

令和8年3月19日
北見工業大学

感染拡大時、限られた検査キットを誰に使うべきか？

～ 射撃や爆撃の数理モデルを公衆衛生上の問題に応用し説明 ～

<ポイント>

- パンデミック等で患者が殺到し検査キットが不足する状況において、臨床現場では、「臨床症状的に感染が明らかな患者」の検査を省略し、「疑わしい患者」のみを検査することでキットを節約することが効率的と考えられてきましたが、この方法が正しいかどうかの証明はなされたことはありませんでした。
- 北見工業大学の研究チームは、オペレーションズ・リサーチにおいて理論化されてきた逐次的資源配分の数理モデルである「射爆理論」をこの問題に応用し、医師による感染の「疑い度合」(Index of Suspicion)に基づいて検査の実施・非実施を判断する最適戦略を数学的に導出しました。
- 分析の結果、疑い度合が中程度の範囲(概ね 0.4~0.6)の患者に検査を集中させるというシンプルなルールが、理論上の最適解に近い性能を達成することを示しました。
- この成果は、パンデミックのみならず、インフルエンザの流行期など、検査資源が限られた状況下での検査実施の決定を支援する実用的な指針となることが期待されます。

<概要>

北見工業大学の奥村貴史教授、松田一徳准教授、中村文彦准教授らによる公衆衛生情報学チームは、パンデミック等で検査キットが不足する状況において、限られた検査キットをいかに効果的に利用するかという数理的な問題に取り組んできました(Scientific Reports 誌、2020年)。今回の研究では、オペレーションズ・リサーチにおいて開発された「射爆理論」の枠組みを医療現場の検査判断に応用し、医師が患者の症状等から推定する感染の疑い度合(Index of Suspicion: IoS)に基づいて、「どの患者に検査を実施すべきか」という個別の臨床判断を支援する数理的手法を提案しました。数値シミュレーションの結果、疑い度合が中間的な範囲の患者に検査を優先的に配分する戦略が、限られた検査資源の総合的な価値を最大化することを示しました。この成果は Springer Nature 社 Health Care Management Science 誌に掲載されました。

<研究の背景>

新型コロナウイルス感染症のパンデミックにおいて、臨床検査体制の逼迫が世界的な課題となりました。このように限られた検査資源を誰に優先的に使うべきかという問題が生じた際、臨床現場の医師たちは、「臨床症状的に感染が明らかな患者」の検査を省略し、「疑わしい患者」のみを検査することでキットを節約することが効率的と考えるようになりました。というのも、「感染が明らかと考えられる患者」は、検査結果が陰性であっても、検査精度の観点から陰性の結果を容易に信じることができないためです。検査体制が逼迫している状況では、感染の疑いが極めて低い患者に対しても、検査が無駄となる懸念が強まります。

こうした経験則は、検査の事前確率や検査精度(感度・特異度)といった統計学的な観点での一定の根拠を持つことは知られていたものの、「有限な検査資源の価値を最大化する」という最適化の観点から理論的に検証されたことはありませんでした。

一方、オペレーションズ・リサーチ分野では、「限られたミサイルや弾薬を、次々と現れる敵に対してどのように使うか」という逐次的資源配分の問題が「射爆理論」として研究されてきました。この問題は、「限られた検査キットを、次々と来院する患者に対してどのように使うか」という医療現場の問題と構造的に類似しています。本研究チームはこの数理的な類似性に着目し、軍事分野で発展してきた理論の枠組みを、医療の検査判断問題へと初めて応用しました。

<研究の詳しい内容>

本研究では、まず医師が患者を診察した際に感じる「この患者が感染している可能性はどの程度か」という主観的な確率推定を、「疑い度合」(Index of Suspicion: IoS)として、0 から 1 の連続変数で表現しました。そのうえで、ある患者に検査を実施した場合に得られる「検査の価値」を定量化する関数を定義しました(図 1)。

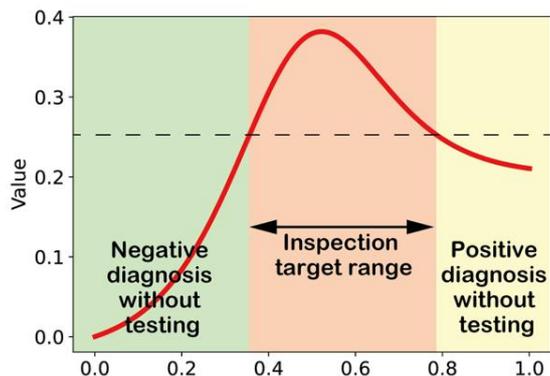


図 1 検査対象範囲を決定するための価値関数

この関数は、検査結果が真陽性・偽陽性・真陰性・偽陰性となる確率と、それぞれの場合に生じる便益・損失・情報の信頼性を統合したものです。この価値関数によって、疑い度が低すぎる場合(検査しても陰性になる可能性が高く、情報価値が低い)や高すぎる場合(検査しなくても臨床判断で対応できる)には検査の価値が低く、中間的な疑い度の場合に検査の価値が最も高くなることを数学的に定式化しました。

さらに、こうして仮定した価値関数を射爆理論の動的計画法の枠組みに組み込み、検査キットの残数と残り時間に応じて「どの範囲の IoS の患者を検査すべきか」を動的に決定する最適戦略を導出しました。図 2 は、(次の「補給」までの)残り時間 t と残り検査キット数 n の組み合わせに応じて、検査を実施すべき IoS の範囲がどのように変化するかを示した計算例です。検査キットに余裕がある初期段階($t=100, n>1$)では、比較的広い IoS の範囲が検査対象となりますが、検査キットの減少に伴い検査対象はより価値の高い中間的な IoS の範囲へと収束します。また、時間の経過に応じて、同じ残数でも検査すべき IoS は拡大します。このように、本手法は状況の変化に応じて検査対象を柔軟に調整する指針を与えるものであり、限られた検査資源を無駄なく活用するための合理的な判断枠組みを提供します。数値シミュレーションでは、こうした枠組みを用いて、提案手法(最適戦略)と「全員を検査する戦略」、「IoS が 0.4~0.6 の患者のみ検査する戦略」、「IoS が 0.3~0.7 の患者のみ検査する戦略」を比較しました。

その結果、最適戦略によって最も高い累積価値を達成できること、検査キットの在庫を期間終了時にちょうど使い切る理想的な配分を実現できることが確認できました。また、IoS 0.4~0.6 のシンプルなルールでも最適戦略に近い性能が得られることが確認され、これまで経験的に行われてきた疑いが中程度の患者を優先的に検査する論理的妥当性も示されました。

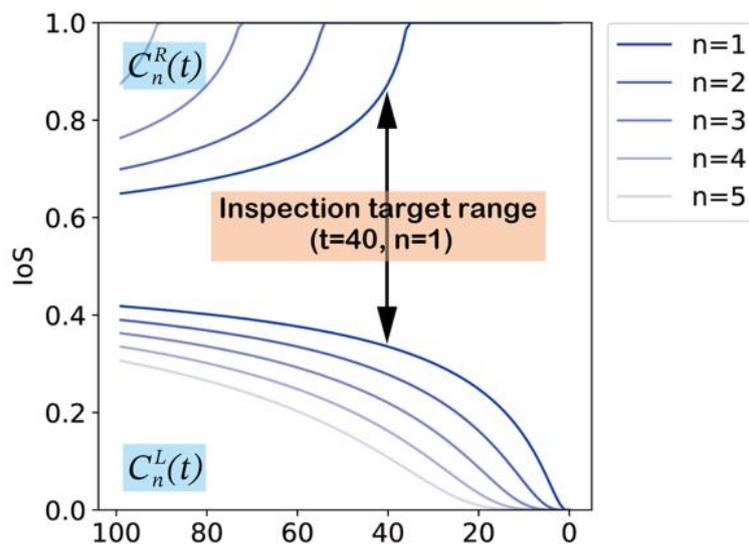


図 2 残り時間 t と残り検査キット数 n に対する検査対象 (IoS) 範囲の計算例

<今後の展開>

本研究は理論的なモデルの構築と数値シミュレーションによる検証を行ったものであり、今後は実際の臨床データを用いた実証研究が必要となります。具体的には、電子カルテデータから IoS をリアルタイムに推定するシステムとの統合や、病院のトリアージ、地域の検査センター、感染症流行時の緊急対応などの実際の場面での検証が求められます。また、本研究では単一の感染症を想定したモデルを構築しましたが、実際にはインフルエンザと COVID-19 が同時流行するような状況も生じます。こうした複数の疾患が競合する場合への拡張や、RT-qPCR・迅速抗原検査・抗体検査など複数の検査手法を組み合わせた場合のモデル化も今後の課題です。それでも、本研究で提案した枠組みは、検査キットに限らず、パンデミック時の治療薬や医療物資など希少な医療資源全般の配分問題にも応用できる一般的な理論基盤を提供したものであり、数理モデルを医療資源の配分問題へと適用する新たな応用分野を切り開いた研究成果といえます。

<論文情報>

掲載誌：Health Care Management Science

論文タイトル：Optimization of diagnostic kits usage based on symptomatic presentation: an application of military decision making in public health

著者：中村文彦，土田直司，松田一徳，才川隆文，奥村貴史

URL：<https://link.springer.com/article/10.1007/s10729-026-09757-7>

DOI：10.1007/s10729-026-09757-7

受理原稿公開日：2026年3月16日（オンライン公開）

お問い合わせ先：

（研究内容について）

北見工業大学 基礎教育系 准教授 中村文彦

E-mail: nfumihiko@mail.kitami-it.ac.jp

（報道について）

北見工業大学 企画総務課 広報戦略係

TEL: 0157-26-9116 E-mail: soumu05@desk.kitami-it.ac.jp