

交通運輸技術開発推進制度
研究成果報告書
(ダイジェスト版)

大規模災害時における海上・航空輸送に関わる
ボトルネック解析

令和4年3月
(海上・港湾・航空技術研究所)

I. 研究開発成果の要約

作成年月	令和4年3月
研究課題名	大規模災害時における海上・航空輸送に関わるボトルネック解析
研究代表者名	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 荒谷 太郎
研究期間	令和元年10月15日～令和4年3月31日
研究の目的	わが国は災害大国であり、近年では、2011年に発生した東日本大震災をはじめ、2016年熊本地震、2018年西日本豪雨など地震に限らず、水害や台風等あらゆる災害が起きている。過去に発生した大規模災害では、自衛隊をはじめ消防や警察、海上保安庁などあらゆる組織が被災自治体に入り、救援活動を行っているが、東日本大震災のように被災範囲が広域に及んだ場合、傷病者・孤立者等の救援需要に対して供給が追いつかない状況が発生する。このため、陸・海・空が連携をして救助・救援活動に当たる必要がある。 本研究課題は、過去の災害の教訓を活かせるように、大規模災害時に発生し得る輸送システムの混乱などさまざまなシナリオ群を事前に確認して知見を蓄積し、災害対応の準備が十分か、どのようなボトルネックが発生しそうかを事前に発見できるシミュレータを開発する。シミュレーション結果を基に、訓練担当者等と意見交換を通じて、検討すべき要件、課題や問題点について整理を行い、防災計画の検討に資することを最終目標とする。
研究成果の要旨	本研究では、過去の災害の教訓を活かせるように、大規模災害時に発生し得る輸送システムの混乱などさまざまなシナリオ群を事前に確認して知見を蓄積し、災害対応の準備が十分か、どのようなボトルネックが発生しそうかを事前に発見できるシミュレータの開発を目的としている。 令和2年度は、主にボトルネックが発生しそうかを事前に発見できる傷病者輸送シミュレータの本開発、大規模災害発災直後に空港へ集中する救援機の駐機スペース等を設定し、混雑状況のシミュレーションを基に受け入れ能力等を検討できるシミュレータの開発、大規模災害時に船舶が活用できる港湾を特定できるよう、岸壁の供用可能率の算出等を実施し考察を行った。
知的財産権 取得状況	例) 特許出願 0 件 著作権登録 0 件
研究成果発表実績	論文発表：国内 1 件、海外 0 件 口頭発表：国内 4 件、海外 1 件 その他 :

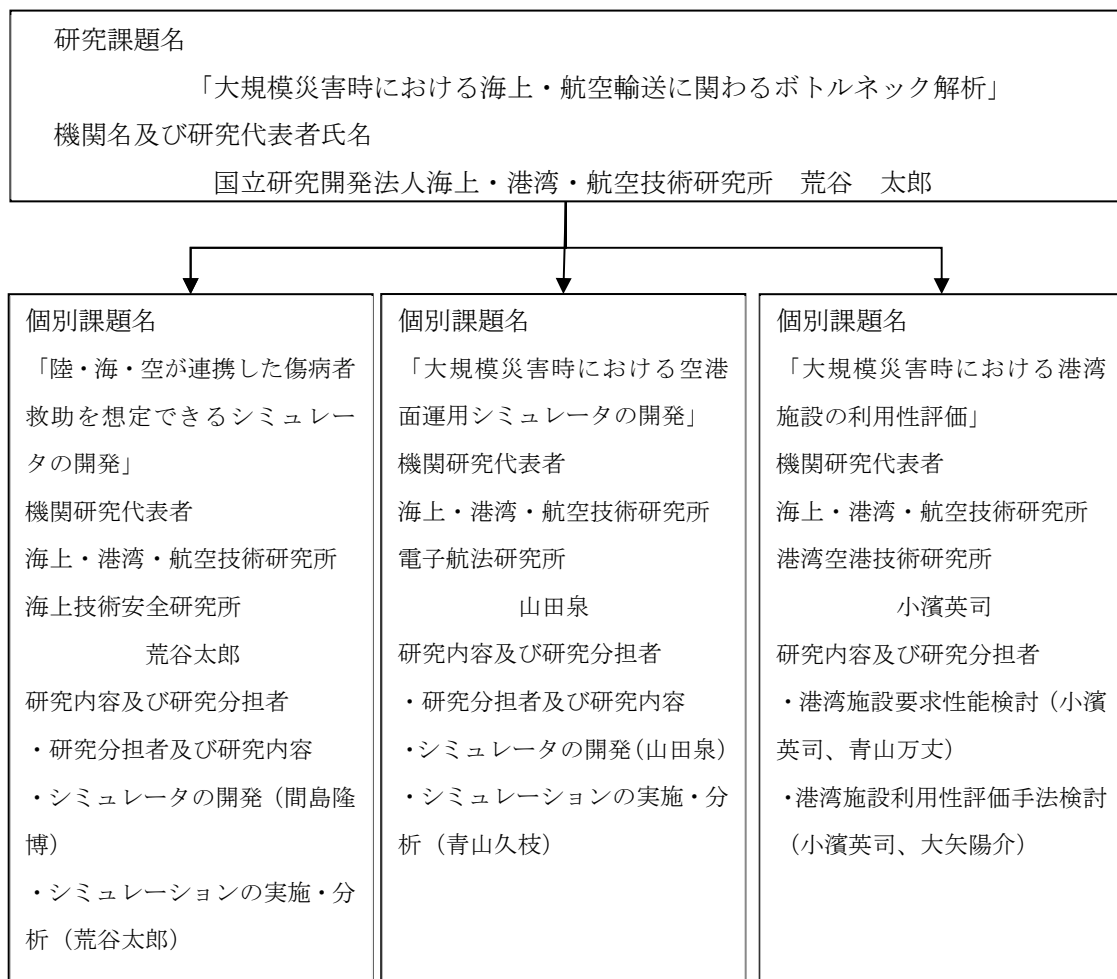
II. 研究開発の目的と実施体制

(1) 研究開発の目的

本研究課題は、過去の災害の教訓を活かせるように、大規模災害時に発生し得る輸送システムの混乱など様々なシナリオ群を事前に確認して知見を蓄積し、災害対応の準備が十分か、どのようなボトルネックが発生しそうかを事前に発見できるシミュレータを開発する。シミュレーション結果を基に、訓練担当者等と意見交換を通じて、検討すべき要件、課題や問題点について整理を行い、防災計画の検討に資することを最終目標とする。

(2) 研究実施体制

本研究は、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所を総括研究機関とし実施した。なお、研究実施に当たっては、海上・港湾・航空技術研究所内に組織されている、海上技術安全研究所、電子航法研究所、港湾空港技術研究所と共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



III. 研究開発の成果

1. 序論

わが国は災害大国であり、近年では、2011年に発生した東日本大震災をはじめ、2016年熊本地震、2018年西日本豪雨など地震に限らず、水害や台風等あらゆる災害が起きている。過去に発生した大規模災害では、自衛隊をはじめ消防や警察、海上保安庁などあらゆる組織が被災自治体に入り、救援活動を行っているが、東日本大震災のように被災範囲が広域に及んだ場合、傷病者・孤立者等の救援需要に対して供給が追いつかない状況が発生する。このため、陸・海・空が連携をして救助・救援活動に当たる必要がある。

本研究課題は、過去の災害の教訓を活かせるように、大規模災害時に発生し得る輸送システムの混乱など様々なシナリオ群を事前に確認して知見を蓄積し、災害対応の準備が十分か、どのようなボトルネックが発生しそうかを事前に発見できるシミュレータを開発している。

2021年度は、これまで作成してきた各種シミュレータの改修および港湾の供用可能率の精緻化、また傷病者輸送シミュレータを用いた全体的な評価を行った。

2. 傷病者輸送シミュレータ

2.1. システム構成の概要

本研究では、2019年度および2020年度において傷病者輸送シミュレータを開発してきた。これまで開発してきた傷病者輸送シミュレータは、PCのスタンドアロンで動くものであった。2021年度は、利用を円滑に行えるようにクラウド上へ実装した上で、ユーザーインターフェ이스の改良を行った(図1)。「傷病者輸送シミュレータ」で使用するデータはcsvファイルに保存されている。そのファイルのデータ構造は以下の通りで、「入力ファイル」と「出力ファイル」に大きく2つに分かれている(図2)。画面からは「入力ファイル」の内容を入力・設定し、シミュレーション実行により「出力ファイル」が生成される。

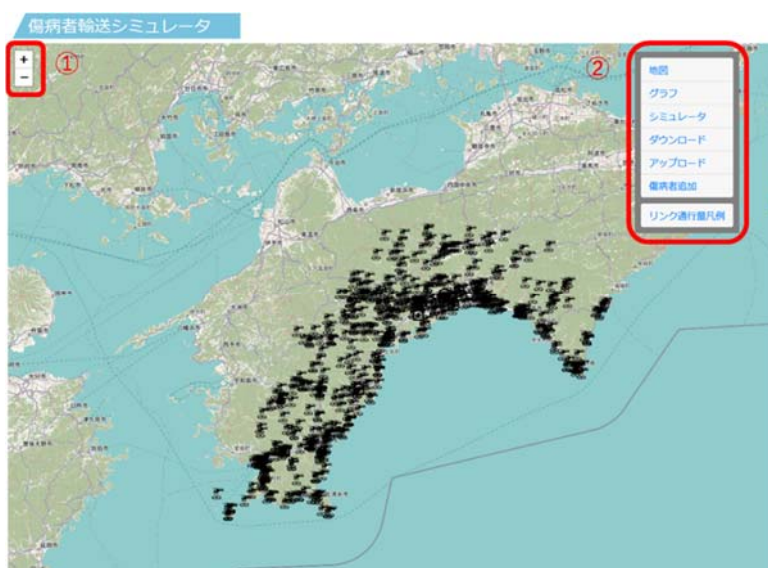


図 1 システムの全体図

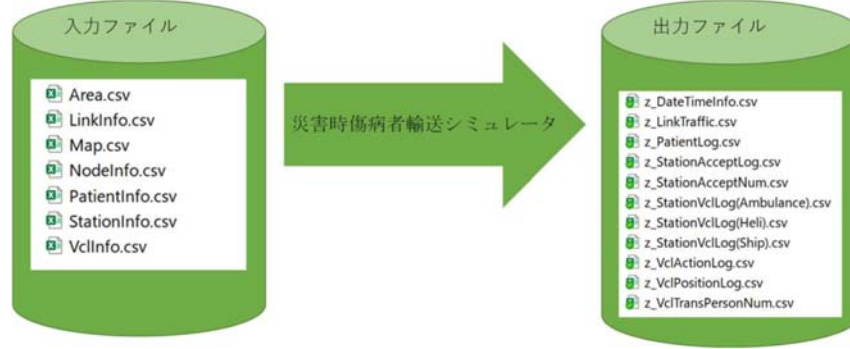


図 2 システムのデータ構造

2.2. マルチエージェントシステムを用いたシミュレータ

開発したシミュレータは、災害時における傷病者（以下、要救助者）を輸送機材（車両、ヘリ、船舶等）により病院へ輸送する過程を再現する。時間の経過による周囲の環境の変化に応じて最適な輸送方法を選択するために、シミュレータのアルゴリズムにはマルチエージェントシステムを採用している。マルチエージェントシステムでは、自律して行動する個々のエージェントが定められた行動ルールの中で、周囲の環境による影響を踏まえた上で最適な行動を選択し行動する。また、エージェントの選択した行動により、環境が変化するためそれぞれのエージェントが環境を通じて相互作用を働きながらシミュレーションが進行する。本研究では、輸送機材 1 つ 1 つを独立したエージェントとして行動ルールを定義し、次節で述べるミッションの決定過程に従い要救助者の輸送を行う。

2.3. ミッションの決定過程

輸送機材の 1 つのミッションは、現在地から要救助者の救助要請地点へ移動し、要救助者を救助し、災害拠点病院（以下、医療拠点）へ輸送するまでとする。ミッションには、要救助者および輸送先医療拠点の選定、他の輸送機材との連携の有無などの判断が含まれ、以下の流れで最終決定される。

①最短時間で輸送できる要救助者の選定

要救助者および輸送先医療拠点は、式(1)および式(2)で定義されるミッション M の所要時間 $T_{t,p,s}$ の最小値 TM を満たす組み合わせで決定される。

$$T^M = \min(T_{t,p,s}) \quad (1)$$

$$T_{t,p,s} = \{TT_{tp} + WT_p + RT_p\} + \{TT_{ps} + WT_s + DT_s\} \quad (2)$$

ここで、 TT_{tp} 、 TT_{ps} はそれぞれ輸送機材の現在地 t から救助地点 p までの移動時間と救助地点 p から輸送先医療拠点 s までの移動時間を示しており、各輸送機材に予め設定された通行速度と該地点間の距離により求められる。 WT_p 、 WT_s はそれぞれ救助地点 p と医療拠点 s における待機時間である。救助地点および医療拠点では同時に作業可能な輸送機材の数を設定しており、上限を超える輸送機材が集中した場合は待ち行列が発生する。待ち行列による待機時間はミッション決定時の各地点の待ち行列により決定する。 RT_p 、 DT_s はそれぞれ救助地点および医療拠点での要救助者の乗降時間であり、本研究では一律に 10 分と設定した。

②輸送機材の連携輸送について

連携輸送とは、1つのミッションの中で複数の輸送機材が利用されることを意味しており、連携輸送には式(2)で求めた所要時間に加え、式(3)で示す追加時間 T_{add} が生じる。

$$T_{add} = \{LT + WT_{add} + DT_{add} + RT_{add}\} \quad (3)$$

ここで、 LT は連携輸送を実施するための乗り換え地点までの移動時間であり、本来の輸送ルート上に存在する場合は 0 となる。 WT_{add} は乗り換え地点での待機時間を示している。 DT_{add} 、 RT_{add} はそれぞれ輸送機材からの乗降時間であり、 RT_p 、 DT_s 同様に一律 10 分と設定した。従って、追加時間 T_{add} より連携輸送による時間的メリットが上回る場合、連携輸送が実行される。具体的には、車両⇔ヘリや車両⇔船舶などの異種機材間において実施される。

3. 傷病者輸送シミュレータを用いた評価・分析

本章では、開発したシミュレータを活用した分析事例について、紙面の都合上、静岡県を事例として示すこととする。なお高知県の事例について、別途参考文献¹を参照頂きたい。

3.1. 静岡県におけるシミュレーションの前提条件

本ケースでは、[静岡県版] 南海トラフ巨大地震による被害想定²に記載されている被災想定、死者数約 9,100 人、重傷者数 30,900 人のケースを用いた。シミュレーション期間は発災後 5 日間の 120 時間とした。重傷者は、43 市区町内に被災想定数の重傷者がランダムに発生し、救助要請日時は発災後 24 時間にランダムに発生することとした。静岡県内の救助体制として、ヘリコプター 3 機、車両 140 台、航空搬送拠点 3 カ所、災害拠点病院 23 カ所を設定した。道路の通行速度は、全国道路・街路交通情勢調査（平成 27 年度）³を参考にすると、静岡県における混雑時の旅行速度は、高速道路 88.3km/h、一般道 29.3km/h であった。そこで、シミュレータ上における一般道・高速道路の制限速度を一般道：30km/h、高速道路：80km/h と設定した。

シミュレーションにおける救助方法については、ヘリ、車両、船舶については、所属する各市町村に待機させ、車両については、所属する地域の救助を担当することとした。ヘリ、船舶については静岡県全体の救助を担当することとした。なお所属する地域については、医療救護計画における医療圏に基づいた 8 区分（図 3）とし、車両についてはそのエリア内にある災害拠点病院へ輸送することとする。救助は、救助要請順に①待機箇所から重傷者発生場所に向かう、②救助、③病院へ搬送、を行う。なお病床が満床になった場合は、要救助者を被災地外の病

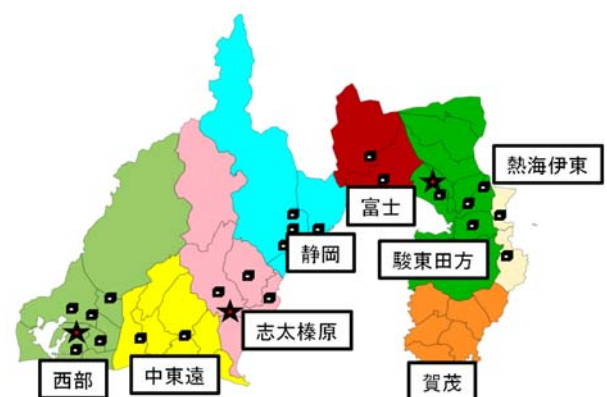


図 3 医療救護計画における 8 区分

¹ 中山恵介,荒谷太郎,間島隆博：高知県におけるシミュレータを用いた傷病者の輸送計画に関する検討, 土木学会論文集, 第 80 巻 5 号, 2024, 5 月. <https://doi.org/10.2208/jscej.22-00131>

² 静岡県 HP：静岡県第 4 次地震被害想定関連資料、
<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/shiryuu.html>（2022 年 3 月 3 日確認）

³ 国土交通省：全国道路・街路交通情勢調査（平成 27 年度），
<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/index.html>（2022 年 3 月 3 日確認）

院へ搬送するため SCU（航空搬送拠点）に運ぶこととした。なお、各地域にいる要救助者数は、表 1 の通りである。

3.2. 静岡県におけるシミュレーションの実施結果

南海トラフ L1 予知なし重傷者約 3 万人ケースにおいて、シミュレーションを実施した結果を図 4 に示す。図 4 は、横軸に病床数と時間経過ごとの病床数を、縦軸に各病院を示している。この結果をみると、23 の災害拠点病院のうち 5 病院において、発災後 72 時間までに病床数が満床となり、西部や中東遠エリアでその傾向が多かった。図 5 は、輸送機材ごとの救助人数を示している。賀茂エリアでは、輸送距離が長く、1 台の車両で 1 日に 5～6 人程度の輸送となった。静岡は 1 台の車両で 1 日に 11 人～19 人となり、内陸に被害が広がると車両の稼働率が落ちる傾向となった。

図 6 に示す救助率の時系列変化をみると、志太榛原は、要救助者数が多いにも関わらず静岡や駿東田方と比較して輸送機材が少ないことがわかる。そのため、救助完了が早い駿東田方や富士から応援車両等を検討する等の対応が必要であると考えられる。

表 1 静岡県における要救助者数

Area	要救助者数 (人数、%)	
賀茂	270	0.87
熱海伊東	40	0.13
駿東田方	400	1.29
富士	400	1.29
静岡	5100	16.5
志太榛原	7120	23.0
中東遠	9500	30.7
西部	8070	26.1

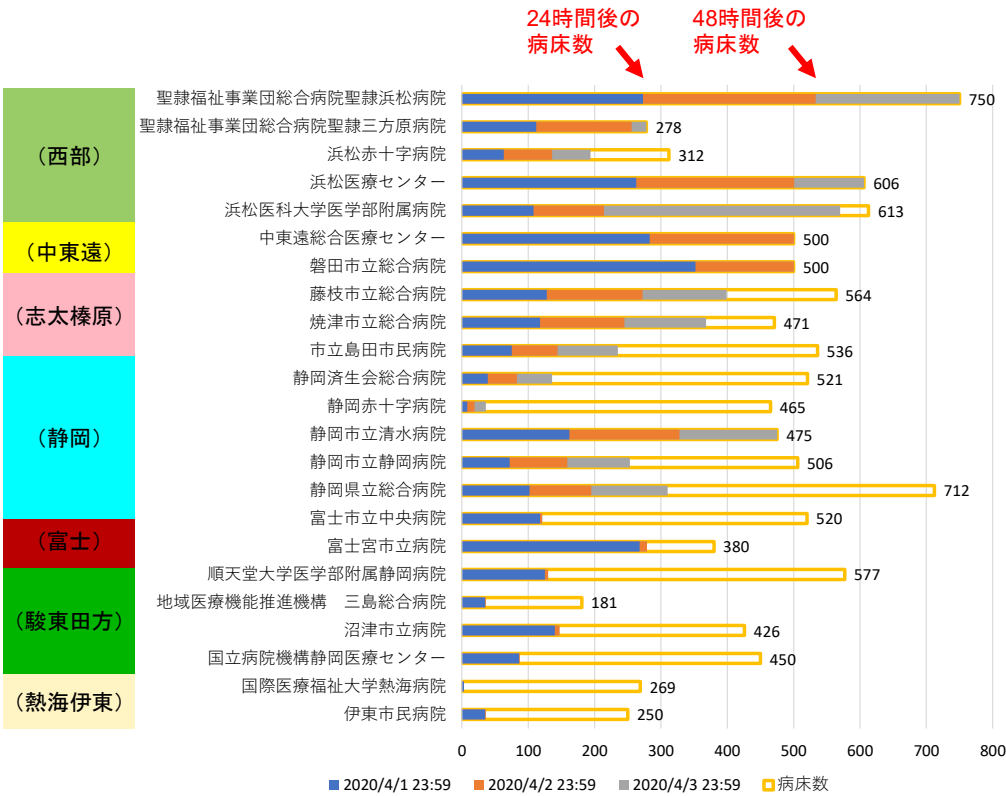


図 4 静岡県における病院別の病床数の推移

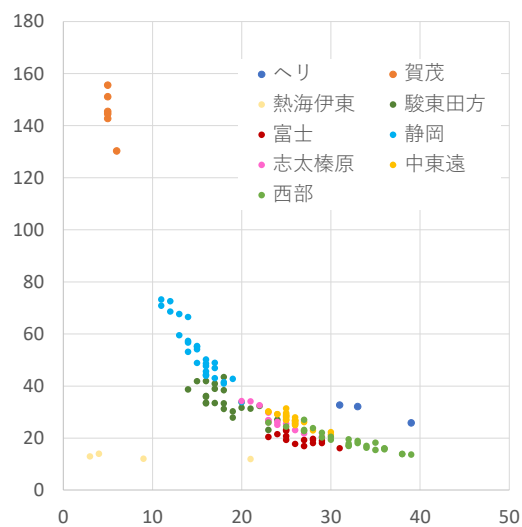


図 6 輸送機材ごとの救助人数

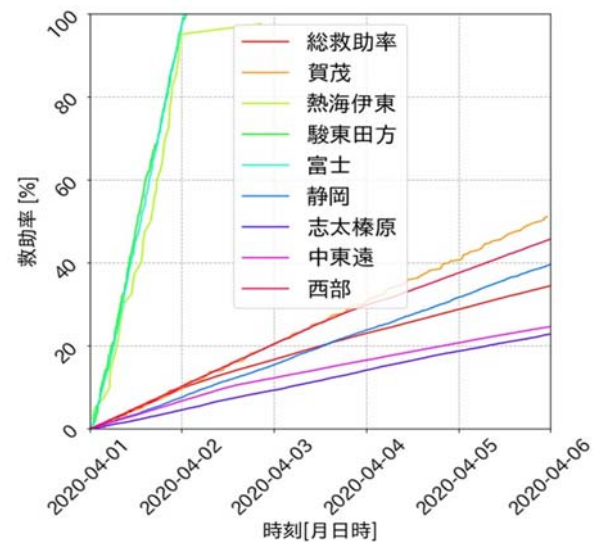


図 6 救助率の時系列変化

4. 空港面交通シミュレータについて

傷病者輸送シミュレータによる分析では、SCU（航空搬送拠点）に多くの要救助者が運ばれることになった。一方で、空港は旅客機、貨物機、ヘリ等あらゆる運航者が利用し、東日本大震災時などには駐機スペースが足りず飛来数を制限するような事態も生じた。これらを踏まえ、過去の大規模災害時における空港の対応等および調査等による情報に基づいてシミュレーション設定およびシナリオを作成しシミュレーションを行った。

4.1. 空港面交通のシミュレーションの前提条件

空港面交通シミュレータを用いて、静岡空港および高知空港の災害復旧過程における空港面の運用についてシミュレーションを行った。シミュレーションシナリオ（以下、シナリオ）は東日本大震災時（2011年3月12日）の花巻空港の1日分を参考⁴にして作成した。紙面の都合上、以下に静岡空港のケースを記す。大規模災害時に救急・救助、消防、捜索等で主に活躍するのは回転翼機であり、回転翼機は通常有視界飛行方式（VFR：Visual Flight Rule）で飛行しているため飛行の時間帯としては日の出から日没までとなる。シナリオが参考とした3月12日は、日の出が6：02、日没が17：51であり、この時間帯に空港の駐機数が変化していることから多くの航空機の離着陸が行われていることがわかる。この時間帯を外れて離着陸が行われたと考えられるのは物資輸送などを行った固定翼機である。固定翼機は計器飛行方式（IFR：Instrument Flight Rule）で飛行することが多いため、時間帯や天候にあまり左右されずに飛行できるが、固定翼機は回転翼機に比べサイズが大きいことから、固定翼機用の駐機場を別途確保しておく必要がある。

以上のことから、天候については VFR で飛行できる程度を想定し、離着陸数が多くなる時間帯に空港内が混雑するシナリオとした。その際、航空機は駐機場と滑走路間の走行途中に待機するケースでは

⁴ 轟朝幸・引頭雄一編著：空港と災害-救援救助活動を支える空港運用、成山堂書店、平成30年2月28日。

走行時間が増加することが予想される。そのため、走行時間がどの程度増加しているか、交通状況にどのような影響を及ぼしたか、滑走路の使用方向による違いなどをシミュレーション結果から検討した。

シミュレーションは、「南海トラフ地震における静岡県広域受援計画（平成 28 年 3 月策定）」および静岡県で開催された図上訓練に基づいて臨時駐機場等を設定した。シミュレーションでは現用の駐機場に加え、多目的用地に 20 箇所の小型・中型回転翼機用の臨時駐機場所を設定した。また、多目的用地内および現用の駐機場等の間に誘導路を設定した。設定を行ったシミュレーション画面を図 7 に示す。

シナリオでは各駐機場所に駐機可能な航空機数とした。各駐機場所の使用状況を図 8 に示す。また、前日から駐機している航空機は小型・中型回転翼機 10 機とした。滑走路の運用は終日 Runway 12、あるいは、Runway 30 で運用され、途中で運用滑走路の変更はなしと想定して、それぞれ 1 回ずつシミュレーションを行った。今回の設定では滑走路、誘導路および駐機場はすべて使用可能とした。空港運用および走行制限については、以下の通りとした。

- ・非定常時の運用であるため、回転翼機についても離着陸は滑走路を使用。

- ・運用に関する制限等：①で設定した小型・中型回転翼機用臨時駐機場所は滑走路の延長上である Runway 12 の進入表面の直下に位置する。そのため、Runway 12 運用時において到着機が着陸のために進入している場合は、臨時駐機場所への出入りを制限した。

4.2. 空港面交通のシミュレーションの実施結果

シミュレーション結果から、各航空機の滑走路と駐機場の間の走行時間によって空港内の混雑を表すこととした。出発機は駐機場から滑走路端まで、到着機は滑走路進入端から駐機場までの走行時間を算出した。また、同じ滑走路と駐機場の組み合わせで、途中で待機することがない状況で走行した場合にかかった時間を基準時間として算出した。出発機については、駐機場から出発した時刻、到着機については滑走路進入端を通過した時刻によって 30 分毎に累計し、基準時間を基に比率を求めた。

図 9 および図 10 は、それぞれの滑走路運用のシミュレーションにおいて出発機数および到着機数を棒グラフで示し、基準時間と走行時間の比率を折れ線グラフで示した。ほぼ障害なく駐機場と滑走路端の走行ができれば、比率はほぼ 100% となる。

運用する滑走路によって同じシナリオを実行しても所要時間に差が出ていることがわかる。

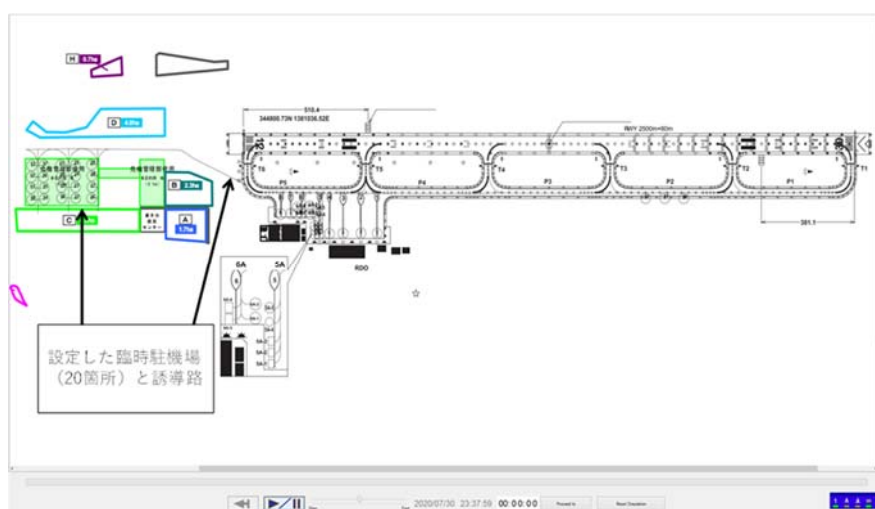


図 7 静岡空港のシミュレーション画面

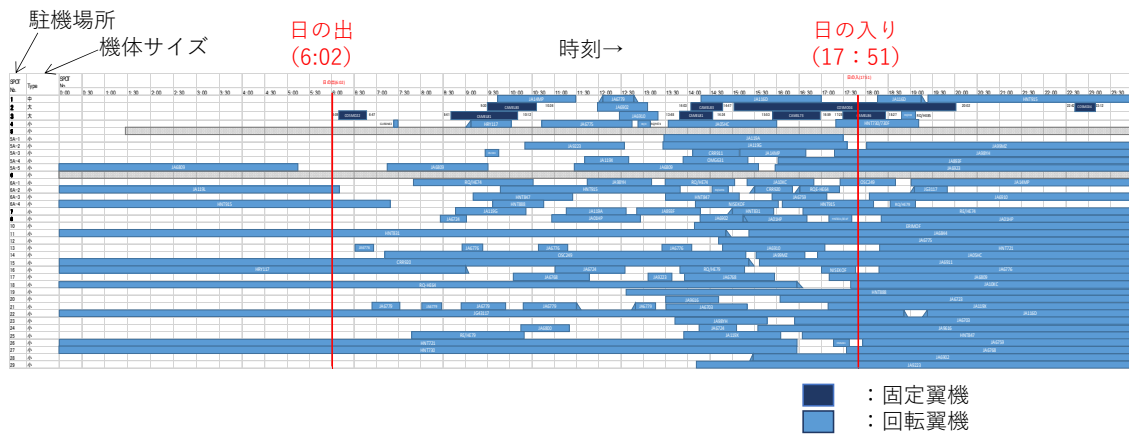


図 8 各駐機場所の使用状況

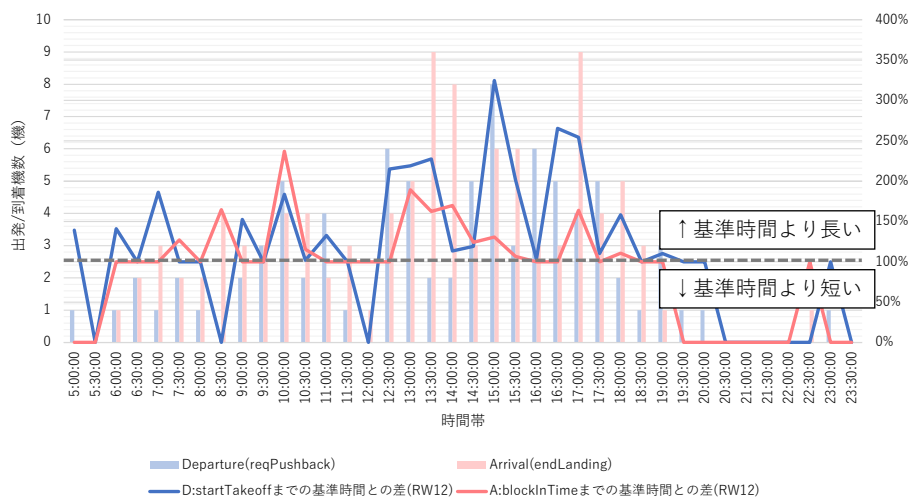


図 9 出発/到着機の時間帯別基準時間と走行時間の比較 (Runway 12 運用時)

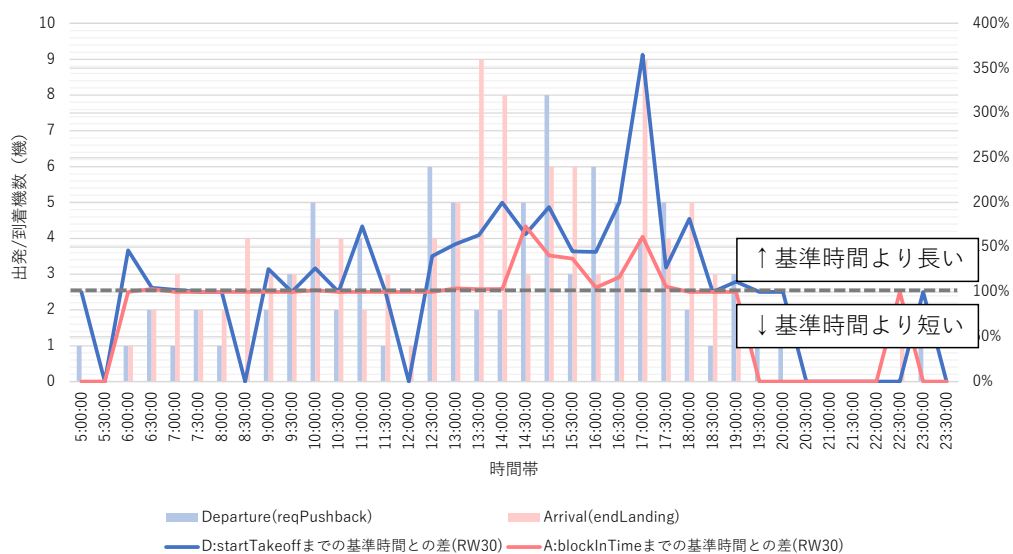


図 10 出発/到着機の時間帯別基準時間と走行時間の比較 (Runway 30 運用時)

基準時間と走行時間の比率は、Runway 30 運用時には一日を通して到着機は比較的 100%に近い。一方、Runway 12 運用時では、10:00～10:30 と午後 2 回に到着機の走行に基準時間以上の所要時間がかかっている。シナリオからも 16:00 から 17:30 にかけて到着機が増加しており、出発機が離陸を待つ状況がみられる。

シミュレーション結果から見られた運用上の問題点について以下に述べる。

- ・滑走路運用に関わらず、臨時駐機場所と滑走路を結ぶ誘導路が 1 本のみであるために臨時駐機場所に入っていく航空機と臨時駐機場所から出てくる航空機が同時に発生した場合、滑走路北側の周辺やエプロンで待機となる。混雑時間帯においては、待機する航空機が増加し、遅延が発生する。

- ・Runway 12 運用時においては、到着機が着陸のために進入してきている場合、臨時駐機場所への誘導路が走行できないため、大きな混雑となる。図 11 はその一例である。滑走路に到着寸前の航空機がいるため、先に到着して臨時駐機場所に向かう航空機が駐機場前に待機している様子である。その行列の中には駐機場から出てきた出発機も待機している。駐機場前で待機する航空機が増加することによって、駐機場への出入りが困難となってくる。

一方、図 12 に示す Runway 30 運用時では、同時刻にこのような混雑は発生していない。この滑走路運用では、到着機によって臨時駐機場所への誘導路の走行は妨げられないため、到着機がエプロン前あるいはエプロン周辺で待機することは少ない。混雑は発生しにくいとみられる。

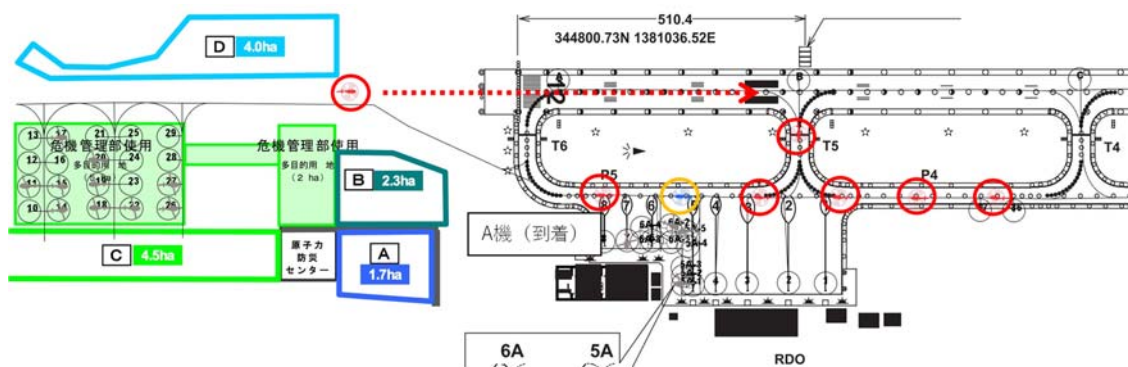


図 11 Runway 12 運用 (13:36 頃)

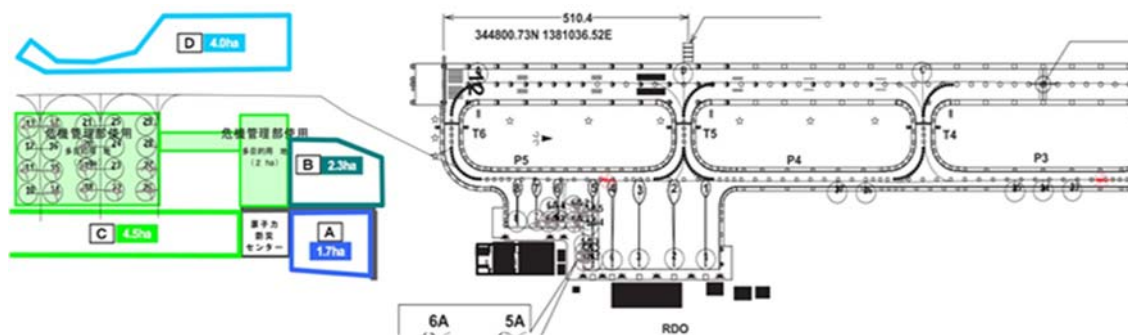
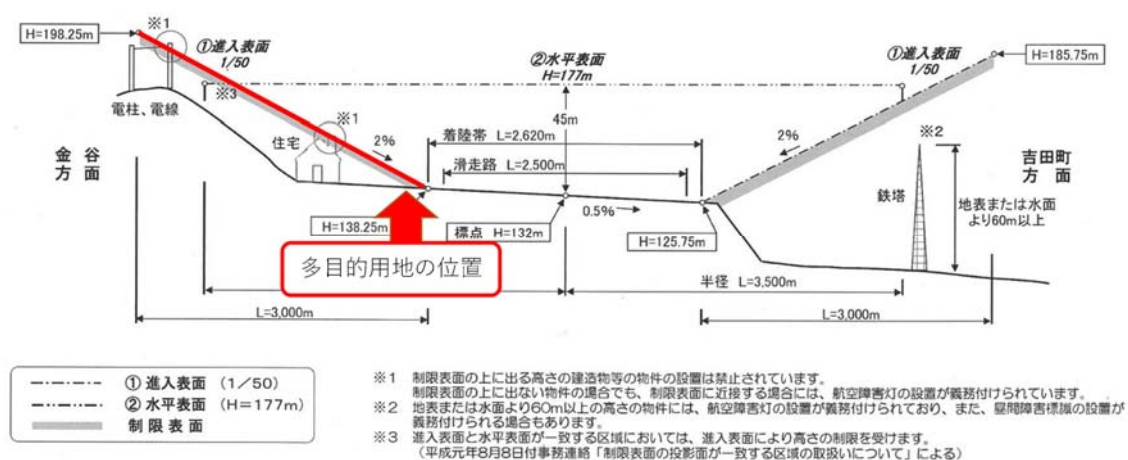


図 12 Runway 30 運用 (13:36 頃)

シミュレーションにおいて検討した問題点について述べる。

シミュレーションでは、参加した図上訓練等による情報に基づいて小型・中型回転翼機用の臨時駐機場所を空港西側の多目的用地に設定した。この臨時駐機場所は Runway 12 の進入表面の直下に位置している。航空法では進入表面を突出する建造物等の設置は禁止されており、ただし書きとして、空港設置管理者の承認を受けて設置できる場合があるとされている。図 13 に進入表面と多目的用地の位置関係を示す。

今回のシミュレーションでは、臨時駐機場所を出入りする航空機が進入表面を突出する建造物等とみなされると判断し、Runway 12 運用時において到着機が着陸のため進入している場合、臨時駐機場所の出入りに制限があった場合を想定して行った。これにより、Runway 12 運用時は Runway 30 運用時より大きな混雑が発生したとみられる。



また、今回のシナリオでは特定の時間帯に航空機が集中して空港を使用する設定となっている。しかし、滑走路の処理容量としてはまだ対応可能な機数であり、駐機場所の確保ができればさらなる航空機の受け入れも可能と考えられる。臨時駐機場所として今回のシミュレーションでは設定しなかったグラスエリアも考慮していく必要がある。

また、実際に大規模災害時に運用された空港の駐機数等を参考にしたシナリオであることから、大規模災害時における空港では航空機の一時的な集中を想定して、多数の航空機の待機時間を少なくする方向に向けた臨時駐機場所の位置や誘導路の設置について検討していく必要がある。

臨時駐機場所の出入りの制限は空港設置管理者の承認によって解除されることも考えられることから、今後現地担当者へのインタビュー調査が必要である。また、臨時駐機場所への誘導路、物資の保管場所、給油等車両の走行、駐車に必要なとなるスペースも考慮したシミュレーションを行うことにより、より現実的な観点から大規模災害時における課題の抽出を行うことが期待できる。

⁵ 富士山静岡空港（株）空港運用部、富士山空港株式会社からのお知らせ ～空の安全委ご協力ください～ PowerPoint Presentation (mtfuji-shizuokaairport.jp)、2021.1 に加筆

5. 港湾施設の利用性評価検討

要救助者を被災地域から、災害拠点病院までヘリや車両を使って搬送することが考えられているが、例えば、孤立地域等が発生した場合は、船での救助も考えられ、要救助者が多数発生するような場合は病院船や船舶を利用し、被災地外へ搬送することも考えられる。本章では、地震時の要救助者輸送における港湾の利用可能性について検討した。

港湾係留施設が地震後において利用可能であるかどうかは、その施設の安定性が保たれているかどうかによるが、係留施設が地震動作用により大きく変形した場合は人や車両等の立ち入りが困難となり供用することができない。また、外観においてあまり変形が生じていないように見える場合においても、海中部や地中部に杭や矢板等の構造部材が損傷している可能性もあり、安定性が保たれておらず、利用者の安全性が確保できていない可能性がある。そこで、構造物の変形、部材損傷を考慮して地震動規模との関係を整理した。港湾の係留施設の地震時変形量に関して相関性が高いと言われる速度 PSI 値と係留施設損傷との関係を整理し、別途、気象庁震度階と速度 PSI 値の関係を整理して、地震動規模による係留施設の利用可能性について検討した。また、既往の地震被害報告書をもとに、被災事例と、検討された地震動規模－施設利用可能性の関係との整合性を確認した。係留施設の耐震性の強さの指標として設計震度を考慮し、利用可能性に与える影響についても検討し、最後に、検討された係留施設の供用可能率と地震動規模との関係を用い、また、実際の港湾における係留施設諸元と係留可能船舶の輸送能力を考慮して、地震時における港湾での傷病者輸送の能力について検討した。ここでは、紙面の都合上、最後に記した地震時における港湾での傷病者輸送の能力について高知港での検討について記すこととする。

5.1. 被災時における港湾での傷病者輸送能力の検討

ここでは、地震動規模と係留施設の供用可能率の関係や、個別施設のより詳細な検討による供用可能率を考慮し、港湾に存在する係留施設諸元から係留可能船舶とその輸送能力を求め、地震時における港湾での傷病者輸送の能力について検討する。

5.2. 貨物輸送と旅客輸送のバースの割合

港湾のバースは貨物輸送用と旅客輸送用に大別される。被災時バース輸送用バースの割合について兵庫県南部地震の実績をもとに整理した。

本来は貨物輸送バースのほうが旅客輸送バースと比べ圧倒的に数が大きいため、地震から時間が経過するごとに復旧が進み旅客輸送バースの割合が減少する。傷病者輸送の重要度は、地震から時間が経過するごとに低下すると考えられるため、地震後 1 か月の実績から判断すると旅客輸送バースの全バースに対する割合は 2 割程度となった。臨時交通機能と傷病者輸送機能の利用割合を推定することは難しいが、旅客輸送バースの全バースを傷病者輸送バースとして利用できるとすれば、全バースのうち 2 割を利用できると考えられる。

5.3. 船舶クラスに応じた傷病者輸送能力の設定

フェリーによる輸送を想定して傷病者輸送能力を検討した。まず、港湾基準を参考に、総トン数によりフェリーのクラス分けを行う。また、日本全国のフェリーの船舶情報を収集した。ただし、総トン数が小さいと船舶の高さも低く乗船等に支障がでると考えられるため総トン数 400 トン以上の船舶とした。各クラスのデータ個数を表 2 に示す。

各船舶クラスの傷病者輸送能力を検討する。収集データのうち極端に定員数の多い船舶のデータは除いて各クラスの定員数を算定した。総トン数が多くなればなるほど定員数の平均値は増加する傾向であるが、今回収集したデータからは船舶クラス7は船舶クラス6より定員数が減る結果となった。

定員数を平均値で評価すると、船舶クラス7が着岸できる施設では船舶クラス6の船も着岸できるため、1回の輸送での各船舶クラスの輸送可能人員を以下のように評価できる。傷病者輸送の際には満載状態での輸送が困難であると考えられるため輸送可能人員の半数を実際の傷病者輸送能力とみなす。

表 2 各船舶クラスのデータ個数

ランク	総トン数(トン)	個数
1	400 ～ 700	14
2	700 ～ 1,000	10
3	1,000 ～ 3,000	21
4	3,000 ～ 7,000	16
5	7,000 ～ 10,000	13
6	10,000 ～ 13,000	5
7	13,000 ～ 15,000	6
8	15,000 ～ 20,000	7

表 4 各船舶クラスの定員数（統計値）

クラス	総トン数(トン)	定員数 (人)		
		平均	最大	最小
1	400 ～ 700	295	500	50
2	700 ～ 1,000	439	550	244
3	1,000 ～ 3,000	514	856	196
4	3,000 ～ 7,000	568	800	450
5	7,000 ～ 10,000	632	877	494
6	10,000 ～ 13,000	640	892	401
7	13,000 ～ 15,000	579	709	519
8	15,000 ～ 20,000	729	846	613

表 4 各船舶クラスの輸送可能人員

クラス	総トン数(トン)	輸送可能人員 (人/回)	
		平常時	被災時
1	400 ～ 700	290	145
2	700 ～ 1,000	430	215
3	1,000 ～ 3,000	510	255
4	3,000 ～ 7,000	560	280
5	7,000 ～ 10,000	630	315
6	10,000 ～ 13,000	640	320
7	13,000 ～ 15,000	640	320
8	15,000 ～ 20,000	720	360

5.3. 各船舶クラスが接岸できる岸壁諸元

各船舶クラスが着岸できる岸壁諸元を設定する。各船舶クラスの諸元は港湾基準⁶を参考にする。必要水深においては、各船舶クラスの喫水に10%の余裕を考慮して設定する。必要バース延長においては、フェリー船は縦付けできる可能性があるが、ここでは安全側を想定し、船舶は横付けを想定する。船首索、船尾索から5mずつ余裕を確保することとした。

5.4. 輸送回数

港湾での船舶による傷病者輸送の能力の検討においては、各バースに係留する船舶の便数を想定する必要がある。ここでは、東京港竹芝ふ頭における係留予定表より、1バースにつき係留する船舶の便数を検討する。

東京港竹芝ふ頭における係留予定表を以下に示す。最も大きな橘丸を参考とすると係留時間は2時間40分である。この場合、船舶の離岸から次の船舶の着岸の入れ替えの時間を1時間と考慮すると、日中を12時間として、その間に3便の係留が可能となるが、ここでは控えめな想定として船舶の運航を各バースにつき1日2便とした。

⁶ 国土交通省港湾局監修、日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2018。

表 5 東京港竹芝ふ頭における係留予定表

埠頭	バース	着岸日時	離岸日時	船名	船種	総トン数	代理店
竹芝	XO00C	2020/3/10 7:50	2020/3/10 8:10	セブンアイランド友	客船	164	東海汽船（株）
竹芝	XO00C	2020/3/10 7:50	2020/3/10 8:10	セブンアイランド大漁	客船	165	東海汽船（株）
竹芝	XO00C	2020/3/10 17:30	2020/3/10 17:50	セブンアイランド虹	客船	281	東海汽船（株）
竹芝	XO00C	2020/3/11 17:30	2020/3/11 17:50	セブンアイランド愛	客船	280	東海汽船（株）
竹芝	XO00C	2020/3/10 19:50	2020/3/10 22:30	橋丸	客船	5681	東海汽船（株）

5.5. 高知港における傷病者輸送能力の検討

ここでは、高知港を例とし、これまでに検討した貨物輸送と旅客輸送の係船バースの割合、船舶クラスごとの傷病者輸送能力、岸壁諸元と船舶クラスの関係、輸送回数（1 バースにおける船舶の便数）を考慮して、港全体の傷病者輸送能力を検討する。

まず高知港における係留施設を整理し、施設諸元（計画水深、延長）と各船舶クラスが接岸できる岸壁諸元により、各施設に接岸可能な船舶クラスを整理した。三里地区（-4.0、L=190m）は法線が屈曲しており、直線延長で船舶クラス 1 の必要延長 105m を確保できないため接岸不可としている。

各船舶クラスの輸送可能人員（表 4）と高知港における各係留施設に接岸可能な船舶クラスを用いて、高知港全体の最大の傷病者輸送能力を算定する。ここでは、全てのバースを傷病者輸送に利用できたとして算定しており、最大輸送人員は 4,870 人/回で、前節で示したように、各施設での便数を 1 日 2 便と想定したため、9,740 人/日となった（表 6）。

表 6 高知港における最大傷病者輸送能力

地区名	計画水深	延長(m)	接岸可能 船舶クラス	輸送人員 (人/回)
弘化台地区	-4.0	242	2	215
	-4.0	446.4	2	215
	-4.0	110	1	145
	-5.0	140	2	215
	-5.5	55	不可	—
北タナスカ地区	-6.0	167.4	3	255
	-4.0	270	2	215
潮江地区	-4.5	180	2	215
	-7.5	260	6	320
	-7.5	310	6	320
	-7.5	172	3	255
	-7.5	390	6	320
港町地区	-6.5	115.8	1	145
	-7.5	66	不可	—
横浜地区	-3.5	71	不可	—
	-2.0	705	不可	—

地区名	計画水深	延長(m)	接岸可能 船舶クラス	輸送人員 (人/回)
仁井田地区	-7.5	130	2	215
	-5.0	140	2	215
	-4.5	300	2	215
三里地区	-3.0	817	不可	—
	-4.0	190	不可	—
	-11.0	190	3	255
	-12.0	280	7	320
	-12.0	240	4	280
	-8.0	240	4	280
	-6.0	180	3	255
御豊瀬地区	-2.0	70	不可	—
	-1.0	430	不可	—
	-2.5~-4.0	83	不可	—
	-2.5	20	不可	—
	-4.0	20	不可	—
	-4.0	50	不可	—

合計 4870 人/回
 9740 人/日

上記の高知港における最大の傷病者輸送能力をもとに、地震被害発生後における高知港での傷病者輸送能力について検討する。ここでは、想定地震を南海トラフ巨大地震とし、高知港での予測最大震度 7 を考慮する（図 14）。震度 7 の場合、表 7 より全体の約 15% の施設が暫定供用可能であり、兵庫県南部地震の実績をもとに、過去の地震時における貨物輸送と旅客輸送のバース割合から、そのうち 2 割を

傷病者輸送に利用できると仮定すると、全体の約 3%の施設で傷病者輸送を行うことができる。よって、最大傷病者輸送能力は 9,740 人／日であるため、震度 7 の場合の傷病者輸送能力は 9,740 人／日 $\times 2.9\% \div 100 \approx 287$ 人／日となる（表 7）。

表 7 高知港における傷病者輸送能力

計測 震度	震度階	速度PSI (cm/s ^{0.5})	供用可能率 (%)		輸送能力 (人／日)
			全体	傷病者輸送	
3.00		5	100.0	20.0	1948
3.50		10	100.0	20.0	1948
4.00		15	97.9	19.6	1907
4.50	5弱	35	91.7	18.3	1785
5.00	5強	60	72.5	14.5	1412
5.50	6弱	105	53.4	10.7	1039
6.00	6強	175	24.5	4.9	477
6.50	7	280	14.7	2.9	287

5-2 震度分布図（最大クラス重ね合わせ）

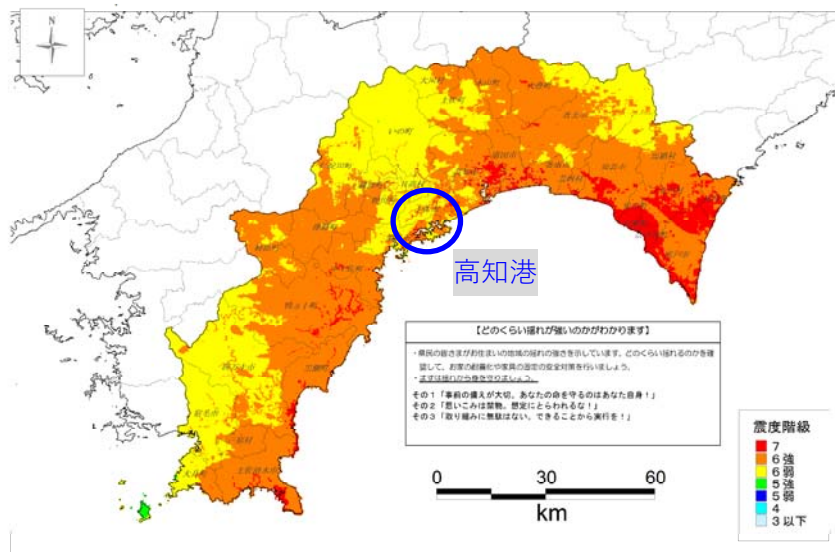


図 14 南海トラフ巨大地震の震度分布図（高知県HPより）



図 15 高知港における傷病者輸送能力

6. 結論

本研究開発では、マルチエージェントシステムによる傷病者輸送シミュレータを開発し、さらに域外搬送の際に活用される空港及び港湾における利用可能性について検討を行った。多くの地域において、輸送機材自体が足りていない地域も多く存在しており、要救助者数に対して病床数が足りていない地域も多く確認できた。そのような場合は、発災直後より域外搬送を視野にいれることや医療資源を被災地域に投入するなどの検討が必要と考えられる。一方、域外搬送を行う際の空港や港湾についても容量がそれほど十分ではない現状も明らかになった。特に空港においては、既存の駐機スペースのみでは限界がある可能性があり、グラスエリアを含めた特殊な運用も必要であり、港湾においても必ずしも傷病者輸送能力は十分とはいえず、事前にどのような対応を行うのかを検討しておくことが重要であると考えられる。

本研究開発については、静岡県及び高知県を対象に行ってきた。今後は、本制度で行った成果が他の自治体に展開していくことで、わが国における国土強靱化対策の一助となれば幸いである。

7. 知的財産権取得状況

特許出願 0 件

8. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 1 件、海外 0 件

[1]中山恵介, 荒谷太郎, 間島隆博: 高知県におけるシミュレータを用いた傷病者の輸送計画に関する検討, 土木計画学: 政策と実践, 2022. (投稿中)

2) 口頭発表

国内 4 件、海外 1 件

[1]荒谷太郎: 傷病者輸送シミュレータを用いた国土強靱化対策の検討, SCI-Japan ウェビナー,

2022.

- [2]荒谷太郎, 小濱英司, 大矢陽介, 間島隆博: 大規模災害時における 海上輸送の可能性に関する検討, 日本航海学会誌 Navigation 第 219 号, 2022.
- [3]青山久枝, 荒谷太郎, 間島隆博, 山田泉, 今込毅: 大規模災害時における空港面運用に関するシミュレータを用いた検討, 土木計画学研究・講演集 Vol.64、2021.
- [4]Taro ARATANI, Eiji KOHAMA, Yousuke OHYA, Takahiro MAJIMA: Possibility of Maritime Transport in Large-scale Natural Disasters in Japan, Asia Navigation Conference 2021.
- [5]荒谷太郎, 間島隆博, 小濱英司, 山田泉, 大矢陽介, 青山久枝, 松倉洋史: 災害時輸送におけるシミュレータ活用, 海上技術安全研究所報告第 21 巻, pp.53-57.2021.

9. 参考文献

各種参考文献は本文中の脚注に記載している。