

緊急支援輸送（ERL）を行う船舶輸送のシミュレーション

熊谷 兼太郎¹・小野 憲司²・赤倉 康寛³

¹正会員 京都大学特定准教授 経営管理大学院（〒606-8502 京都市左京区北白川追分町）
E-mail: kumagai.kentaro.3e@kyoto-u.ac.jp

²正会員 港湾空港技術研究所客員研究官（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail: ono.kenji.5z@kyoto-u.jp

³正会員 国土技術政策総合研究所室長 港湾研究部（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail: akakura-y83ab@milit.go.jp

大規模地震の発生直後から一定の期間、緊急支援輸送（Emergency Relief Logistics, ERL）が行われる。港湾利用のERLのボトルネックとなる可能性の高い過程を把握するために、小野ら（2015）の数値シミュレーションを参考に、タンカー、貨物船及びフェリーという3種類の船舶が船舶輸送を行うようにモデルを改良した。さらに、単純な条件設定ではあるものの、2011年東日本大震災の際にERLに携わった船舶数を参考にそれぞれの船舶数を推定することにより、南海トラフ地震の発生に伴う被害が懸念されている高知港について試算を行った。

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、特に記載の無い限り、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ERLと記すこととする。

液体燃料等の嵩張る物資や、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ERL（港湾利用のERL）の方が、陸上の輸送路のみのERLよりも有利と考えられる。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。被災地域外からフェリー、タンカー、貨物船等の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。その後、避難所までトラック輸送される。

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。そのためには、船舶輸送、トラック輸送、港湾荷役や各集積所における搬入・搬出作業を適切に表現したシミュレーション手法が必要である。

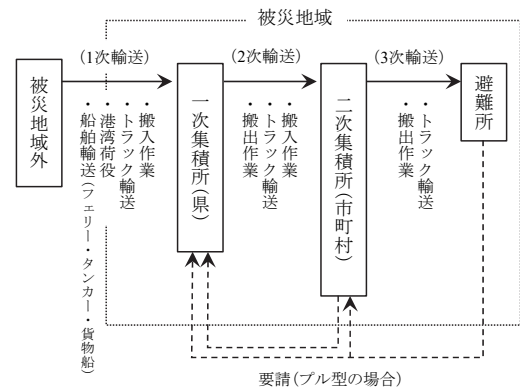


図-1 港湾利用のERLの輸送過程の例

2. 既往の研究

ERLのシミュレーション手法について、既往の主な研究は以下のとおりである。

間島 (2015) は、2011年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¹⁾。ただし、1次輸送の部分が含まれていないことから、単純に港湾利用のERLに適用することは難しい。

小野ら (2015) は、フェリーを活用したERLに着目して1次輸送も含めた港湾利用のERLの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²⁾。ただし、フェリーに注目して分析しており、船舶としてモデル化しているのはフェリーだけである。

以上をふまえ、港湾利用のERLのボトルネックとなる可能性の高い過程を把握するために、小野ら (2015) ²⁾ の数値シミュレーションを参考に、フェリー、タンカー及び貨物船という3種類の船舶が船舶輸送を行うことを表現するようにモデルの改良を行う。

以下、第3章は複数の種類の船舶が船舶輸送を行うERLのシミュレーションのモデルについて、第4章は高知港を対象として行った試算の結果について述べる。第5章は結論と今後の課題を述べる。

3. 船舶輸送のシミュレーション

図-2に、シミュレーションのフローを示す。このプログラムは、被災地域の港湾に沖合に到着した船舶が到着順に入港し、接岸して荷役を行い、出港して港湾の沖合に到り、そのあと元々の出発地である被災していない港湾で補給などを行ったあと再び被災地の港湾の沖合に戻ってくる船舶輸送をシミュレーションするものである。

まず、泊地とバースとの間の経路データ、船舶の数、種類及び諸元に関するデータ、最大計算時間、計算時間ステップ Δt 、乱数を生成するための乱数の種といったデータ・設定値が読み込まれる。フローの途中で使用するための乱数をあらかじめ必要な数だけ生成しておく。

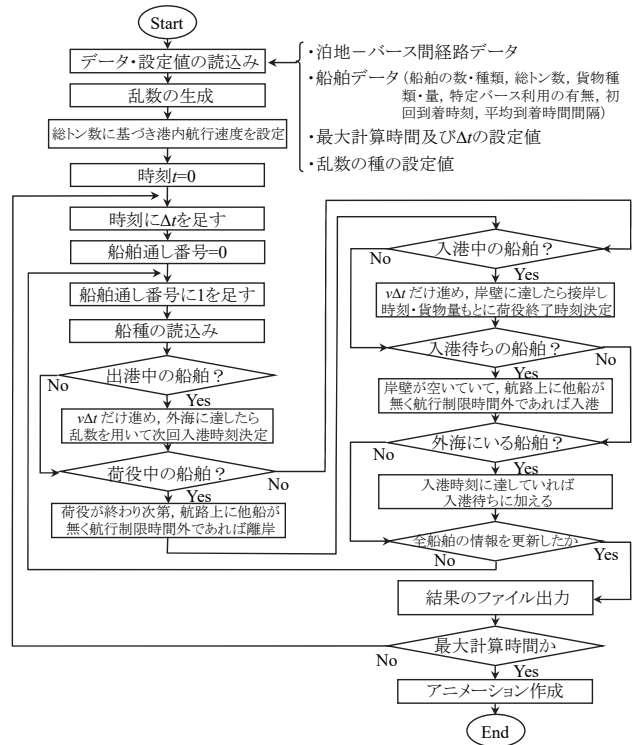


図-2 シミュレーションのフロー

一般に、港内の航行速度は低速であり船型により大きな差がないものと考えられるが、大型船にはタグボートが必要となつて着岸に時間を要すると考えられる。そこで、総トン数に基づき港内航行速度 w をそれぞれの船舶 i ($i=1, 2, \dots, n$) に設定する。

続いて、時間に関して逐次計算を行うループ部分に入る。各船舶に割り振られた通し番号 i の順に、フェリー、タンカーまたは貨物船という船舶種が読み込まれる。そのうえで出港中の船舶、すなわち岸壁を離れ港湾の沖合に向かって港内を航行中の船舶であるかチェックが行われる。該当すれば、 $v\Delta t$ だけ進め、港湾の沖合の外海に達した場合は、平均到着時間間隔とあらかじめ生成しておいた乱数とを用いて、次回の入港時刻を決定する。また、当該船舶の状態を「外海にいる船舶」に更新する。先ほどのチェックに該当しない場合は、荷役中の船舶であるかチェックが行われる。該当すれば、荷役が終わり次第、航路上に入港中または出港中の船舶が無くかつ航行制限時間外であれば、離岸して当該船舶の状態を「出向中の船舶」に更新する。なお、航路上に他船がいる場合は、他船が接岸あるいは完全に離港するまで待機する。先ほどのチェックに該当しない場合は、入港中の船舶、すなわち港湾の沖合から岸壁に向かって港内を航行中の船舶であるかチェックが行われる。該当すれば、 $v\Delta t$ だけ進め、岸壁に達した場合は、着岸し当該船舶の状態を「荷役中の船舶」に更新する。岸壁には占有状態であることを示すフラグを立てておく。また、接岸した時刻、貨物量の種類・量に基づき、荷役終了時刻を決定する。なお、

今回作成したプログラムにおいては、夜間荷役も行うこととしているが、電力の制約や荷役のための人的資源の制約に応じて、夜間荷役は行わないことも考えられる。先ほどのチェックに該当しない場合は、沖合にて入港待ちの船舶であるかチェックが行われる。該当すれば、岸壁が空いていて利用可能であり航路上に他船が無く、かつ、航行制限時間外であれば入港する。また、当該船舶の状態を「入港中の船舶」に更新する。先ほどのチェックに該当しない場合は、外海にいる船舶、すなわち被災地域の港湾から離れていてすぐに入港しない状態であるかチェックが行われる。現在時刻が次回入港時刻に達していれば当該船舶の状態を「入港待ちの船舶」に更新する。次回入港時刻に達しない場合は、当該船舶の状態は「外海にいる船舶」のままである。このようにして、全ての船舶の情報を更新する。全ての船舶の情報を更新すると、当該時刻の船舶の位置等をファイルに出力しておく。

現在時刻を調べ、最大計算時間に達していなければ、逐次計算を行うループに戻り、時刻に Δt を加えて上の過程を繰り返す。最大計算時間に達している場合は、計算結果を可視化したアニメーションを作成したうえで、シミュレーションを終了する。

4. 高知港を対象とした試算

(1) 対象地域

高知県高知市は、南海トラフ地震の発生に伴う被害が懸念されている。そこで、同市へのERLの拠点となると考えられる高知港（新港地区）を対象とする。

泊地とバースとの間の経路データは、著者の一人が実施したAISデータ解析の結果を基に、高知港沖合の錨泊海域を推定して設定した。

(2) 試算したケース

赤倉・小野 (2017) ³⁾は、2011年東日本大震災についてERLに携わった船舶の種類・数について調べている。それによると、船舶の種類は数の多い順にタンカー29隻（石油タンカー及びLPG船）、官公庁船18隻（国土交通省浚渫船、水産庁漁業取締船、訓練船等）、貨物船15隻（一般貨物船、漁船）、艦艇・船艇12隻（海上自衛隊及び海上保安庁）、Ro/Ro船12隻、フェリー11隻であった。官公庁船は浚渫等の特定目的の船舶もあると考えられることからここでは除外し、タンカー及び貨物船を代表的な船舶の種類として採用した。さらに、小野ら (2015) ²⁾のシミュレーションで対象としていたフェリーを加え合計3種類とした。

小野らのシミュレーションではフェリー6隻が支援にあたるとしている。そこで、タンカー、貨物船の隻数は

単純に2011年東日本大震災の際の実績と比例するとして、それぞれ15隻、8隻とした。これらの合計29隻を対象とした。各船舶の初回到着時刻は、地震発生後6時間後から1時間間隔で順不同で仮に与えた。また、高知港で荷役を終えたあと再び高知港の沖合に戻ってくるまでの平均到着時間間隔は、仮に24時間とした。

試算において、地震の発生時間は午前9時、計算の対象期間は地震の発生から7日間（604,800 s）とした。

(3) 計算環境と処理時間

計算に用いたPCのプロセッサはIntel Core i7-5960X（3.00 GHz、20 MB SmartCache）、メモリは64 GB RAM、オペレーティングシステムはWindows 10 Pro 64bitである。プログラミング言語はFortranでありIntel Parallel Studio XE 2017 Update 2 Composer Edition for FortranをMicrosoft Visual Studio Professional 2013に組み込んだ環境で記述・実行した。今回の船舶数（ $n=29$ ）と最大時間（ $t=604,800$ s）であれば処理時間は数秒程度の非常に短い時間であった。

(4) 試算結果

図-3に、試算結果のスナップショットを示す。 $t=76,500$ sであり、発災から2日目の夜間航行制限が解除された直後の時刻（午前6時15分）である。

図において、灰色部分は陸地及び港湾施設であり、中央上部に高知新港のふ頭（岸壁は2つが供用されているとした。）を描いている。白色部分は海域である。図の左下の領域に入港待ちしている船舶が黄色で描かれている。丸印、四角印、十字印はそれぞれ、タンカー、貨物船、フェリーを示している。また、同じ四角印であっても大きいものは総トン数3,000トン以上の比較的大型の船舶を、小さいものはそれ未満の比較的小型の船舶を示している。荷役中の船舶及び入港中の船舶のそれぞれ1隻ずつが緑色で描かれている。

このように、設定条件の精査が今後必要であるものの、タンカー、貨物船及びフェリーという複数の種類の船舶が船舶輸送を行うようにモデルを改良した。なお、今回の設定条件では、午前6時の段階で入港待ちしていた船舶は、同日の午前10時10～20分の間に解消した。



図-3 試算結果のスナップショット ($t=76,500$ s)

5. 結論と今後の課題

港湾利用のERLのボトルネックとなる可能性の高い過程を把握するために、小野ら（2015）の数値シミュレーション³⁾を参考に、タンカー、貨物船及びフェリーという3種類の船舶が船舶輸送を行うようにモデルを改良した。さらに、単純な条件設定ではあるものの、2011年東日本大震災の際にERLに携わった船舶数を参考にそれぞれの船舶数を推定することにより、南海トラフ地震の発生に伴う被害が懸念されている高知港について試算を行った。

今後の課題として、今回の検討で設定した条件を精査して再度試算を行い、小野ら（2015）の計算結果との比較・検討を行う必要がある。トラック輸送の適切なシミュレーション・モデルを構築し、今回構築した船舶輸送のモデルに組み合わせることにより、一体的なモデルとする必要がある。また、2016年熊本地震の際には、県が運営する一次集積所が地震の影響により利用できず、国が設置したプッシュ型物資拠点⁴⁾が代替的に利用される事例が生じた。このような実際に発生した状況を参考に、より実践的なケース設定を行っていく必要がある。

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。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。また、京都大学防災研究所・畑山満則教授と同大学大学院情報学研究所修士課程・西脇文哉さんとはERLのシミュレーションモデルについて有益な議論をさせて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 赤倉康寛、小野憲司：大規模災害時の緊急支援船の船型・対応係留施設の分析—東北地方太平洋沖地震及び平成 28 年熊本地震の例—、国土技術政策総合研究所資料、942, pp. 3-7, 2017.

(2017. 7. 31 受付)

SIMULATION MODEL OF MARITIME TRANSPORT FOR EMERGENCY RELIEF LOGISTICS

Kentaro KUMAGAI, Kenji ONO and Yasuhiro AKAKURA

Emergency Relief Logistics will play an important roll immediately after a large earthquake. In order to assess the process which will be a bottleneck/bottlenecks of ERL through port, the authors modified a numerical simulation model developed by Ono et al. (2015). The new model can handle three types of vessels: tankers, cargo ships and ferrys. In addition, although it is a simple condition setting, the number of each types of vessels was estimated with reference to the number of vessels engaged in ERL at the 2011 East Japan great earthquake. We conducted a trial calculation on the port of Kochi where the high risk of damage will be assumed by the Nankai Trough Earthquake.