

K 値を用いた COVID-19 の感染状況のマクロ解析

中野 貴志^{†1}

概要：新型コロナウイルスとの戦いにおいて、人的および経済的損失を最小限に抑えるために、COVID-19 感染拡大の変化を迅速に検出し、正確に将来を予測する方法を確立することが極めて重要である。本稿では、感染拡大率を示す新たな指標として K 値を導入し、それを用いたマクロ解析により、日本における COVID-19 の感染拡大および収束の特徴を浮き彫りにする。本研究が、新たな感染の波に対する効果的な対策を考える際の一助となれば幸いである。なお、本論文は、同名のタイトルで日本応用物理学会の特別 WEB コラム「新型コロナウイルス禍に学ぶ応用物理」で発表した記事に第2波以降に得られた知見を含めるために加筆修正したものである。

キーワード：新型コロナウイルス、データ活用、モデル分析

1. K 値の導入

COVID-19 の累計感染者数 $N(t)$ が指数関数的に推移すると考えよう。ただし、純指数関数的な増加が永遠に続くことはありえず、一つの流行は、さまざまな理由によりどこかで頭打ちになる。あるいは状況の変化によって感染の再拡大もあり得る。このような時間依存性をあらわに取り入れるため、 $A(t)$ を微分可能な関数として、 $N(t) = N_0 e^{\int_0^t A(t') dt'}$ と表す。我々が知りたいのは $A(t)$ の時間依存性であるので、 $N(t)$ の対数の微分をとればよい。値域を 1 以下に制限するため、分母のとり方に工夫はあるが、時間の単位を経過日数 (d) とし、微分 COVID-19 の感染拡大の典型的なタイムスケールである 7 日で差分に置き換えたものが K 値である [1]。

$$K(d) = \frac{N(d) - N(d-7)}{N(d)} = 1 - \frac{N(d-7)}{N(d)}$$

この導入からもわかるように K 値自体にモデル性はなく、感染拡大率に対する単なる速度計である。K が一定の値をとるとき、 $N(d)$ は純指数関数的に増加する。例えば、 $K = 0.5$ ならば、累計感染者数は 1 週間に 2 倍のペースで増加を続けることになる。

2. 一定減衰仮定

世界に先行して感染が拡大した中国の累計感染者数で求めた K 値の推移を観察すると、経過日数の関数として一定の傾きで直線的に推移していることがわかった。これは指数係数が一定の割合で減衰していることを示唆する。そこで、 $A(d)$ が 1 より小さい公比 k で、

$$A(d) = A_0 k^{d-1} d$$

のように減衰すると仮定すると K 値はその値域の大部分の

領域 ($0.25 < K < 0.9$) ではほぼ直線的に推移する。このとき、K 値の傾き K' と減衰定数 k の間には、近似的に $k = 1 + 2.88K'$ の関係が成り立つ [2]。

$A(d)$ の一定減衰は、当初は仮定として導入されたが、その後多くの国や地域の解析により、観測事実として確立しつつある。累計感染者数の時間発展が一定減衰に従うとき、実データの解析と将来の予測の手順は以下のとおりである。

1. まず累計感染者数 $N(d)$ の推移から $K(d)$ を求める。
2. K が直線的に変化している領域をフィットして傾き K' を求め、その値から k を計算する。
3. 漸化式を用いて将来の $N(d)$ を予測する。日々の新規感染者数は $N(d) - N(d-1)$ で与えられる。

3. K 値解析による施策の評価

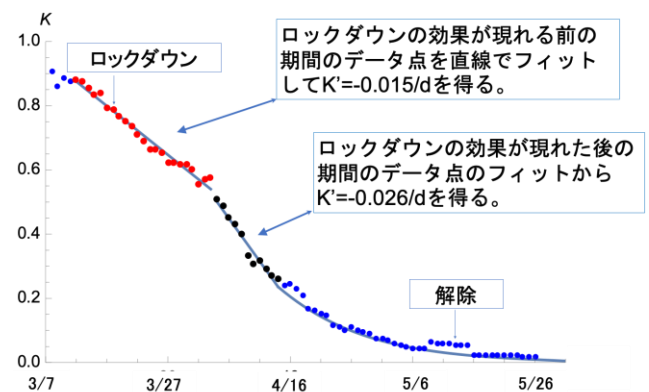


図1 フランスにおける K 値の推移

K 値を用いることにより、感染者数推移の予測、感染再拡大の兆候の検知などに加えて、施策の評価が可能になる。施策が感染収束スピードに顕著な影響を与えた例として、図 1 に示すのが、フランスの K 値の推移である。感染拡大初期では、傾き K' が $-0.015/d$ であったが、3 月上旬のロックダウンの効果が現れ始めた 3 月下旬には $-0.026/d$ となり、

^{†1} 大阪大学 (連絡先: nakano@rcnp.osaka-u.ac.jp)

ロックダウンにより感染収束スピードが増加したことが分かる。4月下旬以降も一定減衰仮定の下で求めた予想線に沿って K 値が推移しており、長期間にわたって一定の感染収束スピードが維持されていることがわかる。このロックダウンによる不連続な K' の変化は、ドイツ、英国、イタリアなど多くのヨーロッパ諸国で共通に見られる現象である。また、程度の差こそあれ、対策を講じる前の感染初期でも自然減の傾向にあること、つまり、傾き K' が負であることも各国に共通する。

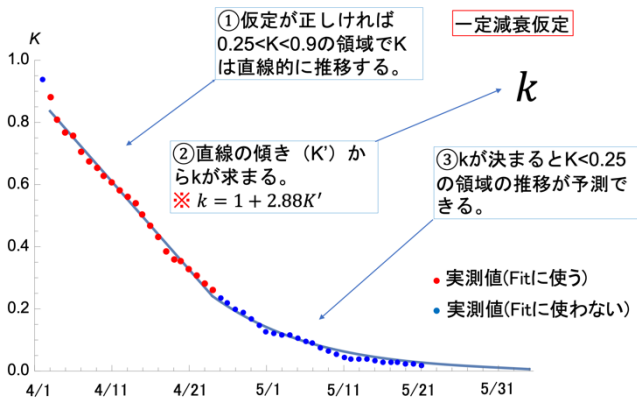


図2 日本における K 値の推移

一方、日本における K 値の推移は極めて安定しており、図2に示すように、ヨーロッパのいくつかの国で見られたような社会活動の制限などの施策による感染収束速度の増加は見られない。4月3日から24日にかけては、傾きが $-0.028/d$ の直線でよく近似され、それ以降も $k = 0.92$ の場合の線に沿って推移している。大阪府から提供されたデータによると、陽性確定日と推定感染日の間には約2週間のタイムラグがあるため、3月中旬以降に実施された施策や対策は感染収束スピードの変化にほとんど寄与しなかったことがわかる。また、 K' の絶対値がロックダウン後のヨーロッパ諸国よりも大きいことから、日本でのCOVID-19の感染拡大

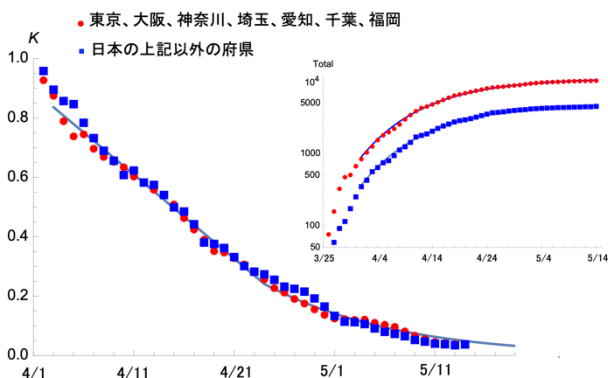


図3 日本の人口密度上位7都府県とそれ以外の府県の K 値と累計感染者数の推移

には他の多くのアジア諸国と同様、強い自然減の傾向があることもわかる。時期的に効果があった可能性がある3密回避についても、単なる密集は感染拡大や収束の遅延を招かない可能性が高い。図3に示すように人口密度上位7都府県とそれ以外の府県の K 値の推移に差はなく、感染の波の高さは感染拡大初期の感染者数でおよそ決まっていたことが分かる。

4. クラスター対策について

COVID-19という潜伏期間が長く、無症状の感染者から感染する非常にやっかいな敵と戦うには適切な対策をタイムリーに打つことが重要である。英国での感染拡大初期に集団免疫の形成という悪手を打ったばかりに医療崩壊の危機を招いたのは記憶に新しい。一方、隣国の韓国や台湾では徹底した検査と追跡による感染者と感染予備軍の同定と隔離という手を打って、 $K' = -0.052/d$ (台湾)、 $K' = -0.082/d$ (韓国)という驚異的なスピードで感染を封じ込めた。

日本に新たな感染の波が到来したとき、どのような対策が効果的であろうか？ そのヒントとなる事例が大阪にある。図4は、大阪における2021年3月の K 値の推移である。大阪では市内の4カ所のライブハウスでクラスター感染が起こったが、ライブハウス側の協力を得て店名を公表し、イベント参加者の特定、追跡、陽性者の隔離を行ったことにより、急速に感染収束に持ち込んだ。3月初旬から中旬にかけての感染収束期の K' の値は $-0.066/d$ である。ちなみに3月下旬から4月初旬にかけての K 値を見ると0.5に張り付いているように見える。これは1週間で倍増のペースであるが、収束に持ち込んだ中国・武漢発の第1波と欧米由来の第2波を分離しなかったことに起因する人為的な見かけの現象である。

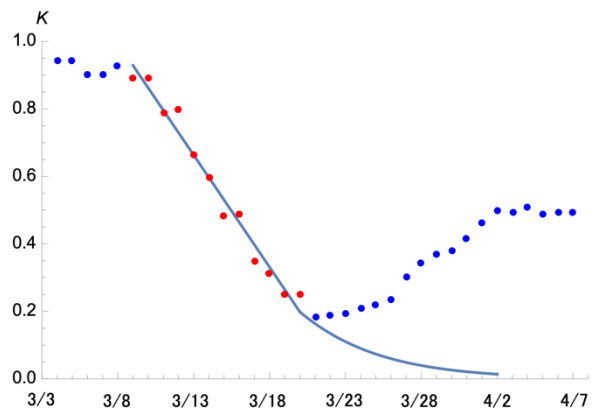


図4 大阪府における武漢発第1波による K 値の推移

5. 第2波以降の感染流行状況の特徴について

第1波では、武漢発の流行が完全に収まる前に欧米発の感

染拡大が起こったが、後者が前者に比べ規模が桁違いに大きく、また後者が始まった時期が全国でほぼ同時だったため、全国的に同期する一つの波として取り扱うことができた。第2波以降については、流行の開始時期や強度に見られる大きな地域差とピークを過ぎても感染が完全に収束せず一定数の新規感染者が定常的に発生する状況が続くこと（ベースラインの存在）が特徴である。図5と図6に大阪と東京の新規感染者推移を一定減衰仮定の下、ベースラインの自由度を加えて解析した結果を示す。東京都のデータからは、第2波の発生源であり、他の地域とは極めて異なる流行推移を示す新宿区のデータを除いた。

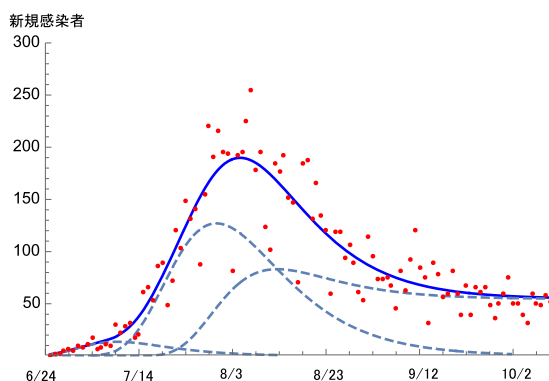


図5 大阪府における第2波による新規感染者数の推移

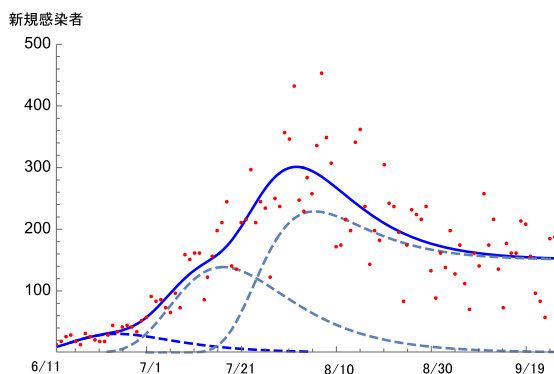


図6 東京都における第2波による新規感染者数の推移
(感染拡大の発生源であり特異な流行推移を示す新宿区のデータは省いた)

図5と図6を比較すると明らかなように、3つの部分波の相対的な強度の関係は大阪と東京で大きく異なり、発生時期についても最初の2つの部分波については東京が先行していることがわかる。またベースラインについても東京と大阪の人口比の1.6で基準化しても東京の方が約2倍高い。ベースラインの高さは地域差が大きく、東京を含む首都圏で高く、大阪を含む関西圏で低いという傾向が第3波においても観測されている。

最後に大阪府の第3波の新規感染者数推移を図7に示す。大量の自主検査による正月明けの新規感染者数の突出の影

響から脱した後、2月下旬までは一定の減衰率でベースラインに近づく一つの波でデータが再現可能である。2月下旬から3月上旬にかけて発生した新たな感染拡大は、減衰率が今までと変わらないと仮定すると4月上旬にピークを迎える。感染日から陽性報告日までの約2週間のタイムラグを考慮すると、2月28日の緊急事態宣言の解除が感染拡大を引き起こした可能性は低い。より感染力が強いとされている変異株の影響については、現時点では判断できない。感染力が強くなると自然減の傾向が弱まり、当然のことながら感染者数は増加するが、感染力の増大に伴う減衰率の低下(k が1に近づくこと)はピーク時期の遅延に、より明確に反映される。今後の流行状況の推移を注視したい。

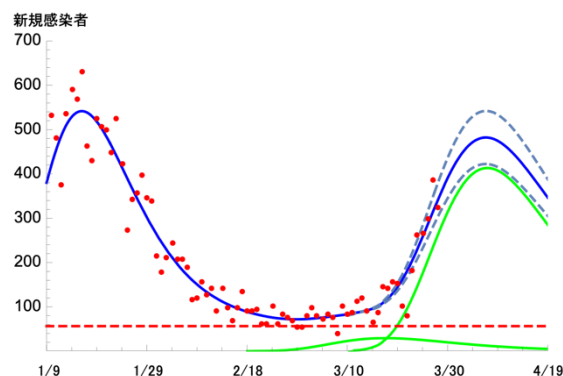


図7 大阪府における第3波による新規感染者数の推移。
(緑色の線は直近波を構成する2つの部分波の成分である)

6. むすび

K 値の推移を紐解くと、日本ではCOVID-19感染が当初から欧米よりは大きな一定の減衰率で収束に向かったことがわかる。緊急事態宣言に伴う社会活動の制限や自粛は、経済や教育に対する影響が甚大な割には効果が見えない。因果関係と相関関係の区別を科学的なエビデンスに基づいて行い、焦点を絞った真に効果的な施策を実施することにより、感染拡大防止と経済活動のバランスを取る必要があるだろう。検査体制が強化された第2波以降に顕著になった一定のベースラインの存在を考慮すると、ゼロコロナを実現することは、たとえ多大の経済的損失を覚悟しても、達成が困難であると推定される。人の命を守るという原点に立ち戻れば、今後も発生が続くと予想される大規模なクラスター感染が病院や福祉施設で起こらないようにする工夫や対策が必要であろう。

参考文献

- [1] Nakano, T. and Ikeda, Y.: "Novel Indicator to Ascertain the Status and Trend of COVID-19 Spread: Modeling Study," *Journal of Medical Internet Research*, Vol. 22, No. 11, e20144 (2020).
- [2] Akiyama, Y.: private communications, http://www.bi.cs.titech.ac.jp/COVID-19/The_K_indicator_epidemic_model_follows_the_Gompertz_curve.html