COVID-19 の感染拡大に数理シミュレーションで挑む！

国立　岡山大学教育学部附属中学校　３年　佐野文音

1. 研究の動機と目的

今年新型コロナウイルス（COVID-19）感染が拡大したことで、新学期になっても中学校に行けなくなってしまった。毎日のように新規感染者数が公表されてその数に一喜一憂する日々が続いた。COVID-19 の感染拡大を防ぐために、マスク・手洗い・うがいをする、3 つの密を避けて外出しないなどを皆が実施したことで、6 月になって感染者数が減少して学校に行けるようになった。いつまでも感染が続くのではないかと不安に思っていたが、あっさり感染拡大が止まったのには大変驚いた。そして、再び訪れた感染の第二波も減り始めている（図１）。COVID-19 感染の拡大と収束があまりにきれいに起きるので自由研究のテーマとして研究することにした。感染の様子を小学校の時に習ったスクラッチで再現（シミュレーション）して条件（パラメータ）を変えることで、感染がどうなるのかを調べてみた。COVID-19 についてはまだ分からないことだらけだが、接触頻度と回復時間、免疫保有者の割合の感染拡大に対する影響を調べることで、感染を収束させるための糸口をつかむことを目指した。

図１. 2020 年の COVID-19 感染者数の推移、（陽性者数-退院者数-死亡者数）の積算
5/8 からデータソースが厚労省集計から各自治体の公表数に変更されている。

2. 研究の方法

ウイルス感染の様子を再現するスクラッチのプログラムを作る。
解析領域内（480x360 ピクセル）にヒトを表す円を、未感染者 Green、免疫保有者 Blue、感染者 Red の順でランダムに配置して一定速度 Speed1 で運動させる。円同士が接触するとランダム（120° から 240° ）に方向が変化する。Red と接触することで Green は Red に変化（感染）し、一定時間 Period 経過すると Blue になり（回復）、Blue は Red と接触しても Red にはならない（免疫獲得）。もちろん、Blue と Green が接触しても変化しない。また、Red は 1 つだけとし、この Red も一定時間経過後は回復する（図 2）。時間は Red の配置後の経過時間とする。

未感染者 Green → （Red と接触） → 感染者 Red → （Period 経過） → 免疫保有者 Blue

図 2. スクラッチによるウイルス感染の再現の手順

1）移動速度（ピクセル/秒）、2）未感染者 Green の数、3）免疫保有者 Blue の数、4）回復時間（秒）の 4 つのパラメータを用いて、未感染者 Green、免疫保有者 Blue、感染者 Red に対応する 3 つの Sprite のスクリプト（図 3-1、3-2）からなるプログラムを用いる。解析には iMac（3.06 GHz、Core2 Extreme、メモリ 4GB）で Scratch2 を用いる。プログラムを実行後、安定状態になるまでの時間と未感染者数などを比較する（図 4、5）。各実行は 10 回以上行い、平均をとる（データは最後にまとめて記載）。

図 3-1. 未感染者（Sprite1）のスクリプト

図 3-2. 左が感染者（Sprite2）のスクリプト、右が免疫保有者（Sprite3）のスクリプト

図 4. 未感染者（●）が 50 個、移動速度 4 での実験の一例
経過時間（T)、感染者数（R)、未感染者数（G)を右下に表示

図 5. 未感染者（●）が 25 個、免疫保有者（●）が 25 個、移動速度 4 での実験の一例
経過時間（T)、感染者数（R)、未感染者数（G)、免疫保有者（B)を右下に表示

3. 研究の結果と考察

【実験 1】移動速度を 1、2、4、8、未感染者数を 10、25、50、100 個、免疫保有者数を 0 個、回復時間は 200 秒として、感染完了までの時間を比較した。移動速度 1 の場合、10 個全てが感染するのにかかる時間は 172.8 秒かかったが、25 個では 118.5 秒、50 個では 76.1 秒、100 個では 73.2 秒となり、数が多い方が早く感染が進むという結果になった。そして、速度が速くなるに従って、全てが感染するのに要する時間は短くなった（図 6、表 1)。これは、数が増えて密度が増すことや速度が速くなることで、接触の頻度が増し、感染が早く進んだのだろう。やはり、密になり接触頻度が増すことは、感染リスクを増加させるようだ。ここで不思議だったのは、50 個と 100 個の違いがあまりに小さいことだ。これはどうも PC の処理速度が追いつかないために起きたようだった。

図 6. 実験 1 の結果：移動速度と非感染者数

表1. 実験 1 の結果

Green（個）	10	25	50	100
回復（秒）	200	200	200	200
移動速度= 1	172.8	118.5	76.1	73.2
移動速度= 2	102.6	63.5	38.7	34.5
移動速度= 4	55.8	31.8	19.2	18.7
移動速度= 8	29.6	16.6	9.5	12.8

【実験２】実験１の結果から、50 個以上になると処理速度が追いつかなくなるようなので、以降の実験は 50 個でやることにした。次に、移動速度と全てが感染するまでの時間との関係をよりくわしく調べてみた。移動速度を 0.5、1、1.5、2、4、6、8、12、16 と変化させた時の感染完了までの時間を調べた。移動速度が速くなるにしたがって、感染完了までの時間は、最初は急激に、後はなだらかに減少した（図 7）。プロットしてできたグラフが双曲線のような形をしていたので、双曲線のグラフに当てはめてみることにした。漸近線が y=0 とは少しずれているようなので、

移動速度 X（感染完了時間－5）……計算式１

の値を計算してみた（表 2）。平均は 67.2 で大きくずれてはいないようだった。つまり、感染完了時間は、移動速度に反比例しているようだった。移動速度を速くしても感染完了時間が 0 にならないのは、単に移動速度だけが関係しているのではなさそうだ。また、これらの結果から移動速度 4 が PC の処理速度への負担が少なそうだったので、以降の実験では移動速度 4 を用いることにする。

図 7. 非感染 50 個の感染完了までの時間

表2. 実験2の結果

Green(個)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
回復(秒)	200	200	200	200	200	200	200	200	200
移動速度	0.5	1	1.5	2	4	6	8	12	16
感染完了(秒)	125.8	72.3	47.9	40.8	23.8	16.4	11.6	11.0	9.6
計算式１	60.4	67.3	64.3	71.7	75.2	68.5	53.1	71.5	73.3

【実験３】免疫保有者 Blue の割合が感染完了までの時間にどのように影響するかを調べた。Green と Blue の合計は 50 個とし、移動速度は 4 に、回復時間は 200 秒に固定した。免疫保有者の割合が 50%までの間は感染完了時間は約 30 秒（1.5 倍）程度だが、50%を超えると急激に完了までに時間を要するようになった（図 8）。Blue の割合が 50%のときに Blue と Green は同じ数となり、66%だと Blue が 2 倍、80%だと 4 倍、90%だと 9 倍になる（表 3）。つまり、Blue 割合が 50%を超えたあたりから接触しても免疫保有者である場合がどんどん増えるために感染が起きにくくなり、結果として感染完了までの時間がかかるのだろう。

図 8. 免疫保有者の感染完了時間に対する影響

表3. 実験3の結果

Green（個）	50	45	40	35	33	25	17	15	10	5
Blue（個）	0	5	10	15	17	25	33	35	40	45
Blue率（%）	0	10	20	30	34	50	66	70	80	90
B/G 比	0	0.11	0.25	0.43	0.52	1	1.94	2.33	4	9
回復（秒）	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
移動速度	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
感染完了（秒）	19.1	21.2	21.6	27.9	28.8	32.4	39.7	41.9	52.2	76.0

【実験 4】実験 3 の条件のうち回復時間のみを 10 秒に変更して実験を行った。これまでの実験では回復時間を 200 秒と感染完了時間よりも長く設定していたので、未感染者は最後には感染して全て Red になって終わっていた（図 4）。実験 4 では、回復時間を 10 秒と感染完了する時間の半分に設定したので、感染が拡大していく途中で感染から回復し免疫を獲得した免疫保有者 Blue になる者が現れ始め、最後は全てが Blue または Green になって終わった（図 5、感染収束）。また、免疫保有者 Blue の割合（免疫保有率）が増えるにつれて未感染のまま終了する個数が増えた。特に免疫保有率 40%の 2.3 個を境に急激に増え、70%の 9.1 個をピークに減り始める（表 4）。これは、免疫保有率が 80%と 90%の場合、もともと最初の未感染 Green の数が 10 個と 5 個であり（表 4）、それ以上になることはないからである（図 9 左の■）。そのため、未感染のままの割合をみると、免疫保有率の増加に伴って右肩上がりに上昇し、免疫保有率が 90%の割合では未感染 Green の 88%が未感染のままであった（図 9 左の▲）。一方、感染収束までの時間は未感染だけの場合には 28.5 秒だった（図 9 右の●）。回復時間が 200 秒のとき同じ未感染だけでは 19.1 秒であるが（表 3）、これは感染完了までの時間であり、両者の間には回復に要する時間である 10 秒の差がちょうどある。感染収束時間は免疫保有率が増加するにつれて長くなり、50~60%をピークに減少し始め、90%では 12.6 秒と 0%の場合の半分以下になる（表 4）。これは、実験 3 の結果のように 50%までは免疫保有者 Blue による感染拡大に対する遅延効果が現れ、50%以上では感染の連鎖を断ち切る効果が現れているのではないのだろうか。

図 9. 回復時間 10 秒の場合の未感染の数と割合（左）、および感染収束までの時間（右）

表4. 実験4の結果

Green（個）	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Blue（個）	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Blue率（%）	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B/G 比	0	0.11	0.25	0.43	0.67	1	1.5	2.33	4	9
回復（秒）	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
移動速度	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
感染収束（秒）	28.5	29.3	32.1	33.3	37.1	41.2	41.4	28.0	17.4	12.6
Green残（個）	0.5	1.0	0.8	2.1	2.3	4.4	6.6	9.1	8.2	4.4
Green残（%）	1.0	2.2	2.0	6.0	7.7	18	33	60	82	88

4. まとめ

・実験１から、数が多い方が早く全てが感染（感染終了）してしまうことが分かった。
・実験２から、感染終了までの時間は移動速度に反比例することが分かった。
・実験３から、免疫保有率の増加に伴い感染拡大が遅延することが分かった。
・実験４から、免疫保有率が 50%より低いと感染の遅延が起こり、50%より高いと感染の連鎖が断ち切られることが分かった。

5. 感想

今回のプログラムでは接触回数や感染のタイミングを記録することをしなかったので、起きている現象の原因がはっきり分からなかった。また、夏休みが短かったので、これ以上に条件を変えて実験することができなかった。今後時間ができたら、もっと条件を変えて実験をしたい。

この研究で、数学を利用し社会の問題を解決することに取り組んで、いろいろなことが分かったのですごく楽しかった。最初のプログラムは長い春休みの間に作れていたが、実際に実験自体をするまとまった時間が取れなくて小学生の弟に実験を手伝ってもらいなんとか間に合わせることができた。頑張ってくれた弟、実験などの助言を与えてくれた家族に感謝する。

6. 参考文献

・厚生労働省　「新型コロナウイルス感染症について」　オープンデータ
https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/open-data.html（2020.9.1 ダウンロード）
・杉浦学 著「SCRATCH ではじめよう！プログラミング入門 ゲームを作りながら楽しく学ぼう」日経 BP 社
・松下孝太郎 著「親子でかんたんスクラッチプログラミングの図鑑」　技術評論社

7. データ

・実験１のデータ
・実験２のデータ
・実験３のデータ
・実験４のデータ

実験１のデータ

Green（個）	10	25	50	100	10	25	50	100	10	25	50	100	10	25	50	100
回復（秒）	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
移動速度	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	8	8	8	8
1	159.0	116.0	82.6	74.7	97.7	46.8	46.1	41.7	43.1	30.1	21.9	16.2	27.7	16.7	8.0	17.1
2	140.0	168.0	56.2	81.8	103.0	72.8	25.4	38.3	61.2	50.5	16.8	18.3	59.7	16.7	8.6	11.6
3	173.0	83.2	98.1	50.6	38.5	56.1	41.8	21.2	64.5	27.3	18.7	17.2	30.1	10.6	8.6	15.0
4	155.0	94.9	77.9	81.0	89.7	93.4	35.4	22.8	39.6	50.1	25.3	20.2	37.4	19.5	9.0	9.6
5	314.0	117.0	54.6	53.5	65.1	109.0	35.1	28.4	36.6	42.4	19.9	18.7	16.5	15.2	11.3	14.0
6	95.7	80.8	90.4	76.9	114.0	40.0	41.1	31.1	53.8	23.4	15.8	19.1	25.7	13.3	11.7	13.5
7	174.0	117.0	68.6	61.0	57.5	75.2	51.0	44.6	47.3	20.9	13.6	19.9	19.3	11.2	12.2	7.9
8	198.0	96.6	72.8	64.1	127.0	60.5	29.0	27.6	34.1	15.9	14.6	20.1	30.6	10.0	7.8	14.3
9	178.5	123.0	124.0	58.4	81.7	48.9	38.1	30.9	67.8	38.7	17.8	30.3	29.8	20.6	7.6	13.4
10	141.2	162.0	83.2	71.9	64.0	88.2	34.0	31.3	70.3	40.1	29.6	13.8	16.1	19.7	9.2	12.5
11		113.0	86.0	83.6	133.0	73.9	34.9	34.3	47.7	43.4	19.3	19.7	29.8	14.6	6.7	13.4
12		85.6	66.1	87.1	50.9	79.7	33.0	35.5	56.6	42.2	23.0	18.5	22.7	21.2	8.0	17.3
13		93.2	80.8	62.0	307.0	37.7	30.4	33.1	71.5	25.9	14.1	17.4	30.4	12.8	10.7	11.5
14		144.0	51.0	76.5	100.0	71.1	36.1	41.0	28.0	24.1	15.8	18.7	45.9	11.6	14.2	14.9
15		113.0	43.8	85.6	198.0	42.4	42.8	30.6	64.2	30.5	19.8	18.6	21.4	15.4	12.1	13.4
16		166.0	87.6	75.9	62.1	38.8	34.6	50.3	93.6	27.9	18.1	22.7	24.9	23.8	7.8	10.1
17		98.4	65.3	70.9	71.5	66.9	45.3	37.7	68.1	27.5	19.7	15.4	42.2	22.1	7.6	12.5
18		162.0	71.7	98.5	86.7	66.3	32.6	45.1	21.9	23.9	17.9	17.1	43.4	20.7	8.2	10.5
19			77.6	60.9		46.5	45.4	30.4	61.8	27.2	19.7	14.1	15.1	16.4	8.8	12.9
20			84.3	88.8		55.6	61.2	34.4	84.5	23.7	22.6	18.0	23.9	19.0	12.3	10.9
平均	172.8	118.5	76.1	73.2	102.6	63.5	38.7	34.5	55.8	31.8	19.2	18.7	29.6	16.6	9.5	12.8
	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒

実験２のデータ

Green（個）	50	50	50	50	50	50	50	50	50
回復（秒）	200	200	200	200	200	200	200	200	200
移動速度	0.5	1	1.5	2	4	6	8	12	16
1	147.9	64.9	44.0	39.0	17.9	13.9	12.4	9.3	8.4
2	120.6	75.5	51.9	47.8	34.1	18.9	14.1	9.2	8.6
3	155.1	98.9	43.7	35.9	19.3	18.9	10.3	8.5	11.0
4	105.1	68.4	55.4	43.3	20.7	15.6	9.6	11.1	14.9
5	173.0	73.6	45.6	41.2	27.1	18.2	10.1	12.4	8.0
6	106.2	92.2	47.7	28.6	17.5	19.1	10.4	13.0	7.1
7	123.4	72.4	42.0	33.2	27.2	14.0	13.0	14.8	9.4
8	109.6	58.9	46.9	54.4	26.9	14.8	10.4	12.4	12.4
9	111.5	63.1	54.9	42.7	24.4	17.0	11.3	10.5	9.9
10	105.6	54.9	46.5	42.3	22.8	13.9	14.7	8.4	6.0
平均	125.8 秒	72.3 秒	47.9 秒	40.8 秒	23.8 秒	16.4 秒	11.6 秒	11.0 秒	9.6 秒

実験３のデータ

Green（個）	50	45	40	35	33	25	17	15	10	5
Blue（個）	0	5	10	15	17	25	33	35	40	45
Blue率（%）	0	10	20	30	34	50	66	70	80	90
B/G 比	0	0.11	0.25	0.43	0.52	1	1.94	2.33	4	9
回復（秒）	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
移動速度	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	17.1	22.6	14.9	29.8	31.1	35.0	34.0	26.8	37.6	40.9
2	18.3	23.2	18.3	24.6	20.0	38.6	28.6	38.5	70.1	98.3
3	18.6	21.3	28.8	25.2	21.5	27.1	48.9	59.7	46.5	60.1
4	21.1	32.9	19.5	22.3	41.2	35.2	47.8	50.8	70.7	68.1
5	16.4	18.6	21.1	18.4	29.3	26.5	36.6	33.3	39.4	109.2
6	24.6	13.6	20.8	34.7	30.6	31.7	28.4	56.6	62.2	119.2
7	13.6	16.1	20.5	23.6	23.2	29.1	36.5	20.3	48.5	86.5
8	17.8	20.9	25.8	38.5	26.3	29.2	33.2	47.0	65.1	74.1
9	21.3	25.4	33.3	27.9	29.5	24.3	27.0	54.4	32.6	35.4
10	21.8	17.2	12.5	33.5	35.7	47.3	75.9	32.0	49.4	68.3
平均	19.1 秒	21.2 秒	21.6 秒	27.9 秒	28.8 秒	32.4 秒	39.7 秒	41.9 秒	52.2 秒	76.0 秒

実験４のデータ

Green（個）	50	45	40	35	30	25	20	15	→	10	5
Blue（個）	0	5	10	15	20	25	30	35	→	40	45
Blue率（%）	0	10	20	30	40	50	60	70	→	80	90
B/G 比	0	0.11	0.25	0.43	0.52	1	1.94	2.33	→	4	9
回復（秒）	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
移動速度	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	28.9	28.9	32.5	38.1	31.5	35.1	53.4	26.9	44.9	18.9	10.0
2	29.8	24.4	22.2	29.6	32.6	42.0	52.9	30.3	38.1	10.0	10.0
3	24.8	28.1	41.8	31.1	48.0	35.1	36.1	27.4	16.5	22.7	10.0
4	26.2	24.7	34.8	42.3	34.0	55.3	34.7	19.1	32.0	10.0	31.9
5	31.8	26.8	26.3	34.2	57.2	58.9	48.7	44.9	30.8	10.0	13.9
6	36.0	28.8	32.3	26.6	34.1	42.6	47.6	10.0	44.1	14.3	10.0
7	23.7	32.0	32.8	31.4	24.7	39.0	28.9	30.4	10.0	36.4	10.0
8	28.0	33.0	30.5	35.3	44.3	40.9	44.1	25.9	10.0	10.0	10.0
9	26.0	31.6	34.3	34.9	35.9	31.0	28.9	22.1	18.2	21.0	10.0
10	30.0	34.7	33.9	29.1	28.3	31.7	38.2	27.8	50.3	20.9	10.1
平均	28.5	29.3	32.1	33.3	37.1	41.2	41.4	28.0		17.4	12.6
	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒		秒	秒
1	2	1	0	2	1	6	4	6	5	8	5
2	0	0	1	2	1	4	5	6	6	10	5
3	0	1	1	3	6	8	5	11	14	6	5
4	0	0	1	2	2	4	9	14	7	10	2
5	0	2	1	3	3	4	2	9	10	10	3
6	1	1	0	3	2	3	4	15	5	9	5
7	1	3	2	0	0	3	14	8	15	3	5
8	0	0	0	1	3	3	11	7	15	10	5
9	1	1	2	4	2	2	7	8	14	8	5
10	0	1	0	1	3	7	5	2	4	8	4
平均	0.5	1.0	0.8	2.1	2.3	4.4	6.6	9.1		8.2	4.4
	個	個	個	個	個	個	個	個		個	個
	1%	2%	2%	6%	8%	18%	33%	60%		82%	88%