

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560161

研究課題名(和文)被災道路網における最適経路の動的選択のための新しい数学モデル:AB-DEモデル

研究課題名(英文)A Mathematical Model for Selecting the Optimal Efficient Route for Delivering Aid Materials: AB-DE Model

研究代表者

重野 芳人(Shigeno, Yoshihito)

東北大学・高度教養教育・学生支援機構・名誉教授

研究者番号：70108570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災後では、被害地までの道路が被災するために支援物資の配送が困難になった。本研究ではAgent-Based Model (ABM)を使用し、交通渋滞を避けながら支援物資配送の最適経路を求める数式モデルを作成した。また、ガソリンスタンドでの車両の燃料供給と一次集積所における混乱が配送の遅れに拍車をかけたことは記憶に新しい。そのため、ガソリンスタンドや一次集積所での遅れに待ち行列を適用し、交通渋滞を避けながら支援物資配送の最適経路を求める数式モデルを作成した。更に、南海トラフ地震で四国高知県が津波で被災した場合を想定し、車による支援物資の配送のための例を示した。

研究成果の概要(英文)：After the severe disaster like the Great East Japan Disaster, delivering the aid materials becomes difficult due to the roads being devastated. In this study, a mathematical model for selecting the optimal efficient route for delivering aid materials is made based on the Agent-Based Model (ABM). Additionally, delivering the aid materials became difficult due to the shortage of car fuel and confusion at the stockyard. In this study, a mathematical model for selecting the optimal efficient route for delivering the aid materials using the queue to consider the delay is made. The example is shown that delivering the aid materials by cars to Kochi Prefecture in Shikoku, which is postulated to be damaged severely by the Nankai Trough Earthquake.

研究分野：数理社会科学

キーワード：Agent-Based Model, Discrete Event Model, 支援物資供給, 南海トラフ地震, 被災道路, 待ち行列, 2  
次被害, 大規模災害

## 1. 研究開始当初の背景

被災直後における被災者への医薬品や食料等の迅速な配送は被災者の生死にも関わる重要な問題であることは言うまでもない。筆者はSDM (System Dynamics Model) を使用して被災した直後に支援物資の配送量は半減するが、迂回経路を見つけることにより、配送が急速に回復することを示した。このようにSDMはマクロ的視点からサプライチェーンの回復を定量的に示すことは可能である。しかし、救助計画に必要な個々の被災者への配送や配送経路を個別に示すことはできない。そのために、地理的位置関係や渋滞等のミクロ的要因を考慮したモデルにより、経路を決定する必要がある、その基礎となる数学モデルの開発は喫緊の課題であった。

本研究では主に個々の車両の行動を表すABM (Agent-Based model) と渋滞等による待ち行列を表すDEM (Discrete Event model) を結合した数学モデルAB-DEMの開発を目指した。

## 2. 研究の目的

東日本大震災に見られるような大規模災害の場合、道路の寸断→ガソリン供給の遮断→緊急に必要な物品や人員の供給の停滞が連鎖的に生じたため、迅速な物資・人員の配送ができず、被害の一層の拡大を招いた。そこで、当該研究者はこれまでSDM (System Dynamics Model) を利用した数学モデルにより、緊急かつ効率的に被災地に物資を配送するためのシミュレーションを実施してきた。しかし、大地震の際には、目的地までの多くの道路が被災するため、道路網の大部分が通行できなくなる。そのような場合においても、迂回路を自動的に選択し、更に目的地まで最も効率的に物資や人員等の配送を計画・実施する必要がある。このような問題はSDMでは扱うことは困難であり、個々の被災者と車両の位置情報及び道路網破壊による配送の停滞を加味した新しい数学モデルの創製が必要である。

## 3. 研究の方法

1. ABMにより迷路中で複数の最適な経路を決定するアルゴリズムの開発

迷路作成はクラスタリングアルゴリズムを使用し、経路の検索にはトレモー・アルゴリズムまたはオーア・アルゴリズムを採用した。最初は経路幅を一定とするが、順次経路幅を部分的に変化させ、細い経路での渋滞が起こった場合、配送効率を維持するため、他の経路を順次検索した。

2. 渋滞発生メカニズムの解明とその迷路への適用

ABMは同士あるいはエージェントと壁との相互作用条件を設定することにより、自動的に“詰まり”(渋滞)の状況を作り出した。この結果、中心に近い部分でボトルネックを通る時のAgentが詰まっていることがわかり、本解析結果を迷路に適用した。

以上の基礎研究に基づき以下の研究を実行した。

1. 個々のエージェント(車両)が複数の配送経路を選択するABMの作成
2. エージェント(車両)の渋滞問題の考察
3. 需要に合わせたサプライチェーン構築のためのDEMの作成
4. ABMとDEMを結合したAB-DEMの作成
5. 4のモデルの実際問題への適用

また、道路ネットワークへの適用例として、四国の道路網で、以下の研究を実施した。

1. GISデータに基づく道路網の作成
2. 上記道路網へのAB-DEMの適用
3. 通行不能箇所を組み込んだGIS道路網へのAB-DEMの適用

## 4. 研究成果

### 1) はじめに

東日本大震災の直後は東北地方は道路ネットワークが被災したために、支援物資を被災地に効率的に届けることができず、2次災害を招いたことは記憶に新しい。主たる原因は次の4つに分類される

1. 一次集積所での仕分けに人手が足りず現場に届けるのに時間がかかった。
2. 緊急支援物資が現場に於ける需要にマッチしなかった。
3. 太平洋沿岸にある石油精製施設が津波の被害に遭い、燃料不足に陥った。
4. 道路網が被災し、迂回路に車両が集中した。

このように多くの要因が重なり、そのために長い時間の遅れが発生した。

また阪神淡路大震災の時には、がれきによる道路封鎖や被災地内への救援物資の搬送車両の侵入困難といった理由が挙げられている<sup>1)</sup>。この中でも特に震災後の共通な問題として4の被災道路による問題がある。

本研究では被災道路の渋滞に関する数学モデルを提案し<sup>2)</sup>、適用例として、近い将来発生の可能性が高い「南海トラフ地震」を想定し、支援物資の配送が困難になると予想される四国の太平洋沿岸へ如何に効率的に配送するかを調べるモデルを作成した。

特に高知県は本州からの支援物資を四国連絡橋を経て輸送する必要があり、また、四国は中心部に山脈が通っているために、高知県への連絡路が少なく、これが被災した場合、周りの太平洋沿岸の迂回路を通らざるを得ない。そのために大きな交通渋滞が予想される。

これらを扱うモデルは大学等ではかなり研究されてきているが、まだ基礎研究段階であり、専門家以外はプログラムの取り扱いが困難である。本研究では世界で広く利用されている汎用ソフト AnyLogic<sup>®(6)</sup> を使用して、そ

の有用性を確認した。特にこのソフトでは渋滞と待ち行列を同時に扱うことが出来るという特徴がある。

4つの原因の内でも、1と3の遅れは「待ち行列」により評価される。本研究では待ち行列を内包する被災道路の渋滞に関する数学モデルを提案した<sup>2)</sup>。この中で、一次集積所の時間遅れは領域型待ち行列を、また給油所に於ける時間遅れには線形の待ち行列をそれぞれ適用した。前者は通常の列を作って待つ待ち行列ではなく、広い場所で多くの車や人が集まり、順番を待つタイプの待ち行列で、前から順々に順番が来るのではなく順番はランダムに決まる。後者は列を作る通常の待ち行列である。

このように2つのタイプの待ち行列を状況に応じて、柔軟に使用することが出来、問題への対処が容易である。待ち行列のロジックには Discrete Event Model (DEM) の概念が使用されている。ABM では時間は連続であるが対象は離散的である一方 DEM では時間も対象も離散的である。このように異なった2つのモデルを単一のプログラムで扱うことが可能である。

従来 Agent-Based Model (ABM) を利用した渋滞あるいは Discrete Event Model (DEM) を利用した、待ち行列の研究は多くあるが<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>、それらは基礎研究であり、待ち行列に関しても、専門家以外は使用が難しい。本研究ではこの問題に関しても、AnyLogic<sup>(6)</sup> を使用して、その有用性を確かめた。

## (2) モデル

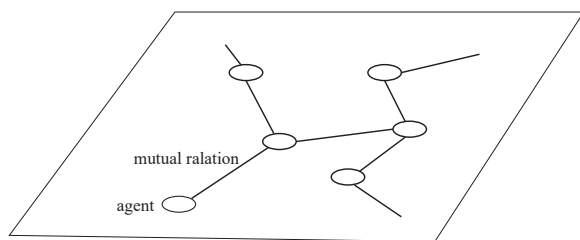


図 1 Agent-Based Model の模式図

図 1 は本研究で使用している Agent-Based Model を模式的に示している。エージェント同士の関係は各 agent で衝突の可能性のある周辺のエージェントのみを考慮し、エージェント同士の中心間の最短距離は本研究の場合は便宜的に直径に等しいとしている。また、エージェント同士あるいは壁との衝突の場合は一定の反発係数で反発する。

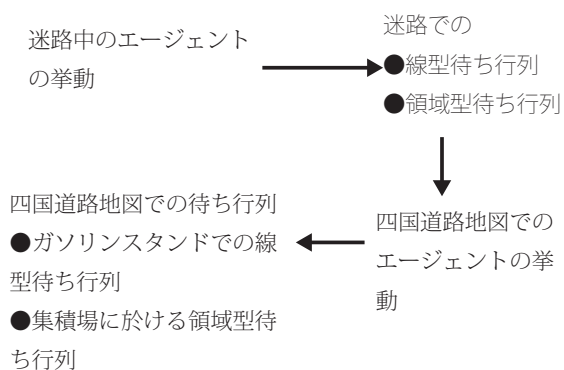


図 2 研究の流れ

研究の流れを図 2 に示した。本研究ではまず 1) 道路ネットワークとして、迷路を使用し、交通渋滞の場合エージェントが迂回できるかを確認し、次に 2) 迷路で一次集積所における領域型待ち行列とガソリンスタンドでの線型待ち行列が適用可能かどうかをチェックした。

更に 3) 地図上の道路でエージェントの動きを調べ、一定以上の密度では迂回すること確認した。最後に 4) 地図上で領域型待ち行列と線型待ち行列を適用し、エージェント(トラック)の挙動を調べた。

図 3 はモデルのフローチャートを示す。操作はそれぞれのアイコンを選択パネルから drag and drop で graph 画面に描く。まず start を決め、次に pedSelect でスタンドで給油する車と素通りする車に分け、その割合を指定する。ここでは前者 0.3 に対して後者 0.7 とした。更に目的地である stockyard と connector で結ぶことにより移動する方向を決める。この gasfilling がスタンドにおける線形型待ち行列を示し、stockyard1 が集積所における領域型待ち行列を示す。

図 4 の迷路に、左上の入り口からエージェントが右下の出口に向かい流れる様子を示す。計算結果は動的画面で示される。エージェントは当初最短距離を選択するが、トラフィック密度が大きくなれば、渋滞が発生するため、他のルートを選択する。

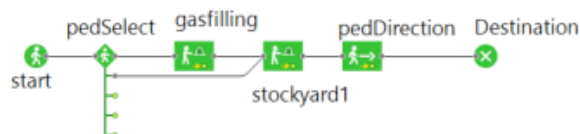


図 3 モデルのフローチャート



図 4 迷路での Agent の最も効率的なルートの選択



図5 高知県が津波被害を受けた場合を想定し、支援物資配送ルートに待ち行列を設定した場合

また道路上行列がはみ出すため車の進行を邪魔し、渋滞の原因となる。

### (3) 四国の道路への適用

近い将来発生が予想される南海トラフ大地震の場合、地震の magnitude は 9.0 であり、発生確率は 30 年以内に 70%、九州から関東に至る太平洋沿岸数百 km に甚大な被害を及ぼすため最悪の場合死者約 300,000 人と予想されている<sup>7)</sup>。もちろん、これらの地域では津波からの避難による人命保護は第一であるが、次に当面の生活のための支援物資を緊急に届けることが二次災害を最小にすることにつながる。

図5は四国の高知県が津波で大きな被害を受け、支援物資をトラックで本州から四国連絡橋を通り高知県まで輸送する場合を想定し、その通行状況を示す。最初は多くのトラックが最短コースの国道32号線を通り高知県まで達するが、次第に交通渋滞のために沿岸の国道

56号線を通ることになる。しかしこの道も津波の被害を受け障害が多いために更に国道56号線からの輸送に変わってゆくことをこの図は示している。

更にこの図は待ち行列の影響を調べたもので北側の待ち行列はスタンドで給油を待つ車の列を示しておりこの部分には渋滞が発生していることが分かる。また、南側の便宜的に海の上に四角で示したのは一次集積場における領域型待ち行列であり、四角い領域には車が停滞し、配送に遅れが生じているのが分かる。

## 結論

1. 大災害の被災地に支援物資を配送するには分断され道路網を使用し、効率的に物資を配送する必要がある。東日本大震災の教訓として、ガソリンスタンドでの車両への燃料供給の遅れと一次集積所における支援物資の被災者への分配の混乱がある。本稿では本稿では ABM (Agent-Based Model) を使用することにより、渋滞地点を迂回して配送するモデルを作成し、また燃料供給の遅れや集積所における車両からの荷下ろしの遅れを待ち行列で解析する方法を提案した。さらに四国の高知県が津波被害に遭った場合を想定し、配送を最大化する方法を提案した。

2. 本モデルにより、渋滞を予想し、迂回路の選択と待ち行列の最小化により配送の最大効率を得ることが出来ることを示した。

## 引用文献

- (1) 大規模災害時の物資輸送について 平成 24 年度第 3 回新道路研究会, 2012.12.11
- (2) Y. Shigeno: Dynamic Selection of the Optimal-Efficient Paths for Delivering Aid after a Big Earthquake, Proceeding of the 4th Annual Conference of Japan Association for Human Security Studies, (Sept. 6-7, 2014, 34,
- (3) D. Helbing, et. al.: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations, Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer Berlin, pp. 21-58, 2002
- (4) A. Edrissi et al : A multi-agent optimization formulation of earthquake disaster prevention and management, European Journal of Operational Research, vol. 229, pp.261- 275 , 2013
- (5) J. Yun et al.: A swarm-based dynamic evacuation simulation model under the

background of secondary disasters, Systems Engineering Procedia, vol.5, pp.61 - 67, 2012

(6) <https://ja.wikipedia.org/wiki/AnyLogic>

(7) <http://www.japantimes.co.jp/news/2014/03/28/national/earthquake-action-plan-wins-approval/#.WImR8-Tf3yg>

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

重野芳人、大震災後の支援物資配送のための最適ルートを選択するための数学モデル - 待ち行列を考慮した場合 - 日本物流学会誌、査読無、No.25, 2017

[学会発表] (計 1 件)

Y. Shigeno: Dynamic Selection of the Optimal-Efficient Paths for Delivering Aid after a Big Earthquake, Proceeding of the 4th Annual Conference of Japan Association for Human Security Studies, (Sept. 6-7, 2014, 34)

## 6. 研究組織

研究代表者

重野 芳人 (SHIGENO, YOSHIHITO)

東北大学・高度教養教育・学生支援機構・  
名誉教授

研究者番号 : 70108570