

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686048

研究課題名(和文)時空間進化ゲーム：交通流解析の一般理論

研究課題名(英文)Spatiotemporal evolution game: a general framework for analysing traffic flow

研究代表者

井料 隆雅 (IRYO, Takamasa)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10362758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円、(間接経費) 3,510,000円

研究成果の概要(和文)：交通工学が対象とする現象には多くのものがあるが、それらは、移動空間という限られた資源を、複数の移動主体が、時空間的に共用する、という共通の枠組で解釈できる。本研究では進化ゲーム理論を応用してこれらを体系化した「時空間進化ゲーム」を構築することを目的とした。離散型交通流モデル、情報収集モデル、不完全情報化の行動と学習のモデルを定式化し、それらの性質を理論・計算的アプローチだけでなくバーチャルリアリティ等を活用した実験的アプローチにより検証した。そして、これらの知見を統合し時空間進化ゲームの枠組みを提案した。

研究成果の概要(英文)：Many phenomena that have been analysed by existing transport studies can be interpreted as a phenomenon in which two or more moving subjects share spatial resources temporally. This study aimed to construct 'spatiotemporal evolution game' that models the above-mentioned phenomenon by applying evolution game theory. Three models, called atomic-flow model, information collection model, and learning and behavioural model under imperfect information, were constructed. In addition to theoretical / mathematical investigations of these models, this study also adopted experimental approaches such as virtual reality technique to investigate how far the proposed models describe actual human behaviour. The framework of the spatiotemporal evolution game was then constructed by combining these findings.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学(土木計画学・交通工学)

キーワード：進化ゲーム理論 交通工学 情報探索モデル 交通流モデル

1. 研究開始当初の背景

交通工学が対象とする現象には数多くのものがある。それらの多くは、「移動空間という限られた資源を」「複数の移動主体が」「物理的衝突がないように時空間的に共用する」ために発生する現象と解釈することができる。既存の交通工学の研究では各種現象をそれぞれに応じた理論体系で解析することが多かったが、上記の解釈を用い、これにどのように移動の需要が決まるかを与えれば、これらを統一的に扱う理論体系を構築することが期待できよう。また、その理論体系の構築には、ゲーム理論（特に進化ゲーム理論）が有効であろう。本研究では、そのような理論体系をゲーム理論の応用として「時空間進化ゲーム」と名付けた。

2. 研究の目的

本研究は上述の「時空間進化ゲーム」の理論体系の構築を目的とする。提案の根拠を得るために、そのような新しい定式化の必要性の提示と、理論を構成する各要素についての理論的、数值的、および実験的アプローチによる特性解析を行う。

3. 研究の方法

研究では理論（および計算的）アプローチと実験的アプローチを併用した。理論的アプローチはモデル構築そのもの、モデルの特性分析（理論的・数值的）を担う。実験的アプローチは、バーチャルリアリティなどで人工的に構成した環境における実験参加者の行動を観測し、理論が実際の人間の行動をどの程度説明できるかを検証するものである。

(1)理論的アプローチ

理論的アプローチは以下 ~ で説明する4種のモデルからなり、それを で統合する。ただし はもっぱら時空間進化ゲームの必要性を主張する（伝統的な均衡解析アプローチへの問題提起とする）ものであり、実際に統合されるのは ~ である。 は物理的制約と主体間の相互作用に主眼を、 は個人が情報をどう収集し、どこに移動しようとするか（移動の需要）のモデル化に主眼を置く。 では不完全情報化の行動と学習のモデルを記述する。これらを で統合する。

連続体交通流モデルを用いた広域ネットワーク解析モデル

交通流を流体のように連続体として表現し広域道路ネットワークの混雑を解析する手法は古くから行われている。混雑に対するドライバーの行動変化を考慮するアプローチとして伝統的なのは均衡アプローチ、すなわち利用者均衡配分である。このアプローチは交通流を静的（1日の中での時間変化を考慮しない）なものと考える場合には数学的にロバストである（均衡解が存在し、一意であり、安定である）ことがよく知られている。

しかし道路の交通流の状況は1日のあいだにピークをもって変動する動的なものであり、道路での混雑もその動的な様相を明確に記述してはじめて正確に解析することが可能である。動的な交通流の特性と利用者均衡配分を結合させたスキームを動的利用者均衡配分(DUE)と呼ばれる。DUEについては理論的なロバストネスに関して不明な点が多い。本研究では、このDUEに関して「時空間進化ゲーム」の必要性を主張するために、DUEのロバストネスについて解析することを行う。

「時空間進化ゲーム」の必要性の主張をするためには、DUEが「ロバストではない」なんらかの状況を見つけることが望ましい。このために有効な方法として本研究では反例提示による否定的解決を試みる。具体的には、特に、一般的証明がなされていない一意性が否定される（すなわち複数均衡解がある）ケースを探索することを行う。

離散的交通流モデル

離散的交通流モデルは、交通流を構成する車両等の移動主体を離散的（1人や1台といった単位）で扱う。基本的にはミクロ交通流モデルと同じ表現方法だが、本研究では、連続体モデルとの対比を重視して離散的という言葉で代わり用いる。

離散的交通流モデルの定式化では複数の移動主体間の相互作用に特に着目する。この相互作用は各自それぞれに行きたい方向を持つ移動主体が交通システム上の時空間を相互に共有（あるいは取り合い）すること考えられる。これは時空間内の物理的制約、すなわち、移動体同士が衝突しない軌跡のみが選択可能であることに着目して記述する。

移動主体間の軌跡の物理的制約に基づく相互作用を記述するには、各主体が他の主体の将来の移動軌跡を予想することが必要となる。この「予想」に関しては、本来は具体的な予想プロセスをモデル化が必要があるが、ここでは「何らかの形で」各移動主体は他者の将来の移動軌跡を正確に予測できると仮定する。この考え方はいわば伝統的な均衡アプローチに相当するものであり、ここではNash均衡として記述することとなる。均衡アプローチについてはにより否定的に扱うこととなるため、均衡状態の仮定については最終的には緩和しなくてはならない。これは によって緩和されることとなる。

情報収集モデル

移動主体が特に目的地に関する情報をどのように収集するかを定式化するモデルである。目的地の決定のモデル化は移動主体がどこへ行くことを目指すか（移動の需要をどう定めるか）という観点で重要となる。

不完全情報化の行動と学習のモデル

における均衡の仮定を緩和するには不完全情報化（将来のことは完全には予想でき

ないこと)における行動をモデル化することが必要となる。不完全情報化の行動のモデル化には期待効用最大化を用いるほか、進化ゲーム理論と、それに近い論理構造を持つ Day-to-day (日々の) 学習モデルで知られる知見を活用する。また、この情報収集モデルも、情報収集自体がそもそも情報を収集する行動自体が不完全情報下での行動であることから、本節の内容と関連させて解析を行う。

時空間進化ゲームとしての統合
 ~ の成果をあわせて時空間進化ゲームとして統合する。

(2) 実験的アプローチ

実験的アプローチでは、人工的に構成した環境における実験参加者の行動を観測し、理論が実際の人間の行動をどの程度説明できるかを検証する。人工的環境として主に使うものはバーチャルリアリティ (VR) であり、これについてで説明する。VR を補完する実験として実空間における実験も行う。これをで説明する。加えて、特に(1)のモデルの実証に適した実験システム (情報探索行動実験システム) についてで説明する。

VR システム

(1)の と を実験的アプローチで裏付けるために VR を構築する。VR は歩行者およびパーソナルモビリティを想定したものとする。図1に装置の構成図を、図2に装置の写真を示す。本装置では実験参加者の挙動をセンサー (汎用小型電子デバイスに内蔵される加速度・ジャイロセンサー、または、発光ダイオードの光を画像処理することによる位置測定) で取得し、それをコンピュータ上で処理して、その実験参加者が仮想空間上で存在する位置に相当する画面をスクリーンに出力する。既存の VR に関する研究、および、本研究で求められる性能を考慮し、以下で示す工夫をほどこしてある：

1. スクリーンをできるだけ実験参加者に近くなるように配置すること。このために、背面投射スクリーンと近接投影型ディスプレイを活用している。
2. 「VR 酔い」を回避すること。方向転換時に画面側を回転させずにすむように、実験参加者を 270 度ないし 360 度の方向から囲めるようにスクリーンを設置し、参加者が自然に向きを変えれば仮想空間上での移動方向も変わるようにした。

VR の処理用の PC には(1)で構築した理論モデルの一部を数値シミュレーションとして実装してある。これにより、実験参加者 (1 人) がモデルで生成された他の移動主体 (複数人) と相互作用する状況を再現できる。この機能は特に(1)の検証に有効である。

VR の実験を行う際には 50 名程度 (実験により異なる) の学生からなる実験参加者の協力を得ている。

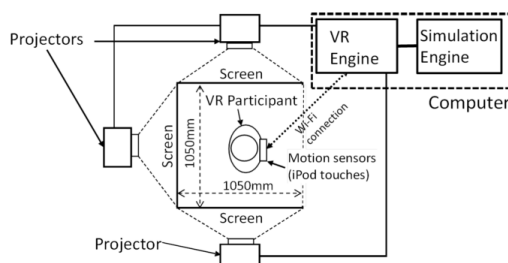


図1 VR 実験システムの構成



図2 VR 実験システムの写真

実空間実験

VR システムでの実験を補完するために実空間実験も一部の实验において並行して行う。実空間実験は、VR に比して現実感において優れている一方で、パーソナルモビリティのような現状で公道を走れない交通手段の実験が難しい、実験条件の制御が困難であり、制御、あるいは観測できない条件の揺らぎに結果が左右される、モデルと実際の人間の相互作用を計測することが不可能である、など多くの欠点もある。本研究ではこれらの欠点のある程度回避できる場面において実空間での実験を補完的に用いる。

情報探索行動実験システム

もっぱら(1)のモデルの実証に用いるシステムである。システムは実験参加者 (数十名程度) が持参する携帯電話やスマートフォンなどの端末からアクセスされる Web サーバにより構築される。Web サーバ内には仮想的な目的地が複数個設定される。これらの目的地にはそれぞれ効用が全参加者に共通の確定値として与えられるが、その値は参加者には事前には知らされない。実験参加者にはそれらの目的地から行き先を 1 個選択することを複数回行ってもらう。その際、参加者は、最初は効用が未知の目的地をランダムに選ぶことになるが、その後、自身の過去の経験の活用に加えて、他者の持つ情報を探索しながらより高い効用の店を選ぶようになることが予想される。この挙動を実験システムで逐一記録することにより、情報探索行動がどのように行われるかその詳細を分析する。

情報探索行動実験システムには 2 種のバージョンが存在する。ひとつは参加者間の情報伝播を自然の社会関係に任せるもの、もうひとつは Web サーバ内で制御するものである。

前者の場合は、参加者は指定された時間に任意の場所から Web サーバへインターネットを經由してアクセスする。後者の場合は、すべての参加者を同じ部屋に集めて、参加者間でのシステムを經由しない情報交換がないように実験環境を制御する。

4. 研究成果

(1) DUE の口バストネスの否定的解析による「時空間進化ゲーム」の必要性の提示

3 (1) に対応する DUE の口バストネスの解析を行い、その結果、特に DUE の均衡解の一意性に対する反例の発見に成功した。この成果は、均衡アプローチの代案としての本研究課題のメインテーマである「時空間進化ゲーム」の有効性を主張するとともに、半世紀以上の歴史を持つ交通量配分問題における重要な理論的発見ともなっている。

反例を得たネットワークの構成と OD ペア (交通需要の起終点ペア) および経路、そして均衡解の概要をそれぞれ図 3 と図 4 に示した。このネットワークの構造の最大のポイントは、2 つの OD ペアの経路の頭 (終点側) が他方の尻 (起点側) と重複することである。このような構成の場合、各 OD ペアの車両の挙動の変化がもう一方へ影響するという「相互作用のループ」が存在することになる。均衡解が複数となる反例を得るにはこのような相互作用のループが重要な役割を果たしたと考えられる。逆に言えば、この結果は、「時空間進化ゲーム」の有効性は、特に多方向に流れる (異質性があるという言い方もあろう) 交通流の解析に対して有効であろうことも示唆している。

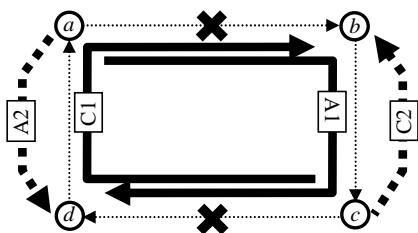


図 3 DUE の均衡解が一意に定まらないネットワーク構造の例。OD ペアは a から d と c から b の 2 個。×印はボトルネックの位置を示す。

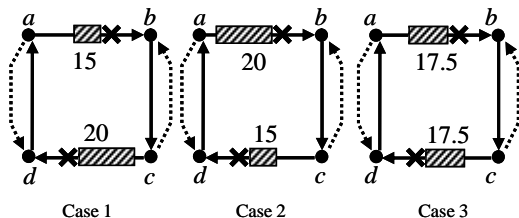


図 4 図 3 のネットワークにおいて発見された複数均衡解の例。数字はボトルネックでの最大遅れ時間 (分)

(2) 離散的交通流モデルの解析と検証

離散的交通流モデルとして研究代表者らが過去に構築したゲーム理論を応用するモデルを構築した。本研究においては特に移動主体間の時空間における物理的制約に関する点において拡張を行っている。具体的には、これまではある移動主体が他の移動主体に衝突するか否かのデジタルな制約だけが物理的制約として記述されていたが、本研究ではこれを近接不効用として連続的な形で拡張した点にある。このような拡張を行って、他者の挙動が既知であるとした場合の移動主体の移動軌跡を、効用最大化を行動規範としてモデル化した。

構築モデルを数理的および数値的に解析した。結果、このモデルにおいては、ある移動主体が他者に近接することの不効用が主体間の反発力として表現される (これはよく知られた Helbing の Social Force モデル (以下 SF モデル) と同様である) が、その力は SF モデルのように現在の位置関係ではなく、将来の位置関係に依存するものであることがわかった。このことは本質的に各移動主体が他者の将来の移動軌跡を予測することを要求することと、それが完全に可能であると仮定できるのであれば、移動主体間の相互作用はゲーム理論的に記述されることを示す。

VR 実験を用いて既存の SF モデルとゲーム理論に立脚するモデル (数理的には、他の歩行者と衝突しない制約条件下での最短経路を選択するモデルとなるので、Fastest Trajectory (FT) モデルと名付けた) の比較を行い、いずれのモデルが、実際の歩行者が他の歩行者を回避する行動をよく再現しているかを検証した。この実験では実験参加者に SF ないし FT モデルでシミュレーションされた歩行者流が流れる交差点を数回横切ってもらい、その挙動を観測する。さらに、参加者をシミュレーションに置換して計算を行うことにより、人間の挙動とモデルの挙動を比較する。図 5 に実験状況と示す。参加者は 61 名であった。

実験結果は次の 2 点に要約できる：

1. 歩行者の回避行動は FT モデルのほうが SF モデルに比べて再現性が高い。
2. FT モデルは SF モデルに比べて交差点横断に要する旅行時間をやや過小に評価する傾向がある。

1. の詳細を説明する。回避行動の特徴が参加者とモデルでどう異なるかを確認するために、参加者の軌跡と交差する歩行者の軌跡が一定距離以下になった時点を初期値としてシミュレーションで参加者の軌跡を再現させた。これを参加者の軌跡と比較することにより回避行動の特徴の差異を定量的に算出する。図 6 にその結果を示す。図 6 の横軸は交錯の相対角度を、縦軸は交錯にかかった所要時間の差 (シミュレーションによるものから人間によるものを引いたもの) を示す。縦軸が 0 より離れればシミュレーションと実

際の人間（参加者）の回避行動に差があることが示唆される．図6が示すように，SFモデルでは45度の交差角付近でずれが生ずる一方，FTモデルではこのずれが生じない．このことはFTモデルの回避行動がSFモデルのそれに比して実際の人間の行動をよく再現することを示唆する．

2.のようなずれが出た原因としては，Nash均衡に基づくモデルでは，交錯する歩行者の優先権をどちらに与えるかによって複数均衡解が存在するが，その均衡解の精緻化が適切に行われていないことが考えられる（FTモデルでは優先権をランダムに与えている）．現実における図5のような状況では，交錯しようとする歩行者は，群衆として同一方向に歩く他の歩行者に比べて優先権が低い，すなわち，他の歩行者の歩行を邪魔しないように動き，その結果所要時間がかかる，と考えるのが自然であろう．ゲーム理論では解の精緻化について多くの知見が得られているが，その中でも進化ゲーム理論を用いるものがある．(4)ではこのことを考慮した分析を行う．

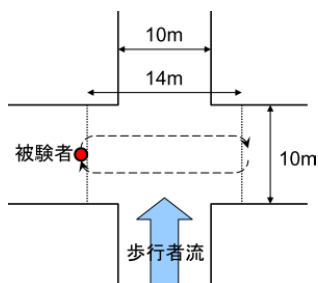


図5 VR実験の設定

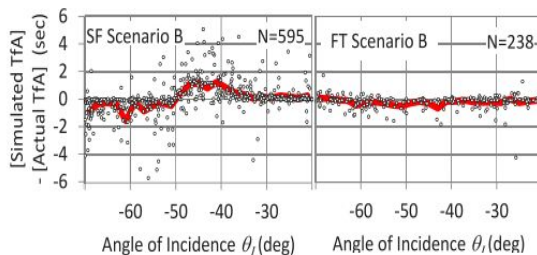


図6 交錯所要時間差（左：SF，右：FT）

(3) 情報探索モデルの解析と検証

目的地に関する情報を移動主体がどのように収集するかをモデル化し，それを実験的アプローチにより検証した．モデル化の際には，特に，非反復的な（すなわち，日常的ではない）目的地選択に着目した．そのような目的地選択では，移動主体は，目的地に関する情報が少ないままに行き先を決めなくてはならない状況に置かれ，その結果，情報収集や伝播のダイナミクスが目的地の決定に大きく影響すると考えられるからである．

モデルには簡単なものを与えた．具体的には，流れる情報は常に正しい，選好の個人差を考慮しない，の2つの仮定を与えた．この場合，流れる情報は単に目的地の効用を示す

数字と考えられる．このモデルに(4)で示す「不完全情報化の行動と学習のモデル」を適用し，それを理論的および数値的に解析すると，移動主体は必ずしも効用が最大の目的地が選択するわけではないことが示される．

情報探索行動実験を3(2)で示した実験システムで行った．実験回数はバージョンごとに1回，参加人数は30-50名程度である．いずれの実験結果でも，実験参加者は情報探索を一定の程度で中止してしまい，それによりもっともよい目的地を選ぶとは限らない状況が観測できた．

(4) 不完全情報化の行動と学習のモデル化

不完全情報化の行動を期待効用最大化モデルと学習モデルにより定式化した．このうち期待効用最大化は1回しか経験しない不確実環境下での意思決定の表現に，学習モデルは繰り返し経験する不確実環境下での意思決定の表現に用いた．学習モデルについては他の交通主体の近未来の行動予測に関するもの（4(2)に対応）と，目的地に関する学習（4(3)に対応）の2つの目的でそれぞれ異なるものを用いた．

交通主体の近未来の行動予測に関しては，特に均衡解を適切に精緻化することを図った分析を行った．その結果，Replicator Dynamicsを仮定することによって交錯時の回避における優先権を適切に決定できることを示した．いっぽう，目的地に関する学習については，ミクロな情報探索行動を反映し実験結果をよく説明するモデルを提案し，それがReplicator Dynamicsを含む各種の既存の学習モデルとどのような関係にあるかを示した．その結果は，既存の学習モデルは数学的な扱いは便利一方で，情報探索行動の精緻な表現には問題が残ることを示唆する結果を示した．

(5) 時空間進化ゲームとしての統合

(2)から(4)で提案したモデルを統合することにより時空間進化ゲームを定式化した．このゲームは，本質的には，問題のスケールに関係なく「学習モデルにより将来に関する予測を各交通主体に与える部分」と「予測に対して，その不確実性を考慮しつつ最適な戦略を算出する部分」の2つからなる．解の導出には，一般的には，実際に計算を反復することにより各交通主体に学習を繰り返し行わせ，その収束点あるいは定常状態を解として用いる．

(6) ケーススタディ

時空間進化ゲームの例として都市の回避行動をケーススタディとして挙げた．回避行動に関しては多くの既存研究があるが，それらには統一性がなく，本研究で提案する時空間進化ゲームが有効なベースモデルとなる可能性があるためである．実験はVRと実空間実験の双方で行った．また，パーソナルモ

ビリティにより回遊が促進されるかどうかという点についても実験を行っている。結果の概要は下記の通り：

1. 提案した時空間進化ゲーム理論は回遊行動の記述に概ね有効であるが、冗長に目的地の探索を行う傾向が見られる。
 2. パーソナルモビリティが回遊促進に有効かどうかは一概にはいえない。場合によっては抑制することもありえる。
 3. VRと実空間の実験を比較すると、実空間実験のほうが理論による説明力が弱い。実空間実験の制御の限界によるものか、あるいは実空間ならではの行動原理があったか、いずれかが理由と思われる。
- 以上の結果のうち特に1と2は、街の回遊行動の促進化などの実務課題と強く関係するものであり、提案理論の実務活用の可能性を示すものである。一方で3は現実の説明力という点で課題を提示しているといえよう。

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7件、すべて査読付)

1. Iryo, T., Investigating Factors for Existence of Multiple Equilibria in Dynamic Traffic Network, *Networks and Spatial Economics*, in press. 10.1007/s11067-013-9206-6. (掲載確定)
2. Iryo, T., Properties of Dynamic User Equilibrium Solution: Existence, Uniqueness, Stability, and Robust Solution Methodology, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2013, **1**(1), pp. 52-67. 10.1080/21680566.2013.779793
3. Iryo, T., Asano, M., Odani, S., and Izumi, S., Examining Factors of Walking Disutility for Microscopic Pedestrian Model – A Virtual Reality Approach, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013, **80**, pp. 940-959. 10.1016/j.sbspro.2013.05051
4. Wei, C., Asakura, Y., and Iryo, T., The Posterior Probability Distribution of Traffic Flow: a New Scheme for the Assignment of Stochastic Traffic flow, *Transportmetrica A: Transport Science*, 2013, **9**(8): pp. 753-771. 10.1016/j.sbspro.2013.05051
5. Iryo, T., Yamabe, K., and Asakura, Y., Dynamics of Information Generation and Transmissions through a Social Network in Non-recurrent Transport Behaviour, *Transportation Research Part C*, 2012, **20**(1): pp. 236-251. 10.1016/j.trc.2011.05.011
6. 上田大樹, 井料隆雅, 朝倉康夫, 都市高速道路のランプ間 OD 交通量に旅行時間が与える影響の実証分析, 交通工学研究発表会論文集, 2011, **31**: pp.147-151.
7. Iryo, T., Multiple Equilibria in a Dynamic Traffic Network, *Transportation Research*

Part B, 2011, **45**(6): p. 867-879.

[学会発表](計12件)

1. 中村優介, 井料隆雅, VRによる回遊行動観測システムの開発と評価, 平成25年度土木学会関西支部年次学術講演会講演会, 2013.6.8, 大阪市立大学
2. 林和良, 井料隆雅, 地理的制約のあるサービスの普及に関する実証分析, 平成25年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2013.6.8, 大阪市立大学
3. 杉森千恵, 井料隆雅, 浅野美帆, 数理的手法によるミクロ歩行者流モデルの比較分析, 第47回土木計画学研究発表会, 2013.6.2, 広島工業大学
4. 泉翔伍, 小谷慎太, 井料隆雅, バーチャルリアリティによるミクロ交通行動モデルの比較と評価, 土木計画学研究発表会, 2012.11.3, 埼玉大学
5. 石原佳世子, 井料隆雅, 社会ネットワーク上での情報探索行動の実験と分析, 土木計画学研究発表会, 2012.11.3, 埼玉大学
6. Iryo, T., Shintaku, H., and Senoo, S., Experimental study of spatial searching behaviour of travellers in pedestrian networks, *LATSIS 2012: 1st European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems*, 2012.9.5, Lausanne, Switzerland
7. 森光, 井料隆雅, 異なるミクロ歩行者交通流シミュレーションによる避難行動評価結果の比較, 平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2012.6.9, 神戸工業高等専門学校
8. Iryo, T., Multiple equilibria in a dynamic traffic network in general settings, *The Fourth International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, 2012.6.4, Martha's Vineyard, MA, USA.
9. 石原佳世子, 井料隆雅, 目的地選択行動における情報探索メカニズムの実験的分析, 土木計画学研究発表会, 2011.11.25-27, 岐阜大学
10. 井料隆雅, 動的交通量配分の最近の潮流, 土木計画学研究発表会, 2011.5.28-30, 筑波大学
11. 松山航, 井料隆雅, 車両を離散化した出発時刻選択問題の性質, 第9回ITSシンポジウム2010, 2010.12.11, 京都大学
12. Iryo, T., Discretised Vehicle Assignment: Characteristics of Equilibrium Solutions and Evolution Processes. *The Third International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, 2010.7.31, Takayama, Japan

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・教授

研究者番号：10362758