

新型コロナウイルス感染症 (SARS-Cov-2) の院内感染を思索した SIQR モデルの改良

Improvement of SIQR model considering nosocomial infection of new coronavirus infection (SARS-Cov-2)

○小泉梨沙¹, 山中雅則²*Risa Koizumi¹, Masanori Yamanaka²

Abstract: Those who test positive for the new coronavirus infection (SARS-Cov-2) will be quarantined. After quarantine, both the community and the quarantine are considered safe. However, the problem of nosocomial infections remains. The purpose of this study is to investigate nosocomial infections in quarantines and their effects on community transmission mediated by nosocomial infections. We improve the SIR and SIQR models that describe time-varying changes in infected person, taking into account nosocomial infections. We numerically solved the improved model and compared it with the results of the SIQR model.

1. 導入

中国武漢から徐々に感染拡大した新型コロナウイルス感染症 (SARS-Cov-2) は、短期間で世界にパンデミックを引き起こした [1]. 集団を介した日常生活では誰でも感染のリスクがある。

このウイルスは、重症急性呼吸器症候群 (SARS) や中東呼吸器症候群 (MERS) 等と比較して多くの相違点が明らかになってきている。毒性は極端には強くないために致死率はそれらと比較してそれほど高くない。感染者の大半は軽症であり、無症状の感染者が多数存在するなどが主なものである。しかし、後者は逆に感染の拡大を引き起こす原因の一つにもなっている。通常は、感染が確認されると隔離が行われ、市中の感染者をなくす努力がなされる。今回のパンデミックでは隔離者が急増したために、感染が拡大するにつれて医療崩壊の発生した国もある。通称ロックダウンと呼ばれる強力な移動制限措置をとった国もあり、感染の抑制と経済活動の兼ね合いも問題となった。

感染症における感染者の時間変化を記述する基本的な数理モデルに SIR モデル [2]がある。SIR モデルから派生した様々なモデルが調べられているが、その一つに SIQR モデル [3]がある。SIQR モデルでは感染者を隔離者と市中感染者に分けて記述がなされる。これは今回のパンデミックでは、隔離し切れてない市中感染者の動態が焦点の一つであるからである。一方で、日本国内では当初から病院におけるクラスター感染が報告されており、高齢者施設におけるクラスター感染は特に心配されてきた。本研究では、隔離後の院内感染とその周辺への影響を調べた。これは隔離感染者と医療従事者の感染の状況は、市中感染の状況と異なると推測されるからである。

2. 先行研究

Kermack and Mckendrick の SIR モデルはウイルス

の広がりを Susceptible (未感染者), Infected (感染者), Recovered and Removed (治癒者・死亡者・隔離者) の時間変化で記述するモデルである。潜伏期間や伝染人数, 再発症を無視する単純なモデルである。以下の微分方程式で表される。

$$dS/dt = -\beta SI$$

$$dI/dt = \beta SI - \gamma I$$

$$dR/dt = \gamma I$$

ここで β は未感染者と感染者の接触による感染率, γ は感染者の治癒または死亡率である。 γ は隔離感染者と市中感染者の回復スピードは同程度として設定されている。

新型コロナウイルス感染症の特徴として、不顕性感染者の影響を無視することができない。この効果を取り込むために小田垣は、SIR モデルに Quarantined (隔離感染者) を考慮した SIQR モデルを提案した。これは以下の微分方程式で表される。

$$dS/dt = -\beta SI$$

$$dI/dt = (1-q')\beta SI - qI - \gamma I$$

$$dQ/dt = q'\beta SI + qI - \gamma'Q$$

$$dR/dt = \gamma I + \gamma'Q$$

ここで $(1-q')\beta SI$ は市中感染者, $q'\beta SI$ は隔離感染者, q' は新規感染者の中で陽性が確認され隔離された人の割合, q は隔離率, qI は市中感染者の中で感染が確認された人の数でありその人数は単位時間の間に市中感染者から隔離感染者になる, γ' は隔離感染者の治癒または死亡率である。

3. 本研究の目的とモデル

本研究では、隔離後の病院における院内感染とその市中感染への影響について調べる。そのために、医療従事者を変数として新たに加え、隔離感染者と医療従事者間の感染を考慮した数理モデルを提案する。

4. 本研究のモデル

SIQR モデルでは隔離後は他者へ感染を引き起こさないと仮定される。しかし、現実には院内感染が頻発した。ここでは SIQR モデルに S' (院内未感染者) と I' (院内感染者) の項を追加し、院内感染の効果を考慮した変更を行う。微分方程式は以下の通りである。

$$dS/dt = -\beta S I - \lambda S I'$$

$$dI/dt = (1-q')\beta S I - qI - \gamma I + \lambda S I'$$

$$dQ/dt = q'\beta S I + qI - \gamma' Q$$

$$dR/dt = \gamma I + \gamma' Q$$

$$dS'/dt = -BS'I' - \alpha S'Q + \delta I'$$

$$dI'/dt = BS'I' + \alpha S'Q - \delta I'$$

ここで $\lambda S I'$ は院内感染者、 $BS'I'$ は未感染医療従事者と感染医療従事者の接触による感染、 $\alpha S'Q$ は未感染医療従事者と隔離感染者の接触による感染、 $\delta I'$ は感染医療従事者の治癒を表す。

SIQR モデルとこの研究のモデルを数値的に解いた結果をそれぞれ Figs. 1, 2, 3 に表す。いずれも係数は、 $\beta=0.5$ [4], $q'=1/1000$, $q=0.06$ [4], $\gamma=1/5$, $\gamma'=1/10$, $B=0.0179$ [5], $\delta=1$ とした。

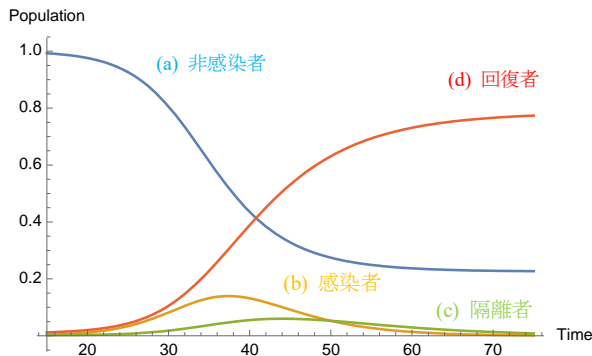


Figure1. Results of the SIQR model

SIQR モデルでは、(a)未感染者の曲線が減衰するにつれて(d)回復者が増加している。(b)感染者は山形の曲線を描き、(c)隔離者はなだらかな曲線を描く。

本研究では、隔離感染者からの感染に焦点を当てて病院内と市中に影響するケースを2パターン考察した。

(i) 隔離感染者による院内感染を考慮した場合

隔離感染者が市中全体に及ぼす影響を知りたいので、 λ は β の感染率と同じとして、 α は β の 10 倍 (係数は $\beta=\lambda=0.5$, $\alpha=5$) とした。SIQR モデルと比較して、未感染者の減少と感染者の増加が共にわずかに早まったが、差は小さく院内の感染率が高くとも市中に与える影響は少ないことが分かる。

(ii) (i)の場合で加えて感染医療従事者と市中未感染者の接触による感染係数が高い場合

(i)における α はそのまま λ を β の 4 倍 (係数は $\lambda=2.0$, $\alpha=5$) とした。SIQR モデルや(i)の場合と比較して、(a)未感染者の減少と(b)感染者の増加は比較的早まった。(c)隔離者と医療従事者の総数は全人口の 1000 分の 1 と仮定しているが、 λ が 4 倍異なるだけで市中全体にも少なからず影響を及ぼす傾向が確認された。

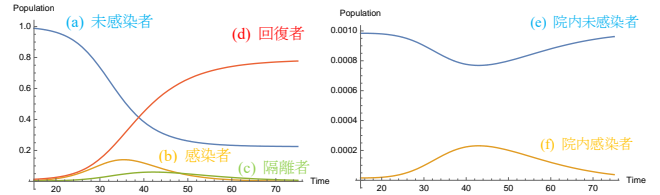


Figure2. Results of this study ($\beta=\lambda$, $\alpha=10\times\beta$)

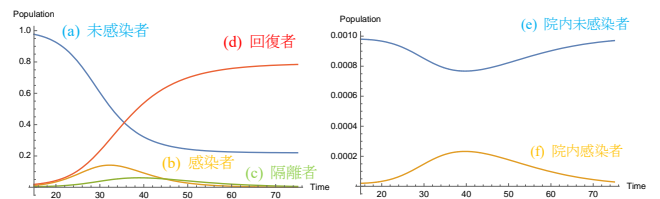


Figure3. Results of this study ($\lambda=4\times\beta$, $\alpha=10\times\beta$)

5. 考察

新型コロナウイルス感染症において、隔離後の院内感染を考慮したモデルの計算を行った。

院内感染を考慮した本研究のモデルは、SIQR モデルと比べ、感染が早まった。(i)隔離感染者と未感染医療従事者の間の感染係数が大きい場合であっても、院内感染は高くなるが市中に与える影響が少ない結果となった。(ii)また、(i)の場合で加えて感染医療従事者と市中未感染者の間の感染係数が大きい場合、市中に感染拡大を与える結果となった。

よって、感染者が隔離されたとしても医療従事者との接触により院内感染を引き起こすことは十分にあり得るということが分かった。こうした隠れた部分に対しても感染症の拡大のリスクがあることを考慮する必要がある。

6. 参考文献

[1] <https://www.who.int>
 [2] Kermack and Mckendrick "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics" Proceedings of the Royal Society of London, series A, vol. 115, no. 772, 1927
 [3] 「新型コロナウイルスの蔓延に関する一考察」小田垣孝 物性研究, vol. 8 No.2, p2 (2020)
 [4] <https://www.ftsus.jp/covinfo/numerical-simulation/>
 [5] <https://group.softbank/system/files/pdf/antibodytest.pdf>