

特集 「ネットワークが発見する知能」

道路交通ネットワークのダイナミクスと 群ユーザ支援

Dynamics of Road Traffic Networks and Mass User Support

車谷 浩一

Koichi Kurumatani

産業技術総合研究所 情報技術研究部門

Information Technology Research Institute (ITRI), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

k.kurumatani@aist.go.jp, <http://www.kurumatani.org>

山下 倫央

Tomohisa Yamashita

(同上)

tomohisa.yamashita@aist.go.jp

野田 五十樹

Itsuki Noda

(同上)

i.noda@aist.go.jp

和泉 潔

Kiyoshi Izumi

(同上)

kiyoshi@ni.aist.go.jp

松尾 豊

Yutaka Matsuo

(同上)

y.matsuo@carc.aist.go.jp

Keywords: road traffic, complex networks, scale free, mass user support, social coordination, information sharing, resource allocation, utility.

1. はじめに

近年、複雑なネットワーク構造の性質として、スモールワールド、スケールフリーといった性質に関する研究が盛んに行われている[Barabasi 02]。これは、従来のグラフ構造に関する研究が、ランダムネスすなわちエッジやノードの分布がポアソン分布に従ったグラフに関するものが中心であったのに対し、現実の世界のネットワーク構造では分布がべき則に従い、膨大な数のリンクをもつハブが存在するとともに、グラフの直径が十分に小さいという性質に対して、その成立と進化における優位性、ならびに現実的な効用の観点から分析が行われている。

これらのスモールワールドやスケールフリーネットワークを分析する際のさまざまな構造的指標は、従来から社会ネットワーク分析で用いられてきた中心性や Google の PageRank と関連し、多くの分野に適用可能と考えられる。本稿では、特に道路交通に関するネットワーク構造に関する分析やそのダイナミクスに関するいくつかの研究を紹介する。道路交通に関するネットワーク構造とは、1) 利用者すなわちドライバーや旅行者の間のネットワーク、2) 道路網そのもののネットワーク構造の二つに大

別される。

1) の利用者間のネットワークとは、従来の道路交通システムが個々の利用者の便利さ(移動時間や移動距離の短さ)のみに注目していたのに対し、近年急速な発展を遂げつつあるユビキタス情報環境を用いて利用者間での情報の共有を進めることにより、利用者の便利さと道路交通システム全体の効率を同時に改善するような情報サービス(群ユーザ支援)[Kurumatani 04]に関する研究である。多数の車両間で経路情報を共有して、各車両の移動時間を短縮しながら、システム全体(全車両)の効率をも向上させるような「協調カーナビ」(2章)、ならびに個々の旅行者の移動時間を短縮しながら、システム全体(移動体(バス))の運用効率を向上させる「デマンドバス」(3章)の話題である。

2) の道路網はネットワーク構造そのものであり、道路網がネットワークとしてもつ構造の分析、特に道路網のネットワーク的な属性がドライバーや移動体の運行に及ぼす影響の分析(4章)、ならびに住民の道路網建設に関する意思決定が道路網の成長に対して及ぼす影響の分析(5章)に関する話題である。

道路交通システムに関する分析や、それを情報技術によってより快適・効率的にするための研究は従来から盛

んに行われている (e.g., オペレーションズリサーチや ITS など). 本稿はこれらの研究の成果をも踏まえつつ, 1) 近年, その性質が徐々に明らかになりつつある複雑系ネットワーク構造 (e.g., スモールワールド, スケールフリーなど) の観点からの新たな分析, 2) 進展著しい ITS などをも含むユビキタス情報環境を利用した, システム全体の構造に注目した新しい情報サービス (群ユーザ支援), 3) これらの分析・検証ツールとしてのマルチエージェントシミュレーション, などの視点からの道路交通ネットワークの分析・効率化へのアプローチである.

2. 協調カーナビ

2.1 個人の利便性と全体の効率向上の両立

車両に対して移動経路の検索と道案内を行うカーナビゲーションシステム (以下「カーナビ」と呼ぶ) は近年急速に普及しており, 今後も車両のカーナビ装着率は上昇を続けると思われる. 効果的なナビゲーションシステムの構築方法に関する研究も近年盛んに行われている [Klugl 03]. カーナビは各時点での混雑情報を, 1996 年に開始された VICS サービスから取得し [VICS], 各車両の各時点での最短時間経路を検索するものが主流である (以下「VICS カーナビ」と呼ぶ).

このような VICS カーナビが今後ますます増加していった場合, 個々の車両の移動時間が本当に短縮されるかという点必ずしもそうではないと考えられる. すなわち道路交通システム全体の観点から見ると, 以下の二つの問題が存在する.

●車両間の非連携の問題

各車両が独立に最短時間経路を検索すると, 各時点における空き経路に多数の車両が集中する. すなわち集中による混雑がほかの経路へと場所を移すだけであり, 車両の移動経路が分散しない.

●提示情報の時間遅れの問題

提示されるのは各時点における混雑状況であるため, 時間の経過とともに混雑状況が変化し, 当初計画が有効でない可能性がある.

すなわち, 従来の VICS カーナビが今後さらに普及した場合, 個々の車両の移動時間が必ずしも短縮されることは限らないことが予想され, 近年シミュレーションによっても, そのような予想が検証されつつある [Mahmassani 91, Tanahashi 02, Yoshii 96]. また, このような予期しない混雑の発生は道路交通システムにおける車両流に留まらず, 大規模テーマパーク [Kawamura 04] やイベントホールの人流 [Suzuki 03] においても観察されている.

これらの問題は一種の資源配分問題であり, すべての車両に対して利便性の向上 (例えば移動時間の短縮) を提供するの是一見無理なように見える. しかしながら, 我々は, 「個々の車両の利便性を落とすことなく, システム全体としての効率向上 (渋滞の緩和) を図る方法があ

る」ことを示す. 具体的には, 車両群の「移動計画情報 (近未来予測情報) を共有」することによって, 各車両がおのこの利便性の向上を目指しつつ, 渋滞の緩和が可能であることをシミュレーションによって示す.

2.2 情報共有の方法

各時点での混雑情報に基づく経路検索の一つの問題点は, 通過する予定の経路に到着するまでの時間遅れがあるにもかかわらず, 現在の混雑状況によって経路を決定することである. 現在は空いている, これからほかのドライバーが集中する経路が事前にわかっているならば, その経路を避けるドライバーも現れ集中を回避できる可能性がある.

もう一つの問題点は, 多数の車両間で競合する資源 (今の場合, 空いている移動経路) をどのように分配するかという問題である. もしすべての車両に対して同時に, 従来システムより利便性を向上させることができる新サービスを構成できれば問題の解となる. より具体的には, 以下のような条件を満たすサービスを構成する必要がある.

●利用者のインセンティブ

新サービスの利用者の利便性は, 従来サービスの利用者の利便性よりも向上する. 少なくとも従来システムより悪くなることはない.

●システムの安定性

新サービスの利用者が増加すると, 新サービス利用者の利便性が增大する. さらに, 新サービス利用者以外の利便性も向上するならばさらに良い.

このような条件を満たす新サービスとして, 我々は, 移動計画すなわち通過予定の経路情報の共有を考える. 各車両が, 通過する予定の経路を経路情報サーバに通知し, サーバはその情報から各リンクの近未来の混雑度を見積もり, その情報を各車両に通知する. 各車両は次節で述べる「経路情報共有」という方法により, 各自にとっての最適な経路を選択する.

また, このような協調カーナビが有効に機能するかどうかについて, シミュレーションによる検証結果についても述べる. 従来研究において経路決定戦略の効果を検証するために用いられる道路網に関しては, 目的地まで複数ある経路から一つを選択するという単純な道路網か [Shiose 01], 現実の複雑な道路網を取り上げた研究が多く, 道路網の構造と混雑情報の提供による混雑の発生の関係を論じた研究は少ない. 本稿では, 放射環状網・放射状網の 2 種類の道路網において, 我々が提案する協調カーナビの導入の結果を報告する.

2.3 協調カーナビのメカニズム

本節では, 従来の経路検索の方法 (最短距離経路, 最短時間経路) について述べた後に, 協調カーナビを実現する経路情報共有について述べる.

●最短距離経路 (SD)

最短距離経路 (Shortest Distance Route: SD と

略記)とは、目的地点から出発地点までの経路長を最短にする経路を選択するような経路探索の方法である。

この経路探索の方法は、地図だけをもって経路を選択して移動するような車両に相当する。

●最短時間経路 (ST)

最短時間経路 (Shortest Time Route: ST と略記)とは、現在の混雑状況の情報を用いて最短時間の経路を選択するような経路探索の方法である。

STを用いる車両とは、地図情報に加えて、車載機を通じて道路交通情報センター (e. g. VICS センター) から受け取った道路網全体の混雑情報に基づいて経路を決定する車両に相当する。

STを用いる車両は、道路網の全ブロックの車両密度を車載機を通じて知ることができ、各経路の予想通過時間を現在の車両密度に基づいて計算するものと仮定する。経路の再検索は、交差点を通過するたびにを行うものとする。

●経路情報共有 (RIS)

経路情報共有 (Route Information Sharing: RIS と略記)とは、地図情報と現在の混雑情報に加えて、RISを用いる車両群が選択した移動計画の集積的な情報をも利用する。

STとRISの違いは、RIS戦略では、経路情報サーバに集約されたRIS利用ユーザーの移動計画、すなわちRIS利用ユーザーの出発地点から目的地点までの経路情報を集約した情報を利用可能な点である。

RISを用いる車両は、最初に出発地点(現在地点)から目的地点までの最短時間経路を探索し、その移動計画を経路情報サーバに通知する。

経路情報サーバでは、RIS車両からの移動計画を集約し、各経路の通過確信度を算出する。通過確信度はドライバがこれからその経路を通過する期待度を表しており、これが高ければ高いほど、その経路を確実に通過することを意味する。具体的には、車両*j*の経路*i*に対する通過確信度を、以下のように計算する。

ある移動計画が現在地点から目的地点までの間に*p*個の経路を含んでいる場合、出発地点から目的地点までの各経路に1から1/*p*を割り当てる。このような各車両の通過確信度をRISを用いる全車両に関して総和をとり、総通過確信度 (Total Passage Assurance: TPA) を計算する (図1)。

RISを用いる車両は、経路情報サーバより全経路の総通過確信度の情報を取得し、その情報をもとに現在地点から目的地点までの期待混雑度が最小となる経路を探索する。この検索方法によって、1) 現在の混雑状況だけではなく、近未来の混雑の予測情報が利用可能となる、2) 移動計画を共有することによりRIS利用ユーザー間で移動経路という資源を譲り合い、車両群の移動経路が分散さ

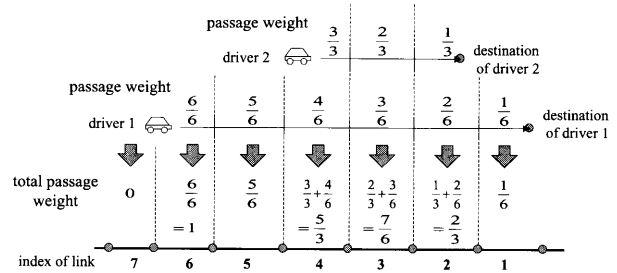


図1 各リンクの総通過確信度の算出

Radial and Ring, N=35.

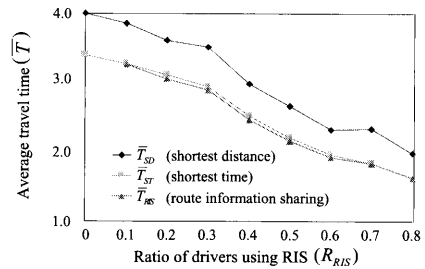


図2 放射環状網におけるシミュレーション結果

Lattice, N=45.

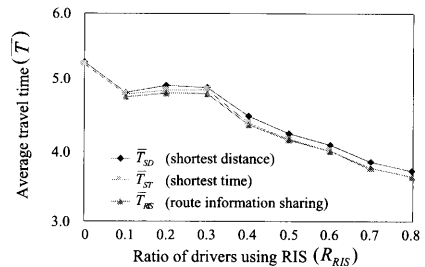


図3 格子状網におけるシミュレーション結果

れる、という二つの効果が期待でき、2・1節で述べた従来方法の問題点(「車両間の非連携の問題」,「提示情報の時間遅れの問題」)の改善となっている。

2・4 シミュレーションによる検証

本節では、1) SD, ST, RISの三つの経路探索方法をとる車両の比率の変化、2) 道路網の構造の違い、に着目したシミュレーション結果について述べ、2・2節で述べた「利用者のインセンティブ」,「システムの安定性」が満たされるかどうかを検証する(詳細は[Yamashita 04a, Yamashita 04b, 山下 04c])。

道路網の構造の影響を考慮して、放射環状網(ノード数32, 結果は図2)と格子状網(ノード数36, 結果は図3)の2種類の道路網に対する結果を示す。このシミュレーションでは、最短距離経路SDを使用する車両の割合を20%に固定している。グラフの横軸は経路情報共有RISを利用する車両の割合を表しており、グラフの左端ではSD=20%, ST=80%, RIS=0%, 右端ではSD=20%, ST=0%, RIS=80%である。またグラフの縦軸は、各経路探索方法を採用した車両の平均移動

時間を表している。

これらのグラフを見てわかるとおり、RIS を利用するユーザの利便性は ST と同程度かわずかにそれを上回る。と同時に、RIS 利用ユーザの数が増大するにつれ、SD, ST, RIS すべてのユーザの移動時間が短縮することがわかる。すなわち 2・2 節で述べた「利用者のインセンティブ」、「システムの安定性」の両方の条件が満たされていることがわかる。

3. デマンドバス

一定の路線の決められた停留所で乗客を乗降させる通常の固定路線バスに対し、乗客の要望に応じて乗降場所を自由に変更できる運営形態のバスをデマンドバスと呼ぶ。人口が比較的少なく市域が平面的に広がる地域では、固定路線バスの場合、採算性の面から路線数や運用台数を十分に増やすことができず、利便性の確保が難しい。その結果、利用者がさらに減少して採算性が悪化するという悪循環が生じやすい。このような状況に歯止めをかけるため、少ない運用台数で利便性を確保できるデマンドバスの運用を検討する自治体が増えてきている。

本稿では、シミュレーションにより都市規模や運用台数とバス運行の方式の関係を明らかにすることを目的とする。

3.1 問題設定

本稿では利便性と採算性を以下のように定義する。

●利便性

出発地から目的地まで乗換えなしで到達する場合の、要求発生時間から達成時間までの平均時間。ただし、路線バスとデマンドバスでの要求発生時間の条件をそろえるために、路線バスではバスが来る時刻に合わせて行動するのではなく、移動を開始したいと考えた時点（要求が発生した時点）で最寄りのバス停まで歩き、来たバスに乗るものとする。また、デマンドバスの場合には、要求が発生した時点でバス会社に配車を依頼するものとする。

採算性については以下のように考える。バス運行の採算性には、車体の維持費、燃料費、人件費と運賃収入などが絡む。さらに運賃収入にからむ運賃設定に関しては、それにより利用者が増減するなどの二次要因が生じるため扱うことが難しい。そこで問題を収入と支出の割合に単純化し、収入は単位時間における総乗客数（総デマンド数）、支出はバス台数に比例するものとする。よって、採算性は以下のように数量化されると考える。

●採算性

単位時間におけるバス 1 台当たりのデマンド処理数

さらにここでは、デマンドバスと路線バスの相対的な優劣のみに着目することとする。具体的には、さまざまな運行条件に対して同じ採算性を保った場合に、デマンドバ

スと路線バスでどちらが利便性に優れているかという点に注目して評価を行う。

3.2 シミュレーション実験

シミュレーションの条件は以下のとおりである。

- 都市は格子状 (11 × 11)。
- バスは一定速度 (バスと徒歩の速度比は 1 : 8) で運行。
- デマンドの発生点 (出発点) および目的点は、一様にランダムに決定される。
- 目的地までバスを利用するよりも歩いていったほうが早い場合、バスは利用しない。この場合、デマンドは拒否されたときみなされ、利便性の評価の際には、徒歩による時間がデマンド達成時間として用いられる。

利便性を求める際には、固定路線・デマンドバスの両方式の上記条件下での最適な運行方法を求める必要がある。実験ではこの最適運行の近似解法として、固定路線については遺伝的アルゴリズムを、デマンドバス方式についてはオークション方式の一種である逐次最適挿入法を用いる (図 4)。各バスは、経由地点のリスト (経由地点リスト) として配分されたデマンドを保持している。デマンドの達成予定時刻および遅延時間は、このリストの順番で各経由地点を回ると仮定して計算されるものとする。新たにデマンドが発生した際、各バスは、そのデマンドを受け入れた場合に生じる総遅延時間を求め、そのデマンドの受入れコストとする。すべてのバスについて上記の受入れコストを求め、最もコストが小さくなるバスにそのデマンドを配分する。

図 5 は、バス台数を 3 台に固定した場合に、単位時間当たりのデマンドの発生件数を変化させた場合の、各デマンドの平均達成時間を示している。固定路線の場合、バスが満員でない限り平均達成時間はデマンドの発生件

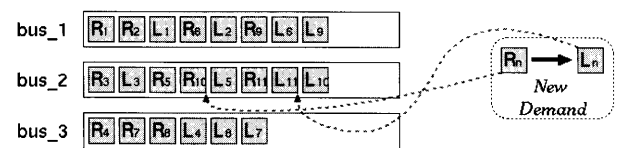


図 4 逐次最適挿入法

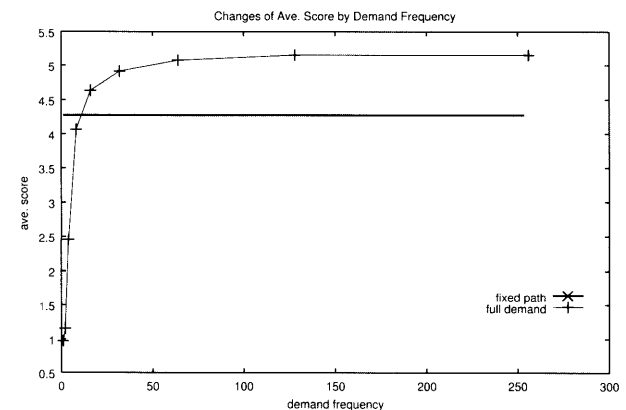


図 5 デマンド当たりの平均達成時間の変化

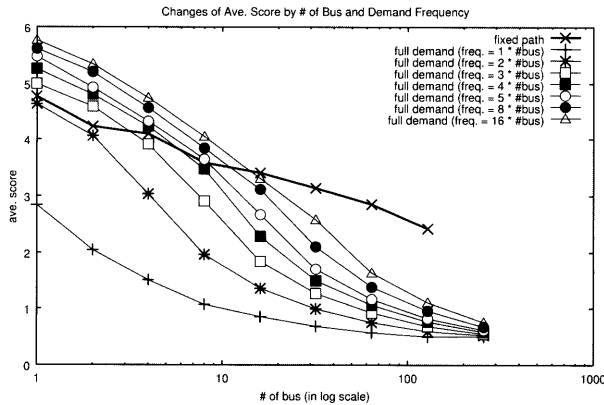


図6 デマンド頻度-バス台数比率を一定に保った場合のデマンド当たりの平均達成時間の変化 (対数表示)

数には関係ないので、おのおの横一直線となる。一方、フルデマンドの場合は、デマンドの発生件数が多くなるに従い、利便性 (= デマンド達成時間の逆数) が急速に悪化し、5 を越えたあたりで飽和する。すなわち、デマンドバスの利便性は、バスが空いている場合に限られることがわかる。

図6は、採算性を一定に保つ (単位時間当たりのデマンド発生件数とバス台数の比率を固定した) 場合の、デマンド発生件数に対する平均デマンド達成時間の変化である。

デマンドバスに関しては異なる採算性 (デマンド頻度とバス台数の比率) 別にその利便性がプロットされている。固定路線の場合、採算性の違いによって利便性に差は生じないため、一つのプロットとなっている。ただし、固定路線においてバス台数を増やす場合、路線当たりのバス台数を増やすのではなく、路線の数を増やす形で総バス台数を増やしている。図から、固定路線、フルデマンドともに、デマンド発生件数 (およびバス台数) が増加するに従い、利便性が改善されることがわかる。しかし、改善の速度には違いがあり、フルデマンドのほうが早く改善され、十分多くのデマンドがあれば、フルデマンドのほうが固定路線よりも利便性が良くなることがわかる。

以上をまとめると、以下がわかる。バス台数を固定した場合、デマンド頻度が増えるに従い、フルデマンド方式では利便性 (平均デマンド達成時間)、デマンド拒否率ともに急速に悪化する (図5)。すなわち、「規模を大きくして客が増えれば採算がとれる」単純な図式は成り立たないことがわかる。

一方、デマンド頻度とバス台数を一定比率で比例させた場合、デマンド頻度が高くなるに従い、固定路線方式に比べフルデマンド方式のほうが急速に利便性を改善できる (図6)。ただ、デマンド頻度とバス台数の比率 (1 台、単位時間当たりのデマンド数) を大きく取るほど、固定路線方式と利便性が逆転する点は大きくなる (デマンド頻度が高くなる)。よって、運行規模が大きくなるに従いフルデマンド方式のほうが固定路線方式よりも高い

利便性を確保できるが、採算を重視 (バス当たりのデマンド頻度を大きく) すると、より大きな規模を必要とすることがわかる。この結果は、今後バスの需要のより多い地域におけるフルデマンドバスシステムの適用に重要な要素となると考えられる。

4. 道路ネットワーク構造とナビゲーションシステムの有効性の関係について

スケールフリーネットワークの研究で、ランダムネットワークに近いとされた道路ネットワークであるが、その中にも差異があるのではないのだろうか。たとえリンク数の分布だとほぼ同じ形状の道路ネットワークでも、構造の違いにより、前章までに述べたナビゲーションアルゴリズムの有効性に差が現れると思われる。本章では、そのようなナビゲーションアルゴリズムの有効性の違いをもたらすネットワーク構造の違いを、適切に表現できる指標の提唱を行う [和泉 04]。

4.1 VEBC 指標

上記のような道路網の構造の特徴を捉えるためには、リンク数の分布ではなく道路網全体でのボトルネックのようすを表さなければならない。そのヒントとなる概念が、人間どうしの社会関係ネットワーク研究で用いられてきた辺間隔度 (edge-betweenness) である [堤 04]。もともと Freeman が提唱し [Freeman 77]、その後社会ネットワーク分析の分野で用いられてきた [安田 01]。ある辺の間隔度とは、有向グラフ上のある二つの頂点の組合せにおいて、片方を始点としもう片方を終点とした最短経路でその辺が使われた回数である [Newman 01, 堤 04]。辺中心間隔度 (edge-betweenness centrality) とは、ある辺について、さきほどの間隔度を有向グラフ上のすべての二つの頂点の組合せについて足し合わせたものである。

社会ネットワーク分析の分野では、この指標によってコミュニティ全体で人間同士のつながりをよく媒介しているキーパーソンを探すのに使っている。しかし、ネットワーク上での流れということに着目すれば、辺中心間隔度は一種のボトルネックを表しているといえよう。そこで、グラフ上のすべての辺について辺中心間隔度を計算して頻度分布を求め、その分布がどのような形状をもっているかによって、そのグラフが潜在的にどれくらいのボトルネックをもっているか表せないだろうか。以上のアイデアより、我々は辺中心間隔度分散 (VEBC: Variance of Edge-Betweenness Centrality) 指標というものを考えている。

VEBC 指標の計算の仕方は次のとおりである。 $D = (N; A)$ を有向グラフとする。ただし、 N は頂点集合、 A は有向辺の集合である。

1. N から一つの頂点 v_i を選び始点とする。
2. N から一つの頂点 $v_j (\neq v_i)$ を選び終点とする。

3. v_i から v_j までのすべての最短経路を求め、最短経路で使われた辺の回数をカウントする。
4. 1 ~ 3 をすべての N のすべての 2 点の組合せに関して行う。
5. 最短経路に何回使われた辺が何個あったかの頻度分布を描き、その分布の分散を求める。

これが有効グラフ D に関する **VEBC** 指標である。最後の分布の形状が、ネットワークの潜在的なボトルネックに関する特徴を表している。とりあえず、分散を **VEBC** 指標としてみた。VEBC 指標が大きいくほど、道路の媒介性の偏りが大きいのでボトルネックとなる辺が出やすく、小さいほど出にくいと考えている。

4.2 VEBC 指標の発展

ネットワークが大きくなるにつれて **VEBC** 指標がどのように変化するかを、図 7 の 3 種類のネットワークについて調べてみた。

格子状のネットワークは辺の長さがすべて 1 であり、ネットワークの大きさ N は一辺の格子の数である。放射環状のネットワークは一番内側が 1 辺の長さが 1 の正八角形であり、そこから放射状に長さ 1 の辺でより大きな正八角形につながっている。ネットワークの大きさ N は八角形が何重になっているかを示す。最後に樹状のネットワークは、分岐数が 3 で辺の長さが 1 である。ネットワークの大きさ N は分岐の深さを示す。

ネットワークの大きさを $N = 1 \sim 5$ まで変化させたときの、**VEBC** 指標の変化を図 8 ~ 図 10 に示す。ただし、各頻度分布のグラフの横軸は、平均の使用回数で割って正規化しており、縦軸の頻度は % で表されている。まず、格子状ネットワークの場合 (図 8) は、ネットワークが大きくなっても、横軸が平均の 1.0 から近い 0.7 から 1.7 の範囲におさまっていることがわかる。次に放射環状の場合 (図 9) は、一番使用回数が多い辺は、平均 3 倍以上になり、しかもネットワークが大きくなるにつれて分布の範囲

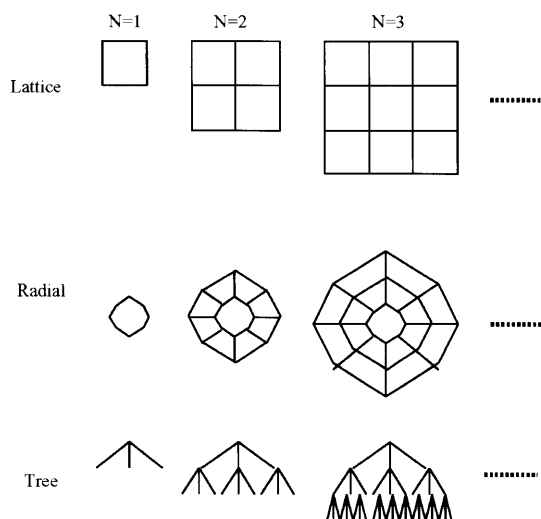


図 7 対象となる 3 種類のネットワーク

格子状

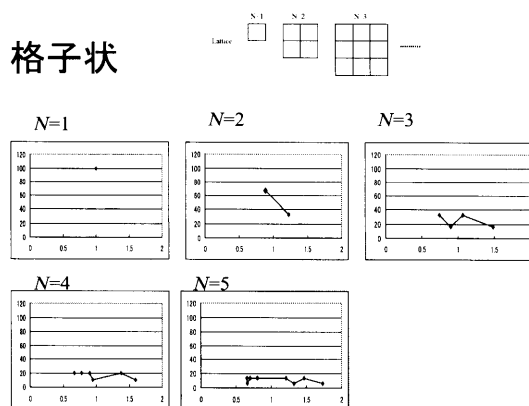


図 8 格子状の場合

放射環状

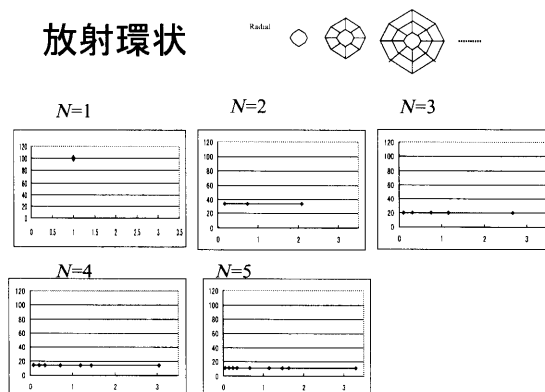


図 9 放射環状の場合

樹形

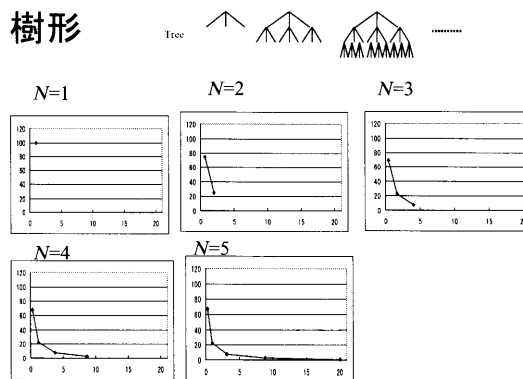


図 10 樹形の場合

が広がり、使用回数が多いものと少ないものの差が広がっていった。最後に、樹状の場合 (図 10) は指数分布のような形になっており、使用回数の偏りが非常に大きいことがわかる。ネットワークが大きくなるにつれて、分布の範囲も広がっていった。以上の結果は、先ほどの分布の分散 (**VEBC** 指標) の変化を示したグラフ (図 11) にもよく表れている。特に格子状と放射環状の違いに着目すれば、前節でのナビゲーションアルゴリズムの有効性の違いも、**VEBC** 指標の差に現れているのではないだろうか。

VEBC指標の変化

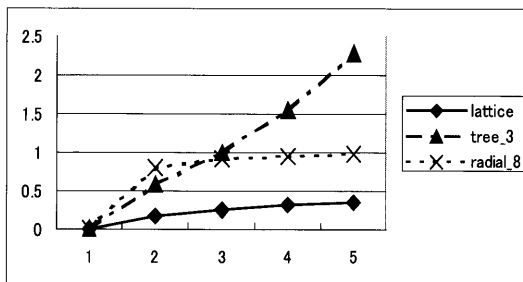


図 11 VEBC 指標の発展

5. 道路建設のネットワーク分析

スモールワールド、スケールフリーといったグラフ構造に関するこれまでの研究では、スケールフリーネットワークは、ネットワークの成長とエッジの優先選択という二つの要因によって現れることが明らかにされている [Barabási 02]. ノードの次数に比例した確率で新たなエッジが張られるという優先選択を行うとき、得られたネットワークはスケールフリーとなっている。ほかにも、しきい値モデル、遺伝子複製モデル、最近隣接続法など、スケールフリーネットワークの生成を説明するモデルが提案されている [林 04].

しかし、道路網や人のネットワークでは、多数のエージェントの意思によってネットワークが成長する。本章では、ネットワークにおけるノードが、簡単な基準に従って投票行動を行うエージェントであると考え、各エージェントの投票行動によって新しくつくられるエッジが決まるといったネットワークの成長モデルを提案する。エージェントの合理性の基準を、ネットワークの中心性によって設定し、異なる中心性の定義によりどのようにネットワークの成長が異なるのかを概観する。

5.1 シミュレーションモデル

社会学におけるネットワーク分析の分野では、1940年代にネットワークの中心性の概念が最初に用いられて以来、多くの中心性の指標が提案されてきた。何らかの組織やグループがあるとき、中心的な存在、他者に影響を与え得る存在を、ネットワーク的な視点から捉えようというのがネットワークの中心性の分析である。どういう視点から中心的な行為者を捉えるかによって、さまざまな指標が存在する [安田 01].

本研究では、以下の中心性の指標を対象として扱うことにする。

- (i) **Degree:** ノードの次数。
- (ii) **Closeness:** あるノードから他のすべてのノードに到達する最短距離の平均。
- (iii) **Betweenness:** あるノードが他の2点の最短パスに含まれる割合。

(iv) **PageRank:** エッジの関係にあるノードの中心性の値を加味した中心性の値。ネットワーク分析の分野で Bonacich の中心性もしくは固有ベクトル中心性として知られているものとほぼ同じ指標である。

シミュレーションアルゴリズムの概要は以下のとおりである。各ノードは評価尺度に基づいて投票を行い、結果として最も得点の高いノード間に1本のエッジが建設される。これを反復することでネットワークが成長していく。エージェントの評価尺度として、上記の四つの中心性の指標を用いる。

5.2 シミュレーション結果

§ 1 Closeness を用いた場合

まず、Closeness を用いた場合であるが、図 12 がネットワークの生成の様子である。ノード数 $n = 100$ 、エッジ候補数 $k = 200$ であり、エッジが 10 本生成されるごとのスナップショットを示している。なお、図示には自動描画アルゴリズムを用いているので、ノードの絶対的な位置は意味をもたない。

最初はエッジがない状態から、小さいクラスタがいくつか生成され、その後一つの大きなクラスタにまとまる。その後は徐々にネットワークが複雑になってくる。中心には多くのエッジをもつハブが出現しているようすがわかる。周辺部はこのハブのいずれかに接続している。

Closeness を用いた場合には、各ノードは自分とほかのノードとの距離が縮まるようなエッジの建設に賛成する。特に、各ノードがハブにつながれることがほかのノードの Closeness を下げるためにも良いことなので、結果として一つもしくは少数のノードにエッジが集中する状態を生むと考えられる。

現実の例で考えてみると、例えば、航空路線では東京や大阪などごく少数の空港がハブとして機能しているが、これは各地域がほかの地域への到達しやすさを追求した結果、結局ハブ空港へつながることが closeness という点では全体にとって有益であり、そのためにハブ空港が現れたと考えることもできる。また、このようなハブの構造は、企業のサプライチェーンネットワークでも見られるが、各企業が取引の効率性を追求した結果、一部の企業に依存し、それらがハブとなっていると捉えることもできる。

§ 2 Betweenness を用いた場合

Betweenness を用いると、ネットワークは図 13 のように成長する。これは、Watts の用語でいうところの、 C も L も大きいレギュラーグラフに相当する。個々のエージェントが Betweenness を上げるためには、結果的に L が大きいグラフをつくれば最短パス自体が長くなり、最短パスに含まれる割合である Betweenness が上がるという仕組みでこのネットワークが出現すると考えられる。したがって、各エージェントが間に入ろうとした結果、全体として L の大きな非効率なネットワークが生まれたことに

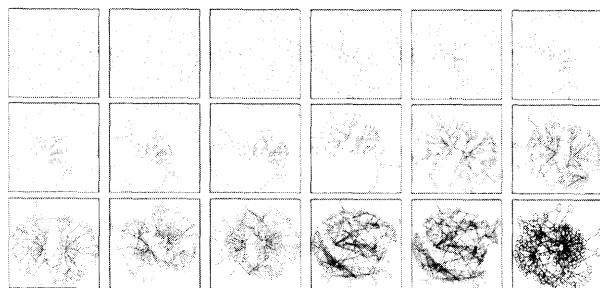


図12 Closeness を用いた場合のネットワークの生成のようす。
 $n = 100, k = 200$. 180 エッジまで張った場合

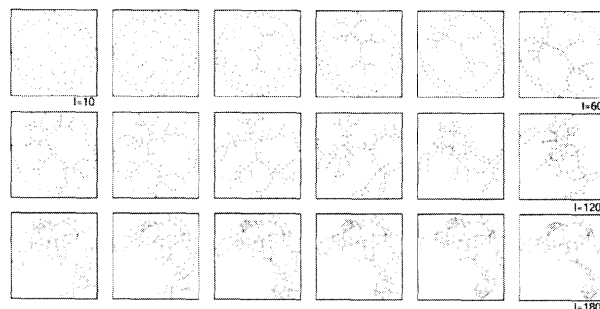


図13 Betweenness を用いた場合のネットワークの生成のようす。
 $n = 10, k = 200$. 180 エッジまで張った場合

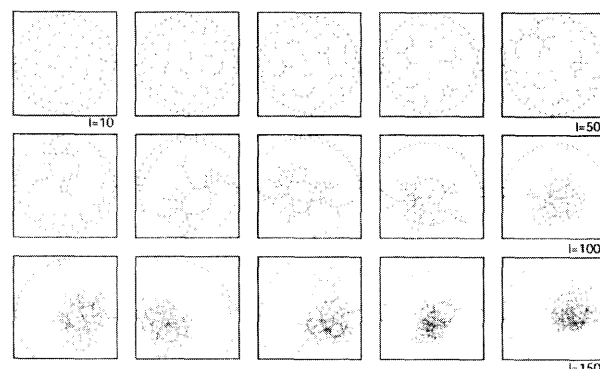


図14 Degree を用いた場合のネットワークの生成のようす。
 $n = 100, k = 200$

なる。

§ 3 Degree を用いた場合

中心性として Degree を用いた場合、図 4 に示すようなランダムグラフに近いグラフが得られる。どこにエッジを設置してもその両端のノードしか中心性の向上に寄与しないので、ランダムに張られることになる。

§ 4 PageRank を用いた場合

中心性として PageRank を用いた場合、図 15 のようにリンクの張られたクラスタ内でエッジが張られるネットワークが得られる。ほぼ完全グラフになったクラスタと孤立ノードから構成される。孤立ノードを除外しつつ、クラスタ内で中心性を高めあっている状態である。

本章では、各ノードを合理的なエージェントと考え、中心性が上がるならエッジの建設に賛成し（良い評価点を与え）、そうでなければ反対するというポリシーのもとでネットワークの成長の様子を俯瞰した。中心性の指標

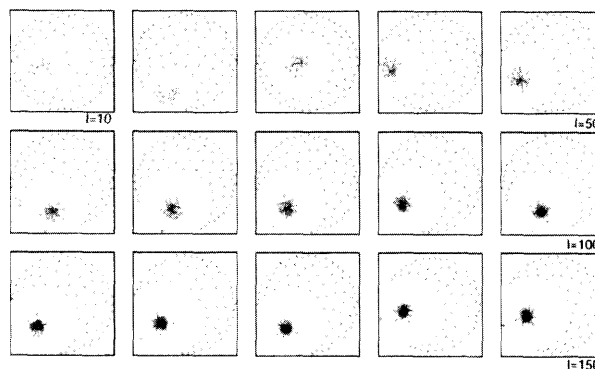


図15 PageRank を用いた場合のネットワークの生成のようす。
 $n = 100, k = 200$

として、Degree, Closeness, Betweenness, PageRank のどれを用いるかで、ネットワークの成長のようすは大きく異なり示唆に富んだ結果となっている。これらのネットワークの構造的特徴の比較や、道路建設における有効性を検討することは今後の課題である。

6. おわりに

本稿では、道路交通ネットワークを例にとり、1) エージェント（ドライバ、乗客、市民）のネットワーク、2) 道路網そのもののネットワークという視点から、最新の研究成果を紹介した。従来の OR, ITS などのアプローチでは、ともすれば伝統的なランダムモデルに基づく解析・予測ですべてが語られがちであるが、我々はそれに加え道路交通システムのネットワーク構造の特性に今後のさまざまな発展の可能性があると考えている。

例えば、2 章、3 章で述べた資源割当のアルゴリズムの運用時に、4 章、5 章で述べた道路網のネットワーク属性に応じたアルゴリズムを選択したり、適切なパラメータ設定を行うなどの発展可能性が考えられる。

◇ 参考文献 ◇

[Barabási 02] Barabási, A.-L., 青木 薫 訳: 新ネットワーク思考, NHK 出版 (2002)

[Freeman 77] Freeman, L. C.: A set of measures of centrality based on betweenness, *Sociometry*, Vol. 40, No. 1, pp. 35-41 (1977)

[和泉 04] 和泉 潔, 山下倫央, 車谷浩一: 道路ネットワーク構造とナビゲーションシステムの有効性の関係について, 情報処理学会研究報告 2004-ICS-136, pp. 31-38 (2004)

[林 04] 林 幸雄, 宮崎敏幸: SF ネットワークモデルの特徴比較, 情報処理学会研究報告, 第 2004-ICS-136 巻, pp. 9-16 (2004)

[Kawamura 04] Kawamura, H., Kurumatani, K. and Ohuchi, A.: Modeling of Theme Park Problem with Multiagent for Mass User Support, *Multi-Agent for Mass User Support, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, 3012, pp. 48-69, Springer (2004)

[Klugl 03] Klugl, F., Bazzan, A. L. C. and Wahle, J.: Selection of information types based on personal utility: a testbed for traffic information markets, *Proc. 2nd Int. Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 377-384 (2003)

- [Kurumatani 04] Kurumatani, K.: Mass User Support by Social Coordination among Citizens in a Real Environment, Multi-Agent for Mass User Support, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 3012, pp. 1-17, Springer (2004)
- [Mahmassani 91] Mahmassani, H. S. and Jayakrishnan, R.: System performance and user response under real-time information in a congested traffic corridor, *Transportation Research*, Vol. 25A, No. 5, pp. 293-307 (1991)
- [Newman 01] Newman, M.: Scientific collaboration networks. II. shortest paths, weighted networks, and centrality, *Phys. Rev. E*, Vol. 64, pp. 016132-1-016132-7 (2001)
- [Shiose 01] Shiose, T., Onitsuka, T. and Taura, T.: Effective information provision for relieving traffic congestion, *Proc. 4th Int. Conference on Intelligence and Multimedia Applications*, pp. 138-142 (2001)
- [Suzuki 03] Suzuki, R. and Arita T.: Effects of information sharing on collective behaviors in competitive populations, *Proc. 8th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics*, pp. 36-39 (2003)
- [Tanahashi 02] Tanahashi, I., Kitaoka, H., Baba, M., H. Mori, H., Terada, S. and Teramoto, E.: NETSTREAM, a Traffic Simulator for Large-scale Road Networks, *R & D Review of Toyota CRDL*, Vol. 37, No. 2, pp. 47-53 (2002) (in Japanese)
- [堤 04] 堤 秀忠, 正代隆義: 密な部分グラフ構造を発見するための指標とそれを計算する効率の良い並列アルゴリズム, 情報処理学会九州支部火の国情報シンポジウム 2004 (2004)
- [VICS] <http://www.vics.or.jp>
- [Yamashita 04a] Yamashita, T., Izumi, K., Kurumatani, K.: Car navigation with route information sharing for improvement of traffic efficiency, *Proc. 7th Annual IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Washington, D.C., U.S.A., pp. 465-470 (2004.10)
- [Yamashita 04b] Yamashita, T., Izumi, K. and Kurumatani, K.: Investigation of reduction of traffic congestion with route information sharing, *Proc. 3rd Int. Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 04)*, pp. 1446-1447, New York, U.S.A (2004.7)
- [山下 04c] 山下倫央, 和泉 潔, 車谷浩一: 交通流における経路情報の共有に基づいた経路選択の効果の検証. IPSJ SIG-ICS, 知能と複雑系研究会, pp. 71-76 (2004. 3)
- [安田 01] 安田 雪: 実践ネットワーク分析, 新曜社 (2001)
- [Yoshii 96] Yoshii, T., Akahane, H. and Kuwahara, M.: Impacts of the accuracy of traffic information in dynamic route guidance systems, *Proc. 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems (CD-ROM)* (1996)

2005年2月27日 受理

著者紹介



車谷 浩一 (正会員)

1989年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。工学博士。同年、電子技術総合研究所入所。1996～97年スイス連邦工科大学ローザンヌ校客員研究員。2001年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センターマルチエージェントチーム長。2004年情報技術研究部門マルチエージェントグループ長。マルチエージェント、ユビキタスコンピューティング、複雑系ネットワーク、社会シミュレーションなどに興味をもつ。情報処理学会, AAAI 各会員。



山下 倫央 (正会員)

2002年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2002～03年ブルッキングス研究所客員研究員。2003年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター入所。2004年情報技術研究部門勤務。ゲーム理論, 社会シミュレーション, ユビキタスコンピューティング, マルチエージェントなどに興味をもつ。計測自動制御学会会員。

野田 五十樹 (正会員) は, 前掲 (Vol. 20, No. 1, p. 58) 参照。



和泉 潔 (正会員)

1998年東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了。博士(学術)。同年、電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター研究員。2004年、情報技術研究部門研究員。人工市場, マルチエージェント, 社会ネットワーク, 社会シミュレーションなどに興味をもつ。

松尾 豊 (正会員) は, 前掲 (Vol. 20, No. 1, p. 123) 参照。