

2020年5月6日

K 値で読み解く COVID-19 の感染状況 と今後の推移

中野 貴志 大阪大学核物理研究センター
池田 陽一 九州大学理学研究院物理学部門

本ノートでは、Web 上で公開された中野・池田によるプレプリント論文” Novel Indicator of COVID-19 spread status”¹に準拠して、論文ではスペースの制限により詳細に述べられなかった日本の感染状況について報告する。

K 値とその傾き K' の意味

前回のノート¹では天下り的に導入した指標 K であるが、その後の研究で感染の拡大・収束傾向を司る係数との間に密接な関係があることが分かった。まずそのことについて解説する。

ある時間 t に依存する量 $y(t)$ が指数関数的に増加する場合、 a を正の定数、 y_0 を初期値として

$$y(t) = e^{at}y_0$$

のように表すことができる。例えば、 t の単位を 1 日とすると、 $a=0.1$ の時に $y(t)$ は 1 週間毎に倍増する。この関数は単調増加関数なので t が大きくなり続けると無限大に発散する。そこで新型コロナの総感染者数のように決して無限大に発散しない現象を記述するためには、

$$t \rightarrow \infty \text{ のとき } a \rightarrow 0$$

という条件を課しないと行けない。我々は COVID-19 が収束に向かう時、 a が単位時間ごとに一定の割合 k ($0 < k < 1$) で小さくなると仮定した。

$$a(t + \Delta t) = ka(t)$$

また、このとき、 $y(t + \Delta t) = e^{a(t)}y(t)$ となる。 t を d (経過日数) とし、 Δt を 1、 $y(t)$ を $N(d)$ とした式が仮定として論文中に与えられている。

¹ 「COVID-19 感染状況の推移について」(中野、2020年4月14日)

論文中では **dumping factor** と呼ばれている k は、指標 K よりも根源的な量で、 k が分かれば、(我々の仮定が正しい範囲で) 総感染者数 $N(d)$ は正確に推測できる。

k は根源的な量であるがグラフからその値を直接読み取るのは至難である。図 1 では、15 日を境に k の値が 0.968 から、0.927 に変化しているがそれがグラフから読み取れるだろうか？

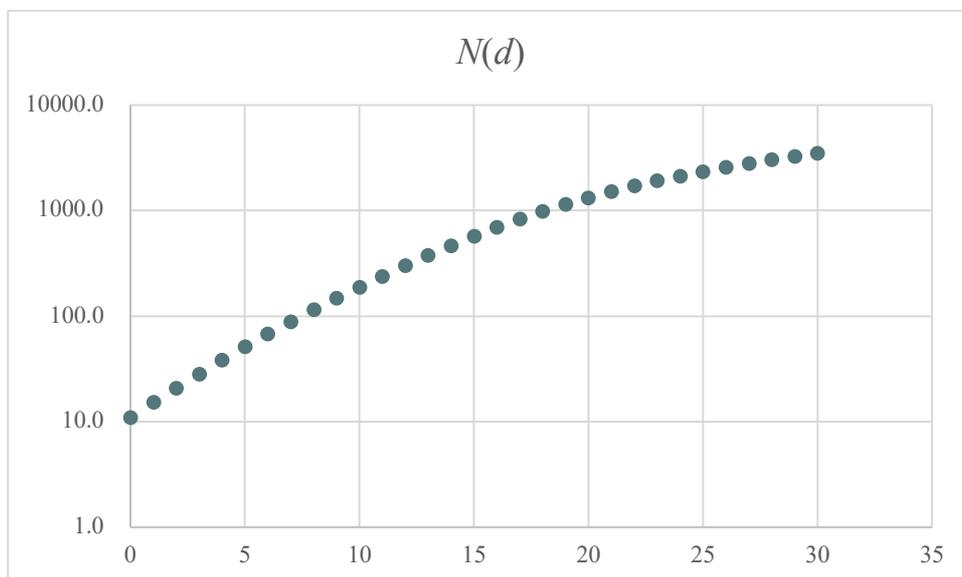


図 1: 総感染者数 $N(d)$ の d (日) 依存性の例. $d=15$ で dumping factor k の値が変化している.

一方、図 1 の $N(d)$ を入力値として K 値を計算すると以下の図 2 になる。3~4 日の遅延はあるが、 k の変化がはっきりと K の傾きの変化に反映されていて変化が格段に読み取りやすくなっていることが分かる(人間の脳は曲率よりも、直線の傾きに敏感に出来ているように思える)。

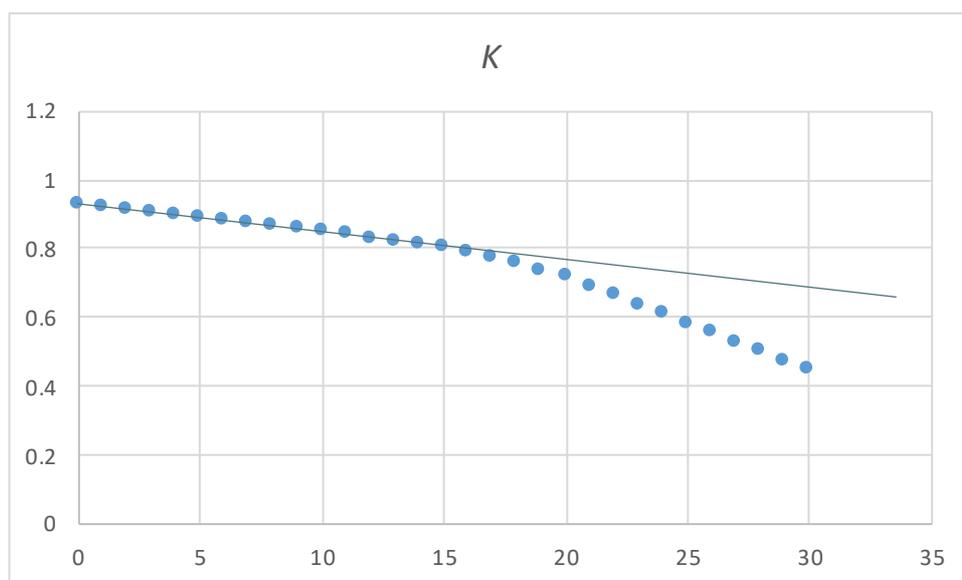


図 2: K 値の d (日) 依存性の例. $d=15$ で dumping factor k の値が変化している.

論文で述べたように、 K の傾き K' と減衰係数 k との間には、 $k = 1 + 2.88K'$ という関係がある。従って、実データの解析と将来の予測の手順は簡単である。

1. まず総感染者数 N の推移から K 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総感染者 $N(d)$ を予測する。日々の新規感染者は $N(d)-N(d-1)$ で与えられる。

K 値の計算になぜ総感染者数 $N(d)$ しか使わないのか？

感染の収束状況を判断する指標として一般には実効再生産数 R_t がよく使われている(らしい)。 R_t は1人の感染者から二次感染者が生まれる数の平均値で、その値が1より安定的に小さいと感染が収束に向かっていると判断される。 R_t の計算には、ある時刻 t における感染者の数だけではなく、回復、隔離、死亡等の理由で感染の拡大を引き起こす必要のない人を除外する必要がある(ということだ)。 K 値の計算においても除外者を考慮すべきではないかという質問や提案をよく受ける。我々は除外者数も総感染者数に比例すると仮定した。その場合、除外者の効果は全て指数 $a(t)$ あるいは k に押し込むことができるので、 K 値の計算に $N(d)$ 以外を考慮する必要はなくなる。もちろん、この仮定の妥当性は実データの解析により K 値の変化の直線性として確認されなければならない²。

我々はこの除外者数が観測された感染者数に比例するという仮定は比較的穏当な仮定であると考えている。我々が一番恐れたのは2月の中国で起こったような「感染者」の定義の変更による総数の不連続なジャンプや、PCR 検査の実施基準の大幅な変更である。幸いにして、そのようなことは第1期非常事態宣言中には起こらなかった³。

² 仮定が正しければ、 $0.25 < K < 0.9$ の範囲で K は直線的に変化する。

³ 検査体制が十分でないため予め決めた検査を実施する基準を遵守できないという理由でPCR 検査体制を強化するのは良いが、もっと感染者は多いはずという思い込みだけで検査体制を強化し、基準を変更して検査数を増やすことは弊害の方が多い。

先のモデル計算との比較で示したように減衰係数 k の変化が K に伝播するまで、3~4 日の遅延がある。しかし、日々の感染者数のふらつきに容易に左右されない K の安定性と将来の予測や状態の変化の察知を容易にする K の線形性は、その欠点を補って余りある。丁度 1 週間の間隔を開けて同じ曜日の総数の比から計算する K には、日本の検査体制の問題「土日の検体の持ち込みが少なく、月曜の陽性判定者は少なくなる」の影響を受けにくい、すなわち、日ごとの新規感染者数で一喜一憂する人を減らすという利点もある。

日本における K 値の推移について

論文中で示したとおり日本における K 値の推移は極めて安定で、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等の施策による感染収束速度の増加もなければ、米国で見られるような感染再拡大の兆候も見られない。4 月 3 日から 24 日にかけては、傾きが -0.0283 の直線によく近似され、それ以降の推移も $k=0.9185$ の予想線に沿って推移している。このまま順調な推移が継続すれば、5 月中旬には多くの国で感染収束宣言が出ているレベルである $K=0.05$ に達するであろう。

次の図 3 に直線によるフィット、そのフィット結果から求めた 4 月 25 日以降の予想曲線と観測値を示す。 $d=0$ が 4 月 1 日に対応し、 $d=30$ が 5 月 1 日に対応する。

日本の K 値

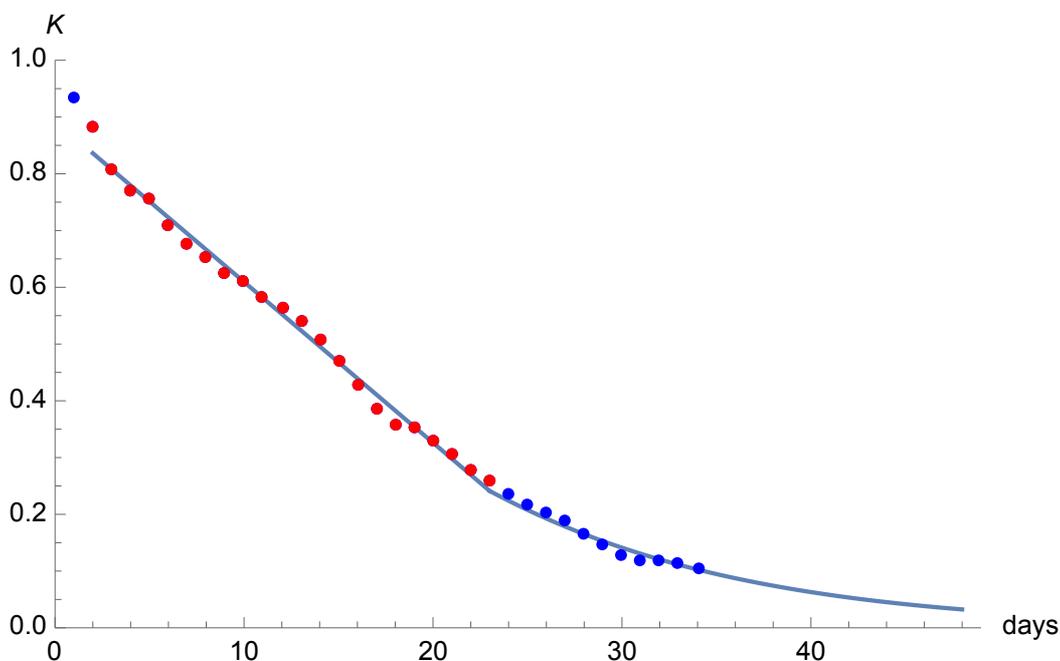


図 3: 日本の K 値の d (日) 依存性. $d=0$ は 4 月 1 日、 $d=30$ が 5 月 1 日に対応する。

東京における K 値の推移について

連日の報道では東京の新規感染者数の変化や総感染者数の増加が大きなニュースになっていた⁴。しかしながら、東京における K 値の推移が他府県と比べて特に特徴的であった訳ではない。次の図 4 に示すように傾き K は、 -0.0268 で全国平均に近く、4 月 25 日以降の観測値も、ほぼ予想通りに推移している⁵。現在までのところ、非常事態宣言下に施された様々な施策の効果が K の傾きの変化として見えないのも全国の場合と同様である⁶。

東京の K 値

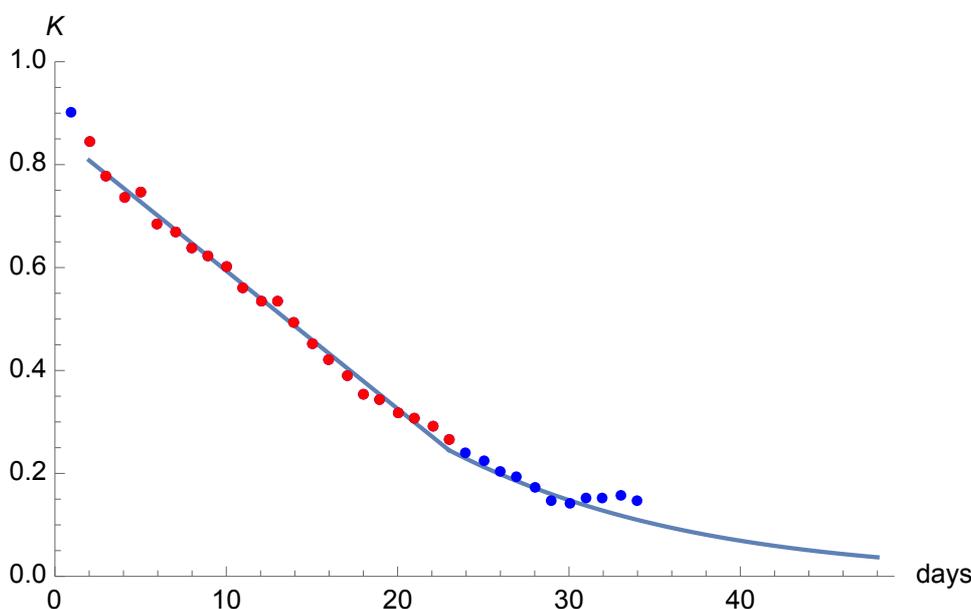


図 4: 東京の K 値の d (日) 依存性. $d=0$ は 4 月 1 日、 $d=30$ が 5 月 1 日に対応する。

⁴ 東京の総感染者数が 3,000 人を超えたことが NHK ニュース 7 のトップニュースになった時は驚いた。前日までの総計が 2,974 人だったからである。

⁵ 5 月 2 日以降の K 値の連続した上昇は、複数の病院でクラスター感染が起こったことが原因だと分かっている。感染者と濃厚接触者の同定と隔離が経路不明の感染より容易であるため、この上昇分の収束は早いであろう。仮に、このような上昇の原因が多数の孤立した経路不明の感染である場合には、感染再拡大につながる深刻な状況が発生したと判断できる。

⁶ 尤も予想通りに推移していること自体が様々な社会活動を制限した施策のお陰だと言えなくもない。検証のために実験を繰り返すことは出来ないため、客観的な事実として「効果が見えない」とした。活動制限に「効果がない」と断言している訳ではない。

非常事態宣言対象地域とそれ以外の地域の違いについて

東京の感染者数は約 30%を占めるので、全国の K 値と東京の K 値の振る舞いが似通っていること自体は驚きではない。4月8日に非常事態宣言の対象となった7都府県(東京、大阪、神奈川、埼玉、千葉、兵庫、福岡)とそれ以外の府県全体との比較をしてみよう。図5で赤い点が非常事態宣言対象都府県で青い点が遅れて対象となった府県の K 値である。両者に大きな差はなく、日本全国でほぼ同じフェーズで感染状況が推移していることが分かる。

非常事態宣言対象地域とその他の地域における K 値

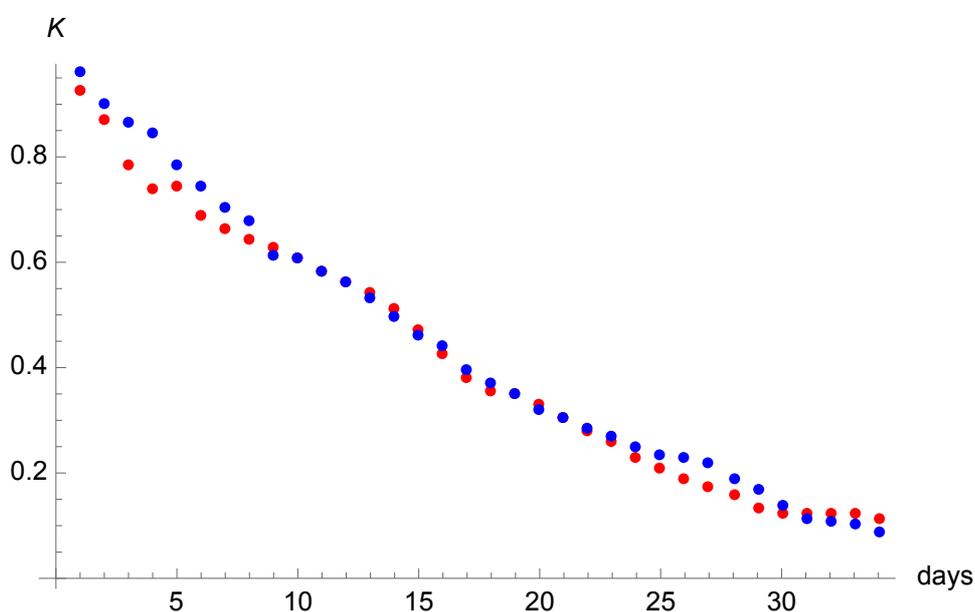


図 5: 4月8日の非常事態宣言の対象地域における K 値(赤)とその他の地域の K 値(青)の d (日) 依存性。 $d=0$ は 4月1日に対応する。

北海道における再感染拡大と収束について

3月初旬に感染の拡大があった北海道は3月31日には新規感染者数が0となり、小康状態にあった。しかしながら、4月8日を境に新たな感染拡大が始まり、今も収束していない。感染者累計の基準日を4月6日に設定して K 値を求めた結果を図6に示す(K 値の計算は基準日の8日後から可能なので、 $d=0$ は4月13日である)。

北海道の基準日変更後の累計総感染者数は700人程度(5月5日時点)と少ないので、データ点のばらつきが大きいですが、それでも K は5%の精度で決まり、その値は-0.0268である。感染収束スピードは全国平均とほぼ同じであり、北海道での第一波の流行と収束は第二波の収

束スピードに影響を与えていない。これは COVID-19 が全人口で完全な集団免疫を形成せずとも、おそらく局所的なコミュニティ(数家族～数十家族程度)で集団免疫に近い状態に達することで収束が進む性質を持つことを示唆している。

北海道の4月の感染再拡大とK値の推移

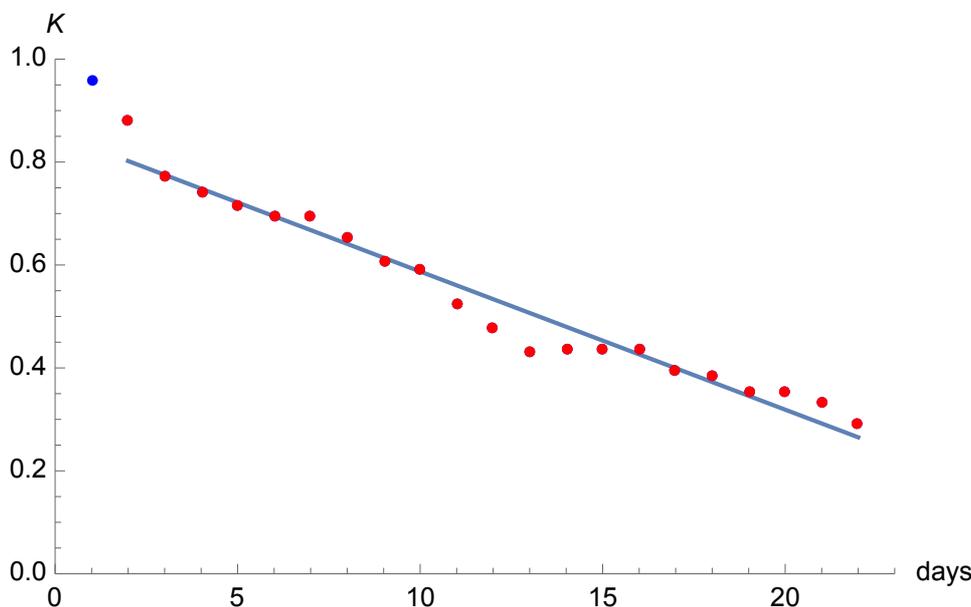


図 6: 北海道の K 値の d (日) 依存性. $d=0$ は 4 月 13 日に対応する.

新規感染者の週変化率について

先のノート「COVID-19 感染状況の推移について」では、感染拡大の大きさの直感的な指標として、1日あたりの新規感染者数を1週間前の同じ曜日新規感染者数で割った値(新規感染者数の週変化率)も導入した。日本の実データの解析で K' が-0.0283、 k が 0.9185と求まったので、週変化率についても現在までの推移との比較や将来の予測が可能である。

次の図 7 に 4 月 2 日以降の週変化率の観測値を、 $k=0.283$ から求めた予想曲線でフィットしたものを示す($d=0$ は 3 月 28 日である)。4 月 1 日以前の週変化率については計算値が観測値を大きく上まっているが、これは観測値に感染第一波の影響が残っていて、分母が小さくなりきれないためである(総感染者数をリセットしないと正しい K 値が求まらないのと同じ理由)。

k が 0.9185 の場合、感染収束期(感染爆発が始まった時点からから 1 ヶ月～2 ヶ月後)で週変化率が 0.55 から 0.6 の値を取る。観測値はそのレベルに達しているので、今後、3~4 週間程度は 1 週間毎に新規感染者の数が 0.55~0.6 倍のペースで減少していくと予想される。

新規感染者数の週変化率

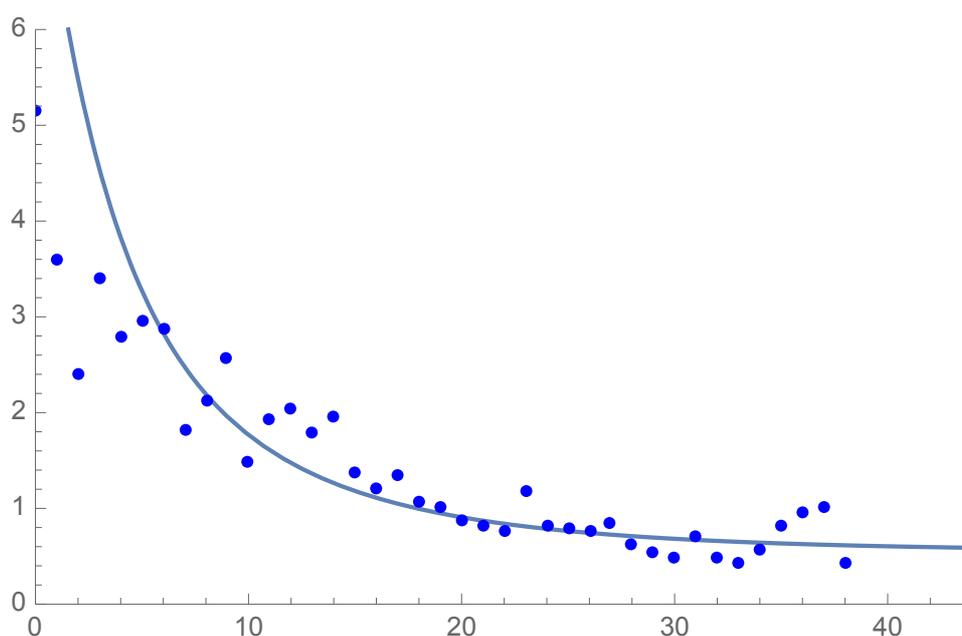


図 7: K 値から求められた新規感染者数の週変化率の d (日) 依存性 (実線). $d=0$ は 3 月 28 日に対応する.

適時適切な対策について

COVID-19 という非常に厄介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、 $K'=-0.0524$ (台湾)、 $K'=-0.0820$ (韓国) という驚異的なスピードで感染を封じ込めた。

これから感染の本格的な収束期 (新規感染者数が少ないがゼロでは無くただらと続く時期) を迎える日本で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 8 は、3 月 3 日を $d=0$ とする、大阪における 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、必要な場合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 である。 K 値を K' 値で割った商の絶対値が感染収束に必要な大まかな日数を与えるので、 K 値が 0.9 を超えるような感染爆発が起こっても、感染者とその濃厚接触者の特定、追跡、隔離が行えれば、約 2 週間で感染の小爆発が収束する。一方、 K' 値が -0.03 程度のままだとその収束に約 1 ヶ月かかる。

大阪の3月の K 値

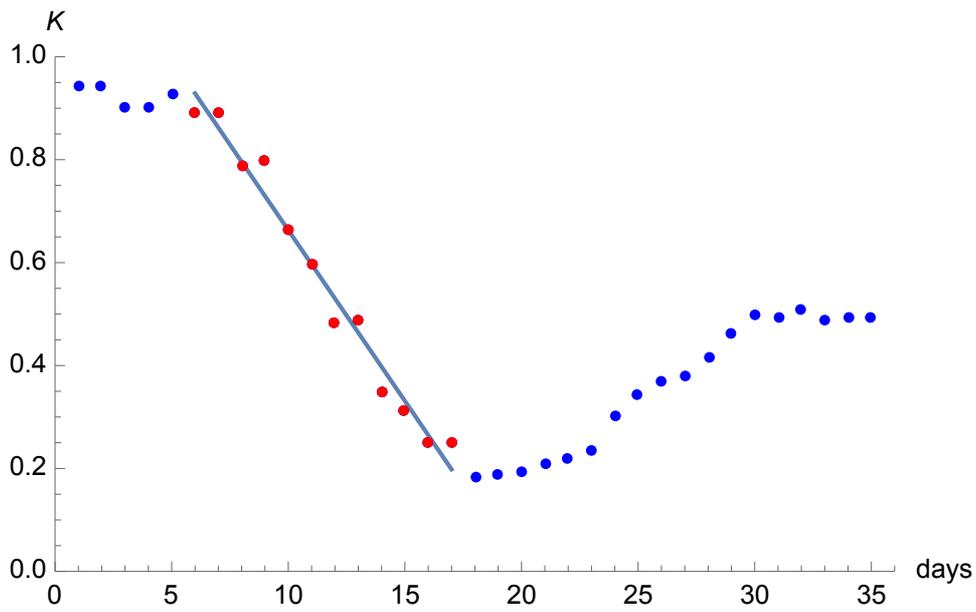


図 8: 大阪の 3 月の K 値の d (日) 依存性. $d=0$ は 3 月 3 日に対応する.

大阪の 4 月以降の K 値

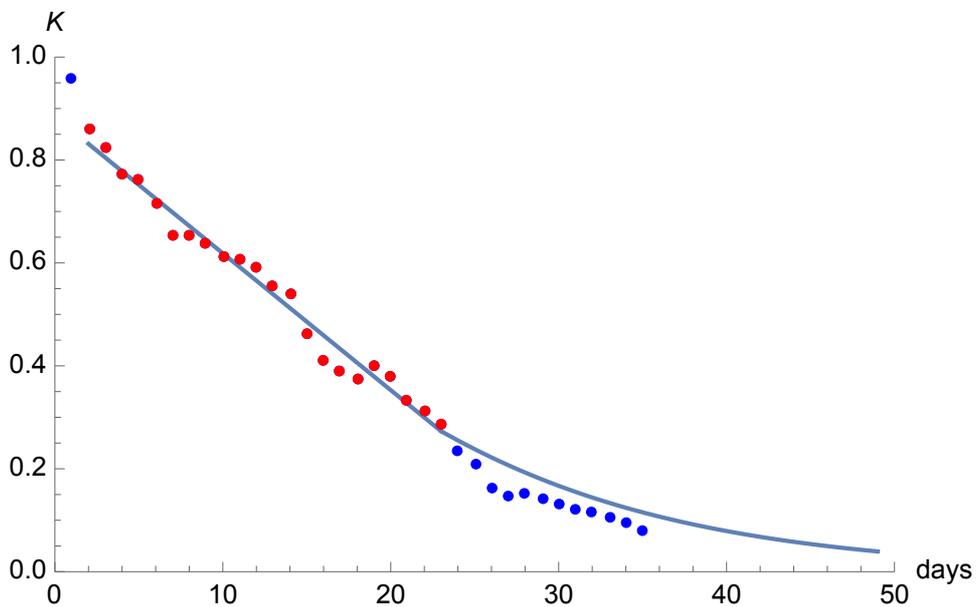


図 9: 大阪の K 値の d (日) 依存性. $d=0$ は 4 月 1 日、 $d=30$ が 5 月 1 日に対応する.

図 8 の大阪の 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。先のノートでもまた論文でも詳しく述べたので、繰り返しになるが、これは本来関係がない 3 月初旬の感染拡大と欧米からの人の流入による下

旬の感染拡大を無理やり関連付けてしまった結果現れた人為的な現象である。累計のカウンターをリセットすると、図9に示すように大阪の K 値の推移も日本全体とほぼ相似形になる。4月前半と後半で傾きに大きな差が無く施策の効果が見えていないのも同様である⁷。

以上のように、 K 値の推移を読み解くと、日本ではCOVID-19が感染収束に向かって順調に進展していることがわかる⁸。この最後の局面で詰めが甘くならないように適時適切な施策を実施することを真剣に考える時期に差し掛かっている。経済や教育に対する影響が甚大な割には、今のところ日本では効果ははっきりしない欧米型の社会活動自粛施策⁹を今後も継続するか否かだけが選択肢ではない。

人の命を守るという原点に立ち戻れば、病院及び医療関係者の安全を守ることが最も重要ではないだろうか？ 今後も散発的に発生すると予想されるクラスター感染が病院で起こらないよう、感染者がCOVID-19を対象としない一般病院の患者及び医療関係者と接する可能性が極力少なくなるような工夫が必要である。その上で、感染者とその濃厚接触者の早期の特定、追跡、隔離が極めて有効であること国内外の多くの実例が示している。

⁷ 緊急事態宣言が出る以前から市民が自発的に行動を抑制したため、施策の効果が見えにくくなったという可能性も大いにある。

⁸ 5月5日時点の K 値は、全国平均:0.104、東京:0.145、大阪:0.087、神奈川:0.144、埼玉:0.084、千葉:0.054、兵庫:0.066、福岡:0.038、東京を除いた全国平均:0.085である。福岡は既に感染収束を宣言して良いレベルに達している。これは新規感染者が今後福岡で出ないと予測している訳ではない(きっと出るであろう)。しかしながら、社会に過度の負担をかけなくても工夫次第で対処できるレベルに達したら、失った日常を取り戻すべきである。

⁹ 日本より厳しい活動制限を課している殆どの欧米の国の感染収束速度(K 値の傾き)は日本より低い。来年以降の適切な備えをする上でその理由を解明することも重要である。