

シミュレーションによる Braess のパラドックス発生条件の探索

坂井 哲朗¹・力石 真²・藤原 章正³

¹ 学生非会員 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山一丁目 5-1)

E-mail: sakatetsu9957@gmail.com

² 正会員 広島大学准教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山一丁目 5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 広島大学教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山一丁目 5-1)

E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

本研究では、Braess のパラドックスの発生条件を探索するシミュレーション分析を行う。具体的には、Braess のパラドックスの発生は、道路網構造と交通需要パターンに依存すると考え、(1) 仮想的な道路網と交通需要パターンを生成する方法を提案した上で、(2) 生成した複数の道路網および交通需要パターンに対し、道路網上の一部の道路リンク削除前/削除後の総旅行時間(利用者均衡配分問題を解くことにより算出)、及びその差分から定義される Braess のパラドックスの発生有無の情報を格納したデータセットを作成、(3) (2)で生成したデータセットを用いて、道路網、交通需要パターンに関する変数を説明変数、Braess のパラドックス発生有無を目的変数とした決定木分析を実施し、Braess のパラドックス発生条件を探索的に明らかにした。

Key Words: Braess's Paradox, Network generation, User equilibrium, Traffic demand, Decision tree

1. はじめに

本研究では、Braess のパラドックス¹⁾が発生する状況を探索する決定木分析を行う。Braess のパラドックスとは、移動時間の短縮を目的として新たに道路リンクを追加することにより、逆に移動時間が増加してしまう現象のことを指す。この現象は、現存する都市でも発生することが確認されており、封鎖することによって渋滞が改善される道路が存在することを示唆する。しかしながら、Braess のパラドックスが発生する諸条件については、一般的な知見が得られていない状況にある。本研究では、決定木分析を通じてパラドックス発生時の諸条件を明示することで、次に述べる政策論展開の足掛かりとしたい。第一に、ある道路区間を封鎖することで道路網全体のパフォーマンスが向上する場合、例えば当該道路区間を歩行者専用空間に割り当てる方策が考えられる²⁾。第二に、災害時に複数道路が被災し、通行止めとなった際の道路網の復旧課程においても Braess のパラドックスが発生し得ることが確認されている³⁾。Braess のパラドックスが生じる諸条件を明らかにすることで、パラドックスの発

生を回避した道路の復旧順序の検討につなげたい。

Braess のパラドックスが発生する状況を探索した研究はいくつか存在するが、ある特定のネットワークでのみの定式化やシミュレーションに留まっており、知見の一般化が図られていない。そこで、Braess のパラドックスが道路網の構造と交通需要パターンに依存すると考え、それらを変数とした分析を行う。分析には決定木分析を用いるとともに、現実の都市においてみられる道路網構造と交通需要パターンを模した仮想状況を生成するアルゴリズムを構築する。

2. 本研究の概要

本研究の全体像を次の図-1 に示す。本研究の最終目的は、平常時だけでなく、災害時の特殊な状況においてのパラドックスの発生状況探索である。本論文では、図-1 中の上側の平常時の発生状況探索を行い、図-1 下側の災害時の分析は、これからの課題とする。様々な道路網構造と交通需要条件下における Braess のパラドックス

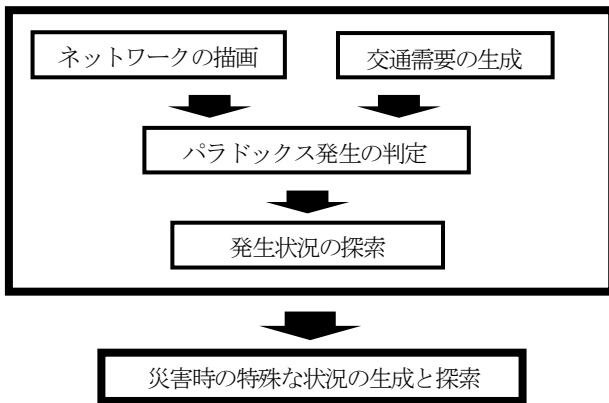


図-1 研究のフロー

の発生状況を確認することを企図した分析を行う。
Braess のパラドックスの発生有無を判別するために、利用者均衡配分を用いて以下の2つの道路網条件下における旅行時間を算出する。

$$TTT = F(D, G(A, E)) \quad (2a)$$

$$TTT' = F'(D, G(A, E, P)) \quad (2b)$$

ここで、 TTT は移動時間、 D は交通需要、 A はリンク(道路)、 E はノード、 $G(E, A)$ は道路網、 TTT' はリンクを封鎖した時の移動時間、 P は実際に封鎖したリンクとする。

イメージ式において、 TTT と TTT' を比較し、

$$TTT > TTT'$$

となったとき、Braess のパラドックスが発生したと判断する。

決定木分析において道路網の変数として π 指標、交通需要の変数として媒介中心性を用いる⁴⁾。 π 指標は、道路の混み具合を示す指標であり、値が大きいほど都市化が進んでいるといえる。媒介中心性は、対象のノードを通る交通がどれだけあるかを表した値であり、この媒介中心性が高いほど、中心部に位置するノードと判断できる。また、決定木分析の説明変数は、交通需要の媒介中心性パラメータ、 π 指標、取り除くリンク両端のノードのそれぞれの媒介中心性(媒介中心性1, 媒介中心性2)、取り除いたリンクの種類、平均移動時間(min)とした。

3. 道路ネットワーク生成方法

(1) L-system

道路ネットワーク生成手法はいくつか提案されている。その中で、本研究では、L-system⁹⁾という自己相似性を持った図形を描画することができるアルゴリズムによるネットワーク生成の手法を用いる。

L-system は、植物や細胞などのような自己相似性を持った図形を描画することができるアルゴリズムである。初期文字列を書き換え規則に従って変換することによ

て、自己相似性を持った複雑な図形が記述できる。本研究では、次の表-1の書き換え規則を設定した。また、書き換え規則によって生成された文字列の意味は、道路種類によって異なるという設定にしている。その設定を、次の表-2から表-5に示す。また、上記の各道路の揺らぎ角度は $\pm 5^\circ$ としている。

(2) 描画と基本条件

書き換え規則を python のタートルグラフィックを用いて描画する。また、道路ネットワーク描画時の条件を次のように設定した。

- ① 描画する線の太さを変えることで、道路の種類分けを行う。
- ② 道路の種類は「高速道路」、「国道」、「県道」、「市町村道」の4種類とする。
- ③ 高速道路が生成される確率は90%とする。
- ④ 高速道路と他の道路の交差確率は、すべての道路で20%とする。
- ⑤ 高速道路以外の道路どうしは100%交差する。
- ⑥ L-system の書き換えの回数は、「高速道路」、「国道」が3回、「県道」が5回、「市町村道」が7回であり、「市町村道」は異なる2地点から合わせて2回描画させる。
- ⑦ ノード数が50以下、または200以上のネットワークは破棄する。

また、描画したネットワークに、配分計算に必要な基本条件を設定する。今回生成するネットワークは、中心部からの距離が3-5km程度の都市を想定している。生成の基本条件は次のように設定する。

- ① 道路の種類別に交通可能容量を設定する。
「高速道路」：2000(pcu)
「国道」：1500(pcu)
「県道」：1000(pcu)
「市町村道」：700(pcu)
- ② 道路の長さ(km)を設定する。
タートル座標系で
(タートルの出力のリンク長/100)とする。
- ③ 道路の自由旅行時間(km/h)を設定する。
道路の長さと同じとする。

表-1 L-system の書き換え規則

置き換え規則の識別子	規則①	規則②
Tree1	“A”→“A”	“B”→“A+B”
Tree2	“A”→“B-A”	“B”→“B”
Tree3	“A”→“B+”	“B”→“B+A”
Tree4	“A”→“A-B”	“B”→“A-”
Tree5	“A”→“[B+A]”	“B”→“[A]B”
Tree6	“A”→“A[B]”	“B”→“B]A”

表-2 高速道路の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	100, 125, 150 のいずれかの長さだけ前進
“B”	100, 125, 150 のいずれかの長さだけ前進
“+”	10° ~ 30° の中のランダムな角度だけ右に回転
“-”	10° ~ 30° の中のランダムな角度だけ左に回転
“T”	意味なし
“X”	意味なし

表-3 国道の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	60, 75 のいずれかの長さだけ前進
“B”	70, 80, 90 のいずれかの長さだけ前進
“+”	(15° ± 揺らぎ角度)だけ右に回転
“-”	(15° ± 揺らぎ角度)だけ左に回転
“T”	丁字に分岐する(丁字路となる)
“X”	十字に分岐する(十字路となる)

表-4 県道の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	30, 50 のいずれかの長さだけ前進
“B”	50, 60, 70 のいずれかの長さだけ前進
“+”	(90° ± 揺らぎ角度)だけ右に回転
“-”	(90° ± 揺らぎ角度)だけ左に回転
“T”	丁字に分岐する(丁字路となる)
“X”	十字に分岐する(十字路となる)

表-5 市町村道の文字列の解釈

文字	文字の意味
“A”	15, 30 のいずれかの長さだけ前進
“B”	30, 40, 50 のいずれかの長さだけ前進
“+”	(90° ± 揺らぎ角度)だけ右に回転
“-”	(90° ± 揺らぎ角度)だけ左に回転
“T”	丁字に分岐する(丁字路となる)
“X”	十字に分岐する(十字路となる)

4. 計算方法

生成したネットワークによるパラドックスの発生への影響を決定木で調べるため、数値化したネットワークの指標を計算する。本研究では、ネットワークの指標として π 指標を用いる。 π 指標は、道路の混み具合を示す指標であり、値が大きいほど都市化が進んでいるといえる。 π 指標は、次に示す式(5a)で計算できる。

$$\pi = \frac{\text{道路の総延長}}{\text{ネットワークの直径}} \quad (5a)$$

また、交通需要の指標として、媒介中心性を用いる。媒介中心性は、対象のノードを通る交通がどれだけあるかを表した値であり、媒介中心性が高いほど、都心部に位置するノードと判断できる。媒介中心性は、次に示す式(5b)で計算できる。

$$BC_i = \sum_{s=1(s \neq i)}^n \sum_{t=1(t \neq s, i)}^n \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (5b)$$

ここで、 BC_i はノード i の媒介中心性、 σ_{st} はノード s からノード t へ移動する最短経路の個数で、 $\sigma_{st}(i)$ は、 σ_{st} の中でノード i を通る経路の数を表す。配分時には、以下に示すように、この媒介中心性を考慮し、値が大きいノードほど交通量が集中するように設定する。

生成したネットワークに即した交通需要を設定する。ネットワークによって、ノードやリンクの数が異なるため、ネットワーク生成後に、即した交通需要を設定する必要がある。交通需要の設定に用いた数式を(5c)に示す。

$$\begin{aligned} V'_i &= V_{OD} \times \left(\frac{BC_i}{BC_{Sum}} \right) \\ V_{ave} &= V_{OD} \times \left(\frac{BC_{Ave}}{BC_{Sum}} \right) \\ V_i &= \{V'_i - P \times |V'_i - V_{ave}|\} \end{aligned} \quad (5c)$$

ここで、 V_i : ノード i に集まる交通量、 V_{OD} はあらかじめランダムに作成したネットワーク全体の交通量、 BC_i はノード i の媒介中心性、 BC_{Sum} は全媒介中心性の合計値、 E はノード数、 P は媒介中心性の考慮の度合いを表すパラメータ、 BC_{Ave} は媒介中心性の平均値である。総交通量 V_{OD} は、5万から15万の間のランダムな整数とし、交通需要の変化がパラドックス発生の要因であるかを検証するためのパラメータ P の値は、0.0, 0.225, 0.450, 0.675, 0.900の5つに設定した。

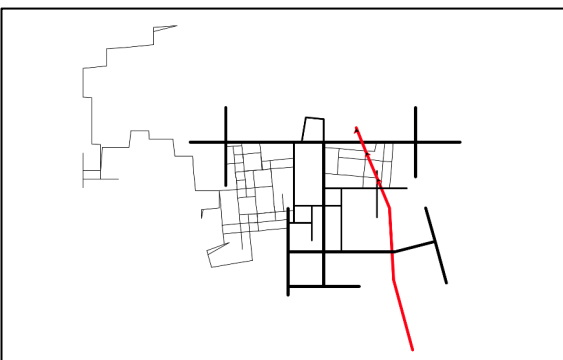
利用者均衡配分時に必要となるリンクパフォーマンス関数にはBPR関数を用い、パラメータとして、溝上ら(1989)⁹が提案した $\alpha = 0.96$ および $\beta = 1.20$ を用いた。また、利用者均衡配分の計算方法として逐次平均法(MSA)を利用した。パラドックスの発生状況の探索には、決定木で分類した。決定木は、木の深さを5層とし、データの2割を教師データとして学習させた。

本研究では、より多くのネットワークを生成し、配分計算を行うために、取り除く道路の数を20本に限定して取り除いた。20本の取り除かれる道路はランダムに選ばれるようにした。よって、1つのネットワークに対して100パターンのパラドックス発生の検証ができ、150個のネットワークを生成するため、15000パターンのパラドックスの発生の検証を行うことができた。

5. 研究結果

(1) ネットワーク生成の結果

ネットワークの生成結果を以下に示す。作成したネットワークの数は膨大であるため、ここでは一部のみを示す。また、ネットワークの指標として用いる π 指標の値も併記する。図中の赤い線は高速道路で、黒い線は太い

図-3 ネットワーク例 1(π 指標:36.44)図-4 ネットワーク例 2(π 指標:50.55)図-5 ネットワーク例 3(π 指標:80.14)図-6 ネットワーク例 4(π 指標:117.59)

順に国道、県道、市町村道である。また、高速道路とその他の道路が一割の確率で交わった場所を黒三角形で示している。図で交差していても、黒三角形が描画されていない場合は、立体交差として扱い、ジャンクションに

はなっていないものとして設定した。

ネットワークの現実性を示す指標は定められていないため、現実的かどうかの解釈は分かれることが予想される。例えば、図-3 では、高速道路を挟んで国道と県道および市町村道が分かれて生成している。都市と考えれば現実的ではないと思えるが、山間部と考えれば高速道路を挟んで集落があり、国道によって他の地域につながっているならば、現実的であるとも捉えられる。このように、地理的条件などの他の条件などによって判断に差が生じるため、ネットワークの現実性を判断する明確な指標の検討は、今後の課題の一つである。

加えて、今回のネットワーク生成では、高速道路→国道(3 回成長)→県道(6 回成長)→市町村道(5 回成長が 2 回)という順序で描画し、種類ごとの生成であったため分岐先の道路は分岐前の道路と同じ種類となっている。しかし、多くのネットワークでは国道の分岐先は県道、その分岐先は市町村道という構造が多く、この点においても改善の余地があるといえる。

(2) 決定木分析の結果

決定木分析の結果を次の図-7 と図-8 に示す。モデルの精度は 98%と高い値を残した。

図-7 中のノードの媒介中心性 1, 媒介中心性 2 は、取り除いたリンクの媒介中心性を表すことができないため、リンクの両端のノードのそれぞれの媒介中心性であり、どちらにも違いはない。また、図-8 中の π_index は π 指標、 $time_average(min)$ はネットワーク全体の平均移動時間、 cut_o_bc と cut_d_bc は取り除くリンクの両端のノードの媒介中心性、 cut_road_type は取り除いた道路の種類で、 i は交通需要の媒介中心性パラメータを表す。取り除いた道路の種類について、高速道路を 1, 国道を 2, 県道を 3, 市町村道を 10 として値を設定した。

始めに、図-7 の特徴量を見ると、ネットワーク全体の平均移動時間の値が大きいことがわかる。Braess のパラドックスの発生には、この平均移動時間の値が大きいかかわっており、逆に、取り除くリンクの種類や交通需要の中心媒介性の考慮については大きな影響がないことがわかる。Braess のパラドックスの発生に、ネットワークの状況は多少関わっていると証明できたが、交通需要パターンによる発生分類はできなかった。

次に、図-8 の決定木分析の Tree の構造について考察する。この結果から、Braess のパラドックスが特に発生しやすいネットワーク状況をまとめると、次の表-6 のようになる。表-6 について、赤く囲われた二つノードに注目する。この二つのノードの分類は、ネットワーク全体の平均移動時間が 3.887 分以下かつ π 指標の値が 31.571 以上で、リンクの両端のノードのうち一方のノードの媒介中心性の値が 0.015 以上のネットワーク状況であれば、

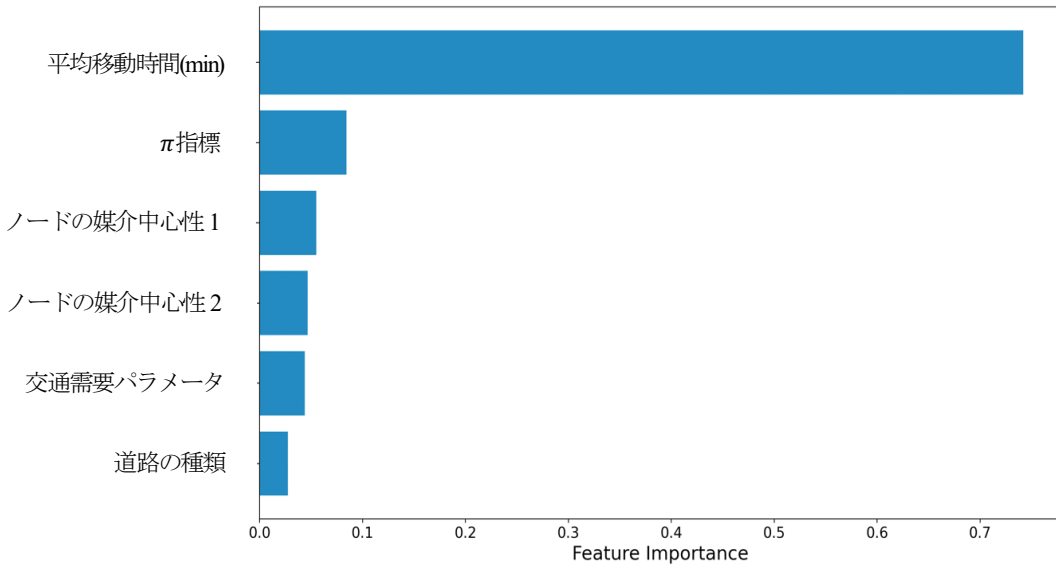


図-7 特徴量

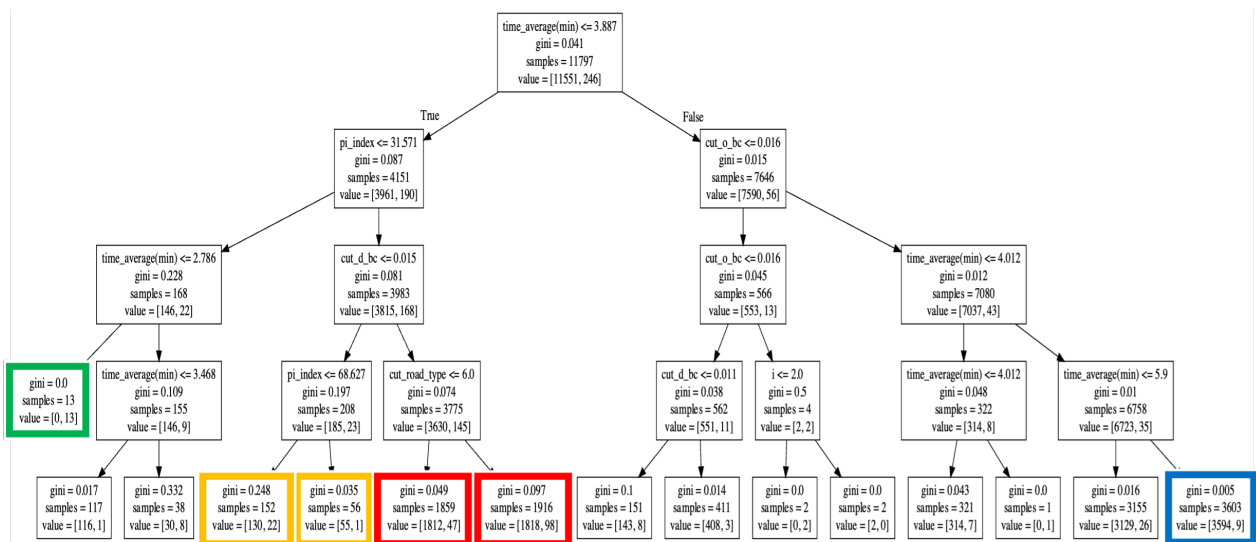


図-8 Treeの構造

表-6 決定木分類のまとめ

パターン① (図 4.9 の赤ノード)	平均移動時間が 3.887 分以下
	π指標の値が 31.571 以上
	媒介中心性が 0.015 以上
	*カットする道路の種類が市町村道ならば、なお発生しやすい
パターン② (図 4.9 の緑ノード)	平均移動時間が 2.786 分以下
	π指標の値が 31.571 以下

パラドックスは発生することがわかる。すなわち、比較的都市化の進んだネットワークの中心の道路ほど、パラドックスが発生しやすいといえる。加えて、この二つのノードを比較すると、カットする道路は、国道などの大きな道路ではなく、小さな市町村道の方が2倍近く発生しやすいという結果になった。また、緑で囲われたノ

ードでは、平均移動時間が2.786分以下かつπ指標の値が31.571以下のネットワークであれば、完全にパラドックスが発生するということがわかる。さらに、図-8の他のノードを解説する。青く囲われたノードに注目すると、平均移動時間が5.9分以上かつリンクの両端のノードのうち一方のノードの媒介中心性の値が0.016以上のネッ

トワーク状態では、パラドックスはほとんど発生しないという結果となった。そのほかに、黄色く囲われた二つのノードに注目すると、二つは π 指標の値の大小によって分類されているが、 π 指標の値が 68.627 以上、すなわち都市化が進んでいるとパラドックスは発生しないという結果となった。都市化が進んだ複雑な道路ほどパラドックスが発生しやすい訳ではなく、都市化の度合いによって、パラドックス発生の有無は大きく変わるということがわかる。

しかし、今回の分析では、 π 指標の値による都市化の明確な基準がないため、どの程度の都市であるかという議論ができない。加えて、(1)のネットワーク生成の結果で挙げたように、ネットワークの現実性を考慮することができていないため、現実性を判断する指標が必要である。さらに、図-8において、分類されたデータ数が極端に少ない終端ノードがいくつか確認できる。これは、現在用いている説明変数では分類できないデータであることや、教師データとして用いた2割に含まれていたハズレ値が反応したことなどが原因で生じていると考えられる。この問題の改善に、説明変数の種類を増やす必要がある。

6. おわりに

本論文では、回避によって多くのメリットが期待されるものの、未だ発生状態について知見が一般化されていない Braess のパラドックスの発生状況の探索を行った。本研究では、Braess のパラドックスが発生する状況を探

索するため、仮想ネットワークを生成し、利用者均衡配分ののち、決定木分析により状況の探索を行った。ネットワークを生成においては、道路種類別に生成することの課題とネットワークの現実性指標についての問題を示した。また、決定木分析によって、パラドックスの発生しやすいネットワーク状況を発見した。加えて、Braess のパラドックス発生状況を探るうえで、必要となる説明変数の種類や設定条件などの課題を示した。

参考文献

- 1) Dietrich Braess, Anna Nagurney, Tina Wakolbinger: On a Paradox of Traffic Planning, *Transportation Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 446-450, 2005
- 2) Saeed Asadi Bagloee, Avishai (Avi) Ceder, Majid Sarvi and Mohsen Asadi: Is it time to go for no-car zone policies? Braess Paradox Detection, *Transportation Research Part A*, Vol. 121, pp. 251-264, 2019
- 3) 山下達也:災害時のモバイルブリッジの敷設効果と道路区間の優先順位の検討, 広島大学大学院国際協力研究科修士論文(2021)
- 4) 延原玄弥, 内田英明, 阿部和規, 藤井秀樹, 吉村忍: 道路ネットワークの特徴量分析とその生成, *The 34th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence* (2020)
- 5) 加藤伸子, 奥野智江, 狩野均, 西原清一: L-system を用いた仮想都市のための道路網生成手法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 41, No. 4, 2000
- 6) 土木学会, 1998, 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 土木学会

(Received July 1, 2009)

(Accepted November 1, 2009)

How road network structure and travel demand affect the occurrence of Braess's Paradox?

Tetsuro SAKAI, Makoto CHIKARAISHI and Akimasa FUJIWARA

In this study, we conduct a simulation analysis to search for conditions in which Braess's paradox occurs. Specifically, we hypothesize that Braess's paradox depends on the road network structure and traffic demand patterns, and we propose a three-step-method (1) to generate a virtual road network and traffic demand patterns, (2) for a large number of generated them, to create a dataset that contains information on the total travel time before/after removing some road links on the road network (calculated by the user equilibrium distribution) and the occurrence of Braess's paradox defined by the difference between them, (3) to use the dataset generated in (2), to conduct a decision tree analysis with variables of road network and traffic demand patterns as explanatory variables and the occurrence of Braess's paradox as an objective variable.

As a result, we identified the conditions in which Braess's paradox occurs in an exploratory manner.