南海トラフ地震における支援物資輸送への船舶の利用

ープッシュ型輸送期間の日本海側フェリー/RORO 船隊輸送ー

正会員 松 倉 洋 史*
正会員 間 島 隆 博*

正会員 荒 谷 太 郎*

Ship Utilization for Transporting Relief Supplies after the Nankai Trough Earthquake
- Ferry/RORO Fleet Transportation in Japan Sea during Push-type Transportation Term -

by Hiroshi Matsukura, *Member* Taro Aratani, *Member*
Takahiro Majima, *Member*

Summary

Just after inevitable Nankai Trough earthquake in Japan huge amount of emergency relief supplies must be transported rapidly. Truck transportation is supposed to be the main means but there is a non-negligible possibility that its capacity becomes heavily insufficient because of road network damage and shortage of available number of truck resources and so on. In this paper we propose major-scale ferry/ro-ro fleet transportation in Japan Sea for "push-type" transportation period as a redundant means. We discuss the necessity of the proposed transportation system and show its qualitative merits and quantitative performance by using variety of numerical backbone transportation simulations between cargo origin and logistics hub of the destination area.

1. 結 言

南海トラフ地震はこれまで 100～150 年の周期で発生しており、M8～9 クラスの地震が今後 30 年以内に発生する確率は 70～80%と予測される¹⁾。被害は極めて広範かつ甚大であり、地震発生(以後、発災と記載)後、非常に多量の災害支援物資(以下、支援物資)を迅速に輸送する必要がある²⁾。

政府による支援物資の輸送計画ではトラックによる陸上輸送が主に想定されている。しかし、トラック・ドライバ・燃料等の不足、道路ネットワーク破断、復旧遅延、あるいは何らかの想定外の事象により、トラック輸送力が大きく不足する可能性もある。一方、上記計画では船による輸送はトラック輸送が機能しない場合に行う補助的なものとされると共に、主に被災港への都度輸送を想定した限定的な取り組みとなっている^{3,4)}。しかし、発災後しばらくは港湾関連施設の損傷や海上瓦礫により被災港を十分活用できない場合もある。このような、陸路輸送を中心とし海上輸送を補完的に加える取り組みは妥当かつ必要ではあるが十分とまでは言えない。上記輸送計画に加え、冗長的輸送手段として日本海側を中心とする非被災港を用いた大規模な船舶輸送を利用できるよう準備しておくことは有用と考える。

これまで、阪神淡路大震災や東日本大震災を契機に、震災

後の船舶利用について調査報告・研究等がおこなわれてきた^{5)6)7)他}。しかし、南海トラフ地震後の日本全体の支援物資輸送を対象とし、日本海側の非被災港を中心とした大規模船舶輸送を取り上げた研究は行われていない。

前報⁸⁾では、南海トラフ地震発生直後における、日本海側での支援物資輸送に使用可能な船舶の数量や属性を検討し、発災後約 24 時間以降から大きな海上輸送力を利用できる可能性が高いことを示した。本論文は、それを踏まえて発災直後のプッシュ型輸送期間における日本海側のフェリー/RORO 船隊による支援物資輸送の必要性について定性的に論じる(2 章)と共に、それを踏まえて支援物資の発地から広域物資輸送拠点(以下、広域拠点)までの基幹輸送部分をシミュレーション評価することでその有用性を定量的に示す(3～5 章)ことを目的とする。なお、有用性としては支援物資の輸送状況・トラック輸送関連資源の削減程度・海上輸送の実現可能性を考え、その評価のため支援物資の充足率、トラック総走行距離、船の消席率等を評価することとする。

2. 日本海側フェリー/RORO 船隊輸送の必要性

2.1 支援物資

南海トラフ地震発災直後には多量の支援物資が必要となる。中央防災会議の計画²⁾では、発災後 3 日間で必要となる物資は各被災地の備蓄で賄うこととされている。一方、当初は被災地での正確な状況把握は困難と考えられることから、

* 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

原稿受理 令和 3 年 7 月 29 日

4~7 日目に要する物資については被災府県からの具体的要請を待たずに必要と見込まれる物資の輸送を行い(プッシュ型輸送), その後, できるだけ早期に被災府県からの要請に基づいた輸送(プル型輸送)に切り替えるものとされている。

現在のプッシュ型輸送期間の物資調達計画では, 発災後, 基本 8 品目について, 担当する各関係省庁が関係業界団体・事業者・地方公共団体と調整の上で確保し, 関係省庁の指示の下, 調達先の関係事業者が自ら輸送手段を確保した上で広域拠点まで輸送することとなっている。輸送手段を確保できない場合, 関係省庁は緊急災害対策本部に輸送手段の確保を要請し, 海上輸送が効率的と見込まれる場合には, 国土交通省が主体となって, 海上輸送を含む発地から着地までの輸送手段調達の調整を行う¹⁾。

同会議では発災後 4~7 日目において, 被害が大きい場合は食料だけで 1 億 800 万食の輸送が必要となると見込んでいる。その他の基本輸送品目である毛布・乳児用粉/液体ミルク・乳児/小児用おむつ・大人用おむつ・携帯/簡易トイレ・生理用品, 更には上記基本 8 品目以外の標準対象品目まで含めれば 10 トントラック換算で数千台以上となる膨大な量の輸送が必要となる(3.2.1 項参照)。

なお, 飲料水は被災水道事業者及び応援水道事業者により, 域内の浄水場・配水池・貯水槽等から給水を行うとされており, 上記輸送計画には含まれていない。停電長期化・給配水設備/機器の損傷や不足²⁾・避難人口の増大等で給水能力が足りない場合, 生命維持に非常に重要であることから³⁾, 上記計画にペットボトル等の飲料水輸送が加わることとなる。

仮に必要な量の支援物資輸送を円滑に行えない場合, 被災者の健康を害するだけでなく, 大きな社会的混乱が生じるなど深刻な悪影響をもたらす。多様な状況下においても必要な輸送能力を柔軟に確保できることは極めて重要である。

2.2 トラック輸送

支援物資輸送においてトラック輸送(トレーラ, コンテナ等を用いた車両による輸送を含む)は, Door to door の輸送が可能であり, 柔軟性が高く, 高速であり, かつ多くの荷主が通常業務で利用していて豊富な知見を有しているため, 円滑に進めば極めて有力な手段であり, 第一選択肢となる。

一方, 以下の可能性がある。

(1) トラック・ドライバー・燃料の不足

発災後, 道路の通行可否や被災地での燃料供給等の不確実さから, 事業者からの長距離輸送向けのトラック(主に自走式のトラック, トラクタ)の供給が必要な台数に達しない可

能性がある。

輸送過程では物資不足の被災地域での食事や休憩場所の確保に困難が伴うと考えられ, また, 被災地域外であっても買い占め等により物資不足となったり社会不安が増大したりすることによって, ドライバが長期間家族を置いて輸送に従事しづらい場合もある。

また, 現状では支援物資輸送車両に優先供給するための燃料備蓄計画⁴⁾はあるものの, 円滑に供給できず軽油・ガソリン等のトラック燃料が不足して長距離の輸送ができなくなる場合もある。あるいは, 大規模災害のために製油所の復旧の見込みが立たず¹⁾, 一定の備蓄はあるもののでできるだけ燃料を節約したいというニーズもありうる。

(2) 道路ネットワーク破断

トラックのみによる基幹輸送では, できるだけ高速道路や自動車専用道路(以下, 高速道路等)を用いて長距離を移動し, インターチェンジを降りた後, 広域拠点までは一般道を利用することとなる。高速道路等は頑強に建設され, Fig.1¹²⁾を基に著者作成のように本州では複数の路線で東西方向に移動できるよう多重化されている地域が多い⁴⁾。発災後も東西の長距離トラック輸送が機能する見込みは大きい。

Fig. 1 Highway Structure in Western Japan (April 2020).

一方で, 以下の可能性もある。

- a) 過去の大地震において揺れが強い地域では, 耐震性が高いとされる高速道路等であっても, 路面・橋梁損傷, のり面・盛土崩落(多量の降雨後は危険は高まる), 跨道橋落下等により車両が通行不能となる事例が発生している⁷⁾。強い揺れに誘発された車両事故により通行困難となる場合もある。
- b) 揺れがあまり強くない地域であっても, 一定以上の揺れにより付近の斜面で表層崩壊あるいは深層崩壊¹³⁾⁵⁾が発生し, 高速道路等の管理区域外から流出した土砂

¹⁾ 支援物資輸送は発地から広域拠点までの基幹輸送部分と, 広域拠点から各避難所までの末端輸送部分に分けられる。前者は国が輸送を担当し, 後者は被災自治体が輸送を担当する²⁾。

²⁾ 広域災害では給水車数の制約から目標応急給水量(3L/人日)の達成は困難であり, また給水車数は近年漸減傾向にあるとの指摘がある⁹⁾。

³⁾ 成人で 1,400~1,500ml/日が生命維持に最低限必要な量である¹⁰⁾。

⁴⁾ 現在供用中のものでは Fig.1a)1 本, b)d)2 本, c)3 本など多様である。

⁵⁾ 地震動に伴う深層崩壊は, 震度が 5 程度を超える地震動と同時期に, また広域にわたり多数発生する傾向がある¹⁴⁾。

により通行止めになる場合がある。発災前後に多量の降雨を伴う場合、危険は更に高まる。

- c) 南海トラフ地震の強震域、あるいは強震域外の地域であっても余震や誘発地震が発生し、それに伴う通行障害が生じる場合がある⁶。ひとたび南海トラフ地震が発生すれば誘発地震は高率で生じるとされる。
- d) 豪雨・豪雪・台風に起因する広域の大規模な通行止め¹⁶⁾など、発災が重なる場合がある。近年は地球温暖化に伴い災害は年々激甚化する傾向がある。

強震度域では a)～d) が、その他の地域でも b)～d) により、通行不能箇所が広域で複数同時発生することがある。高速道路等が通行止めの場合、一般道を利用することとなるが、脆弱かつ交通容量が小さいため、高速道路等でさえ通行止めとなっている過酷な環境下で十分な役割を果たすことは期待しづらい。東西方向の迅速な通行が出来なくなれば、支援物資輸送は大幅な効率低下に陥る。上記は状況次第では起こりうるシナリオであり⁷、その影響の大きさから無視すべきではない。

(3) 復旧遅延

南海トラフ地震では極めて広範囲かつ同時多発的に被害が発生して人的・物的な復旧資源が不足する恐れがある。高速道路等・一般道路共に通行が再開されるまで長期間を要する可能性がある。

以上により、トラックによる陸路輸送のみでは、必要な支援物資量を充足するだけの輸送能力を、ブッシュ型輸送期間において確保できない可能性がある。

2.3 フェリー/RORO 船隊輸送

船は活動範囲が港間に限られ、輸送ロットが大きいために消席率を確保するには大量の貨物が必要となり、また荷役や船速が遅いため輸送に時間がかかる。港でのパースや貨物蔵置場所の確保等も必要である。一方、トラックと比べて以下の長所を持つ。

(1) 長距離・大量輸送

トラック輸送は積載量が 10 トン程度までであることが多いのに対し、船は大量の貨物の長距離輸送が可能である。

(2) 少人数輸送

トラックは 1 台あたり最低 1 名(長時間の運行等、状況によっては 2 名)のドライバを要するが、フェリー/RORO 船は、積載量により異なるものの、少数の船員で百台以上のトラック

クを輸送可能である。

なお、フェリーはドライバも乗船できるが、RORO 船の場合と同様に、無人航送を行って着地側でトラックあるいはトラックのドライバを別に手配することで、必要となるドライバ(人×時間)を削減することが可能となる。

(3) 活動の独立性

一定規模以上の船は船員の食事・休憩・睡眠等が可能であり一人当たりのスペースも広い。また、発電設備を備え、船舶無線等の利用による通信の頑健性も高い。更に、船は多量の燃料を積載して長期にわたる独立した活動が可能である⁸。社会インフラの安定利用が困難となる災害時において、船は非常に有力な独立した活動主体となる。

現在、船舶を利用した補完的な支援物資輸送としては主に被災港を利用したものが検討されている。しかし、南海トラフ地震は極めて広域の災害であるため、2.2 節(3)と同様に、地震被害が大きい場合は航路啓開が進んで利用可能となるまで時間がかかる可能性がある。また、発災後しばらく大きな余震による津波の恐れがある上、いわゆる半割れケース⁹の場合は残り部分の震源域からの地震発生による巨大津波の恐れがあるなど、被災港を利用した支援物資輸送を行うことが困難なケースもありうる。

一方、日本海側を中心とした非被災港を利用した輸送は発災による被害を基本的には受けないため、冗長的輸送手段として適している。被災港を利用する輸送に比べ、全体の輸送距離は伸びるものの、フェリー/RORO 船等の、荷役・船速共に速い船種を用いることで対応できる可能性がある。その際、必要な輸送力を確保するため、また逐次の船舶手配の時間を省くため、航路及びダイヤを設定した海上輸送を行う事が望ましい。そこで日本海側の各港を主に利用し、定期フェリーのように航路及びダイヤを予め決めて運用するフェリー/RORO 船隊による輸送を想定することとする。

2.4 分析の位置づけ

本研究では、中央防災会議の被害想定に用いられている 4 ケースの地震¹⁷⁾のうち、最も被害が大きいとされる「駿河湾～紀伊半島沖」に大すべり域を設定した場合を想定する。予想震度分布を Fig.2 に示すが、極めて広範囲に強い揺れが分布していることが分かる。

⁶ 東日本大震災では、最大震度 6 強のものだけでも翌日に長野県北部で 3 回、4 日後に静岡県東部で 1 回の内陸型誘発地震が発生した¹⁵⁾。

⁷ 例えば、山陰地方の豪雨中に地震が発生し、誘発地震が同地域に発生して大量の雨と深層/表層崩壊により複数箇所が高速道路等や一般道が通行止めになる等のシナリオが考えられる。このような被害の広域性・同時多発性が南海トラフ地震対策を困難なものにしている。

⁸ 北海道・東北等、非被災地域の製油所での燃料補給も期待できる。

⁹ 直近 2 回の南海トラフ地震では震源域から一度に地震が発生したのではなく、東半分から先に地震が発生し(半割れ現象)、約 30 時間後(安政南海地震)あるいは 2 年後(昭和南海地震)に残りの西半分の震源域から大地震が発生した。半割れが生じた直後は、残りの部分から地震が発生する確率は 100 倍程度に高まる¹⁸⁾。

Fig. 2 Seismic Intensity Distribution Map⁶⁾.

ここでは1章で述べた通り、発災後4~7日のプッシュ型輸送期間を対象とし、支援物資の基本8品目の発地から広域拠点までの基幹部分の輸送を対象に評価を行う。輸送手段としては、トラックと日本海側を中心とする非被災港を用いたフェリー/RORO船隊を想定する。

従来の大規模地震時の支援物資輸送では、基幹輸送部分で問題が生じることは殆ど無く、多くの問題は末端輸送部分で生じている¹⁹⁾。しかし南海トラフ地震は大規模かつ広域の、近年経験したことのない災害であるため、2.2・2.3節で述べたように基幹輸送部分で問題が発生する初のケースとなりうる。基幹部分の輸送が行えなければ末端部輸送も成立しないことから、ここでは基幹輸送部分を取り上げるものである。

一方、各広域拠点あるいはその付近に、必要となる殆どの支援物資を貯蔵すれば輸送手段を大規模に準備する必要はないとの考えもある。しかしその場合、流通在庫備蓄を利用できないことから倉庫設置・在庫購入/入れ替え・維持管理等の負担が大きく、また、想定よりも多量の輸送が必要となったり、飲料水が不足するなど当初の想定外の状況が生じた際に急遽輸送手段を準備することは困難なため対応できない。今後数十年の長期にわたる備えが必要であり、また全ての被災ケースを想定することは困難であることから、冗長性の高い輸送システムを用意しておき、状況に応じて動的に運用するのが適切と考える¹⁰⁾。

また、ここで評価するのは輸送の潜在的な能力である。すなわち、現状のハード・ソフトでは貨物発着地・トラック・道路・船・港湾等において本研究で述べるような輸送を行うことは難しい点もある。しかし必要に応じ、今後の各方面の尽力によりハード・ソフト両面から必要な準備を行う事は可能と考える。ここではそれらが達成された状況を想定して輸送能力を算出するものである。

なお、以降の分析では想定輸送システムの基礎的性能を評価することを目的とする。そのため、設定においては支援物資の発地・広域拠点・船・港・トラック等で行われている対

策や個別事情を考慮せず、出荷開始時刻・トラック移動速度・乗下船所要時間・出航間隔等の設定パラメータについて、一律とみなして評価する。

3. 想定する輸送システム

本論文で想定する、日本海側を中心とするフェリー/RORO船隊輸送とトラック輸送を併用した支援物資輸送について述べる。

3.1 輸送の概要

輸送は陸路をトラックで発地から着地まで直行(以下、陸路のみの輸送)するか、途中でフェリー/RORO船を利用する(以下、海陸併用輸送)かのいずれかとなる。ここで、船はあらかじめ発災時の航路と運航ダイヤが定められているものとする。概要は以下となる。

- (1) 発災の一定時間後、非被災地域に分布する貨物の発地からトラックによる支援物資の発送を開始
- (2) トラックの出発時に、海路の利用条件に合致すれば対象航路で利用可能な最も早いフェリー/RORO船を予約。利用条件に合致しなければ、陸路で広域拠点まで直行輸送((5)へ)。
- (3) トラックは陸路で船の発港まで移動し、予約した船に搭乗。船は設定ダイヤ通りに航行。
- (4) トラックは着港で下船後、広域拠点まで陸路を移動。
- (5) 被災自治体が広域拠点から避難所まで支援物資を輸送。

貨物の発着地(発着地域)と船の発着港の配置を Fig.3 及び Fig.4 に示す。

Fig. 3 Transportation Route Pattern Diagram.

¹⁰⁾ 想定外の物資輸送が必要となるケースでは、新たな物資の供給地域として被害の少ない東日本や北日本が中心となることが多いと考えられ

る。その際、長距離・少人数輸送に適し、かつ安定して運用可能な日本海側の船舶輸送は親和性が高いと期待できる。

Fig. 4 Layout of Cargo Origin, Destination and Port.

以下、輸送の各要素の詳細に関して、評価を行う際の想定を説明する。

3.2 支援物資

3.2.1 総貨物量

中央防災会議は発災後4～7日目に必要となるプッシュ型支援の必要輸送量を、被災地域に設置される広域拠点72か所毎に算出している。これを基本値として被害状況に応じて必要な量が修正され輸送が行われることとなる。上記を文献20)を参考に10トントラックに換算したところ、合計5,972台となった(付録1参照)。これを対象に輸送の評価を行う。

3.2.2 貨物発地と発貨物量

南海トラフ地震は数十年を想定した長期にわたる備えが必要である。その間、経済社会情勢やIoT等の技術の発展による企業の生産・販売・流通活動の変化に伴い、支援物資の供給態様も変化していく。支援物資の発地点及び発量の分布は流動的である。輸送の検討が進んだ結果、その影響を受けて支援物資の供給計画が変化することもありうる。

そこで本分析では、発地の分布として現時点の状況を想定せず、また品目を区別しない。発地は非被災県の県庁所在地とみなし、発貨物量は当該県の人口比に比例すると仮定して評価を行う。支援物資のように日常生活で消費される物品は、基本ケースとしては人口比に従って供給されると設定し、バリエーションも含めて検討することで一般化可能な知見を得られると考える¹¹⁾。

具体的に発地として想定するのは、南海トラフ地震防災対策推進地域²¹⁾が設定されていない19県(北海道、青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島、栃木、群馬、埼玉、東京、新潟、富山、石川、福井、鳥取、島根、佐賀、長崎)とする。

また、輸送はトラック単位で行われるため、貨物量ではなく到着したトラック台数を基準に評価する。

3.2.3 着地と着貨物量

着地は文献2)に記載の72か所の広域拠点とし、着貨物量(すなわち着トラック台数)は付録1付表3の台数とする。

なお、広域拠点から実際の支援物資消費場所である各避難所等へは被災自治体が輸送を担当する。広域拠点での荷降し、検収、保管・発送分の仕分け、トラック積み込み、輸送、避難所等での荷降し等には、広域拠点での物資受け入れ直後は不慣れなことから、受け入れ開始時点では約1日(24時間)、最終的には習熟により約半日(12時間)を要すると想定する。

3.2.4 発着地の組合せ

発災直後のプッシュ型の支援物資輸送では、輸送の迅速性・公平性(広域拠点間で支援物資の充足率の差が少ないこと¹²⁾)を満たすために、広域拠点の規模等を考えず、基本的には発地の西側と着地の西側を順に組み合わせていくとした¹³⁾。仮に近くの発着地どうしを組み合わせると、残った組合せではより遠くどうしの組み合わせとなって長距離を輸送することとなり、輸送時間が長くなると共に公平性を損なう¹⁴⁾。発地の東西の分類はFig.4とした¹⁵⁾。

ここで発着地の組合せ方法としてFig.5(a)(b)の2種類を想定する。(a)は発地を分割せず西側の発地と西側の着地を順に組み合わせる方法である。(b)は発地全体を東西に分割し、それぞれで西側の発地と西側の着地を順に組み合わせる方法である(付録2参照)。

(b)は(a)に比べ西側から着地までの平均輸送距離が短くなるため、輸送経路に障害が発生する余地が少なくなり、また1か所の着地へ複数の発地から経路の大きく異なる貨物が届くので冗長性が高くなるというメリットを期待できる。

なお、海路併用輸送は輸送の冗長性確保が主目的であるため、(b)を主に検討を進める。

¹¹⁾ 支援物資の発地、及びそこからの品目・貨物量は、本論文作成時点で公表されていない²⁾。

¹²⁾ 輸送の遅れが不可避な事情によるものではなく、例えば小規模な広域拠点が輸送上後回しにされるなどの意図的なものである場合、差別された広域拠点の被災者の不満は非常に大きくなる。

¹³⁾ この組合せ方法は一例である。より優れた組合せ方法が見つければそれを採用すればよい。その場合は少なくとも本評価例よりも優れた輸

送性能なのであるから、日本海側フェリー/RORO 船隊輸送の有用性については上方修正されることとなり、結論(有用である旨)は変わらない。

¹⁴⁾ 例えば関東地方の発着地間で物資を届けてしまうと、それより西の地域へは東北地方等のより遠距離から届けることとなり、時間がかかる。

¹⁵⁾ 東京と埼玉は位置が近くどちらに分類するかは任意である。ここでは東西の合計貨物量が拮抗するよう東京を西に分類した。

Fig. 5 Combination of Cargo Origin and Destination.

3.2.5 貨物の発送

プッシュ型輸送期間の支援物資は、4～7 日目に使用されることを想定している。4 日目に使用する分については、広域拠点から避難所等へ 1 日を要するとすれば、広域拠点には 3 日目昼頃(発災 60 時間後)には届き始めていることが望ましい。陸路のみで輸送を行う、あるいは海陸併用輸送を行うかのいずれであっても、時間的猶予が限られることから発災後 24 時間後から発地より支援物資の発送を開始し、続く 48 時間で全ての予定量を等速で出荷することとする。出荷完了は発災 72 時間後となる。

なお、評価の結果、貨物の到着速度に余裕がある場合は、発送完了時期を遅くするよう調整することも一法である。

3.3 陸上輸送

3.3.1 トラック

本評価では陸上輸送手段として 10 トントラックを想定する。輸送手段としてはトレーラやコンテナ等を用いた車両輸送もあるが、貨物出荷速度を一定と仮定しており(3.2.5 項)、また船上での専有面積は積載量に準じるため、それらを想定しても結果に大きな違いは出ない。ここでは輸送力の評価単位として考えやすい 10 トントラックを想定するものである。

3.3.2 陸路

陸路は第 1 次～3 次の緊急輸送道路として指定されている道路を対象とし、経路は高速道路等/一般道路/その他道路の区別なく使い、最短時間となる経路を用いるものとする。

その際、計算の基本となる非被災地域の陸路移動速度は、文献 22)を参考に高速道路等で 80km/h、一般道路(一般国道、主要地方道)30km/h、その他道路 20km/h と設定する。

また、被災地域として、震度・津波高や高速道路等の通過地域を参考に中被害県(岡山、岐阜、京都、熊本、広島、山梨、滋賀、鹿児島、大分、長野、兵庫)と大被害県(愛知、愛

媛、宮崎、香川、高知、三重、静岡、大阪、徳島、奈良、和歌山)を設定する。

中被害県では高速道路等・一般道路・その他道路の各移動速度の 1/4、大被害県では 1/8 になると想定する。これは本論文で想定している最も地震被害の大きな発災ケースにおける、安全確保のための速度制限、移動途中のインターチェンジやジャンクション前後の渋滞、通行可能経路確認、落石警戒等のための徐行など全てを含めた平均速度である。減速割合を大きくした安全側の仮定ではあるが、この係数値に明確な根拠はないため、5.2.2 項では感度解析を行って影響を見る。

なお、南海トラフ地震の広域・同時多発性からプッシュ型輸送期間では速度低下は回復しないとする。これは充足率上昇を低めにする効果のある安全側の仮定である。

3.4 海上輸送

3.4.1 対象船種

海上輸送手段としてフェリー/RORO 船を想定する。これらは一般貨物船やコンテナ船等の他船種に比べて速度が速く、荷役が迅速である。

フェリーと RORO 船の違いとしては、ドライバの乗船可能人数がある。旅客船であるフェリーと異なり、貨物船である RORO 船が乗せることのできるドライバは法律上最大 12 名である。RORO 船では着港から着地までのドライバの手配が必須となる。

前報⁸⁾では、本報と同じ地震被害ケースを想定し、参集可能な¹⁶⁾フェリー/RORO 船を対象に AIS 情報及び船舶属性情報を基に分析を行った。その結果、発災後 24 時間前後以降には非常に大きな輸送能力を利用可能となることが分かった¹⁷⁾。本報では、上記で利用可能となる船の平均値、及び日本海における耐航性を参考に、全て航海速力 21.5kt、10 トントラック積載台数 150 台のフェリー/RORO 船を想定する。これは平均値であって実際の船の仕様は多様であるが、候補船が多数あることから、航路ごとにその時点までの平均の速力と積載台数が全体の平均に近くなるよう配置すればよい。

3.4.2 発着港

発着港としては、発災後も利用できる可能性が高いことから、発着港共に日本海側を中心とした非被災港を用いることとする。具体的には非被災港あるいは被害の少ない港であること、地域の中心にあつて設備の整っている大規模港であること、他の発着港と距離が離れていること、支援物資の発着地が近くにあつて利用される見込みが高いこと等を考慮して選定する。分布を Fig.4 に示す¹⁸⁾。

¹⁶⁾ 発災時に被災港や被災域の内海におらず稼働見込みの高い船のうち、離島・北海道-本州・沖縄-本州・四国・九州航路の最低限必要な隻数(就航数の 1/3。ただし最低 1 隻)を残し、必要な船員が揃いづらいう日帰り航路の船は除外した。

¹⁷⁾ 新潟港を評価基準地点とした場合、発災 24・36・48・72・96 時間後で、

それぞれ累積で 15・40・70・80・90 隻、積載能力としては 10 トントラック換算で累積合計 3・8・14・16・18 千台を利用可能となった(2019 年 1～12 月の日本全周 AIS データを使用。前報⁸⁾Fig.11 参照)。

¹⁸⁾ Fig.4 で舞鶴港・川内港は共に被災県にあるが、前者は日本海側にあつて津波被害を受けず、後者は予想津波高(満潮位)²³⁾が港湾機能停

3.4.3 航路

選定した発着港を組み合わせて航路を設定する。その際、着地方面から発地方面へ向かう航路などの不合理な組み合わせを除き殆どの組合せを用意する。評価の結果、実際には利用されない航路も生じる。設定した航路を Table 1 に示す。

ここで、評価対象期間であるプッシュ型輸送期間で十分な隻数の船を利用できる見込みがあること、上記輸送期間は4日間と中長距離航路を周回輸送するのに十分ではないことから、各船は往路航海のみに従事し、その後は元の航路に復帰するものとする¹⁹。

Table 1 List of Voyage Routes.

着港 発港	常陸 那珂	伏木 富山	舞鶴	境	博多	川内
苫小牧	○	○	○	○	○	○
秋田	○	○	○	○	○	○
新潟		○	○	○	○	○
金沢			○	○	○	○

3.4.4 ダイヤ

発災して24時間後に物資の発送が始まることから、発地から港までの移動時間も考え、その6時間後(発災後30時間後)に第一便が出航し、その後は6時間毎に出航するようダイヤを設定する。全ての航路について同一の出発間隔とする。また、輸送時間を短縮し、運用を単純化するため、全て着港までの直航とし複数港積みや複数港揚げは行わない。

なお、トラックが乗船に要する時間は、トラックの発港到着後1時間とする。すなわちトラックは、発港到着後1時間後以降に出発する便を利用可能である。ここで船は支援物資輸送専用かつ片道の直航便であるため、発港で他トラックの下船を待つ必要が無く、また船はあらかじめ余裕をもって着岸している想定であって他の乗船待ちトラックとの順番待ちを考慮しなくてよい。短時間の設定となっている。また着港後、下船に要する時間は1時間とする。

3.5 輸送経路

陸路である発地から着地、発地から発港、着港から着地は最短時間経路を選択する。海路も同様に最短時間経路である。

3.5.1 海路利用可否判定

貨物の発地から着地までの経路には、陸路を直行するか、途中で船を利用するかの2種の選択肢がある。最短時間で届けることのみを考えれば陸路直行を選択することとなるが、

輸送手段の冗長性確保のため、船を用いても著しく不合理としない経路については必ず船を利用するものとする。

具体的には Fig.3 の a , b , c を各バスの距離(全て最短時間経路の距離である)、海路選好係数 k を調整パラメータとして式(1)に従う。 k は物理的な意味を持たない調整項であるが、大きければ、陸路を直行する場合と比べて港までの陸上距離が相対的に長い航路も利用対象となり、海路が選ばれやすくなる。値の設定法については 5.2.2(1)で述べる。

なお、候補となる海路の利用可否判定では、関係する陸路の距離 a , b , c のみで判定が行われ、海路自体の距離は加味されないことに留意されたい²⁰。

$$\begin{cases} b + c < a \times k : \text{海路を利用} \\ b + c \geq a \times k : \text{陸路を利用} \end{cases} \quad (1)$$

3.5.2 北海道発貨物の経路の扱い

北海道発の貨物は着地へ到着するまでに必ず海路を使う。陸路での直行輸送を行うのは、主に最短時間で輸送を行うためであるが、函館ー青森間でフェリーを用いた以降は主に高速道路を用いるのが殆どの場合で最短時間となる²¹ことから、これを陸路のみの輸送経路として扱い、他の航路を用いるものを本検討における海陸併用輸送の経路とみなす。

3.6 評価の観点

主に以下の3点から輸送性能を評価する。

(1) 支援物資の充足率

広域拠点毎に支援物資の充足率を計算する。計算では品目の区別をせず、また、貨物の到着量ではなく輸送の単位であるトラック到着台数を基に評価する。すなわち到着済みトラック台数を到着予定の総トラック台数で割り充足率とする。

(2) トラック走行距離

必要となるトラック輸送資源の指標として往路のトラック走行距離を用い²²、輸送距離の合計、平均等を計算する。トラック燃料の使用量は車種毎の燃費性能・速度・停止回数などに影響されるものの、基本的には走行距離に比例する。また車両台数・ドライバー等のトラック関連の必要資源量の指標となる。

なお、北海道発のトラックの輸送経路は函館港ー青森港間を含むものを陸路扱いとするが、当然ながら距離集計の際は

止の目安である 4m²⁴を下回っているため発災後も利用可能とした。

¹⁹ 本論文では研究の対象外としているが、プッシュ型輸送期間以降の輸送も重要である。検討を行い、必要な輸送需要に適切に対応できるよう対策することが急務である。船が往路のみに従事すると設定は、プッシュ型輸送期間以降の船舶運用上の制約が少ないと期待できる。

²⁰ 海路部分も加えて評価すると、航海距離が短く港までの陸路距離の長い経路の方が合計が短くなって選ばれ易くなり、トラック輸送資源削減の趣旨と合わない。なお、海路距離が長くてもトラック資源の削減は可能

である(脚注 25 参照)。

²¹ 青函航路のフェリーダイヤの頻度は高く、また北関東や東北地方の高速道路は地震被害が無いため基本速度(80km/h)で走行可能である。

²² トラックは輸送後に発地に戻る必要がある。復路は急ぐ必要がないため、大型のフェリー/RORO 船を周回させ、往路の着港から発港へとトラックを輸送すれば往路と同程度の削減が可能と考えるが、単純化のため本研究では評価対象外とする。

航路距離を含めずにトラック走行距離を集計する。

(3) 船の消席率

海上輸送において発着港・航路・ダイヤ共に利用見込みのあるものは合理的な範囲で幅広く設定しておく。輸送シミュレーションを行って各船の消席率(積載台数/積載可能台数)を見ることで、有用かつ必要な組み合わせを抽出する。

4. 評価システムの開発

前章で述べた輸送システムを、以下によりコンピュータ上に輸送シミュレーションとして作成する。ここでは4.1節で概要を述べたのち、4.2節以降で詳細を説明する。

4.1 全体構成

まず貨物発着地及び輸送量の組合せ(支援物資ODデータ, ODはOrigin-Destinationの略), 貨物発着地や港間の距離・所要時間データを作成し, 次にFig.6に従い輸送を評価するのが基本的手順となる。

Fig.6で $ts[h]$ はシミュレーションのタイムステップ(time step)であり, 発災時刻を $ts=0$, シミュレーション期間の最終時刻を ts_{end} , ts の間隔は1時間とする。

Fig. 6 Program Flow Overview.

最初に支援物資 OD データを用い各 ts で発地毎に発貨物があるかを評価する。発貨物がある場合, (1)輸送の単位である 10 トントラックを必要台数生成する。次に生成された各トラックの発着地情報に従い, (2)選択可能な候補経路を全

てリストアップする。そこから(3)条件に合う航路を抽出し, 海陸いずれかの採用経路を選定し, (4)海路の場合はその時点でまだ満船となっておらず予約可能な最も早い船を予約した上で, 各経路の距離・移動時間データ等を基に待ち時間等も考慮した詳細な所要時間を計算して(5)トラックの着地到着時刻をログに記録する。以上を必要な貨物数分, またシミュレーション期間が終わるまで繰り返した後, (6)ログを基に評価指標を計算する。

次に個々の項目を見ていく。

4.2 支援物資 OD データの作成

支援物資 OD データは3.2.4節に従い作成された, 貨物発着地の組合せとその間を輸送するトラック台数合計のデータである。例えば「北海道発ー神奈川県総合防災センター着, トラック 18 台の貨物」などがデータ要素となり, 発時刻に関する情報は含まない。また, 輸送経路は未定であるため, その情報も含まない。

4.3 距離・所要時間データの作成

距離・所要時間データは, 経路選択計算に必要となる陸路及び海路の距離と(待ち時間等を含まない)移動所要時間を格納したものである。具体的にはトラックまたはフェリー/RORO 船による発地ー着地, 発地ー発港, 発港ー着港, 着港ー着地間の距離・移動時間となり, 以下により計算される。

4.3.1 陸路

基礎データとして文献(25)を用いる。これは国土交通省が公開している日本全体の緊急輸送道路ネットワークのデータである。プログラムにより読み取って内容を解釈し, ノードとそれをつなぐパスに再構成する。ノードは ID・緯度・経度, パスは ID・両端ノード ID・都道府県名・緊急輸送道路種別・道路種別・路線名称等の情報を持つ。

まずは読み取ったデータに対し, 欠損パス情報の補完・誤情報の修正等のクレンジング処理を行う。次に, 貨物発着地と港のノードを追加し, 最短距離にある既存ノードとの間にパスを生成して上記ネットワークと連結する。

次に, このままのネットワークデータではサイズが大きくコンピュータ上で扱いづらいことから, 連続しており, かつ都道府県名・緊急輸送道路種別・道路種別・路線名称が全て同一のパスは連結して縮約する。その結果, 日本全体でノード約 27,000 個, パス約 44,000 本のネットワークとなった。作成した道路ネットワーク(一部)をFig.7に示す。

Fig. 7 Contracted Road Network (Part of Western Japan).

上記に対し、3.3.2 項で述べた道路種別・被害程度・基本移動速度・減速係数に従い、全てのパスにトラック移動所要時間を設定する。次に Dijkstra 法を用い、貨物の発地ー着地、発地ー着港、着港ー着地間の全ての組み合わせについて最短時間経路の所要時間と総距離を計算する。

上記は最短距離ではなく最短時間で経路選択されたものであるため、移動速度が遅くなる被災県を避けて長距離を移動し、着地近くで被災県に入る経路となる傾向がある。また、上記は休憩・休息等の時間を含まない。

4.3.2 海路

まず、必要な航路ネットワークを作成した上で著者らの所属機関が有する既存プログラム²⁶⁾で港間の航海距離を計算する。本プログラムは海上にノード(ウェイポイント)及びパスからなる航路ネットワークを設定しておき、Dijkstra 法で港間の最短経路及び航海距離を求めるものである。

次に、フェリー/RORO 船の航海速力として 21.5kt(3.4.1 項参照)を用い、港間の航行時間を計算し、更に入出港に追加で要する時間として一律 30 分を加えて発港ー着港間の所要時間とした。

4.4 評価計算の手続き

4.2 節・4.3 節で作成した OD データ・移動所要時間データを用い、輸送の性能を評価する。プログラムは Visual C#.Net 上で開発した。

(1)トラックの生成

支援物資 OD データを基に各 ts での各発地から出発するトラック台数を計算する。基本設定では被災後 24 時間後から 72 時間後まで等速で出荷を行うことから(3.2.5 項参照)、生成台数はその発地の総出荷台数を 48 時間で割って算出する。

次に、生成した各トラックに着地を割当てる。具体的には、

ある ts にその発地から複数のトラックが出発する場合、担当する着地の中で発地充足率²³⁾(=その発地からその着地へ出発済みのトラック台数÷その発地からその着地へ輸送する総トラック台数)が最も低い着地からトラックを割当てる。

出荷開始当初は全ての着地の充足率が 0 であり、発地充足率を基に着地を割り当てることで、必要台数が少数の着地へも少なくとも 1 台は早期に出発することとなる。そのため輸送が後回しになるのを防ぐことになり、平等に配慮した配車となる。

(2)候補経路のリストアップ

発着地の組合せに対して選択可能な候補経路を全てリストアップする。

陸路のみの輸送については 1 本のみ計算されており、それは発地から着地まで陸路を直行する最短時間経路である²⁴⁾。

海路を併用する経路については、航路が Table 1 に示しており複数設定されていることから、それらを結ぶ貨物発地ー発港・発港ー着港・着港ー貨物着地の 3 本からなる複数の経路が候補として選択される。ただし、貨物発地ー発港と着港ー貨物着地は最短時間経路である。

なお、北海道発のトラックについては、「札幌市役所ー函館港ー青森港ー(着地)」を陸路のみの経路として 1 本選択し、「札幌市役所ー苫小牧港ー(着港)ー(着地)」が海陸併用の経路として複数選択される。

(3)条件に合う経路を抽出

上記の候補経路に対し、3.5.1 項の海路選好係数 k の値に応じて利用可能な海路を抽出する。利用可能な海路がなければ陸路のみの経路が利用対象として選択される。

(4)海路の選択と船の予約

海陸併用の経路の候補が 1 本のみ場合はそれを採用する。候補が複数ある場合はトラック輸送資源が削減されるよう Fig.3 の距離 b と距離 c の合計が最小のものを採用する²⁵⁾。

採用された経路に対し、貨物発地からの着港への到着時刻を計算し、乗船所要時間及び消廃率も加味した上で、各航路のダイヤのうち満船となっていない、最短で利用可能な船を選定する。その上で出航までの待ち時間、航海時間、下船所要時間、着港から着地までの陸路所要時間を加味し、貨物発地から貨物着地までの総所要時間を求める。併せて、利用する船の予約処理を行う。

(5)着地到着時刻の記録

陸路のみの経路の場合は(3)の経路が、海陸併用経路の場合は(4)で算出した総所要時間を用いて各トラックの着地到着時刻をログに記録する。同様にトラック走行距離や利用対象船をログに記録する。

²³ 3.6 節(1)は着地側で測定した充足率であり、ここでいう発地充足率とは異なることに注意されたい。

²⁴ 最短距離だからという理由で、輸送速度が低く通行の可否が不確実な地震被害の大きい地域の経路を選ぶとは考えづらい。

²⁵ トラック資源のうち、トラック燃料は海路では消費されず、ドライバは無

人航送を行うことで削減でき、車両(自走トラック・トラクタ)は、トレーラを用いれば削減できる(トレーラは動力部分がないため資産価値が低く、整備もしやすいため比較的調達しやすい)。以上からどのような対策をとっても主たるトラック資源の使用が避けられない、陸上部分の距離の最小化を図っている。

(6) 評価指標の計算

以上をシミュレーション期間が終わるまで繰り返した後、ログを基に評価指標となる着地別充足率の時間推移、トラック輸送距離、船毎の消席率を計算する。

5. 評価結果

5.1 陸路のみの輸送の場合

まずは発地を東西に分割し、陸路のみで輸送した場合の結果を示す。各種設定値は4章で述べた基本の設定値である。主な値をTable 2にまとめる。

Table 2 Parameter Value (Land Transportation Related).

項目	値	項目	値
発地数(県庁所在地)	19	輸送台数[台]	5,972
着地数(広域拠点)	72	基本速度 高速道路[km/h]	80
トラック積載量[ton]	10	基本速度 一般道路[km/h]	30
積載効率[%]	80	基本速度 その他道路[km/h]	20
出荷開始ts[h]	24	減速係数 被害大	1/8
出荷終了ts[h]	72	減速係数 被害中	1/4

(1) 充足率

充足率の時間推移をFig.8に示す。横軸は発災後の経過ts[h]、縦軸は充足率[%]である。充足率は、当該tsまでに届いた支援物資量を必要な支援物資の総量で割って求める。灰色線は各広域拠点の充足率を示し、黒(曲)線は平均充足率を示す。平均は避難所ごとの公平性を見るため、支援物資量を加味した加重平均ではなく単純平均を用いた。また、黒の点線分は(ts[h], 充足率[%]) = (60, 25)と(144, 100)を結んだものであり、目標となる進捗を示す(以降同様。3.2.3項参照)。

結果を見るとts=60[h]の時点で平均充足率は目標をやや上回っており、その後は十分な余裕をもって推移する。個別にみると広域拠点によっては当初は目標進捗率を下回るものもあるが、目標進捗の末尾であるts=144[h]の時点ではいずれも目標より高い進捗率となる。

Fig. 8 Progress Rate (Land Transp./ Divided Origin).

参考として発地を東西に分割せずに陸路のみで輸送した場合の結果をFig.9に示す。比較用にFig.8の結果を点線で示した。

Fig. 9 Progress Rate (Land Transp./ Combined Origin).

発地を東西に分割した場合、分割しない場合よりも平均充足率の進展は初期にやや先行しているものの、それ以降はほぼ同程度である。陸路のみによる輸送は迅速性が十分高いため、差異は大きくはない。陸路のみで輸送する場合は3.2.4項で挙げたリスク低減と冗長性確保が東西分割の主なメリットとなる。

(2) トラック走行距離

輸送に従事したトラックの走行距離を見る。これは輸送に必要なトラックの活動量、ひいてはトラック燃料・車両台数・ドライバー等のトラック関連の必要資源量の指標となる。結果は全て片道分である(以降も同様)。結果をTable 3に示す。

発地を東西に分割した場合、トラック走行距離の合計は5,019,077km、平均840km、標準偏差344kmとなる。これらは片道の値であることを考えるとトラックはかなりの長距離輸送に従事することが分かる。発地を東西に分割しなかった場合も参考に付記したが、同様に長距離の輸送となる。

Table 3 Truck Travel Distance.

		総距離	平均	標準偏差
発地を東西に分割	西側発貨物	1,696,515	602	245
	東側発貨物	3,322,562	1,053	273
	合計	5,019,077	840	344
(参考)発地を東西に分割せず		5,111,737	856	226

[km]

5.2 日本海側フェリー/RORO 船隊を併用した場合

次に発地を東西に分割した上で日本海側フェリー/RORO 船隊と陸路を併用して輸送した場合の結果を検討する。

5.2.1 基本ケース

発地を東西に分割して海陸を併用した場合(以下、基本ケース)を検討する。各種設定値は4章で述べた基本の設定値である。陸路関連の設定値はTable 2と同様であり、海路関連の主な設定値はTable 4となる。

Table 4 Parameter Value (Sea Transportation Related).

項目	値	項目	値
航海速力[kt]	21.5	第1便出航ts[h]	30
積載台数[台]	150	乗船所要時間[h]	1
設定航路数	20	下船所要時間[h]	1
出航間隔[h]	6	海路選好係数	0.7

(1)充足率

Fig.10 に充足率の時間推移を示す。平均充足率を見ると、初期には目標の点線分とほぼ同等、以降はそれよりも早い進展で推移している。一般に船は輸送に時間がかかる傾向があるが、結果を見ると概ね良好な成績である。

一方で個々にみると、広域拠点により、特に初期には目標充足率を大きく下回るところがある。これらに対しては、あらかじめ広域拠点や避難所の貯蔵物資の量を増やしておく、あるいは発地を近くに変更する(進捗の速い広域拠点の発地と交換する)等様々な対策を施すことでばらつきを抑えることが可能と考える(本検討は基本的輸送力を見るのが目的であるため詳細は立ち入らない)。このように個別対応が必要な個所及びその程度が事前に分かるのはシミュレーションの長所である。

Fig.10 の点曲線は同じ貨物を陸路のみで輸送した場合の平均充足率である。また Table 5 に目安となる平均充足率 5, 25, 50, 75, 95%を達成した時刻を、陸路のみで輸送したものと比較した結果を示す。進捗率 50%達成時点で見ると、陸路のみの輸送と比較し、基本ケースは進捗の遅れは約 10 時間にとどまっている。遅れがあまり大きくない理由として海路を移動する際は津波被害の無い日本海側を高速なフェリー/RORO 船によって航海速力で航行可能なため、また、陸路を移動する際は地震被害による速度低下が少ない経路を選択するため大回りになりがちであるからなどが考えられる。

Fig. 10 Progress Rate (Base Case).

Table 5 Comparison of Progress Rate Achievement Time.

充足率	a)基本ケース	b)陸路のみで輸送	a)-b)
5%	41	39	2
25%	63	55	8
50%	79	69	10
75%	97	83	14
95%	118	100	18

値は左欄充足率を達成したts[h]

参考として、発地を東西に分割せず、海陸併用で輸送を行った場合について付録3で述べる。

(2)トラック走行距離

トラック走行距離を集計した結果を Fig.11(a)に示す。値は全て片道のものである(以降も同様)。

陸路のみの結果(a)-1 と海陸併用の結果(a)-2 を比べると、西側発の貨物でトラック走行距離は 21%減、東側発の貨物

では 60%減となり、輸送距離の長い東側発の貨物でトラック走行距離は大きく削減されている。東西の合計でも約 47%減と半減している。トラック輸送資源の削減に船の利用は非常に有用である(海上部分でのトラック資源の削減については脚注 25 参照)。

参考として Fig.11 右欄に全データから北海道発の貨物を除いた結果(b)-1, 2 を付記した。北海道発本州向け貨物は元から必ず海路を利用し長距離フェリーを使うものも多いため、本論文で検討する日本海側フェリー/RORO 利用の支援物資輸送の効果と明確に区別するのが難しいためである。

結果を見ると、北海道発貨物を除いても、西側発の貨物で 21%減、東側発の貨物で 55%減、合計で 41%減と大きな削減幅となった。北海道発貨物を含んでいるか否かに関わらず、トラック資源の削減に船の利用は有効と言える。以降は北海道発貨物を区別することなく、全貨物を用いた結果を見ていくこととする。

Fig.11 Comparison of Truck Travel Distance (Total).

次に、トラック走行距離の平均と標準偏差を Fig.12 に示す。両者とも海路を併用すると大きく短縮される。例えば、東側発貨物、西側発貨物で平均トラック走行距離はそれぞれ 473km・422km と近い値となり、全体でも平均 446km となって陸路のみの輸送より大きく短縮されている。また、海陸併用の場合は乗船前と後にトラックの走行機会が分かれるため、ドライバの疲労軽減の点でもメリットは大きい。

Fig.12 Comparison of Truck Travel Distance (Average and Standard Deviation).

(3) 船の消席率

Table 1 で設定した全航路につき消席率を見る。結果を Fig.13 に示す。これは航路の 20 便目までを等間隔に並べたものである(横軸方向は時間に比例していない)。図では初便は全て発災後 30ts[h] 発, 出航間隔は全て 6 時間である。

図から, 多数の航路が分散して利用されるのではなく, 利用される航路は限られることが分かる。これは後述の結果 (Fig.16, Fig.22 等) でも同様である。Fig.13 では秋田発舞鶴着, 新潟発舞鶴着及び境着の便が平均消席率 50% 以上とよく利用されている。

中でも新潟発舞鶴着の便の消席率はほぼ 100% である。船が満席でトラックが港到着後の直近の出発便を予約できない場合, 計算上, 次便以降で最初に空きのあるものを予約して乗船することとなる。これは輸送の遅れとなるため, 実運用上はダイヤ調整により便数を増やして積み残しが無いようにするのが適切である。

一方, 新潟発川内着及び博多着の便など消席率が 10% 以下の航路や, 苫小牧発伏木富山着など合計数個しか貨物を運ばない航路もある。船は道路・航路の啓開資機材や自衛隊等の人員輸送, ホテルシップや病院船など, 多方面に有用である²⁷⁾。船の有効活用のため, 実運用上は充足率進展への影響を見ながらダイヤ調整により, 消席率が少ない航路を減便するか航路そのものを廃止して輸送効率を高めることとなる。

ただし, 輸送性能の比較を行いやすくするため, ダイヤの調整は 5.3 節で扱い, 本節では行なわない。

Fig.13 Voyage Route Attendance Rate (Base Case)

5.2.2 パリエーション

基本ケースのパラメータを変化させた結果を比較する。

(1) 海路選好係数

海路選好係数(3.5.1 項参照)が輸送に与える影響を見る。値が 0 の場合は海路使用不可を意味するため, 陸路のみの輸送と同じである。値が 1.0 の場合はトラック資源節減のメリットがない。そこで値を 0.1 から 0.9 まで変化させる。

Fig.14(a)~(d)は充足率の変化を見たものであり, 基本ケースの進捗を点曲線で示してある。海路選好係数 0.7 は基本ケースに相当するので Fig.10 となる。

海路選好係数が(d)から(a)へと小さくなると海路選択の条件が厳しくなり, 陸路のみで直行する経路に比して港への移動距離が長い経路は次第に選択できなくなる。その結果, 陸路のみで輸送する貨物が増え, 充足は早く進むようになる。

Fig.15 はトラック総走行距離の変化を見たものである。上述の通り, 海路選好係数が小さくなるに従い, 陸路のみで輸送する貨物が増えてトラック走行距離が増加していく。

Fig.16(a)(b)は海路利用貨物数と消席率の変化を見たものである。海路選好係数が小さくなるに従い(a)のように船を利用できる貨物の総数が減り, それに従い(b)のように消席率が減るようになる。ただし, 利用対象航路は変化しない。

Fig. 14 Sea Route Preference Coefficient and Progress Rate.

Fig. 15 Sea Route Pref. Coef. and Truck Travel Distance (Total)

Fig. 16 Total Cargo Number and Average Attendance Rate.

以上のように、海路選好係数を変えることにより、輸送の迅速性・トラック資源の節減・消費率を変化させることが可能である。ただし、輸送の迅速性とトラック資源の節減・消費率向上はトレードオフの関係となる。

どの海路選好係数を選ぶかは被災状況に応じた優先事項(充足率優先, トラック資源削減優先)により任意である。充足の速さと削減されるトラック資源量はトレードオフの関係にあるため、発災後の状況に応じて計算される(あるいはあらかじめ計算しておいた多パターンの中から現況に類似した)結果に応じ、Fig.14 のような実現したい充足率推移と、Fig.15 のようなトラック走行距離、ひいては必要となるトラック資源を鑑みて²⁶緊急災害対策本部²⁾等の全体を差配する組織により値が決定されることとなる。本分析では充足率が目標進捗を満たし、かつトラック総走行距離の削減程度がある程度確保された 0.7 を採用している。

(2)道路移動速度

基本ケースでは大被害県で陸路移動速度は高速道路・一般道路・その他道路のいずれにおいても基本速度の 1/8 になるとし、中被害県で 1/4、それ以外の県では不変としている。ここではその 2 倍の速度にした大被害県で基本速度の 1/4、中被害県で 1/2 のケース(a)と、4 倍にした大被害県で基本速度の 1/2、中被害県で 1/1(速度低下無し)のケース(b)を計算する。基本ケースは減速の大きい悲観(安全)側の仮定であり、逆にケース(b)は減速の小さいかなり楽観側の仮定である。

Fig.17 に充足率の進捗を示し、Table 6 に 5, 25, 50, 75, 95% の充足率を達成した ts を示す。充足率 50%到達時点で見ると、移動速度を速くした(a)(b)であっても基本ケースより数時間～半日程度しか早く進展しない。すなわち真値が基本ケース(悲観側)と(b)(楽観側)の範囲内にあれば、差異も上記範囲内に収まるため、道路通行速度の設定値の差異は本解析の意味を大きく変えるまではならない。

なお、経路選択(3.5.1, 4.4(4)参照)は陸路距離のみで行われ、所要時間は加味されないため陸路移動速度は影響しない。そのため、トラック走行距離及び利用航路についてはどのケースでも結果は同等である。

Fig. 17 Truck Speed and Progress Rate.

Table 6 Truck Speed and Progress Rate Achievement Time.

充足率	基本 ケース	(a)2倍の速度 (a)-基本	(b)4倍の速度 (b)-基本
5%	41	37	33
25%	63	58	51
50%	79	73	65
75%	97	90	77
95%	118	111	96

値は左欄充足率を達成したts[h]

(3)諸要素の遅れ

次に出荷開始遅れ、出航開始遅れ、出荷完了遅れ及び船積み遅れの影響を見る。遅れの幅はいずれも 24h である。

Fig.18(a)は出荷開始を被災後 24h 後から 48h 後へと 24h 遅くした結果である。基本ケースのグラフがその分だけ右に移動し、目標進捗から大きく遅れている。出荷遅延の影響は大きいので迅速に出荷を開始することは重要である。

Fig.18(b)は出荷の完了が基本ケースの 72 時間後から 96 時間後へと 24h 遅れたものである。もともと輸送後半の充足率は目標を大きく上回っていたため、出荷完了が遅れても充足率はほぼ目標付近で推移している。

Fig.18 (c)は出航開始を全ての航路の便について 24h 遅らせたものである。陸路のみにより輸送される貨物は基本ケースと同様に輸送されるため(a)ほどの遅れではないものの、輸送前半での遅れが目立つ。

Fig.18(d)は船積み時間を基本ケースから 24h 増加させ、25h としたものである。船は片道運航であって(3.4.4 項参照)ある程度前から発港に停泊しているため、トラックが早めに発港へ到着するケースでは積み時間の遅れを一定程度吸収できるものの、輸送前半では目標値を大きく下回ることとなる。

ただし、(a)～(d)で遅れの程度と発生の可能性、改善に必要なコストはそれぞれ異なるため相互比較は出来ない。いずれにせよ上記のように輸送シミュレーションによる事前の定量的な影響評価は可能であり、改善目標を立て準備を進める上で有益である。

Fig. 18 Delay of Various Factors and Progress Rate.

²⁶ 物資充足率・トラック資源削減等の何をどの程度重視して k を決めるのかは、その時点での被災・備蓄状況、復旧進捗見込み、支援物資/ト

ラック輸送資源調達見込み等から総合的に判断される。

(4)貨物 OD

これまでの評価では貨物発地を東西に分割し、発着地・輸送量の組合せ(以下、貨物 OD(Origin-Destination))は固定していたが、実際は多様なパターンがありうる。全てのケースを検討することは不可能であるため、ここでは発着地及びその間の輸送量の組合せの最も基本的と思われるパターンを評価する。

ここで着貨量は中央防災会議の推定値をもとにしており基本的には変わらない。そこで県ごとの発貨量を Fig.19 のように変化させる。県ごとの発貨量が変化すると、西から順に発着地ペアを割り当てているため、発着地の組合せ及びその間の輸送量の組合せが変化する(付録2 参照)。

具体的には、基本ケースでは発貨量を県ごとの人口に比例させていたのに加え、Fig.19(a)のように①人口の2/3 乗に比例させたもの、及び②1/3 乗に比例させたものを想定する。基本ケースでは東京・埼玉に発貨物が集中していたのが、相対的に地方へと分散するようになる。なお①より②の方が地方への分散の程度が大きい。

また、③西側発地の総発貨量を東側の倍にして発地内の各县で等分したもの、④東側発地の総発貨量を西側の倍にして発地内で等分したものを想定し、Fig.19(b)に示す。

基本ケースと①②は(相対的には)中央重点配置と地方分散配置を意味し、③は西日本重点配置、④は東日本重点配置を意味する。貨物 OD の基本的なバリエーションと言える。

Fig.19 Setting the Departure Volume Pattern.

Fig.20 に充足率の推移、Table 7 にトラック走行距離の評価結果を示す。Table 7 では比較用として、貨物を陸路のみで輸送した場合のトラック走行距離を付記した。

充足率の推移を見ると、Fig.20 (a)~(d)いずれのケースでも基本ケースと同様、平均的にはほぼ目標(点直線)に間に合って輸送が進展する。

また、トラック走行距離を見ると、いずれのケースでも(a)

÷(b)欄の値が5~6割程度となっており、トラック資源の削減に大きな効果を持つことが分かる。

4種のバリエーションのいずれでも船併用輸送が間に合い、トラック資源の削減にも有益であった。多様な OD に対しても海陸併用輸送が大きな効果を持つと期待できる。

Fig. 20 Departure Volume Pattern and Progress Rate.

Table 7 Departure Volume Pattern and Truck Travel Distance.

発貨物の設定	船併用			(参考) 陸路のみ
	a)合計 a)÷b)	平均	標準 偏差	b)合計
人口に比例	2,664,498 (53%)	446	178	5,019,077
人口の2/3乗に比例	2,492,978 (53%)	417	182	4,732,582
人口の1/3乗に比例	2,280,393 (52%)	382	157	4,409,037
西側に重点配置	2,110,903 (61%)	355	189	3,457,405
東側に重点配置	2,238,948 (47%)	408	129	4,756,760

[km]

5.2.3 陸路ネットワーク破断

海路併用輸送が持つ冗長性の程度を見るため、陸路ネットワークが破断した場合を想定してその影響を見る。具体的には、Fig.1のうち、脆弱な個所の1つであるb)を延長したb')において主たる道路が有用性を喪失し、それを境に支援物資の陸路輸送が不可能となった状況を想定する。その際は、破断帯を越えるために海路併用輸送を行うこととなる。

ここで破断をまたぐ海陸併用輸送は、迅速性を優先するために、最短距離ではなく最短時間となるよう経路を決めるとする。すなわち陸路及び海路の移動時間と荷役時間の合計が最短時間となる経路を選択する²⁷。経路選択にあたっては、簡単化のため、乗船以降の出航待ち時間は考慮しない。

結果を Fig.21 に示す。基本ケースと比べ、充足率の進展は少し早まっている。破断が無くとも元々海路を利用する貨物、即ち最短陸路距離の航路を選ぶはずだった貨物も総輸送時間最短となる海陸併用経路を選択したためと解釈できる。

Table 8 はトラック走行距離を示す。迅速性を優先するため、発着港までの陸路距離が伸びたため(輸送速度が遅く時間のかかる長い航路は選ばれづらくなる)、トラック走行距

²⁷ 当初予定通りに最短陸路距離の経路の航路を利用するという考えもあるが、ここでは、船が急遽利用できなくなる等の更なる不測

の事態が生じた際(他の航路/便を探す必要がある)に備え、念のため最短時間となる経路を選択するという想定をとる。

離は増加している。

Fig.22 は船の消席率である。破断を跨ぐ貨物が最短時間経路をとるようになったため、航路距離の長い新潟発川内・博多・境着の便の消席率が減り、破断を跨ぎつつも航路距離の短い金沢発境・博多着の便の消席率が増加している。例えば金沢発舞鶴便のような、破断を最短で跨ぐような航路があれば多くの貨物が利用したと考えられる。

取り上げた計算は1例のみではあるが、被災地域中央付近での陸路破断という極めて重大な事象であり、それに対し十分な冗長性が示された。海陸併用輸送では陸路破断のような輸送上重大な事象に対しても高い対応力を期待できる。

Fig. 21 Progress Rate (Overland Network Breakage).

Table. 8 Truck Travel Distance (Overland Network Breakage).

発貨物量の設定	合計	平均	標準偏差
基本ケース	2,664,498 (100%)	446	178
道路破断	2,923,215 (110%)	489	232

[km]

Fig. 22 Voyage Attendance Rate (Overland Network Breakage).

5.3 輸送シミュレーションによる海路の設計

これまで Table 1 に記載の全ての航路を利用可能に設定して計算を行ってきた。しかし運用上は、事前の OD 調査を基にしたシミュレーション結果によって設定する航路を絞っておき、それらを対象に発災前に必要な準備・訓練を行い、

発災後は実際の貨物 OD やその他の状況を基に航路と便数を決定する。

(1)低消席率航路の廃止

基本ケースの輸送シミュレーション結果から(Fig.13 参照), 貨物量が少ないため、苦小牧発伏木富山着、金沢発川内着、金沢発舞鶴着、新潟発川内着及び、貨物の無かった航路は全て廃止し7航路に集約する。廃止した航路を使っていた貨物は他の航路に流れるか、利用可能な航路がなければ陸路のみの輸送となる。後者の場合、トラックで運ばばむしろ輸送は早くなるため不利とはならない。

(2)低消席率航路の出航頻度低減

ある程度の貨物はあるものの、消席率が低い金沢発境着、苦小牧発常陸那珂着、新潟発博多着の便の出航間隔を 6h から 12h 間隔へと延ばして減便する。この場合、貨物の到着は最大 6 時間遅れる。

(3)高消席率航路の出航頻度増加

消席率が 100%である新潟発舞鶴便を当初 6h 間隔だったのを 3h 間隔に増便して消席率を 100%未満に抑える。この場合、次便以降まで待っていた貨物の到着が早まる。

Fig. 23 Progress Rate (Modified Route and Schedule).

Table 9 Truck Travel Distance (Modified Route and Schedule).

発貨物量の設定	合計	平均	標準偏差
基本ケース	2,664,498 (100%)	446	178
航路・ダイヤ調整済	2,679,617 (101%)	449	179

[km]

Fig. 24 Voyage Attendance Rate (Modified Route and Schedule).

Fig.23は充足率の推移を示す。基本ケースより進展が早くなっており、またばらつきが少なくなっている。これは(2)により到着が遅れる効果より、(3)により到着が早まる効果が大きいためである。

Table 9はトラック走行距離を示す。(1)の効果により距離はわずかに増加したものの、ほぼ同程度の値である。

消席率をFig.24に示す。(1)(2)の効果により低すぎる消席率の航路はなくなり、また(3)の効果により100%を超える消席率の航路もなくなっている。必要な船は計59隻である²⁸。

このように輸送シミュレータを用いることであらかじめ航路を設計することが可能である。利用する航路はほぼ決まっていることから、設計後は必要な準備・訓練が可能となる。

5.4 考察

本章では日本海側フェリー/RORO 船隊輸送を想定し、輸送シミュレータによる評価を行った。各事例による結果及び考察は以下のようにまとめられる。

①充足率の時間推移

海路に設計を施したFig.23が基本ケースの改善版となる。結果を見ると、平均充足率は輸送初期には目標進捗と同程度であり、それ以降は十分に目標進捗を上回る。広域拠点によっては目標進捗を下回るものもあるが、発地を近くに移動するなどばらつきを縮小するよう調整することは可能である。

なお、本評価では、陸路移動所要時間を各区間の距離を速度で割ったものの合計として求めている。これは長距離輸送時にドライバが2名乗車することを前提としたものであり、1名乗車の場合は連続運転時間最大4時間・運転時間は2日間平均で1日9時間以内など各種制約があるため²⁸、充足率の進展はこれより遅くなる。一方、海路利用の場合はドライバが乗船しても休息中に長距離を移動でき、貨物発地一発港間・着港一貨物着地間はそれぞれ平均200km強となり、ドライバ1名の乗車であっても休憩等による時間の増加はわずかとおり有利である。

②トラック輸送資源の削減

トラック燃料・車両・ドライバ等のトラック輸送資源を大幅に削減することが出来る。

なお、ドライバはRORO船で最大12名しか運べないことから、フェリーを優先的に使用したり、着港側で別ドライバを手配したりする等の対策が必要となる。10トントラックを無人航送する場合、震災時は着港が業務上関係のある地域でないことが多いと考えられるため、ドライバを円滑に手配するにはマッチングシステム等の何らかの仕組みを用意しておく必要がある。コンテナやトレーラを用いれば、業務としてコンテナ・トレーラ輸送を行っている業者へ依頼すれば

よいため、着地側でのドライバ(トラクタ)手配は容易となる。
③海上輸送の実現性

各航路は発災後30時間後を初便とし、出航間隔は6時間を基本に3~12時間と設定した(消席率は100%を超えず、また過少ではない値となる)。これは本研究で想定している大規模港にとっては複数のバースを用いれば今後の施設整備や訓練等によって実現可能な値である。

なお、貨物発着地の組合せが大きく変わらない場合、利用される可能性のある航路は限定される結果となった。このため、定期的な発着地調査を基に、あらかじめシミュレーションにより有望な航路を選定し、体制整備や訓練をしておくことが可能となる。

④迅速性とトラック輸送資源削減の調整

輸送シミュレーションで海路選好係数を変化させて計算する事で、輸送の基本性能であり、かつトレードオフの関係にある迅速性とトラック資源の節約程度を調整できる。基本性能を決めるための調整対象が限られるため、発災後の迅速な意思決定・多数の関係者への周知・行動開始等を行い易い。

なお、実施に際し、仮に船の予約連絡が出来なかったり、船の用意ができないなど想定船の利用が出来ない場合は、各トラックの判断で陸路直行に切り替えれば混乱は少ない。

⑤陸路ネットワーク破断の影響

被災状況によっては陸路ネットワークが破断する可能性がある。解析例では、それでも平均充足率の推移は大きく影響されず、基本ケースと同程度の進捗を確保可能であった。

⑥輸送シミュレーションの利用

支援物資輸送は関係者が多数かつ多方面に渡るため、新しい輸送システムを立ち上げる際に具体的効果が不明だと着手しづらい。輸送シミュレータの分析により、あらかじめ定性・定量的な効果が分かることで大規模な検討に着手しやすくなる。輸送シミュレーションは、体制立上げ、準備・訓練及び発災後の詳細計画作成等の各段階において有用である。

以上から、1章末尾で述べた支援物資の充足については①、トラック輸送資源の削減については②、海上輸送の実現性については③となり、更には④~⑥のメリットにより、日本海側フェリー/RORO 船隊輸送はトラック輸送に対する冗長的輸送手段として非常に有用と考える。

6. 結 言

南海トラフ地震は、極めて広域かつ同時多発的に被害を及ぼすため、陸路のみによる輸送や被災港を用いた補完的な海上輸送だけでは震災後4~7日に必要となるプッシュ型輸送を十分に行えない可能性がある。そこで本論文では、冗長的輸送手段として日本海側フェリー/RORO 船隊輸送を取り上

²⁸ 前報⁸⁾で求めた発災後利用可能な隻数(脚注17)の範囲内である。

げ、その必要性について定性的に論じると共に、シミュレーションにより性能を定量評価した。その結果、上記輸送は有用な基本性能及び特性を持つことが分かった。

南海トラフ地震後の多様な状況においても災害支援物資の輸送を円滑に行う必要がある。日本海側フェリー/RORO船隊輸送の検討を進めることは極めて有意義と考える。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K04864 の助成を受けたものである。記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Japan Meteorological Agency: Information of Nankai Trough earthquake, August 2020 (in Japanese), Retrieved August 2020 from <https://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/nteq/>.
気象庁：南海トラフ地震に関連する情報 2020.8, <https://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/nteq/> , 参照 2020.8.
- 2) Central Disaster Prevention Council: Plan for specific emergency measures activities in the Nankai Trough earthquake, May 2020 (in Japanese).
中央防災会議：南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画, 2020.5.
- 3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Conducted marine transportation training for transporting disaster relief supplies in preparation for the Nankai Trough earthquake, January 2017(in Japanese), Retrieved June 2021 from https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo10_hh_000060.html.
国土交通省：南海トラフ地震に備え、災害支援物資輸送の海上輸送訓練を実施, 2017.1, https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo10_hh_000060.html, 参照 2021.6.
- 4) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Report of the Study Group on Specific Measures for Facilitating the Utilization of Ships in the Event of a Disaster, April 2015(in Japanese), Retrieved June 2021 from https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk3_000037.html.
国土交通省：災害時の船舶活用の円滑化の具体的方策に関する調査検討会 報告書, 2015.4, https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk3_000037.html, 参照 2021.6.
- 5) Inoue, K.: Ship Utilization at a Disaster, Maritime Transportation Research, Vol.64, 2015 (in Japanese).
井上 欣三：災害時における船舶活用, 海事交通研究, Vol.64, 2015.
- 6) Ono, K., Tatsumi, J., Nakao, T., and Shimakura, Y.: Possible Mobilization of Long-Distance Ferry for Emergency Relief Logistics after Large-Scale Disasters, Vol.28(1), 2015 (in Japanese).
小野 憲司, 辰巳 順, 中尾 健良, 嶋倉 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, 日本沿岸学会, Vol.28(1), 2015.
- 7) Akakura, Y., and Ono, K.: The required specifications of the ship type and the corresponding port facilities for emergency supplies in the event of a large-scale disaster, Proceedings of Civil Engineering Planning, Vol.53, 2016 (in Japanese).
赤倉康寛, 小野憲司：大規模災害時の緊急物資等支援船の船型及び対応港湾施設の必要諸元, 題 53 回土木計画学発表会 講演集, Vol.53, 2016.
- 8) Matsukura, H., Aratani, T and Majima, T.: Assessment of Ship Availability for Transporting Relief Supplies after the Nankai Trough Earthquake, Journal of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.32, 2021 (in Japanese).
松倉 洋史, 荒谷 太郎, 間島 隆：南海トラフ地震における支援物資輸送への船舶の利用可能性評価, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.32, 2020.
- 9) Onishi, Y., Kuwata, Y.: A Study on Emergency water Delivery in Wide-area Earthquake Disaster - A Case Study of the Great East Japan Earthquake Disaster -, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.64.4, 2012(in Japanese).
大西 洋二, 鍛田 泰子：広域災害時の応急給水能力に関する一考察－東日本大震災の事例－, 土木学会論文集, Vol.64.4, 2012.
- 10) Tanaka, M.: Water and Human Beings: from the Physiological Viewpoint, Journal of Human and Living Environment, Vol.26.2, 2019(in Japanese).
田中正敏：水とヒト:生理的立場から, 人間と生活環境, Vol.26.2, 2019.
- 11) Fukuwa, N.: In Order not to End Japan with the Coming Earthquake, JIJI Press,Ltd., ISBN-13:978-4788716087.00(in Japanese).
福和 伸夫:必ずくる震災で日本を終わらせないために, 時事通信社, 2019.3, ISBN-13:978-4788716087.00.
- 12) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: White Paper 2020 of Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2020.8(in Japanese), Retrieved June 2021 from <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/data/html/ns007020.html>.
国土交通省：国土交通白書 2020 資料編, 国土交通白書 2020, 2020.8, <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/data/html/ns007020.html>, 参照 2020.8.
- 13) Chigira, M.: What We Learned from Recent Geohazards, DPRI Annuals, No.63.A, 2020(in Japanese).

- 千木良 雅弘: 近年の地質災害から学んだこと, 京都大学防災研究所年報, No.63.A, 2020.
- 14) Hamihara, N., Sato, T. and Suzuki, M.: Classification of Causes about Deep-seated Landslide and Those Characteristics of Geographical Predisposition, Journal of Japan Society of Engineering Geology, Vol.60.2, 2019.
 神原規也, 佐藤丈晴, 鈴木素之: 深層崩壊の誘因による分類と地形的素因の特徴, 日本応用地質学会論文集, Vol.60.2, 2019.
 - 15) Ministry of Health, Labour and Welfare: Records of mainshock, aftershocks and induced earthquakes, Final report on damage to water facilities after the Great East Japan Earthquake, March 2013(in Japanese).
 厚生労働省: 本震・余震および誘発地震の記録, 東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書, 2013.3. <https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/houkoku/suidou/dl/130801_s01.pdf>, 参照 2021.6.
 - 16) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Record of Heavy Rain in July 2018, July 2018(in Japanese), Retrieved July 2021 from <https://www.mlit.go.jp/common/001248491.pdf>.
 国土交通省: 平成 30 年 7 月豪雨について, 2018.7. <https://www.mlit.go.jp/common/001248491.pdf>, 参照 2021.6.
 - 17) Central Disaster Prevention Council: Damage estimates for a huge Nankai Trough earthquake (building damage and human suffering), June 2019 (in Japanese).
 中央防災会議: 南海トラフ巨大地震の被害想定について(建物被害・人的被害), 2019.6.
 - 18) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Guidelines for Studying Disaster Prevention Measures in Preparation for Various Forms of Nankai Trough Earthquakes (Ver.1, partially modified on May 2021), May 2021(in Japanese), Retrieved July 2021 from http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline2.pdf.
 内閣府: 南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン【第 1 版】(令和 3 年 5 月一部改訂), 2021.5. http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline2.pdf, 参照 2021.6.
 - 19) Yano, H.: A Study on Public-Private Partnership in Disaster Relief Supplies Logistics, September 2019(in Japanese), Retrieved July 2021 from <https://www.mlit.go.jp/kanto/content/000164252.pdf>.
 矢野裕之: 災害時支援物資物流における官民連携について考える, 2019.9. <https://www.mlit.go.jp/kanto/content/000164252.pdf>, 参照 2021.6.
 - 20) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Handbook for transporting relief supplies, opening bases, and operating the last mile, March 2019(in Japanese), Retrieved June 2021 from <https://www.mlit.go.jp/common/001282576.pdf>.
 国土交通省: ラストマイルにおける支援物資輸送・拠点開設・運営ハンドブック, 2019.3. <https://www.mlit.go.jp/common/001282576.pdf>, 参照 2021.6.
 - 21) Central Disaster Prevention Council: Nankai Trough Earthquake Disaster Prevention Measures Promotion Area / Nankai Trough Earthquake Tsunami Evacuation Measures Special Strengthening Area, March 2014(in Japanese), Retrieved June 2021 from http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough_chizu.pdf.
 中央防災会議: 南海トラフ地震防災対策推進地域・南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域, 2014.3. http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough_chizu.pdf, 参照 2021.6.
 - 22) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: National Road / Street Traffic Situation Survey 2015, March 2019(in Japanese), Retrieved June 2021 from <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>.
 国土交通省: 平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査, 2019.3, <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>, 参照 2021.6.
 - 23) Central Disaster Prevention Council: Average tsunami height list by municipalities by municipality <high tide>, August 2012 (in Japanese).
 中央防災会議: 市町村別平均津波高一覧表<満潮位>, 2012.8.
 - 24) Central Disaster Prevention Council: Summary of damage estimates and methods for the Nankai Trough mega earthquake - damage to lifelines, damage to transportation facilities, damage amount, etc., June 2019 (in Japanese).
 中央防災会議: 南海トラフ巨大地震の被害想定項目及び手法の概要 〜ライフライン被害, 交通施設被害, 被害額など, 2019.6.
 - 25) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: National land numerical information download Emergency transportation road, July 2015(in Japanese), Retrieved June 2021 from <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>.
 国土交通省: 国土数値情報ダウンロード 緊急輸送道路, 2015.7, <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>, 参照 2021.6.
 - 26) Majima, T.: MarinNet Editor, Retrieved July 2020.
 間島隆博: MarinNet Editor, 参照 2020.7.
 - 27) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Final report of the study group on utilization of ships during large-scale disasters, March 2014 (in Japanese).

国土交通省：大規模災害時の船舶の活用等に関する調査検討会最終報告，2014.3.

- 28) Ministry of Health, Labour and Welfare: Points of improvement criteria such as working hours of truck drivers, 2016(in Japanese), Retrieved June 2021 from <https://www.mhlw.go.jp/new-info/kobetu/roudou/gyousei/kantoku/dl/040330-10.pdf>.
厚生労働省：トラック運転者の労働時間等の改善基準のポイント，2016. <https://www.mhlw.go.jp/new-info/kobetu/roudou/gyousei/kantoku/dl/040330-10.pdf>, 参照 2021.6.

付 録

付録 1 トラック換算台数の概算

以下により輸送に必要なトラック台数を概算する.

(1)各品目の容積基準の原単位

ブッシュ型輸送期間の主たる輸送対象である基本 8 品目は包装まで含めると密度が低く、いわゆる容積勝ちの貨物である。そこでトラック台数に換算する際は容積を基準とする。

基本 8 品目の原単位を付表 1 に示す。これは文献 20)の図表 III-1-2 に記載されている、各物資をパレット上に高さ 120cm 程度積載し、2 段積み(高さ約 2.4m)とした場合の 1m²あたりの保管量を基に換算したものである。

ここで付表 1(A)は付表 2 の(a-1)(a-2)を合計したものであり、(E)は(e-1)と(e-2)の 3 倍を合計したものである((e-2)は(e-1)の 3 倍使うと想定)。また文献 20)と同様、食料はおにぎりやパン・カップラーメン等の日常生活用のものではなく、輸送や保管がしやすく栄養摂取効率の高いアルファ化米や非常食を想定している。

付表 1 基本 8 品目の容積基準原単位.

	2.4m ² の個数	m ³ /単位
(A)食料	(付表2より計算)	0.001127 m ³ /食
(B)毛布	120 枚	0.020000 m ³ /枚
(C)乳児用粉ミルク	653 kg	0.003675 m ³ /kg
(D)乳児・小児用おむつ	3,996 枚	0.000601 m ³ /枚
(E)大人用おむつ	(付表2より計算)	0.002068 m ³ /枚
(F)簡易トイレ	10,500 個	0.000229 m ³ /回
(G)トイレットペーパー	810 ロール	0.002963 m ³ /ロール
(H)生理用品	27,000 枚	0.000089 m ³ /枚

付表 2 食料及び大人用おむつ構成要素の容積基準原単位.

	2.4m ² の個数	m ³ /単位
(a-1)アルファ化米	4,200 個	0.000571 m ³ /個
(a-2)非常食(サバイバルフーズ等)	4,320 個	0.000556 m ³ /個
(e-1)介護用おむつ	1,944 枚	0.001235 m ³ /枚
(e-2)尿取りパッド	8,640 枚	0.000278 m ³ /枚

(2)10 トントラック 1 台の輸送可能量

ここではバンボディやウィングボディ等の箱型の荷室を持つ 10 トントラックを想定する。荷室の平均的な内寸は長さ 9.6m・幅 2.4m・高さ 2.6m 程度であることから²⁹、平均内容積を 60m³とし、また、容積基準の積載効率を 80%として 1 台あたり 48m³の貨物を輸送できるものとする。

(3)必要トラック台数の計算

付表 1 の各品目の原単位と、文献 2)別表 5-1 の広域拠点毎の輸送必要量をかけて物資の総容積を求め、更に 10 トントラック 1 台の輸送容量である 48m³で割ることで必要トラック台数を求める。広域拠点毎に少数点以下の台数は切り上げる。結果を付表 3 に示す。輸送に必要なトラック台数は合計 5,972 台である。

付表 3 広域拠点毎の必要トラック台数.

No.	府県名	広域物資輸送拠点名	8品目の総容積(m ³)	トラック台数(台)
1	神奈川県	県総合防災センター	820	18
2	山梨県	アイメッセ山梨	1,306	28
3	長野県	やまびこドーム	362	8
4	長野県	若里多目的スポーツアリーナ(ビッグハット)	14	1
5	岐阜県	岐阜メモリアルセンター	1,285	27
6	静岡県	キラメッセぬまづ	872	19
7	静岡県	県立愛鷹広域公園	966	21
8	静岡県	富士市産業交流展示場(ふじさんめっせ)	1,564	33
9	静岡県	静岡産業支援センター(ツインメッセ静岡)	7,555	158
10	静岡県	大井川農業協同組合農産物集出荷場	5,961	125
11	静岡県	県立小笠山総合運動公園(エコパ)	5,010	105
12	静岡県	浜松市総合産業展示館	10,121	211
13	静岡県	河津建設(株)資材倉庫	926	20
14	愛知県	愛・地球博記念公園	2,981	63
15	愛知県	豊橋市総合体育館	10,187	213
16	愛知県	中部トラック総合研修センター	14,098	294
17	愛知県	中小企業振興会館	20,588	429
18	愛知県	愛知県一宮総合運動場	9,998	209
19	三重県	三重県広域防災拠点(北勢拠点)	5,275	110
20	三重県	三重県広域防災拠点(中勢拠点)	6,415	134
21	三重県	三重県広域防災拠点(伊賀拠点)	4,504	94
22	三重県	三重県広域防災拠点(伊勢志摩拠点)	9,019	188
23	滋賀県	浅野運輸倉庫(株)第7号倉庫	854	18
24	滋賀県	センコー(株)守山PDセンター3号倉庫	1,481	31
25	滋賀県	日本通運(株)大津支店甲賀2号倉庫	178	4
26	京都府	舞鶴港拠点	121	3
27	京都府	山城総合運動公園	2,293	48
28	京都府	丹波自然運動公園	75	2
29	京都府	京都ハルスプラザ	5,213	109
30	大阪府	大阪府中部広域防災拠点	18,453	385
31	大阪府	大阪府北部広域防災拠点	5,687	119
32	大阪府	大阪府南部広域防災拠点	5,882	123
33	兵庫県	三木総合防災公園	2,430	51
34	兵庫県	西播磨広域防災拠点	584	13
35	兵庫県	但馬広域防災拠点	11	1
36	兵庫県	淡路広域防災拠点	838	18
37	兵庫県	阪神南広域防災拠点	1,294	27
38	兵庫県	丹波広域防災拠点(公園)	10	1
39	奈良県	県営競輪場	4,150	87
40	奈良県	吉野川浄化センター	555	12
41	奈良県	第二浄化センター	3,153	66
42	和歌山県	県立和歌山ビッグホエール	7,510	157
43	和歌山県	田辺スポーツパーク	3,504	73
44	和歌山県	新宮市民運動競技場(新宮市立佐野体育館)	1,201	26
45	和歌山県	橋本市運動公園(県立橋本体育館)	6,029	126
46	岡山県	岡山県総合展示場コンベックス岡山	6,349	133
47	岡山県	岡山空港貨物ターミナル	349	8
48	広島県	広島県防災拠点施設	2,989	63
49	山口県	消防学校	559	12
50	徳島県	県立防災センター備蓄倉庫屋内集配施設	9,247	193
51	徳島県	南部健康運動公園屋内多目的練習場	2,620	55
52	徳島県	鳴門総合運動公園陸上競技場バックスタンド	1,636	35
53	徳島県	野外交流の郷まぜのおか南部防災館	240	6
54	徳島県	阿波市交流防災拠点施設	310	7
55	徳島県	西部健康防災公園西部防災館別館	563	12
56	香川県	サンメッセ香川(大展示場)	7,936	166

²⁹ 国内でシェアの高い 10 トントラック製造会社のカタログ等から調査

付表3(続き) 広域拠点毎の必要トラック台数.

57	愛媛県	山根公園	3,656	77
58	愛媛県	石鎚山ハイウェイオアシス	3,589	75
59	愛媛県	愛媛県営総合運動公園	1,688	36
60	愛媛県	愛媛県国際貿易センター(アイテムえひめ)	5,807	121
61	愛媛県	宇和島市総合交流拠点施設(道の駅みま)	5,357	112
62	高知県	県立室戸広域公園	1,581	33
63	高知県	県立春野総合運動公園	8,508	178
64	高知県	県立青少年センター	8,243	172
65	高知県	宿毛市総合運動公園	2,396	50
66	熊本県	県産業展示場(グランメッセ熊本)	326	7
67	大分県	大分スポーツ公園	4,815	101
68	宮崎県	都城トラック団地協同組合	9,292	194
69	宮崎県	高千穂家畜市場	5,017	105
70	鹿児島県	霧島市公設地方卸売市場	175	4
71	鹿児島県	鹿児島市中央卸売市場青果市場	281	6
72	鹿児島県	串良町平和公園内ゲートボール場	106	3
合計			5,972	

付録2 発着地の組合せ

単純化した付表4,5のODを用い3.2.4項の発着地の組合せの作成手順を例示する(一般化した手順は3.2.4項を参照). 表のA~JはFig.5の貨物発着地である.

(1)東西に分割せず一体として運用

貨物OD例を付表4に示す. 発地A~Dはそれぞれ11,14,14,12個・計51個の貨物を保有し, 着地E~Jはそれぞれ9,8,9,9,7,9個・計51個の貨物を必要としている.

まずは最も西にある発地Aから最も西の着地Eへ貨物9個を割り当てる. 発地Aからは残りの貨物2個を, Eの次に西にある着地Fへ割り当てる.

次に, 着地Fの必要数は8個でありまだ充足していないため, 発地Aの次に西にある発地Bから残り6個を着地Fへ割り当てる. 発地Bは残りの貨物8個をFの次に西にある着地Gへ割り当てる.

以降, 残りの発地C, Dについても同様に割り当てる.

付表4 一体運用時の貨物の割り当て.

		貨物着地(広域拠点)						計
		E	F	G	H	I	J	
貨物発地	A	9	2					11
	B		6	8				14
	C			1	9	4		14
	D					3	9	12
	計	9	8	9	9	7	9	51

(2)東西に分割して運用

着地側の必要数を, 西側と東側に分割したのち, 独立に(1)と同様の操作を行う. まずは, 貨物OD例である付表5に示すように発地を東西に分割し, 必要輸送個数を割り振る.

次に最も西にある発地Aから最も西の着地Eへ貨物4個を割り当てる. 次に貨物4個をEの次に西にある着地Fへ, 残った貨物3個をFの次に西にある着地Gへ割り当てる.

次に, 着地Gの必要数は5個でありまだ充足していないため, 発地Aの次に西にある発地Bから残り2個を着地Gへ割り当てる. 発地Bは貨物4個を着地Hへ, 貨物3個を着地Iへ, 残りの貨物5個を着地Jへ順に割り当てる.

東側発地である発地C, Dについても同様に割り当てる.

付表5 東西分割運用時の貨物の割り当て.

			貨物着地(広域拠点)						計
			E	F	G	H	I	J	
貨物発地	西側	A	4	4	3				11
		B			2	4	3	5	14
		小計	4	4	5	4	3	5	25
	東側	C	5	4	4	1			14
		D				4	4	4	12
		小計	5	4	4	5	4	4	26
合計		9	8	9	9	7	9	51	

付録3 発地非分割時の海陸併用輸送と海路選好係数

発地を東西に分割せず海陸併用輸送を行った場合の結果を付図1に示す. 発地の設定を除き, 基本ケースと同じ設定である. また, 基本ケースの結果を点線で付してある.

結果を見ると基本ケースよりも充足率の進展が遅れている. これは新潟発舞鶴着の航路で消席率100%が発災後132h(5.5日後)目まで続き, 計算上, 船による輸送が次便以降へと先送りとなった影響が大きい.

実運用上はあらかじめ多頻度出航できるよう船を用意することとなるため, 5.3節と同様に海路設計を行った結果を付図2(a)に示す. 比較のため, 基本ケース(発地を東西に分割して海路を併用して輸送)に対して海路設計を行った結果を付図2(b)に示す.

平均進捗は付図2(a)(b)で同程度となったものの, (a)は(b)に比べて広域拠点毎の進捗のばらつきが大きい. ばらつきを減らす調整は難しくなる.

付図1 海陸併用で輸送・発地一括.

付図2 (参考)海陸併用で輸送・発地一括.