ドライバーの経路選択制御へのゲーム論的アプローチ*

An Application of Limited-Move stability to Drivers Route Choice Control*

宮城俊彦**・市川　昌***
By Toshihiko MIYAGI**,Masashi ITIKAWA***

1．はじめに

ナビゲーションシステムやルートガイダンスシステムのようなドライバー情報システム（DIS）が各国で開発されている。DISは交通マネジメント、あるいは交通制御システムを支援するシステムとして、今後益々その重要度が増してくるものと思われる。

図1.1は交通システムにおける情報の流れを示したものである。既存の交通システム制御の多くは、図中の（I）の部分の情報のやりとりが中心である。道路データをベースにした、静的で集合的（ドライバーを集団的に扱う）である交通制御システムが基本となっていると言えよう。

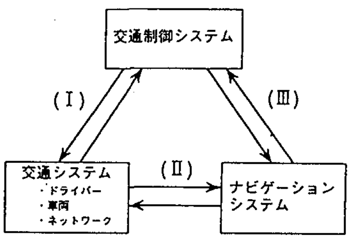

図1.1 交通システムにおける情報の流れ

一方、最近のナビゲーションシステムの発達によって、（II）の情報の流れが確立しつつある。したがって、ナビゲーションシステムを使った、より動的で個人単位の交通システム制御が今後開発されていくことは、容易に想像できる。

ところで、道路利用者は自身で得られる情報を基に、自由な経路選択を行いたいと考える。一方、道路管理者あるいは交通システムの制御の目的は、道路利用者とは異なる規範で交通システムの改善を行うことである。したがって、交通システムの制御には、ある種のコンフリクトが生じる。

本研究の目的は、交通システム制御を道路管理者と道路利用者の参加するゲームと考え、道路管理者の戦略と利用者の行動のコンフリクトによって、生ずる状態がどのような均衡解を導くのかを分析するモデルを提案することである。

また、道路利用者の行動は、不完全な情報に基づく確率的利用者均衡を想定する。道路管理者の戦略は、まず第一段階として経路情報を提供し、利用者の行動を確率均衡から確定的な利用者均衡に導き、第二段階として、混雑料金度を課すことによって利用者均衡からシステム最適化へ導くものとする。

このような戦略をとることによって、システムは果たして安定的な解に至るのかを分析するためのプロトタイプモデルを考えていく。

2．限定手番ゲーム

2.1 安定と均衡

kilgour(1985)は、ゲームの安定分析に「起こり得る状態」という概念を初めて導入した。すなわち、合理的なプレイヤーは起こり得る状態を予測し、そしてその情報に基づいて最も好ましい代替案を選択するであろうということである。ゲームにおいてプレイヤーが選択した状態が「安定的」とは自らが状態を変えることによって、さらに現在より好ましい状態に移れないような状態を指す。したがって、すべてのプレイヤーが安定的ならば、そのシステムは均衡状態にある。均衡を与える状態は1個とは限らない。したがって均衡状態は、コンフリクトを解決する可能解を含んでいる。

さて、プレイヤーの集合をNとおき、ｉの予測ベ

*キーワーズ：経路選択，交通行動分析，ゲーム理論
**正員　工博　岐阜大学教授　工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1番1 TEL 058-230-1111
FAX 058-230-1528)
***学生員　岐阜大学大学院博士前期過程

クトルを$[G(i,k), k\in U]$とおく。ここに、Uは起こり得るすべての状態の集合である。$G(i,k)$は、プレイヤーiが状態kでゲームを始動させた場合に起こり得る最終状態を表す。このとき、

$G(i,k)=k$　ならば、$k\in U$はプレイヤー$i\in N$に対する「安定域」　(2.1.1)

$G(i,k)=k$　for all　ならば、$k\in U$はゲームの「均衡域」　(2.1.2)

と呼ぶ。

2.2　限定手番ゲーム

今、プレイヤーが選択できる手番の長さをhとし、L_hを手番hの限定手番ゲームの安定解と呼ぶ。

今、プレイヤーiが状態kから移り得るすべての状態の集合を$S_i(k)$とおくと、L_hに対するプレイヤーiの予測ベクトルは次のように定式化できる。

if. $S_i(k)=\phi$

then　状態kはプレイヤーiに対する安定解である。

if. $S_i(k)\neq\phi$

then　プレイヤーは状態kから移動することによって達成し得る最善の状態$M_h(i,k)\in U$へ移動する。

ここに、$M_h(i,k)$は

$$P_i(G_{h-1}(j,q^*)=\max.\{P_i(G_{h-1}(j,q)):q\in S_i(k)\} \tag{2.2.1}$$

を満足する状態　$q^*\in S_i(k)$　である。このときの評価値は、

$$A_h(i,k)=P_i(G_{h-1}(j,q^*))=P_i(G_{h-1}(j,M_h(i,k)) \tag{2.2.2}$$

である。ここに、$P_i(G)$は、状態Gにおけるiの利得を表す。

さて、以上の定義のもとで再度、予測状態ベクトルを再帰的に定義する。

$h=0$　に対し、　$G_0(i,k)=k$　(2.2.3)

$h\geqq 1$　に対し、

$G_h(i,k)=k$: if $S_i(k)=\phi$ or $P_i(k)\geq A_h(i,k)$　(2.2.4.a)

$G_h(i,k)=G_{h-1}(j,M_h(i,k))$　(2.2.4.b)

: if　$S_i(k)\neq\phi$　and $P_i(k)<A_h(i,k)$

この$G_h(i,k)$を(2.1.1),(2.1.2)に当てはめることによって、限定手番ゲームの安定解、均衡解が定義できる。L_hに対するプレイヤーの状態予測ベクトルは、図2.2.1のような展開型ゲームの木として表現できる。

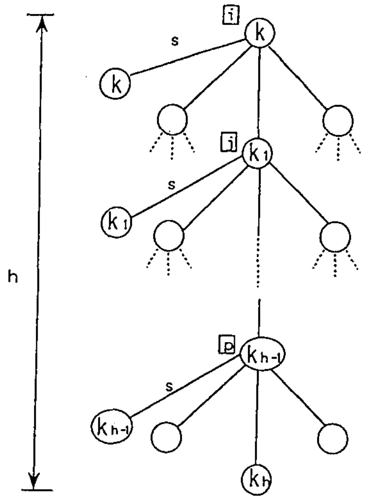

図2.2.1　L_hに対するプレイヤーiの予測ベクトル

3.経路選択制御問題への限定手番ゲームの応用

3.1問題設定

さて、コンフリクトモデルを構成する要素は、意思決定者（プレイヤー）、状態、そして可能な状態間の推移である。状態および、状態間の推移はオプションと呼ぶことができる。プレイヤーが2人の限定手番ゲームを考え、プレイヤーi (i=1)は道路管理者、j (j=2)は道路利用者であると仮定する。道路利用者は、自己のもつ道路情報に応じて、自由に経路を選択したいと考えている。一方、道路管理者はある政策目的を達成させるために、道路利用者を誘導できるような制御をしようとする。したがって、しばしば両者の利害は対立することになる。

今回は問題を簡単にするため、2つの経路で連絡される1つのODペアを考える（図3.3.1）。経路交通量をf_1,f_2、経路のコスト関数を$C_1(f_1),C_2(f_2)$とおく。OD交通量をqとおき、一定と仮定する。

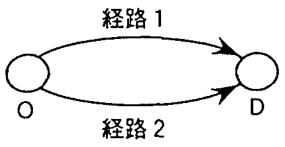

図3.1.1 2経路からなるODペア

ところで、限定手番ゲームを経路選択の制御問題に応用するにあたって、道路利用の行動原理を次のように規定する。

仮定1）経路選択は確率的利用者均衡(SUE)に従う。

すなわち、フローパターンSUE(f)は、次の最適化問題の解として与えられる。

$$\min.\ p_2=\frac{1}{\theta}\sum_{i=1}^{2} f_i(\ln f_i-1)+\sum_{i=1}^{2}\int_0^{f_i} C_i(f)df \quad (3.1.1)$$

$$\text{s.t.}\ f_1+f_2=q$$

$$f\geq 0$$

均衡解は次式で与えられる。

$$f_i=q\frac{\exp\{-\theta C_i(f_i)\}}{\sum_{i=1}^{2}\exp\{-\theta C_i(f_i)\}} \quad (3.1.2)$$

これを図式すると、図3.1.2のようになる。すなわち、経路 i の仮想的なコスト関数$\widetilde{C}_i$を次式のように仮定したときの交点として均衡解が得られる。

$$\frac{1}{\theta}\ln f_i+C_i(f_i)=\widetilde{C}_i(f_i) \quad (3.1.3)$$

図では様々なレベルのθに応じた$\widetilde{C_1}$を描いているが、$\theta_1<\theta_2<\theta_3$を仮定しており、$\theta_3$は利用者均衡に一致するようなレベルの$\theta$である。

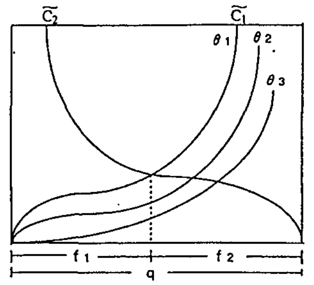

図3.1.2 確率的利用者均衡（SUE）

次に道路交通管理者の行動について考える。道路交通管理者のオプションは、次の3つの状態を考える。

K_1：確率的利用者均衡パターン(SUE)

K_2：利用者均衡パターン(UE)

K_3：システム最適化パターン(SO)

道路管理者の選好関係は、$K_1< K_2<K_3$と仮定する。すなわち何もしない場合には、SUEの状態にある。

一方、ある経路情報を流すことによって、SUEからUEにフローパターンを誘行させることができるが、そのためにはより確実な情報をドライバーに流すためにコストがかり、そのコストはドライバーより徴収するものと仮定する。例えば図3.1.2にしめすように、SUEからUEに至る状態変化は$\theta_1<\theta_2<\theta_3$という分散パラメータの変化で表現する。$\theta_3$は完全情報の状態である。$\theta=\theta_3$のとき、SUEの目的関数(3.1.1)の第一項は無視できるほど小さく、したがってSUEはUEの目的関数になる。ただし、より正確な情報をドライバーに伝達するシステムを提案するにはコストがかり、コストに応じてドライバーから徴収されるものと仮定すると、［SUE］の目的関数は、ある与えられたオプション$m\in O$に対し、

$$\min.\ p_2=\frac{1}{\theta}\sum_{i=1}^{2} f_i\ln f_i+\sum_{i=1}^{2}\int_0^{f_i} C_i(f)+\kappa(\theta_m-\theta_1) \quad (3.1.4)$$

で与えられる。道路管理者はドライバーから徴収できる金額に応じてより良いシステムが提案できるものと仮定しているので、道路管理者の利得は、$p_1=\kappa(\theta_m-\theta_1)$で与えられる。一方、道路利用者の

利得p_2は、目的関数の値そのものである。

さらに道路管理者は、UEからSOにシステムを効率化していくオプションを持つものと仮定する。このオプションは、経路の限界費用曲線$MC_i(f_i)$を設定することによって達成できるものと仮定する。例えば、各々の経路に関し次のようなオプションが存在するものと仮定する。

$$\mathrm{UE}\rightarrow\mathrm{SO}: K_1: MC_i^1(f_1)$$

$$K_2: MC_i^2(f_2)$$

$$K_3: MC_i^3(f_3)$$

これらのオプションは図3.1.3のように表せる。オプション3は C_i に対する完全な限界費用曲線となる。この時、道路利用者の行動及びその利得は、式（3.1.4）において、C_iの代わりにMC_iを代入して得られる。一方、道路管理者の利得は、

$$p_1=\sum_{i=1}^{2}\int_0^{f_i}[MC_i(f)-C_i(f)]dt+\kappa(\theta_m-\theta_1) \quad (3.1.5)$$

で与えられる。

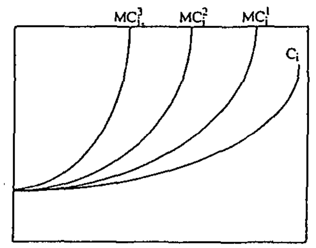

図3.1.3 限界費用曲線

これらの設定のもとで、ゲームの展開樹を描くと図3.1.4のようになる。すなわち、道路管理者は現在の状態（θ_0）に対し、情報提供の水準（$\theta_1<\theta_2<\theta_3$）に応じた状態$K_1, K_2, K_3$を持ち、道路管理者の利得は 状態$K_3$が最も高い。しかし、道路利用者の方は完全情報を得ることは望ましいが、コストがかかるためオプションK_2を選択するかもしれない。したがって、道路管理者はK_2に対し、さらにシステム最適化を計るべく限界費用関数の設定水準に応じた交通政策を展開していく。その結果、道路利用者の経路選択行動の最適化は、例えば k_{21}を選択するかもしれない。

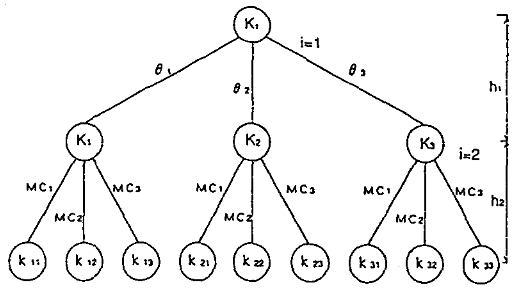

図3.1.4 ゲームの展開樹

このように、道路管理者の第一の手番（h=1）に対する道路利用者の反応として、３つの可能な状態が存在し、その各々に対し、道路管理者は第２の手番で３つの可能な戦略を持つため、最終的には９つの可能な状態が存在する。これらの状態のうち、どの状態が安定解か、また均衡状態はどの状態かを求めることが必要となる。この際、すべてが安定的な解であるとは限らないし、また均衡解も複数個生じる可能性もある。

3.2 計算法

L_h安定を求めるための計算法であるLimited-Move stabilityを図3.2.1に示す。

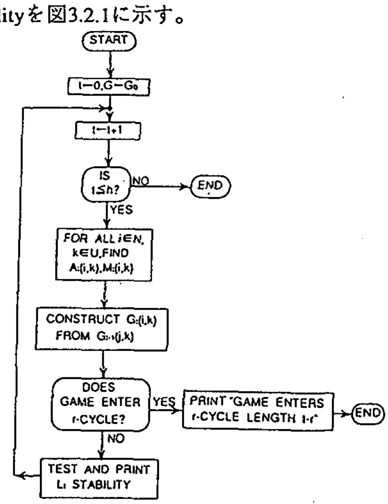

図3.2.1 L_h安定の計算法

【参考文献】

1)Transportation Science Vol.29,No2,May1995

2)Fang,Hipel,Kilgour(1964)

:Interactive DecisionMaking,Wiley Interscience