

連載

エデルマンの勇者たち(7) 人命を救う米国疾病予防管理センター (CDC)

伊倉 義郎

これまで紹介したエデルマンのケースは、すべて私企業が対象であった。ということは、OR 適用の効果としてはコスト削減や作業の効率化ということであったが、今回紹介するのは人命にかかわるケースである。しかも OR が使われることによって、何十万人、何百万人の命が救われるかもしれないという話である。

2012 年のエデルマン賞に残った 6 ケースの一つが、CDC (米国疾病予防管理センター, Center for Disease Control and Prevention) である。CDC は米国国民の健康を守るために、疫病や感染症の研究を行い、その予防や問題解決を図る使命を負っている。例としては、インフルエンザの発生を抑え、その兆しがあれば蔓延を喰い止めたり、テロによる生物兵器による大量感染の防止を図ったりする。つまり、疫学的に国民がより健康的な生活を送れるように、あらゆる手段を使ってより安全な環境と社会を構築することを目指している。

このような CDC の本部はジョージア州のアトランタにあり、同じアトランタにあるジョージア工科大学とのコラボによって今回のプロジェクトが生まれた。

事の始まりは、2001 年の同時多発テロである。9 月 11 日の 1 週間後に、炭疽菌 (anthrax) の入った封筒が一部のマスコミや政治家に送られ、5 人が死亡、17 人が感染する事件が起きた (図 1 イメージ)。この事件を受けて、CDC では炭疽菌攻撃に対しての予防と対策とについて、より緻密な対策が講じられることとなった。特に炭疽菌のような生物兵器を使ったテロに対しては、発生後短時間でできるだけ多くの人に必要な医薬品を投与することが急務である。

空中散布のような広域の攻撃があった場合に、発生から抗生物質の投与までの日数と生存率の相関を表し



図 1 2001 年の炭疽菌攻撃後の処理方法
<http://news.yahoo.com/what-ever-happened-to-the-2001-anthrax-attacks-.html>

たものが図 2 である。秘密裏に行われるテロ実行からその発覚、対応の決定と指示、ワクチン配布、投与開始までに最短でも 2 日半はかかることとされているが、それから全人口に 48 時間以内に配布が終わったとしても生存率は 50% 程度でしかない。この図から、いかに早く大量に薬を投与することが重要か理解できる。全住民に 2 日間ですべての投与を終わらせるというのは実は不可能に近い。しかしながら、CDC の役割はいかにしてその時間を減らし、効率よく薬品投与を行えるような配布ネットワークを構築することである。これ

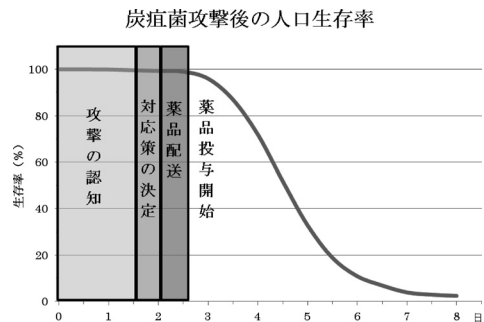


図 2 攻撃後の時間と人口生存率

いくら よしろう

(株) サイテック・ジャパン

〒 113-0033 東京都文京区本郷 2-19-9 田原ビル 2F

には、連邦政府のみならず、州政府、地方自治体、市民グループ、企業、宗教団体など幅広い組織の参加と協力が必要となる。さらに事前に綿密な計画を作成し、それに従った予行演習を行うことも重要である。

CDC の計画上一つのキーポイントは、薬品投与を実施する場所 (Point of Dispensing, POD) の数と位置を決めることである。2001 年の炭疽菌事件以来、米国政府は炭疽菌予防のワクチンの製造を急ぎ、2003 年までに全国民のワクチン在庫を確保している。その後米国政府は、各州に対して大量ワクチン投与計画を作成するように指示している。さらに単に立案だけでなく、その案を実施するための組織、施設、人員の確保も義務化した。

一口に緊急ワクチン投与計画といっても、大変なロジスティクスが絡んでくる。在庫ポイントから多数の POD への配送ネットワークの構築と POD 施設の設計や医療器具の配備、必要な人員の種類と人数の確保など、通常の医療関係者の専門知識の枠を超えたノウハウが必要になる。POD では、医師や看護師だけでなく、事務員や警官の確保も必要となる。POD もいくつかの種類があり、個人が徒歩か車で駆けつけるタイプ、いったん車で集合場所に人を集めてバスで移動するタイプ、ドライブスルー型、ウォークスルー型、モバイル型などがある。それぞれのタイプに弱みと強みがありスタッフ数や担当地域の人口と広がりによって最適なタイプが決められるという。

このような複雑な要因が絡んでくる立案には、高度なシミュレーションツールが不可欠である。CDC では、ジョージア工科大学のエバ・リー教授を中心としたグループの助けを借りて、2003 年より必要なツールの開発に着手した (文献 [3], [4])。出来上がったソフトウェアは、RealOpt と呼ばれるシステムで、最適化モデルとシミュレーションを組み合わせた総合的な POD 設計・配置・運用支援ツールである。

では POD の配置計画の中身についてももう少し詳しく見てみよう。POD の配置問題は、与えられた行政地区 (州内の郡の複数個、または都市程度を想定) で、費用対効果と効率を最大化した複数の POD の設置場所を決めるということである。さらに、POD の位置だけではなく、その担当地域と必要なスタッフ数も計算しなければならない。各地域内の人口については、まず地域をグリッドと呼ばれる細かなサブ地域 (例: 1 マイル四方) に分け、グリッドごとに人口調査の結果による推定家庭数 (人口) を当てはめる。POD の設置場所候補としてはグリッドを使い、どのグリッドに POD

を設置するかという問題を考える。制約としては、各行政地区内に少なくとも二つの POD が存在すること (一つが機能しなくなった場合を考慮)、各グリッドを一つの POD に割り当てること、割り当てられた POD への移動距離があらかじめ定められた最大距離以下であること、各 POD へ割り当てられた人口合計がその処理能力を超えないこと、などである。以上よりこの問題は混合整数計画問題 (MIP) として定式化できる。

例えば、アトランタ市の例をとれば、全体人口が 520 万人程度に 11 の行政地区があり、それぞれに 36 から 3,275 のグリッドが存在する。グリッド内の家庭数は 140 から 3,074 とばらつく。これを最適化配置問題として定式化すれば、行政地区ごとの問題としては小型ケースで制約式数 2 万と 0-1 変数 2 万個、大型ケースで制約式数 945 万、0-1 変数 945 万個程度の MIP となる。ちなみに標準 LP パッケージの CPLEX を使った結果は、POD での処理能力を 1 時間当たり 2,000 人とすれば、最小問題は 30 分程度で最適解が求まったが、処理能力を 1 時間あたり 500 人とすると 1 週間でも解は収束しなかったという。ほかの行政地区での結果は、ソルバーを数ヶ月間実行しても求まらなかった。その後種々の改良を加えても、最適解は約 3 日間かかることが判明しているが、人の生死がかかる場合にはとてもこのスピードでは満足できない。

実用的なシステム構築に向けて、リー教授らは計算時間を大幅に短縮するようなヒューリスティックな解法を開発した。使われたのは遺伝的アルゴリズムとアダプティブ・グリーディ検索法を組み合わせたものである (文献 [3], [4])。その結果、アトランタ市の計算時間は大幅に短縮され、3 分以内で最適解からの乖離が 8% 以内の近似解が求まるようになった (POD の能力を 1 時間 500 人とした一番困難なケースでも 15 分程度)。その結果が図 3 に示されている。

RealOpt は、POD の数と位置の最適化だけではなく、POD の設計と感染のシミュレーション機能も備えている。その他 RealOpt には、次のような機能が含まれているという。

- POD のような施設の場合、患者が最初に訪れた際の初期選別 (triage) は非常に重要である。これは、重症患者を素早く見つけて隔離し、他の患者や医療関係者への感染を防ぐという意味を持つ。そのような初期選別の方法についての選択肢や初期選別の間違いの確率。
- 医療関係者はあらかじめ予防的な薬品の投与を受けているとはいえ感染を 100% 防げるわけでは

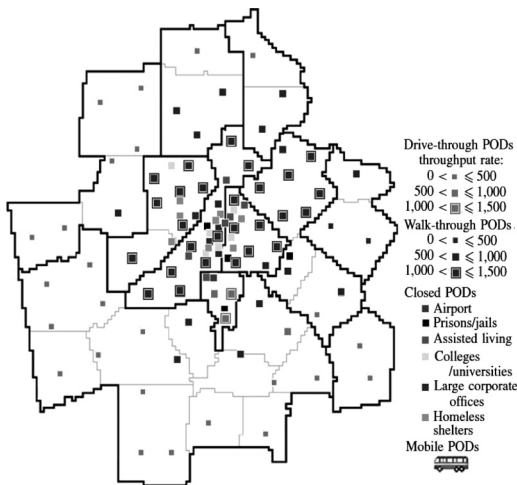


図3 アトランタ市の POD の配置図

なく、幾ばくかの感染は起こりうる。その確率の設定。

- POD を複数のサーバーを持つ待ち行列としてモデル化していること。患者の到着率や各サーバーでの処理時間の設定。
- POD 内でのスタッフのスケジューリングと割り当て最適化モデル。

これらの機能により、以前では何十時間とかかっていた POD 業務と感染シミュレーションが、今では数分程度で行えるようになったという。

では、実際に RealOpt はどの程度使われているだろうか。最初に RealOpt を試験導入したのは、2005 年にジョージア州内八つの郡で炭疽菌攻撃に対する訓練を実施した際である。この時は 600~700 人の医療関係者と数百人の警察官、数千人のボランティアが参加して演習が行われた。中でも、RealOpt を使った POD の配置とスタッフ配置を行った Dekalb 郡の成果（処理患者数、単位処理数に対しての最小スタッフ費用、平均待ち行列長さ、最小平均待ち時間、平準化された負担率）は他の七つの郡をはるかに超えていた（約 20

倍）という報告がある。その後全米各地（バージニア州、ワシントン市、ロサンゼルス市等）で導入が進み、すでに数百回の緊急ドリルや感染症予防で使われている。効果としては、スルーブットが 2~10 倍に改善されたことや、必要人員が半減したことなどが報告されている。さらに具体例としては、2007 年のニューオーリンズ洪水での緊急対応要員の配置と大量ワクチン投与、ニューヨーク市での種々の都市計画等もある。

現在全米ではすでに 4,000カ所以上に RealOpt が導入され、インフルエンザや H1N1 に対する対策、種々のテロ攻撃への方策立案などにも使われている。また海外の例としては、タンザニア、イスラエル、カタル、ハイチなどでも導入が始まっているそうである。

今年になってリー教授は、福島原発サイトを訪れ、被災地の状況を視察している。今後 RealOpt が被爆者のスクリーニングやシェルターの配置、物資供給分析に使われる可能性もあるという。

筆者は普段米国に住んでいるので、このような話を聞くのと改めて若干の安堵感を覚える。しかしながら、日本の実情を考えると非常に不安を感じてしまう。リー教授に日本の現状を率直に聞いたところ、「日本は未だ何もやっていない」とすげもなく言われたことは流石にショックであった。

参考文献

- [1] 2012 INFORMS Edelman Awards Gala, www.YouTube.com, 2012.
- [2] Presentation, “Centers for Disease Control and Prevention: Advancing Public Health and Medical Preparedness with Operations Research” https://live.blueskybroadcast.com/bsb/client/CL_DEFAULT.asp?Client=569807&PCAT=4340&CAT=4341.
- [3] Lee, E. K., et al. “Modeling and Optimizing the Public-Health Infrastructure for Emergency Response,” *Interfaces*, Vol. 39, No. 5, pp. 476–490 September-October 2009.
- [4] Lee, E. K., et al., “Advancing Public Health and Medical Preparedness with Operations Research,” to appear in *Interfaces*, January-February 2013.