

パンデミックへの備えとしての医療資材の循環備蓄：モデル化とシミュレーション

森田瑞樹^{*1}

Rolling stockpile of medical supplies for pandemic preparedness: modeling and simulation

Mizuki Morita^{*1}

Abstract - When a global pandemic of infectious diseases occurs, demand for medical supplies such as masks, disinfectants, and personal protective equipment will exceed the production capacity in normal times, consequently leading to serious shortages. Stockpiling is necessary to prepare for such situations. However, because pandemics are infrequent and might occur at any time, stockpile freshness is an important concern. As described in this paper, a “rolling stockpile” of medical supplies is proposed to prevent the medical supply stockpile from becoming too old. A formulation of a model and simulations based on it is presented. Results demonstrate that the method is applicable to the design of warehouses for rolling stockpiles, monitoring stockpile depletion during emergencies, and monitoring the process of recovery from emergencies.

Keywords : 感染症と備蓄, ローリングストック, 備蓄倉庫の設計, 緊急時の備蓄量の計算

1 はじめに

2019年に世界的な流行が始まった新型コロナウイルス感染症(COVID-19)では、多くの医療機関でマスク、消毒液、個人防護具などの医療資材の確保が一時的に困難な状況となり、感染症の世界的な大流行(パンデミック)における医療資材の確保という課題を浮き彫りにした。

パンデミックが広がると、医療資材の使用量が平時の生産能力を超えるために供給不足に陥る。しかし、これは一時的な現象であり、その後は生産能力の拡大が図られて供給不足は解消されていく。しかし、平時の生産能力をパンデミックに合わせて維持することは合理的ではないため、今後もパンデミックにおいて一時的な供給不足は必ず起こると想定される。よって、パンデミックの開始時期における医療資材の供給不足による医療現場の混乱を軽減するために、備えをしておくことが望ましい。

緊急時の資源の供給不足への備えとして考えられる対策は備蓄である。生物学的製剤や生鮮食品などは緊急時のために備蓄をしておくことは多くの場合に困難であるが、マスクなどの医療資材の多くはそれらと比べると消費期限は長く、緊急時用の

備蓄をすることが可能と思われる。

しかし、パンデミックは100年に数回という頻度である。また、発生間隔は均等ではなく、いつパンデミックが起こるかを予測することは難しい。医療資材は一定の期間は保管できるものの、たとえばマスクであれば保管中に感染抑止効果は徐々に低下しており、長期間にわたって備蓄されていたものを感染症の流行時に使用することは望ましくない。なお、医療用マスクの消費期限は一般に3年間が目安である。そこで、備蓄倉庫に保管はするものの、一定期間の後に日常診療に使用していき、備蓄機関が長期間にならないようにするという工夫が考えられる。一般的には災害時への備えとして水や食糧などの生活必需品の備蓄においてこうした考え方が議論されており「循環備蓄(ローリングストック)」と呼ばれることがある。

本稿ではパンデミックへの備えとして、パンデミックの際に必要な量が大幅に増加する医療資材(マスク、消毒液、個人防護具など)の循環備蓄を提案する。循環備蓄を行うためには1つ以上の備蓄用の倉庫が必要になるが、その設計に必要なパラメータの計算方法を明らかにするためにモデル化を行う。つまり倉庫の大きさをどう計算すればよいか、パンデミックの際にどれく

*1: 岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科

*1: Graduate School of Interdisciplinary Science and Engineering in Health Systems, Okayama University

らの期間であれば備蓄が維持できるか、などを計算するためのモデルを示す。また、パンデミックが発生した際には、「あと何日後まで備蓄を維持できるか」を常に把握できていることが必要で、日々の状況の変化に応じて計算を更新していくことになる。そこで、同じモデルを適用したシミュレーションの例を示す。さらに、生産体制の増強によって供給量が増加した場合には、第2波や第3波に備えて低下した備蓄量を速やかに回復しておく必要があり、その際のシミュレーションの例も示す。

2. 循環備蓄の概要

本稿で提案する医療資材の循環備蓄においては、備蓄計画のキープレイヤー（自治体など）が、医療施設へ納品する医療資材を一時的に保管する倉庫（循環備蓄倉庫）を用意する。

医療施設が卸売業者に医療資材を発注すると、受注した当該業者は循環備蓄倉庫から受注量を出庫して医療施設へ納品し、同時に同じ数を仕入れて循環備蓄倉庫へ入庫する。備蓄量（在庫量）の計画変更や調達の困難などの特別な事情がない限り、入庫量と出庫量は常に同量となる。

医療資材に着目すると、循環備蓄倉庫に入庫された医療資材は医療機関への納品の前に一定期間この倉庫に保管された後、医療機関に向けて出庫される。出庫方式の形態を先入れ先出し法（First In First Out : FIFO）とすることで、医療資材ごとの保管期間に大きな差は生じない。

医療機関の視点で考えると、発注した量が納品されるため、保管された期間だけ古くなった医療資材が納品されること以外は特に変わったことはない。保管期間は、後に論じるように循環備蓄量に依存するため、その設計次第では長期間にわたって保管されることもあり得る。

医療資材は通常は複数のものが段ボールにまとめて梱包されて流通する。この段ボールのサイズに複数の種類があると追加の計算が必要になるが、本稿では単純化のために、その総ボリュームのみを扱う。

なお、倉庫は1つにまとまっている必要はなく、危険分散という観点からは分散することが望ましい。倉庫の数や配置を実際に検討する際には、医療機関の地理的条件、交通網との位置関係、利用可能な土地・建物などを加味する必要がある。

3. モデルの定式化

循環備蓄を建設するための設計や非常時における備蓄量などの計算のために、循環備蓄をモデル化する。

3.1 系の設計

図1に示す倉庫について考える。倉庫では毎日、卸売業者による医療資材の流入（入庫）と流出（出庫）があると仮定する。流入した医療資材は一定期間にわたって倉庫に滞留し、その後流出する。倉庫の大きさは倉庫の設計時に決まるものとする。

ここで、変数を次のように定義する。

- F_{in} : 単位時間あたりの倉庫への流入量
- F_{out} : 単位時間あたりの倉庫からの流出量
- N : 倉庫内の滞留量
- T : 倉庫での平均滞留時間

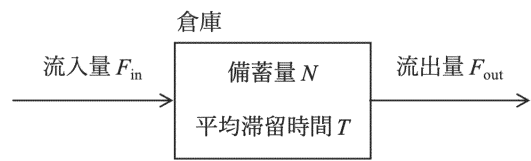


図1 循環備蓄用の倉庫と物質収支

単位時間あたりの倉庫への流入量と流出量は平時においてはつり合っており、この倉庫と関連する全医療機関の単位時間あたり（たとえば1日）の医療資材の消費量に相当する。

3.2 挙動（物質収支、動特性）

図1で示した循環備蓄用の倉庫の物質収支¹は(1)式のように表すことができる。

$$(\text{倉庫内の滞留量}) = (\text{流入量}) - (\text{流出量}) \quad (1)$$

倉庫内の滞留量の時間変化 dN/dt は次式のようになる。

$$\frac{dN}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (2)$$

倉庫内の滞留量の時間変化は流入量と流出量に違いがあるときに生じる。循環備蓄では、通常は注文があると、倉庫からその量を出庫し、それと同じ量を入庫する ($F_{in} = F_{out}$)。このため、平時では下記の定常状態が成り立っている。

$$\frac{dN}{dt} = 0 \quad (3)$$

つまり定常状態では倉庫内の滞留量 N は時間に依存しない定数となる。またこのとき、 $F = F_{in} (= F_{out})$ とすると、医療資材が倉庫に流入してから流出するまでの平均滞留時間 T は下記のように表される。

$$T = \frac{N}{F} \quad (4)$$

3.3 実際に適用する際の留意点

実際にモデルを適用する際には次の点に留意する必要がある。

まず、倉庫への流入量と流出量が平時ではつり合っていることを前提にしたが、実際の運用においては短い期間ではつり合わない。たとえば、医療機関からの発注（流出）を受けてから仕入れのために同じ量の発注（流入）をするが、流出してから流入するまでは少し時間が空く。また、医療機関からの発注量は常に同じではなく変動が生じる。これらが組み合わさった結果として在庫量は一定とはならない。このことを踏まえて平時の備蓄量と倉庫の容量とのバランスを設計する必要がある。

医療資材にも使用期限がある点にも留意する必要がある。たとえば、医療機関で使用されるマスク（N95マスク、サージカルマスク）は未開封で3年が目安とされる。使用期限を越えた場合には不良在庫となる。よって、平均滞留時間 T を設計する際には使用期限との兼ね合いに注意を払う必要がある。

4. モデルの適用

前章で定式化したモデルを用いて、パンデミックなどの非常時の振る舞いについて考える。非常時には、流入と流出の量が異なる非定常状態となることが多いと想定される。ここでは非常

時におけるシナリオを3つ想定し、それぞれにおいてどのような計算になるかを確認する。

シナリオ1では、倉庫からの流出量は変化しないものの流入量が0になった場合に、何日間にわたって倉庫の備蓄(在庫)を維持できるかを考える。シナリオ2では逆に、流入量は変化しないものの流出量が増えた場合に、何日間にわたって倉庫の備蓄が維持できるかを考える。シナリオ3では視点を変え、流出量が増えて流入量が0になった場合に事前に想定した期間にわたって倉庫の備蓄を維持できるように倉庫の大きさをどの程度に設計しておけばよいかを考える。

ここで示すように、非常時に備蓄が尽きるまでの時間などを前章のモデルに基づき簡単な式で計算することができる。こうした計算は、備蓄倉庫を設計する際や、あるいは後から倉庫の追加を検討する際などに利用することができる。

4.1 非常時のシナリオ1

はじめに、流出量は変化がなく、時刻 $t=0$ において流入がなくなった場合を考える。このとき、備蓄が空になるまでの時間 T_1 は、次のように計算される。

$$T_1 = \frac{N}{F_{out}} \quad (5)$$

つまり、シナリオ1で備蓄が空になるまでの時間 T_1 は、倉庫内の滞留量が大きいと長くなり、流出量が増加すると短くなる。また、(4)式で表される定常状態における平均滞留時間と等しい。

(5)式は時間・距離・速さの関係の類推から得ることができるが、次のように導出することもできる。

(2)式に $F_{in}=0$ を代入し次式を得る。

$$\frac{dN}{dt} = -F_{out} \quad (6)$$

変数分離をして積分を実行し、

$$dN = -F_{out} dt \quad (7)$$

$$N_t = -F_{out} \times t + C \quad (8)$$

を得る(C は初期条件)。本シナリオでは、 $t=0$ で滞留量 $N_t=N$ であるため $C=N$ となり、また、時刻 $t=T_1$ のときに倉庫の備蓄量が底をつく(つまり $N_t=0$ になる)ので、これを代入して

$$0 = -F_{out} \times T_1 + N \quad (9)$$

ここから(5)式を得る。

4.2 非常時のシナリオ2

次に、流入量には変化がない一方で時刻 $t=0$ において流出量が増えた場合(定常状態の k 倍になった場合で、 $k>1$ とする)を考える。このとき、備蓄が空になるまでの時間 T_2 は次のように計算される。

$$T_2 = -\frac{N}{F(1-k)} \quad (10)$$

もしくは、 $k>1$ より

$$T_2 = \frac{N}{F(k-1)} \quad (11)$$

つまり、シナリオ2で備蓄が空になるまでの時間 T_2 は、倉庫内の滞留量が大きいと長くなり、流出量が増加すると短くなる。また、流出量と流入量が同じ場合($k=1$)は定常状態に相当するため、いつまでも備蓄は空にならない(T_2 は無限大に発散する)。

4.3 非常時のシナリオ3

最後に、時刻 $t=0$ において流出量 F_{out} が k 倍になり、さらに流入量が0になったときに、 T_3 日にわたって備蓄を維持できるようにするためには、倉庫のサイズ N をどのように設計すればよいかを考える。このとき、 N は次のように表すことができる。

$$N = k T_3 F \quad (12)$$

ここから、たとえば流入がなくなって流出量が定常状態の3倍に上昇した場合でも30日間備蓄を維持できるようにするには、

$$N = 3 \times 30 \times F = 90 F \quad (13)$$

となる。よって、平時における1日の流出量の90倍の量の在庫を置くことができるように倉庫を設計しておけばよい。この倉庫を使用しうる医療機関の平時に置ける医療資材の消費量に相当する F を事前に把握できていれば、 T_3 と k を過去のパンデミックや非常災害対策計画などから設定することで、循環備蓄用の倉庫のサイズを設計することが可能である。

5. シミュレーション

前述の非常時のシナリオ1~3では $t=0$ のみにおいて F_{in} と F_{out} が変化することを考えたが、実際の非常時には日々刻々と流入量と流出量は変化する。よって実用的には、毎日の状況を入力して在庫状況を再計算し、あと何日まで医療資材を供給し続けられるかを常に把握できることが重要となる。また、医療資材の生産能力が向上した際にどのように備蓄量を回復するかを検討する必要がある。このためには、先に定式化したモデルを用いてシミュレーションをすることが有効である。ここでは2つのケースを考える。

5.1 消費過程のシミュレーション

パンデミックが始まって医療資材の消費量が増えると供給が不足する。ここでは簡単な例として、次のようなケースを考える。

平時では定常状態が続いていたが、非常時になって1日目に流入量が0になった。7日目には加えて流出量が平時の3倍に増えた。しばらくこの状態が続くが、14日目に平時の10倍の流入が1回だけあり、21日目に同じことがあった。その後、28日目に流入量が増加して流出量と同じになり、それがしばらく続く。

ここに適当な値を初期値として与え、備蓄量と備蓄が空になるまでの残り日数をモデルに基づいて計算すると図2になる。

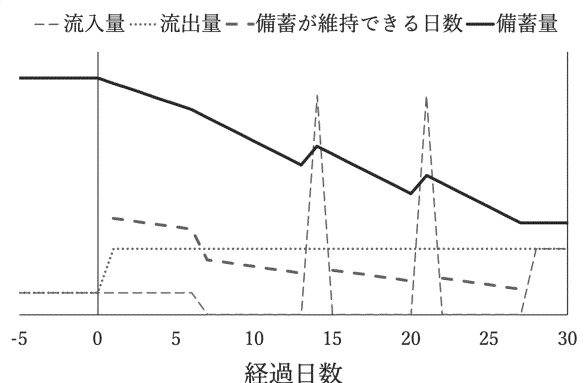


図2 非常時の消費過程における循環備蓄のシミュレーション

このようなグラフを毎日確認して備蓄量をモニタリングすることで、備蓄量が底をつく前に医療資材を提供している医療機関とも共有をして対応を検討しやすくなると期待される。情報の共有を受けた医療機関では、その情報を利用したシミュレーションをすることで、たとえば医療機関の中で医療資材の使用を工夫するために活用することができる。COVID-19の流行当初、医療機関では医療資材の在庫を維持するために様々な工夫が行われた。たとえば、事務系職員は同じマスクを数日間にわたって着用し続けるといった工夫が見られた。この際に、同じマスクの使用は何日間までとするのか、この緊急対応はいつまで続ける必要があるのかといったことが、日々の在庫量や今後の見込みなどを入力して計算を更新することで定量的に検討することができる。

5.2 回復過程のシミュレーション

流行のピークが過ぎて医療資材の不足が解消されたら、備蓄量を回復する。パンデミックは第2波、第3波といった複数の流行のピークを示すことがあり、発注量を増やすことができるようになったら速やかに備蓄量を回復しておくことが望ましい。しかしこのとき購入量が多すぎると倉庫に入りきらないため、適切な量を発注しなければならない。この量を定めるためにもシミュレーションが役に立つ。

入庫量の最大値を設定し、図3aには計画を立てずに少しずつ回復させた例を、図3bには計画的にできる限り速やかに回復させた例を示した。

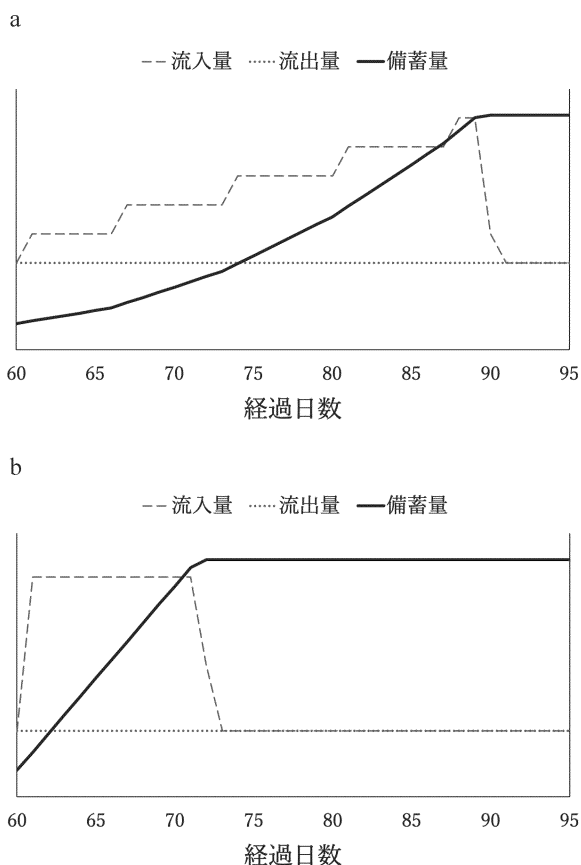


図3 非常時の回復過程における循環備蓄のシミュレーション

図3bでは、はじめは発注できる最大量を発注し、倉庫のキャパシティを超えそうになると適切な流入量になるように制御する。毎日の備蓄量や流出量をモニタリングおよびシミュレーションすることでこうしたことが容易になる。

6. おわりに

本稿では、世界的な新興感染症や再興感染症の大流行（パンデミック）における医療資材の不足への備えとしての循環備蓄（ローリングストック）を提案し、そのモデル化とシミュレーションの方法を示した。循環備蓄では、流入と流出がつり合っている定常状態では特に計算などをせずとも安定した運用を続けることが可能であるが、倉庫の設計や非常時の対応においてはより適切な意思決定のためにはモデルやシミュレーションが役立つ。

モデルとシミュレーションを利用することで、循環備蓄を利用する範囲における日常的な医療資材の流通量、循環備蓄のために用意する（もしくは用意できる）倉庫の大きさ、医療資材の不足が生じた際に何日まで備蓄が維持できればよいか、といったパラメータから循環備蓄の設計を検討することができる。また、パンデミックが発生した際に、備蓄があと何日間維持できるかを日々計算し直すためや、流行が落ち着いてから速やかに備蓄量を回復するためなどにも用いることができる。

医療資材には多数の品種・品目があり、また、医療資材の供給および感染症の対策には多数の企業、医療施設、自治体などが関与している。物流という観点からは、生産拠点の配置・分散化や物流効率を追求した荷姿などにおけるメーカーの協力、輸送効率の向上や緊急時の輸配送の確保などにおける物流業者の協力が欠かせない。よって循環備蓄を社会実装する際に検討すべきことは多くあり、単純なモデルの適用だけで完結するわけではない。さらに、平時にこれを運用するコストを誰がどう負担するかを事前に協議する必要がある。とは言い、循環備蓄の設計のために何をパラメータとして決定する必要があるかが示されることは、少なくとも循環備蓄の設計の初期段階において検討の参考になると期待される。パンデミックに限らず、一時的な資材の供給不足が生じる事態への備えとして備蓄を検討する際に、本稿が参考になれば幸いである。

謝辞

原稿に有益なご意見およびご助言をくださった人間文化研究機構の高祖歩美先生、三井倉庫ホールディングス株式会社の上保貴弘氏および竹鼻敏一氏、査読者の方々に深く感謝を致します。

参考文献

- [1] Himmelblau, D. M. Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, 4th ed., Prentice-Hall, 1982, 608 p.