

戦略・戦術的概念を取り入れた経路選択ロジックとその配分手法*

Route choice logic considering the concept of strategic/tactic choice and its assignment *

倉内 文孝**・坂 穂崇***

By Fumitaka KURAUCHI** and Hodaka BAN***

1. はじめに

情報化が進行した現代社会では、ドライバーは、多くの交通情報をリアルタイムで取得することが可能になった。その結果、情報を利用するドライバーの意思決定が経路選択行動に大きな影響を及ぼし、想定していない場所で交通渋滞が発生することも予想される。それら情報提供下の交通現象分析においては、交通流シミュレーションを用いることが一般的であるが、その理由は交通量配分手法における現在の経路選択行動では、情報を活用した経路選択・変更を的確に表現することが難しいためである。交通量配分では、最短経路として単一経路の選択を前提としているため、実際のドライバーが起こす経路選択・変更を的確に表現することができていないといえる。

実際のドライバーの経路選択行動は、交通情報や目前の交通状況によって経路選択・変更行動を容易に行えるため、その行動によって経路走行時間を大幅に減少させる可能性があり、最短経路は1つではなく、交通状況やドライバーが得られる交通情報によって複数存在する可能性があり、これが既存の経路選択原則と実際のドライバーの経路選択行動との差異を生じさせていると考えられる。また、交通情報提供が身近に実施されている現在では、情報提供と経路選択行動の関係¹⁾や、駐車情報提供による選択行動変化²⁾など、情報提供による交通行動変化について様々な示唆が得られているが、目前の交通状況による経路選択への影響についてはそれほど多くの研究蓄積はみられず、情報提供効果を考慮に入れた経路選択アルゴリズムや配分手法の構築には至っていない。

このような背景を踏まえて、本研究では、経路変更可能点に到達した時点で提供された交通情報を認識し経路選択確率が変化することを確率事象として表現することで情報取得を表現する、「戦略・戦術的経路選択」に基づく経路選択ロジックを提案する。さらにこの考えに基づく交通流配分手法を提案する。

2. 経路選択ロジックと配分手法の構築

(1) 戦略・戦術的経路選択行動の仮定

本研究で提案し、経路選択ロジックの基本的概念となる「戦略・戦術的経路選択」は、実際のドライバーの経路選択行動を段階に分類して表現するものである。まず、ドライバーは出発地や走行中の一地点においてその先の正確な経路情報が提供され、目的地に至るまでの、その時点での最短経路を知ることができるでしょう。このとき、経路分岐点における経路について、交通状況によっては利用可能性のあるものと、全く利用されないものに分類することができる。この利用可能性がある経路群を選択・決定する行動を、戦略的経路選択行動とする。そして、戦略的経路選択に従い選択した経路を進行し、情報取得地点においてその先の正確な情報を取得し、目的地に至るまでの所要時間が最小となるように経路を選択する行動を戦術的経路選択行動とする。本章では、この戦略・戦術的経路選択行動に関連するリスク回避型経路選択ロジックおよび期待所要時間最小化ロジックを概説した後に、戦略戦術型経路選択ロジックを構築する。

なお、本研究では、以下の仮定に基づいて議論を進める。

- 交通状況は、渋滞/非渋滞の2つの状態しかなく、各状態における所要時間は同じである、
- 各リンクの交通状況は、ある生起確率（渋滞発生確率）をもって発生する。
- 各リンクに容量制約はない。

*キーワード：戦略・戦術的経路選択，交通量配分

**正員，博（工），岐阜大学工学部社会基盤工学科

（岐阜市柳戸 1-1，058-293-2443，kurauchi@gifu-u.ac.jp）

***学生会員，岐阜大学大学院工学研究科

(2) リスク回避型経路選択ロジック³⁾

リスク回避型経路選択ロジックとは、各経路の渋滞発生確率 q_a について、全く知識を持たないときの合理的な経路選択方法について考察を加えたものである。先行研究では、このような状態の時のリスク回避型の経路選択ロジックとして、混雑を意図的におこす邪悪な存在がいることを想定し、その元で期待所要時間を最小化するような行動を行う考え方を提案した。これは、 q_a をコントロール可能な邪悪な存在と、経路選択者との以下のマキシミン問題として表現できる。

$$\max_{q_a} \min_{p_a} \sum_a (v_a + d_a \cdot q_a) p_a \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_a p_a = 1, 0 \leq p_a \leq 1 \quad \forall a \in \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\sum_a q_a = 1, 0 \leq q_a \leq 1 \quad \forall a \in \mathbf{A} \quad (3)$$

ここで、 v_a : リンク a の非混雑時所要時間、 d_a : 混雑時遅れ、 p_a : リンク a の利用確率、 q_a : リンク a の混雑発生確率、 \mathbf{A} : リンクの集合、である。

この問題の最適経路選択戦略は、公共交通ネットワークにおける遅れ d_a を運行間隔とみなした最短経路群 (hyperpath⁴⁾) 戦略と一致し、最小期待所要時間は、以下で記述できる。

$$E[t] = \left(1 + \sum_a t_a / d_a \right) / \left(\sum_a 1 / d_a \right) \quad (4)$$

なお、この考え方について、経路の利用確率が遅れの値のみに依存しているため、現実を表していない、という課題が指摘されている⁵⁾。

そこで、本研究では「 q_a に関して知識を持たないという極端なケース」を想定した先行研究を拡張する。

(3) 期待所要時間最小化ロジック

q_a に関して十分な知識を持つ場合を考えよう。ただし、それぞれのリンクが実際渋滞・非渋滞のいずれの状態であるかはわからないとする。このとき、ドライバーが取り得る最適な状況とは、期待所要時間を最小とする行動となる。従って、式(1)の q_a を与件とし、 p_a のみを変数と見なせばよい。

$$E[t] = \arg \min_{p_a} \sum_a (v_a + d_a \cdot q_a) p_a \quad (5)$$

(4) 戦略・戦術的経路選択行動ロジック

(2)では、 q_a に関して十分な知識をもつが、実際の状態についてはわからない、とした。一方で、もし分岐地点において交通状況がわかるとすれば、それを元に所要時間が最小の経路を選択することができる。このとき、各リンクの渋滞発生確率が独立であると仮定すれば、経路分岐確率は q_a で決定づけられ、そのときの期待所要時間は次のように記述できる。

$$E[t] = (1 - q_1) v_1 + \sum_{j=1}^{n-1} \prod_{i=1}^{j-1} q_i (1 - q_j) v_j + \prod_{i=1}^n q_i \arg \min_k (v_k + d_k) \quad (6)$$

ただし、ここでは $i=1, \dots, n$ の順で所要時間 v_i が短い経路順に並んでいるとし、第3項では渋滞時経路所要時間が最短の経路 k を求めている。また、非渋滞時所要時間が、渋滞時所要時間最短のリンクのそれより大きな経路は利用されない。この考え方を、戦略・戦術的経路選択行動と称する。戦略的経路選択は、その地点より先の地点で情報が提供され、最短経路が変化することを前提として、目的地に向かうまでに使用する可能性のある経路群の決定と定義する。戦略的経路選択においては、唯一経路を選択するのではなく、経路群あるいはある流出リンク一つを選択することになり、式(6)における n 個の経路を抽出する意思決定となる。戦術的経路選択は、戦略的経路選択に従って移動している中で、経路変更が可能な地点に到着した時に取得した情報を参照し、所要時間が最小となるように経路を選択する行動となる。戦術的経路選択行動によって、戦略的経路選択行動において選択された経路群のうちひとつが式(6)の分岐確率により選ばれる。

(5) 定常状態の記述

渋滞発生確率がリンクフローの関数で記述できると考え、定常状態を記述する。期待所要時間最小化ロジックは、期待所要時間が最小の経路が選択されることより、Wardrop 均衡⁶⁾が成立する。一方、戦略・戦術的経路選択ロジックにおいては、リンクの渋滞発生確率がリンクフローの関数、すなわち経路選択確率の関数であり、それと同時にリンクフローが渋滞発生確率の関数となる。したがって、 p, q がバランスする状態として定常状態を記述できる。なお、リスク回避型経路選択ロジックにおいては、経路の

混雑状況が経路選択行動に反映されない。したがって、経路選択に関する均衡状態は定義されないことになる。

3. 経路選択ロジックの基本検証

(1) 仮想ネットワーク

上記の経路選択ロジックの特性を把握するため、図-1 に示した IOD2 リンクの仮想ネットワークを用いて試行計算を実施した。ただし、渋滞発生確率については、次に示すようなリンク交通量に関するロジスティック型の関数を仮定している。

$$q_a = 1 / (1 + \exp(\alpha(-v_a + c_a/2))) \quad (7)$$

ここで、 a : 感度パラメータ、 c_a : 渋滞発生確率が 0.5 となる交通量 (ある種の交通容量) である。リンク交通容量、非渋滞時所要時間および渋滞時遅れ時間は図中に示した通りである。配分計算には、逐次平均法 (Method of Successive Average) を適用した。

(2) 定常状態の確認

2 つの経路選択ロジックが想定した定常性を満たしているのかを確認する。期待所要時間最小化ロジックにおいては、Wardrop 均衡条件に基づく均衡状態が成立している必要があり、戦略・戦術的経路選択ロジックにおいては、混雑発生確率から計算される経路選択確率と、配分交通量から計算される渋滞発生確率の均衡性などから、定常状態を確認する。

図-2 は、各経路の期待所要時間とその期待所要時間差を表した。これより、2 経路の期待所要時間がほぼ等しく、また、期待所要時間の差もなく利用者均衡状態が成立しており、期待所要時間最小化ロジックの定常状態が確認された。

次に、同ネットワークを用いて戦略・戦術的経路選択ロジックの定常状態について確認する。交通需要が 150 台の時の配分結果を図-3 に示す。経路交通量は、経路 1 が 61.88、経路 2 が 88.12 であった。このとき、各経路の混雑発生確率を式(2.7)より計算すると、それぞれ、 $q_1=0.77$ 、 $q_2=0.23$ となる。そして、この渋滞発生確率より経路選択確率を求めると、 $p_1=0.41$ 、 $p_2=0.59$ となる。よって、経路 1 は 41%、経路 2 に残り 59%の交通量が流入することになり、そこから、交通量を算出すると $X_1=61.88$ 、 $X_2=88.12$ となる。この値は、配分結果である交通量と一致し

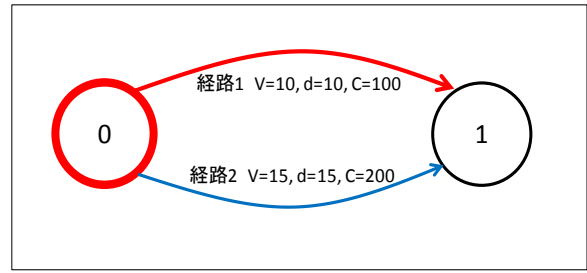


図-1. 計算ネットワーク(1)

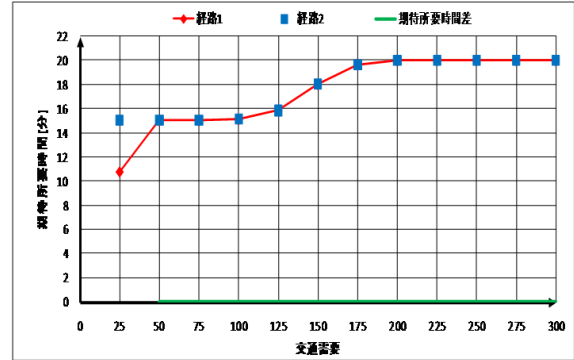


図-2. 各経路の期待所要時間

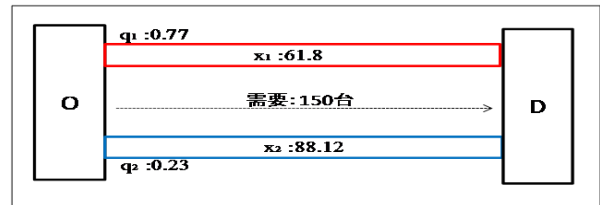


図-3. 戦略・戦術的経路選択ロジックを適用した時のリンクフローと渋滞発生確率

ており、定常状態が成立していることがわかる

(3) ロジック間の特性比較

図-4 は、期待所要時間最小化ロジックおよび戦略・戦術的経路選択ロジックについて、総交通需要と期待所要時間の関係を示したものである。なお、それぞれのロジックについては、すべてのドライバーがそれぞれに従うものと仮定している。期待所要時間最小化ロジックの場合は、需要 50 台から期待所要時間が急激に増加しているが、これは経路 1 の交通容量が小さく渋滞発生確率が急激に増加するためである。さらに、この点で経路 1 の期待所要時間が経路 2 の非混雑時走行時間とほぼ等しくなり、経路 2 も利用されはじめるため、期待所要時間の増加が小さくなる。その後、経路 2 の混雑が増加しはじめる。今回の計算条件では容量制約がないため、経路 1 に無限大の交通が通行したとしても、所要時間が 20 分である。したがって、期待所要時間は、20 分に漸近する。一方、戦略・戦術的経路選択ロジックの

場合、期待所要時間が全体的に小さく需要が各経路の交通容量を上回ったとしても、期待所要時間の最大値は18分弱に留まっている。これは、出発点において提供される経路情報を用いることで渋滞を回避でき、結果的に経路2に多くの交通が流入することで、経路1の混雑が緩和されていることを示している。2つのロジックを比較すると、「戦略・戦術的経路選択ロジック」における期待所要時間が「期待所要時間最小化ロジック」のそれよりも常に小さい値をとっており、情報提供によって走行時間を短縮することが可能であることが確認できる。

次に、2つのロジックの差が大きな交通需要75台に着目し、情報利用率を変化させた場合の期待所要時間推移について考察する。図-5に試算結果を示す。まず、情報を利用する戦略・戦術的経路選択行動ロジックの方が常に所要時間が短いことが確認できる。そして、情報利用率が一定値を越えてないと期待所要時間に変化が生じない。また、戦略・戦術的経路選択行動ロジックのドライバーが増加すると、期待所要時間最小化ロジックに従うドライバーの所要時間も減少することも確認できた。

4. 情報提供効果に関する考察

(1) 多経路ネットワークへの適用

前章で挙動確認を確認した経路選択ロジックをより大きなネットワークに適用し、ネットワーク内に経路変更点を多く設置、情報提供が行われるノード数が経路選択に及ぼす影響について検証を行う。適用するネットワークは図-6のような4経路の格子型ネットワークとしノード(0,1,2,4,5,6,8,9,10)の9点で情報提供を受けうるものとし、目的地をノード15と定めた。前章までの議論においては、各経路が独立のリンクで表現されていたが、図-6に示すネットワークでは、経路間でリンクの重複が生じる。このようなケースにおいては、直近リンクの混雑状態(渋滞 or 非渋滞)が情報として与えられるものとしている。ただし、下流が情報提供地点であれば、そこで戦略・戦術的経路選択を行った結果の期待所要時間を用い、情報提供されていない場合は、期待所要時間最小化ロジックによる結果を用いることとした。

図-7に各ロジックを適用した時の期待所要時間を示した。交通需要が少ない場合には、期待所要時間

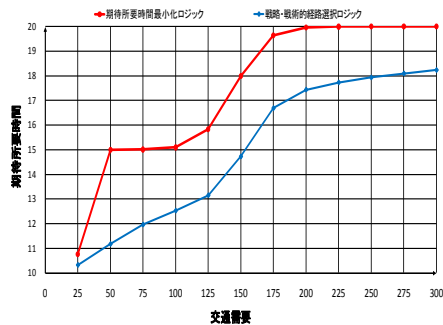


図-4. 期待所要時間の比較

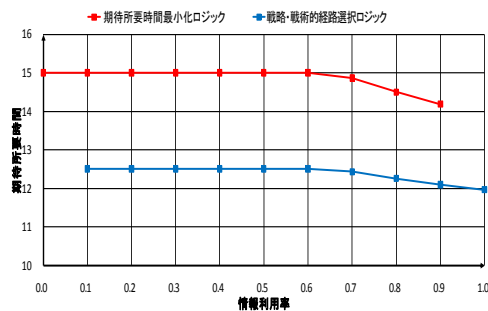


図-5. 情報利用率と期待所要時間の関係

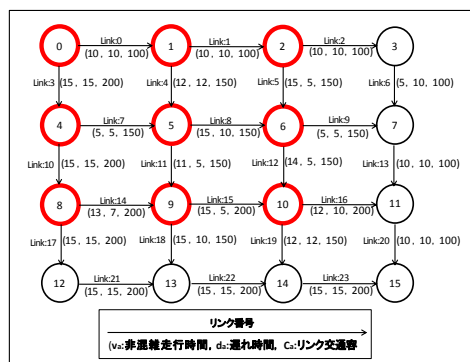


図-6. 計算ネットワーク(2)

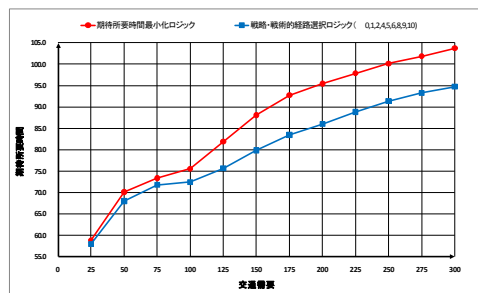


図-7. 交通需要と期待所要時間の関係

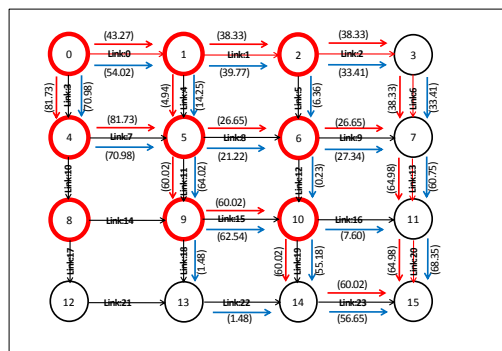


図-8. ロジック間のリンク交通量の比較

最小化ロジック，戦略・戦術的経路選択ロジックをそれぞれ適用させた場合の期待所要時に差がほとんど生じていないが，需要が増大するにつれて，2つのロジックの期待所要時間に大きな差が生じ，戦略・戦術的経路選択ロジックを適用した場合の方が，期待所要時間が小さくなっている．次に，期待所要時間の差が大きくなり始める交通需要100台に着目し，各ロジックを適用した時のリンク交通量を図-8に示した．赤の実線が期待所要時間最小化ロジックを適用したときのリンク流入交通量，青の点線が戦略・戦術的経路選択を適用したときのリンク流入交通量である．戦略・戦術的経路選択を適用した場合，情報提供ノードで情報を受け取り，戦術的対応行動を行うため，期待所要時間最小化ロジックでは使用されない，リンク4, 5やリンク8などに少なからず交通量が流れる．その結果，交通集中が緩和され，その結果，期待所要時間の減少につながっていると考えられる．

(2) 情報提供位置の違いによる提供効果の違い

次に，経路情報を受け取る地点についての検証を行う．実際の道路ネットワーク上では，出発点（始点）で全経路の情報を得られることは少なく，経路途中の経路変更可能点で情報を得て，ドライバーは進行する経路を決めるのが一般的である．図-9にそれぞれ示した地点（ケース①～③の各点）で情報提供を行ったケースを比較する．図-10, 11に交通需要125台での，ケース①～③のリンク交通量を示した．赤の実線がケース①，緑の実線がケース②，青の実線がケース③のリンク流入交通量を示している．図-10よりケース①と②を比較すると，使用されるリンクは同一であるが，リンク0, 3, 4, 7の交通量に差がある．情報提供位置が上流に推移することで，選択の幅が広がっていることが考えられる．また，図-11からケース①と③を比較すると，ケース③ではノード10で情報提供を受けるため，ケース①では使用されないリンク16が使われ，リンク19→リンク23の流入交通量が若干減少している．しかし，リンク16では，リンク20からの交通量と合流するため，リンク20の混雑が悪化してしまっている．

表-1に各ケースの期待所要時間を示したが，情報提供位置が目的地に近くなるほど期待所要時間が大きくなっているのがわかる．情報提供地点が目的地

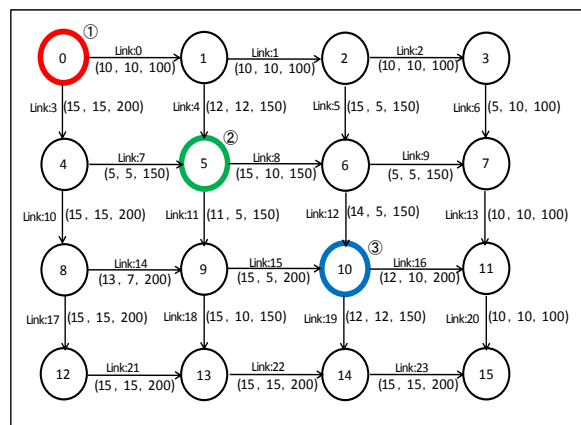


図-9. 計算ネットワーク(3)

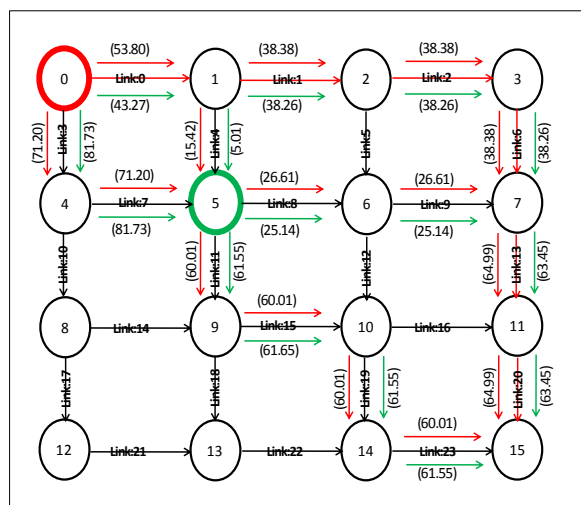


図-10. リンク交通量の比較 (ケース①, ②)

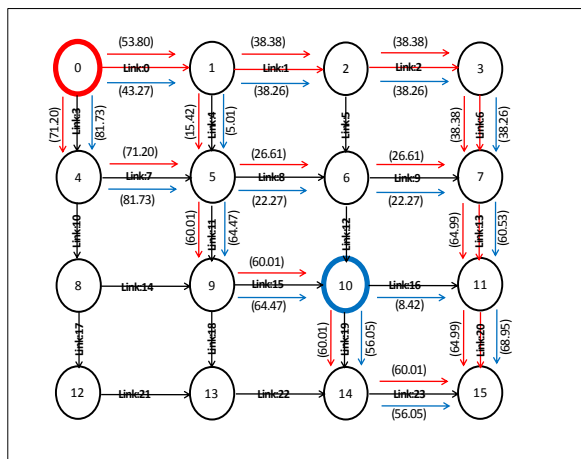


図-11. リンク交通量の比較 (ケース①, ③)

表-1. 期待所要時間の比較 (ケース①～③)

期待所要時間	
ケース①	78.81
ケース②	80.46
ケース③	81.29

から離れるほどに、経路選択の幅が広がるためと考えられる。情報提供を行うノードについては、そのネットワークに適した情報提供地点が存在し、情報提供位置によって期待所要時間に大きな影響が存在することが示された。

5. おわりに

本研究では、情報を使用して経路選択を行うドライバー経路選択行動を表現できる経路選択ロジックと配分手法の構築した。いくつかの仮想ネットワークに提案したモデルを適用した結果、以下の知見が得られた。

- ① 戦略・戦術的経路選択ロジックによって算出された期待所要時間は、期待所要時間最小化ロジックによって算出された期待所要よりも小さく算出されており、情報提供の優位性が確認された。
- ② 4 x 4 のネットワークに適用した場合でも、1OD2 リンクでの知見と同様の結果が得られ、大規模なネットワークについても、戦略・戦術的経路選択ロジックの優位性が証明された。
- ③ 提案したモデルによって、情報提供位置や数によって提供効果が異なることが示唆された。すなわち、情報提供効果について、本モデルを活用することで議論することが可能である。

なお、今後の研究課題としては以下があげられる。

- ・ 複数の OD ペアを対象とした場合の適用計算の実施
- ・ リンクの交通容量制約を導入することの検討
- ・ ここでは誤差なく提供されていると仮定した情報提供に誤差があるケースの考察

これらを踏まえて、実ネットワークへの適用を検討していく。

謝辞

本研究は、科学研究費・挑戦的萌芽研究「経路選択原則の新しいパラダイム：戦略・戦術的行動の数理的記述」（課題番号 20656080，研究代表者：倉内文孝，2008～2009）の成果の一部である。記して深謝する。

参考文献

- 1) 安隆浩，宇野伸宏，倉内文孝，飯田恭敬：「隆観測交通量データを用いた経路分岐率による情報提供の影響に関する実証分析」，大阪交通科学研究会平成 16 年度研究発表会講演論文集，19-20，2004
- 2) 倉内文孝，飯田恭敬：“情報精度が駐車場選択行動に及ぼす影響に関する実験分析”，土木学会論文集，No. 653/IV-48，17-27，2000.
- 3) Schmöcker, J.-D., Bell, M. G. H., Kurauchi, F. and Shimamoto, H. (2009) “A Game Theoretic Approach to the Determination of Hyperpaths in Transportation Networks”, *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*, 1-18.
- 4) Nguyen, S. and S. Pallottino (1986) “Hyperpaths and shortest hyper paths” in : *Combinatorial optimization :Lecture notes in mathematics*. Berlin: Springer-Verlag
- 5) 安部遼佑，山本俊行：“経路途中の変更可能性を考慮した確率的最短経路案内アルゴリズムの開発”，第 40 回土木計画学研究・講演集，CD-ROM，2009.
- 6) Wardrop, J.G.(1952) “Some theoretical aspects of road traffic research”，*Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II*, 325-378.