

寄稿

秋田高校における感染症流行の可視化

2年G組2番猪狩友太郎(共同研究者：石井沙季、刈屋瑛嗣、佐藤航貴)、指導教員：高橋健

※本論文は学会誌掲載用に大幅に要約改訂しています。研究方法 SEIR モデルのみを抜粋させていただきました。番号等は原文と一致させるためにとりどころ抜けています。要約改訂されていない論文は <https://drive.google.com/file/d/1ATfjyiNtD6fBCcF-yoTc5KrXLqbHPPEL/view?usp=sharing> で見るすることができます。

研究目的

学校に焦点をあて、これら感染症の流行とその対策について数理モデルを用いて研究を行っていくことにした。

1. 研究方法

[1]数値解析の方法

感染症の流行を可視化するにあたり、本研究では SEIR モデルを基盤とするモデル系を用いることとした。この数理モデルは、感染症の流行過程を記述するモデル方程式で、対象とする閉鎖人口を感染症に依存した4つの状態(S:感受性宿主で感染する可能性のある人口、E:潜伏期間(感染性を有するが発症していない)にある人口(厳密な定義は感染待ち時間だが本研究では同一とみなす)、I:感染性を有し、発症している人口、R:感染後に回復して免疫を獲得した、あるいは死亡した人口)に区分する(Fig.1)。本研究では COVID-19 による新型コロナウイルス感染症の拡大をみるが、学校を占めるのは若年層で重症化、あるいは死亡に至りにくい傾向がある(Table.1,2)ことから、発症者はすべて軽症か無症状で、誕生死亡(感染症罹患による死亡を含めて)による人口の増減は考慮しない。各区分の単位時間あたりの変化は(1)式のような連立常微分方程式によって与えられる。ここで、 β は感染確率で m を1人が毎日接触する人数、 p をそれぞれの接触ごとに感染が生じる1日当たりの確率、 N を全人口とすると(2)式で与えられる。 ϵ は発症率で ϵ^{-1} は発症期間が指数分布に従うと仮定したときのその平均値、また γ は回復率(または隔離率)で、 γ^{-1} は感染期間が指数分布に従うと仮定したときのその平均値である。

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \epsilon E(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \epsilon E(t) - \gamma I(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t)$$

$$\beta = \frac{mp}{N}$$

(1)

(2)

(1)式において、第1式は未感染者の時間変化率を示し、未感染者と感染性を持つ者との接触で感染するので接触率は両者の積 SI に比例する。また感染確率は β で、刻々と感染が生じると未感染人口

は減少していく。第3式は発症者の時間変化率を示し、ある時に発症した者と回復者の差分にあたる。第4式は回復者の時間変化率を示し、発症者は一定の速度 γ で回復していくため、時間経過に伴って回復する者は増加する。

総人口 $N=S+E+I+R$ は定数であるから、時間微分は0である。

$$\frac{dS(t)}{dt} + \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dI(t)}{dt} + \frac{dR(t)}{dt} = 0$$

これと第1,3,4式から第2式が与えられる。

解析によって、1人の感染者あたりが生産する2次感染者数である基本再生産数 R_0 が(3)式で与えられる(稲葉、2002)。

$$R_0 = \frac{\beta N}{\gamma} = \frac{mp}{\gamma} \quad (3)$$

$R_0 > 1$ のとき、1人の感染者が1人より多くの人に感染させるため感染が拡大していくことを示し、逆に、 $R_0 < 1$ のとき、感染者の2次生産が減少していくので、これが終息の条件である。

感染症対策の効果(ワクチンやマスクの着用等)を α ($0 < \alpha < 1$)、感染症対策を施している人の割合を p' ($0 < p' < 1$ 、施していない人の割合は $1-p'$) とするとその感染症への感染に対し予防によって得られる耐性をもたない人の割合は $1-\alpha p'$ となり、この場合の再生産数 R' は(4)式で与えられる。

$$R' = (1 - \alpha p') R_0 \quad (4)$$

感染症流行の終息の条件は(再生産数) < 1 であるからそれは(5)式で与えられる。⁴⁾

$$R' = (1 - \alpha p') R_0 < 1$$

$$p' > \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{R_0}\right) \quad (5)$$

加えて、新型コロナウイルス感染症では回復してから再感染する可能性があることが分かっている。⁵⁾⁶⁾ただし、事例が少なく、再感染であるのか再陽性が確認されたのかの区別は一般になされておらず、また免疫のシステムも明らかではないためその具体的数値は不明瞭である。しかしながら、感染者が大きく増加しうる学校では考慮すべき事象だと考え、本研究では免疫の喪失に関係する研究を参考に再感染も反映することとした。したがって上記 R が一定確率で S となることを加えた SEIRS モデルもシミュレーションで用いる。SEIRS モデルのモデル方程式は(6)式のように与えられる(Figure.2)。 ξ は回復した人が免疫の消失のために感染する可能性のある状態になる割合である。 R_0 及び終息条件は(3)(4)(5)式と同様である。なお、 $\xi=0$ のとき、このモデルは SEIR モデルと同等である。

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t) + \xi R(t)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \varepsilon E(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \varepsilon E(t) - \gamma I(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) - \xi R(t) \quad (6)$$

これら微分方程式をコンピュータで解析するにあたっては、誤差が小さく最も一般的な 4 次 Runge-kutta 法を採用し、Excel の表計算を用いてシミュレーションを行った。

[2] 図等による可視化の方法

① セル・オートマトン法

セル・オートマトン法とは、格子状のセルを単純な規則に基づいて処理をするモデルである。このとき個々のセルは離散的な時間による変化を繰り返す。シミュレーションを通して学校内での感染拡大の可視化を試みた。

② 格子型モデル

本来連続的なモデルを一定間隔に切って近似化するモデルである。2次元格子世界を考え、その格子状に排他的に人を設置する(つまり、1個の格子上の点には1人しか入れない)。この格子は物理的な空間を示すものではなく、社会的位置を示すものと解釈する。このモデルでは一定確率のもとで離散的に発生する感染者からの流行を可視化した。

2. 結果

[1] パラメータの設定

文献調査から潜伏期間 $\varepsilon^{-1}=5$ 、発症期間 $\gamma^{-1}=14$ 、回復から再感染までの期間 $\xi^{-1}=90$ 、それぞれの接触ごとに感染が生じる確率 $p=0.02$ と設定した。また、 m の値(1日あたりの接触人数)を推定するため、秋田高校 1,2 年及び教員に接触人数について調査を行うこととした。 $\alpha=0.8$ と設定した。

[2] シミュレーション

(I-i) SEIR モデルによるシミュレーション

現在の秋田高校の状況に即し、最初の発症していない感染者集団 5 人が秋田高校の閉鎖人口内に発生したとし、 $N=900, S(0)=895, E(0)=5, I(0)=0, R(0)=0$ を初期条件に設定し、単位時間 150(日)でもってシミュレーションを行った。

(I-ii) SEIRS モデル

初期条件は(I-i)と同様に設定し、単位時間 300(日)でもってシミュレーションをおこなった。(6)式の解析により得られる各段階に属する人数の推移を Figure.6 に示す。E と I には(I-i)と同様の傾向がみられる。再感染の導入により S と R では数値の起伏がみられるが、のちに一定の値で推移していく(S は約 256 人、R は約 530 人)。長期的に感染が発生する状況が続くことが示される。

3. 考察

SEIR モデルによるシミュレーションの結果から、学校現場において 5 人の感染者集団の発生があるとき何の対策もなければ校内において急速に感染が拡大し、そのまま学校への出席を続けた場合およそ 97%が感染し、感染者の増加がみられなくなるには 5 か月を要し、これらの点から学校は感染症流行の温床となる可能性が高い。感染の抑え込みに成功するためにはこのような大きな人間の行動変容が必要となる。

4. 結論(課題)

[1]結論

COVID-19 の感染者が学校内に発生するとき、現在の秋田高校の状況では広範にわたる感染拡大と社会的な負の影響は免れられないことが数理モデルの利用により明らかに示せた。解析により得られる感染の抑え込みや流行の防止のために必要な対策の数値目標は、生徒教員らに大幅な行動の見直しを要請する。

[2]課題

一つの目的である、学校現場にあわせたシミュレーションを行って具体的数値目標を設定することはできたが、学校における様々の特有の事象に対応させることは困難であった。本研究では重症者死亡者の無視、接触人数などシミュレーションの根幹の部分のみを反映させた形になっている。例えば、今回調査で回答してもらった部活動の加入状況(Table.3)を研究に反映できなかった。学校での活動の大きな要素であり、そこにおける行動の状況は感染症の流布にも影響をもたらすとも考えられる。今回用いた格子型モデルは人の移動や空隙を設定できるものである。設定の方法を検討してより具体的なシチュエーションのモデル化を試みる予定である。さらには、SEIR モデルなど感染の状況を予測する数理モデルを用いて考察するだけでなく、統計資料から各パラメータを推定したり、人の配置を踏まえた解析をしたりして、より実際に即した形でシミュレーションを行いたい。

まだ確認されてから間もない COVID-19 による新型コロナウイルス感染症に関する研究は新しい情報の更新が続いており、本研究で用いた数値も今後見直される可能性が非常に大きい。特に、1回の接触で感染する確率や、回復から再感染までの期間については、憶測の域を出ない部分もある。最新の臨床研究や統計を注視しつつ数値の吟味をしていく必要がある。

5. 図表

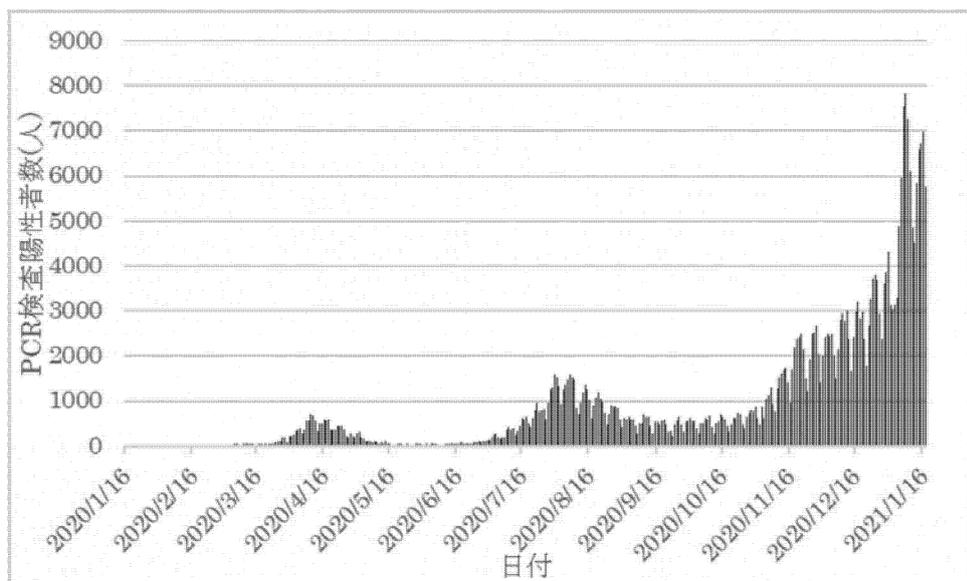


Figure.1 日本国内の PCR 検査陽性者数(単日)

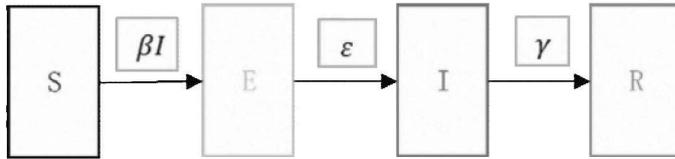


Figure.2 SEIR モデルでの区画の遷移のイメージ

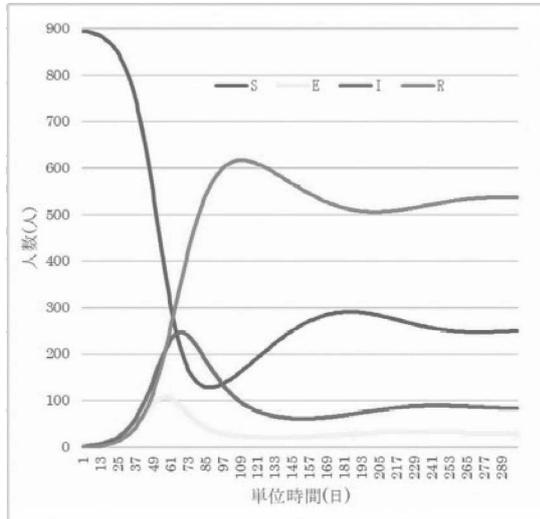


Figure.6 SEIRS モデルによる計算結果:S,E,I,R の推移

Table.1 新型コロナウイルス感染症による年齢階級別重症者割合(%)

全体	10歳未満	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代	80代以上
1.1	0	0	0.1	0.2	0.5	2.5	5.8	3.7	2.5

Table.2 新型コロナウイルス感染症による年齢階級別死亡者割合(%)

全体	10歳未満	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代	80代以上
3.1	0	0	0	0.1	0.3	0.8	4.1	12.5	25.4

Table.3 1日あたりの接触人数の調査の回答結果

回答計	1年	92
237	2年	138
	教員	7
	運動部(屋外で活動)	55
	運動部(屋内で活動)	54
	文化部	106
	所属なし	22
感染可能性のある	最小値	0
	最大値	800
接触人数	平均値(外れ値除く)	12.52340426

本論文は、つくば Science Edge に投稿された論文です。