

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760347

研究課題名（和文） 需要モデルを内包した動的配分理論

研究課題名（英文） Dynamic Traffic Assignments Including Demand Model

研究代表者

井料 隆雅 (IRYO TAKAMASA)

神戸大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10362758

研究成果の概要（和文）：

本研究では需要モデルを内包した動的配分理論を構築した。動的配分理論は交通需要を既知のものとして道路交通網を評価するが、その際は詳細な交通需要データが必要であり、それを外性的に与えるのは一般的には難しい。本研究では動的配分理論に需要モデルを内包させるために、車両を離散化した動的配分理論と、社会ネットワークを組み込んだ需要モデルをそれぞれ構築した。これらと、これらを組み合わせた融合モデルについてその特性を分析した。

研究成果の概要（英文）：

This study proposes a dynamic traffic assignment model that includes a demand model. Dynamic traffic assignment models, which aim to evaluate road networks, use precise data on travellers' demand, although they are not easy to be obtained. This study proposes a dynamic traffic assignment model where traffic flows are discretised and a demand model considering social networks. These models and the combined model are theoretically investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,040,000 |
| 2009年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・交通工学・国土計画

キーワード：動的均衡配分, 交通需要モデル, 交通ネットワーク理論, 社会ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

道路交通網における混雑現象を分析する理論のひとつとして、時間軸を考慮した配分理論である「動的配分理論」が研究されてきている。道路交通網における混雑は空間方向

のみならず時間方向にも広がるため、より効果的な道路交通網の整備運用計画の立案には時間軸を考慮した理論が不可欠である。動的配分理論の研究は世界中で精力的に進められており^{[1][2]}。解決すべき重要な理論的課

題はまだいくつか残ってはいるものの、動的配分理論は近い将来一定のレベルでの完成を見ることが期待できる理論といえよう。

一方、動的配分理論を実務的応用の面から見るといまだに積み残されている問題点を見つけることができる。中でもっとも重要な問題点は「現状の動的配分理論では需要パターンが外生的に与えられることを前提としている」である。たとえば、動的配分理論では需要の時間的集中が混雑に大きく影響することが知られており、現実的な問題への応用の場面では少なくとも分単位での需要の時間変動を知る必要が出てくる。このような詳細な交通需要を知るには、大規模な追跡型調査により交通行動の詳細を知る必要がある。昨今このような調査は技術的には容易になっているが、個人情報の問題などの社会的制約はむしろ強化されており、十分な精度で必要な需要パターンを知ることは難しい。このため、現状のままでは、「モデルの理論的課題が解決しても、そのモデルに必要な入力が必要な精度で得られない」ということになってしまう。この問題は動的配分理論に残された大きな課題ととらえることができよう。

第1章の参考文献：

- [1] 桑原雅夫：動的配分理論－蓄積と展望。第35回土木計画学研究発表会・講演集，2007。
- [2] 井料隆雅：動的均衡配分問題における解の特性に関する研究解説。第35回土木計画学研究発表会・講演集，2007。

2. 研究の目的

本研究では、需要パターンに関する限られた情報から交通網のパフォーマンスを推定する「需要モデル内包型の動的配分理論」を構築する。それにより、動的配分理論を交通網の整備運用計画に応用するための方法論を提示する。

需要モデル内包型の動的配分理論では、現状の動的配分問題では完全に外生的にあつかうとされている「交通網の需要」の一部の情報を内生的に記述する。交通網の需要パターンに関する研究は実証的にも理論的にも多く行われている。たとえば研究代表者は高速道路への流入交通量の変動が確率モデルである程度記述できることを示している^[3]。また、需要パターンの基となる交通行動に関する研究は幅広く行われている。そこでこの知見を活かすことにより、このような内生的記述は一定の程度まで達成可能であることが期待できる。

第2章の参考文献：

- [3] 井料隆雅，岩谷愛理，朝倉康夫：都市高

速道路における時間帯別流入交通量の週変動分析。交通工学研究発表会論文報告集，173-176，2007。

3. 研究の方法

2章で示した目的を達成するために、本研究は、

1. 需要モデルの内包に適した動的配分モデル
 2. 社会ネットワークをベースとした需要モデル
 3. 動的配分モデルと需要モデルの融合
- の3について研究を行った。それぞれの研究方法について以降で説明する。

(1) 需要モデルの内包に適した動的配分モデル

既存の動的配分モデル、特に動的均衡配分モデルを需要モデル内包に適するように再構築し、その特性を分析した。

構築の際のポイントは「車両を離散化して動的な交通量均衡配分問題を再構築する」ところにある。既存の動的交通量配分問題では、車両を流体のような連続的なフローで記述することが一般的であった。いっぽう、交通流は本来1台1台の車両が集合して構成されるものであり、連続値をもちいた定式化はあくまでも近似的扱いであることに注意しなくてはならない。交通流を構成する各車両は独立した意思をもって自身の利得を最大化する選択肢（経路、時刻など）を選ぶ。また、車両どうしの相互作用も本来は追従モデルのように個別の車両間のあいだに定義されるものである。これまでは利用者均衡配分問題の理論をこのような離散的なモデルで構築することは必ずしも主流ではなかった。しかし需要モデルを内包させる場合には、個々の車両の意思を配分モデルの中で直接記述することになる。よって、上述のような離散的なモデルが連続的なフローを用いたモデルより適しているといえる。

離散的な車両に対して均衡状態を考える場合、連続フローモデルに対してよく用いられるWardrop均衡の概念を使用することはあまり適切とはいえない。離散的なプレイヤーの道路混雑を介したネットワーク上での相互作用とその結果もたらされる均衡状態を記述するには、非協力ゲームを用いて均衡配分を定式化すると都合がよい。そして、均衡状態としてNash均衡の考えを用いるのが妥当であろう。

本研究では、上記のような考え方をもとに「動的交通量配分ゲーム」を定式化し、その性質を分析した。このゲームでは、起終点と出発時刻が固定された車両（ドライバー）がプレイヤーであり、経路選択肢集合が戦略集合、旅行時間の負数が利得となっている。均衡状態の性質として「解の存在」「解の安定

性」の2つについて理論的分析を行った。

(2) 社会ネットワークをベースとした需要モデル

交通需要を記述するモデルはこれまで多くのものが提案されている。そのなかでも本研究では、1日24時間を移動や滞在などどのような目的に振り分けるかを記述する「時間資源の配分問題」を交通需要のモデリングに適用した既存研究に着目した。このような考え方に基づく交通需要モデルとして、Beckerによる時間配分の最適化問題の定式化^[4]やKitamuraによるランダム効用理論の適用^[5]を早期の成果として挙げる事ができ、以降にも多くのモデルが提案されている。

いっぽう、これまでの交通需要モデルでは時間を「誰と」使うか、ということについてはそれほど大きな注意は払われていない。交通は「目的をもった移動」と定義される。そして、人間がその生活の大半を社会的な活動に費やすという前提を置くことがもし可能であれば、この「目的をもった行動」は「社会的な相互作用をするための行動」と置き換えて解釈することが多くの場面で可能となるだろう。このように、移動の目的を「社会的な相互作用」ととらえることにより、これまでの交通需要モデルの研究では外生的に与えていた「移動の目的」を一定の範囲で内生化することが可能になる。

本研究では、社会的相互作用と交通需要との関連を、社会ネットワーク理論の考え方を適用してモデル化し、その数理的特性を分析した。主に、下記に示す2つのモデルを具体的に考えて理論的および数値的に分析した。

- A. 混雑と社会的相互作用の双方を考慮した2項選択モデル。
- B. 社会的相互作用と空間的位置関係の双方を考慮した多項選択モデル

Aは、2項選択モデル(目的地よりむしろ手段選択を想定)における、社会的相互作用と混雑作用との拮抗関係を知るために考えたモデルである。社会的相互作用は複数の利用者が同一選択肢を選択することを促進する「吸引力」であり、混雑はそれを抑制する「反発力」である。このモデルの分析においては、これらの力がどう拮抗するかについて主に着目する。

Bは、空間的な距離の大きさによる需要抑制効果と、社会的相互作用による需要誘発効果との拮抗関係を知るために考えたモデルである。この問題では、選択モデルを多項選択モデルとすることにより、目的地選択問題に直接適用できるようにしている

AとBの各モデルを分析するために、以下のような具体的な場面をそれぞれ設定した：

- A. 2つの交通手段A, Bがあり、そのうちA

は混雑現象を持つ。一般化交通費用としては、固定費・混雑のほか、社会的相互作用(自分と社会的に関係する人と異なる選択をすると費用が上がる)を考える。社会的相互作用としては、対称(お互いに関係がある)なものと同非対称なもの(一方から他方には関係するが、逆方向には関係しない)の2種を考慮した。

- B. 交通ネットワークの各ノードに居住する人を考える。彼らは旅行時間と目的地で得られる効用の双方を検討して移動の目的地を選択する。目的地で得られる行動は社会的に関係ある人が多いほど大きい。

これらの設定における利用者の挙動を、進化ゲーム理論でよく利用される動学であるBest Response Dynamicsによって分析した。

第3章の参考文献：

- [4] Becker, G.S.: A Theory of the Allocation of Time, *The Economic Journal*, 1965. 75(299): p. 493-517.
- [5] Kitamura, R.: A Model of Daily time allocation to discretionary out-of-home activities and trips, *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(3), pp. 255-266, 1984.

(3) 動的配分モデルと需要モデルの融合

(1)で定式化した「車両を離散化した動的配分モデル」に、(2)で得た需要モデルの知見をベースとした需要モデルを組み込んで数値的な分析を行った。この需要モデルは、(2)のモデルBをベースとしている。Best Response Dynamicsによって、目的地選択と混雑にどのような傾向が出るかを複数のケースで分析した。

4. 研究成果

(1) 需要モデルの内包に適した動的配分モデルの特性分析

動的交通量配分ゲームの純粋 Nash 均衡解の存在と安定性が、特定のネットワーク構造(単一起点(図1), 単一終点)において成立することを証明した。この知見は、動的交通量配分ゲームを Nash 均衡解の概念で解くことが一定の条件下では妥当であることを示す。また、安定性の成立により、Best Response Dynamicsによって必ず Nash 均衡解が導出されることも保証される。

いっぽう、複数の起終点がある一般ネットワークでは、純粋 Nash 均衡解が存在するとは限らないことも示した。そのようなケースが発生しうるネットワーク構造を図1に示す。この場合は、Best Response Dynamicsが

1 点に収束することはなく、解がどのようなものであるかを知るためには、ダイナミクスの軌跡の動きそのものの特徴を捉えなくてはならない。

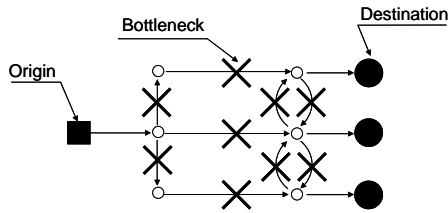


図1 単一起点ネットワークの例

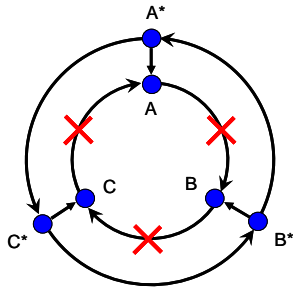


図2 純粋 Nash 均衡解が存在しない例

(2) 社会ネットワークをベースとした需要モデルの特性分析

①モデル A の特性

Best Response Dynamics による繰り返し計算の収束性が場合により異なることが分かった。図3に計算結果の例を示す。ここで Case1 は「社会的相互作用が非対称で混雑が存在」、Case2 は「社会的相互作用が対称で混雑が存在」、Case3 は「社会的相互作用が非対称でなおかつ混雑がない」状況である。図3が示すように、社会的相互作用が非対称で混雑が存在するときは、Best Response Dynamics が収束しないことがわかる。

これらの3つのケースを理論的に見ると、Case2 は「Potential Game」、Case3 は「Supermodular Game」となることがゲーム理論により知られている。Hofbauer and Sandholmによれば、ゲームがPopulation Gameとして示せれば、Potential GameもSupermodular GameもBest Response Dynamicsにより（正確にはPerturbed Best Response Dynamics）収束することが知られている^[6]。図3の結果もこの特性を反映していると考えられる。一方Case1 はいずれのゲームにも分類できない。図3の数値計算結果は、そのような場合にはBest Response Dynamicsが安定しないことがあることを示している。

②モデル B の特性

ここでは図4に示す5×5の格子状の交通ネットワークにおける分析を例に示す。各

ノードの居住者数は $B(1000, 1/25)$ の二項分布に従うとした。また、どのノードも目的地の候補であるとした。社会的相互作用の

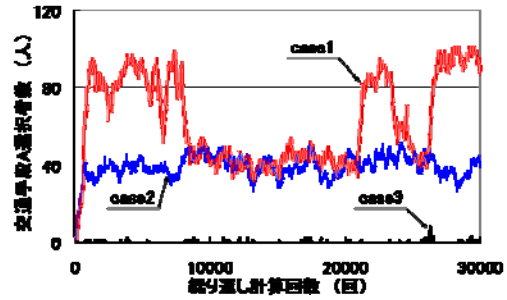


図3 モデル A の動学分析の結果

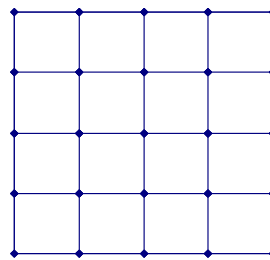


図4 交通ネットワークの構造

構造として、すべての人が互いに関係している「完全ネットワーク」と、「スケールフリーネットワーク」の2つを仮定した。

Best Response Dynamics により各居住者の目的地選択行動を漸次更新させ、どのような状況に収束するか（あるいはどこにも収束しないか）を調べた。

完全ネットワークを仮定した場合には、

- Best Response Dynamics は Nash 均衡解に収束。
- 収束点では、全利用者が同一の目的地を選択

の2点の特徴が見られた。特に2点目は重要な特徴である。この結果は利用者の目的地は唯一になることを意味するからである。また、ネットワークの中央にあるノード、居住者数が他に比べて多いノードが唯一の目的地として選ばれやすいこともわかった。

スケールフリーネットワークを仮定した場合には、

- Best Response Dynamics は Nash 均衡解に収束。
- 収束点では利用者は共通の目的地には集中しないで、複数の目的地に分散するの2点の特徴があることがわかった。この場合、より多くの人と社会ネットワークでつながっている（=居住者を社会ネットワークのノードと見れば、居住者の次数が高い）人がいるノードが目的地として選ばれやすいこ

とがわかった (図5)。

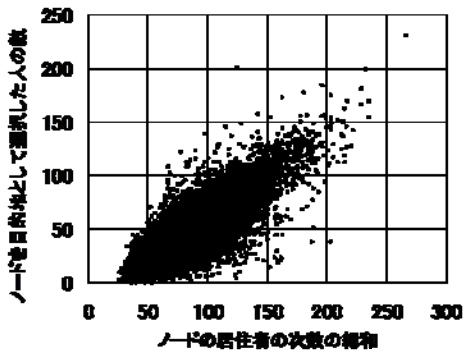


図5 各ノードの居住者の社会ネットワークにおける次数の合計と、そのノードを目的地として選んだ人数の関係

(3) 動的配分モデルと需要モデルの融合モデルの分析結果

動的交通量配分ゲームと(2)のモデルBをベースとした融合モデルにおいて、居住地から目的地までのトリップについて分析した結果を以下で示す。交通ネットワークとして交通量配分問題の分析評価によく用いられるSioux Falls ネットワークを使用し、社会ネットワークとしては完全ネットワークを仮定したケースについてここでは示す。経路および目的地選択の双方をBest Response Dynamicsで動的に記述している。これらの設定により以下の2つの計算結果を得た

1. 各リンクの容量が大きいとき：どの出発地から出発する車両も、ひとつの目的地を選択する (図6)
2. 各リンクの容量が小さいとき：大半の車両が同一の目的地を選択するが、一部の車は別の目的地を選択したり、移動をおこなわずに居住地にとどまったりする。(図7)。

また、前者のケースではBest Response Dynamicsは完全に収束し、後者のケースでも、一部の車両の挙動は収束しないが、ほとんどの車両は目的地・経路を1個に固定するようになった。

以上の結果は、混雑によって、もともとモデルBの持っていた性質である「目的地選択の集中性」が薄れることを示している。ただ、この際でも移動する車両の目的地は2~3個程度に限定される。これにより、動的均衡配分問題としては「単一終点問題」に実質近い問題となり、その結果としてBest Response Dynamicsが収束したと考察できる。

この融合モデルによって、交通ネットワークのどこが混雑しやすいか、どのような場所に人が集中しやすいのかを、ネットワーク構造のみによって、(Best Response Dynamicsの収束点に近づく、という意味で) 長期的なス

パンで一定の程度評価することができる。

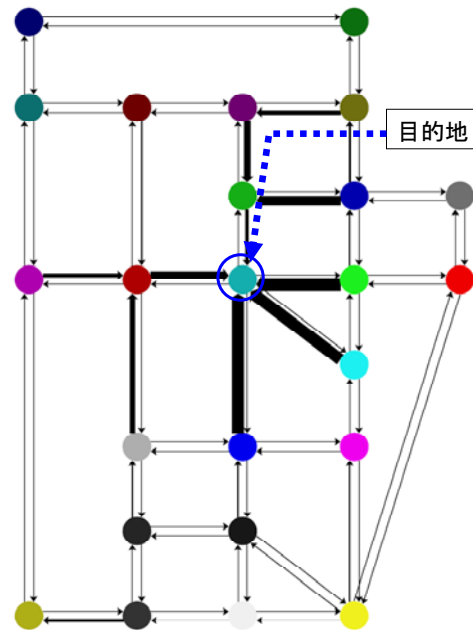


図6 ケース1での混雑リンクと目的地 (線が太いリンクほど平均旅行時間が長い)

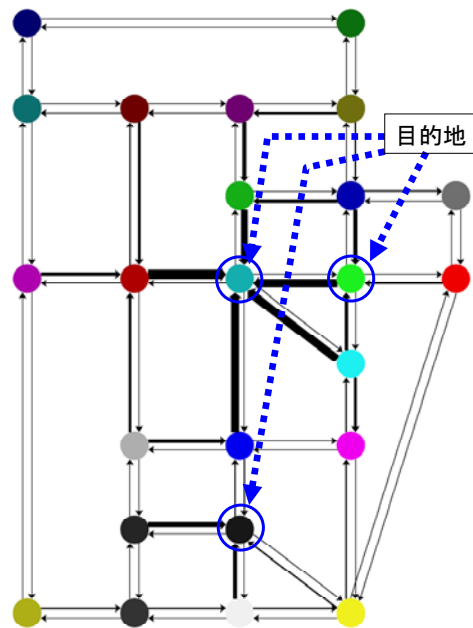


図7 ケース2での混雑リンクと目的地 (線が太いリンクほど平均旅行時間が長い)

第4章の参考文献：

[6] Hofbauer, J. and Sandholm, W. H., Evolution in Games with Randomly Disturbed payoffs, *Journal of Economic Theory*, 132 (1), p. 47-69, 2007.

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 井料隆雅, 利用者均衡配分問題へのゲーム理論的アプローチと動的均衡配分問題への応用, 土木計画学研究・論文集, **26**, 469-473, 2009.
- ② 山辺教磨, 井料隆雅, 朝倉康夫, 混雑と流行を考慮した次世代交通手段の普及シミュレーション, 土木計画学研究・論文集, **26**, 475-481, 2009.
- ③ 新宅弘明, 井料隆雅, 朝倉康夫, 利用者均衡配分問題における動的交通流モデル導入における影響の評価, 土木計画学研究・論文集, **26**, 505-510, 2009.
- ④ 小池真実, 井料隆雅, 日下部貴彦, 朝倉康夫, 時間帯別料金割引制度が交通量パターンに与える影響の実証分析, 交通工学研究発表会論文集, **29**, 229-232, 2009.

[学会発表] (計5件)

- ① Iryo, T., Yamabe, K., and Asakura, Y., A Choice Model Considering Effects of Congestion and Social Interaction and Its Evolutionally Process over Days, *An international workshop on day-to-day dynamics for transportation network analysis: assignment, control, design*, Salerno, Italy, 2nd/Dec/2009.
- ② 井料隆雅, 動的均衡配分問題の安定性について, 第39回土木計画学研究発表会, 徳島大学, 2009/6/13.
- ③ 松山航, 井料隆雅 一般ネットワークにおける出発時刻選択問題の解法, 第39回土木計画学研究発表会, 徳島大学, 2009/6/13.
- ④ Iryo, T., On the Existence of Pure Nash Equilibrium in Dynamic Traffic Assignments, *Second International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, Leuven, Belgium, 18th/June/2008.
- ⑤ Iryo, T., Asakura, Y., Yamabe, K., A Simulation Model for Evaluating How a New Transport Mode Will Be Popularized,

International Workshop on Recent Advances in Transport, Marrakech, Morocco, 8th/May/2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井料 隆雅 (IRYO TAKAMASA)

神戸大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 10362758