

[特集論文]

限定合理性と交通行動モデリング：研究展望

小林潔司¹・松島格也²¹正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)²正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究では、個人の限定合理性に基づく行動モデルに関する既存の研究成果について概括する。さらに、ベイズ選択モデルをとりあげ、そのモデルの背後に想定されている合理性条件に関して批判的に検討する。さらに、個人の認知能力や情報処理能力に限界が存在する場合を対象として、限定合理的学習モデルのプロトタイプを提案する。以上の2つのモデルを比較することにより、限定合理的モデルの役割と意義について考察し、限定合理的モデルに関する今後の研究の方向性と残された研究課題をとりまとめる。

Key Words : bounded rationality, behavior modeling, memory, minmax rule, route choice

1. はじめに

ランダム効用理論をはじめとして、合理的個人を想定した多くの交通行動モデルが提案されている。一方で、合理的個人という想定の経験的妥当性に関してさまざまな批判が提示されてきた。経済学の分野では、合理的個人という仮定は理論を構築するための公準(postulation)であり仮説検定の対象ではない。公準から理論的に導出されたモデルが経験的検証の対象となる。

Simonは現実の経済主体は利潤(効用)最大化を貫徹するようには行動しないことを指摘し、新古典派経済学が前提とする理想的合理性(Simonは実質的合理性と呼んだ)は限定的合理性(手続き的合理性)に置き換えられるべきだと主張した¹⁾。個人は合理的な行動を動機づけられるものの、現実には自分が置かれている環境を不完全にしか把握できず、最適な選択を計算する完全な能力を持たない限定合理的な存在である²⁾。

現在、限定合理性概念を前提とした多様な行動モデル(以下限定合理的モデルと呼ぶ)が提案されており^{3),4)}、交通行動モデルへの適用も試みられている。しかし、限定合理性の概念は研究分野によって多様に異なり、限定合理性に関する体系的な理論が確立されているわけではない。限定合理的モデルが対象とする問題は広範囲に亘るが、本研究では個人の交通行動において幅広く見いだされる認知能力や情報処理能力の限界の問題に焦点を絞ることとする。そのうえで、主として経済学の分野における限定合理的モデルに関する最近の研究成果を踏まえて、限定合理的な交通行動モデリングの可能性に関して考察する。

限定合理的モデルは心理学、認知科学、人工知能等の分野で精力的に開発されており、経済学のみに着目

することはレビューとしては不完全である。しかし、これらの分野の最新の研究成果は経済学における最近の研究成果に反映されており、経済学を対象としたレビューは今後の交通モデリングの可能性を考える上で有用な情報を与えてくれよう。このような問題意識の下に、以下、2. では限定合理性概念について考察する。3. では個人の認知能力や情報処理能力の限界に着目した限定合理的アプローチを紹介する。4. では合理的アプローチの例としてベイズ選択モデルをとりあげ、その背後にある個人合理性の仮定について批判的に検討する。5. では、個人の認知能力や情報処理能力の限界を考慮したような限定合理的経路選択モデルを提案する。6. では4., 5. の議論を踏まえて、限定合理的モデルの意義と今後の課題について考察する。

2. 限定合理性とは

(1) 理想的合理性と限定的合理性

人間行動の背後にある合理性を議論する場合、理想的合理性と限定合理性を区別する必要がある。Simonの定義によれば、理想的行動とは「あたえられた条件と制約の下で当初の目的を達成するために最適な結果をもたらす行動」を意味する¹⁾。一方、限定合理的行動を「意図的には合理的であるが、その合理性には限界がある行動」と定義する。限定合理的行動は、行為者による何らかの合理化戦略によるものであり、思考の判断を経ずに行われる突発的な非合理的行動とは異なる。Simonは、現実の意思決定環境は経済主体の認知能力を越えるほど複雑であると考えた。そのような環境の中で、個人は目的を達成するために意識的に努力するが、それらは認知能力の限界や情報処理能力の限

界を反映したやり方でなされる。Simonによる限定合理性の解釈は、限定合理性の重要な側面である「認知能力上の限界」に着目したものである²⁾。Seltenは現実の経済主体が利潤（効用）の最大化と異なる多様な動機を持っていることを主張し、限定合理性は動機づけ上の限界とも呼ぶべきもう1つの重要な側面を持っていることを指摘した^{5),6)}。限定合理性の個人はある種のルールや手順に従って、自らの行動を合理化する。そのルールや手順が最適ではないにしろ、十分に満足のいくものであればそれを変更しようという誘因をもたない。このような試行錯誤の結果、最終的に選ばれた行動が限定合理的行動と呼ばれる。しかし、「首尾一貫した手順に従ってなされる行動」と「ただ単に無秩序な行動」との間には無限の多様性が存在する。「個人がある手順に従って行動する」からといって、あらゆる形式の手順的行動(procedural behavior)を限定合理性であると認めるわけにはいかない。限定合理性と非合理性とを分ける境界線を設定する必要がある。本研究では、限られた認知能力や情報処理能力を前提としたうえで、個人が合理的であると判断し、それを変更しようという誘因を持たないような意思決定行動を限定合理的行動と定義することとする。

(2) 意思決定の手順と限定合理性

経済理論が想定する合理的行動は、1)「何が実行可能な選択肢であるか?」、2)「どういうことを望ましいと考えるか?」、3)「実行可能な選択肢と望ましさに関する考え方から何が最適な選択か?」ということを熟考し、4)「選択肢の中から1つの代替案を選択する」という手順により記述される。多くの限定合理的モデルも、ある適切な手順に従って代替案を選択するメカニズムを記述する。理想的合理性を前提とした行動モデル（以下、合理的モデルと呼ぶ）と限定合理的モデルの双方が手順的アプローチを採用するのであれば、両者の手続きの間にどのような本質的な違いがあるかを明確にしなければならない。

合理的アプローチの特徴は、実行可能な選択肢を発見する手順と選好を定義する手続きが相互に独立して行われる点にある。その結果、個人がある問題において1つの手順に従ってある選択肢を選択したのであれば、別の環境の下で同じ意思決定問題に直面したとしても、同じ手順に従って同じ選択肢を選択しなければならない。このような選択行動が可能であるためには

- 1) 意思決定者は合理的個人であり、選好に基づいて代替案を序列化する動機を持っていること、
- 2) 直面している問題に対して明確な知識を持っていること（選択肢集合を知っていること）、
- 3) 選択肢集合の中から最適な行動を選択する能力を

持っていること、

4) 選択肢の論理的に等価な記述方法に対して選好が変化しないこと、

が成立しなければならない。個人が上記の4つの条件を満足するような意思決定能力を持つ場合、合理的な決定手順が自動的に採用されることとなる。したがって、経済理論は個人の合理的行動を記述することに専心があり、「個人がなぜそのような意思決定を行ったのか」を説明することに努力を払わなかった。

選択行動を論理的な最適化計算に基づいた選択関数として表現するためには、上述の4つの条件が成立する必要がある。しかし、現実の個人は上記の4つの条件を満足するとは限らず、合理的手順を採用する（できる）とは限らない。以上の条件が同時に満たされない場合、選択行動を論理的演算モデルとして表現できない。個人は限界のある認知能力や情報処理能力の下で、限定的ではあるが合理的な一連の「親指ルール（rule of thumb: 型にはまったやり方）」を作りだし、直面する状況それぞれの文脈に応じて適切なやり方を選択するといった帰納的な意思決定を行う。最近の認知心理学等の関連分野の成果を用いて、機能的な意思決定を特徴づける合理的手続きに関する研究が進展しつつある。合理化手続きとして種々のものが提案されているが、次節では個人の認知能力、情報処理能力の限界を考慮するうえで重要な手続き³⁾である1) 問題のフレーム化、2) 問題の簡略化、3) 合理化を紹介する。上述した4つの条件のうち、問題のフレーム化は主として条件2)を、問題の簡略化は条件3)を緩和する試みである。また、問題のフレーム化と簡略化と付随して、意思決定における合理化の問題が発生する。

(3) 限定合理的手続き

a) 問題のフレーム化

個人が意思決定環境を完全には認知できない場合、対象とする問題を自分自身のやり方で定式化することになる^{7),8)}。意思決定環境を認識し、対象とする問題を定式化する行為をフレーム化と呼ぶ。フレーム化が異なれば、選択の結果も異なる。上述したように、合理的行動では選択肢集合と望ましさの定義が独立に所与のものとして与えられる。しかし、個人が自分自身で選択肢の集合を定義し、選択問題を定式化しなければならない状況を考えよう。この時、選択肢の特徴を記述する方法が、選択肢の選ばれ方（望ましさの定義）に影響を及ぼすことがある。例として、経路選択問題を取りあげよう。いま、ドライバーが選択する各経路の平均走行時間を認知できたとする。この場合、ドライバーは経路選択問題を平均走行時間のもっとも小さい経路を選択しようとするだろう。しかし、平均走行時

間を計算するためには過去の走行時間を記憶し、その平均値を計算する情報処理能力が必要である。ドライバーが平均走行時間を認知できず、せいぜい「過去何回かの走行経験」か、あるいは「もっとも時間がかかった時の記憶」程度の情報しか持ち合っていない場合を考えよう。この場合、平均走行時間という評価尺度を用いることはできない。ドライバーは、経路選択問題を、たとえば「もっとも時間がかかった場合の走行時間が最小となる」ような経路を選択する問題として定式化する可能性がある。しかし、経路の選び方はこのようなルールだけではない。たとえば、「記憶の中でもっとも短い時間で目的地に行けた経路を選択する」という他のルールで経路を選択することも可能だろう。この場合、いろいろなルールをためしてみて、最終的に経路選択ルールを選ぶことも可能である。このように個人の認知能力や情報処理能力に限界がある場合、自分が直面している問題を自分の能力にあった形でフレーム化することになる。問題をフレーム化する方法が異なれば選択される結果も異なる。

b) 問題の簡略化

個人は思考に必要な資源を節約するために、選択問題を簡略化する。認知能力や情報処理能力に限界があるため、すべての要因を考慮するのではなく、あらかじめ決定したルールによって選択した要因のみに着目する⁷⁾。たとえば、ドライバーは経路選択にあたって利用可能なすべての経路を認知できるわけではない。過去の経験や先駆的な情報等に基づいて、あらかじめ考慮の対象とする経路集合を限定している場合が少なくない。選択肢を限定するルールが個人によって異なっていれば、選択される経路も当然異なってくる。このような選択肢集合の認知能力の限界を考慮した離散選択モデルに関して研究が蓄積されている^{9),10)}。複数の選択肢の望ましさを比較するためには大量の情報処理が必要となる。個人が多数の選択肢の中から選択肢を1つ選択する場合、すべての評価要因を同時に考慮して選択肢を選択するわけではない。例えば、ある特定の評価要因に着目し、選択肢集合の中から少数の選択肢を絞り込む。個人は選択問題に対してある手順に従って問題を簡単化する。このような問題の簡単化の手順を考慮した行動モデルに関しては、古典的なTverskyのElimination model¹¹⁾をはじめとして離散的選択モデルとして記述可能であり、今後の発展が期待される。

c) 合理化

個人は意思決定の段階で必要となるすべての情報を獲得できるわけではない。個人は意思決定を行う際に、限られた情報を用いて論理的な推論を行い、その論理に関して整合的な意思決定を行っている。しかし、推論で用いる論理は先駆的に与えられるのではなく、意

思決定者が置かれている環境に応じて状況依存的に決定される¹²⁾。再び経路選択問題を例にとろう。個人は各経路の走行状況に関する情報を経路選択の前の段階で完全に把握することはできない。たとえば、曜日や天候といった経路の状況と関連がある情報を用いて各経路の状況を予想する。このような予想や推論に用いる情報は個人によって多様に異なる。予想や推論の方法が異なれば、選択される結果も異なる。経路選択を行った事後の時点において、当初想定していなかった新しい状況に遭遇することもある。この場合、新しく獲得した情報を用いて各経路の状況を推論し直し、選択した経路を途中で変更することもあるだろう。このような論理的な推論に基づく合理化行動を考慮した経路選択モデルもいくつか提案されている¹³⁾。個人の合理化行動に関する研究は、特に学習モデルの分野において進展しつつある¹⁴⁾。

以上で3つの代表的な限定合理的な手続きと、いくつかのモデル化の事例を紹介した。現在、認知能力や情報処理能力に限界がある個人の選択行動の1側面の記述にとどまらず、限界合理的な個人行動やその相互作用を総合的にモデル化しようとするいくつかの研究プログラムが発展しつつある。以下では、その中から代表的なアプローチとして学習モデル、進化論的ゲームを取りあげ、それらのアプローチにおける限定合理性の取り扱い方と問題点についてとりまとめる。

3. 限定合理的アプローチ

(1) 限定合理的アプローチの方向性

限定合理性を取り扱うもっとも直接的な方法は、個人の情報処理能力に限界があることを表現する何らかの制約条件を明示的に定義し、個人行動を制約条件付き最適化問題として定式化する方法^{15),16),17)}である。しかし、情報処理能力の限界を考慮した制約条件付き最大化問題によるアプローチの最大の問題点は、制約のない場合と比べて問題を解くための計算量がどのように変わるかについては何ら考慮していないという点にある^{18),19)}。一般に、最適化問題に制約条件が付加されるほど、最適化問題を解くために必要とされる情報処理は複雑となる。したがって、情報処理能力の限界を考慮した制約条件付き最大化問題によるアプローチは、それを解くためにより多くの情報能力が必要になると矛盾が発生する。

以上のような限界に配慮して、ゲーム理論や経済学の分野では個人の情報処理能力や認知能力の限界を手順的な方法により表現しようという試みが蓄積された。ゲーム理論の分野では個人の情報能力の限界を表現するために、オートマタやチューリング機械を用いて個

人行動を表現したり、戦略の複雑性という概念を持ち込んで選択行動をモデル化したりする研究^{20),21),22)}が発展した。中でも Neyman²³⁾はあらかじめ限られた数の状態変数を用いて設計されたオートマトン機械でプログラムできない戦略はプレイヤーにとって遂行不可能であると考えた。さらに、プレイヤーがこのようなオートマトン機械で表現される場合、有限回の繰り返しゲームにおいても協調行動がナッシュ均衡として記述できることを示した。この種のアプローチの特徴は、個人の行動や学習過程がオートマトン機械として表現されるルールを繰り返し用いるところに特徴がある。しかし、多くの研究事例では、個人が用いることができるルール集合が先決的に与えられている。個人が利用可能なルール集合が個人間の相互作用の結果を本質的に規定する。モデルの結果の現実性を評価するためには、個人が「なぜそのルール集合を用いるのか」を説明する行動的、あるいは認知論的な説明が不可欠である。このような考え方から、認知能力や情報処理能力に限界がある個人が学習行動を通じてルールを獲得し、より合理的な行動を採用するまでのプロセスをモデル化する試みが試みられた。このような視点から、3.(2)では個人の学習行動に関するアプローチについて簡単にとりまとめよう。さらに、個人の学習行動だけでなく、社会の多くの個人が同時に学習するような社会的学習モデルが開発されている。3.(3)ではその事例として進化論的ゲーム理論をとりあげ、今後の研究方向についてとりまとめよう。

(2) 学習モデル

経済学の分野では、合理的期待均衡理論の中で学習モデルに関する研究が発展した²⁴⁾。合理的な個人が経験情報を蓄積しながら合理的な期待を形成する過程を、例えばペイズ推論過程を用いてモデル化することが可能である。初期のペイズ学習モデルでは、個人が現象を支配する真の確率モデルを知っているということを仮定しており、個人の認識能力に関して過度の合理性を要求しているという批判がなされた²⁵⁾。その後、ペイズ学習モデルにおける個人の認識能力に関する仮定を緩める方向で研究が蓄積された。経路選択行動モデルにおいても、4. で紹介するペイズ選択モデルによると、可能な限り個人の認識能力に関する合理性の仮定を緩めたモデルが開発されている²⁶⁾。しかし、4. でも考察するように、依然として個人の記憶能力、情報処理能力に関して高度な合理性が要求されている。

Seltenは個人の意思決定過程において、自分が直面している状況を知覚し、意思決定問題を主観的にモデル化する段階が決定的に重要であると指摘した⁶⁾。限定合理的な個人の学習行動をモデル化するためには、個

人が帰納的推論過程を経て問題を主観的にモデル化するプロセスをモデル化することが必要である。個人は自己の推論過程に従って、蓄積された経験的事実をたよりに直面する問題に直接関係する様々な要素を互いに結びつけ、1つの主観的モデルを構築していく。帰納的推論過程をモデル化するためには、個人の知覚、問題解決、調査、遂行、学習といった5つの認知段階を明確に考慮することが必要である²⁶⁾。

Selten プログラムに従って限定合理的学習モデルを内蔵した主観的意思決定モデルに関する研究が進展しつつある。そこでは、個人の短期と長期の問題を区別する。短期には、個人は自己が直面する選択問題を単純化し、主観的モデルとして定式化する。個人は自分の置かれている環境をよく理解していない。したがって、主観的モデルが間違った特定化となっている可能性がある。長期には、個人は経験情報に基づいて主観的モデルの改良・更新を試みる。この更新の手続きはヒューリスティック（試行錯誤の繰り返しで解法を発見する）なものである。学習行動もある程度は理にかなっているが、全体的に見れば最適ではない方法が採用される可能性がある。個人は自分が採用しているモデルが誤っている可能性も知っており、モデルの変更に対する準備と対処をヒューリスティックに行う。

すでに、限定合理的な考え方に基づいた学習モデルに関する膨大な研究成果が蓄積されている^{14),27)-32)}。初期の学習モデルは個人の学習行動をある機械的なルールの反復過程としてモデル化する^{24),27),28)}ことに主眼が置かれていたが、最近では個人の信念の異質性^{29),30)}、親指ルールへの収束性³²⁾等、個人の認知能力や情報処理能力の限界をより明示的に考慮したアプローチが試みられている。中でも有名な Gilboa and Schmeidler による Case-based 選択モデル³¹⁾は、過去に経験したことがない意思決定環境における個人行動をモデル化しており、不確実性下における意思決定行動への発展が期待されている³³⁾。Case-based 選択モデルは、各戦略を選択した時の評価値が、過去に経験した様々な状況において同じ行動をとった際に獲得した便益の加重平均和として定義される。その加重平均和は過去の状況と今直面している状況との類似性を示す何らかの尺度によってウェイトつけられたものである。残念ながら、既存研究の多くは機械論的なルールを用いた学習モデルにとどまっている。今後、Kreps¹⁴⁾が指摘したように、2.(3)で示した個人の問題の簡略化・合理化行動に基づいた個人の推論過程をモデル化することが必要となるだろう。5. では記憶能力と情報処理能力に限界があるような個人が経路選択の中で、意思決定ルールを決定するような限定合理的モデルを提案するとともに、限定合理的モデルの役割と限界について考察する。

(3) 進化論的ゲーム

以上で紹介した学習モデルは、ある特定の個人が限られた認知能力と情報処理能力の中で、学習を通じて意思決定の合理化がどのように達成されるかをモデル化したものである。しかし、例えば、道路ネットワーク上での経路選択問題では、個々人の経路選択の結果が各経路のパフォーマンスを決定し、結果的に個人の学習行動に影響を及ぼす。個人行動が相互作用を及ぼすような社会システムにおいては、単に個人の学習行動のみをモデル化するだけでは不十分であり、社会全体の中で個々人の学習行動が互いに関連しながら、社会全体として学習するメカニズムを分析する必要がある。このような問題意識に基づいて、進化論的ゲーム理論という新しいゲーム理論が発展しつつある。

進化論的ゲームではあらかじめ特定の戦略をプレイするようにプログラム化された個人が逐次相手のプレイヤーを代えながらゲームを繰り返し、より大きなペイオフを獲得するような戦略を採用していく^{34),35)}。結果的に、より大きなペイオフをもたらす戦略のみが生き残り、集団全体の均衡状態が達成される。Maynard Smith³⁶⁾は進化論的安定性の概念を導入し、集団内のごく少数のメンバーが突然変異的に均衡から逸脱する行動をとったとしてもとの均衡状態に回帰するよう、進化論的に安定な戦略という概念を導入した。

進化論的ゲーム理論では、個人の限定合理性を1) 過去からの慣性、2) 近視眼的視点、3) 試行錯誤（実験）という観点からモデル化する。個人はゲームの構造についてよく知らず、ゲームをプレイする瞬間には各主体は自己の戦略をあたかもプログラムされたかのように行動する。しかし、各期ごとに社会の中の一部の人人が戦略を変更し、社会全体では各戦略をとる人たちの分布が徐々に調整される。逆に言えば、社会全体の急激な変化が不可能であるという慣性が働いている。また、個人が戦略を変更する時には、その人はその時点でみた最適な戦略を選択するという意味で近視眼的である。各個人は自分の行動が社会全体の戦略の分布に及ぼす影響まで考慮しない。最近では、個人の試行錯誤や実験(experimentation)を考慮にいれた進化論的ゲームも提案されている³⁷⁾。個人は常に最適戦略を選択するということに拘らず、さまざまな戦略を試みる。人口の一部が毎期入れ替わるような状況では、現実に適応せずに新しい戦略を採用する世代が登場するかもしれない。このような既存の戦略分布を毎期攪乱する要因が試行錯誤または実験と呼ばれる³⁸⁾。

進化論的ゲームでは、プレイヤーは完全には合理的でなく、経験を通じて他の人々の行動を学習する。プレイヤーは将来の動向まで予測して行動するほどの合理性は持たないという点で限定合理的である。このよう

なゲームにおいて社会全体が安定的な均衡点に到達すれば、それは社会において自発的に形成された慣習あるいは制度と解釈できる。また、複数の均衡が存在する場合には、歴史的な初期条件に依存して異なる点に収束するという歴史依存性あるいは経路依存性の問題も分析することができる。しかし、進化論的ゲームではプレイヤーの行動や学習過程があらかじめプログラム化されており、動的な環境の中における個人の学習行動を明確に定式化したわけではない。そこでは、個人はある特定のルールに従って行動するオートマトンとしてモデル化されており、機械論的なオートマトンゲームと同様の限界を有している。これに対して、近年、個人行動の心理的な行動様式を明示的に取り入れた行動論的ゲーム理論^{39),40)}が発展しつつある。そこでは、個人は自分自身のペイオフだけでなく他人のペイオフも考慮に入れたり、2.(3)で紹介した個人のフレミング、簡略化、合理化行動を明示的にモデル化したような新しいゲーム理論が開発されつつある。著者らの知る限り、土木計画の分野で社会的学習プロセスを扱った研究事例はほとんどない。経路選択行動に関しても個人の学習行動に関してはいくつかの研究が蓄積されているが、個々人の学習行動の関係に関しては非常にprimitiveな取り扱いしかなされていない。このような社会的学習問題に関する今後の課題に関しては6.において考察する。

4. ベイズ選択モデル再考

(1) ベイズ選択モデル

宮城・小林・藤高は個人が不完備な情報の下で経路選択を繰り返し、経路の走行時間を学習する行動をベイズ学習モデルとして表現した^{41),42),43)}。さらに、小林・藤高のベイズ学習を考慮した経路選択モデル（以下、ベイズ選択モデルと呼ぶ）は個人の合理的学習行動を通じて、最終的には個人が形成する経路走行時間に関する主観的期待が客観的に実現する統計値と一致するような合理的期待に収束することモデル化している。通常のベイズ学習モデルとは異なり、ベイズ選択モデルでは、各個人は自分の行動が他人の行動や自分の学習結果に及ぼす影響を考慮しないで経路を選択する。さらに、選択した経路の経験情報を用いて、選択した経路の走行時間に関する主観的期待のみを更新する。合理的個人ならば、そのようにして得られる情報の将来価値を考慮に入れて経路選択を行うだろう。また、新しい経験情報を用いてすべての経路の走行時間に関する主観的期待を同時に更新することも可能であろう。しかし、個人が情報の価値も考慮しながら経路選択を行うためには、途方もなく複雑な計算をしなけれ

ばならない。ベイズ選択モデルは認知制約や情報処理能力制約の下での制約条件付き最大化行動をモデル化したものである。この意味でベイズ選択モデルは限定合理的であり、個人は簡単なルールと計算のみにより合理的期待を形成することが可能となる。しかし、ベイズ選択モデルは、個人の記憶の有限性という認知制約を考慮に入れた場合、高度に合理的な内容になっていることも事実である。以下では、ベイズ選択モデルを極めて単純化した形で示すとともに、個人の認知制約、情報処理能力といった視点からモデルの前提となっている合理性の仮定に関して考察し、限定合理的モデルにおける論点を浮き彫りにしたい。

(2) 学習過程のモデル化

無限に続く離散的時点において、ある同一のOD間のトリップを繰り返している個人を考えよう。当該のOD間には I 本の経路が選択可能であり、選択可能な経路集合を $S = \{i : i = 1, \dots, I\}$ で表そう。個人は利用可能な選択肢集合を認知していると仮定する。個人によって選択肢集合が異なっていてもいい。選択した経路走行時間は他の個人の行動や環境条件によって不確実に変動する。個人は選択した経路の走行時間は観測できるが、選択しなかった経路の走行時間を知ることはできない。いま、時点 t における経路 i の所要時間 $\pi_i(t)$ に関する主観的期待を $\pi_{i^*}(t)$ で表そう。時点 t における個人の経路 i に対する期待効用関数を

$$V_i(t) = -\pi_i(t) + \omega_i \quad (1)$$

と表す。 ω_i は私的情報を表す確率変数であり、試行錯誤や実験的行為を表す搅乱項である。個人は、期待効用(1)を最大にする経路

$$i^*(t) = \arg \max_i \{V_i(t)\} \quad (2)$$

を選択する。個人は走行経験を蓄積することにより、経路の走行時間の主観的期待 $\pi_i(t)$ を形成する。いま、 t 期において経路 i^* を選択したとしよう。その結果、経路 i^* の走行経験が $n_{i^*}^{(t)}$ 回になったとしよう。個人の学習ルールは、 t 期の新しい経験情報 $\hat{\tau}_{i^*}(t)$ を用いて、主観的期待 $\pi_{i^*}(t)$ を更新するルールとして記述できる。客観的走行時間分布が1次元正規分布で近似できる時、個人がベイズ推定により走行時間の平均値に関する主観的期待を更新するメカニズムを

$$\pi_{i^*}(t+1) = \pi_{i^*}(t) + \frac{1}{\nu_0 + n_{i^*}^{(t)}} (\hat{\tau}_{i^*}(t) - \pi_{i^*}(t)) \quad (3)$$

により表現できる⁴²⁾。ここに ν_0 は個人に固有なパラメータである。すなわち、 $t+1$ 期における走行時間の主観的期待値は、 t 期における主観的期待値 $\pi_{i^*}(t)$ と t 期における主観的期待の誤差（走行時間の実績値と主観的期待値との差）を用いて更新される。主観的期待の

誤差に関する重み係数 $1/(\nu_0 + n_{i^*}^{(t)})$ は個人によって多様に異なり、すべての個人にわたって一定となる保証はない。重み係数 $1/(\nu_0 + n_{i^*}^{(t)})$ は定数ではなく、 $n_{i^*}^{(t)}$ が大きくなるにつれて0に近づき、主観的期待 $\pi_{i^*}(t)$ の補正量は次第に減少し0に収束する。個人は学習行動を通じて自己の主観的期待を逐次修正し、彼の主観的期待はある値に収束する。また、 t 期で選択しなかった経路 $j (j \in S) \neq i^*$ の主観的期待は、その経路が利用されるまで更新されない。すなわち、次式が成立する。

$$\pi_j(t+1) = \pi_j(t) \quad (4)$$

式(3)で $n_{i^*}^{(t)}$ が十分に大きい時、主観的期待 $\pi_{i^*}(t)$ を

$$\pi_{i^*}(t) \simeq \hat{\tau}_{i^*} = \frac{1}{n_{i^*}^{(t)}} \sum_{k(t)=1}^{n_{i^*}^{(t)}} \hat{\tau}_{i^*}^{k(t)} \quad (5)$$

と近似できる。 $\hat{\tau}_{i^*}$ は標本平均、 $\hat{\tau}_{i^*}^{k(t)}$ は初期時点から逆算して k 回目に経路 i^* を選択した時の走行時間を表す。個人が経路選択を十分多く繰り返せば、彼の平均時間に関する主観的期待は客観的に実現する標本平均に漸近する。個人はどのような初期期待を有していても、学習行動を通じて最終的に合理的期待を形成する。式(4)に示すように、個人が選択しない経路の主観的期待は更新されない。個人が利用可能なすべての経路に関する主観的期待を更新するかどうかは、期待効用関数(1)に含まれる搅乱項 ω_i の分散に依存する。搅乱項の分散が十分小さい場合、走行時間の主観的期待が大きい経路はなかなか選択されず、長期間にわたって主観的期待が更新されないことが起こりうる⁴³⁾。中山ら⁴⁴⁾がいう思いこみ状態が出現する。しかし、十分な長期間を考えれば、偶然にも搅乱項の値が大きい値をとり、ドライバーが当該の経路を選択するだろう。その結果、学習速度は遅いものの、十分な長期においては合理的期待を形成する。搅乱項の分散がゼロであれば、その経路は一度も選択されず、合理的期待も形成されない。小林・藤高は学習メカニズムがある弱い合理性条件を満足する場合、主観的期待が合理的期待に収束しうることを示した⁴²⁾。ベイズ学習だけでなく、広い範囲の学習メカニズムが合理性条件を満足する。個人の認知過程に関する所与の制約条件を満足する学習メカニズムの中で、ベイズ学習過程はもっとも合理的な（主観的期待の収束速度がもっとも早い）学習過程であることを示すことができる。期待効用最大化のフレーム(1),(2)の中では、個人がよほど特殊な学習行動を採用しない限り、個人の主観的期待は合理的期待に収束する。

なお、個人によって合理的期待は異なる可能性がある。たとえば、「毎日経路を選択する」、「決められた曜日のみに経路を選択する」など個人の行動様式が異なれば、当然のことながら個人は異なった合理的期待を

形成する。走行時間の観測値にシステム的な誤差が含まれれば合理的期待にもバイアスが含まれる。合理的期待は個人が経験する客観的な標本観測値と主観的な期待が一致した状態を意味し、個人が一度合理的期待を形成できれば個人はそれを修正しようという誘因を持たない。しかし、個々人が異なる走行履歴により走行時間をベイズ学習すれば、個々人は異なる合理的期待を形成することが起こりうる。このようにベイズ学習の結果、すべての個人が主観的期待を更新する誘因を持たないような合理的期待均衡が成立する。このような合理的期待均衡モデルを用いて、個々人が異質な合理的期待を形成し、しかも誰も主観的期待を変更しないような状況を記述することができる。合理的期待均衡概念は各個人が学習を継続する動機づけを持つかどうかに関する内的な整合性条件を表現しているのである。ベイズ選択モデルの未解決の問題点として、十分長期間に亘ってベイズ学習を蓄積した個人は、仮に交通環境が変化しても、それに気づかないという非合理性が存在する。この問題を解決するためには、しばらく選択していない経路を実験的に選択してみるという実験的行為を考慮することが必要である。

(3) ベイズ選択モデルと限定合理性

個人がベイズ選択モデルを用いる場合、個人にどのような合理性が要求されるかを考察してみよう。ベイズ選択モデルでは、個人は自分が直面する経路選択問題について完全には理解していない。過去に獲得したデータを用いて、走行時間に関する主観的期待を形成し、個人自ら主観的な経路選択問題を定式化している。さらに、新しい走行経験を踏まえて主観的な経路選択問題を逐次更新している。主観的経路選択問題を更新するにあたって必要なデータは、各経路の走行回数 $n_i^{(t)}$ 、1期前の主観的期待 $\pi_i(t)$ 、選択した経路の観測データ $\tau_{i^*}(t)$ 、および個人に固有なパラメータ ν_0 である。また、ベイズ選択モデルを用いるためには、選択した経路の観測誤差 $\tau_{i^*}(t) - \pi_{i^*}(t)$ と主観的期待 $\pi_{i^*}(t)$ の加重平均を計算する能力が必要とされる。以上の合理性条件を、個人の認知能力、情報処理能力の観点から検討してみよう。ベイズ選択にあたって必要となるデータはいずれも当該の個人が入手可能なデータであり、この点については問題はないだろう。しかし、個人の記憶能力の視点に立てば、過去の走行回数を正確に記憶しているという仮定は強すぎるだろう。さらに、加重平均（平均値）を求める計算は、on trip 状態にある一般的な個人の情報処理能力を越えている可能性がある。個人にこのような認知能力、情報処理能力上の限界がある場合、ベイズ選択モデルを用いることはできない。5. では、以上の認知能力、情報処理能力の限界を考慮に入

れた学習モデルを提案してみよう。当然のことながら、提案する限定合理的学習モデルはベイズ選択モデルが想定する合理性条件よりも、より弱い認知能力、情報処理能力を前提としたモデルでなければならない。

5. 限定合理的学習モデル

(1) メタ意思決定問題

ベイズ選択モデルは、個人が完全な記憶能力と平均値計算を行う情報処理能力を持っている場合には最適な学習モデルである。しかし、個人がなぜ期待効用最大化ルールを採用したのかを説明していない。期待効用最大化ルールが採用された背後には、「合理的な意思決定主体であれば、合理的な意思決定ルールを採用するはずである」ということが暗黙のうちに想定されている。しかし、4.(3) で検討したような記憶能力と情報処理能力に限界がある場合、個人が期待効用最大化ルールを採用することは不可能である。したがって、個人が限られた認知能力や情報処理能力の下で、どのような意思決定ルールを採用するかを決定する問題（メタ意思決定問題）をモデル化する必要が生じる。メタ意思決定問題は 1) 意思決定ルールの集合と 2) 意思決定ルールの望ましさを判定する評価基準により構成される。意思決定ルールとは、過去の走行経験の記憶と情報処理能力に基づいてある経路を選択するまでの情報処理過程を意味する。評価基準は意思決定ルールの望ましさを判定する基準である。限定合理的学習モデルに関しては、すでに中山等⁴⁴⁾、藤井⁴⁵⁾が提案している。また、記憶容量に限界がある限定合理的モデルに関しては Barucci⁴⁶⁾が理論的な分析を試みている。これら既往の研究にならい、限定合理的モデルを意思決定ルールの選択とその評価プロセスで構成される手続き的プロセスモデルで表現しよう。

(2) 記憶の有限性

個人はある意思決定ルールに従って経路選択を行う（意思決定ルールの内容に関しては次節で説明する）。個人は毎期ごと経路選択を繰り返し、選んだ経路の走行時間は経路情報として記憶される。各個人の記憶能力には限界があり、各経路に対して高々近い過去 M 回の走行経験のみを記憶していると考えよう。それ以前の時点におけるメモリーは消滅すると仮定する。初期時点のメモリーには先駆的な情報が納められていると考える。いま、経路 i で実現可能な走行時間を離散的集合 $\tau_i = \{\underline{\tau}_i, \tau_i^1, \dots, \tau_i^n, \bar{\tau}_i\}$ を表そう。ここで、 $\underline{\tau}_i$ は経路 i で実現可能な走行時間の下限値、 $\bar{\tau}_i$ は上限値であり $\bar{\tau}_i < \infty$ を仮定する。現実には走行時間は連続的に分布するが、個人が認知可能な走行時間は有限個の離散的

な値をとると考える。いま、各経路の走行時間は時間を通じて定的な確率過程に従って変化していると仮定する。このような定的な確率過程の中で、記憶容量に限界を持ったある1人の個人が繰り返し経路を選択しているような状況を考える。着目している個人が時刻 t までに経験した経路 $i \in S$ の走行時間に関する記憶の内容を $\tilde{\tau}_i(t) = \{\tilde{\tau}_i^{1(t)}, \dots, \tilde{\tau}_i^{m_i(t)}\}$ で表そう。前節と同様、記号 $\tilde{\tau}$ は経験値を表す。また、 $m_i(t)$ は時刻 t までに経路 i を選択した場合の走行時間に関する記憶の総数であり、 $m_i(t) \leq M$ を満足する。 $\tilde{\tau}_i^{k(t)}$ は時刻 t の時点で過去 k 回前に経路 i を利用した時の走行時間に関する記憶である。 $\tilde{\tau}(t) = \prod_{i \in S} \tilde{\tau}_i(t) \in \bar{\Pi}$ は時刻 t における個人の記憶の状態を表す。 $\bar{\Pi}$ はすべての可能な記憶の状態を表す有限集合である。これらの記憶を手がかりに個人は意思決定ルールに基づいて経路選択を行うとともに、意思決定ルールのパフォーマンスを評価する。

(3) 意思決定ルールと評価関数

個人は複数の意思決定ルールが選択可能である。意思決定ルールとして、「ある特定の経路のみを選択する」、「記憶の中でもっとも早く目的地な到達できた経路を選択する」、「でたらめに選択する」等、多様な内容が考えられる。個人が想定する意思決定ルールの集合は、個人により多様に異なるだろう。ある個人が有限個(J 個)の意思決定ルールが想定可能であり、その中に以下で述べるminmaxルールが含まれていると仮定しよう。minmaxルール以外の意思決定ルールとして、個人がどのような意思決定ルールを想定しているかは特定化しない。これらの意思決定ルールは、「有限個の記憶だけを用いるもの」という認知制約条件を満足しなければならない。したがって、期待効用最大化ルールは除外される。minmaxルールを以下のように定義する。

定義1：(minmaxルール) minmaxルールは経路 $i^*(\text{minmax}) = \arg \min_{i \in S} \tau_i^{\max}(t)$ を選択するような意思決定ルールである。ただし、 $\tau_i^{\max}(t) = \max_k \{\tilde{\tau}_i^{k(t)} \in \tilde{\tau}_i(t), i \in S\}$ である。

すなわち、minmaxルールは過去の高々 M 回の記憶の中でもっとも悪かった(時間がかかった)ケースの走行時間がもっとも小さくなるような経路を選択するというルールである。いま、個人が意思決定ルール j を採用していると考えよう。時点 t における意思決定ルール j ($j = 1, \dots, J$) の評価値を $f_j^*(t)$ で表そう。初期時点においては、評価基準値にはある適正な値が設定されていると考える。個人は各意思決定ルールの評価基準の現在値も記憶していると考える。さらに、意思決定ルール j の望ましさをもっとも最近の過去 N ($\leq M$) 回の

OD間走行時間ベクトル $\theta_j(t) = \{\tilde{\tau}_{i_{t-1}^*(j)}, \dots, \tilde{\tau}_{i_{t-N}^*(j)}\}$ で評価すると考える。ここに、 $i_{t-s}^*(j)$ はルール $j \in J$ の評価に用いる経路選択の結果の内、 s 回前の経路選択で選択した経路を表す。どのような過去の経験を意思決定ルールの評価に用いるかは個人によって多様に異なる。例えば、 $i_{t-s}^*(j)$ をルール $j \in J$ を用いて s 回前の時点での選択した経路と考えることもできる。あるいは、個人によっては、選択しなかったルールに関しても、もしもそのルールを用いて同じ経路を選択したのであれば、その経路の走行経験を当該のルールの評価情報として加えることもあるだろう。ここでは、どのような評価情報を用いて各ルールを評価するのかを特定化しない。しかし、個人は1) 過去の高々 N 個の走行経験情報を用いて各ルールの評価を行う、2) それぞれのルールを適用した場合に獲得できる可能性のある情報を用いてルールの望ましさを評価する、ということだけを仮定する。評価関数 $f(\theta_j) : R^N \rightarrow R$ は、意思決定ルール j を用いた最近の過去 N 回の経験に基づいて、意思決定ルールの性能を評価する関数であり、以下の単調性条件を満足すると仮定する。

定義2：(評価関数の単調性) $f(\theta_j) = f(\theta_{j'})$ が成立する任意の $\theta_j, \theta_{j'}, (j \neq j'; j, j' \in J)$ を考える。任意の非負ベクトル $\delta \geq 0, \delta \in R^N$ に対して $f(\theta_j + \delta) \geq f(\theta_{j'})$ 、かつ任意の正ベクトル $\delta > 0$ に対して $f(\theta_j + \delta) > f(\theta_{j'})$ が成立する時、評価関数 $f : R^N \rightarrow R$ は単調である。

評価関数の単調性は、ある意思決定ルールで実現した記憶の中の走行時間ベクトルが、別のルールの下で実現された走行時間ベクトルを弱い意味で卓越する場合、そのルールに対する評価値はもう一方のルールの評価値より小さくなければならないことを意味する。言い換えれば、単調評価関数はあるルールがいい成果を残すならばそのルールをよりよいものと評価するものでなければならない。単調性条件は非常に弱い条件であり、多くの評価関数がこの条件を満足する。たとえば、

$$f(\theta_j(t)) = \max\{\tilde{\tau}_{i_{t-1}^*(j)}, \dots, \tilde{\tau}_{i_{t-N}^*(j)}\} \quad (6a)$$

$$f(\theta_j(t)) = \min\{\tilde{\tau}_{i_{t-1}^*(j)}, \dots, \tilde{\tau}_{i_{t-N}^*(j)}\} \quad (6b)$$

$$f(\theta_j(t)) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{\tau}_{i_{t-k}^*(j)} \quad (6c)$$

はいずれも単調性条件を満足する。式(6a)は過去 N 回の走行時間の最大値を、式(6b)は最小値を、式(6c)は平均値を用いて意思決定ルールを評価することを意味する。もちろん、これら3つの評価関数以外にも単調性条件を満足する関数形は数多く存在する。以下、個人にとって評価関数は所与であると仮定する。なお、評価関数の選択というさらに高度な次元の選択問題を定

式化することも可能だろう。しかし、以下の議論は評価関数の形式を特定化しなくても成立するため、ここでは評価関数の単調性のみ仮定して議論を進める。

(4) 限定合理的意思決定ルール

時点 t において個人が J 個の意思決定ルールに対して、評価値 $\{f_1^*(t), \dots, f_j^*(t)\} \in F$ を与えていると考えよう。 F は評価値空間である。走行時間の実現値集合が離散集合で与えられると仮定しているため、評価値空間も有限集合で表現される。時点 $t+1$ の期首において、現在選択している意思決定ルール $j(t)$ の性能を評価関数 $f_j^*(t+1) = f(\theta_j(t+1))$ を用いて評価する。評価値の更新方法は多様に考えられる。たとえば、ルール h ($\neq j$) の評価値は修正せず、 $f_h^*(t+1) = f_h^*(t)$ が成立すると仮定することもできる。あるいは、時刻 t において利用しなかったルールでも、仮にそのルールを用いて時刻 t で経路を選択した場合、時刻 t で実際に選択した経路と同じ経路を選択した場合に t 期の走行経験をそのルールの評価値を更新するために用いることも可能だろう。個人によって、利用可能な意思決定ルールに多様性があるため、極めて数多くの評価値の更新ルールを考えることができる。ここでは、評価値の更新ルールを特徴化しない。前述したように、1) 過去の高々 N 個の走行経験情報を用いて各ルールの評価を行う、2) それぞれのルールを適用した場合に獲得できる可能性のある情報を用いてルールの望ましさを評価する、という条件を満足する任意の更新ルールが適用可能であると考える。意思決定ルールの更新ルール H を

$$j(t+1) = \arg \min_h \{f_h^*(t+1)\} \quad (7a)$$

で表現しよう。時点 $t+1$ では更新した意思決定ルールに従って、経路を選択する。なお、時点 $t+1$ においてはじめてルール j を用いた場合、その性能に関する過去の情報が存在しない。ルール j の初期評価値を $f_j^*(0)$ とすれば、時点 $t+1$ の走行後におけるルール j の性能評価は情報ベクトル $\theta_j(t+1) = \{\tilde{\tau}_{i_{t+1}(j)}, f_j^*(0), \dots, f_j^*(0)\}$ を用いて評価されると考える。また、情報ベクトルは新しい経験情報が追加されるたびに更新される。この時、つぎの定理が成立する。

定理：すべての単調な評価関数 f と minmax 戰略を含む任意の意思決定ルール集合 J に対して、確率 1 で $\lim_{t \rightarrow \infty} j(t) = \text{minmax 戰略}$ となる。さらに、個人が選択する経路は走行時間の minmax 値を与える経路に収束する。

証明：有限状態空間 $J \times F$ において、更新ルール H によって定義される有限マルコフ連鎖を考える。時点 t に

おけるマルコフ連鎖の状態は個人が時刻 t において用いた意思決定ルールと J 個のルールに対する評価値により定義される。個人は今期の走行結果に基づいて、今期に用いたルールの評価値を更新する。つぎの時点で用いる意思決定ルールは更新ルール H により決定される。まず、minmax 戰略の下で個人が選択する経路は走行時間の minmax 値を与える経路に長期的に収束することを示そう。いま、経路 i においてとりえる走行時間の最大値を $\tilde{\tau}_i$ と表す。 $i^*(\text{minmax}) = \arg \min_i \{\tilde{\tau}_i\}$ を minmax 経路と呼ぼう。さらに、minmax 経路でとりうる走行時間の最大値と最小値を $\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}$, $\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\min}$ と表現する。個人は minmax 経路以外の経路を利用することにより、長期的には $\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}$ より走行時間が大きくなる走行経験を必ず持つ。一度、 $\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}$ より大きい走行時間を経験した経路は、他のすべての経路でその値よりも大きい走行時間を経験するまで選択されない。したがって、当該経路の記憶も更新されない。しかし、minmax 経路では $\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}$ より大きい値を経験しない。したがって、個人が minmax 戰略を継続的に採用している限り、個人が長期的に選択する経路は $i^*(\text{minmax})$ に収束する。なお、minmax 経路に対する評価値は $f(\theta_{\text{minmax}}^{\max})$ と $f(\theta_{\text{minmax}}^{\min})$ の間の数値をとることは明らかである。ただし、 $\theta_{\text{minmax}}^{\max} = \{\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}, \dots, \tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}\}$, $\theta_{\text{minmax}}^{\min} = \{\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\min}, \dots, \tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\min}\}$ である。以下では、minmax ルールを採用し、かつその他のルールに対する評価値が $f(\theta_{\text{minmax}}^{\max})$ より大きい値となるような状態がマルコフ連鎖の吸収状態になることを示す。そのためには、1) その他の状態から吸収状態に必ず有限回のマルコフ連鎖により到達する、2) minmax ルール以外にマルコフ連鎖の吸収状態が存在しないことを示す。1) の証明。いま、個人が minmax 戰略以外のルールを採用し、minmax 経路以外の経路を選択したとしよう。この時、有限回の試行のうちに $\tilde{\tau}_{\text{minmax}}^{\max}$ より大きい走行時間を重ねて経験する確率は正の値をとる。記憶 N が有限であるため、その他のルールの評価値が minmax ルールの評価値より大きくなる（悪くなる）確率も正の（ゼロでない）値をとる。したがって、他のルールを採用しても十分多くの反復を行うことにより、その評価値は minmax 戰略の場合よりも大きくなる。したがって、確率 1 で吸収状態に到着する。2) の証明。minmax ルール以外のルールが吸収状態になる場合は、a) minmax ルールを採用しているうちに、評価値 f_{minmax}^* より評価値が小さくなるような minmax ルール以外のルール j を少なくとも 1 つ発見するか、b) minmax ルール以外のルールを使い続けるか、のいずれかが成立する場合しかない。a) の場合、minmax ルールからそれ以外のルール j ハルルを変更したとしよう。しかし、個人は有限回の走行経験でルール j の評価値が f_{minmax}^* より

大きくなる事態を経験する。したがって、ルール j を用いる状態は吸収状態ではない。b)の場合、有限回の経験により、任意の別のルールの下で、個人は τ_{minmax}^{max} より悪い走行時間を何度か経験するため、そのルールは吸収状態ではありえない。したがって、minmax ルール以外に吸収状態は存在しない。(Q.E.D.)

なお、以上の定理の証明から明らかのように、個人が十分学習をすれば minmax 経路を継続的に利用することになる。この場合、「minmax 経路だけを選択する」というルールと minmax 戦略は戦略的に同等であり、「minmax 経路だけを選択する」というルールもマルコフ過程の吸収状態になる。以上の定理が意味する内容は非常に明瞭である。個人はある意思決定ルールに従って経路選択を繰り返すうちに、非常に悪い結果を経験するという例外的な事態に少なくとも 1 回は経験する。一度、そのような苦い経験をすると、その意思決定ルールに対して不当に低い主観的評価を与えたまま別の意思決定ルールに切り替える。すると、他の意思決定ルールがそれより低く評価されるようにならない限り、もとの意思決定ルールを再び評価することはありえず、その意思決定ルールに対して下された不当に低い評価は変更されないままになる。このため、最低の状況がもっともましな意思決定ルール、すなわち minmax ルールが長期的に生き残ることになる。個人が minmax ルールを用いる場合、それぞれの経路の走行時間に関する記憶の中で最悪の結果を比較し、その中で、もっともましな経路を選択する。一度、個人がある経路を選択すれば、同一経路を継続して利用する。このような走行経験を繰り返す内に、その経路のひどい渋滞に巻き込まれ、走行時間が非常に長くなつたとしよう。その場合、次回以降、利用する経路を変更し、同じような学習を繰り返す。このような学習により、最終的には minmax 経路を継続して利用することになる。以上の結果は、個人が採用する意思決定ルールの評価基準に依存しない。minmax ルールはありふれたルールである。したがって、個人が意思決定ルールの代替案として minmax ルールを採用することは十分に考えられよう。以上のモデルでは個人が試行的に行う実験的行為を考慮していない。実験的行為を許容した場合にも、実験的行為を行った短期間においては、思考錯誤を繰り返すが、長期的な学習を経ればやはり minmax 経路に収束するだろう。

6. 限定合理的交通モデリングの課題

(1) ランダム性と確率的集計化

以上で定式化した限界合理的モデルによれば、「個人に記憶能力に限界がある場合、長期的には minmax ル

ールを採用する」という結果を得る。しかし、以上で示した定理は、あくまでも定常的な確率的環境の下で経路選択を繰り返す 1 人の個人のみに着目して得られた結果である。ここで、記憶容量に限界がある多くの限定合理的な個人が同時に経路選択を繰り返すような状況を考えよう。この時、「限定合理的な個人の相互作用により、各時点における経路の交通量（走行時間）が定常的な確率変動を再現することが可能になるか」という問題が生じる。いわゆる限定合理的モデルの確率的集計化の問題であるが、この問題は経路選択モデルにとどまらず、その他の限定合理的モデルにおいても現れる。本節では、限定合理的モデルの確率的集計化の問題を経路選択行動を例にとり説明しよう。

ペイズ選択モデルでは期待効用関数(1)の中に、状況依存的に変動する確率変数が含まれる。この確率変数の変動により、個人行動のランダム化が達成される。それに対して、限定合理的モデルは確定的な意思決定ルールを表している。限定合理的経路選択モデルに関するいくつかの先行研究では、経路選択の各ラウンドにおいて一定数の個人が同時に経路選択を行い学習行動を続けるようなシミュレーションが実施されている。言い換えれば、個人の経路選択のタイミングが外生的に与えられた環境の中でシミュレーションが行われる。このような環境の中では、個人間の学習行動の相互関係による個人全体の学習過程は複雑であるが確定的なメカニズムである。このようなシミュレーションでは確率的な交通量変動は発生しない。この時、確定的ルールを採用する限定合理的な個人の経路選択の繰り返しにより、現実の道路で観察されるような交通量、走行時間の確率的な変動を再現できるかどうかが重要な分析課題となる。

現実の交通ネットワークで観測されるような走行時間の確率的な時系列変動を生じさせる原因是、1) 個人行動のその時々の状況依存的な確率変動（以下、ミクロな不確実性と呼ぶ）、2) 数多くの個人が互いに coordinate されないでランダムに意思決定することにより生じる不確実性（マクロな不確実性と呼ぶ）が考えられる。現実の確率変動はこれら 2 つの不確実性の相互作用により発生している。互いに事前の調整を行っていない個人がランダムに交通行動を行う交通ネットワーク上では、交通ネットワーク上で生じる確率変動がマクロな不確実性のランダム特性に決定的に支配される場合も十分にありうる（付録参照）。今後、ミュレーション実験により、個人の意思決定原理と個人間のマクロな不確実性の相互作用によって生じる確率変動特性に関して知見を蓄積していく必要があろう。たとえば、個々人が minmax ルールに代表されるような限定合理的な確定ルールによって経路選択を繰り返すと

しよう。各時点において、ネットワーク均衡（等時間均衡）が成立する可能性はほとんどゼロに近い。しかし、個々人が経路選択を行うタイミングが十分にランダム化（ある時点で経路選択を行う個人の数が十分にランダム化）されているとしよう。この時、「毎期ごとの実現値を時間的に集計化した平均的なパフォーマンスが等時間配分に近い結果をもたらすかどうか」、あるいは「個々人の限定合理的な学習行動の全体が非定常的なマクロ的挙動を引き起こすかどうか」が重要な検討課題となろう。このような確率的な集計化の結果とその確率的特性は、個人の意思決定ルールとマクロな確率変動との相互作用に依存している。このような確率論的なマクロ挙動に関する研究は今後に残された大きな研究課題である。

（2）限定合理的モデルの役割と意義

限定合理的モデルの1つの限界は、それが特定の状況に限定された局面における人間行動を記述したものにすぎない点にある。5. では記憶能力、情報処理能力に限界があるような個人の経路選択行動をモデル化した。しかし、限定合理性に関する行動仮説を変えれば、数多くの限定合理的モデルを定式化することができる。多様な限定合理的学習モデルを用いた複雑な経路選択シミュレーションモデルを用いてある分析結果を得ても、それが「一般性を持つのか」それとも「シミュレーションにより、たまたま運良く得られたものか」がわからない。

限定合理的モデルのいま1つの限界は、限定合理性に関する経験的な検証が行われていない点にある³⁾。Tversky and Kahneman等をはじめとして、室内実験という競争関係が存在しない仮想環境の中で個人合理性に対する反証を見いだした事例はこと欠かない。しかし、多くの経済学者はこれらの人間心理学的な成果に敬意を払いつつも、現実社会における相互作用や市場競争は人間を合理的な存在に作り上げていると信じている。多くのドライバーが互いに早く目的地に到達しようとする環境がドライバーにできるだけ合理的な行動を取るように動機づけるのである。限定合理的モデルの中には、異なった限定合理性の仮定に対して同じような結果が得られたり、ad hocな技術的仮定にモデルの結果が左右されたりする場合がある。モデルが多く技術的仮定に依存する場合、個人の限定合理性に関する本質的な仮定とモデルの結果が1対1に対応しない。したがって、モデルの結果の検証が限定合理性の仮定に関する検討につながらないことも起こりうる。ある限定合理的モデルが個人の行動を表現したとしても、そのことがモデルの仮定の妥当性を保証するものではない。これは合理的モデルの経験的な検証においても介

在する問題であるが、技術的仮定が多くなるほど、限定合理性に関する経験的な検証が困難となる。

本来、交通行動モデルの目的は、個人の交通行動の基礎となる行動仮説とそこから得られたモデルによる分析結果の間の論理的関係を説明する点にある。モデルの妥当性は、モデルがもたらす結果だけではなく、仮定の妥当性の双方について議論されなければならない。

5. で提案した限定合理的モデルは、「個人の記憶容量に限界があり、意思決定ルールを単調的評価基準で評価するならば、長期的には個人はminmaxルールで経路を選択する」という仮定と行動の関係を示したにすぎない。限定合理性の原因は記憶の有限性だけではない。個々人は各自の文脈においてそれに限定合理的である。このような限界を考慮すれば、限定合理的モデルの向かうべき方向は、経験的に観測される多くの現象を説明しうる1) 限定合理性に関する仮定、2) 意思決定ルールと、3) その結果との間の関係の発見に向かうべきである。いたずらに、モデルの精緻化とその推計競争に堕することは慎むべきだろう。

これまでの限定合理的モデルの研究では、しばしば合理的モデルと矛盾するようなモデルを作成することを自己目的化した場合が少なくない。しかし、このようなアプローチは生産的ではない。むしろ、ある手続きをモデル化し、その結果が合理性と矛盾するかしないかを検討することが正攻法である⁴⁷⁾。たとえば、Galeは限定合理的な個人によるマッティングゲームにおいてある条件が満足される場合、個人の相互作用により競争的な市場均衡が実現することを示した⁴⁸⁾。それと同様に、経路選択問題においても情報システム、予約システムあるいは料金制度のような技術的・制度的な条件が整備されれば、限定合理的な個人の相互作用を通じても、より効率的な経路選択を実現できる可能性がある。このようなシステムや制度を発見的に模索していくことが、限定合理的モデルの1つの効用だろう。

7. おわりに

交通行動モデルが果たす役割として、1) モデルは行動を予測するためのものである、2) モデルは規範的な行動を示すものであり、より望ましい政策決定するための道具である、3) モデルは複雑な現象を解明するための道具であり、モデルは完全には現象とは対応していないが、そのようなモデルは間接的に有用である、4) モデルは概念や行動仮説とわれわれの日常感覚との間のリンクを確立することである、という4つがある³⁾。1) は実証的・経験的モデルであり、2) は規範的モデルである。これらのモデルの目的は政策決定や意思決定のための情報やそれを正当化するため

の論理を検証することにある。3)は抽象的な理論モデルである。理論モデルの発展により、多くの実証モデルや規範モデルの発展がもたらされたことは言うまでもない。限定合理的モデルは4番目のカテゴリーに属する³⁾。限定合理的モデルは、日常的な人間行動における認知能力や計算能力の限界を研究の対象としている。限定合理的な交通行動モデルは、このような人間の能力の限界が、実際の個人の交通行動やその相互作用にどのような影響を及ぼすかについて洞察するための道具である。言い換えると、日常生活の感覚でもっともだと思われるいくつかの行動原理を仮定した場合、「そこからどのような結論が導き出されるのか」を説明する手法である。限定合理的モデルが現実に正確に一致しなければならないという誤ではない。モデルが適切であるかどうかは、「モデルが取り上げている仮定が自然であるかどうか」、「有用な知見を導いているかどうか」により評価される⁴⁹⁾。

限定合理的な交通行動モデルの役割を考慮すれば、以下のような研究課題が残されているように思える。1) 限定合理的モデルでは、無限に多様な種類の合理化手続きを利用できる。このような手続きの間にどのような関係が存在するのかを解明する必要がある。言い換えると、手続きに関する一般理論を開発する必要がある。2) 前述したように、限定合理的モデルの最終的な目的は合理的モデルとの矛盾を示すところにあるのではない。合理的モデルにより得た結論は、限定合理性の存在に対してどの程度に頑健であるかを分析する必要がある。3) ある限定合理的な手続きが社会において支配的であり、それが合理的モデルでは説明できない現象をもたらしているのであれば、限定合理的な手続きを用いて自生的秩序や制度の存在を説明できるかどうかを検討する必要がある。4) 限定合理的な行動原理とマクロな不確実性の間の相互作用に関するシミュレーション実験を通じて、たとえば限定合理的な確定的ルールを持つ個人の相互作用を通じて現実の交通ネットワークで現れる確率変動特性を表現しうるかどうかに関して、知見を蓄積していく必要があろう。

付録 補足説明

筆者等の問題意識を説明するために簡単な例題を考えよう。経路Aと経路Bという2つの対称的な経路を持つ簡単なネットワークを考える。十分多くの交通主体が存在し、2つの等質な(数の等しい)集団 α と集団 β に分かれるとする。ここで2つの状況を想定しよう。状況1では、集団 α の個人はすべて経路Aのみを利用し、集団 β の個人はすべて経路Bのみを利用する。しかし、その時々に経路を選択する個人はそれぞれの集団

からランダムにサンプリングされる。それぞれの集団からある個人がサンプルされる確率 p は各個人に共通している。状況2では集団 α に属する個人はいずれも経路Aを確率0.7で、経路Bを確率0.3で選択する。集団 β に属する個人はいずれも経路Aを確率0.3で、経路Bを確率0.7で選択する各集団から個人がランダムに選択されるが、その選択確率は状況1と同じであると考えよう。状況1ではミクロな個人行動は確定的であるが、状況2ではミクロな個人行動は確率的である。状況1と状況2において、各経路における交通量の確率的変動特性は等しい。この例題では、各経路の交通量の確率的変動特性はミクロな個人行動ではなく、その時々に交通主体がランダムサンプリングされる確率的特性に完全に規定される。

参考文献

- 1) Simon, H.: A behavioral model of rational choice, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 69, pp. 99-118, 1955.
- 2) Simon, H.: *Models of Bounded Rationality*, The MIT Press, 1982.
- 3) Rubinstein, A.: *Modeling Bounded Rationality*, The MIT Press, 1998.
- 4) Anand, P.: *Foundations of Rational Choice under Risk*, Oxford University Press, 1993.
- 5) Seltzer, R.: The chain store paradox, *Theory and Decision*, Vol. 9, pp. 127-159, 1978.
- 6) Seltzer, R.: Bounded rationality, *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, Vol. 146, pp. 649-658, 1990.
- 7) Tversky, A. and Kahneman, D.: Rational choice and the framing of decisions, *Journal of Business*, Vol. 59, pp. 251-278, 1986.
- 8) Rubinstein, A.: *Economics and Language*, Cambridge University Press, 2000.
- 9) Pudney, S.: *Modelling Individual Choice. The Econometrics of Corners, Kinks and Holes*, Blackwell, pp. 260-290, 1989.
- 10) 森川高行, 竹内博史, 加古裕二郎: 定量的観光魅力度と選択肢集合の不確実性を考慮した観光目的地選択分析, 土木計画学・論文集, No. 9, pp. 117-124, 1991.
- 11) Tversky, A.: Choice by elimination, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 9, pp. 341-367, 1972.
- 12) Huber, J., Payne, J., and Puto, C.: Adding asymmetrically dominated alternatives: Violations of regularity and the similarity hypothesis, *Journal of Consumer Research*, Vol. 9, pp. 90-98, 1982.
- 13) 羽藤英二, 朝倉康夫, 平井千智: 不確実性下の意思決定を考慮した逐次的情報参照モデル, 土木学会論文集, No. 660/IV-49, pp. 27-37, 2000.
- 14) Kreps, D. M.: Anticipated Utility and Dynamic Choice, in: Jacobs, D. P., Kalai, E., and Kamien, M.I. (eds.): *Frontiers of Research in Economic Theory*, Cambridge University Press, 1998.
- 15) Fershtman, C. and Kalai, E.: Complexity consideration and market behavior, *RAND Journal of Economics*, Vol. 24, pp. 224-235, 1993.
- 16) Dow, J.: Search decisions with limited memory, *Review of Economic Studies*, Vol. 58, pp. 1-14, 1991.
- 17) Rubinstein, A.: On price recognition and computa-

- tional complexity in a monopolistic model, *Journal of Political Economy*, Vol. 101, pp.473-484, 1993.
- 18) Gilboa, I.: The complexity of computing best response automaton in repeated games, *Journal of Economic Theory*, Vol. 45, pp.342-352, 1988.
 - 19) Papadimitriou, C.: On players with a bounded number of states, *Games and Economic Behavior*, Vol.4, pp. 122-131, 1992.
 - 20) Abreu, D. and Rubinstein, A.: The structure of Nash equilibrium in repeated games with finite automata, *Econometrica*, Vol.56, pp.1259-1282, 1988.
 - 21) Kalai, E. and Stanford, W.: Finite rationality and interpersonal complexity in repeated games, *Econometrica*, Vol. 56, pp.397-410, 1988.
 - 22) Rubinstein, A.: Finite automata play the repeated prisoner's Dilemma, *Journal of Economic Theory*, Vol. 39, pp.83-96, 1986.
 - 23) Neyman, A.: Bounded complexity justifies cooperation in finitely repeated prisoners' dilemma, *Economic Letters*, Vol.19, pp.227-229, 1985.
 - 24) Kirman, A. and Salmon, M.: *Learning and Rationality in Economics*, Basil Blackwell, 1995.
 - 25) Kurz, M.: *Endogenous Economic Fluctuation, Studies in the Theory of rational Beliefs*, Springer, 1997.
 - 26) Seltzen, R.: Evolution, Learning, and Economic Behavior, in: Jacobs, D. P., Kalai, E., and Kamien, M.I. (eds.): *Frontiers of Research in Economic Theory*, Cambridge University Press, 1998.
 - 27) Sargent, T.J.: *Bounded Rationality in Macroeconomics*, Oxford University Press, 1993.
 - 28) Fudenberg, D. and Levine, D. K.: *The Theory of Learning in Games*, The MIT Press, 1998.
 - 29) Barucci, E.: Heterogeneous belief and learning in forward looking economic models, *Journal of Evolutionary Economics*, Vol. 9, pp. 453-464, 1999.
 - 30) Koutsougeras, L.: Bounded rational learning in differential information economies, core and value, *Journal of Mathematical Economics*, Vol. 31, pp. 373-391, 1999.
 - 31) Gilboa, I. and Schmeidler, D.: Case based decision theory, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110, pp. 605-639, 1995.
 - 32) Slonim, R. L.: Learning rules of thumb or learning more rational rules, *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 38, pp.217-236, 1999.
 - 33) Matsui, A.: Expected utility and case-based reasoning, *Mathematical Social Science*, Vol. 39, pp. 1-12, 2000.
 - 34) Young, P.: The evolution of conventions, *Econometrica*, Vol. 61, pp. 57-84, 1993.
 - 35) Weibull, J.: *Evolutionary Game Theory*, The MIT Press, 1995.
 - 36) Maynard Smith, J.: *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press, 1982.
 - 37) Samuelson, L.: *Evolutionary Games and Equilibrium Selection*, The MIT Press, 1997.
 - 38) Kandori, M., Mailath, G., and Rob, R.: Learning, mutation, and long run equilibria in games, *Econometrica*, Vol. 61, pp. 29-56, 1993.
 - 39) Rabin, M.: Incorporating fairness into game theory and economics, *American Economic Review*, Vol. 83, pp. 1281-1302, 1993.
 - 40) Camerer, C. F.: Progress in behavioral game theory, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 11, pp. 167-188, 1997.
 - 41) 宮城俊彦：ベイズ学習過程と確率的利用者均衡モデル，土木計画学研究・論文集，No. 8, pp.73-80, 1990.
 - 42) 小林潔司, 藤高勝巳:合理的期待形成を考慮した経路選択モデルに関する研究, 土木学会論文集, Vol.458/IV-18, pp.17-26, 1993.
 - 43) Kobayashi, K.: Information, rational expectations, and network equilibria - An analytical perspective for route guidance systems, *The Annals of Regional Science*, Vol. 28, pp. 369-393, 1994.
 - 44) 中山晶一郎, 藤井聰, 北村隆一:ドライバーの学習過程を考慮した道路交通の動的解析-複雑系としての道路交通システム解析に向けて-, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.753-762, 1999.
 - 45) 藤井聰, 中山晶一郎, 北村隆一:習慣解凍と交通政策, 道路交通シミュレーションによる考察, 土木学会論文集, No.667/IV-50, 2000.
 - 46) Barucci, E.: Exponentially fading memory learning in forward looking economic models, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 24, pp. 1027-1046, 2000.
 - 47) Blonski, M.: When is rational behavior consistent with rules of thumb?, A link between evolutionary terminology and neoclassical methodology, *Journal of Mathematical Economics*, Vol. 32, pp. 131-144, 1999.
 - 48) Gale, D.: *Strategic Foundations of General Equilibrium, Dynamic Matching and Bargaining Games*, Cambridge University Press, 2000.
 - 49) Matsushima, H.: Bounded rationality in economics: A game theorist's view, *The Japanese Economic Review*, Vol. 48, pp. 293-306, 1997.

(2001. 1. 31 受付)

BOUNDED RATIONALITY AND TRAFFIC BEHAVIOR MODELING: AN ANALYTICAL PERSPECTIVE

Kiyoshi KOBAYASHI and Kakuya MATSUSHIMA

This paper provides with a state-of-the-arts review on behavior models with bounded rationality. The rationality underlying the Bayesian learning models is critically investigated, and a leaning model with bounded rationality is presented as an alternative formulation. By comparing the structures of the models, the roles and objectives of the bounded rational behavior modeling are investigated. The paper concludes by summarizing the authors' perspectives and remaining research issues for further development of bounded rational behavior modeling.