

マルチエージェントシミュレーションモデルを用いた 災害時多数傷病者搬送問題に関する基礎的研究

A study on transportation activities of mass casualties in disaster
by Multi Agent Simulation

荒木 康弘¹, 東原 紘道¹

Yasuhiro ARAKI¹ and Hiromichi HIGASHIBARA¹

¹独立行政法人防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Earthquake Disaster Mitigation
Research Center

This paper attempts to construct multi-agent system simulation model by considering each activity of those groups and organizations that are related to transportation activities of those who have injured when the disaster occurs. This simulation model can evaluate "Decentralized Transportation" and "Transportation distance" of those who have injured when the disaster occurs. To verify the accuracy of the simulation model, the simulation model attempts to reproduce the transportation activity of those who have injured in the train accident by using the JR Fukuchiyama line train accident in April, 2005.

Key Words : multi-agent system simulation model, transportation activities, decentralized Transportation, transportation distance, JR Fukuchiyama line train accident in April, 2005

1. 背景と目的

大規模事故災害および自然災害時には、多くの場合短時間に多数の傷病者が発生する。このような状況で、もし特定の医療機関に平常時を大きく上回る傷病者が来院するならば、医療活動に混乱、遅延が生じる可能性がある。特に地震災害時には医療機関自身も被災するため、建物および医療機器等の損傷に加え、ライフライン等も損傷するために、平常時と同じレベルの医療活動を行うことが困難となる。そのため一部の傷病者は適切な治療を受けることができず、結果として「防ぎ得た死 (Preventable deaths)」の生じる可能性がある。

このような「防ぎ得た死」を防ぐためには、傷病者が特定の医療機関に集中することなく、負傷度に応じて適切な医療機関に分散して搬送する必要があるが、そのためには傷病者が災害現場から救助され医療機関へ搬送された後、医療機関で適切に治療を受けるまでの傷病者の搬送活動を適切にモデル化する必要がある。

これら一連の傷病者搬送活動を評価した研究について、救急医学の分野ではほとんどが症例報告や医療技術に関するものであり、災害時における人的被害を軽減するための搬送活動に注目した研究は見られない。一方土木計画学の分野では、小池らは災害時における搬送活動を「医療機関の混乱」と「長時間搬送」という二つの側面から説明するシミュレーションモデルを構築し、航空機事故における傷病者搬送活動の計画策定手法について考察している⁴⁾。しかし傷病者の救助から救急に至る過程には、消防・警察・医療機関以外にも多くの組織や各組

織間および組織内での情報通信が関係するが、これら関係する諸要素及び各要素間の関係を適切に考慮しモデル化することにより、災害時における傷病者の搬送活動を評価した研究は未だ無い。

筆者らは、特に地震災害時における「防ぎ得た死」を最小限に軽減することを目的として、傷病者搬送および人的・物的医療資源の最適利用を検討可能な、マルチエージェントシステムを用いたシミュレーションモデルの構築を行っている。シミュレーションを行うためには、プレイヤーとなる各エージェントの特性、行動則およびエージェント間の情報通信等のモデル化に加えて、医療活動の中心となる医療機関の建物、医療機器、関係するライフライン等のモデル化、また搬送経路となる道路情報等のモデル化が必要である。システム全体の精度は、各項目のモデル化の精度に依存すると考えられるが、これらを検証する際に最初から地震災害をシミュレーションの対象とするならば、エージェントである各関係機関等の行動則が精密にモデル化できたととしても、医療機関および搬送経路の状態等の影響が大きくなる可能性があり、結果としてシステム全体の振舞いにおける各エージェントの行動則の影響が把握できない可能性がある。

そこで、災害時における傷病者搬送および人的・物的医療資源の最適利用を検討可能なシミュレーションモデルを構築することを最終目標として、本研究では2005年4月のJR福知山線列車事故（以後「列車事故」と呼ぶ）における傷病者の搬送活動の再現を試みることにし、関係する各エージェントの特性、行動則等のモデル化の妥当性を検証することを主たる目的とする。

列車事故を研究対象とした理由として、例えば地震災害の場合と異なり医療機関および災害現場から医療機関に搬送するまでの搬送経路の状態は平常時と同じである一方、一度に多数の負傷者が発生する、いわゆる「多数傷病者発生」という点では平常時とは大きく異なり、問題を複雑にすることなく各エージェントの特性、行動則等のモデル化の妥当性、およびシミュレーションモデルの精度を検証可能であると考えられるためである(表1)。また救助・救命に携わる各エージェントの行動則についても、各エージェントの行動規準に従った場合と実際の事故当時の動きとの比較、各エージェント間の関係について、文献等の調査^{1), 2), 3)}や尼崎消防局に対するヒアリングを通して、詳細に調査することが可能である点が挙げられる。

2. エージェントの種類、特性、行動則のモデル化

マルチエージェントシステム(MAS)とは、多数の自律的に行動するエージェントから構成されるシステムである。個々のエージェントは各自の環境を知覚し、各自の目標を達成するように行動をとる。システム全体の振舞いは、エージェント同士が相互に作用することによって決定される。また、この振舞いは各エージェントの行動決定に影響を及ぼす。各エージェントは、このフィードバックから自分の行動を変化させていくことになる。列車事故において登場する集団、組織のうち、本研究では以下の項目をエージェントとした。

(1) 傷病者、(2) 消防機関、(3) 医療機関

図1に傷病者搬送問題における各エージェント間の関係を、表2に各エージェントの特性、活動内容を示す。以下に各エージェントの特性、行動則について説明する。なお警察機関および一般市民もエージェントとして考えられるが、本研究では、特に重症、中等症者の救助後から医療機関での治療に至るまでの過程に注目していること、また列車事故において重症、中等症者の搬送の中心を担ったのは主に消防機関であることから、警察機関および一般市民の活動は検討するモデルから省略した。

(1) 傷病者

傷病者の負傷状態を「重症者」、「中等症者」、「軽症者」の3種類を仮定した。また各負傷状態を評価する指標として、救出されてから何も治療を施さなければ回復不可能な状態に至るまでの時間(RmnT)を仮定し、各負傷状態とRmnTの関係を表3のように仮定した。重症および中等症の傷病者は自力歩行や能動的な判断を行わないとした。一方軽症の傷病者については自力歩行が可能とし、列車事故においては救急隊の誘導に従って行動していたことを考慮し、本シミュレーションにおいても、消防機関エージェント等による誘導に従うと仮定する。

(2) 消防機関

消防機関に所属する部隊としては、主に消火活動を行う消防隊、主に被災者の救命および搬送を行う救急隊、主に被災者の救出救助を行う救助隊等があげられる。また消防本部は、各部隊および外部との情報通信を行う。本研究では、特に傷病者の救助後から医療機関での治療に至るまでの過程に注目していることから、消防本部および救急隊をエージェントとして考慮する。

(2-1) 消防本部

表1 列車事故と地震災害における被害の比較

	列車事故	地震被害
傷病者の発生	短時間に多数	短時間に多数
消防・警察機関	被害なし	被害有り
医療機関	被害なし	被害有り
ライフライン	被害なし	被害有り
搬送経路	被害なし	被害有り

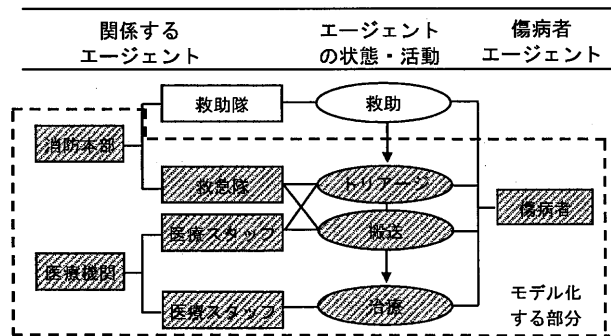


図1 各エージェント間の関係

表2 対象とするエージェントの特性・活動内容

エージェント	特性・活動内容
傷病者	重症者 負傷度
	中等症者 重症・中等症：自力歩行不可能
	軽症者 軽症：自力歩行可能
消防機関	消防本部 出動命令・災害全体の情報の収集 市内部隊・市外消防機関との情報通信
	救急隊 トリアージ・搬送・消防本部との情報
医療機関	病院内 傷病者の治療・消防機関との情報通信
	現場派遣 トリアージ・搬送 所属医療機関との情報通信

表3 傷病者の負傷度別の重症度評価(RmnT)

負傷度	重症	中等症	軽症
RmnT(min.)	≤120	120~300	≤300

消防本部は、災害が発生した当該市消防本部(=「災害発生市消防本部」)とそれ以外(=「災害発生市外消防本部」)に区別できる。災害発生市消防本部の行動則としては以下の(a), (b)について、災害発生市外消防本部については(c)について説明する。

(a) 事故の覚知後から初動部隊出動指令まで

本研究では、覚知の時刻(事故発生からの時間で設定)を初期条件として設定し、解析を行う。覚知後は通報内容をもとに災害の種類および規模を推定し、出動部隊の編成を行う。消防本部には各車両の位置および車両の使用状態を確認できるシステムがあり、このシステムを用いて現場活動が可能な車両の選定を行い、市内関係消防署に出動命令を通知している。本研究における消防本部エージェントも、同様の機能を有するようにモデル化する。

(b) 部隊出動指令後の活動

災害発生市消防本部は、現場部隊から事故および現場の状況、負傷度別の傷病者数等に関する報告を受ける。

応援要請については、災害発生市消防本部内にある通信司令室には応援の要否を判断する権限はなく、現場部隊からの要請に応じて市内残存救急隊の編成または市外消防機関への応援要請を行う。応援要請の仕組として、尼崎市の場合、近隣の7市1町（芦屋・伊丹・西宮・宝塚・川西・三田・猪名川町）との間の消防応援協定、兵庫県内における兵庫県広域消防相互応援協定、隣接市である大阪市との相互応援協定、さらに全国規模となる緊急消防援助隊などがある。本研究では、応援部隊の要請は表4の流れで行うと仮定する。災害発生後から現場での活動が完了するまで、災害発生市消防本部は各救急車両等の位置情報、搬送した傷病者の負傷状態、各医療機関への搬送人数及び残り受入可能人数等に関する情報を継続的に収集する。またヒアリング結果を踏まえ、重症・中等症者が10人以上発生したという現場からの報告があった場合、基幹災害拠点病院に医療スタッフの派遣を要請すると仮定する。

(c) 災害発生市以外の消防本部の活動について

災害発生市以外の消防本部から部隊が出動するケースとしては、災害発生市消防本部からの応援要請があった場合、もしくは災害に関するメディアの情報を通じて自主判断により出動する場合が考えられる。本研究では、災害発生市以外の消防本部からの応援部隊の出動については、災害発生市消防本部からの応援要請により出動するケースについて検討する。

2-2) 救急隊エージェント

救急隊エージェントの活動としては、現場での傷病者のトリアージ、および傷病者の現場から医療機関までの搬送が考えられる。救急隊は1隊3人で構成されるとし、活動車両としては救急車、消防マイクロバス、消防ヘリの3種類を想定する。

(a) 出動から現場到着まで

消防本部からの出動要請に基づき、各救急隊は現場に向け出動する。各消防車両（救急車・マイクロバス・ヘリ）の初期位置は、所属消防署に位置すると仮定する。現場に最初に到着した先着隊は、現場の状況および傷病者数の把握、応援要請の要否の判断を行い、消防本部に報告する。負傷者概数の把握について、先着隊による報告は目視で確認できる範囲であることから、実際の傷病者数よりも少ないと考えられ、報告の回数を増すごとに正確な傷病者数の報告に近づくと考えられる。そこで、救急隊による事故第1報の報告における負傷者数の報告（VTM'）について、実際の負傷者数（VTM）に対し目視では確認できない傷病者の割合を mr 、改善率を τ とすると、各負傷度別の傷病者数を以下のように決定した。

$$VTM'_i = VTM \times [mr + \tau \times (i - 1)] \quad [1]$$

$$\text{但し } 0 \leq mr \leq 1 \text{ かつ } 0 \leq \tau \leq 1 \text{ かつ } [mr + \tau \times (i - 1)] \leq 1$$

現場から消防本部への報告の頻度について、尼崎市消防活動規程第36条（活動状況の報告）には、「出動各隊の指揮者は、出動途上及び現場到着後の現場の状況について、随時必要に応じて次の各号（災害発生場所および目標・災害の状況および周囲の状況・要救助者の有無・応援隊の要否・その他必要事項）の全部または一部を指令班（＝消防本部）に即報しなければならない」とある⁵⁾。まず現場到着後の先着救急隊の活動としては、現場での活動に必要な機材の搬入、および応援隊の要否を報告するために、特に緊急に治療を必要とする重症者の人数を把握するための誘導による重症・中等症者と軽症者の選

表4 応援要請の順序及び応援部隊数

順位	応援部隊	部隊数（計）
-	初動部隊	4
①	市内残存部隊	4
②	近隣市町(1)（西宮・伊丹・大阪）	4
③	近隣市町(2)（②以外の近隣7市1町）	5
④	兵庫県内（神戸・明石・加古川・姫路）	4

表5 事故発生からの時間と消防本部の対応の関係
（救急隊の活動に関係するものに限る）

時刻	経過時間	消防本部の対応等	救急隊 参集状況
9:18	-9	災害発生	
9:22	-5	災害発生: 市内救急隊5隊出動指令	
9:26			
~	0		3隊到着
9:28			
9:27	0	市内・近隣市・大阪府内の二次、三次医療機関に受入体制の強化を依頼	
9:31	4		1隊到着
9:35	8	B6にドクターカー派遣要請	
9:36	9		1隊到着
9:38	11	(1) 市内救急隊2隊出動指令	
9:43	16		2隊到着
9:46	19	(2) 隣接市(西宮・伊丹)に応援要請	
9:50	23	(3) 大阪市消防局に応援要請	
9:50	23	神戸市自主判断による消防防災ヘリ出動	

別、トリアージによる重症者と中等症者の選別を行うと考えられる。重症・中等症者と軽症者の選別を行ったところで消防本部に重症・中等症者と軽症者の概数を報告し、以後トリアージを行いつつ必要に応じて随時重症者、中等症者の概数を消防本部に報告するものと考えられる。一方表5に、列車事故における消防本部の対応活動を示す。表中の「経過時間」は、救急隊が到着した時間を9:27分とみなした場合の、その時刻から各対応活動までの経過時間を表す。このとき消防本部による救急隊の出動に係る(1)～(3)の対応活動について、(1)は先着救急隊到着後10分程度、(2)は市内増援部隊到着後3分後、(3)は(2)の4分後であるが、(2)と同時期に応援要請を決定したと考えられ、市内増援部隊到着後の状況報告時に、現場からさらに応援要請があったと考えられる。

以上の一連の活動内容および列車事故における消防本部の対応活動の救急隊到着からの経過時間を考慮した結果、現場到着から消防本部への状況と応援要請の要否に関する報告は、最初は10分、以後応援隊が到着した時点で消防本部に状況報告および応援の要否を報告すると仮定する。

(b) 現場到着後の活動

現場に到着した救急隊は、傷病者の負傷度を選別するトリアージ、または傷病者の搬送を行う。

(b-1) トリアージ

救急隊員は救出された傷病者に対し、自力歩行可能な軽症者を誘導した後、残った自力歩行できない重症者及び中等症者に対しトリアージを行う。トリアージは重症者から優先的に行い、重症者同士、中等症者同士につい

ては救出順にトリアージを行う。負傷者1人に対しスタッフ1人が担当し、負傷者一人に要する時間は2分と仮定する。

(b-2) 傷病者搬送

各搬送方法の搬送速度、及び負傷度別の傷病者の搬送可能人数を表6のように仮定する。救急車両およびマイクロバスの搬送速度は列車事故における各車両の搬送速度をもとに仮定した。またヘリコプターの搬送速度については、一般的な速度(200km/h)に傷病者の搬入・搬出時間を考慮した数値を仮定した。

(c) トリアージスタッフと搬送スタッフの割合について

列車事故をはじめとする多数傷病者発生事故では、トリアージスタッフと搬送スタッフの数的なバランスを図ることも重要である。本研究では、トリアージスタッフ数に上限を設け両者の割合を制御した。トリアージスタッフの上限について、救出されかつ未トリアージの重症および中等症者数をVTM-RYとすると、VTM-RYを時間T(min.)内でトリアージを終了できる人数(Ntrg)とした。すなわち

$$Ntrg \geq VTM-RY / (T/2) \quad [2]$$

本研究ではT=10(min.)として解析を行った。

(3) 医療機関

医療機関の活動としては、医療機関での傷病者の治療に加え、列車事故と同様に災害現場への医療スタッフの派遣および現場でのトリアージ活動への参加までを考慮する。検討する医療機関の範囲としては、解析対象時間内に傷病者が搬送された医療機関を対象とする。事故現場と各医療機関の位置関係を図2に示す。

(a) 各医療機関の負傷度別受入可能人数の仮定

各医療機関は、保有する人的・物的医療資源に従って負傷度別に傷病者を受け入れる。列車事故時における、各医療機関の負傷度別の受入人数と医療スタッフや医療機器などの人的・物的医療資源の関係を表7、表8に示す。表7より、重症者についてはICU病床を有し専属の救命スタッフを有する医療機関にのみ搬送されること、搬送人数についてはICU保有数と同程度かやや下回る数値であることが確認できた。実際には、事故時にICU病床全てが使用可能であるとは限らないため、ICU保有数をNicu、空きICU率をFicuとして重症者の受入可能人数(Nacr)を以下の式で表すとする。

$$Nacr = Nicu \times Ficu \quad \text{但し } 0 \leq Ficu \leq 1 \quad [3]$$

本研究ではFicu=1として解析を行った。

一方中等症及び軽症者については、分析の結果療養型病床を有さない救急告示病院に搬送されていることが確認できた。表8に、各医療機関の総病床数と中等症及び軽症者の搬送人数の関係を示す。受入人数について、いずれの医療機関でも中等症の場合は総病床数の5%程度、軽症の場合は20%程度であることが確認できた。

以上の検討結果を踏まえ、各医療機関の負傷度別の傷病者受入人数を表9のように仮定した。総病床数に対する割合は毎日変動するものと予想されるが、病床稼働率を

表6 各搬送方法の搬送速度及び負傷度別搬送可能人数

	隊員数	速度	搬送人数(/台 or 機)		
	(人/隊)	(km/h)	重症	中等症	軽症
救急車両	3	30	1	2	4
マイクロバス	3	30	0	0	25
ヘリコプター	3	150	1	2	2

表7 列車事故における各医療機関の受入人数(1)
[重症者の受入]

	一般型 病床数	ICU 病床		専属 スタッフ
		保有	使用	
A1	670	7	6	有
A2	400	0	0	無
A3	149	0	0	無
A4	62	0	0	無
A5	102	0	0	無
A6	500	5	0	無
A7	100	0	0	無
A8	106	0	0	無
B1	1001	17	15	有
B2	400	5	3	有
B3	406	0	0	無
B4	292	0	0	無
B5	383	5	1	無
B6	292	10	1	有

表8 列車事故における各医療機関の受入人数(2)
[中等症者・軽症者の受入]

搬送先	搬送人数		病床数	比率	
	①中等症	②軽症	③一般型	①/③	②/③
A1*	30	33	670	0.04	0.05
A2	11	40	400	0.03	0.1
A3	12	63	149	0.08	0.42
A4	5	0	62	0.08	0
A5	0	22	102	0	0.22
A6	1	2	500	0	0
A7	6	11	100	0.06	0.11
A8	0	0	106	0	0
B1*	11	66	1001	0.01	0.07
B2*	1	0	400	-	0
B3	2	0	406	0.00	0
B4	1	0	292	0.00	0
B5	4	2	383	0.01	0.01
B6*	2	0	292	0.01	0

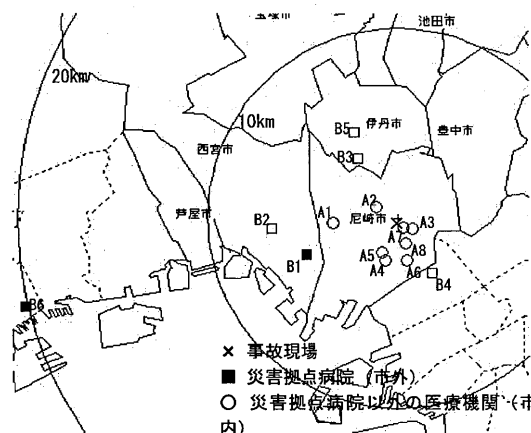


図2 事故現場と各医療機関の位置関係

調査することにより精度を向上させることができると考えられる。

(b) 病院前トリアージ

医療機関に傷病者が搬送された時点でトリアージを行うと仮定する。所要時間は2分とする。

(c) 必要治療時間

各傷病者の治療時間について、重症、中等症者についてはそれぞれ1人あたり10分、軽症者については3分と仮定する。いずれの医療機関も、一度に治療可能な傷病者数は、重症、中等症の場合は2人までとする。

(d) 医療スタッフの現場出動

基幹災害拠点病院であるB6は、尼崎市消防本部からの要請があった場合医療スタッフ3名を派遣すると仮定する。現場に到着した医療スタッフは、トリアージスタッフとして活動する。使用していたドクターカーは緊急の場合は、他の救急隊員が使用可能とする。その際の搬送先医療機関はB6とする。

3. 解析対象およびパラメタ

(1) 検討項目

上述の通り決定した各エージェントの行動則を用いて、列車事故で被災した傷病者の救助後から医療機関で治療を施されるまでの過程をシミュレーションする。シミュレーション結果の評価方法としては、「負傷度別の傷病者搬送人数の時間推移」、「重症者の病院到着時間および治療開始時間の時間推移」、および「各医療機関への重症者搬送人数の時間推移」を指標とし、実際の列車事故におけるこれらの指標との比較から、本シミュレーションモデルの精度についての考察を行う。

(2) 研究対象とする時間帯および傷病者数

図3に、重症・中等症者の現場からの搬送状況を示す。「経過時間」とは、事故発生時刻(9:18)からの時間のことである。図3より、事故発生から約240分で搬送待ちの傷病者がいなくなったことが確認できる。また文献¹⁾では、事故発生から約140分後には搬送のための救急車両が余っていたと報告している。これらを踏まえ、事故発生から150分間を解析対象時間とし、その間に救出された傷病者を搬送対象者とした。その結果、重症者31人、中等症者18人、軽症者193人が、解析における搬送対象となった。

(3) 解析パラメタ

傷病者の搬送時間に影響を与えるパラメタとしては、以下の2項目が影響すると考えられる。

(a) 重症者の搬送先医療機関選定条件

列車事故等の災害時における搬送部隊の医療機関選定ルールは、基本的に平常時と変わらないと考えられる。平常時に重症者を受入可能な医療機関の特徴としては、ICU病床を有しかつ専属の救命スタッフを有する点があげられる。一方尼崎市消防本部に対するヒアリングによると、消防本部は、通常一日に3回市内の各医療機関に対し症例別の受入可能人数を確認しており、その情報を各救急隊員に周知させている。また列車事故において、各救急隊は消防無線を介して搬送先医療機関に関する報告を行っていたことなどから、各救急隊員は各医療機関の残り受入可能人数は把握できていたと考えられる。これらの点を踏まえ重症者搬送においては、まず以下の3項目を前提として搬送先医療機関を選定する。

表9 本研究における各医療機関の負傷度別受入可能人数

	距離 (km)	一般型	ICU	受入可能人数		
		病床数	病床数	重症	中等症	軽症
A1*	3.3	670	7	7	33	134
A2	1.2	400	0	0	20	80
A3	0.9	149	0	0	7	29
A4	2.1	62	0	0	3	12
A5	1.7	102	0	0	5	20
A6	2.1	500	5	5	25	100
A7	0.5	100	0	0	5	20
A8	1.2	106	0	0	5	21
B1*	4.7	1001	17	17	50	200
B2*	6.5	400	5	5	3	13
B3	4.0	406	0	0	20	81
B4	3.3	0	0	0	0	0
B5	5.2	383	5	5	19	76
B6*	20.6	292	10	10	14	58

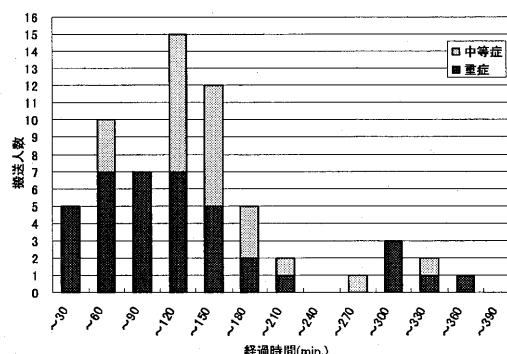


図3 事故発生後の傷病者の搬送状況

- ・重症者を受入可能な医療機関はICU病床を有しかつ専属の救命スタッフを有する医療機関であること
- ・搬送を担当する救急隊は各医療機関の負傷度別の受け入れ可能人数を把握していること
- ・傷病者を搬送する際には消防無線を介して消防本部並びに他の救急隊員に搬送先医療機関を報告すること、その結果、他の救急隊員は各医療機関の残り受入可能人数を把握していること

上述の前提のもとに重症者の搬送先医療機関選定に関するパラメタとしては、以下の3ケースを想定する。

- ①搬送距離を優先する (=搬送先医療機関の受入人数が0になるまで現場に近い医療機関に搬送する)
- ②受入可能人数を優先する (=空ICU病床率の大きい医療機関に搬送する)
ここで空ICU病床率とは、(残り空ICU病床)/(全ICU病床)で定義する。
- ③搬送距離と受入可能人数の両方を優先する
この場合、搬送距離と空ICU病床率の逆数を乗じた値から、両者を考慮した優先順位を決定した。

(b) 搬送部隊数 (=応援部隊の要請範囲)

全傷病者を医療機関に搬送するまでに要する全体の時間は、特に今回の列車事故の場合には、搬送部隊数が大きく影響すると考えられる。この搬送部隊数は、応援部隊の要請範囲が関係する。そこで応援部隊の要請範囲について、以下の3段階をパラメタとした。

- ④市内救急隊のみ
- ⑤近隣市町 (1) まで
- ⑥近隣市町 (2) まで

以上, (a), (b)の解析パラメタの組み合わせとしては9 (=3×3) ケースが考えられるが, 「(a)重症者の搬送先医療機関の選定条件が傷病者搬送に与える影響」を分析するために, (a)の3ケースに対する(b)のパラメタは「⑤近隣市町(1)まで」に固定し, 「(b)搬送部隊数が傷病者搬送に与える影響」を分析するために, (b)の3ケースに対する(a)のパラメタは「③搬送距離と受入可能人数の両方を優先」に固定した。その結果, 解析ケースとしては表7に示すCase1~Case5の5ケースについて解析を行う。

列車事故にもっとも近い解析ケースについて, 列車事故における事故発生から150分間における搬送部隊数の条件としては⑤に相当する。また救急隊の重傷者搬送先医療機関の選定条件としては①~③のいずれかであると考えられる。従って, 列車事故にもっとも近い解析ケースとしては, 重傷者搬送先医療機関の選定条件の違いによりCase1~Case3が考えられる。

4. 解析結果と考察

図4にシミュレーションモデルの例を示す。また図5に負傷度別の傷病者病院到着時間の推移を, 図6に重症者の病院到着時間と治療開始時間の推移を, 図7に重症者の医療機関別の病院到着時間の推移を示す。

(1) 列車事故とシミュレーション結果の比較

図5より列車事故における搬送活動の特徴として, 事故発生後20分程度から重症者搬送が優先的に行われていること, 重症者搬送が落ち着いた120分頃以後に中等症者の搬送が増加していることが挙げられる。列車事故の搬送条件に近いCase1~Case3では, いずれも重症者については事故発生後20分後程度から搬送が優先的に行われていること, また120分程度から中等症者の搬送が増加していることなど, 列車事故における重症者, 中等症者の搬送活動がよく再現されている。一方図7より, 重傷者の医療機関別の病院到着時間の推移の特徴として, 列車事故では最初A1にある程度の人数の重傷者が搬送され, その後B1に重傷者が搬送され始め, 事故発生後80分程度でB1への搬送人数がA1を追い越すこと, その他B2, B6にも搬送されるという点が挙げられる。Case1~Case3と比較すると, Case2やCase3のように規則的に分散搬送することではなく, 全体の搬送の傾向としてはCase1に近いものの, 受入可能人数が0になる前に次に近い医療機関に搬送していると考えられる。これより想定した重傷者搬送先医療機関の選定条件の範囲で, 列車事故における重傷者搬送をある程度再現できるものと考えられる。

以上の検討結果より, 一災害事例に対してではあるものの, 本シミュレーションモデルにおける各エージェントの行動則のモデル化が, 妥当なものであったことが確認された。

(2) 重傷者搬送先医療機関の選定条件が搬送活動に与える影響

重傷者搬送先医療機関の選定条件が搬送活動に与える影響について, 「①搬送距離を優先する」場合, 傷病者全体の病院到着時間は短縮されるが, 特定の医療機関に搬送が集中するために病院到着時間と治療開始時間に遅れが生じてくることが予想される。一方, 「②空ICU病床率の大きい医療機関に優先的に搬送する」場合, 空ICU病床率を優先するため現場からの距離が遠い医療機関でも早い段階で傷病者が搬送され, 結果として傷病者

表10 解析ケース

	重症者搬送先選定条件	応援要請の範囲
Case1	①	⑤
Case2	②	⑤
Case3	③	⑤
Case4	③	④
Case5	③	⑥



図4 シミュレーションモデルの例

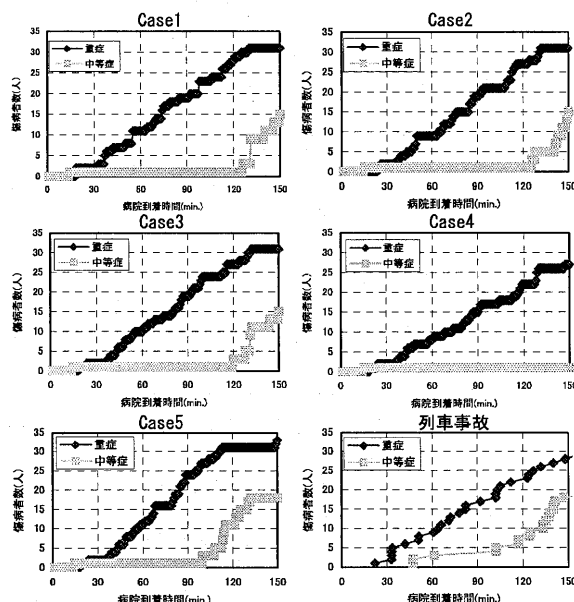


図5 負傷度別の傷病者病院到着時間の時間推移

の病院到着時間は長くなる可能性があるが, 分散搬送されることにより病院到着時間と治療開始時間との間の遅れはあまり生じないことが予想される。「③搬送距離と受入可能人数の両方を考慮する」場合, 傷病者全体の病院到着時間はそれ程長くなることは無く, また分散搬送することにより, 病院到着時間と治療開始時間との間の遅れはあまり生じないことが予想される。

図5よりCase1~Case3について比較すると, 重症者全体の病院到着時間はCase1~Case3のいずれも約130分程度であり, パラメタの違いによる全体の病院到着時間への影響は見られない。特にCase2が他の2ケースとそれほど全体の搬送時間が変わらない理由として, 重症者を搬送可能な医療機関の現場からの距離が, B6は約20km, その他はいずれも約5km前後に位置するため, 空ICU病床率を優先して搬送先医療機関を決定してたととしても, 搬送時間には影響しなかったことが考えられる。一方図6より, 重

症者の病院到着時間と治療開始時間の推移を見ると、Case2、Case3では両者の差がほとんどないのに対し、Case1では70分過ぎから重症者の病院到着時間と治療開始時間の差が大きくなっていることが確認できる。空ICU率を優先する、つまり分散搬送を行うことにより、特定の医療機関に負担が集中することを軽減できることを定量的に示すことができた。

(3) 搬送部隊数が搬送活動に与える影響

搬送部隊数が搬送活動に与える影響について、対象事例のような短時間に多数の傷病者が発生する災害であり、かつ災害現場からそれ程遠くない距離に重症、中等症者を受入可能な医療機関が存在する場合、災害発生後初期の段階から多数の搬送部隊を確保することは、より迅速に傷病者搬送活動を行うことに有効であると予想される。シミュレーション結果を見ると、Case3～Case5より応援要請の範囲を狭くすることにより、搬送を行う救急隊数が少ないため、全ての傷病者を搬送するのに要する時間が長くなることが確認できる。特にCase5では130分頃から回復不可能状態になる重症者が2名ほど生じている。これより今回の列車事故のような消防機関および医療機関の条件では、事故発生から早期に多数の救急隊を動員することの効果性が、シミュレーション結果を通して示唆された。

5. まとめ

災害時における傷病者搬送および人的・物的医療資源の最適利用を検討可能なシミュレーションモデルの構築を最終目標として、本研究では各エージェントの特性、行動則等のモデル化の妥当性を検証するために、2005年4月のJR福知山線列車事故における傷病者の搬送活動の再現を試みた。その成果を以下に述べる。

(1) 列車事故とシミュレーション結果の比較について、列車事故とシミュレーション結果を比較した結果、負傷度別の傷病者病院到着時間の推移における重症者搬送および中等症者搬送の特徴、重症者の医療機関別の病院到着時間の推移における重症者の搬送機関の時間推移の特徴ともに、シミュレーション結果は列車事故を良く再現するものであった。一災害事例に対してではあるものの、本シミュレーションモデルにおける各エージェントの行動則のモデル化の設定が、妥当なものであったことが確認された。

(2) 重傷者搬送先医療機関の選定条件が搬送活動に与える影響について、今回の列車事故における医療機関の配置条件では、搬送距離のみを考慮した場合、搬送先医療機関の空ICU病床率のみを考慮した場合、また両者を考慮した場合のいずれも、それほど重症者全体の搬送時間に差異は見られなかった。この理由として、重症者を受け入れ可能な医療機関が事故現場から比較的近い位置に集中している点が考えられる。一方重症者の病院到着時間と治療開始時間の推移より、空ICU病床率を考慮した搬送すなわち分散搬送が医療機関の負担軽減に有効であることを、シミュレーション結果を通して定量的に示すことができた。

(3) 搬送部隊数が搬送活動に与える影響について、今回の列車事故のような消防機関および医療機関の条件では、

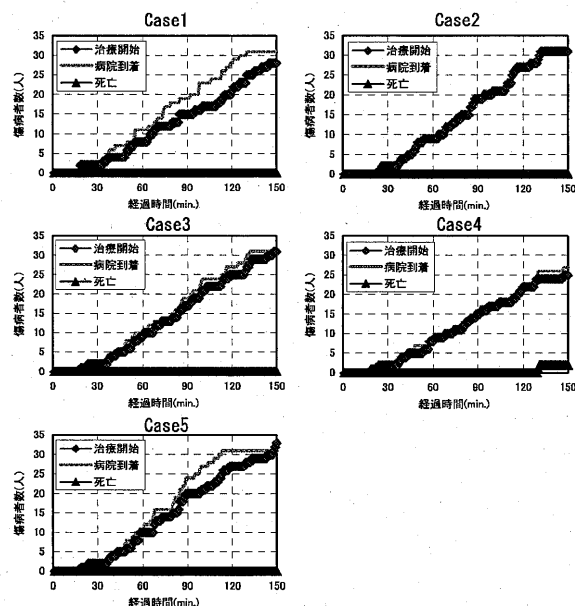


図6 重症者の病院到着時間と治療開始時間の推移

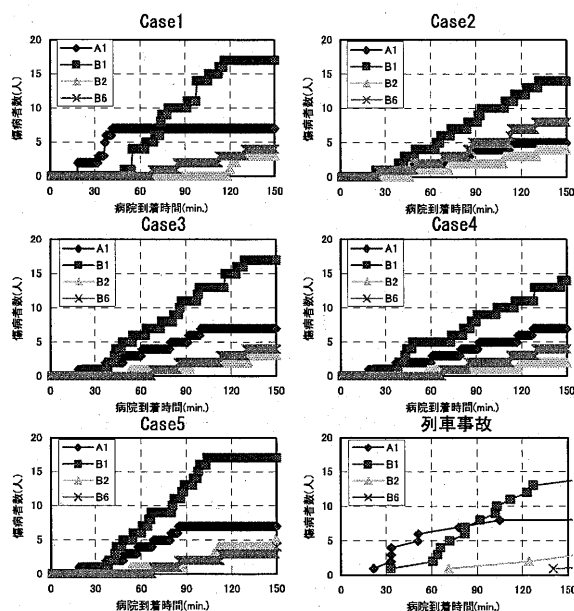


図7 重症者の医療機関別の病院到着時間の推移

事故発生から早期に多数の救急隊を動員することの効果性が、シミュレーション結果を通して示唆された。

今後は本検討結果に加え、建物、医療機器およびライフライン等を考慮した、地震災害時における医療機関の医療活動能力のモデル化、搬送経路のモデル化を行い、災害時における傷病者搬送および人的・物的医療資源の最適利用を検討可能なシミュレーションモデルの構築を目指すとともに、他の事故災害に本シミュレーションモデルを適用し、エージェントのモデル化の精度を向上させていくことを目指す。

参考文献

- 1) 日本集団災害医学会尼崎 JR 脱線事故特別調査委員会, JR 福

- 知山線列車事故に関する医療救護活動について，2006 年
- 2) 尼崎市消防局，JR 福知山線列車脱線事故消防活動概要，2005 年
 - 3) 兵庫県 JR 福知山線列車事故検証委員会，JR 福知山線列車事故検証報告書，2006 年
 - 4) 小池則満，秀島栄三，山本幸司：航空機事故等緊急災害時における傷病者搬送計画に関する基礎的考察，土木計画学研究・論文集No.16，pp.371-376，1999年
 - 5) 尼崎市，尼崎市警防活動規程

(原稿受付 2007.5.28)

(搭載決定 2007.9.15)