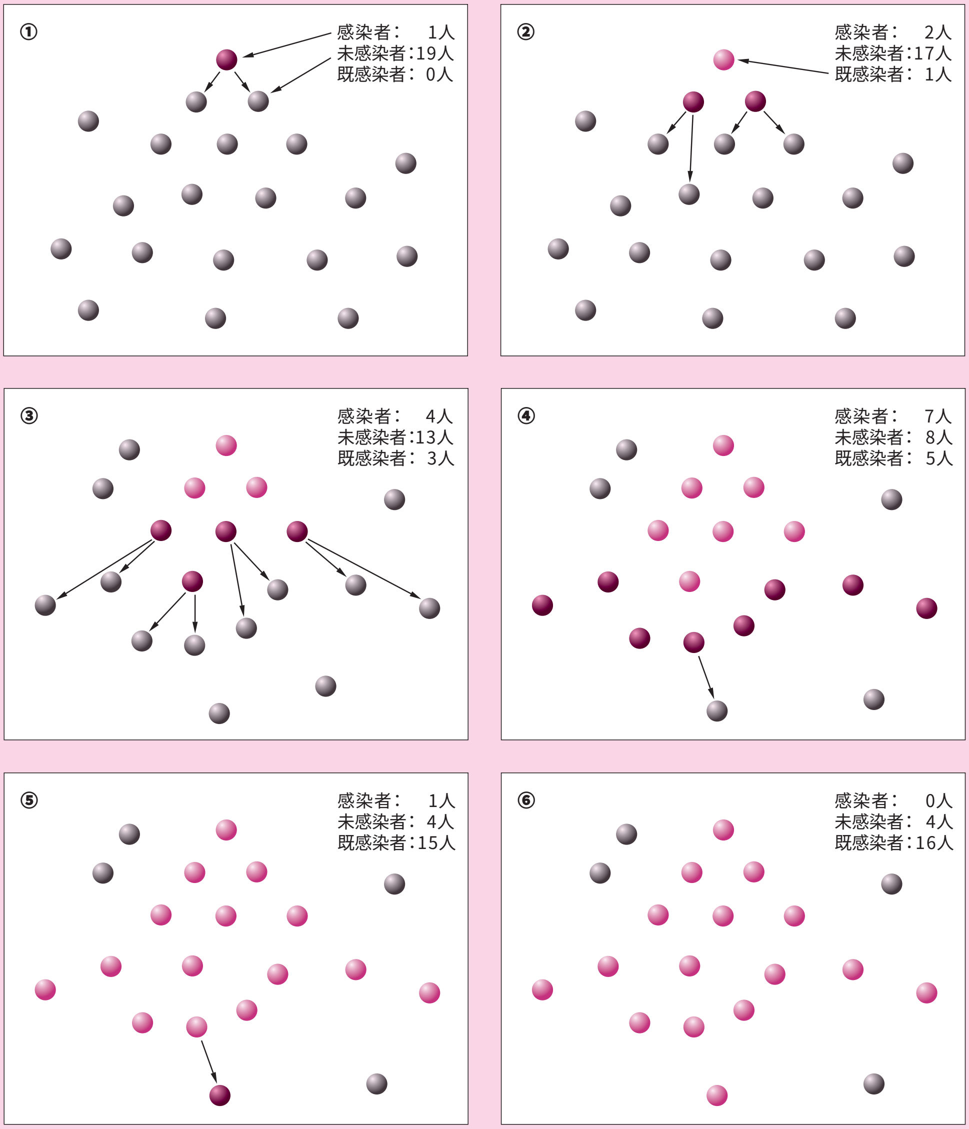
Epidemic

感染症の感染モデル

20人のクラスの中で1人が感染者となりました。1人が2人に感染させる力があるとすると，（図1-40）のように次々と感染者が増えていきます。しかし，やがて未感染者の数が減るに従って，あるいは既感染者が増えることによって，感染者の数は減少に向かいます。最終的に未感染者を残して感染流行は終息します。

ここに人の出入りのない，すなわち出生，死

図1-40　間接予防効果（herd immunity）



亡がなく，引越しもない1,000人（N）がいたとします。そこに新興感染症である重症急性呼吸器症候群〈SARS〉をもった人が侵入しました。この1,000人は全員その感染症に対して未感染であり，感染する可能性があります（S）。SARSのような典型的な流行性の感染症では，強い伝染性，短い潜伏期間（E），一方，伝染期間は比較的短く（I），感染後免疫状態（R）となります。モデルを簡単にするために潜伏期間（latent period；E）なし，伝染しうる期間（I）は症状を呈している期間に一致し（D＝1 週），1回の接触で平均0.00015（β）の確率で感染し，1人が1週間に他人と12回（κ）のコンタクトがあると仮定します。

最初の公式（時間当たりの未感染者数の減少 $dS/dt=\beta\times\kappa\times S\times I$）はSがどんどん減っていくことを意味します。S×I は何を意味しますか？

人々が接触する際，以下の6通りのパターンがあります（未感染者（S），感染者（I），既感染者（R）とします）。

① S vs. S，② S vs. I，③ S vs. R，
④ I vs. I，⑤ I vs. R，⑥ R vs. R

明らかに感染症は②S vs. Iの場合においてのみ感染します。すなわちSとI両方が多いと感染症は速いスピードで広がり，どちらか，あるいは両方が少ないとゆっくり広がる（あるいは消滅する）ことになります。

例えばSが1,000人でありIが1人であったとしますと，

1週間あたりの未感染者の変化 $dS/dt=\beta\times\kappa\times S\times I=0.00015\times 12\times 1000\times 1=1.8$

1週間あたりの感染者の変化 $dI/dt=\beta\times\kappa\times S\times I-I/D=1.8-1/1=0.8$

1週間あたりの既感染者の変化 $dR/dt=I/D=1/1=1$

すなわち最初の1週間で1.8人の感染者（I）が発生し，最初侵入した感染者は1週間の病期を経て既感染者となるのでRは1となります。これを続けてEXCELなどでコンピューターに計算させますと，図1-41のグラフとなります。

R_0：basic reproductive numberとは，1人が何人に感染させるかでした。この場合，最初の1人は1.8人に感染させていますから，R_0は1.8です。「感染症の伝播力」で述べたとおり，R_0が1より大きい場合で流行します。この例では10週目で感染者人数のピークを迎えます。その後，流行は終息に向かい，およそ20週目で感染者人数は0になります。

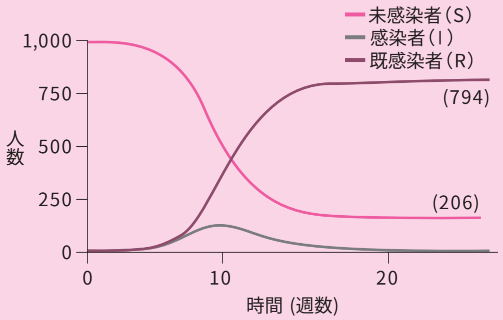
先の計算を行うと，結局全員が罹患することなく，約200人が感染症にかからずにすみました。最後に残った200人は800人の免疫獲得者によって感染患者からブロックされた形となります（未感染者の減少と既感染者が増加するため，感染者と未感染者の接触する機会が減る）。決して病原性が弱まるからではありません。これをherd immunityとよびます。ワクチンを導入すれば，未感染者（S）が減りますし，インフルエンザの場合，抗ウイルス薬を使用すれば感染期間（D）が短くなります。

●都市部と農村部における感染症拡大

先の例では1,000人の集団にSARS感染者が侵入した場合を想定しました。今度は，10,000人の都市部と100人の農村部に感染者が侵入した場合についてはどうでしょうか（図1-42）。未感染者が多い都市部では急速に感染は拡大し，ほとんどの人が感染してしまいました。しかし，100人の農村部では感染は拡大していません。

このように，都市化や国際化が進んだ現代，新興感染症は急速に拡大する可能性があります。

図 1-41　未感染者 1,000 人における流行経時変化



=0.00015*12*B2*C2-C2/1

=0.00015*12*B2*C2

=C2/1

week	S	I	R	dS/dt	dI/dt	dR/dt
1	1000	1	0	1.8	0.8	1
=B2-E2 2	998.2	1.8	1	3.234168	1.434168	1.8
3	994.9658	3.234168	2.8	5.792196	2.558028	3.234168
4	989.1736	5.792196	6.034168	10.31308	4.520882	5.792196
5	978.8606	10.31308	11.82636	18.17112	7.858039	10.31308
6	960.6894	18.17112	22.13944	31.42224	13.25112	18.17112
7	929.2672	31.42224	40.31056	52.55938	21.13714	31.42224

=C2+F2

=D2+G2

	A	B	C	D	E	F	G
1	week	S	I	R	dS/dt	dI/dt	dR/dt
2	1	1000	1	0	1.8	0.8	1
3	2	998.2	1.8	1	3.234168	1.434168	1.8
4	3	994.9658	3.234168	2.8	5.792196	2.558028	3.234168
5	4	989.1736	5.792196	6.034168	10.31308	4.520882	5.792196
6	5	978.8606	10.31308	11.82636	18.17112	7.858039	10.31308
7	6	960.6894	18.17112	22.13944	31.42224	13.25112	18.17112
8	7	929.2672	31.42224	40.31056	52.55938	21.13714	31.42224
9	8	876.7078	52.55938	71.7328	82.9426	30.38322	52.55938
10	9	793.7652	82.9426	124.2922	118.5085	35.56381	82.9426
11	10	675.2567	118.5085	207.2348	144.0406	25.53409	118.5085
12	11	531.2161	144.0406	325.7413	137.7306	−6.31004	144.0406
13	12	393.4876	137.7306	469.7819	97.55147	−40.1791	137.7306
14	13	295.9361	97.55147	607.5124	51.9642	−45.5873	97.55147
15	14	243.9719	51.9642	705.0639	22.82005	−29.1442	51.9642
16	15	221.1518	22.82005	757.0281	9.094052	−13.726	22.82005
17	16	212.0578	9.094052	779.8482	3.467583	−5.61847	9.094052
18	17	208.6002	3.467583	788.9322	1.302009	−2.16557	3.467583
19	18	207.2982	1.302009	792.3998	0.485828	−0.81618	1.302009
20	19	206.8124	0.485828	793.7018	0.180855	−0.30497	0.485828
21	20	206.6315	0.180855	794.1876	0.067267	−0.11359	0.180855

●感染症の流行の変動

感染症についてもう少し長いレンジでモデルを構築してみましょう。常に新生児が生まれ，高齢者が死んでいく状態を想像してみてください。新生児が生まれるので，数年すると未感染者集団（S）が増えます。そして感染症の特性に従って，一定の期間の後に感染症が流行します。もちろん，インフルエンザのように抗原の変化がカギとなることもありますが，少なくともこのようなモデルでワニングを再現できます（図1-43）。つまり，その地域で安定した感染症となり，大流行をみなくなります。

さらに，このモデルに季節性（サインの要素）を加えると，数年ごとに流行する感染症を再現できました（図1-44）。マイコプラズマ肺炎などは秋から冬にかけ，オリンピックの年（4年ごと）に流行しやすいといわれています。このようなパターンが発生する理由を数理モデルで説明できるのです。

これに対して，ワクチン導入を仮定してモデルを再構築してみました。ワクチン接種率をいろいろ変えてみたところ，87%とした時に感染症の流行をほぼなくすことができそうです（図1-45）。

図 1-42　未感染者 10,000 人（都市部）と 100 人（村）における流行経時変化

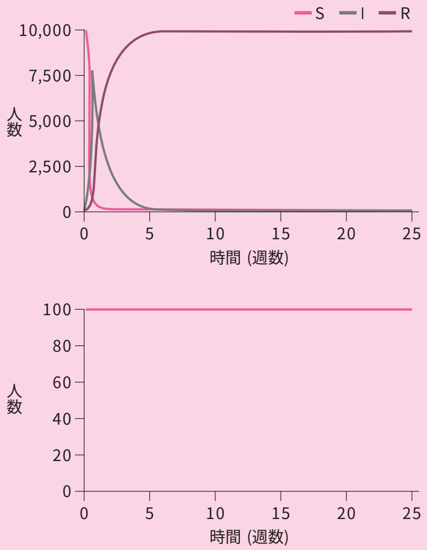


図 1-43　100 万人の出生死亡を加味した集団における流行経時変化

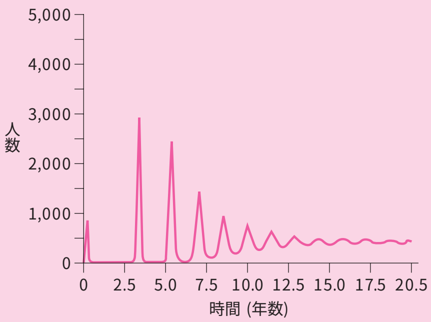


図 1-44　前図の条件に季節性を加味した場合の流行経時変化

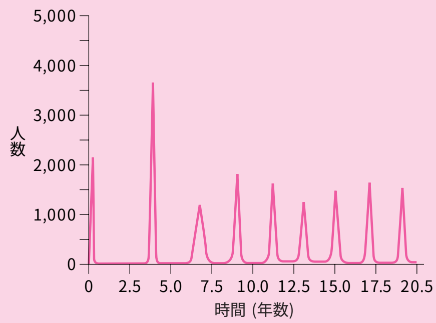


図 1-45　ワクチン導入（87%）をした場合の流行経時変化