

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

Basic Study on Numerical Simulation of Emergency Relief Logistics

熊谷兼太郎・小野憲司

Kentaro KUMAGAI and Kenji ONO

Synopsis

In this study, simulation model of cargo trucks in disaster area was proposed for Emergency Relief Logistics (ERL). The model was a 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 average 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 stock-yard in traffic conditions of a specific density and higher density.

キーワード: 緊急支援物資輸送, 数値シミュレーション, 海上輸送

Keywords: emergency relief logistics, numerical simulation, 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はなく、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はなく、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。

Fig. 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

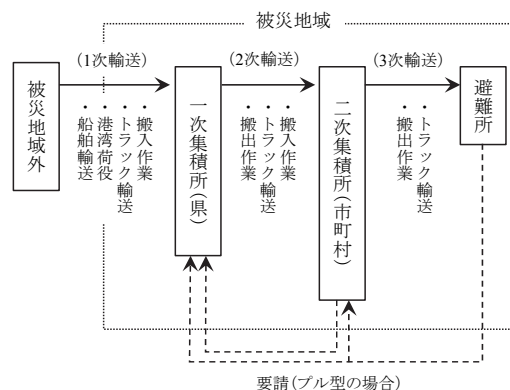


Fig. 1 Transport process of ERL through port

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。

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。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。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。地震ごとに災害の様相は大きく異なるため（例えば、東日本大震災では津波により沿岸部の道路インフラが大きく毀損したが、2016年に発生した熊本地震ではそれに比較すると道路インフラの残存度合いは小さいと考えられる）、1次輸送も含めた一体的なシミュレーションが必要と考えられる。また、国土交通省（2003）の報告書に基づき、トラックの走行速度を時速15 kmで一定としているが、道路交通量の時間変化などを考慮するためには、混雑・渋滞等の効果を取り入れる必要がある。

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。ただし、国土交通省（2014）の資料に基づき、トラックの走行速度を時速15 kmで一定としている。間島（2015）について指摘したのと同様に、道路交通量の時間変化などを考慮するためには、混雑・渋滞等の効果を取り入れる必要がある。

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。ERLでは、平常時に比べ運行管理に必要な情報等が入りにくいことから、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。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、基礎的な検討として、1次輸送のトラック輸送のマイクロ交通シミュレーションを行うことにより、交通環境の変化がトラックの移動速度に及ぼす影響を把握する。

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

3.1 対象地域

南海トラフ地震のリスクが想定されている、高知県高知市沿岸部を対象とする。

Fig. 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2015）をもとに、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

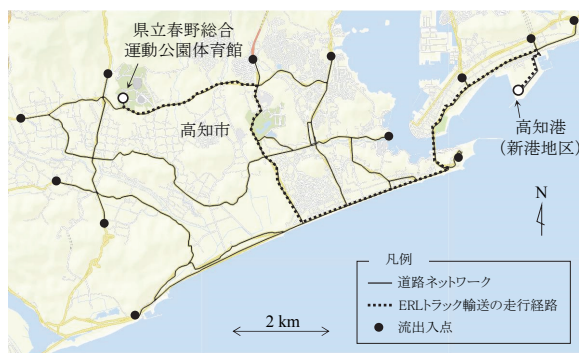


Fig. 2 Road network in coastal area of Kochi city

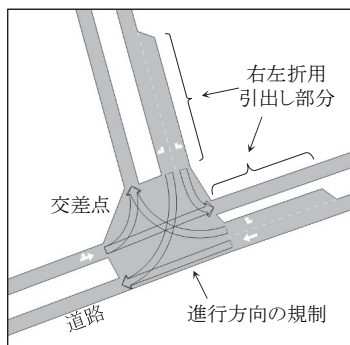


Fig. 3 Lanes and travel directions around intersection

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。Fig. 3に、交差点のうちの一か所を例として示す。上述の情報は、Google Earthの写真をもとに設定した。

3.2 災害時の交通環境

通過交通について、道路ネットワークに流入する一般車両の台数を変化させたいくつかのケースを設定した。詳細は3.4節で述べる。

交差点の信号制御について、通常時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上記の他、道路・地盤の損傷及び建物倒壊による通行容量の低下・閉塞、歩行者との錯綜による速度低下、または、渋滞情報の事前取得による迂回行動についても考慮する必要がある(桑原, 2016)。さらに、復旧工事による通行容量の低下・閉塞も考慮する必要があると考

えられる。しかし、本稿では単純化のためにこれらの点については考慮していない。

3.3 エージェントの種類と走行特性

分散型のエージェントとして、通過交通となる一般車両と、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点を12か所設けた(Fig. 2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。流出入点に達した場合は、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、加速度は一般車両に比較して小さく設定した。また、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。Fig. 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。

3.4 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、各流出入点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 (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記の発生率で発生・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。

3.5 シミュレーション結果

Table 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

Table 1 Results of simulation

| ケース | 流出入点一か所あたり 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 |

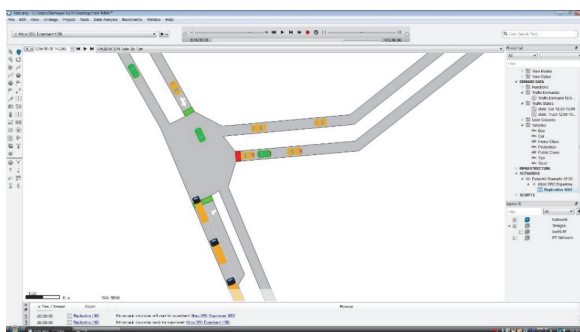


Fig. 4 Snapshot of Numerical Simulation

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。Fig. 4は、ケース4でトラックの出発点（高知港）から9.95 km地点の交差点をトラックが通過したときのスナップショットである。トラックが図の下側から上側に向かって走行してきて、交差点で停車したのち、青信号になったため交差点に進入したところを図として切り出した。当該トラックのすぐ前方には、乗用車1台が信号で停車しており、同じ青信号のタイミングで上側に向かって走行を再開したが、図では既にトラックを引き離していた（図の左上隅の緑色車両）。

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。従って、Uターン等の動的な経路変更行動、渋滞情報の事前取得や経験による迂回行動の組み込みについて検討が必要である。

4. 結論と今後の課題

本研究は、港湾利用のERLのうち1次輸送のトラック輸送のシミュレーションにより、交通環境の変化が移動速度に及ぼす影響を把握する基礎的検討を行

った。

その結果、高知県高知市中心部を対象に、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行ったところ、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一定の値を超過す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、市道以下の比較的小規模な道路、道路の損傷による通行容量の低下・閉塞等の、より詳細な交通環境の表現について検討が必要である。

次に、本稿ではトラック輸送の経路を固定としたが、Uターン等の動的な経路変更行動、渋滞情報の事前取得や経験の積み重ねによる迂回行動等のドライバーの行動モデルについて検討が必要である。

さらに、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。

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

- 小川慶輔・谷口栄一・Ali Gul Qureshi・中村有克・Joel Teo（2014）：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.
- 小野憲司・辰巳順・中尾健良・島倉康夫（2015）：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.
- 桑原雅夫（2016）：災害時の交通モニタリングと避難シミュレーションの最前線，第20回震災対策技術展（横浜）セミナー資料，2016年2月5日.
- 国土交通省（2003）：平成14年度基幹的広域防災拠

点を中枢とする緊急輸送ネットワークインフラの形成に関する調査報告書，都市・地域整備局大都市圏整備課，pp.93-97.

国土交通省（2014）：冬季における津波災害対応・復旧支援方策検討会第2回検討会資料，国土交通省北海道開発局，pp.36，2014年2月26日.

花岡伸也（2013）：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.

間島隆博（2015）：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.

（論文受理日：2016年6月13日）