

ゲーム理論の視点から見た
自動運転システム実用化についての一考察

川上 敏和

A Note on Practical Use of Automated Driving Systems
from the Viewpoint of Game Theory

Toshikazu Kawakami

ITEC Working Paper Series

16-04

March 2017

ゲーム理論の視点から見た自動運転システム実用化についての一考察

A Note on Practical Use of Automated Driving Systems from the Viewpoint
of Game Theory

同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター
ワーキングペーパー16-04

川上敏和

同志社大学 政策学部教授

602-8580 京都市上京区今出川通烏丸東入

Tel: 075-251-3478

E-mail: tkawakam@mail.doshisha.ac.jp

キーワード： 自動運転システム、ピグーのパラドックス、ブライスのパラドックス、調整ゲーム、Eメールゲーム

JELコード： C72, C73, R41

著者の専門領域： 応用ミクロ経済学

要旨：

本稿では、来るべく自動運転車社会に備えて、あらかじめ議論しておくべき問題や論点を発見する手がかりを見出すという目的意識のもと、交通経済学のモデルを中心として、自動車交通のモデルの展望を行う。特に、Pigou(1920)とBraess(1968)が開発したモデルは、単純ではあるが、交通経済学において長年研究されてきたものであり、自動運転システムが実用化されたのちの自動車交通のあり方について示唆に富むと思われるため、その紹介を行いたい。

加えて、ゲーム理論の研究における大きなテーマである「調整」という側面から、論点の1つを提示する。自動運転システムを実現する際の課題として挙げられていることの多くは自動運転車がいかに周りの状況に適応しながら自律的に走行できるかに関するものである。一方、混合交通の状態においては、依然として人間が運転する自動車も自動車交通の担い手である。しかしながら、人間が運転する自動車からみた議論はまだ少ない。混合交通の状態における人間の運転する自動車側からの視点に立った議論を、現在よりも進めるべきであるということをゲーム理論のいくつかのモデルを援用しながら提案したい。

謝辞：

本稿は、JSPS 科研費 25281071 (次世代自動車の普及政策とそのグローバル・ベネフィットに関する研究)の助成を受けたものである。

ゲーム理論の視点から見た自動運転システム実用化についての一考察

川上敏和

1.はじめに

ここ数年、自動運転車を巡る話題は人工知能(A.I.)と相まってマスコミで取り上げられない日が珍しいほど、社会の注目を浴びている。マスコミ等での華やかな扱いの一方で、内閣府(2016)や首相官邸の政策会議の1つである高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部(2016)の報告書等に目を通すと、自動運転システムについての議論はまだ端緒に着いたばかりで自動運転車の導入がもたらす社会の変化については、議論が混沌としている状況であると思われる。そのような状況を少しでも改善するためには、まずは自動運転車の導入によって生じると考えられる問題や論点をなるべく多く発見し、整理をする必要がある。一方で、多くの社会科学に携わる研究者は自動運転車の導入について、自らの研究が貢献できることはそれほど多くはないと考えているように筆者には思える。筆者自身も当初は法学や経営学を専門とする研究者に比べて、経済学者の出番は少ないのではないかと考えていた。しかしながら、自動運転システムについて少しずつ考察を進めるうちに、経済学者にも貢献できることが相当程度にあるのではないかと考えるようになってきた。そこで経済学者がこの話題に踏み込むことを躊躇している現状を少しでも改善するために、特にゲーム理論的な立場から、自動車交通に関する交通経済学やゲーム理論の成果を継ぎ接ぎ整理し、今後の議論の足がかりを作っておきたい。これが本稿の1つの目的である。もう1つの目的は、ゲーム理論の研究における大きなテーマの1つである「調整」という側面から、自動運転車の導入によって生じると考えられる新たな論点の1つを私なりに提案することである。

本稿の前半では、これまで経済学で生み出されてきた自動車交通のモデルを筆者なりに展望する。その目的は既に述べたように、現在急速に開発が進められている自動運転車の実用化による自動車交通の変化になんらかの見通しを立てるための題材提供である。自動車交通は経済学でもしばしば研究の対象とされてきた。しかしながら、日本においては交通経済学という分野は、多くの経済学者にとっても馴染みがない。けれどもひも解いてみると、興味深いモデルが多いⁱ。中でも、Pigou(1920)と Braess(1968)によって開発されたパラドキシカルな結果を生むゲームは自動運転車の問題を考える上で重要な論点を提示すると思われる。

本稿の後半では、自動車交通の「調整」という側面に焦点を絞り、ゲーム理論における調整ゲームやそれと関連する Rubinstein(1989)の E メールゲーム

を用いて、思考実験的な議論を行う。このような思考実験を通じて、特に混合交通と呼ばれる自動運転車と普通のドライバーが運転する車が混在する状況について浮上するであろう問題について吟味したい。自動運転車を走らせるためにもっとも技術者が関心を払っていることの1つは、他の自動車、周りの歩行者、道路などの外的環境などに、如何に適応した走行をさせるかという点であると思われる。しかしながら、本稿で行う思考実験に基づけば、自動運転車側からの視点もちろん重要であるが、自動運転車と対峙する人間のドライバー側の視点もまた重要であるということが言える。

2. 自動車交通のモデル

自動車交通は経済学でしばしば分析の対象とされてきた。自動車交通の円滑化のためには、各ドライバー間の調整は不可欠である。また、自動車交通に付き物の混雑は、負の外部効果の典型例である。ゲーム理論の技術的用語を導入すると、ドライバーはプレイヤーであり、ドライバーが下す意思決定が戦略となる。相互依存関係にあるドライバーたちの意思決定の結果、交通の円滑度や目的地への所要時間などを抽象的に表現した利得が定まると考えることができる。道路網などは外生的に固定された環境であるとみなす。このように、自動車交通をドライバー間のゲームであるとみなすと、先に述べた2つのポイントは、「調整ゲーム」と「囚人のジレンマ」という代表的なゲームで扱われる問題とパラレルに対応することが分かる。

交通経済学において、自動車交通の代表的なモデルは2つのタイプに分けられる。1つは、ボトルネックの経済と呼ばれるタイプのものである。同一の出発地点から同一の目的地へ単一の経路を使って多数のドライバーが向かう状況を想定する。出発地点と目的地を結ぶ道路では、利用するドライバーの数が増えると混雑が発生する。目的地への到着時間（例えば、職場の始業開始時間）が想定されており、それを目指してドライバーは何時に出発するかを意思決定を行う。ボトルネックというネーミングから分かるように、道路には容量が設定されており、利用ドライバー数が増えると混雑により目的地までの所要時間が増加する。各ドライバーは想定されている到着時間のなるべく直前に着くように出発したいと考えており、そのためお互いに近い時間に出発しようという傾向が生まれ、過度な混雑が生まれる。出発時間をドライバー間で調整すれば混雑は緩和されるのであるが、分権化された利己的エージェントであるドライバーはそのような動機付けがなく、混雑の緩和は難しいという結果になる。これはある種の囚人のジレンマである。

もう1つは、道路網をネットワークとみなし、ドライバーが経路を選択することを扱うモデルである。通行するドライバーの数が多くなるにしたがって混

雑が発生し、経路を通過する所要時間が増加する点は、ボトルネック型経済のモデルと同様であるが、ドライバーはなるべく早く目的地に到達するように経路を選択する。このようなモデルをルーティングゲーム(routing game)と呼ぶ。ルーティングゲームは、更に2つに分類される。1つは、ドライバーの数が非常に多数であり、特定のドライバーの選択によって、ルート交通量に影響が及ばないノンアトミックと呼ばれるモデルであり、もう1つは特定のドライバーの経路選択により、ルート交通量に変化するアトミックと呼ばれるものである。前者の代表例が、Pigou(1920)によって考案されたモデルであり、後者の先駆的なモデルは Rosenthal(1973)が開発した congestion game と呼ばれるものであるⁱⁱ。

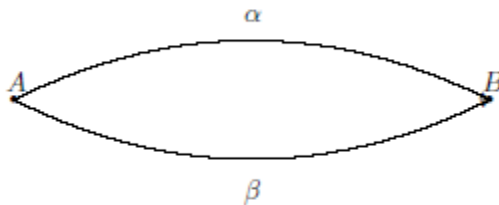
アトミックなルーティングゲームの分野における研究動機は、均衡の存在や一意性、学習による均衡への到達といったテーマへの関心が主なものである。例えば、Monderer and Shapley(1994)は congestion game を potential game とみなし、ある種のダイナミクスが均衡へ到達させることを保証することを示している。しかしながら、congestion game は抽象度が高く、現実の例に引き寄せることが難しい。学習というテーマについては、Sugden(2004)が交差点ゲームと呼ばれるモデルを用いて、交差点をすれ違う車の間の調整が、慣習としての均衡に、学習を通じて到達するという分析を行っている。このモデルは自動車交通における調整問題について示唆に富むものである。本稿では、こちらのモデルに基づいて節を改めて考察を行う。

最後に、ノンアトミックなルーティングゲームとして有名な2つのゲームを紹介する。1つは、すでに触れた Pigou(1920)のモデルであり、もう1つは Braess(1968)が考案したモデルである。どちらも混雑というプレイヤー間の負の外部効果が、パラドキシカルな結果を生む、シンプルであるが含蓄の深いモデルである。その内容を簡単に述べると、個別ドライバーの分権的な判断に任せてルート選択をさせた場合の均衡における目的地への所要時間は、社会的に最適なルート選択の場合に比べて、相当程度長くなるというものである。交通経済学においては、前者の意思決定の仕方による均衡状態を個別最適と呼び、後者の集権的な意思決定に基づき社会全体として最適な状態をシステム最適と呼ぶ。自動車交通ではシステム最適が個別最適よりもより効率的な結果をもたらすということがしばしば起こる。自動運転車の導入は、個別自動車のもつ情報をクラウド等の特定のシステムに一元的に収集し、集めた情報に基づいて個別自動車に指示を出すことが多かれ少なかれ行われる。その際に、どのような基準に基づいて指示を出すのかを考える必要があることを、これらのモデルは提示していると考えられる。

まず、Pigou(1920)のモデルを簡単な数値例を用いて紹介する。図1をご覧ください。出発地点であるAから目的地であるBに向かって2つの道

路 α と β が走っている。今、A を出発 B に向かおうとしているドライバーが多数いる状況を考える。ドライバーの数は 1 と仮定する。道路 β を通ると、交通量にかかわらずどの車も 1 時間で目的地に到達する。一方、道路 α を通ると、交通量の増加に従って、所要時間が増加する。交通量を $x \in [0, 1]$ で表すと、自動車 1 台当たりの所要時間は交通量の関数 $f(x)$ で表され、 $f(x) > 0$ であるとする。また、分析を単純にするために $1 > f(0) > 0$ かつ $f(1) = 1$ と仮定する。具体的には、 β は荒れていて走りにくく時間がかかるが広い道で交通量が増えようしても所要時間は変化せず一定である。一方、 α はよく整備されているが狭く、交通量が増えると所要時間が増加するという状況をイメージしてもらえばよい。

図 1. Pigou のモデル



このとき個別のドライバーが分権的にルート選択をするとどうなるであろうか。各ドライバーにとっては $f(x) \leq 1$ であるならば、道路 α を通るのが支配戦略であり、すべてのドライバーが α を通るのがナッシュ均衡であることが分かる。この結果は $f(x)$ が先ほど仮定した条件を満たすのであれば、関数の詳細な形状に関わらず常に成り立つ。つまり、よく整備された道路 α の混雑がひどくなり、 β を使った場合と同じ所要時間になるまで、 α への自動車の流入は止まらないのである。

ところが、この状態は社会的に最適、この分野の言葉を使うと、システム最適ではない。それを確認するために、社会の全ドライバーの所要時間の合計時間を計算する。いま α を利用するドライバーの数を x とすると、合計時間 $c(x)$ は以下の式で表現できる。

$$c(x) = f(x)x + 1 - x \tag{1}$$

この式は、社会の全ドライバー数を1と定めているので、目的地までの所要時間の平均値を表してもいる。(1)式を x について微分することにより、 $c'(x)=f'(x)x+f(x)-1$ を得る。関数 $f(x)$ に与えた仮定に基づいて計算を進めると、区間 $[0,1]$ 間で $c(x)$ は下に凸の形状をしていることが分かり、最小値は一階の条件である $c'(x)=0$ より、

$$f'(x)x+f(x)=1 \quad (2)$$

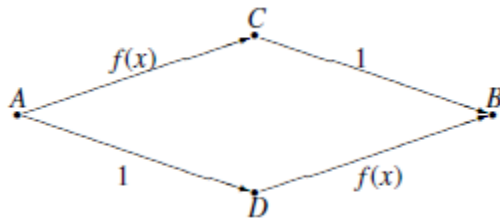
を満たす x において達成されることが分かる。この x がシステム最適な x であり、これは0と1の間の数である。従って、交通量の関数が単調増加であれば、一般的にシステム最適な交通量は、全ての車が α を通るというナッシュ均衡の状態とは異なることが示せるのである。

議論をより具体的にするために、関数の形をより具体的なものと想定してみよう。この分野でしばしば行われるように、 $f(x)=x$ のケースを考えてみる。すると、(2)式から直ちに、システム最適な x は $1/2$ であることが分かる。つまり、全体の半分が α を使い、もう半分が β を使う状態がシステム最適と分かる。更に、その際の車1台あたりの平均所要時間は、(1)式より、 $3/4$ である。従って、平均においてはナッシュ均衡の状態より25%程度所要時間は短縮する。ただし、システム最適な状態では、半分のドライバーが整備された道路を短い時間($1/2$ 時間)で通行し、もう半分のドライバーは整備されていない道路を時間をかけて(1時間で)通行するということによって実現する。関数 $f(x)$ の形状によって、システム最適な状態とナッシュ均衡の状態における所要時間の差は変わってくるが、関数が線形の形状をしていれば、その差が最も小さくなるということが知られており、この数値例の意味は過大評価ではないⁱⁱⁱ。

Pigou(1920)はこのモデルをもとに、整備された方の道路交通の容量を拡張することは、渋滞の緩和という目的には必ずしもつながらないことを主張した。例えば、先ほどの例から変更して、車の台数が2であると仮定してみよう。今の道路状態の下では、ナッシュ均衡では α を利用する車が1であり、 β を利用する車も1である^{iv}。このとき平均所要時間は1である。道路 α の拡張を通じて所要時間の関数を $(2x)/3$ に改善できたとしよう。このときナッシュ均衡では $3/2$ 台が α を通り、 $1/2$ 台が β を通る。その結果、依然として平均所要時間は1に留まる。つまり、混雑緩和を目指して α の拡張を行ったとしても、それに応じて β を通行していたドライバーの α 側への新たな流入が生じ、所要時間を押し上げ、結果として β と同じになるまで、新規ドライバーの流入は続くのである。これをピグーのパラドックスという。

次に、Braess(1968)が開発したモデルの説明に移る。図 2 をご覧いただきたい。先ほど同様に出発地点 A から目的地 B へ向かおうとしている多数のドライバーがいる状況を考察する。ドライバーの数は先ほど同様 1 とする。

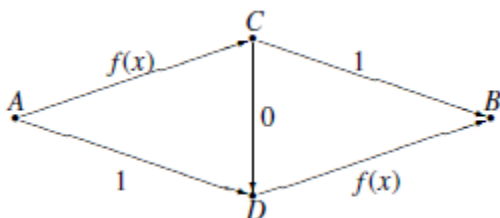
図 2. Braess のモデル(その 1)



道路網は、Pigou の例と同様、目的地に向かう方法は 2 通りであるが、各ルートは 2 つの部分に分割されている。例えば、図 2 の上側のルートは AC と CB からなり、下側のルートは AD と DB からなる。そして、CB、AD の区間は交通量に関わらず、1 時間という一定の所要時間で通行できる一方、AC、DB の区間は交通量の増加とともに所要時間が増える区間とし、それを関数 $f(x)$ で表すとする。ただし、 $f(x)$ は前の例と同様、 $f'(x) > 0$ であり、 $1 > f(0) > 0$ かつ $f(1) = 1$ と仮定する。容易に分かることであるが、全ドライバーの半分が ACB、もう半分が ADB のルートを通る状態がナッシュ均衡である。なぜなら、この状態からあるドライバーがルートを変更しても(例えば ACB を利用するドライバーが ADB に変更しても)、所要時間を短縮することはできないからである。Pigou のモデルと同様の計算をすると、ナッシュ均衡における目的地までの平均所要時間は

$1 + f(1/2)$ である。ここで交通状態を改善すべく CD を繋ぐ道路が新しく建設されたとしよう。更に CD 間の移動は 0 時間で行われると仮定する。この変更が加えられた状態を表すものが図 3 である。

図 3. Braess のモデル(その 2)



この道路網においては、ACDB という経路を通ることが各ドライバーにとって支配戦略である。この事実は任意の $x \in [0, 1]$ について $2f(x) \leq 1 + f(x)$ が成り立つことから容易に確かめられる。従って、ACDB を全ドライバーが通ることがナッ

シュ均衡となり、この均衡における平均所要時間は $2f(1)=2$ と計算できる。ところが、この道路網においても全ドライバーの半分が ACB を通り、もう半分が ADB を通るといふ、CD 間が新たな道路で結ばれる前のルート選択は可能である。その時、このルート選択の際の平均所要時間は $1+f(1/2)$ であり、2 よりも小さい。

Braess(1968)が主張したことは、渋滞状態の改善のため、道路網に新たな道路を付け加えることが、かえって渋滞の状態を悪化させることがあるというものであり、これはブライスのパラドックスと呼ばれる。Youn, Jeong, and Gastner(2008)はボストン市内の交通について解析を行った結果、ブライスのパラドックスによる効率性の損失は相当大きく、システム最適の場合より所要時間は 30%程度増加するという推計結果を示している。

ピグーとブライスのパラドックスについては、すでに数多の研究が行われている。ただし、その多くはあくまでルート選択は分権的なドライバーが行うという仮定のものが中心である。しかしながら、自動運転化の進展に伴って、各自動運転車が個別に保有する情報はそれらを管理する中央センターのような場所に集められ、それに基づいた指示が出されることになる。その際にあくまで個人のドライバーの視点を重視して運転を行うのか、それとも社会全体を見渡した視点を取り入れるのかでは大きな違いが生まれる可能性があることをこれらのパラドックスは示唆している。

3. 調整

3.1 交差点ゲーム

交差点ゲームは、自動車交通が持つ特色の1つである「調整」という側面を的確にとらえたモデルといえる。本節では、Sugden(2004)を参考にしながら、このゲームを紹介し、それを手掛かりとして、混合交通について考察を始める。自動運転車の普及は、普通の自動車からの買い替えによって徐々に進むと考えられている。従って、自動運転車と普通の自動車が混在する状況がしばらく続くと考えられる。この状況を混合交通と呼ぶ。混合交通が可能かどうかは、自動運転車と普通の自動車との調整がどの程度円滑に進むのかということが大きなポイントになることを以下の議論で示したい。

図 4. 交差点ゲーム

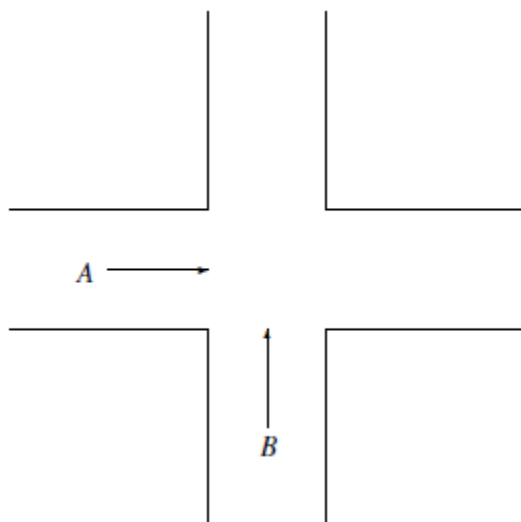


図 4 のように 2 台の自動車 A と B が交差点に近づいている状況を考える。車のドライバーは、速度を保つか減速するかの 2 つの戦略が選択できるとする。一方が減速し、他方が速度を保つと、2 台とも無事に交差点を通過する。ただし、減速したドライバーは少し遅れることになり、どちらのドライバーも速度を保ったまま交差点を通過する方を望むとする。両車が減速した場合には、安全に通行はできるが、お互いに相手の様子を更に確認する等の手間を要す。従って、この結果は一方だけが減速した場合よりも双方にとって悪いとする。両車が速度を保ったまま交差点に進入すると、とても危険であり、これが両ドライバーにとって最悪であるとしよう。このような状況は次のような利得表で表すことができる。

図 5. 交差点ゲーム利得表

		ドライバー B	
		減速	維持
ドライバー A	減速	0,0	2,3
	維持	3,2	-10,-10

このゲームには 2 つのナッシュ均衡が存在し、ドライバー A が減速し、ドライバー B が速度を維持するというものと、ドライバー A が速度を維持し、ドライバー B が減速するというものである。これらのナッシュ均衡は、両ドライバー

にとって、両者とも減速や両者とも維持よりも良い結果である。そのような良い結果を得るためには、お互いの行動を相手と調整することが必要となるため、このゲームは調整ゲームと呼ばれるものの一種である。

調整ゲームで扱われる問題の1つは、2つあるナッシュ均衡のどちらをドライバーたちはプレイするのかといういわゆる均衡選択である。どのように調整が行われるかについての考え方には様々なバリエーションがある、Sugden(2004)では進化と学習のメカニズムを通じて、ある一方の均衡に到達する過程が丁寧に描かれている。多数のドライバーからなる社会があって、そのメンバーがこのゲームを繰り返し行う状況を考える。各ドライバーはAの立場に立つ場合も、Bの立場に立つ場合もあり、それはランダムに起こるとする。そのような状況では、Aの立場に立った場合に経験したことと、Bの立場に立った場合に経験したことを各々のドライバーは区別するとする。そのような非対称性を手掛かりにして、一方のドライバーは減速し、他方のドライバーは速度を保ったまま、交差点を通過するということが学習を通じて慣習として確立される。例えば、Aの立場に立った場合には、減速するより維持をした方が成功し、Bの立場に立った場合には、維持するより減速した方が成功するという経験を積み、Aでは維持、Bでは減速という慣習が成立し、それに誰もが従う。その確立された慣習が選ばれたナッシュ均衡となるわけである。

既に述べたように、本モデルは自動車交通においては「調整」が本質的な問題であることを的確に捉えてはいる。しかしながら、現実の自動車交通においては、ここで問題とされる調整のようなものを人間は無数に行うことにより、複雑な運転という作業を行っているが、その点はモデルの構築の際に捨象されている。例えば、2台の車が交差点へ到達する時間には、完全に同時から完全にずれるまで無限のバリエーションがある。法定速度をどの程度守るかや、道のどのあたりを進行するかなどについてもドライバーによって様々な癖がある。その微妙な差異について、人間は無意識的な調整で対応している。更に、ドライバーA、Bに加えて、同時点に歩行者が交差点を渡ろうとしているとするとどうだろうか。ドライバーたちは歩行者の動きも見ながら、減速の程度をより強めたり、慣習に従えば減速する必要のないドライバーも減速する必要に迫られるかも知れない。これらの行動にも慣習や法律などの支えに基づき、歩行者を含めた3者間で無意識的に微妙な調整がなされ、何事もなかったかのような通行がなされている筈である。そしてそれは、ドライバーや歩行者数がもう少し増え、状況がより複雑になったとしても、同様に行われるであろう。このようなことが可能なのは人間が持つ高い認知、判断、操作、修正能力に負うところが大きい。更に人数が増え、複雑な状況になると、信号機であるとか交通標識等の助けが必要となるが、これらの能力が果たしている役割は依然として相当大きい。

ところで、もとの交差点ゲームに戻って、ドライバーAは人間の運転する車である一方、ドライバーBは自動運転車に乗っているとするとどうだろうか。この交差点でのすれ違いはドライバーAにとって突然難易度が高くなることが分かるだろう。仮にAは維持、Bは減速という慣習が成立していたとしても、Aはその慣習通りに動くことは難しいのではないだろうか。この例は、混合交通と呼ばれる状態における問題点を浮かび上がらせる。ドライバーが人間同士の場合に、上で述べたような通行が可能なのは、相手のドライバーの表情、人間が操るものとしての車の挙動などから相手の動きを予測し、それに基づいて行動するということが人間には無意識的にできるからである。そこには同じ生物、同じ人間ならこうする筈だという予測のようなものが基礎としてあると思われる。つまり相互依存関係が生ずる場面における人間の高度な認知、判断、操作、修正能力は同じ人間同士では発揮できるが、それが機械あるいは人工知能相手にも同じようにできるかは大きな疑問が残る。自動車交通について交差点ゲームのタイプ議論の一般化が可能なのはドライバーが人間同士だからとも言える vi。

3.2 E メールゲーム

前節の論点を深めるために、Rubinstein(1989)によって開発されたEメールゲームを紹介し、それを用いて議論を進めてみたい。ゲーム理論におけるもっとも基本的な仮定の1つが共有知識(common knowledge)である。例えば、2人プレイヤーゲームにおいて、「両プレイヤー1と2の間で自分たちがプレイするゲームが共有知識である」とは、「両プレイヤーはゲームのルールを知っており、プレイヤー1はプレイヤー2がそのゲームのルールを知っていることを知っており、プレイヤー2はプレイヤー1がそのゲームのルールを知っていることを知っており、プレイヤー1は、プレイヤー2がプレイヤー1はそのゲームのルールを知っていることを知っていることを知っており、プレイヤー2はプレイヤー1がプレイヤー2はそのゲームのルールを知っていることを知っていることを知っており、等々」ことを意味する。この共有知識の仮定の下で、合理的なプレイヤーはゲームの均衡を予測することができるのである。しかしながら、この共有知識の意味することを直観的に理解するのは難しい。そこでRubinstein(1989)は限りなく共有知識に近い状況では何が起こるのかという問いを立て、それをEメールゲームというモデルで表現した。

Eメールゲームは2人プレイヤー1と2からなる不完備情報のゲームである。2人が直面するゲームは、次のようにaとbという2つの可能性かあるとする。

図 6. E メールゲーム利得表

	プレイヤー 2	
	α	β
プレイヤー 1	α M, M	β $0, -L$
	α $-L, 0$	β $0, 0$

ゲーム a

	プレイヤー 2	
	α	β
プレイヤー 1	α $0, 0$	β $0, -L$
	α $-L, 0$	β M, M

ゲーム b

ただし、利得表の中にある数値 M と L は $M < L$ を満たすと仮定される。ゲーム a という事態が実現するか、それとも b という事態が実現するかは、事前確率に従い、ゲーム a は良く起こる事態を表し、実現する確率が $1/2$ より高く、ゲーム b はまれにしか起こらない事態を表し、実現する確率は $1/2$ より低いと仮定する。ゲーム a においてもゲーム b においても、ナッシュ均衡は 2 つあり、戦略の組 $\alpha\alpha$ と $\beta\beta$ である。ただし、ゲーム a においては α の選択は安全かつ β より高い利得が保証される。一方、ゲーム b においては α の選択は安全ではあるが、必ずしも高い利得を保証するものではない。ゲーム b においては、相手プレイヤーが β を選ぶとすると自分も β を選んだ方が高い利得を得られるのである。つまり、両プレイヤーにとっては、ゲーム a が実現したなら α をゲーム b が実現したなら β を選択することが望ましい。従って、このゲームは実現する事態に応じて、各人がお互いの行動を調整しあうことが、両者にとって望ましいという状況を抽象的に表現しており、不確実性の下での調整というテーマを扱っていると言える vii。

この設定に追加的な仮定を 2 つ加える。事態がゲーム a であるか b であるかについてプレイヤー 1 は知ることができる。更に、両者は離れた位置にいるため直接のコミュニケーションは取れないが、E メールを使って事態についての情報をやり取りすることができるとする。例えば、いつもとは違う事態であるゲーム b が実現したことを知った場合、最初にプレイヤー 1 はゲーム b が発生したことをプレイヤー 2 にメールする。それに対して、プレイヤー 2 はメールが伝わった旨を返事する。更にプレイヤー 2 からメールが届いたなら、その受領確認のメールをプレイヤー 1 は再び送り返すという具合である。ただし、メールは非常に低い確率で、相手に届かないことがある。また、ゲーム a が実現した場合にはメールはそもそも送信されないとする。

Rubinstein(1989)はこのゲームを分析し、たとえ何度メールのやり取りが行われても、両プレイヤーは β を決して選ばないことを示した。例えば、事態 b が発生したというメッセージが発せられ、その後 17 回受領確認のメールがやり取りされたとしよう。そのとき、ゲームが実際は b であることをお互いに知っていたとしても、その情報を無視して、戦略 α を選択するのが均衡行動とな

る。この結果が導かれる証明を追うことはそれほど困難ではないが、この結果を直観的に理解することは困難である。一方で、人間同士ならメールのやり取りを2、3回ほど行われれば戦略Bを選ぶことは容易い。このパラドキシカルな結果の根っこには、ゲーム理論家が分析において数学的推論を用いるのに対して、生身の人間は推論に数学を用いない事実があるからではないかとRubinstein(1989)は示唆している。別な言い方をすると、ゲーム理論が想定する合理的なプレイヤーがゲームの均衡を予測するためには共有知識が必要であるが、生身の人間はその問題を意識すらせず乗り越えているとでも言えよう。自動運転という文脈からEメールゲームで描かれている内容を見てみると、ゲーム理論が仮定する合理的なプレイヤーは人間よりも計算機械、今風に言えば、A.I.に近いように思われる。もちろん、技術の進歩は凄まじく、現在のA.I.同士ならこの程度の相互調整は易々で行うのかも知れない。しかしながら、このモデルはA.I.のある種の頑なな側面を捉えているようであり、また混合交通で発生すると考えられる問題の端緒を与えてくれると思われる。

混合交通の問題に話を進めるために、Eメールゲームと密接な関係にある「調整攻撃の問題(The coordinated attack problem)」を紹介し、それを用いて議論を進めたい。1つの谷を挟んで2つの山がある。谷には敵が陣を張っており、味方は2つの山に別れて陣を張っている。敵に攻撃を仕掛けたいのであるが、一方の陣だけが攻撃を仕掛けたのでは、負ける可能性が高い。両方が同時に攻撃を仕掛ければ、相手に勝つことができるとする。この時、一方の陣から伝令をもう一方の陣に飛ばし、明朝、日が昇るのを合図に攻撃を仕掛けようと、片方の指揮官が考えたとする。ただし、伝令は谷を通らねばならず、小さな確率で敵に見つかり捕まってしまうとする。従って、伝令を受け取った指揮官もまたその旨の返事の伝令を返して確認を行いたいと考え、伝令を送る。それを受け取った指揮官は再び伝令を送り、情報が伝わったという確認を行おうとするだろう。相手の指揮官が同時に攻撃してくれると確信するまで、両指揮官は攻撃を行おうとはしないとすると、何度伝令が行き来すればよいであろうか。これが調整攻撃の問題である。Eメールゲームの分析結果から容易に推測は可能だと思われるが、両指揮官をゲーム理論が仮定するプレイヤーであるとすると、何回伝令を飛ばしても両指揮官は攻撃を行おうとしないであろう。逆に、両指揮官がともに生身の人間であれば、伝令が2、3回やり取りされれば、容易に行われる筈である。

ところで、指揮官の一方は生身の人間であり、もう一方はゲーム理論が仮定する合理的プレイヤーであったらどうなるであろうか。これまで同様、合理的プレイヤーは何度伝令が走っても攻撃を行えない。従って、人間の指揮官の側も攻撃はできない。この例えにおいて、合理的プレイヤーをA.I.に置き換えても同じ構図が成立する。更に、この例えが示唆している重要なポイントは、仮

に人間と A.I.の間で何らかの調整が必要になった場合には、人間の側が A.I.に合わせなければ調整は上手くいかないだろうということである。接客サービスなどで A.I.を搭載したロボットが、人間と会話をする機会が現実には増えてきているが、そのような場面で会話がちぐはぐになったときには、人間の側が気を利かせて会話が進められるのは、その実際の例と言えよう。

自動運転車の議論においては、自動運転車の側がいわゆるマップ上の様々な情報や自ら搭載したセンサーによって得た情報に基づいて、周囲の状況にどのように合わせるのかが議論の中心のようである。例えば、内閣府（2016）には「自動車の走行機能は認知、判断、操作の 3 要素で構成される。車両に設置したレーダー等を通じて走路環境を認識する技術(自立型システム)と、車両同士または車両と車両外部の通信を利用して走路環境を認識する技術(協調型システム)がある。自動運転システムの実現には、この両者が統合され、前述の 3 要素が高度化される事が必要である」とある。しかしながら、上の例えから分かるように、混合交通においては、人間が運転する車に相当の負担がかかると思われる。そういった人間が運転する自動車側の視点からの議論も必要であると推測される。例えば、自動運転車がどのように動こうとしているのかを予め人間側に伝えるシグナルを発信することなどにより、他のドライバーに対する運転援助手段などを考えることはその 1 つの可能性であろう。もう 1 つの可能性としては、自動運転車の動きをある程度制限することも考えられる。例えば、路面電車を自動運転化しても、多くのドライバーは対応にそれほど困難を感じないと思われる。それは路面電車がレールの上だけを走るように動きが制限されているために、ドライバーからみて行動の予測がたてやすいからである。アイデアだけを書いてしまうと、簡単に対応できることのように思えるが、実現するとなると、技術的な問題から制度的な問題までを見渡し、時間をかけて考察を進める必要があるポイントだと思われる。ゲームにおいてナッシュ均衡が実現するためには、プレイヤーが共通の予測を持っていることが必要とされる。近年、ゲーム理論を用いた研究によって、そういった予測をルールや制度を用いて上手に作り出す仕組みが、人間の社会には備わっていることが解明されてきた。混合交通を実現し、自動運転車を走行させるためには、共通の予測あるいはそれに代わるものを作り出すための議論が不可欠と思われる。

4. おわりに

本稿では、来るべく自動運転車社会に備えて、あらかじめ議論しておくべき問題や論点を発見する手がかりを見出すという目的意識のもと、交通経済学のモデルを中心として、自動車交通のモデルの展望を行った。加えて、その論点の

1つとして、混合交通の状態における人間の運転する車の側からの視点からの議論を、現在よりも進めるべきであるという提案を行った。その際にキーとなる概念は「調整」である。自動車交通を可能としている大きな要素は、相互依存関係がある状態における人間同士の高い調整能力である。しかし、対自動運転車となった場合にはその能力がこれまで通り発揮できるのかは疑わしい。それを可能とするには何らかの方策が必要と思われ、この点に関してはまだ十分な議論がなされていないと思われる。

「調整」問題に関しては、ゲーム理論では相当程度の研究蓄積がある。Eメールゲームは、プレイヤー間の持つ情報に大きな隔たりがある時、電子メールという手段を用いて非対称情報を解消することの困難を描いたものである。Eメールゲームに関連して、不確実性下の調整について考察したゲームとしてグローバルゲームがある^{viii}。グローバルゲームでは、現在プレイヤーが直面している状況についてのシグナルを両プレイヤーが独自に受け取る。ただし、両者はそれぞれが受け取るシグナルが従う確率分布を知っていて、それらの間の隔たりは大きくないと仮定する。その際に、プレイヤー間の調整がそれほど困難でことが示されている。本稿では、人間にとって自動運転車がどのように動くかについて分からないという状況はEメールゲームに近いと考え、そちらのモデルに基づき議論を行ったが、グローバルゲームからも何らかのヒントが得られるかも知れない。今後の課題としたい。

最後に、本稿の議論では、思考実験を用いるなど、感覚に訴えるという手法を多用している。この点は筆者にとって心苦しい点である。考察している問題の性格上やむを得ない部分もあるが、よりフォーマルなモデルを組み、科学的な分析を行うことが望ましいと自覚している。この点についても今後の課題としたい。

注

- i. 本稿では特に竹内(2006)を参考とした。
- ii. ルーティングゲームは近年情報科学や計算機科学の領域で1つの研究分野を形成しているアルゴリズムックゲーム理論において精力的に研究が進められている。その主要な応用分野はインターネットや人工知能などである。ここでは自動車交通について関心があるので、それらの成果について紹介することは割愛する。アルゴリズムックゲーム理論におけるルーティングゲームのサーベイとしてはNisan, Roughgarden, Tardos and Vazirani (2007)の18章を、和書としては岩間(2006)の13章を参照されたい。
- iii. Nisan, Roughgarden, Tardos and Vazirani (2007)の18章を参照されたい。

- iv. 因みに、この場合のシステム最適なルート選択は α を $1/2$ 、 β を $3/2$ の台数の車が通ることである。
- v. 最近、外国人が訪れる観光地の筆頭として取り上げられる渋谷のスクランブル交差点での通行の様子などを見ると、人間が持つこのような能力の高さが改めて理解できよう。
- vi. 近年、囲碁や将棋などで人間のプロ棋士と A.I.の対戦が行われ、A.I.がプロ棋士に勝つことが増えてきており、話題として大きく取り上げられている。その際に、あるプロ棋士が A.I.は動揺や焦りといったものを見せず、安定しているところが A.I.との対戦の難しさであると語っていたことは印象深い。人間同士の対局は、盤上の石や駒の配置だけではなく、相手の表情やしぐさなどの盤の外の事柄も相当含んだゲームであるが、A.I.は盤上だけの情報で対戦をしている。この点は自動車交通に引き付けても似た側面はあると思われる。
- vii. 自動運転車に関する議論では、時々刻々と変化する状況に応じて、行動を相互に調整する必要を念頭に置かれる場合が多い。交差点ゲームでは、慣習が確立した後は、ドライバーには常に同じ行動をすることが求められるだけである。一方、出来る事態に応じて歩調を合わせた行動をする問題を取り扱っているという点で、Eメールゲームは自動運転システムを考える際にしばしば想定される状況により近いと言える。
- viii. グローバルゲームの日本語のサーベイとしては、宇井(2009)を参照されたい。

参考文献

－日本語文献－

岩間一雄 (2006) 『アルゴリズム・サイエンス：出口からの超入門』 共立出版

宇井貴志 (2009) 「グローバル・ゲーム」 『経済セミナー』 2009年8・9月号：120-128

竹内健蔵 (2006) 『都市交通ネットワークの経済分析』 有斐閣

高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 (2016) 「官民 ITS 構想・ロードマップ 2016 ～2020年までの高速道路での自動走行及び限定地域での無人自動走行移動サービスの実現に向けて～」

http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/2016_roadmap.pdf

(2017年3月22日)

内閣府 (2016) 「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 自動走行システム研究開発計画」

http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf (2017年3月

22日)

—外国語文献—

- Monderer, D. and Shapley, L. S. (1996) 'Potential Games' *Games and Economic Behavior*, 14: 124-143.
- Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, É. and Vazirani, V. V. (2007) *Algorithmic Game Theory*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Pigou, A. C. (1920) *The Economic of Welfare*, Macmillan.
- Rosenthal, R.W. (1973) 'The network equilibrium problem in integers' *Networks*, 3: 53-59.
- Sugden, R. (2004) *The Economics of Rights, Co-operation and Welfare*, Palgrave Mcmillan.
- Youn, H., Gastner, M. and Jeong, H. (2008) 'Price of Anarchy in Transportation Networks: Efficiency and Optimality Control' *Physical Review Letters*, 101(12): id. 128701.