

感染症防護と OR

神藤 猛

21 世紀の新興・再興感染症の脅威を阻止するには、エボラ出血熱のアウトブレイクに見るように世界が団結し、各国は強靱で持続可能な保健システムを整備し、国民の健康水準を向上させ、誰もが護られる国際保健の体制を再構築する必要がある。ユニバーサル・ヘルス・カバレッジは、国際社会の持続可能な発展を担保し、感染症の予防・検知・報告のサーベイランス能力の強化を伴い、公衆衛生危機の備えにも資する。本研究は二つに共通する感染症の制御に特徴的な感染症疫学の基本を確認し、感染症危機管理の類型化された意思決定と組織行動のパターンから、感染症防護における OR の活用のあり方を論究する。

キーワード：感染症疫学，危機管理，感染症の数理モデル

1. はじめに

今日、世界秩序の変貌に伴い、弱体な国家群の武装集団やテロ組織が大きな力を持ち、内戦と国家間紛争が頻発する地域を管理する制度的メカニズムの機能が弱まり、国際的なテロネットワークの拡大、感染症ウィルスの伝播、地球温暖化による異常気象など、国際秩序を脅かす脅威が世界的規模に拡大している。

特にガバナンスの破綻による地域の不安定化は、公衆衛生能力の低下を招き、21 世紀の新興・再興感染症の脅威を阻止するためには、迅速で効果的な疫学的サーベイランスとこれを統制する政府横断の調整機構、円滑な国際連携が必須となっている。しかし、多くの国でサーベイランスシステムは不完全であり、強い社会的緊張や国際紛争が伴う場合には著しい。この欠陥を補完する 21 世紀の IoT 型社会の幅広い情報ネットワークと人工知能、ビッグデータ解析に資する OR 活用の枠組みが整備されれば、感染症アウトブレイクの予防と対処に、国際的協調の取れた対応を行ううえで、多くの役立つ情報が得られることが指摘されている。

OR が意思決定の科学的アプローチに成功した第二次大戦の歴史的事情からも明らかなように、過去半世紀以上にわたり OR が複雑で不確実な環境における意思決定を推進する強力で効果的なアプローチであることは、繰り返し実証されてきた。今日の感染症の拡大は、エボラ出血熱に象徴されるように世界の公衆衛生を脅かし、人間の安全保障とグローバルヘルス領域の保険医療システムへの深刻な脅威を生み出している。

本稿は、感染症防護の原点となる、感染症アウトブ

レイクの予防とコントロールにおける感染症疫学の基本原則を確認し、感染症の計測、数学モデル、流行の構造とパターンの発見に役立つ OR を研究対象として、持続可能な経済成長を損なうことなく、感染症の被害から人々を防護し、以って、国家の発展に資する強靱な感染症防護のあり方を論究することを目的とする。

2. 感染症疫学の基本モデル

2.1 感染症とは

公衆衛生 public health は、集団の健康を向上させるための活動全体を意味する。公衆衛生の向上に必須の方法である疫学は、環境要因が病気の発生に影響する可能性があるとしたのが起源とされ、健康に関連する状態や事象の分布や決定要因を研究し、成果を健康問題の予防とコントロールのために適用する学問として定義されている [1]。感染性疾患のコントロールから、人間集団における疾病の研究や予防まで、幅広く疫学は応用されている。

感染症 communicable (infectious) diseases は、ある病原体が感受性を持った宿主へ伝播されることにより生じる疾病であり、病原体が感染した人間や動物から直接うつる直接感染と、病原体がベクター（媒介動物）や空気中の粒子や媒体 vehicle を介して人に感染する間接感染がある。ベクターとは、病原体を人から人へと運ぶ昆虫や動物のことをいい、媒体は、衣服、刃物、水、ミルク、食物、血液、血しょう、注射液や手術用具などの病原体に汚染された物体をさす。今日、地球規模の感染性疾患の負荷 burden の大半は、HIV/AIDS、結核、マラリアからなる三大感染症による。またエボラなどのウィルス性出血熱、変異型クロイツフェルト・ヤコブ病、重症急性呼吸器症候群 (SARS) などの新興感染症とジフテリア、黄熱病、炭疽病、ペスト、デン

しんどう たけし

千葉大学大学院

〒 260-8672 千葉県千葉市中央区亥鼻 1-8-1

グ熱、インフルエンザなどの再興感染症は、とりわけ開発途上国において、計り知れない大きな負荷を保健医療システムに及ぼしている。

2.2 感染症疫学とエボラ出血熱

感染症疫学の主要な目的は、適切なコントロール方法の開発、実施、評価と、それに必要な感染のプロセスの解明にある。感染症は、病原体、伝播のプロセス、宿主、環境の相互作用から生じることから感染症を制御するには、これら要因の少なくとも一つを変化させる必要がある。したがってプロセスの一部でも明らかになれば、疾患の発生を制御できる可能性がある。

感染とは、宿主に病原体が進入し増殖することをいい、感染しても全く臨床的な症状が生じないこともある。宿主は、病原体の自然な成育や増殖に適切な場所を提供する生体で、ヒトの身体や動物が相当する。感染の性質は、病原体の以下の特性により決定される。

(1) 病原性 pathogenicity: 発症者の数を感染にさらされた人々の数で割った値で表現される疾患を引き起こす力, (2) 毒力 virulence: 疾患の重篤度を表わす概念, (3) 感染量 infective dose: 対象者に感染を起こさせるのに必要な病原体の量, (4) 病原巣 reservoir: 病原体の棲息する場所で、ヒト、動植物、自然環境（土壌）, (5) 感染源: 宿主が病原体を受容する相手をいい、ヒト、物体、動植物などがある。また感染症の発生には、環境が重要な役割を担い、一般的な衛生環境、気温、大気汚染、水質などは、感染連鎖のすべての段階で影響を及ぼし、人口密度、過密居住、貧困などの社会経済的要因も大きな影響を与える。したがって、人々の暮らしや行動の理解なくしては、感染症の流行を本当に理解することはできないといわれる。

人類が初めてエボラ出血熱に遭遇したのは、1976年ザイールのヤンブク村の周辺といわれ、地域を流れるエボラ川の名前をとって命名された。これまでに世界で27,000人が感染し、11,000人が亡くなった。病原体のエボラウイルスによる致死率は50~90%と非常に高く、特に集団発生では、致死率は90%に達することがある史上最も危険なウイルスといわれている。感染率と致死率が極めて高い理由の一つに、その巧妙な免疫回避機構が挙げられる。免疫系を攪乱するsGPデコイにより、ウイルスを無害化する抗体を吸着させ生体の免疫系を欺く特徴があり、驚異的な病原性の高さにつながっている。また、体細胞の構成要素であるタンパク質を分解することで強い毒性を発揮し、ウイルスを捕食する免疫細胞に過剰な防衛反応を起こさせて体内を破壊させ、肝臓をはじめとする全身の臓器を冒

して内出血を生じ、発症者を死に至らしめる。潜伏期間は通常7日（最短2日、最長21日間）程度で、発病後に感染力が発現すると見られている。発病は突発的で、発熱、倦怠感、筋肉痛、頭痛、咽頭炎で発症する。2~3日後に、嘔吐、下痢、発疹、肝機能障害が出現する。進行すると、口腔、歯肉、結膜、鼻腔、皮膚、消化管など全身に出血、吐血、下血がみられ死亡する。

2014年8月、WHOの国際的な公衆衛生上の緊急事態宣言に至った最初の感染は、ギニア南部の小村メリアンドウの2歳の小児エミールとされ「ジャ香の匂いがする子供の手のひらほどの濃い灰色のコウモリ」と描写される病原巣となる生物の巣の近くで、木の棒で刺して遊んでいた。コクビワフルーツコウモリなどの3種が、エボラウイルスの自然宿主とされ、図1に示す食用コウモリからの感染が報告されている。

2.3 感染症の数理モデル

感染症流行の現象は、感染者が自己増殖する個体群からなる部分人口集団のダイナミクスの問題として全体像を把握し予測することができる。ワクチン投与による免疫、感染者の隔離による制御、調査、サーベイランスなどによる感染症のコントロールの評価を行う際に、数理モデルによる定量分析と評価が有効になる。数理モデルは感染症を理解するうえで欠くことのできない、ものの見方の本質を教えてくれるとされ [2]。その起源は、18世紀の大数学者ベルヌーイによる天然痘死亡率の寿命への影響に関する研究に遡る。感染症数理モデルの基本的な関心は、感染者が存在しない個体群や生物集団に感染症が発生した場合、感染の持続的な拡大と、長期的に感染者が存在する定常状態と周期的流行はどのような条件で起きるのか、流行の根絶にはどのようなコントロールが有効かにある。

次にKermack-Mckendrick型の感染モデル（SEIR型無症候性）による、未発症での感染率を想定したエボラモデルの一例を示す。ここでは、年齢構造を識別



図1 エボラウイルスの感染経路（出典：CDC）

しない宿主の人口を $S(t)$: 感受性人口, 非感染性の潜伏期にある人口を $E(t)$: 潜伏期人口, 発症した人口を $I(t)$: 感染性人口, 回復期にある人口を $R(t)$: 回復人口の各 4 状態に分解する. 宿主となる人口の出生率と自然死亡率をそれぞれ b : 出生率, μ : 自然死亡率とし, 潜伏期および発症期の感染率をそれぞれ β_1 : 潜伏期感染率, β_2 : 発症期感染率とする. また潜伏期から発症期への遷移率を ϵ : 発症率とし, 感染からの回復は生涯免疫を誘導するものと仮定して, 回復率を γ とする [3].

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= b - \mu S(t) - (\beta_1 E(t) + \beta_2 I(t)) S(t), \\ \frac{dE(t)}{dt} &= -(\mu + \epsilon) E(t) + \beta_1 (E(t) + \beta_2 I(t)) S(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} &= -(\mu + \gamma) I(t) + \epsilon E(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} &= -\mu R(t) + \gamma I(t). \end{aligned}$$

システムダイナミックスのフローモデルを図 2 に示す. エボラ出血熱は病原性が極めて高く, 未発症期の感染率は $\beta_1 < 1$ とされているが, 米国では隔離措置をとっている. 逆に HIV/AIDS の感染のほとんどは, 自覚症状のない潜伏期の感染と考えられている. 本モデルは, 感染からの回復は生涯免疫を誘導するものと仮定しているが, 感染を克服したとされた後, 6 カ月以上経過した患者からのエボラ感染が報告されている.

感染症疫学による数理モデルの定式化は, 感染症のアウトブレイク, ワクチンの接種, 個人の間人性と国家の防衛と生態系を考慮した封じ込め戦略, この三つの組み合わせを評価する目的で適用されることが多い.

数理モデルは, 模擬的な人口集団と仮想のシナリオを前提とすることが多く, さらに感染症の流行と制御の問題に役立てるためには, より粒度の高い実社会の構造に埋め込まれた個人からなる, 大規模な人口の健康状態をモデル化し, 実際の流行のパターンとアウト

ブレイクを調査する方法との比較対照が必要になる.

3. 感染症の流行とコントロール

3.1 流行の調査とコントロール

ある疾患が, コミュニティや地域で通常の頻度以上に多く発生する状態を流行と定義し, 流行のダイナミクスは病原体と伝播のパターン特性, 宿主の感受性により決定される. 流行の規模と速度は, 感受性のある個体の数, 感染経路, 感染性の強さによる. 感染症の原因とコントロール手法の発見には, 詳細で系統的な疫学調査が必要になる. 調査ステップは, 予備調査の実施, 症例の同定と報告, データの収集と解析, 対策の実施, 知見の普及と追跡調査からなる.

予備調査の段階では, 流行の疑いのある症例を調べ, 診断の妥当性を評価し流行の存在を確認する. 調査結果から, 疾患の病源と流行拡大の仮説に基づき直ちに対策を実施する. 流行が疑われる場合には, 症例を同定するための明確な定義と当該疾患の少なくとも一例について, 詳細な情報収集が必要になる. 流行初期の症例は全体の一部に過ぎず, 流行の全体像の把握には, 症例の全数把握が必要になる. 流行が確認された場合, 直ちに流行をコントロールする手立てを講じなくてはならない. 非常に感染性の高いエボラ出血熱のような場合には, すべての症例の発見と, 流行拡大を阻止するため全症例の追跡調査が必須となる.

感染症流行の対策は, 治療, 流行の阻止, 対策効果のモニタリングからなり, 通常は, 感染源への対処, 感染拡大の防止, 感染に曝露した人々の保護の全アプローチが必要になる. 対策開始と共にサーベイランスを用いて, 対策の普及状況と有効性の継続的モニターを行い, 事後の公衆衛生対策の立案, 実施, 評価に必要な健康データを系統的, 継続的に収集・分析し解釈する. 定点医療機関からの報告システムを活用し, 疑いのある症例報告について診断の妥当性を確認する. サーベイランスは単にデータを集める活動ではなく, 疾病の発生と広がり絶えず監視し, 完全な正確性よりも報告の有意な増加の迅速な把握を重視する. 健康データの情報を共有し, 分析して不足情報を補い, 感染症の予防と制御に素早く適用することが目標となる.

3.2 不足情報を推論する人工知能の適用

地方政府, NGO, メーリングリスト, インターネット, 検査機関など SNS の幅広い情報ネットワークを活用し, 不足する情報を推論して補う人工知能適用モデルは, 感染症アウトブレイクで国内外の協調の取れた対応を行い, 多くの役立つ情報を得る必須の要件と

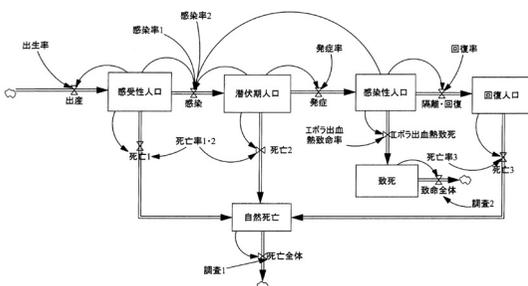


図 2 エボラ感染症の人口フローモデル

なる。従来の疫学の量的研究は、集団の粗視化統計分析を行い、これを取りまとめ総合化することを重視していた。AI 推論モデルでは、実世界のソーシャルネットワークを通して、感染症の蔓延をきめ細かく粒度を上げてモデル化することに焦点を当てる。具体的には、特定個人の社会的関係と相互作用が、感染症の伝播に果たす仕組みを明らかにすることに重点をおく。

図 3 に示す Sadilek et al. による SNS 活用モデルの事例では、公共 Twitter のデータに焦点を当て、1,000 以上の無差別のメッセージの中から、数少ない健康関連のメッセージを見つけ出す [4]。このデータ集合の不均衡は識別を困難にするが、オンライン通信の内容から病気の個人を正確に特定する枠組みを構築することができる。たとえば 250 万のジオタグ付き Twitter メッセージのサンプル評価から、人々の社会的つながりと感染者と共にいた最新のコロケーションの強度を明らかにし、近い将来の感染の可能性を把握する。このモデルは、人々の社会的活動とその移動から生じる相互作用と、大規模人口を擁する社会の感染症の拡大と特性の推定値を提供する枠組みからなる。労力を要するユーザー参加型の調査過程を経ることなく、人々の日々の社会的活動の情報から流行を予測し、その兆しを察知する基本モデルといえる。

メッセージ検出の最初のステップとして、メッセージが掲示された時間に対象の疾病に感染していることを示す Twitter メッセージを特定する必要がある。流行前は、健康関連のツイートはほかのタイプのメッセージと比較して少ないため、ビッグデータを活用した高精度・高再現率のカーネルマシンの適用する。すな

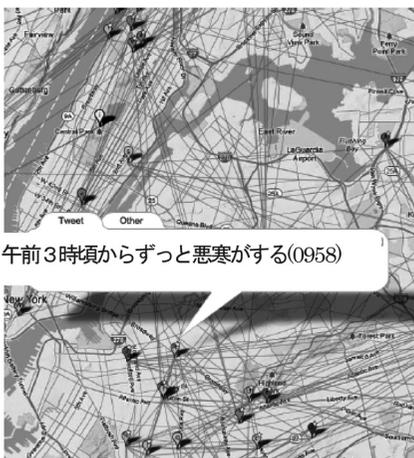


図 3 Twitter データの視覚化 (Sadilek et al. (2012) から作成)

わち広範囲の頑健なサポートベクトルマシン (SVM) の学習の成果として、データ識別が可能なカスケードベースの認知モデルによるアプローチを適用する。

3.3 AI 学習モデル

SVM は、現在知られている性能の優れた学習モデルであり、ツイートの本人が感染症に感染しているのか、正常なツイートかを識別する 2 値分類を行う AI 学習モデルとして構成できる。SVM は得られた学習用サンプルデータを使用し図 4 に示すカーネルトリックを用いて、再生核ヒルベルト空間でデータを区分し識別する境界を学習する。その結果得られる超平面は、境界に近く判然としないグレーゾーンにある Twitter データと識別面との距離マージンを最大にする多層パーセプトロンとして定義される。SVM は感染、非感染の二つのクラスに属するメッセージを分離する複数の超平面の中で、最大のマージンで、集合の各点と距離を維持する超平面を探索するアルゴリズムといえる。

このような識別を学習するためには、すでに正否が判定された試験用の高品質のデータ集合が必要になる。Twitter 内のサンプルデータから複数の特徴量を計測し、未知の認識対象から得られる特徴ベクトルから、その対象者が感染、非感染どちらの集合に属するかを識別する分類器を構築する。またクラスの帰属が既知の学習用のサンプル集合から、少数のサポートベクターを選び出し、識別面とのマージン最大化という基準からしきい素子のパラメータの学習を行う。

初期の感染者の識別は、破壊的な感染症を予防し抑制する決定的な手段となる。図 5 は、ニューアーク・リバティ国際空港の Twitter 利用者のネットワークのサンプルである。ハイライトされた発信者は特定の友人について言及し、16 日後に戻ってくることを告げている。この場合、直ちにこの発信者と直接接触できる人々を観察することが可能であり、分類器などを用いて感染しうる付加的な候補者を探索することができる。

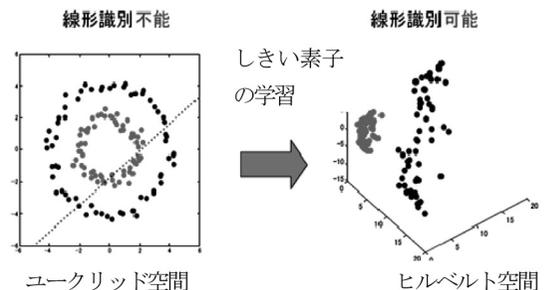


図 4 カーネルトリック

さらに将来予想される移動場所と共通の場所に居合わせる人々を、さまざまなスケールで高精度の予測をすることもできる。したがって、明示的に症状や健康の兆候が言及されている場合には、それらのデータを情報共有し、感染症の伝播に関して優れて確実性の高い推論を得ることができる。

4. 複雑な環境における多様な意思決定の事例

4.1 対応の困難性と制御不能事態

感染症の防護では、コマンドアンドコントロール（指揮統制）の原理を適用する。すなわち、感染症の適切なコントロールと評価に必要なプロセスを明確化し、治療と隔離により流行を阻止し、対策効果のモニタリングを行い、最善の解決策に可能な限り近づくことを原則としている。

この方法論は、事象の基本構造の安定化を仮定したうえで「Solutionが存在し、行うべきはSolutionの発見にある」とする伝統的な合理主義的パラダイムに共通の(1)事象の予測可能性、(2)組織の明確な意図、(3)構成員による計画の理解、(4)良識ある人々の常識的な行動を前提に、過去の延長線上に未来を予測し、目標のあるべき姿を明らかにして、指揮統制の手法により社会のシステムを目標に指向する、ネガティブフィードバックの原理を適用する。ただし、もし環境に大きな構造的変化が生じている場合、たとえば先行き不透明な環境で人類が経験したこともない感染症が発生したときは、必ずしも有効な対処が期待できない。特に異常気象による温暖化など、今日の感染症を取り巻く環境の複雑性が理解されるに従って、予測し管理する、伝統的な従来の手法には、限界があることが明らかになってきた。

4.2 エボラ感染症による危機

2014年、エボラウイルスのアウトブレイクが起

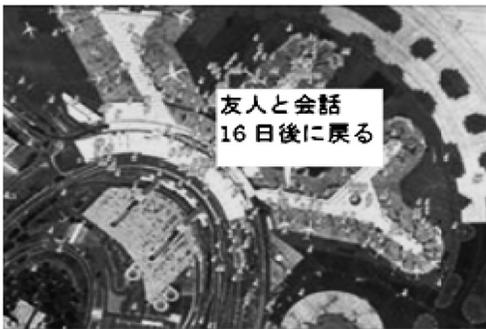


図5 空港 Twitter 利用者ネットワークの可視化
(出典：Sadilek et al. (2012))

したとき、リベリアにいた医師は250名だった。人口10万人に対し医師は2名、人口1万人に対して看護師は3名、病床数は8床で、医療施設も老朽化し、医療物資の補給も予算も少なかった。リベリアの社会制度は内戦期に崩壊し、人間の安全保障の指標でもある国連の開発指数は、世界で175位/185カ国、国民一人当たりのGDPはわずか480ドルであった（日本は36,222ドル）。現地にはワクチンも治療法も、利用できる診断キットもなく、防護服は不足し、医療システムも訓練された医療関係者もいなかった[5]。

開発途上国では新しい疾患を短期間で特定し、ウイルスや病原体の拡散を迅速に管理できる状態にする指揮統制機能の発揮は期待できない。むしろ必要なものは、水、電力、基本的な医療器具、衛生設備であった。国連のWHOは、グローバルヘルス領域の中核的役割を期待されていたが、グローバルヘルスのインフラは弱く、その活動の多くをメンバー国の支持とコンセンサスに依存し、政治的な制約も多く予算も限られていた。新たな病原体の台頭に対する世界の反応は限定的で、調整機能は困難を極めコンフリクトも起きやすかった。迅速な意思決定メカニズムは機能せず、緊急事態を前にしても、今後を見据えた対応ではなく状況対応型の反応が多かったため、試行錯誤し成功しなかったものをふるい落とす、意思決定プロセスが主体となった。2014年8月8日WHOにより「国際的な公衆衛生上の緊急事態」が宣言された時点では、すでに感染症は劇的な広がりを見せ、大きなパニックが生じていた。通常の医療体制は崩壊し、交通事故、転倒による怪我など比較的軽易な医療的対応もできなくなっていた。暴動が発生し、遺体が隠され、医療関係者が襲撃され、食料の供給も混乱していた。

4.3 安全保障のアジェンダとしての感染症

2014年9月1日、エボラウイルス拡大のペース緩和のために、各国のバイオハザード封じ込めの専門知識を有する軍と民間の組織を動員する必要があるとの意見が国連に提出された。米国はエボラ危機がグローバルな脅威であり、グローバルな対応を必要とし、より多くの諸国が経験のある人材、医療物資、資金を提供すべきであるとした。9月18日、国連安全保障理事会は、エボラ危機に関する緊急会合を開催し、エボラ出血熱の流行を国際社会の平和と安全に対する脅威であると宣言し、すべての国連加盟国に対して迅速な支援と協力を要請する安保理決議2177号を採択した。

9月29日、国連は感染拡大阻止に向けた国連エボラ緊急対処ミッション（UNMEER）を立ち上げ、エボラ

対策タスクフォースを現地に投入し、国連機関が飢饉や災害後に実施する活動に準じた、人道支援活動の調整にあたった。エボラ危機のために、米国、英国、フランス、中国は、医療支援組織としては比較的大規模な部隊の派遣を行った。米国は、エボラ対応のために3,000人規模の部隊をリベリアに派遣し緊急治療施設を設置した。英国は緊急治療施設の設置の国防省要員750人、航空支援艦アーガスを医療従事者や専門家の派遣支援にあて、WHOの活動支援のため500人規模の部隊を派遣した。フランスはギニアに陸軍病院を設置し、100人規模の軍医を派遣して対応にあたり、中国は人民解放軍がリベリアおよびシエラレオネに治療施設を設置したほか、軍の医療関係者を500人規模で派遣し、治療および感染症予防の訓練を実施した。安全保障常任理事国の中の4カ国が、感染症の対策のために医療部隊を派遣したことは、軍事組織による非軍事的な国際協力の新側面を示すものであり、感染症対策を目的とする安保理の招集、決議採択、国連ミッションの設立もかつてない事態であった。

国際社会における平和構築および安定化プロセスの中で、感染症の流行は人々の生活を破壊し、地域のコミュニティを荒廃させ、国家財政を極限まで圧迫する。長期にわたる国際経済援助が逆戻りするばかりか、紛争後の疲弊した国家のガバナンスの崩壊は、テロリストの温床になりうる。国際的な介入が本格化したこの時期、米軍が対応にあたるようになり、研究所でのテストと診断の迅速化、感染者を隔離できる治療ユニットの建設、感染リスクのある埋葬の禁止と火葬の義務化が行われた。

統治能力の脆弱な国家に対する平和構築の支援活動は、国際安全保障の重要な手段の一つではあるが、感染症の終焉に最も効果の大きい活動は、柔軟で適応力があり、感染症から学ぶ力を備えたプロセスをコミュニティ内に作り出すことに成功した、現地の人々により行われた。リベリア村落のコミュニティは、特定の家や小屋を隔離施設として住民を収容し、保健省は数千人の若者を雇用し、人々と感染者との接触を調査した。村落の指導者は事態を管理し、家族に感染者がいるかを気遣い、遺体の引き渡しを要請し、安全な埋葬を指導し、隔離された家庭には食料を届けるように配慮した。こうしてリベリアでの感染はピークに達した後、次第に低下していった。

この感染症拡大の流れを変えたのは、感染症の防護に関与する人々が、独自に発想する必要があるとする観点から、地域のコミュニティを外的な突発事項に対

処できるようにし、住民の生存の可能性を高めるためより好ましい環境へ人々を導き、効果的な防疫の構造を構築することに成功した、リベリアの国民とそのコミュニティであったといわれている。

5. 求められる不確実性への対応

5.1 克服すべき課題

1976年、ザイールでエボラ出血熱のアウトブレイクが発生するまで、世界の公衆衛生の医療関係者は、将来の感染症の防護を希望的に観測していた。免疫療法による効果の高い一連のワクチンの開発により、ジフテリア、はしか、ポリオ、風疹、破傷風などのリスクのレベルは押さえ込まれ、次々と続く新型の抗生物質の開発により医療品産業界は力強い発展の途上であった。しかし、エボラ出血熱と同時期に発生したHIVによる感染症の拡大は、これまで人類と公衆衛生機関が感染症を効果的に管理できるとする、成功の罫に陥っていたことに対する警鐘でもあった。

今日の複雑な感染症のアウトブレイクの突発が危惧される、変化の激しい不確実な環境では、基本的な防疫の前提条件を維持するのみでなく、前提条件の価値と規範を根本から見直し、変化に抵抗するよりも、むしろ自ら変化を創り出し環境に適応するような、能動的な修正をもたせたポジティブフィードバックによるダブルループ学習が求められる。感染症を生むグローバルリスクネットワークの複雑な環境は、基本的に不安定で、時間が経つにつれてリスクが変化し、しばしば、突然方向を変え均衡から離れる。わずかな摂動や効果が自己増殖、自己組織化し、古い仮説が見当違いになるような基本的な構造の変化をもたらしかねない。

基本構造が変化しつつある場合には、予測や前提に捕らわれることなく柔軟な視点から環境を見るべきであり、現在のメンタルモデルと現実の違いを認識することが重要になる。その兆候として現れるシグナルは微細な場合が多く、発生する微妙な事象を観察し、事象の根底にあるパターンや構造の変化を素早く察知することが必要になる。そのためには、環境の変化に敏感に反応する複雑な調整プロセスを、組織の中に創り上げていくことが求められる。

5.2 ユニバーサル・ヘルス・カバレッジへの期待

専門家の中には「ギニア、リベリア、シエラレオネで誰もが受診できる医療システムが整備されていれば、エボラ危機がかくも深刻な事態と化すことはなかった」との反省から、真の課題は感染症への対応よりも、基本的な公衆衛生プログラムへのアクセスがあるかどうか

か、すなわちユニバーサル・ヘルス・カバレッジの構築にあるとする意見がある。国際公衆衛生機関がとるべき重要なステップとして、各国の医療部隊による感染症対策の国際協力に加え、迅速な展開能力をもつ民間の国際医療チームの創設も提言された。また人道危機に対処する医師、看護師、検査技師、疫学研究者、ロジスティクス支援要員などで構成される、ミッションコマンド方式の多国籍チームを編成できるプール制のボランティア人材の養成が期待されている。

たとえば、訓練を受けた数千人の専門家を WHO に登録し、原則の共有とコンセンサスを強化し、より確かな行動を生む好循環を創り出すことができる。危機発生の際には短期間で現地に向かい、有望な医薬品、ワクチン、簡易診断キットの入手と供給をスムーズにさせるなど、危機の重要な局面で、これまでのように暫定的で調整力に欠け、初歩的な対応に終始する緩慢な対応を防止することができる。同時に不確実な感染症と不確実な支援態勢という二つの問題の解決を、現地を直接経験し認識できる位置にいるメンバーに、意思決定の権限を委譲し、分散型の自律的な処理体制を任せることが可能になる。

5.3 IoT (モノのインターネット) による感染症防護

2014 年の 5 カ月間で、エボラウイルスは 300 回変異したといわれ、ワクチンの効かないウイルス、短期間で変異しパンデミック化しかねない新たな感染症への防護計画を準備する必要がある。オリンピックを控え 1,300 万の人口を抱える世界的な大都市東京は、経済的にも繁栄する政治行政の中核として人の移動が多い。適切な公衆衛生上の措置がなされない限り、家庭、勤務先、学校、店舗、交通機関など人々が集まるあらゆる場所が、感染の温床となる可能性がある。そのため空港、港湾での監視体制、航空会社や交通輸送機関への指示や規制の強化を徹底しなければならない。また大規模な人口を持つ七大都市の中に二次感染の温床が出現した場合に備え、緊急対処計画を準備すると共に、警察、消防、医療、自衛隊が協働する、高度な即応部隊の手順を整備し演練する必要がある。

感染症ウイルスの拡散は人間の社会行動のパターンを変化させる。人々は他人との接触を避けるようになり、必然的に社会の経済活動は低下する。感染者との接触は少なくなり、感染者は病院でのケアを受けるようになる。最初は家庭内で感染が広がり、その後、病院で感染が広がる可能性がある。病院の施設が、封じ込め能力の高いバイオセーフティレベル 4 であれば、

防護が期待できるが、医療施設が不足しスタッフと病床が足りない場合は、封じ込めが効かずアウトブレイクする危険性がある。そのような不測の事態を防止するため、人の移動を監視し規制する SNS を活用した AI 学習モデルを内蔵し、すべてのモノがインターネットに接続された IoT 型社会の統制システムが有効になる。感染者の経路を洗い出し、その人物と接触した人々も直ちに監視・隔離し、看護をする必要がある。SNS に適正なフィルターリングを行った感染経路の特定と、OR を活用した早期警戒警報および管制システムの価値は極めて高く、OR モデルは、次世代の IoT 型社会の進化には欠くことができない。

6. まとめ

大規模な定量化モデルの構築には大きな投資が伴い、OR の成功と共にアルゴリズムの社会的権威も向上する。そのため前提の変更が困難となり、意思決定がモデルの内に閉じこめられる可能性を否定できない。その結果、前提に適合しない実世界の変化を見失い不測の事態に遭遇する危険性がある。

OR ワーカーは、想定シナリオと結びついたモデルが、いつ、どのようにして、どのような理由で前提を覆い隠し、思考の改善ではなく拘束に変わるのか、絶えず自問しなければならない。OR のこの科学的アプローチが、人間の行動が創り出す結果と経験を内省し、モデルと現実との違いを正しく捉え、新たなパターンやトレンドを発見し、ものの真の見方を学ぶことを可能にする。

謝辞 本研究は、科学研究補助金 (26671030) の助成を受けたものであり、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 世界保健機関 (木原雅子, 木原正博監訳), 『WHO の標準疫学 (第 2 版)』, 三暉社, pp. 139-158, 2008.
- [2] J. Giesecke, *Modern Infectious Disease Epidemiology*, 2nd edition, CRC Press, 2001. (山本太郎, 門司和彦訳, 『感染症疫学』, 昭和堂, pp. 3-18, 2006.)
- [3] 稲葉寿, 『感染症の数理モデル』, 培風館, pp. 29-37, 2008.
- [4] A. Sadilek, H. Kautz and V. Silenzio, "Modeling spread of disease from social interactions," In *Proceedings of the Sixth International Conference on Weblogs and Social Media*, 2012.
- [5] L. Garret, "Ebola's lessons," *Foreign Affairs*, **94** (5), pp. 80-107, 2015. (ローリー・ギャレット, 『エボラ危機対策の教訓 (上・下)』, フォーリン・アフェアーズ・リポート, No. 11, pp. 78-91, No. 12, pp. 92-106, 2015.)