリンクの劣化状況とは独立とする . 各リンクが $i = 1, \dots, n$ の n 通りの状態をとり得るものとし、最良の状態 ($i = 1$) を除いた ($n - 1$) 通りの状態について、「状態 i に達したら来期までに必ず補修する」という ($n - 1$) 通りの選択肢が存在するものとする . 本研究ではこれを「補修戦略」と呼ぶ . 図 - 2 は、状態 k に達した時点で必ず補修する補修戦略 k を示している .

・各リンクの状態生起確率分布の決定

各リンクの劣化過程のマルコフ連鎖が $n \times n$ 遷移確率行列 T により記述され、 t_{ij} は T の i 行 j 列成分を意味するものとする . 補修戦略 k の下での修正遷移確率行列 T'_k は次式により決定される .

$$T'_k = T + X_k \quad (2)$$

ここで X_k は次式のように定義される .

$$X_k = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -t_{k1} + 1 & -t_{k2} & \dots & -t_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -t_{n1} + 1 & -t_{n2} & \dots & -t_{nm} \end{pmatrix} \quad (3)$$

(2) 式の遷移確率行列 T'_k により記述されるマルコフ連鎖の定常確率分布を求めることにより、運営者がある補修戦略を選択した場合の各状態の生起確率を求めることができる .

・各状態ごとの交通量配分の決定

リンク l の状態が i_l 、交通量が v_l であるときのリンク l のリンクコスト関数を $f_l(v_l, i_l)$ とする . f_l は v_l, i_l の単調増加関数であるとする . 利用者がルート r を選択した場合、ルート r のリンクコスト lc_r は次式により与えられる .

$$lc_r = \sum_{l \in \Lambda_r} f_l(v_l, i_l) \quad (4)$$

ここで Λ_r はルート r に含まれるリンクの集合を意味する . 利用者はリンクコスト lc_r が最小となるルートを選択するものとする .

m 本のリンクから成る道路ネットワークで各リンクの状態の組 (i_1, \dots, i_m) が生じたとき、各リンクの交通量はリンクコスト関数に基づいた利用者均衡配分により決定される . さらに、2 . において定義した補完効果を考慮する場合は、OD 交通量はリンク状態の劣化に対して単調に減少するものとする .

以上により、リンク l の交通量は各リンクの状態の組 (i_1, \dots, i_m) に依存するものとし、 $v_l(i_1, \dots, i_m)$ と表す . (i_1, \dots, i_m) において運営者が自ら管理するリンク l から得る利得を次式で定義する .

$$s_l(i_1, \dots, i_m) = d_l(v_l(i_1, \dots, i_m)) - c_l(k_l) \quad (5)$$

ここで $d_l(v_l(i_1, \dots, i_m))$ は交通量 $v_l(i_1, \dots, i_m)$ に規定される通行料収入であり、 $c_l(k_l)$ はリンク l において選択した補修戦略 k_l の実行に要する期待費用を意味する .

(2) 運営者の意思決定

各リンクにおける補修戦略が決定されれば、補修戦略の下での各状態の定常確率分布から、運営者が各リンクから得る利得((5)式)の期待値を求めることができる . 各リンクにおける補修戦略の組 (k_1, \dots, k_m) の下での運営者 j の利得の総和は次式で定義される .

$$p_j(k_1, \dots, k_m) = \sum_{(i_1, \dots, i_m) \in I} \phi((i_1, \dots, i_m), (k_1, \dots, k_m)) \sum_{l \in L_j} s_l(i_1, \dots, i_m) \quad (6)$$

ここで $\phi((i_1, \dots, i_m), (k_1, \dots, k_m))$ は補修戦略の組 (k_1, \dots, k_m) の下での各リンクの状態の組 (i_1, \dots, i_m) の生起確率、 I は各リンクの状態の組 (i_1, \dots, i_m)

の集合である。

運営者は(6)式を最大化するように、補修戦略を選択するとする。このとき非協力ゲームにのナッシュ均衡¹⁾の概念に基づき、次の均衡補修戦略プロファイルを定義することができる。
 定義 均衡補修プロファイル

L_j に含まれるリンクにおける補修戦略の組み合わせ θ_j の集合を Θ_j , $L \setminus L_j$ に含まれるリンクにおける補修戦略の組み合わせ θ_{-j} の集合を Θ_{-j} とする。すべての運営者 j について次式が成立するような補修戦略の組 (k_1^*, \dots, k_m^*) を均衡補修戦略プロファイルと呼ぶ。

$$p_j(k_1^*, \dots, k_m^*) \geq p_j(\theta_j, \theta_{-j}^*), \quad \forall \theta_j \in \Theta_j \quad (7)$$

ここで θ_{-j}^* は、 $L \setminus L_j$ に含まれるすべてのリンクについて、 (k_1^*, \dots, k_m^*) と同じ戦略が選択されていることを意味する。

均衡補修戦略プロファイルは、分権的ネットワーク運営モデルの下での各リンクの整備水準を規定する。

(3) 最適補修戦略

均衡補修戦略プロファイルの比較対象として、ネットワーク G を単一の主体が集権的に運営した場合の最適補修戦略を定義する。まず、補修戦略の組 (k_1, \dots, k_m) の下でのネットワーク G 全体の利得の期待値は $p_{all}(k_1, \dots, k_m)$ は次式で与えられる。

$$p_{all}(k_1, \dots, k_m) = \sum_{(i_1, \dots, i_m) \in I} \phi((i_1, \dots, i_m), (k_1, \dots, k_m)) \sum_{l \in L} s_l(i_1, \dots, i_m) \quad (8)$$

(8)式を最大化する補修戦略の組 (k_1, \dots, k_m) を最適補修戦略と呼ぶこととする。あるネットワーク分割パターンの下での均衡補修戦略プロファイルが最適補修戦略に一致する場合、運営者の観点からはネットワークの分権的運営に伴う非効率性は生じないことを意味する。

4. 数値計算結果に関する考察

数値計算の対象とする四角形ネットワークについて、都市の配置パターン及びネットワーク

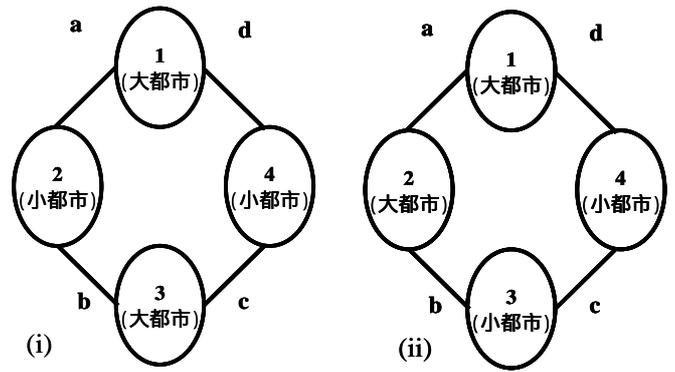


図 - 3 都市の配置パターン

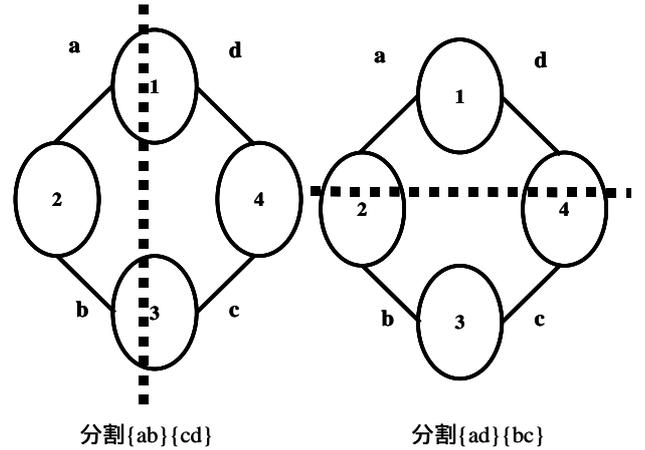


図 - 4 ネットワークの分割パターン

分割パターンをそれぞれ図 - 3, 図 - 4 に示す。都市規模の差は OD 交通量の違いとして与えられる。図 - 3 (i) では、分割 $\{ab\}\{cd\}$ において、2 人の運営者は 2 大都市 (都市 1, 都市 3) 間の交通を巡って競争関係にある。一方、分割 $\{ad\}\{bc\}$ においては、2 人の運営者はそれぞれ異なる大都市を起点としたネットワークを運営しており、2 大都市間の移動に際しては、必ず両者の運営するリンクを利用する必要がある。図 - 3 (ii) では、分割 $\{ab\}\{cd\}$ と分割 $\{ad\}\{bc\}$ 共に、どちらか一方のみが 2 大都市 (都市 1, 都市 2) 間のリンクを運営している。

以下では、リンクの状態数を $n=3$ とし、利得関数((5)式)、リンクの状態の遷移確率行列 T 、各リンクの状態の組 (i_1, \dots, i_m) から OD 交通量を与える関数、リンクコスト関数を仮定して数値計算を行った結果を示す。表 - 1 ~ 表 - 4 に利得関数を変化させたときの分割パターンごとの均衡補修戦略プロファイルと、ネットワークを集権的に運営する場合の最適補修戦略の計算例を示す。通行料が増加し、補修費用が低下すれば利得は大きくなり、通行料の単価が減少して、補修費用が上昇すれば利得は小さくなる。

表中の 4 つ 1 組の数値は、リンク a,b,c,d に関する均衡補修戦略プロファイルを表している。例えば (2,2,3,3) の場合、リンク a, b において状態 2 に達した時点で補修が実施され、リンク c, d において状態 3 に達した時点で補修が実施されるような戦略の組が均衡補修戦略プロファイルであることを意味する。結果の比較から、以下の点が明らかとなった。

- ・表 - 1 では、4 つのケースすべてにおいて、分割 {ad}{bc} の均衡補修戦略プロファイルと最適補修戦略が一致している。このうち、ケース 3 においては、一方の運営者がリンク a(c) を、他方の運営者がリンク b(d) を優先的に（状態 2 に達した時点で）補修する戦略をとることにより、2 つの大都市間に整備水準の高いルート a - b(c - d) が確保されている。このとき、ネットワークが分権的に運営されているにも関わらず、運営者間での自発的な補修戦略の調整がなされている。一方、分割 {ab}{cd} の均衡補修戦略プロファイルと最適補修戦略を比較すると、分割 {ab}{cd} では補修のタイミングが遅れる。従って、この場合は分割 {ab}{cd} よりも分割 {ad}{bc} の方が望ましい。

- ・表 - 3 では、各ケースを通じて、分割 {ab}{cd} と分割 {ad}{bc} の均衡補修戦略プロファイルはともに、最適補修戦略と一致しており、ネットワークを分割することによる影響は少ない。

- ・表 2, 表 4 において、均衡補修戦略プロファイルの下での補修タイミングは、最適補修戦略の場合よりも早い。従って、分権的なネットワーク運営が行われた場合の方が、リンクの整備水準は向上する反面、最適補修戦略から乖離した過大な補修が実施される。

5. おわりに

本研究の分析結果から、分割形態が適切であればネットワークを分割することによって必ずしも非効率性が生じるとは限らないことが明らかとなった。また、ネットワークの分割の可否は、大都市が連担しているか分散しているか等の国土構造にも依存することが明らかとなった。

表 - 1 (i)・補完効果・競合効果有の場合

	通行料大 補修費用小	←→	通行料小 補修費用大	
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
分割 {ab}{cd}	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 3 3, 2, 2, 2	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3
分割 {ad}{bc}	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	2, 2, 3, 3 3, 3, 2, 2	3, 3, 3, 3
最適補修戦略	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	3, 3, 2, 2	3, 3, 3, 3

表 - 2 (i)・競合効果のみ有の場合

	通行料大 補修費用小	←→	通行料小 補修費用大
	ケース1	ケース2	ケース3
分割 {ab}{cd}	2, 2, 2, 2	2, 3, 2, 2 3, 2, 2, 2	3, 3, 3, 3
分割 {ad}{bc}	2, 2, 2, 2	2, 2, 2, 2	3, 3, 3, 3
最適補修戦略	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3

表 - 3 (ii)・補完効果・競合効果有の場合

	通行料大 補修費用小	←→	通行料小 補修費用大	
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
分割 {ab}{cd}	2, 2, 2, 2	2, 2, 3, 2	2, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3
分割 {ad}{bc}				
最適補修戦略	2, 2, 2, 2	2, 2, 3, 2	2, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3

分割 {ab}{cd}, 分割 {ad}{bc} の均衡戦略プロファイルは一致

表 - 4 (ii)・競合効果のみ有の結果

	通行料大 補修費用小	←→	通行料小 補修費用大
	ケース1	ケース2	ケース3
分割 {ab}{cd}	2, 2, 2, 2	3, 3, 2, 2	3, 3, 3, 3
分割 {ad}{bc}			
最適補修戦略	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3	3, 3, 3, 3

分割 {ab}{cd}, 分割 {ad}{bc} の均衡戦略プロファイルは一致

参考文献

- 1) 岡田章：ゲーム理論，有斐閣，1996.