

10 災害時輸送におけるシミュレータ活用

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*

Transportation Simulators for Natural Disasters

by

ARATANI Taro, MAJIMA Takahiro, KOHAMA Eiji, YAMADA Izumi,
OHYA Yousuke, AOYAMA Hisae and MATSUKURA Hiroshi

Abstract

Japan consistently experiences natural disasters such as earthquakes, floods, and typhoons. Some of the most extreme disasters in the past decade include the Great East Japan Earthquake in 2011, the Kumamoto Earthquake in 2016, and the torrential rains in western Japan in 2018. When a natural disaster occurs in a large area, as in the case of the Great East Japan Earthquake, an extensive response system is necessary for relief efforts. In a large-scale disaster, the disaster site is mainly accessed by roads, but if roads are cut off due to a tsunami or collapsed cliff, a large area may become isolated. It is necessary to maximize all available means of transportation (road, sea, air).

In this paper, we introduce a simulator for transporting injured people using a multi-agent system that is currently under development. The simulated results of transporting injured people by helicopters and vehicles in a hypothetical city were evaluated in terms of the number of people rescued for each transport vehicle and the utilization rate of hospital beds. Additionally, we introduce airport operation simulators for disasters and evaluate the usability of port facilities during disasters.

* 海上技術安全研究所 知識・データシステム系, ** 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域,

*** 電子航法研究所 航空交通管理領域

原稿受付 令和3年5月17日

審査日 令和3年6月15日

1. はじめに

わが国は災害大国である。近年でいえば、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、水害や台風など多くの災害が起きている。特に被災範囲が複数県に跨がるような広域に及んだ場合、救援活動は広域的な支援態勢が必要である。多くの自治体では、あらゆる災害に対して、地域防災計画を策定している。例えば、静岡県地域防災計画¹⁾は、共通対策編の他に、地震対策編、津波対策編、原子力災害対策編、風水害対策編、火山災害対策編、大火災対策編、大規模事故対策編、資料編1・2より構成されている。

特に地震では、南海トラフ沿いの地域においてマグニチュード8~9クラスの地震が30年以内70~80% (平成31年1月1日現在)の確率で発生するといわれている²⁾。そのため多くの自治体では、南海トラフ地震が発生した際の地震被害想定を公表³⁾している他、施設面の港湾や空港等の交通結節点においてはBCP計画⁴⁾、医療関係においては医療支援計画⁵⁾など、国や自治体のさまざまな部局・組織において災害に備えた対策が行われている。これらの多くは、過去の大規模災害を教訓として計画が策定され、さらに毎年のように更新されている。一方で救助・救援活動の拠点、物資・人員輸送において個々の効率化・最適化を行っただけでは全体最適にはならない。例えば、輸送人数に対して必要なヘリコプター(以下、ヘリ)を揃えたとしても、空港側の処理容量を超える可能性がある。その場合は海からの支援等、他の輸送手段と連携した形で検討しておく必要がある。その際、港湾の被災状況においてどの程度利用可能なのか、予め検討しておくことが必要である。海上技術安全研究所(以下、海技研)、電子航法研究所(以下、電子研)、港湾空港技術研究所(以下、港空研)では、3研究所が連携し、個別最適からは見落とされる可能性のある救援活動の一連の流れで発生し得るボトルネックを事前に発見できるシミュレータを開発している。本稿では、交通運輸技術開発推進制度のもとで開発中である傷病者輸送シミュレータ⁶⁾について述べ、空港面運用シミュレータ及び港湾施設の利用性評価については紹介を行う。

2. 開発内容

本研究において開発しているシミュレータは、今後想定される災害について、事前にどのようなソフトとハードの対策を行えばよいかを明らかにするものである。シミュレータは、各組織が災害・防災対策の施策を検討している運用方法や被害想定を前提条件として、シミュレーションを実施し、結果

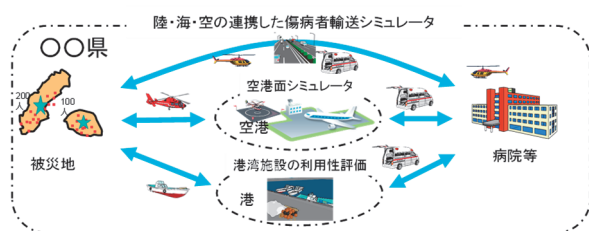


図-1 シミュレータの概要

をもとに改善案を検討し、再度条件を変更して輸送性能を評価できるものである。なお、図-1に示しているが、全体総括とシミュレータの核となる傷病者輸送シミュレータを海技研が、空港面シミュレータに関する部分を電子研、港湾施設の利用性評価に関する部分を港空研が研究開発を行っている。

3. 傷病者輸送シミュレータ

3.1 マルチエージェントシステムによるシミュレータ

シミュレータは、輸送機材(ヘリ、車両、船等)による傷病者(以下、要救助者)の輸送を対象としている。シミュレーションでは、被災地域にいる要救助者を輸送機材によって、病院までの輸送する流れを再現することとしている。そのため、輸送機材の動きをできるだけ現実に近い条件に設定し、その動作をミクロな視点で捉える必要があるため、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は、集合知や社会システムの分析など、複雑な現象を解明する目的で盛んに活用されている。マルチエージェントシステムでは、個々のエージェントがある環境内で定められた行動ルールに従い、判断、行動するが、その行動が環境をも変化させるため、自らの行動にも影響を及ぼす。本研究では、輸送機材をエージェントとして行動ルールをモデル化し、その行動をシミュレートすることにより、輸送機材による輸送を再現することとする。

3.2 輸送機材、輸送対象者、輸送先の決定過程

本研究において、輸送機材による輸送の1ミッションは、出発地(輸送機材の現在地)を出発した輸送機材が要救助者の集まっている場所まで移動し、要救助者を乗せて災害拠点病院まで運ぶまでと定義する。その上で、各輸送機材の一つひとつを1エージェントと考え、エージェントが向かう場所を決定する。輸送機材の行動は以下のとおりである。

①各輸送機材は、最短時間で輸送できる要救助者を選定

選定方法は、以下の時間を計算し、合計時間が最小となる要救助者を選定する。ただし、要救助者を輸送中の他の輸送機材が向かった方が、この輸送機材より合計時間が最小となる可能性もあるので、最終的な決定は③で行う。

- 現在地から要救助者がいる場所までの移動時間
- 要救助者の救助時間
- 要救助者がいる場所から最も近い災害拠点病院までの移動時間
- 災害拠点病院での降車・降機待ち時間(活動内容の決定時点での待ち時間の長さ)
- 災害拠点病院での降車・降機時間

②選定時点で輸送中である他の輸送機材の方が早いかを計算(他が早ければ任せ、①に戻る)

①の輸送機材による輸送より、要救助者を輸送中である他の輸送機材が向かった方が早いかどうか①同様の合計時間を計算する。他の輸送機材の方が早ければ、その要救助者は他の輸送機材に任せ、再度①の計算を行う。

③最終決定

①の輸送機材の方がミッションを最短で終了できる場合、要救助者と災害拠点病院を決定してミッションに移る。ミッション終了後は①に戻る。

3.3 シミュレーションの前提条件

本研究では、都道府県規模のエリアにおいて、大規模地震が発生した際の要救助者の輸送をシミュレーションすることとする。大規模災害時に県内に発生した要救助者を輸送機材によって災害拠点病院まで運ぶものとする。災害拠点病院が満床の場合は広域搬送拠点臨時医療施設（Staging Care Unit, 以下、SCU とする）へ輸送することとする。なお、本シミュレータは開発段階であるため、図-2のようなエリアを四つに分けた仮定の都市規模、病院、要救助者を配置してシミュレーションを実施した。エリア0は、他のエリアと比較して要救助者が約120人と少ないが、他のエリアと異なりエリア内に SCU または災害拠点病院が無く、他のエリアの病院か SCU への輸送が必要となる。なお、輸送機材であるヘリは、対象地域を直線的に移動でき、移動速度は200km/hである。ヘリの初期位置については、エリア2に2機、エリア3に1機配置し、全てのエリアで活動が行えることとした。車両は、シミュレータ上に設定した道路ネットワーク上を移動でき、移動速度は道路ネットワーク上の設定速度により移動する。また、車両はエリア内のみで活動が行えるが、エリア内に輸送可能な病院が無い場合はエリア外の病院・SCUへ輸送可能とした。その他の前提条件については、表-1に示すとおりである。

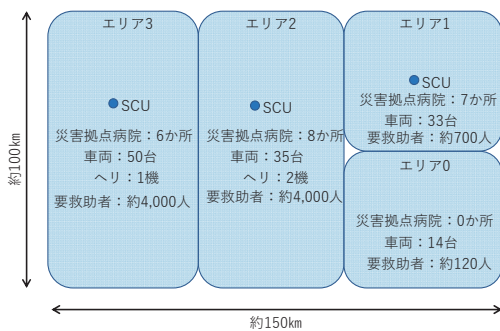


図-2 対象地域と要救助者数

表-1 前提条件

前提条件	
救助対象エリア	東西150km、南北100km程度の自治体の中に、約9000人の要救助者が発生したと仮定
輸送機材数	ヘリ3機（全エリアの救助を担当） 車両132台（エリア内の救助を担当）
災害拠点病院数	21カ所
SCU数	3カ所
要救助者発生場所	救助対象エリアにランダムに配置
要救助者発生時刻	24時間以内にランダムに発生

3.4 シミュレーションの結果

シミュレーションの可視化画面を図-3に示した。シミュレーションでは、3.2に示した行動ルールに従って輸送機材が動き、要救助者を病院まで輸送する。シミュレーション結果を確認することで、計画している地域防災計画や県内における救助態勢においてどの程度の時間で傷病者を輸送可能なのか、輸送機材はどの程度活用できるのか等が定量的にわかる。

図-4は、ヘリと車両において平均輸送距離（機材移動距離/輸送人数）と輸送人数（24時間）の関係を示したものである。グラフは大きく三つのグループに分かれており、輸送人数が少なく平均輸送距離が長いグループはエリア0を担当した車両であった。エリア0の地域は災害拠点病院及びSCUがエリア外になるため、平均輸送距離が長くなり^{*2}、必然的に輸送人数が少なくなった。また平均輸送距離が短く輸送人数が多いグループは、輸送機材がヘリであった。ヘリは巡航速度約200km/hと車両と比較しても速いため、多くの要救助者を輸送できたものと考えられる。残りのグループはエリア1～3を担当した車両であった。輸送人数は10～20人前後となっており、ほぼピストン輸送のように要救助者の発生場所と病院を往復していた。以上の結果より、仮定のエリア内の結果ではあるが、周辺に病院が無い場合は、病院への輸送距離が長くなり、輸送人数が減少すること、またヘリは車両の3倍程度の輸送が可能ということが明らかになった。

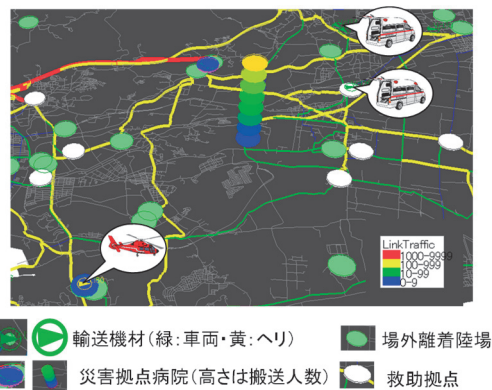


図-3 シミュレーション可視化画面（抜粋、凡例等を付加）

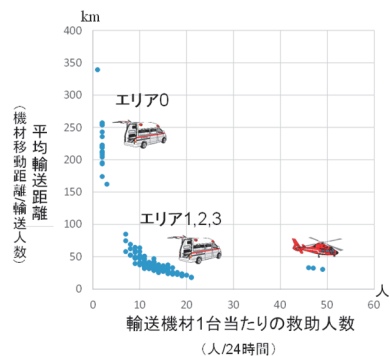


図-4 平均輸送距離と輸送人数の関係

災害拠点病院ごとの輸送人数と病床使用率を図-5に示した。なお、病床数は一律500床と仮定し、24時間後の輸送人数と48時間後の輸送人数を示した。まず、全てのエリアにおいて24時間以内に輸送が完了したエリアは無かった。48時間以内とした場合、エリア1の輸送は完了していた。エリア0は、要救助者が約120人と少ないが、エリア内に災害拠点病院が無いために、片道100km程度あるエリア1のSCU及び病院への輸送が必要となる。そのため、48時間時点でも輸送が完了できていない状態となった。エリア1は病院が7カ所あり、車両も33台と、病院数と車両台数に対して要救助者が700人程度であったため、48時間以内に輸送が完了したものと考えられる。なお、エリア1で要救助者の輸送を終えたのは43時間後であった。エリア2、エリア3については、両エリアとも48時間時点で輸送は完了しなかった。エリア2の輸送完了率は約19%、エリア3の輸送完了率は約41%であった。エリア3の方が他のエリアより輸送完了率が高いのは、車両の台数がエリア3の方が多く、要救助者の輸送を48時間で多く実施できたことによるものと考えられる。

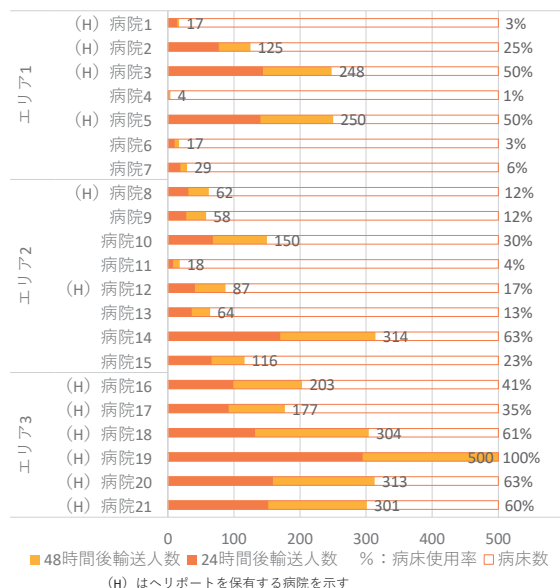


図-5 病院別の輸送人数と病床使用率

4. 空港面運用シミュレータ

3章で示したシミュレータは、輸送機材数について自由に設定することが可能である。ヘリは、災害発生時には機動力が生かせるため傷病者の輸送に有効である。一方で、ヘリの拠点となる空港には災害直後より機材が集中することが考えられ、現に東日本大震災時の福島空港では、通常の約12倍もの航空機が飛来し、震災発生直後から、救援機、報道機及び定期便・臨時便を24時間態勢で受け入れた⁷⁾。そのため通常の駐機スペースでは足りず、誘導路上を臨時的駐機スペースとして活用を行った。そこで、大規模災害時の空港において、どの程度の航空機が受け入れ可能で、どの程度の救援機が活用可能かを事前に把握しておく必要がある。電子研で

は、混雑空港を対象として空港面の交通状況を把握し、混雑緩和の対策となる航空交通管理手法を検討、検証するためのシミュレータを開発してきた⁸⁾。本シミュレータは固定翼機(旅客機等)のみについて空港面における走行を模擬するものであったため、本研究で扱う大規模災害時に物資や傷病者輸送の支援の拠点となる空港運用では主に回転翼機(ヘリ等)の運用を模擬する必要があり、回転翼機の運用を模擬できるようにシミュレータの改修を行った。

図-6は、シミュレータ画面を示している。図右側が、通常使うエプロンであり、左側に臨時駐機場と誘導路を新たに設置した場合のシミュレーション等が可能である。本シミュレータでは、出発機と到着機の機数、各機材の駐機場所を設定することで、シミュレーションを実施し、シミュレーション結果から運用上の問題点等を明らかにするものである。

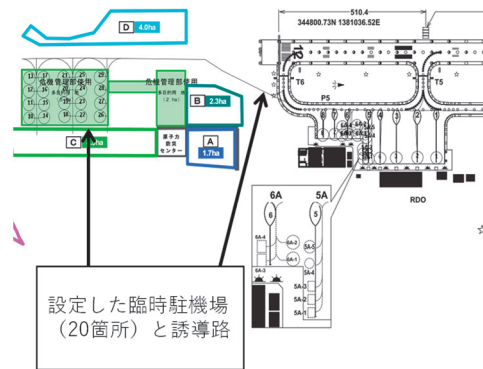


図-6 空港面運用シミュレータ画面

5. 港湾施設の利用性評価

傷病者輸送において、主となる輸送機材は車両とヘリとなる。しかし孤立地域が発生した場合は、船を利用した輸送も考えられ、要救助者が多数発生するような地域へは、既存船舶を活用した災害医療活動や船舶を利用した域外への輸送も考えられる。そこで、港空研において、過去の被災事例に基づいて、地震の規模と地震後に施設を利用できる割合を構造形式毎の供用可能率として算出を行った。表-2は計測震度と係留施設の供用可能率の関係を示している。例えば、震度

表-2 計測震度と係留施設の供用可能率の関係

計測震度	震度階	速度PSI (cm/s ^{0.5})	供用可能率 (%)			
			重力式	矢板式	機橋式	全体平均
3.00		5	100.0	100.0	100.0	100.0
3.50		10	100.0	100.0	100.0	100.0
4.00		15	100.0	93.8	100.0	97.9
4.50	5弱	35	100.0	75.0	100.0	91.7
5.00	5強	60	100.0	25.0	92.6	72.5
5.50	6弱	105	89.5	18.8	51.9	53.4
6.00	6強	175	47.4	18.8	7.4	24.5
6.50	7	280	36.8	0.0	7.4	14.7

6 弱程度であれば、重力式では、89.5%程度、矢板式の岸壁では18.8%程度の供用可能率となった。今後自治体が想定する震度分布と照らし合わせ、船舶が利用できる岸壁を構造形式別に推定する方法を検討し、シミュレータに活用していく予定である。

6. おわりに

本稿では、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について述べた上で、輸送機材ごとの輸送人数及び病床使用率の観点からの分析事例を示した。さらに空港面運用シミュレータ及び港湾施設の利用性評価について紹介を行った。傷病者輸送シミュレータによるシミュレーション結果より、周辺に災害拠点病院が無い場合は、輸送距離が長くなり、車両では時間がかかるため、要救助者の輸送に時間がかかる可能性が示唆された。このような場合は、ヘリを活用することも有効と考えられる。ヘリは巡航速度約200km/hと車両と比較しても速く、要救助者を多く輸送できるメリットはあるものの、現状は、空港側の駐機可能数に上限があり、機材数が限られる問題がある。災害の発生状況によっては、既存船舶を活用した災害医療活動などの選択肢も考えられる。このように大規模かつ広域的な災害においては、利用可能な輸送手段を最大限活用することで、一人でも多くの命が救われることになるといえる。

今後は、空港面の容量の算出及び港湾施設の利用可否判定のデータを踏まえ、傷病者輸送シミュレータによる包括的な評価を行う予定であり、その際、自治体の意見を取り入れ、評価結果をフィードバックしながら全体的な評価を行う予定である。

謝辞

本研究は国土交通省の交通運輸技術開発推進制度(JPJ002223)の助成を受けたものである。

補注

*1 傷病者輸送シミュレータの内容については、荒谷、間島ら⁶⁾の文献を加筆修正したものである。

*2 平均輸送距離は、機材移動距離を輸送人数で割ったものである。そのためここでは、輸送機材の現在地から要救助者がいる場所までの距離と要救助者がいる場所から災害拠点病院もしくはSCUまでの距離を輸送距離としている。

References

- 1) Crisis Management Strategic Division, Shizuoka pref.: Regional disaster prevention plan, <http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/seisaku/keikaku.html> (accessed 2021-04-28).
- 2) Cabinet Office Japan: Guidelines for Disaster Preparedness for Various Types of Nankai Trough Earthquakes, 2019, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline2.pdf (accessed 2021-06-14).

- 3) Nankai Trough Earthquake Countermeasures Division, Kochi pref.: Estimated Damage from the Nankai Trough Earthquake, <https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/higaisoutei-2013.html> (accessed 2021-04-28).
- 4) Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism. Shikoku Regional Development Bureau: Business Continuity Plan of Tokushima Komatsushima port, <https://www.pref.tokushima.lg.jp/ippannokata/kendozukuri/kowan/2015012300190> (accessed 2021-04-28).
- 5) Health Measures Division, Kochi pref.: Manual for Supporting Medical Personnel in Nankai Trough Earthquake, https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/130401/files/2016052500137/file_20165253111359_1.pdf (accessed 2021-04-28).
- 6) ARATANI Taro, MAJIMA Takahiro, KOHAMA Eiji, YAMADA Izumi, OHYA Yousuke, AOYAMA Hisae, MATSUKURA Hiroshi: Development of Simulator for Transporting Injured People using Multi-agent System, Proceedings of Infrastructure Planning Japan, Vol.62, 2020, CD-ROM.
- 7) ARATANI Taro, HIRATA Terumitsu, OSADA Teppei, HANAOKA Shinya, TODOROKI Tomoyuki, INDO Yuichi: Aircraft Activities and Airport Operations in the Aftermath of the Great East Japan Earthquake -Case of Iwate Hanamaki Yamagata and Fukushima Airport-, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3, Vol. 69, Issue 5, 2013, Pages I_229-I_246.
- 8) YAMADA Izumi, AOYAMA Hisae, BROWN Mark, SUMIYA Midori, MORI Ryota: A Simulation Study on a Method of Departure Taxi Scheduling at Haneda Airport, Proceedings of the 3rd ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2013), EN-024, 2013.