

緊急支援物資輸送（ERL）シミュレーションに関する基礎的検討

熊谷 兼太郎¹・小野 憲司²

¹正会員 京都大学防災研究所 特定准教授（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: kumagai.kentaro.3e@kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学防災研究所 特定教授（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: ono.kenji.5z@kyoto-u.ac.jp

大規模地震等の発生後、緊急支援物資輸送（ERL）は、経済活動・人命維持に重要であり、液体の燃料等の嵩張る物資を輸送する場合、都市間をつなぐ陸上の輸送路が地震により途絶して被災地域が孤立してしまった場合等は港湾利用のERLが求められる。本研究は、港湾利用のERLのシミュレーションに関して、1次輸送のトラック輸送について基礎的検討を行った。その結果、離散型のエージェントとして一般車両とERLを行うトラックとを想定し、かつ、信号の停電している状況を想定したマイクロ交通シミュレーションを提案した。また、高知県高知市中心部を対象に、ERLを行うトラックについて一般車両の交通量を変化させてマイクロ交通シミュレーションにより試算したところ、平均走行速度は約28.4～28.5 km/hとほぼ一定であった。ただし、一般車両の交通量がある程度を超えるとグリッドロック状態の渋滞が発生したためトラックは一次集積所まで到達できない結果となった。

Key Words : Emergency Relief Logistics, Numerical simulation, Earthquake, Maritime transport

1. 序論

大規模地震等の発生後の数日間ないし数か月間、被災地域の復旧のための緊急支援物資輸送（Emergency Relief Logistics, ERL）が行われる。その内容は多様であり、例えば、輸送対象に着目するならば、食料、生活必需品、燃料、医薬品、復旧工事の車両・資器材等の物資が運ばれるだけでなく、復旧作業の労働者等の人も運ばれる。また、輸送方向に着目するならば、地域外から被災地域に物資等を運び込む動きだけでなく、被災地域から地域外へ負傷者等を運び出す動きもある。本稿では、こうした活動のうち、地域外から被災地域へと物資を輸送する活動を検討対象とする。また、特に記載の無い限り、ERLと記した場合にはこの活動を指すものとする。

液体の燃料等の嵩張る物資を輸送する場合や、車両・資器材等の大型の物資を輸送する場合は、海上の輸送路を経由し港湾を利用した物資輸送（港湾利用のERL）が陸上の輸送路のみのERLに比較して有利と考えられる。また、都市間をつなぐ陸上の輸送路が地震により途絶して被災地域が孤立してしまった場合も港湾利用のERLが求められる。

図-1に、被災地域外から港湾を利用して避難所に至る

輸送過程の例を示す。被災地域外から船舶により運ばれてきた物資は、港湾荷役、トラック輸送及び搬入作業を経て県等が運営する一次集積所に集積される。そこから搬出作業、トラック輸送及び搬入作業を経て市町村等が運営する二次集積所に集積されたのち、最終的に避難所へと届く。なお、避難所からのERLの要請が有る場合（プル型）と無い場合（プッシュ型）とがある。

このような港湾利用のERLについて、ボトルネックとなる可能性の高い過程を事前に把握しておく必要がある。

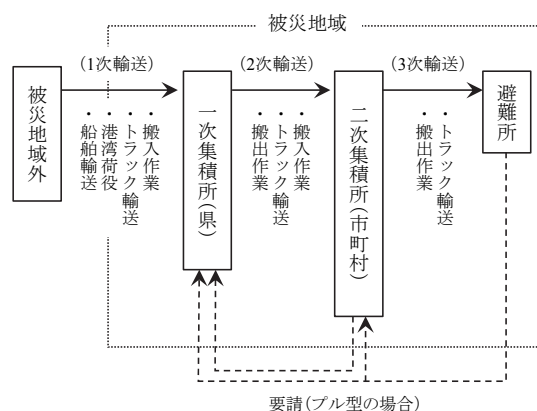


図-1 港湾利用のERLの輸送過程の例

2. 既往の検討

港湾利用のERLのボトルネック把握に関連した既往の主な検討は、以下のとおりである。

花岡 (2013) は、東日本大震災について、国内で報告された論文等の28編のレビューを行っている。その結果、レビューにより収集したERLの個々の課題を、まず、輸送路のノード（集積所及び避難所）において発生したものとリンク（集積所間あるいは集積所と避難所とを結ぶ経路）において発生したものとに分類している。さらに、前者を需要算定、在庫引当、作業管理という3つの小分類に整理し、後者を配車、運行という2つの小分類に整理している¹⁾。定量的な分析ではないものの、ERLの課題を幅広く整理しており参考となる。

間島 (2015) は、同じく東日本大震災について、1次輸送は概ね順調であったが2次輸送及び3次輸送で物資が滞ったと指摘している。また、各避難所の物資充足率を均等にするようなERLの数値シミュレーションを提案し、東京都における2次輸送及び3次輸送に適用した試算を行っている。その結果、区市町村の荷受能力の不足、区市町村に物資が滞留することを表現している²⁾。ただし、1次輸送を考慮していないことから、単純に港湾利用のERLに適用することは難しい。また、トラックの走行速度を時速15 kmで一定としている等の課題がある。

小野ら (2015) は、港湾利用のERLに着目してフェリー運航を含めた数値シミュレーションを提案し、物資を地域外の港湾から被災地域の港湾までフェリーで輸送、港湾から一次集積所を経て二次集積所までのトラック輸送することを表現している。また、高知市中心部を事例とした試算を行い、特に、船舶輸送～港湾荷役の部分について詳細かつ具体的な条件設定をしている。その結果、高知市中心部のピーク時の物資需要量の32.7%を高知港から荷揚げ出来るとしている³⁾。ただし、間島 (2015) と同様に、トラックの走行速度を時速15 kmで一定としており、災害時の陸上交通環境が及ぼす影響についてより詳細に検討する余地があると考えられる。

これらの他、平常時を対象にしたものであるが、小川ら (2014) は都市内物流施策を評価するための数値シミュレーションを提案している。同シミュレーションは、物流事業者及び荷主としてそれぞれ複数のエージェントが存在するマルチエージェントシミュレーションであり、各エージェントは自身の行動の結果をもとに学習する強化学習モデルを採用している。すなわち、物流事業者または荷主のエージェントはそれぞれ配送の利潤の増大または顧客からのクレーム数の低減のため行動を修正していく²⁾。ERLでは、平常時に比べ運行管理に必要な情報等が入手しにくいことから、各主体が自立的判断のもと行動する機会が多いと考えられる。繰り返し行う運転や

作業は時間経過とともに経験によって変化していくであろうから、小川ら (2014) の強化学習モデルの考え方は参考となる。

以上をふまえ、港湾利用のERLのボトルネック把握のために、小野ら (2015) の数値シミュレーション³⁾を基礎として、港湾から一次集積所・二次集積所を経て避難所までのトラック輸送のモデル改良、搬入・搬出作業の所要時間等のパラメータの収集、及び、各二次集積所・各避難所への物資分配モデルの追加を行うことにより、同シミュレーションを改良する。

本稿では、そのための基礎的検討として、1次輸送のトラック輸送について検討した。以下、第3章ではトラック輸送のモデルを用い高知市中心部を対象として行った試算の結果について、第4章では結論と今後の課題を述べる。

3. トラック輸送のモデルと試算の結果

(1) 対象地域

南海トラフ地震のリスクが想定されている、高知県高知市中心部を対象とする。

図-2に、作成した道路ネットワークの概形図を示す。道路ネットワークは、詳細な地図データ (ESRIジャパン株式会社, ArcGIS Data Collection詳細地図図2015) をもと

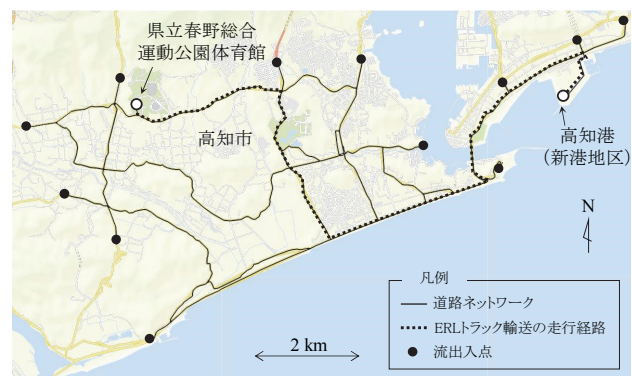


図-2 対象地域

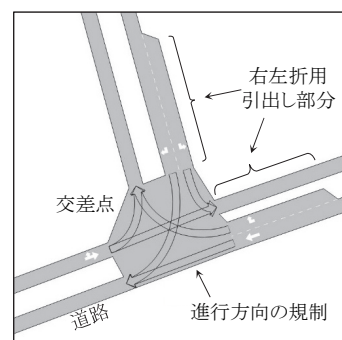


図-3 交差点の例

に、マイクロ交通シミュレーションソフトウェアである Aimsun Professional Micro Ver. 8.0.9 (TSS社) を用いて、対象地域の一般国道、主要地方道及び一般都道府県道を抽出して作成した。幅員は一律3 mとした。市道以下の比較的小規模な道路については、本稿は基礎的検討であり単純化のために考慮していない。

道路ネットワークのデータとしてはさらに、車線数、交差点における進行方向の規制、右左折用引出し部分の形状等を適切に設定する必要がある。それらの情報は、Google Earthの写真をもとに設定した。図-3に、交差点のうちの一か所を例として示す。

(2) 災害時の交通環境

通常時、交差点の青信号の時間の長さは、交通量等を勘案して、一般的には進行方向によって異なるように調整されている。しかし、災害時に交差点において信号が停電している状況を想定し、進行方向に関わりなく一定時間ごとに通行を切り替えた。

なお、災害時の交通環境としてはこの他、道路の損傷、落下物等による通行容量の低下・閉塞・回避、歩行者との錯綜、情報提供の効果等についても考慮する必要があるが⁹⁾、本稿は単純化のために考慮していない。

(3) エージェントの種類と走行特性

離散型のエージェントとして、一般車両とERLを行うトラックとを想定した。

一般車両については、対象地域のネットワークへの通過交通の流出入口を12か所設けた(図-2にこの図中に黒丸印で示す)。すなわち、一般車両はそれぞれの箇所から、一定の発生率でネットワークに流入する。追従走行モデルによって時速60 kmを上限として走行し前方の車両・信号に従って減速・停止する。交差点においては分岐率モデルによって、進行可能な方向に均等な確率で進行していく。流出入口に達した場合は、そこから流出していく。

ERLを行うトラックは、追従走行モデルによって時速60 kmを上限として走行する点は一般車両と同じであるが、交差点における挙動が異なる。すなわち、トラックはあらかじめ定められた走行経路に従って、港湾から一次集積所へ向かう。図-2の中の点線は、高知港(新港地区)から一次集積所である県立春野総合運動公園体育館までのERLのトラック輸送の走行経路(延長約14.3 km)である。この経路は、高知県へのヒアリングにより定めた。

(4) 試算したケース

対象地域の一般車両の交通量を変化させた試算を行った。すなわち、各流出入口から流入する一般車両の発生率を0, 60, 120, …, 360 台/時と変化させた7ケースを設定した。

シミュレーションはAimsun Professional Micro Ver. 8.0.9

表-1 シミュレーション結果

ケース	流出入口一か所あたり一般車両の発生率(台/時)	トラックの所要時間(分)	トラックの平均速度(km/h)
0	0	30.05	28.49
1	60	30.05	28.49
2	120	30.06	28.48
3	180	30.05	28.49
4	240	30.16	28.39
5	300	30.06	28.48
6	360	N/A	N/A

(TSS社)を用いた。最初は道路ネットワーク上に車両がない状態から始まるので、交通環境を安定させる目的であらかじめ約2時間のあいだ一般車両を上での発生率で発生・走行させたあと、港湾から一次集積所に向かうトラックを走行させて得られた所要時間から、その平均速度を試算するマイクロシミュレーションを行った。

(5) シミュレーション結果

表-1に、シミュレーション結果を示す。

まず、ケース0~5の平均速度はほぼ同じで、約28.4~28.5 km/hであった。これは、海岸線や郊外を通るルートであってかつ市道以下の比較的小規模な道路を省略しているため、信号の数が比較的少なかったこと(走行経路上の信号は計10か所)、また、トラックは一般車両に比較して停止状態からの加速が遅いため、仮に交差点において一般車両のあとについても走行を再開すると引き離されてしまうことから、基本的には周囲に車両がないときの自由走行状態で走行しているため、ほとんど差が出なかったものである。

次に、ケース6で平均速度がN/A(計測不能)となっているのは、途中の交差点においてグリッドロック状態になってしまう渋滞が発生し、一次集積所まで到達できなかったためである。通常は迂回したりUターンしたりすることにより目的地を目指すか、本稿では経路を固定としたためこのような結果となった。

間島(2015)は平均速度として15 km/hを採用しているが、道路の被災等による徐行・通行止め、渋滞等の影響を反映して得られた地域によらない速度の目安値であると考えられる。今後、マイクロ交通シミュレーションにより平均速度を精度よく推定するために、徐行・通行止め等の影響も考慮したモデルとしたうえで、街路特性の異なる複数の地域間の比較を行うこと等により、さらに検討が必要である。

4. 結論と今後の課題

本研究は、港湾利用のERLのシミュレーションに関して、1次輸送のトラック輸送について基礎的検討を行っ

た。その結論は以下のとおりである。

- ・分散型のエージェントとして一般車両と ERL を行うトラックとを想定し、かつ、信号の停電している状況を想定したマイクロ交通シミュレーションを提案した。
- ・高知県高知市中心部を対象に、ERL を行うトラックについて一般車両の交通量を変化させてマイクロ交通シミュレーションにより試算したところ、平均走行速度は約 28.4~28.5 km/h であった。ただし、一般車両の交通量がある程度を超えるとグリッドロック状態の渋滞が発生したためトラックは一次集積所まで到達できない結果となった。

今後の課題は以下のとおりである。まず、本稿ではトラック輸送の経路を固定したが、通常は迂回したり Uターンしたりすることにより目的地を目指す行動についてモデル化する必要がある。なお、ERL では平常時に比べ運行管理に必要な情報等が入手しにくいことから、各主体が自律的判断のもと行動する機会が多いと考えられるため、経験に基づいて学習するモデルも考えられる。

次に、マイクロ交通シミュレーションで得られる平均走行速度について、道路の被災等による徐行・通行止め、渋滞等の影響を考慮したモデルについて検討するとともに、街路特性の異なる複数の地域間の比較を行うこと等により、既往の文献において提案されている平均走行速度との比較・検証が必要である。

また、本稿では一次輸送のうちトラック輸送のモデルについて基礎的検討を行ったが、搬入・搬出作業の所要時間等のパラメータの収集、及び、各二次集積所・各避難所への物資分配モデルの追加により一次輸送から三次輸送までの統合的モデルとする必要がある。なお、物資分配モデルは、間島 (2015) を参考に、各避難所の物資

充足率を均等にするような物資配分モデルも考えられる。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 15H02970 (2015~2017 年度) の助成を受けたものです。国土交通省大臣官房参事官 (運輸安全防災)、株式会社日通総合研究所の各位に、ERL データの収集に関しご協力を頂いています。また、高知県土木部港湾・海岸課、国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所、株式会社ピーアイ物流企画の各位に、高知市のシミュレーションに関しご協力を頂いています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 花岡伸也：東日本大震災における緊急支援物資輸送に関する文献レビュー，日本物流学会誌，第 21 号，pp. 373-376，2013。
- 2) 間島隆博：災害時における救援物資に輸送体制とシミュレータ (サプライチェーンリスク管理と人道支援ロジスティクス，久保幹雄・松川弘明編)，近代科学社，pp. 201-234，2015。
- 3) 小野憲司・辰巳順・中尾健良・島倉康夫：大規模災害時の緊急支援物資輸送における長距離フェリーの活用とその課題，沿岸域学会誌，Vol. 28，No. 1，pp. 71-82，2015。
- 4) 小川慶輔・谷口栄一・Ali Gul Qureshi・中村有克・Joel Teo：マルチエージェントシステムを用いた都市内物流施策の評価に関する研究，土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，2014。
- 5) 「命を守る津波避難のシミュレーション」 (桑原，第 20 回震災対策技術展 (横浜) セミナー，2016 年 2 月)

(2016. 4. 22 受付)

BASIC STUDY ON SIMULATION OF EMERGENCY RELIEF LOGISTICS

Kentaro KUMAGAI and Kenji ONO

In this study, simulation model of cargo trucks in disaster area was proposed for Emergency Relief Logistics (ERL). The model was an micro traffic simulation model, consisted of cargo truck agents and small vehicle agents. The model included an effect of an interruption of traffic signal, because of electric power failure due to an earthquake. Trial simulations were conducted for the central area and suburbs of Kochi City, Kochi Prefecture, and result of the simulation showed that an averaged speed of cargo truck was constant, 28.4 -28.5 km/h in conditions of low density traffic. In contrast, the simulation also showed 'Grid lock' traffic jam around some intersections, and cargo trucks could not access to a stockyard in traffic conditions of a specific density and higher density.