

2013年49週 定点報告総数 138 (1定点あたり 0.46)

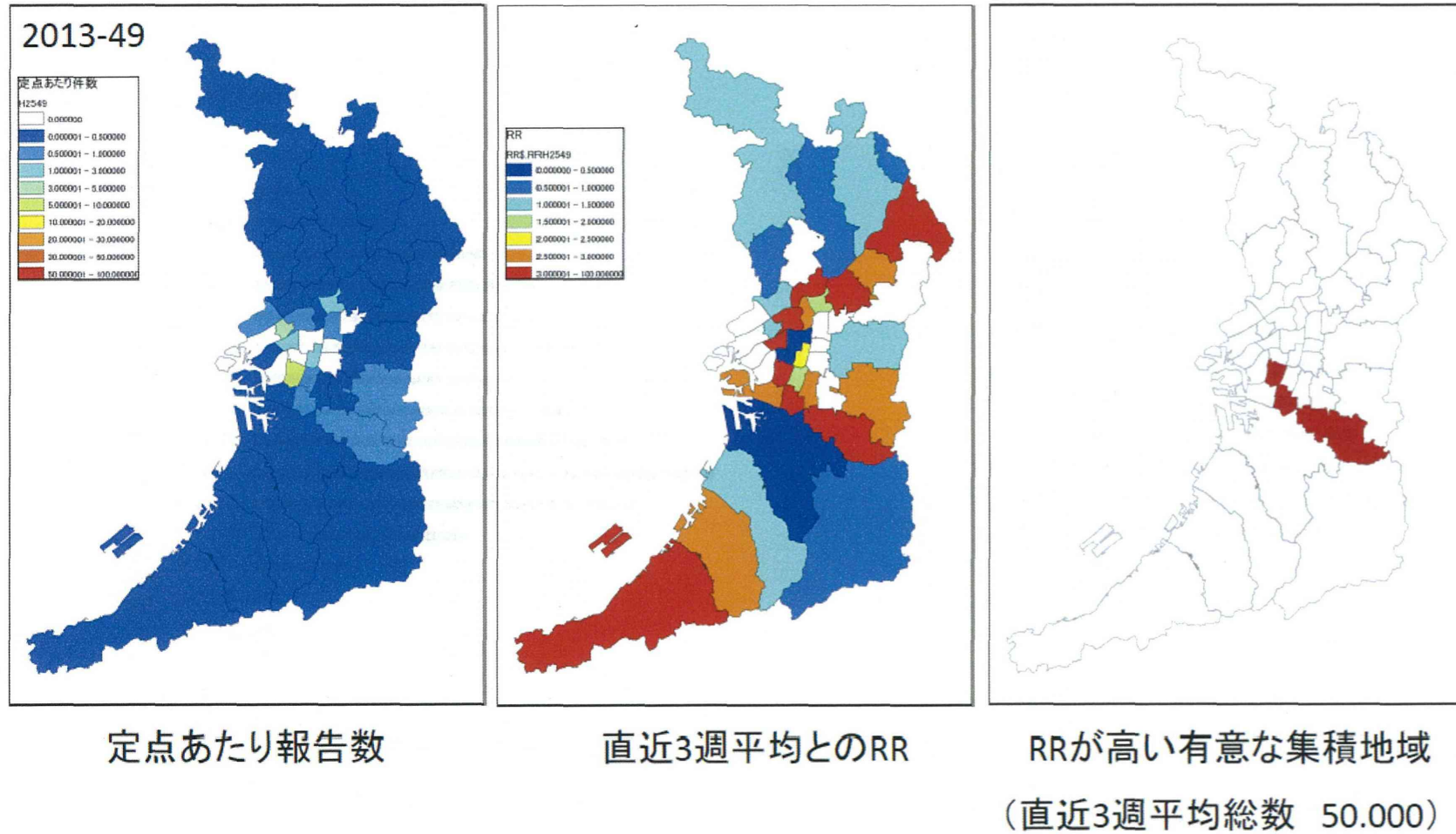


図3. 保健所管轄ごとの流行の視覚化

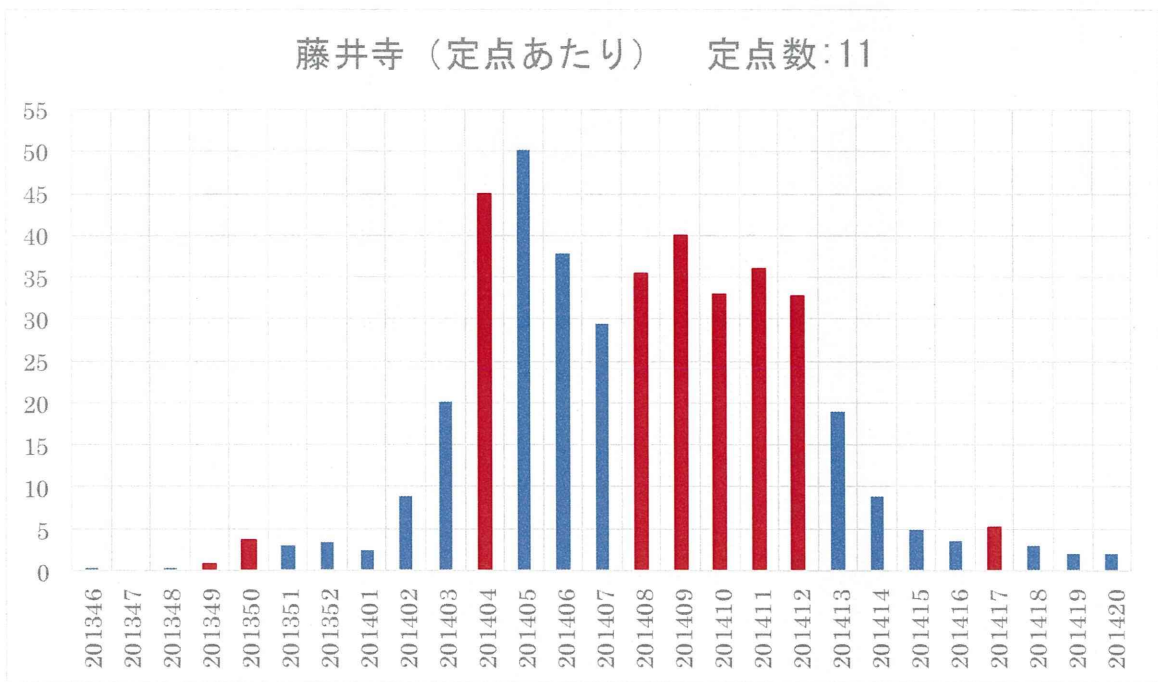
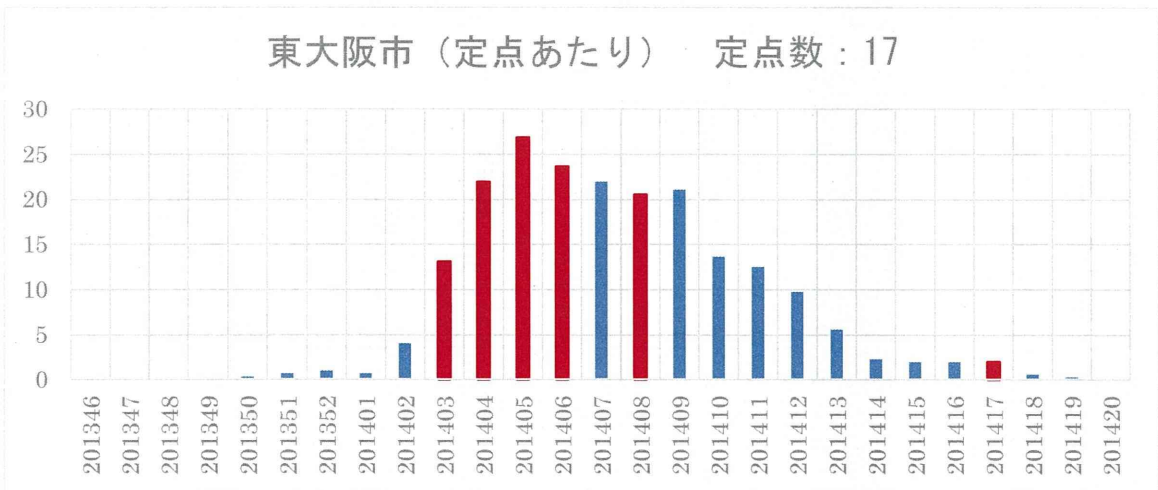
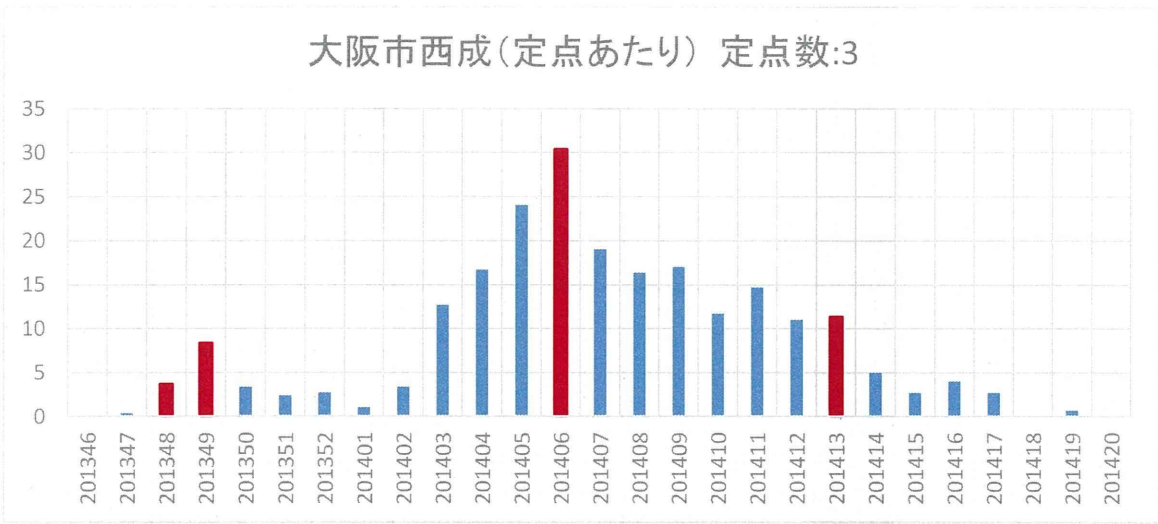


図4. 保健所管轄単位での流行の様子。赤色は集積地域として同定された週

CBRNE 事態における公衆衛生対応に関する研究班

研究成果（書籍）の刊行に関する一覧

（平成26年度：2014年4月1日～2015年3月31日迄、予定を含む）

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻	ページ	出版年 ※H26年度	GRANTへの 謝辞の有無
数藤由美子、平井百樹、穠山美穂	Human metaphase plate obtained from cultured peripheral lymphocytes after 5-Gy in vitro gamma-ray irradiatio	Radiation Biology of Medical Imaging; Wiley & Sons Publishing Co.			2014年刊行	無
数藤由美子	Normal human karyotypes	New Senior Secondary Mastreing Biology, 2nd Ed.; Oxford University Press			2014年10月刊行	無
数藤由美子	二動原体染色体異常の画像	初学者のための原子力・量子・核融合の事典; 丸善出版			2014年12月刊行	無
数藤由美子	放射線被曝により誘発された染色体異常の例	大学講義 放射線医学; 丸善出版			2014年12月刊行	無

CBRNE事態における公衆衛生対応に関する研究班

研究成果（雑誌）の刊行に関する一覧

(平成26年度：2014年4月1日～2015年3月31日迄、予定を含む)

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻	ページ	出版年 ※H26年度	GRANTへの 謝辞の有無
市川学, 春日雄翔, 出口弘, 金谷泰宏.	二次医療圏における夜間救急医療モデルの構築とその利用	システム制御情報学会論文誌	27(7)	p259-267	2014	無
石西正幸, 市川学, 田沼英樹, 出口弘, 金谷泰宏	エージェントベースシミュレーションによる高い致死性を持つ感染症対策におけるリスク分析手法の提案	システム制御情報学会論文誌	27(7)	p319-325	2014	無
山口一郎	医療現場の放射線安全医療施設の放射線立入検査のポイント放射線安全に関する事例の紹介	医療放射線防護	68	p31-35	2014	有
Kubokawa T, Hasukawa M, Takahashi K	On measuring uncertainty of benchmarked predictors with application to disease risk estimate	Scandinavian J Statistics	41	p394-413	2014	有
Nadaoka Y, Hayata N, Sugishita Y, Kajiwara T, Watanabe Y, Yoshida M, Hasegawa M, Hayashi Y, Ochi M, KaiA, Sumitomo M	The 2011 measles outbreak in Tokyo. An analysis of surveillance data	Nihon Koshu Eisei Zasshi	61(3)	p136-44	2014	無
Mano S, <u>Suto Y</u>	A Bayesian hierarchical method to account for random effects in cytogenetic dosimetry based on calibration curves	Radiat Environ Biophys	53(4)	p775-80	2014	無

二次医療圏における夜間救急医療モデルの構築と その利用*

市川 学[†]・春日 雄翔[†]・出口 弘[†]・金谷 泰宏[‡]

The Construction and Usage of a Simulation Model of Night-time Emergency Health Care System*

Manabu ICHIKAWA[†], Yusho KASUGA[†], Hiroshi DEGUCHI[†] and Yasuhiro KANATANI[‡]

The current Japanese night-time emergency health care system can no longer satisfy patients' demand due to the patient's changing consultation behavior and the doctor's uneven distribution. In order to understand the current situation of the night-time emergency health care in Japan, we propose a model to simulate the whole process of the night-time emergency health care system, including the patient's consultation behavior process, the patient's transportation process, and the negotiation process between a medical institute and an ambulance. We apply the agent-based modeling (ABM) approach to take into account the decision-making process of the patient, the medical institution, and the fire services department. We validate the model according to the actual patients' ambulance transportation time in the real situation. Especially, this model allows us to evaluate the proposed plan for improving the current daily rotation system of the Japanese night-time emergency health care system. As a result, we find that the proposed new daily rotation system will improve the medical services without raising the burden of the medical institute.

1. 背景と目的

1.1 背景

近年、比較的人口が集中する都市部において、夜間救急搬送患者の医療機関における不応需が問題となってきた。医療機関が患者収容に応じられない要因としては、「専門外」、「手術中・処置中」、「ベットの満床」、「医師不在」などが挙げられている [1,2]。医療機関による不応需の問題は、救急搬送時間の遅延を引き起こし、患者の予後を左右する重要な因子の一つとなりうるため、早急な改善が必要である。

このため、多くの市区町村や地域が、医療患者の受け入れ体制が制限される夜間救急医療のシステムの改善に取り組んでいる。とくに、地域内の病院群が共同で連帯

することにより、輪番制方式を用いた夜間における入院機能を確保することを目的とした病院群輪番制は、すでに多くの地域で導入されている。しかし、その制度の実態はさまざまであり、十分な効果を上げられていない [3]。今日、病院群輪番制の更なる充実をはじめ、新たな夜間救急医療システムの構築が求められている [4]。

1.2 目的

本研究では、現在の夜間救急搬送システムを取り巻く状況をふまえ、夜間救急医療における患者の発生から診療終了までの一連のプロセスを表現可能なモデルを構築する。構築するモデルは、患者収容要請に関わる時間を含めた搬送時間をシミュレーション結果として出力し、患者の観点からの医療サービスの評価が行えることを可能にする。また、現状の病院群輪番制に対して、夜間救急医療の当番となる医療機関のローテーションの組み換え案をシミュレーションすることができ、その結果を用いて医療サービス全体に及ぼす影響を分析することも可能にする。本論文では、上記の内容を含んだ構築モデルを説明し、現実の二次医療圏を対象に構築したモデルを適用することで、モデルの妥当性を評価するとともに、対象とした医療圏の病院群輪番制における現状の問題点を明確にする。そのうえで、現状の問題点の改善策を提

* 原稿受付 2013年9月2日

[†] 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology; J2-57, Nagatsutacho, Midoriku, Yokohama, Kanagawa 226-8502, JAPAN

[‡] 国立保健医療科学院 National Institute of Public Health; 2-3-6, Minami, Wako, Saitama 351-0197, JAPAN

Key Words: emergency health care system, medical service, agent-based, SOARS.

案シミュレーションを通じて夜間救急医療システムの改善が可能であることを説明し、構築したモデルの利用可能性を示す。

2. 関連研究

救急医療に対してシミュレーションを取り入れた研究は、救急搬送に関する研究と医療機関に関する研究の二つに大別することができる。

救急搬送に関する研究としては、大山らによる分析がある [5]。大山らは、患者が消防機関に通報したのち救急搬送によって医療機関に収容されるまでの時間が最小になるような消防機関の最適配置問題に取り組み、患者需要を考慮した消防機関の最適配置を示している。しかし、患者区分を考慮していない点と患者の救急需要をポアソン分布で取るなど、問題全体に対してトップダウンの視点でモデル化を行っているため、患者の傷病に応じた搬送経路の違いなど詳細な救急需要が表現されていない。また、独歩で医療機関を受診する患者が考慮されていない点や、医療機関の患者収容に関する制約条件（たとえば、医師が処置中で対応できない）も考慮されていないなど、シミュレーションモデルの現実社会への適用は困難であると考えられる。

また、医療機関に関する研究としては、松本らによる報告がある [9]。松本らは、病院群輪番制の効率化に関して、患者の移動距離の最小化を目的とした最適化問題に取り組んでおり、病院群輪番制での担当回数や病院のローテーションを変化させることで移動距離が改善されることを示している。しかし、日本の夜間救急医療に係る患者のアクセスコストを議論するうえで、距離だけでなく搬送時間を考慮する必要がある。したがって、このモデルについても現実社会への適用は難しいと考える。

同様に、医療機関や救急車の最適配置問題、医療機関設置の計画性、救急搬送の経路に着目した他の研究も存在するが、現実の医療機関の制約条件や患者を優先した評価指標が十分に考慮されていない [6-8,10,11]。

以上のことから、これまで行われてきた研究では、夜間救急医療における救急搬送時間の遅延問題を、医療機関の患者収容に関する制約条件を含めて議論することができていない。そこで、本研究では、医療機関と救急搬送の相互連携に焦点を当てた夜間救急医療モデルを構築し、その有用性について言及する。

3. 方法論

3.1 救急医療の特性

救急医療は、消防機関における救急搬送部門と、医療機関による救急医療部門から構成されており、医療法で定められた医療計画に基づき二次医療圏¹を対象とした

¹二次医療圏の定義：地理的条件などの自然的条件および日常生活の需要の充足状況、交通事情などの社会的条件を考慮して、一体の区域として病院における入院

地域完結型医療の実施が推進されている。その中で、救急医療部門を担う救急指定病院は、受診対象となる患者の「重症度」により以下の3段階に分類され、それぞれの医療機関は都道府県知事から救急告示²の指定を受け運営される。

- 一次救急医療機関：入院や手術を必要としない救急患者の診療を担う医療機関。
- 二次救急医療機関：生命の危機はないが、入院や手術を必要とする重症救急患者の診療を担う医療機関。原則として一次救急医療機関からの転送患者を受け入れる。
- 三次救急医療機関：生命の危機に瀕しており、二次救急医療機関では対応できない重症および複数の診療科領域にわたるすべての重篤な救急患者を、24時間体制で受け入れられる体制と高度な診療機能を持つ医療機関。

厚生労働省が基本と考える救急医療体制では、診療を必要とする患者はまず一次救急医療機関（救急初期）を受診し、検査や入院を必要とする重症患者であると診断された場合に、二次救急医療機関に転送される。さらに、高度な医療が必要な場合には、三次救急医療機関へ転送される。また、患者の症状に応じて二次または三次の救急医療機関へ直接搬送されることもある (Fig.1 参照)。

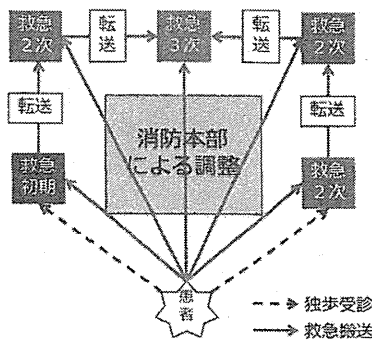


Fig. 1 Image of emergency health care system

に関わる医療を提供する体制の確保を図ることが相当であると認められるものを、単位として設定する。

²救急告示の要件：

- 1) 救急医療について、相当の知識および経験を有する医師が常時診療に従事していること。
- 2) X線装置、心電計、輸血および輸液のための設備・そのほか救急医療を行うために必要な施設および設備を有すること。
- 3) 救急隊による傷病者の搬送に容易な場所に所在し、かつ、傷病者の搬入に適した構造設備を有すること。
- 4) 救急医療を要する傷病者のための専門病床または当該傷病者のために、優先的に使用される病床を有すること。

現行の救急医療システムの枠組みは、既述の通りであるが、実際には徒歩もしくは自家用車やタクシーを利用して受診する独歩受診患者が、二次救急医療機関へ殺到する可能性がある。このとき、二次救急医療機関の患者収容には制約が生じ、結果として搬送部門における搬送先医療機関の選定に多くの時間を要する現象が引き起こされている。とくに搬送遅延の問題は、一般外来が終了した夜間において顕著に生じる。

以上のことより、本研究では、現在の夜間における救急医療現場を表現するモデルには、患者とその疾病の多様性による搬送経路や診療行為の違い、また医療機関と消防機関の患者収容に関する相互連携など、複数の利害関係者の行動や意思決定をマイクロレベルでモデルとして表現したうえで、システム全体として振舞いが観測できるモデルが必要であると考えられる。

3.2 研究手法

3.1 で既述したとおり、複雑に利害関係が絡み合った対象をトップダウンにとらえることは難しい。そこで、本研究では、複数の意思決定主体を表現可能なエージェントベースモデリング（以下、ABM）を用いて夜間の救急医療現場を表現するモデルの構築を行う。ABMとは、個々のエージェントとよばれる主体が多様な意思決定基準に応じた自立的な活動を行い、それを制約条件や評価指標に基づいて機能的に分析することを狙いとした手法である [20]。この手法を用いることで、患者の年齢、傷病区分、傷病程度による受診行動、搬送経路、診療過程の違いをモデルで表現することが可能となる。また、現実に即した制約条件として、医療機関の患者収容条件を設定することで、現行制度である病院群輪番制をモデルに組み込むことが可能となる。これらを含むモデルにおいて、意思決定主体が自立的な行動を取ることにより、評価指標に基づいた夜間救急医療システム全体の分析が可能になり、現行制度の評価・分析を通じた改善案の提案も可能になると考える。

なお、本研究で構築するモデルは現実世界に存在する問題、ここでは夜間の救急医療体制を理解するためのモデルであり、現実世界に存在する現象や問題を理解、分析、予測するためにシミュレーションモデルを利用する社会シミュレーションの枠組みの中でモデルを構築する [21]。したがって、モデルのシミュレーションを通じて、モデルの対象とした夜間の救急医療現場の最適化を目指すのではなく、問題点を明らかにし改善案を提案できることを目標とする。

4. モデル

ここでは、構築した現行の夜間の救急医療現場を表現した夜間救急医療シミュレーションモデルについて説明する。モデルは、意思決定主体となるエージェントおよびエージェントの活動の場から構成される。エージェン

トには、患者と救急車が存在し、これらエージェントが行動する場は仮想都市である。

4.1 仮想都市

仮想都市は、人間が居住する現実世界の町丁を境界にした都市空間の場と、患者が収容される医療機関の場、および救急車の配車に関わる消防本部および消防署の消防機関の場から構成される。

4.1.1 都市空間

都市空間は、人間が居住する現実世界の町丁を最小単位とした複数の場から構成される。それぞれの場は、人間が居住する需要点であり、人間が発症し患者が発生する場でもある。都市空間のそれぞれの場が持つパラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Variables of each space in city

変数	意味
小児人口	小児（15歳未満）の人口
成人人口	成人（15歳以上、65歳未満）の人口
高齢者人口	高齢者（65歳以上）
市区町村	場が存在する市区町村名
緯度	各場の緯度
経度	各場の経度

4.1.2 消防機関

消防機関は、消防本部、消防署、救急車から構成される。このうち消防本部と消防署については、エージェントの活動の場であり、救急車が患者の救急搬送に意思決定を行うエージェントである。消防署は、救急車が待機する場であり、Table 2 に示すパラメータを持つ。

Table 2 Variables of fire station

変数	意味
救急車数	所属する救急車の台数
緯度	消防署の緯度
経度	消防署の経度

消防本部とは、救急車の配車に関わる中央制御の役目を担う。患者からの救急車の要請連絡を受けた後、各市区町村の消防機関への連絡と、救急車配送の調整を行う。なお、消防本部は、消防組織法に基づき各市区町村または一部事務組合、広域連合ごとに設置される。

消防本部は、統括する消防署の情報を持ち、統括する各消防署に所属する救急車の情報も持つ。また、各医療機関の場所、対応診療科に関するデータベースも持ち、救急車が患者の搬送先の医療機関を選択する際に利用する。消防本部が持つパラメータを Table 3 に示す。

なお、救急車については 4.2 で説明する。

Table 3 Variables of main fire station

変数	意味
消防署リスト	管轄する全消防署の集合
救急車リスト	管轄する全消防署が保有する全救急車の集合
医療機関データ	各医療機関の地理, 対応診療科の情報
夜間当直データ	当直の当番表と夜間診療対応の医療機関の情報
緯度	消防本部の緯度
経度	消防本部の経度

4.1.3 医療機関

医療機関は、患者が収容される場であり、同時に患者の診療を行う場でもある。医療機関に設置される診療科については、その機能と特性に基づき10の診療科に分類した。構築するモデルにおける診療科と現実の診療科の対応表をTable 4に示す。

Table 4 Hospital department

本研究における診療科	現実の診療科
脳神経外科	脳神経外科
循環器科	循環器科, 心臓血管外科
神経内科	神経内科
消化器科	消化器科
呼吸器科	呼吸器科
精神科	精神科
泌尿器科	泌尿器科
内科	内科
外科	外科, 整形外科, 救急科
小児科	小児科

その他、医療機関は病床数、各診療科の患者への対応状況、夜間帯の当番情報などTable 5に示すパラメータを持つ。機能区分は、Fig. 1に示した患者の搬送、転送に関係する。また、診療科対応状況については、現在何らかの処置をしている患者がいる場合は、その値は「処置中」となり、そのときの対応患者の傷病と程度によっては、新たな救急患者を受け入れることができなくなる。診療時間については、医療の専門家の意見を参考にした。また、当直表の値である診療科ごとの「当直の有無」、「夜間診療開始時刻」「夜間診療終了時刻」の組合せには、病院群輪番制におけるローテーションのパターンを設定する。この設定するローテーションのパターンを変えることで、さまざまなシナリオを想定してのシミュレーションを行うことが可能である。

4.1.4 仮想都市の構築

都市空間の場を定義するにあたり、人間が居住する都市空間の情報は政府統計の総合窓口から得られる情報を用いる[19]。なお、この情報を都市情報とする。ま

Table 5 Variables of hospital

変数	意味
機能区分	「一次」「二次」「三次」のいずれか
診療科リスト	処置可能な診療科の集合
病床数	受け入れられる入院患者数
診療科対応状況表	各診療科に対して、「処置中」「対応可能」のいずれか
当直表	各診療科に対して、「当直の有無」「夜間診療開始時刻」「夜間診療終了時刻」
待患者リスト	各診療科に対して診療を待っている患者の集合
軽症診療時間	軽症患者の診療時間
中等症診療時間	中等症患者の診療時間
重症診療時間	重症患者の診療時間
緯度	医療機関の緯度
経度	医療機関の経度

た、圏内に存在する医療機関については、都道府県や市区町村の行政が公開している情報より、各医療機関の名前、住所および診療科の情報を取得した。この情報を医療機関情報とする。そして、これら都市情報と医療機関情報をArcGIS9.0 (ESRI社)を用いて統合し、モデルの入力値として利用する。なお、二次救急医療機関で対応できない患者が発生した場合の収容先となる三次救急医療機関が存在しない場合は、圏外医療機関を一つ設置し、すべての診療科に対応し必ず患者を収容できるものとする。

4.2 エージェント

本研究で構築するモデルにおいて意思決定主体となるエージェントは、都市空間に居住する人間と、患者を医療機関に搬送する救急車である。

4.2.1 人間

人間は、年齢に応じて小児、成人、高齢者の三つのコホートに分類され、各コホートの発症確率に従い、患者が発生する。発症した人間は患者となり、それぞれ固有の傷病区分と傷病程度を持つ。本研究のモデルでは、Table 6とTable 7に示す傷病区分と傷病程度を想定した。傷病区分については、世界保健機構(WHO)が定める「疾病及び関連保健問題の国際統計分類」(ICD)[12]をもとに9種類に分類した。また、傷病程度に関しては、消防法に定められている「救急事故等報告要領」[13]内の死傷者の分類にもとづき3種類に分類した。

患者は、傷病区分に適した診療科を受診する。その際、傷病区分や傷病程度、年齢に応じて、救急車を利用した救急搬送と、自家用車やタクシー、徒歩による独歩受診のいずれからの経路を選択する。救急搬送においては、救急車が患者区分に応じて収容先の医療機関の選択を行

Table 6 Types of illness

傷病区分	ICD分類
脳血管疾患	IX-脳血管疾患
心疾患	IX-高血圧性疾患, 心疾患, その他の循環器系の疾患
神経系	VI
消化器系	XI
呼吸器系	X
精神系	V
感覚器系	VII, VIII
泌尿器系	X IV
その他内科系	I, II, III, IV, X II, X V, X VI, X VII, X VIII, X X I
外科系	X III, X IX

Table 7 Degree of illness

傷病程度	定義
軽症	入院治療を必要としない程度, 一次救急医療機関以上の機能を有する医療機関で診療が可能.
中等症	三週間未満の入院が必要な程度, 二次救急医療機関以上の機能を有する医療機関で診療が可能.
重症	三週間以上の入院が必要な程度, 二次救急医療機関以上の機能を有する医療機関で診療が可能.

い、収容先に搬送される。独歩受診においては、医療圏内のすべての医療機関の中から、傷病区分に適した対応可能で当直を行っている最寄りの医療機関を選択し、医療機関に向かう。医療機関へ向かう経路の選択、つまり救急搬送を利用するか独歩受診をするかは、救急車利用率に従う。医療機関に収容後は、重症患者から順に診療が行われる。診療後に転院が必要な場合には、再度救急車を要請し、適当な医療機関に転送される。また、疾病の程度に応じて診療後は入院するか帰宅するかの予後決定がされる。診療を終えた患者のうち、傷病区分が軽症な患者はそのまま帰宅し、中等症以上の場合は入院する。人間の行動に関するフローチャートを Fig. 2 に示す。また、人間が持つパラメータは、Table 8 のとおりである。

4.2.2 救急車

本研究のモデルでは、患者を搬送する救急車もエージェントと見なし、医療機関へ患者収容に関わる意思決定を行う。救急車が持つパラメータは、Table 9 のとおりである。救急車は、所属する消防署で待機し、患者からの要請に応じて、患者が居住する都市空間へ移動し、患者を収容後に医療機関へ搬送する。なお、搬送先の医療機関の選定は、消防本部が持つ医療機関リストの情報

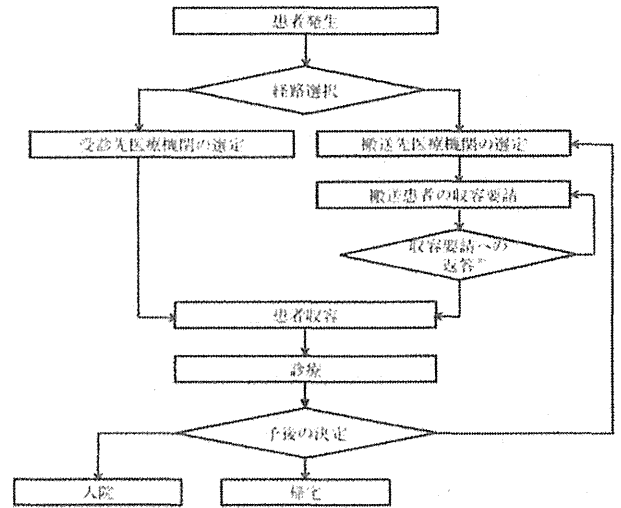


Fig. 2 Flow chart of patient behaviour

Table 8 Variables of human agent

変数	意味
年齢区分	「子供」「成人」「高齢者」のいずれか
発症確率	年齢コホート別の発症確率（毎分）
居住地	居住する都市空間の一つの場
傷病	発症した傷病名
発症程度	「軽症」「中等症」「重症」のいずれか
救急車利用率	救急搬送を選択する確率（発症時）

Table 9 Variables of ambulance agent

変数	意味
所属消防署	救急車が所属する消防署を保持
移動速度	救急搬送時の救急車の移動速度

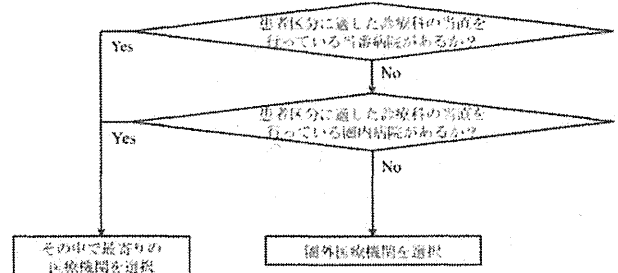


Fig. 3 Rules of selecting hospital

を参照し、患者区分に適した医療機関を選択する。救急車の医療機関選択に関するルールは、Fig. 3 に示す。

4.3 シミュレーションの設定

構築したモデルのシミュレーションの共通設定は、下記の通りである。

- (1) シミュレーション実行間隔は1分とする。
- (2) 18:00～翌8:00を夜間帯として位置づけ、この時間の1サイクルをモデルの1日とする。
- (3) シミュレーションは28日を経過した時点で終了する。

(4) モデル内の移動に関わる距離および時間は、出発地と到着地の直線距離を、移動速度で除算した値を用いる。

4.4 評価指標

本研究で構築したモデルでは、夜間救急医療に関わる主要なステークホルダーである、患者と医師の双方の観点からシミュレーション結果の評価が行える。本研究では、人間が発症してから医療機関に収容されるまでの救急搬送時間と、医師の1ヶ月あたりの当直回数、当直時間を評価対象とした。

そもそも救急搬送時間と医師の労働コストは、一方を最適化すれば他方が改悪されてしまうトレードオフの関係になっている。そのため、両者の望ましい組合せの導出により、夜間救急医療システムの改善が見込まれる。そこで、本研究で構築したモデルでは、所要時間と医師労働の双方の観点から、望ましい病院群輪番制のローテーションの導出を行う。なお、近年では、地域完結型医療が推進されているため、今後の政策方針として圏外搬送率を下げることも望ましい。したがって、救急搬送時間と医師の労働コスト、および圏外搬送率をモデルのシミュレーション結果として出力し、これらの値を病院群輪番制のローテーションの評価に活用する。

なお、本研究のモデルを構築するにあたって、社会シミュレーション言語：SOARS[14,15]を利用した。

5. モデルの適用

都市近郊の二次医療圏に本研究で構築したモデルを適用し、シミュレーション結果からモデルの有効性の検証を行う。また、モデルの活用例として、病院群輪番制ローテーションの改善案の提案を行う。なお、対象とした二次医療圏内には三次救急医療機関が存在しない。モデルの適用先として対象とした二次医療圏を Fig. 4 に示す。

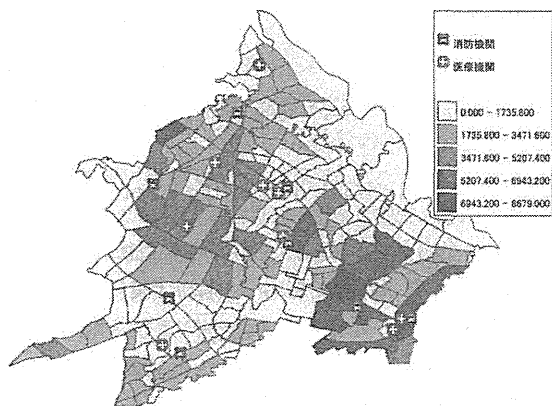


Fig. 4 Image of targeted area

さらに、都市情報を Table 10 に示す。独歩移動速度は平成 22 年度道路交通センサス [16] より時速 30km と設定し、救急車移動速度はその倍の時速 60km と仮定し

た。診療時間については、専門家の意見をもとにすべての医療機関において一定にすることとした。また、人間の発症確率および救急車利用率は、それぞれ平成 20 年度患者調査 [17]、平成 20 年度「救急・救助の現況」[18] のデータを利用した。

Table 10 Target area information

説明	値
総人口	448,485
市区町村数	4
都市空間数	226
医療機関数	9
消防署数	8
救急車数	12
消防本部数	1
診療科毎医師数	1
救急車利用率	0.165
救急車移動速度	1,000m/min
独歩移動速度	500m/min
軽症診療時間	5min
中等症診療時間	30min
重症診療時間	60min

5.1 現状シナリオ

対象とした医療圏における現行の輪番制を現状シナリオとする。公開されている情報より、この医療圏では、毎日一つの医療機関が当番病院として指定され、九つの医療機関が順番に当番病院を担当していることが判明した。この情報をもとに、現状シナリオでは九つの医療機関が順番に当番となるようにローテーションを組むものとした。また、医療機関によっては当番外の日においても当直を実施している。現状シナリオにおいても、当番外の日における当直の状況も反映した。現状シナリオを 30 回シミュレーションした際の全搬送患者の平均時間と圏外搬送率を Table 11 に示す。なお、実測値は平成 20 年度の医療圏管轄保健所のデータである。

Table 11 Transportation time and rate of out

	平均搬送時間 [min]	圏外搬送率 [%]
実測値	35	22
現状シナリオ	36.1	23.0

Table 11 より、平均搬送時間、圏外搬送率ともに実測値と比べて近い値が得られた。この値より本研究で構築したモデルは、夜間救急医療の一連の過程を再現できているものと判断した。

また、現状シナリオの平均搬送時間のシミュレーション結果を Table 12 に示す。括弧付きの数字は患者数が 49 人以下であることを意味し、横線は患者が発生しなかったことを意味する。

Table 12 より、年齢階層別にみると小児の搬送時間が全体の平均時間より長くなっていることがわかる。同様

Table 12 Transport time of present senario[min.]

平均値	小児			成人			高齢者		
	軽症	中等症	重症	軽症	中等症	重症	軽症	中等症	重症
脳血管疾患	—	(30.0)	—	(25.9)	31.0	27.5	(25.2)	31.7	30.8
心疾患	(23.0)	(45.2)	(34.5)	29.4	39.9	38.2	26.5	40.6	37.2
神経系	(31.6)	(51.4)	(27.0)	27.9	40.8	(37.0)	30.6	40.4	(39.7)
消化器系	31.3	48.7	48.7	26.7	41.5	39.9	26.6	42.6	38.8
呼吸器系	34.2	48.1	45.7	27.0	39.0	36.5	25.8	41.3	39.2
精神系	(27.5)	(44.7)	(44.0)	26.4	41.9	41.1	26.7	39.4	(27.7)
感覚器系	33.1	28.0	(22.3)	28.5	27.4	(25.8)	28.0	26.3	(23.2)
泌尿器系	(36.0)	(36.4)	(39.0)	27.8	34.3	31.5	29.1	34.7	(31.2)
その他内科系	32.6	30.1	(34.7)	27.4	29.4	27.9	27.8	28.6	28.7
外科系	34.7	26.8	(23.6)	28.1	29.0	27.8	28.4	28.8	27.9

Table 13 Transport time of modified senario[min.]

平均値	小児			成人			高齢者		
	軽症	中等症	重症	軽症	中等症	重症	軽症	中等症	重症
脳血管疾患	—	—	(53.0)	(24.0)	29.6	26.7	(27.6)	29.7	27.5
心疾患	—	(37.2)	(28.5)	27.4	34.0	31.2	26.5	34.9	32.7
神経系	(28.7)	(37.2)	(27.0)	27.3	37.7	(41.1)	24.2	38.4	(35.5)
消化器系	29.5	38.1	39.7	25.9	37.3	35.0	26.5	38.0	35.9
呼吸器系	30.6	37.4	36.1	26.1	34.9	33.1	26.9	35.2	32.4
精神系	(29.9)	(34.7)	—	25.6	38.8	36.6	26.0	37.0	(34.4)
感覚器系	30.8	29.7	(24.7)	25.3	29.0	(23.3)	26.2	26.0	(27.5)
泌尿器系	(57.0)	(42.5)	—	26.4	32.2	28.1	27.4	30.7	(30.8)
その他内科系	33.8	29.0	(35.9)	26.2	28.5	29.1	25.7	27.9	29.2
外科系	25.4	26.0	(25.1)	26.8	27.8	26.7	26.5	28.1	27.1

に、傷病区分、傷病程度別では、心疾患、神経系、消化器系、呼吸器系、精神系の中等症以上の搬送時間が全体の平均時間より長くなる傾向が示された。これらの個別の平均搬送時間については、実測値の情報が取得できないため、適正值かどうかは判断できないが、全体の平均搬送時間を改善するためには、これらの個別の搬送時間の短縮が必要不可欠である。そのため、上記の個別ケースに関して、1日ごとの平均搬送時間を用いた搬送遅延の要因分析を行った。その結果、搬送時間を短縮するためには、以下の2点を考慮した輪番制が有効であることがわかった。

- (1) 輪番制の当番病院を、現行の9病院から医療圏内で特に多くの診療科をもつ三つの医療機関によるローテーションに切り替え、他の六つをバックアップに専念させる。
- (2) 小児科はなるべく二つの医療機関が並行して終日診療を行うようにする。

5.2 改善シナリオ

本節では、現状シナリオのシミュレーション結果の分析から得られた知見を考慮した輪番制度の改善案を提案し、そのシミュレーションを行う。提案する改善策では、

小児と中等症以上の心疾患、神経系、消化器系、呼吸器系、精神系の救急搬送時間を改善することに焦点を当てる。また、現状シナリオと比べ、すべての医療機関において輪番制度の当番日および医療機関が独自に設定した当直による医師の当直回数と当直時間が、現状より増加しないよう制約を加え、ローテーションの組み替えのみで現状からの改善を試みるものとした。つまり、医師の負担は現状と改善案では変わらない。この条件を満たす輪番制を改善シナリオとして、シミュレーションを行いその結果を分析した。改善シナリオを用いた平均搬送時間のシミュレーション結果をTable 13に示す。現状シナリオを同様にシミュレーション結果は、30回の平均値で、括弧付きの数字は患者数が49人以下であることを意味し、横線は患者が発生しなかったことを意味する。なお、現状シナリオと改善シナリオの項目によっては、括弧付き数字と横線の比較となる箇所があるが、これは患者発生確率の確率値が非常に小さいことによる揺らぎが影響した結果のため比較対象外とした。

Table 13 から、改善シナリオのシミュレーション結果は、現行シナリオと比べ、小児、中等症以上の心疾患、神経系、消化器系、呼吸器系、精神系の個別の平均搬送

Table 14 Result of t-analysis

平均値	小児 14.06*			成人 16.07*			高齢者 12.78*		
	軽症	中等症	重症	軽症	中等症	重症	軽症	中等症	重症
脳血管疾患	—	—	—	—	0.64	0.38	—	1.31	1.78
心疾患	—	—	—	1.13	7.05*	6.22*	0	8.76*	5.46*
神経系	—	—	—	0.3	2.26	—	2.95	1.15	—
消化器系	1.22	6.85*	1.71	1.17	11.80*	5.14*	0.14	7.07*	1.92
呼吸器系	2.16	11.24*	5.90*	0.75	6.12*	2.92*	-0.62	4.90*	3.11*
精神系	—	—	—	0.7	2.45	1.08	0.37	1.23	—
感覚器系	0.79	-0.26	—	2.62*	-1.1	—	1.2	0.24	—
泌尿器系	—	—	—	1.09	1.92	1.29	0.74	3.03*	—
その他内科系	-0.67	0.61	—	2.29	1.31	-0.85	2.49	1.01	-0.29
外科系	1.04	0.36	—	1.65	1.49	0.59	2.42	0.82	0.37

時間が減少したことを確認することができる。一方で、その他内科系と感覚器系においては、改悪されている箇所も見られた。これは、ローテーションの組み替えにおいて、心疾患、神経系、消化器系、呼吸器系などの特殊な疾患を優先したため、内科系の汎用的な疾患に対する対応が遅れたことが原因であると考えられる。

上記のように、改善シナリオを適用したシミュレーションでは、現状シナリオと比べ、搬送時間が改善される疾患も改悪される疾患も存在する。そこで、本研究では、現状シナリオと改善シナリオにおける患者区分ごとの平均搬送時間の差について、t検定を用いた有意性の分析を行った (Table 14)。分析対象としたのは、小児の平均値、および小児と成人と高齢者における心疾患、神経系、消化器系、呼吸器系、精神系の中等症と重症の値である。なお*は、1%で統計的に有為であったことを意味する。検定結果より、分析対象とした項目の中でも、小児、心疾患系、消化器系、呼吸器系の平均搬送時間に関して有意差が確認された。また、改悪箇所については、有意差は見られなかった。以上のことから、改善シナリオを用いたシミュレーションにより得られた改善値は統計的に有意であり、本研究で提案する改善策は有効であると考えられる。

5.3 まとめ

本節では、現実の二次医療圏の都市情報と医療情報を構築したモデルに適用し、先行する研究では考慮されてこなかった医療機関の患者収容に関する制約条件と患者収容に関わるアクセスコストの面で距離と時間を考慮してモデルの有用性を検証した。シミュレーションからは、一ヶ月当たりの医師の当直回数、当直時間を変化させずに、当直ローテーションの組み替えと、当番医療機関の輪番制方式の改善により、全体としての平均搬送時間を短縮できることを示した。その一方で、有意差は確認されていないものの、内科系科目においては改悪箇所も見られた。そのため、本節で対象とした二次医療圏に

ついては、シミュレーション結果から医師会などの救急支援を通じた夜間救急医療体制の整備が必要であることを提案する。なお、患者の搬送時間は、現実世界において患者の生死に直結するものであり、医療機関における患者の受け入れの制約を考慮したうえで、距離だけでなく、病院間の転送搬送時間を指標としたシミュレーションの結果分析を可能にした本モデルの意義は大きいと考える。

6. 結論と今後の展望

本研究では、夜間救急医療における患者の発生から診療の終了までの一連のプロセスを表現できるモデルを構築した。そして、本研究で構築したモデルを利用することで、従来の研究では考慮することができなかった、患者の収容要請に関わる時間を含めた救急搬送時間を評価することを可能にした。また、現行制度である病院群輪番制もモデルに実装することによって、夜間救急医療が抱える搬送遅延の問題に対して、政策的観点から評価・分析を行うことも可能にした。さらに、構築したモデルの利用可能性を評価するために、現実の二次医療圏に対して本研究のモデルを適用しシミュレーションした結果、当直ローテーションの組み替えと当番病院の輪番制方式に焦点を当てた制度変更を行うことで、医師の労働コストとしての一ヶ月当たりの当直回数と当直時間を変化させることなく、救急搬送時間を短縮できることを示した。

今後は、第三者が構築したモデルを利用することを想定した利用環境の整備を行うとともに、他の地域を対象とした夜間救急医療体制の評価への適用を試み、本研究で構築したモデルのさらなる有用性を検証する。また、夜間帯だけでなく日勤帯にも対応した全日の救急医療を対象とした、医療制度の評価・分析が可能なモデルへの拡張も検討する。

謝 辞

本研究は、MEXT 研究費 11019662 および東京工業大学ソリューション機構企画プロジェクトの助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] 日本政策投資銀行: 救急医療の現状と課題 (2009)
- [2] 救急振興財団調査研究助成事業: 救急搬送収容拒否の実態に関する前向き検討 (2010)
- [3] 救医政局指導課: 第二次救急医療機関の在り方について (2008)
- [4] 厚生労働省: 救急医療の今後のあり方に関する検討会 (2008)
- [5] 大山, 鈴木: 病院までの搬送を考慮した救急車の最適配置; 日本オペレーションズ・リサーチ学会 春季研究発表会, pp. 212-213 (2000)
- [6] O. Berman, R. C. Larson and S. S. Chiu: Optimal server location on a network operating as an M/G/1 queue; *Operations Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 746-771 (1985)
- [7] M. L. Brandeau: Characterization of the stochastic median queue trajectory in a plane with generalized distances; *Operations Research*, Vol. 40, No. 2, pp. 331-341 (1992)
- [8] J. Brimberg, A. Mehrez and G. O. Wesolowsky: Allocation of queueing facilities using a mini-max criterion; *Location Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 89-101 (1997)
- [9] 松本, 腰塚: 移動距離に着目した夜間小児医療施設配置; オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol. 51, No. 1, pp. 47-48 (2006)
- [10] 日本建築学会: 建築都市計画のためのモデル分析の手法, 井上書院 (2009)
- [11] M. S. Daskin: *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*, John Wiley and Sons (1995)
- [12] World health organization: *International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems (ICD10)* (1990)
- [13] 総務省消防庁: 救急事故等報告要領; <http://aeml.umin.ac.jp/hou/0690.html>
- [14] M. Ichikawa, H. Tanuma, Y. Koyama and H. Deguchi: SOARS: introduction as a social microscope for simulations of social interactions and gaming; *Organizing and Learning through Gaming and Simulation*, pp. 149-158 (2008)
- [15] SOARS Project: <http://www.soars.jp>
- [16] 国土交通省: 平成 22 年度 全国道路・街路交通情勢調査; <http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>
- [17] 厚生労働省: 平成 20 年 患者 調 査:

- <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/08/>
- [18] 総務省消防庁: 平成 21 年版救急救助の現況; http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_3-1.html
 - [19] 政府統計の総合窓口 (E-Stat): <http://www.e-stat.go.jp>
 - [20] N. Gilbert: *Agent-Based Models*, SAGE Publications (2007)
 - [21] N. Gilbert and K. Troitzsch: *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press (2005)

著 者 略 歴

市川 学 (正会員)



1980年9月10日生。2009年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程修了。同年4月同助教となり現在に至る。都市シミュレーション, エージェントベースアプローチ, 医療シミュレーションの研究に従事。計測自動制御学会, 日本公衆衛生学会, 日本シミュレーション&ゲーミング学会などの会員。

春日 雄翔



2011年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士前期課程修了。

出口 弘



1986年東京工業大学総合理工学研究科システム科学専攻後期課程修了。1987年福島大学行政社会学部助手, 1989年国際大学助教授, 1995年中央大学商学部助教授, 1997年京都大学経済学研究科助教授, 現在, 東京工業大学総合理工学研究科教授。エージェントベースシミュレーションの研究に従事。計測自動制御学会, 進化経済学会, 日本シミュレーション&ゲーミング学会, 日本公衆衛生学会などの会員。

金谷 泰宏



1997年防衛医科大学校医学教育部医学研究科修了。1998年厚生省保健医療局エイズ疾病対策課課長補佐, 2001年防衛庁運用局衛生官付, 2003年防衛医科大学校防衛医学研究センター准教授を経て, 2011年4月より国立保健医療科学院健康危機管理研究部長となり現在に至る。専門分野は, 公衆衛生学, 血液学, 医学博士, 日本公衆衛生学会などの会員。

エージェントベースシミュレーションによる高い致死性を持つ感染症対策におけるリスク分析手法の提案*

石西 正幸[†]・市川 学[‡]・田沼 英樹[‡]・出口 弘[‡]・金谷 泰宏[§]

A Proposal of Risk Assessment Method on Countermeasure against High Fatality Infectious Disease Using Agent-based Simulation *

Masayuki ISHINISHI[†], Manabu ICHIKAWA[‡], Hideki TANUMA[‡], Hiroshi DEGUCHI[‡] and Yasuhiro KANATANI[§]

This paper aims to propose a risk assessment method on countermeasure against infectious disease with high fatality rate using social simulation. We constructed a novel model which are able to visualize social vulnerability against outbreak of infectious disease such as smallpox. In this model, disease state transition of smallpox, infection process, social structure, human activity, social countermeasure, simulation condition that include parameters, and simulation results are described. We evaluate the social protection policies by an agent-based model using Spot Oriented Agent Role Simulator (SOARS). This model is able to visualize the risk of social vulnerability against smallpox and social vulnerability is different among generations.

1. まえがき

感染症の大規模流行は、社会生活を営むうえで大きな障害であり、致死性の高い感染症の発生は、人類における大きな脅威である。とくに天然痘は、1976年以降種痘（ワクチンの接種）が中止されており、天然痘ウイルスに対する免疫を有していない人口は総人口の40%に及ぶ。Table 1は、齋藤らの調査による種痘の接種率を示している[1]。1976年以降に生まれた者は全員が未接種であり、免疫を有していないことがわかる。このことから、天然痘が大規模流行した際には、これら種痘が行われていない世代を中心に、大きな被害が発生することが考えられる。

感染症の感染拡大防止にあたっては、手洗い・うがい

* 原稿受付 2013年9月30日

[†] 防衛省航空自衛隊 Japan Air Self-Defense Force; 5-1 Ichigaya-Honmura, Shinjuku, Tokyo 162-0845, JAPAN
本研究の内容は、著者（石西）の職務との関連はなく、個人的見解を示すものである。

[‡] 東京工業大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology; 4259 Nagatsuda, Midori, Yokohama, Kanagawa 226-8503, JAPAN

[§] 国立保健医療科学院 National Institute of Public Health; 2-3-6 Minami, Wako, Saitama 351-0104, JAPAN

Key Words: social simulation, agent-based modeling, smallpox, school closure, SOARS.

などの個人的対策のほかに、ワクチン接種や学校閉鎖・自宅待機による患者との隔離などの社会的対策がある。このうち、ワクチン接種については、ワクチンの需要量を推計しその確保を進めるために、感染規模を事前に想定する必要がある。

感染規模のマクロ的な分析においては、過去の感染拡大事例における統計値や、それを参考にしたパラメータを用いた微分方程式を用いた疫学モデル[2]が多く用いられてきた。しかしながら、天然痘の場合、1976年に撲滅されているため、近年の統計データが存在しないほか、当時の社会環境が現在とは異なるために単純に現在に当てはめて感染規模を推計することはできない。そのため、社会環境を考慮したシミュレーションモデルの構築が求められている。

近年では、微分方程式を用いた疫学モデルに代わる、

Table 1 Immunization rate for vaccination

生年	人口 [万人]	接種率 [%]	未接種者数 [万人]
1976年以降	3740	0	3740
1969年～1975年	1330	61	519
1962年～1969年	1142	69	354
1961年以前	6400	92	512
計	12612		5125

エージェントベースモデルによるシミュレーションを用いた分析が盛んに行われている [3-5]. エージェントベースモデルによる感染症の分析では, 社会を構成する人の行動や生活様式を表現して計算機上で模倣することにより, 感染症のマクロ的な被害規模の推定のみならず, 感染経路の推定や社会的対策の効果について理解することができる.

われわれは, これまで致死率の高い感染症の一つである天然痘を例に, その病態遷移, 感染過程, 都市および人口構造, 住民行動, 社会対策をモデル化し, シミュレーションにより, 患者発生のメカニズムと被害規模を推計するとともに, 予防接種対策, 学校閉鎖などによる社会防衛対策に取り組んできた [6]. 本論文は, 感染症に対する社会脆弱性を評価できるモデルを構築し, 感染症法に基づく社会対策の効果について, 本モデルを用いて, リスク評価を行うものである.

2. 方法

本研究では, エージェントベースモデルにより住民の行動, 人口, および都市構造をミクロレベルでモデル化するとともに, シミュレーションの構築において, 感染症におけるウイルス拡散現象を社会シミュレーション言語 SOARS (Spot Oriented Agent Role Simulator) により記述している [7].

モデル化に当たっては, SOARS の仕様から, 住民をエージェント, 相互作用の場である都市構造をスポット, 職業や患者などの社会的・病態的役割をロール, 住民の行動をロールの集合体とした. また, シミュレーションでは, 離散時間におけるエージェントの行動および状態遷移を複数の段階¹に分割して処理されている.

SOARS には, 以下の三つの特長があり, 予防接種や学校閉鎖などの社会防衛対策を実装しやすい利点がある.

- (1) スポットを用いることで物理的位置関係に制約されずにエージェント間の相互作用を実現できる.
- (2) ロールを用いることでエージェントの状態と社会的役割に対応した行動を容易に表現できる.
- (3) ステージ, フェーズ, ターンを用いることで, エージェントの状態遷移, 行動, およびエージェント間の相互作用を区別し, エージェントロールの実行順序により状態遷移に差が生じないような干渉分解された役割遂行を表現できる.

3. モデル化

本研究の社会シミュレーションモデルは, 以下の四つの要素から構成されている.

¹シミュレーション上の時間単位を表すステップ, エージェントのまとまった動作を実行する制御単位を表すステージ, 各エージェントの役割ルールを実行するための単位を表すフェーズ, 個々のエージェントのロールの実行単位を表すターンに分割される.

病態遷移モデル 個々のエージェントの天然痘に罹患した場合の病態変化を表す.

感染プロセスモデル 罹患したエージェントから未感染のエージェントへの感染を表す.

都市構造と人口構成モデル 家庭・職場・学校・交通機関などの都市構造および居住する世代別人口と世帯数を表す.

住民行動モデル 家庭, 学校, 職場などを移動し接触を行う住民の社会的活動を表す.

3.1 病態遷移モデル

本研究では, 病態遷移の表現にあたって, Wu らによる病態遷移モデルを採用した [8]. Fig. 1 に示されるように, エージェント i の病態 (Agent Disease Stage: $ADS(i)$) は 8 種類に区分され, 病態ごとに遷移確率に応じて定められた期間で遷移する². また, 病原体 (ウイルス) の排出 (Agent Excretion Scale: $AES(i, t)$) は, 病態遷移モデルにおけるエージェント i の病態に応じて Fig. 1 で示される. $AES(i, t)$ は, Downie らによる天然痘の病原体の排出の性質により求められる [9].

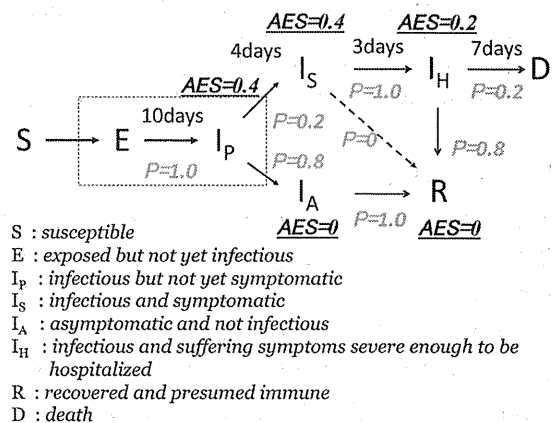


Fig. 1 Agent's disease state transition

3.2 感染プロセスモデル

本研究では, Fig. 2 上段に表されるような, 患者が未感染の人に直接接触して伝染するプロセスは採用せず, Fig. 2 下段で表される, ヒトから場 (以下「スポット」という) の汚染, 汚染されたスポットからヒトへの伝染を感染プロセスとして分割するモデルを考慮した [10,11].

エージェント i の感染プロセスは, Fig. 2 下段に示されるとおり, 病原体の排出, スポットの汚染, エージェントの汚染, エージェントの感染に分割される.

²わが国において, 天然痘は感染症法に基づく第1類感染症に指定されていることから, 症状が出現した場合, 患者はすべて医療機関に収容される. したがって医療機関に収容されない確率は極めて低いことから, 状態 I_S から状態 R への遷移確率は 0 とした.

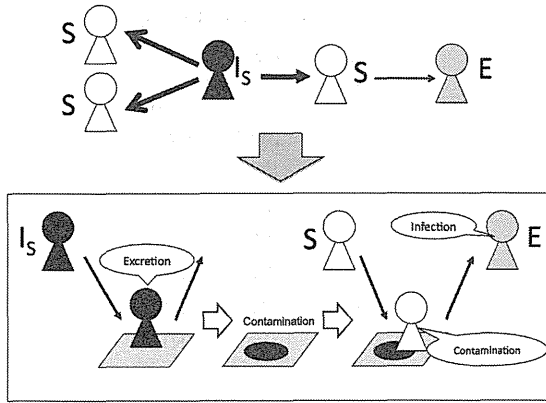


Fig. 2 The infection process

3.2.1 病原体の排出

時刻 t において、スポット k に滞在するエージェント i の危険度 (Agent Hazard Level of Agent: $AHL_k(i, t)$) は、次式のとおり個人防護具 (Personal Protective Equipment) などによる病原体の排出抑制フィルタ¹(Excretion Protection Filter: $0 \leq EPF(i) \leq 1$) と $AES(i, t)$ との積で表される。 $EPF(i)$ は、0 に近ければ排出が抑制され、1 に近ければそのまま排出される。

$$AHL_k(i, t) = AES(i, t) \cdot EPF(i) \quad (1)$$

3.2.2 スポットの汚染

スポットの汚染は、過去の場の汚染に対する減衰の結果と、そのスポットにいるエージェントから排出された病原体による汚染が加わって決定される。

時刻 t におけるスポット k の危険度 (Spot Hazard Level Before Protection: $SHLBP_k(t)$) は、スポット k に滞在するエージェントの危険度の総和で決定されることから、 $SHLBP_k(t)$ は $AHL_k(i, t)$ の和で表され、

$$SHLBP_k(t) = \sum_{i \in Spot(k)} AHL_k(i, t) \quad (2)$$

となる。

時刻 t におけるスポット k の汚染度 (Spot Contamination Level: $SCL_k(t)$) は、時刻 $t-1$ における $SCL_k(t-1)$ とスポット k の汚染の減衰を表すフィルタ (Spot Attention Filter: $SAF_k(t-1)$) の積、および時刻 t におけるスポット k の危険度 $AHL_k(t)$ との和として表される。

$$SCL_k(t) = SHLBP_k(t) + SCL_k(t-1) \cdot SAF_k(t-1) \quad (3)$$

時刻 $t-1$ におけるスポット k の汚染の減衰を表すフィルタ $SAF_k(t-1)$ は、湿度や気温などの環境要因による病原体の減衰と消毒による病原体の減衰で決定される。環境要因によるフィルタ (Environment Spot Attenuation Filter) は、 $EnSAF_k(t-1)$ として表され、0~1の値をとる。同様に、消毒によるフィルタ (Sterilization Spot

Attenuation Filter) は、 $StSAF_k(t-1)$ で表され、0~1の値をとる。0に近ければ排出が抑制され、1に近ければそのまま排出される。 $SAF_k(t-1)$ は、上記の積で表される。

$$SAF_k(t-1) = EnSAF_k(t-1) \cdot StSAF_k(t-1) \quad (4)$$

スポットの汚染からエージェントの汚染が決定されるプロセスでは、スポットの密度とエージェント側の予防対策から決定される。

スポットの密度を厳密に表現することは、スポットの性質とエージェントの行動形態などによって接触頻度が異なり、困難であるため、スポットにおける接触密度を表現するパラメータであるバーチャル密度 (Virtual Density: VD_k) を導入する。 VD_k は、自宅、学校、職場、交通機関などによって異なる値をとることができ、バーチャル空間サイズ (Virtual Space Size: VSS_k) の逆数として与えられる。

$$VD_k = \frac{1}{VSS_k} \quad (5)$$

時刻 t におけるスポット k の密度リスク (Density Risk by SCL: $DRSCL_k(t)$) は、スポットの汚染度 $SCL_k(t)$ と VD_k の積で与えられる。

$$DRSCL_k(t) = SCL_k(t) \cdot VD_k \quad (6)$$

エージェント側の予防対策は、マスクなどの使用によるエージェント汚染防護フィルタ (Agent Contamination Protection Filter: $ACPF(i, t)$) で表され、0~1の値をとる。0に近ければ排出が抑制され、1に近ければそのまま排出される。

エージェント側の予防対策を行った後のエージェント i のスポット k における危険度 (Spot Hazard Level After Protection: $SHLAP_k(i, t)$) は、エージェント汚染防護フィルタ $ACPF(i, t)$ とスポット k の密度リスク $DRSCL_k(t)$ との積で表される。

$$SHLAP_k(i, t) = DRSCL_k(t) \cdot ACPF(i, t) \quad (7)$$

3.2.3 エージェントの汚染

つぎにエージェントの汚染について考慮する。エージェントの汚染 (Agent Contamination Level: $ACL(i, t)$) は、1ステップ前のエージェントの汚染に対する減衰の結果と、その場におけるエージェントの危険度が加わって決定される。

エージェントの感染は、エージェントの汚染の程度とエージェントの持つ免疫から決定される。

スポットの汚染の場合と同様に、エージェントの減衰フィルタ (Agent Attenuation Filter: $AAF(i, t)$) は、湿度や気温などの環境要因による病原体の減衰フィルタ (Environment Agent Attenuation Filter: $EnAAF(t)$) と消毒・手洗いなどの感染予防対策による減衰フィルタ

¹患者による、いわゆる「咳エチケット」のようなもの。

(Sterilization Agent Attenuation Filter: $StAAF(i,t)$) の積で求められる。各フィルタは、0~1の値を取る。

$$AAF(i,t) = EnAAF(t) \cdot StAAF(i,t) \quad (8)$$

エージェントの汚染 (Agent Contamination Level: $ACL(i,t)$) は、エージェント i のスポット k における危険度 $SHLAP_k(i,t)$ と以前の $ACL(i,t)$ とエージェントの減衰フィルタ $AAF(i,t)$ から与えられる。

$$ACL(i,t) = SHLAP_k(i,t) + ACL(i,t-1) \cdot AAF(i,t-1) \quad (9)$$

3.2.4 エージェントの感染

エージェントの感染は、エージェントの汚染の程度とエージェントに対するワクチン接種などによる免疫などの個体免疫レベルである抗体価 (Physical Condition: $0 \leq PC(i) \leq 1$) によって確率的に決定される。エージェントの抗体価 $PC(i)$ は、0に近ければ免疫が高く、1に近ければ免疫が低いものとする。

各ステップごとにエージェントが感染する確率 $P(i,t)$ は、1を超えない範囲で単調増加するように、 $PC(i)$ と $ACL(i,t)$ の積から次のように決定される。

$$P(i,t) = 1 - e^{-PC(i) \cdot ACL(i,t)} \quad (10)$$

3.3 都市構造と人口構成モデル

本研究における都市構造と人口構成のモデル化では、住民の属性と行動、住民の滞在する場所の特性を明確にし、都市における感染拡大の脆弱性を可視化できることが特長である。

本論文では、2005年国勢調査に基づく世代構成、世帯人口構成、都市構造から、日本全国の平均である人口1万人の仮想都市を想定して算出している。

世代構成は、Table 2にあるように全国の年齢別人口を六つのカテゴリに分類している。各世代の抗体価 ($PC(i)$) は、壮年・高年が過去にワクチンを接種していることから、乳幼児、児童、生徒、青年と比較して高いものとする。

世帯人口構成は、Table 3のとおり1世帯の構成人員を八つのカテゴリに分類し、日本の人口と各世帯数から仮想都市の人口に適合させている。

都市構造は、Table 4にあるように学校 (小学校、中学・高校)、職場 (大企業、中小企業、零細企業)、交通

Table 2 The age distribution on the virtual city

記号	世代名	年齢	人数	免疫	抗体価
Baby	乳幼児	0~5	531	0	1
Child	児童	6~12	655	0	1
Student	生徒	13~18	597	0	1
Young	青年	19~34	2104	0	1
Middle	壮年	35~59	3425	0.7	0.3
Old	高年	60~	2688	0.7	0.3

Table 3 Household sizes

世帯	世帯数	人口
1人	1183	1183
2人	1042	2084
3人	736	2208
4人	617	2468
5人	228	1140
6人	97	582
7人	37	259
8人以上	10	80

Table 4 Urban structure

区分		数
学校	小学校	1
	中学・高校	1
職場	職場 (大)	1
	職場 (中)	5
	職場 (小)	549
交通機関		4
病院		1

機関、病院に分類している。なお職場数については、全国の事業所数および従業員数から仮想都市に適合させている。

3.4 住民行動モデル

住民行動モデルは、都市構造と人口構成モデルで決定された属性をもつエージェントが、家庭、学校、職場などを移動し接触を行う住民の社会的活動をモデル化したものである。感染したエージェントは、感染プロセスモデルで定式化したとおり、病原体を排出してスポットを汚染させる。そして未感染のエージェントが、汚染されたスポットに入ることにより感染するプロセスをたどる。

エージェントの1日の行動は、Table 5に示すとおり、乳幼児と高年を除く世代が家庭と学校または職場を往復する。またFig. 3に示すとおり、児童は、家庭と学校を直接往復し、生徒は、家庭と学校を往復する際、交通機関を利用する。青年および壮年も、家庭と職場を往復する際、交通機関を利用する。

Table 5 Human activity

世代	時刻	行動
Child	8:00am	登校
	4:00pm	帰宅
Student	8:00am	交通機関で通学
	9:00am	登校
	3:00pm	交通機関で下校
	4:00pm	帰宅
Young, Middle	8:00am	交通機関で通勤
	9:00am	出勤
	6:00pm	交通機関で帰宅
	7:00pm	帰宅

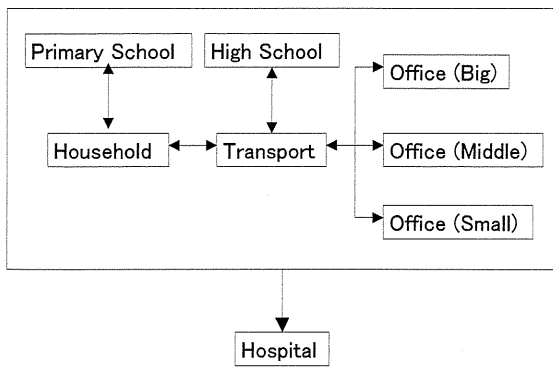


Fig. 3 The human activity model

エージェントの行動を制約する政策として、(1) 学校閉鎖、(2) 職場閉鎖、(3) 交通封鎖があるが、本論文では(1)のみを考える。

4. シミュレーション

ここでは、学校閉鎖の開始日の組合せにより、初期に感染した患者からどのように感染が拡大するか、効果的な学校閉鎖の開始日はどの程度なのかをシミュレーションにより分析する。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件は、初期状態において50人（児童、生徒、青年、壮年および高年から10人）が天然痘に感染し、10日経過した時点¹からシミュレーションがスタートするものとする。時刻経過は、30分経過するごとに1ステップ進める離散時間とする。3.で示した定式化におけるパラメータとして、Table 6で示す値を用いるものとする。なお、スポットにおけるパラメータはすべてのスポットが、ヒトにおけるパラメータはすべてのエージェントが同じ値をもつものとし、時間経過による変化はないものとする。

EPFは、自治体による咳エチケットのアンケート調査の結果[12]から、患者がマスクなどを使用することによって、病原体の排出が抑制されるものとし、0.3とした。EnSAFおよびEnAAFは、天然痘ウイルスの半減期が1.5時間であることから、0.8とした[13]。StSAFおよびStAAFは、消毒活動が行われないものとし、1とした。また、感染予防のためのマスク着用は行われないものとし、ACPF=1とした。本論文におけるバーチャル空間サイズは、10000人の都市のスポットの密度をすべて均一と仮定し、VSS=10000とした。

シミュレーションの実施にあたっては、学校閉鎖のパターンを、Case 1: No response（学校閉鎖なし）、Case 2: No delay（0日目に学校閉鎖）、Case 3: 10 days（10日目に学校閉鎖）、Case 4: 20 days（20日目に学校閉鎖）、Case 5: 30 days（30日目に学校閉鎖）の5種類に

¹すなわち、Fig. 1におけるI_Pの状態である。

Table 6 Parameters

パラメータ	名称	Value
EPF	排出抑制フィルタ	0.3
EnSAF	環境減衰フィルタ（スポット）	0.8
EnAAF	環境減衰フィルタ（ヒト）	0.8
StSAF	消毒によるフィルタ（スポット）	1
StAAF	消毒によるフィルタ（ヒト）	1
ACPF	汚染防御フィルタ	1
VSS	バーチャル空間サイズ	10000

分類した。

4.2 シミュレーション結果

Fig. 4は、天然痘に感染し病原体を排出する患者数²を示している。当初感染した50人に接触したエージェントが、潜伏期間を経て感染し、10日目から患者が増加する。これが第1次感染である。10~20日目までの第1次感染の間に接触したエージェントが感染し、20~33日目までに第2次感染を引き起こす。同様に、第3次感染、第4次感染を繰り返して感染拡大が発生する。0日目や第1次感染の発生日である10日目に学校閉鎖を実施した場合であるCase 1,2では、第2次感染の患者数は他のケースと比較して著しく低くなっている。また、第2次感染の発生日である20日目に学校閉鎖を実施した場合であるCase 3では、第3次感染の患者数が低くなっている。このことから、学校閉鎖が感染の抑制に大きな役割を果たしていると予想できる。では、第1次感染以降の患者は、どの場所でおもに感染するのであろうか。

Fig. 5に、学校閉鎖の各ケースを世代と感染場所ごとに新規感染者数を示す。各行は住民の世代を、各列はシミュレーションの組合せを表す。各グラフの縦軸は新規感染者数、横軸は経過日数を示し、グラフ中の青色は学校または職場を、赤色は自宅を、緑色は交通機関を表す。Case 1では、児童のおもな感染場所は学校であり、生徒のおもな感染場所は学校と交通機関である。青年および壮年は、おもな感染場所が家庭、職場、交通機関である

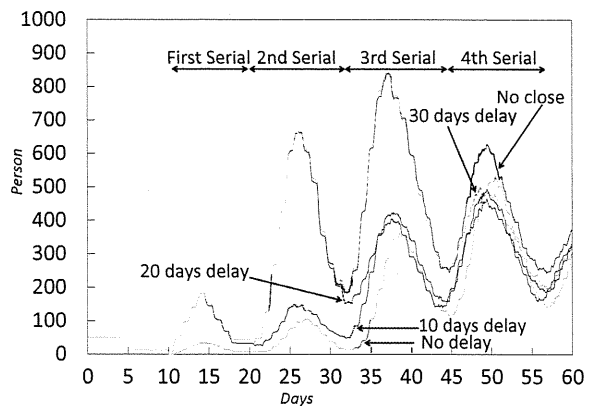


Fig. 4 The number of patients

²I_P, I_S, I_Hの状態である。

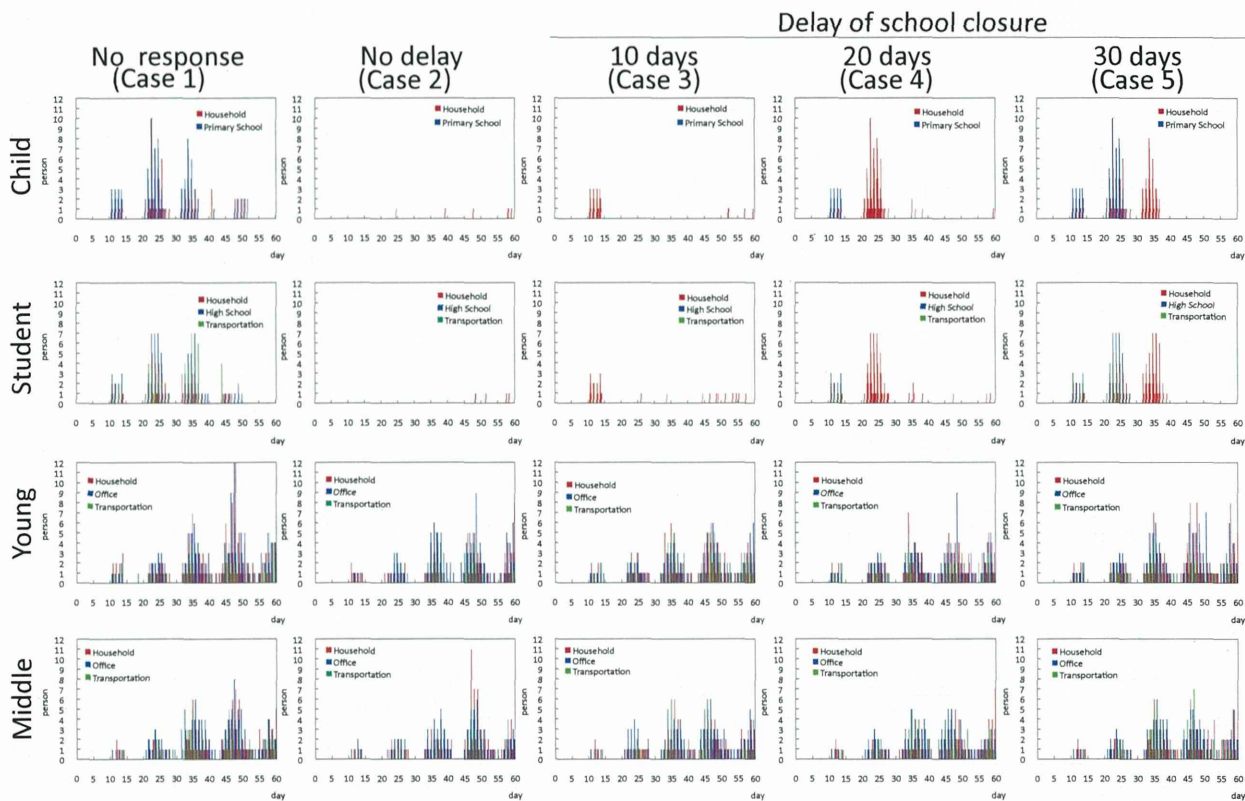


Fig. 5 The number of new infection in each place

ことがわかる。Case 2,3では、第1次感染の発生前に学校閉鎖を行っていることから、児童・生徒ともに学校での感染は起こっていない。Case 3において、第1次感染で感染する場所は自宅であることから、家族間で感染拡大が起こっていると考えられる。また、Case 4では、20日目に学校閉鎖を行うことから、第1次感染では学校でおもに感染し、第2次感染では、第1次感染において感染した青年および壮年から自宅で接触することで感染していることがわかる。同様にCase 5では、第1次感染および第2次感染で、おもに学校で感染し、第3次感染で自宅に接触した家族から感染していることがわかる。

5. あとがき

天然痘は、1980年代に根絶された感染症であり、わが国での流行は、昭和初期が最後で、近代化した都市での流行の記録はない。このため、感染拡大防止対策を検討するうえで、シミュレーションによる評価が不可欠である。感染拡大を防止する手段として、社会対策とワクチン接種が考慮されるが、先般の新型インフルエンザで経験されたとおり、短期間で全人口に対してワクチン接種を行うことは極めて困難である。このため、社会的活動を制限することで、感染拡大を遅らせ、結果としてワクチン接種に向けての時間を稼ぐことが必要となる。しかしながら、職場、学校などの閉鎖については、社会活動を大きく制限することから、安易に実施することは困難

である。そこで、本研究では、ワクチン接種を行っていない若年世代に着目し、彼らが、どこで感染し、社会的対策を行うことで、感染のリスクがどの程度軽減されるのかについて、SOARSを用いた社会シミュレーションモデルによって検証を行った。このモデルの特徴は、ヒトからヒトへの感染を、場の汚染とヒトの免疫状態の両面から評価できることであり、ログを解析することで、どの場所で感染拡大が発生するかを特定できることが、従来モデルと大きく異なる点である。

シミュレーションの結果、都市全体の感染拡大のおもな要因となるのは、第1次感染となる10日目以降に児童および生徒が学校へ登校し、患者である児童および生徒と接触すること、感染拡大を抑制するためには、第1次感染までの学校閉鎖が有効であることがわかった。これらの知見から、学校閉鎖の早期の開始かつ継続的な実施により患者の発生を遅らせることができ、ワクチン接種のための時間的猶予が得られると考えられる。

本研究におけるモデルは、感染プロセスを人から場への汚染および場から人への汚染とし、その間にフィルタを介することで汚染の程度が変化するように定式化されている。また、シミュレーションは、住民の属性や行動から、社会のどこに脆弱性があるかを明確にし、その脆弱性を克服するための対策の有効性を定量的に示せることが特長である。これにより、社会的対策を表すことができ、従来のシミュレーションモデルの問題点を克服す

ることができた。

感染拡大の様相は、都市構造により異なることから、特定の都市における感染拡大の予測について、地理情報を用いた精細な都市モデルとパーソントリップ調査による住民行動モデルを適用し、スポットにおける空間サイズを測定したパラメータの設定による評価を実施することが今後の課題である。

参考文献

- [1] T. Saito, T. Fujii, Y. Kanatani, M. Saijo, S. Morikawa, H. Yokote, T. Takeuchi and N. Kuwabara: Clinical and immunological response to attenuated tissue-cultured smallpox Vaccine LC16m8; *The Journal of the American Medical Association*, Vol. 301, No. 10, pp. 1025–1033 (2009)
- [2] H. Nishiura and I. M. Tang: Modeling for a smallpox-vaccination policy against possible bioterrorism in Japan: The impact of long-lasting vaccinal immunity; *Journal of Epidemiology*, Vol. 14, No. 2, pp. 41–50 (2004)
- [3] D. S. Burke, J. M. Epstein, D. A. T. Cummings, J. I. Parker, K. C. Cline, R. M. Singa and S. Chakravarty: Individual-based computational modeling of smallpox epidemic control strategies; *ACAD EMERGMED*, Vol. 13, No. 11, pp. 1142–1149 (2006)
- [4] I. M. Longini, M. E. Halloran, A. Nizam, Y. Yang, S. Xu, D. S. Burke, D. A. T. Cummings and J. M. Epstein: Containing a large bioterrorist smallpox attack: a computer simulation approach; *International Journal of Infection Diseases*, Vol. 11, pp. 98–108 (2007)
- [5] S. Riley and N. M. Ferguson: Smallpox transmission and control: Spatial dynamics in Great Britain; *PNAS*, Vol. 103, No. 33, pp. 12637–12642 (2006) <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0510873103>.
- [6] M. Ishinishi, M. Ichikawa, H. Tanuma, H. Deguchi and Y. Kanatani: The effects of vaccination strategies against smallpox bioterrorism with agent-based simulation; *Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems VII* (T. Murata, T. Terano and S. Takahashi, Eds.), Springer Japan, pp. 131–145 (2013)
- [7] 田沼, 出口: エージェントベース社会シミュレーション言語 SOARS の開発; 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol. J90-D, No. 9, pp. 2415–2422 (2007)
- [8] J. T. Wu, S. Riley, C. Fraser and G. M. Leung: Reducing the impact of the next influenza pandemic using household-based public health interventions; *PLoS Medicine*, Vol. 3, No. 9, e361 pp. 1532–1540 (2006)
- [9] A. W. Downie, M. Meiklejohn, L. St. Vincent, A. R. Rao, B. V. Sundara Babu and C. H. Kempe: The recovery of smallpox virus from patients and their environment in a smallpox hospital; *Bull. World Health Organ*, 33, pp. 615–622 (1965)
- [10] H. Deguchi, T. Saito, M. Ichikawa and H. Tanuma: Simulated tabletop exercise for risk management – Anti bio-terrorism multi scenario simulated tabletop exercise; *Developments in Business Simulation and Experiential Learning*, Vol. 38, pp. 1–21 (2011)
- [11] 金谷, 出口, 齋藤, 兼田, 小山, 市川, 田沼: 新型インフルエンザに対するパンデミック対策プログラムとプロジェクト分析; オペレーションズ・リサーチ, Vol. 53, No. 12, pp. 667–671 (2008)
- [12] 横浜市: 横浜市民の危機管理アンケート調査結果の概要 (2009) <http://www.city.yokohama.lg.jp/somu/org/kikikanri/press/20press/pdf/090116senryaku.pdf>
- [13] S. N. Shchelkunov, S. S. Marennikova and R. W. Moyer: *Orthopoxviruses Pathogenic for Humans*, Springer pp. 19–87 (2010)

著者略歴

いしにし まさゆき
石西 正幸



1995年3月防衛大学校卒業, 2000年3月同校理工学研究科修了, 2003年9月東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了. 専門分野は, マルチエージェント, 社会シミュレーション. 博士(工学). 電気学会, 情報処理学会各会員.

いちかわ まなぶ
市川 学 (正会員)

本誌文誌 p.267 参照

たぬま ひでき
田沼 英樹



1992年3月東京工業大学理学部卒業, 1994年東京大学大学院数理科学研究科修士課程修了, 2008年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了. 1999年(株)サイヴァース入社, 2004年東京大学医科学研究所産学官連携研究員, 2005年東京工業大学総合理工学研究科エージェントベース社会システム科学研究員, 2008年同研究科21世紀COE研究員, 2009年同研究科知能システム科学専攻特任講師となり, 現在に至る. 社会シミュレーションおよび並列処理アーキテクチャの研究に従事. 博士(理学). 電子情報通信学会, 日本公衆衛生学会各会員.

でぐち ひろし
出口 弘

本誌文誌 p.267 参照

かな たい やすひろ
金谷 泰宏

本誌文誌 p.267 参照