

呼吸器感染症に対する効果的なマスクの使用に関する検討

Mathematical model for the respiratory infections and effective of medical mask

白川康一^{1)*}・梅岡 航²⁾・国貞宗久³⁾・末吉真人⁴⁾

¹⁾京都大学大学院医学研究科医学専攻病原細菌学

²⁾静岡大学工学部システム工学専攻 ³⁾広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻

⁴⁾大阪大学工学部応用自然科学科応用生物専攻

It is said to be effective in preventing cold and flu by wearing mask.

The virus spread into the air through coughing or sneezing, to invade the nasal mucosa and trachea through breathing in humans.

Now, if you wear a mask to prevent infection can spread the virus into the air by coughing or sneezing. Also, the susceptibility is expected to suppress the invasion of respiratory pathogens.

In this study, refer to the traditional model of SIRS, we have constructed a mathematical model. Effective in preventing the spread of the virus and whether the wearing of masks in the results of the model by further analysis, we examined the effect of masking epidemiological theory for the propagation of the virus in contact with the wearer not wearing a mask.

1. 緒言

1918年にサンフランシスコにおいて街頭や公共の場、集会や2人以上が集まる場所、食品や衣料品を扱う人などで、食事するとき以外マスクで口と鼻を覆うことが条例(罰金、懲役刑を伴う)によって決められた。この条例の解除によって当時流行したインフルエンザが再流行したという経緯がある。一般に呼吸器感染症の原因となるウイルスは、咳やくしゃみを通じて空中へと拡散する。インフルエンザでは、唾液とともに拡散したウイルスが空中を浮遊し、ヒトが呼吸を通じて気管や鼻粘膜に取り込むことで感染へと繋がるということが知られている。ここで、マスクを着用することで、感染者は咳やくしゃみなどによって空中へのウイルスの拡散を、患者の周囲にいる人(感受者)は、気道の保湿性を維持することでウイルスが呼吸器への侵入を抑制し、感染確率の低下が期待できたため、感冒やインフルエンザなどの流行性呼吸器感染症の感染抑制や伝播の軽減には、マスクの着用が奨励されている。

マスクには、綿や化学繊維を材料にしたものが使用されるが、最近では不織布を使用した製品が多く見られるようになった。不織布を使用したマスクの場合、綿布のマスクに比べて繊維の間隙が極めて小さいため、拡散したウイルスを侵入させにくいという利点がある。米国食品衛生局(Food and Drug Administration)ではサージカルマスクを"General and Plastic Surgery Devices"と定め、サージカルマスク基準をBFE95%以上と規定している(CFR 878.4040, Surgical Apparel, June 24, 1988)。多くの医療用マスクでは、BFE>99%、PFE>95%であり、比較的性能が高いものが使用されている^{注1)}。

* Corresponding author. k.shirakawa@mb.med.kyoto-u.ac.jp

注1 BFE（細菌ろ過効率）：ブドウ球菌を含む粒子（平均粒子径 $4.0\sim 5.0\mu\text{m}$ ）が除去された割合（%）で、95%以上の性能が求められる。PFE（微粒子ろ過効率）：試験粒子（ $0.1\mu\text{m}$ のポリスチレン製ラテックス球形粒子）が除去された割合（%）数値が高いと性能が高いことを示す。

マスクの着用による感染抑制効果を評価する場合、マスクを着用した感受者とマスクを着用していない感受者間における症例・対照研究を行う必要がある。症例・対照研究では、薬剤の効果や特定の疾患の発生に関与する要因を扱う研究で、マスクの効果を調べるには、マスクを着用した集団での発症割合と着用していない集団での発症割合を比較する必要がある。

この点について、Kermack-Mckendrick型の感染症数理モデルを使用し、個体間の接触や感染割合の変動、感染症の拡大を数学的に表現することで、マスクの使用効果を定量的に捉えることができる。さらに、流行性の呼吸器感染症が流行する季節において、感染者の増加を抑制することが期待でき、公衆衛生学上の対策に有用であると考えられる。

マスクの効果に関する研究は、関西医科大学の研究グループでインフルエンザの発症抑制効果を扱ったもの（2007）がある。この研究では、マスクを使用することでインフルエンザの発症がどの程度軽減したかをということをもマスクの効果指標として示している。

本研究では、SIRSモデルを基本とし、マスクの着用の有無におけるウイルスの拡散防止効果や、マスク着用集団と未着用集団の接触における感冒やインフルエンザなどの呼吸器感染症の発生割合や原因となるウイルスの伝播に対するマスクの効果について疫学的手法を加えながら、マスクの効果を検討した。

2. 数理モデルの構築

2.1 マスクの作用について

本研究では、図1で示したように単純にウイルスの伝播を低下させる割合を考慮した。また、感染症の原因となるウイルスは、マスクの周囲から漏出して感受者の呼吸器への侵入や、感染者が排出したウイルスがマスクを通過後、空中で増加することや、空中に拡散したウイルスが新たに加わることは考慮していない。

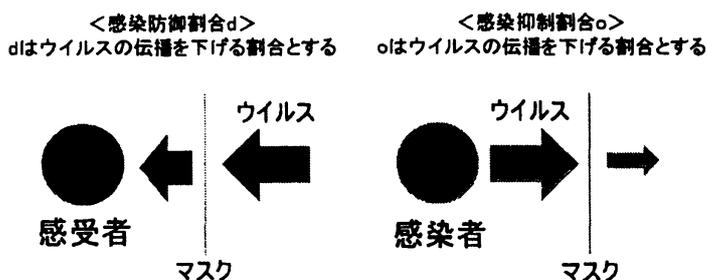


図1

2.2 SIRS モデル

既存の SIRS モデルを参照して、マスクを着用した感受者、マスクを着用していない感受者、マスクを着用して感染した者、マスクを着用しないで感染した者、回復者の関係を図2に示した。

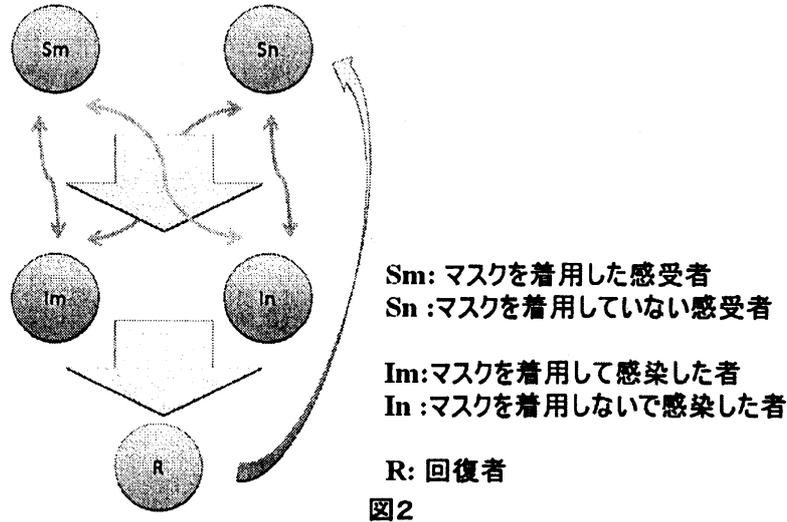


図2で示された各集団の動態変化を微分方程式で示すと、

$$S(t) = S_n + S_m \quad I(t) = I_n + I_m$$

$$S_n = (1 - w)S(t) \quad I_n = (1 - w)I(t)$$

$$S_m = wS(t) \quad I_m = wI(t)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = -aS_n(t)I_n(t) - aoS_n(t)I_m(t) - adS_m(t)I_n(t) - adoS_m(t)I_m(t) + cR(t),$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = aS_n(t)I_n(t) + aoS_n(t)I_m(t) + adS_m(t)I_n(t) + adoS_m(t)I_m(t) - bR(t),$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = bI(t) - cR(t).$$

a: Iからの感染率	b: I→R 回復率・治癒率
c: R→S 免疫消失率	w: マスク着用割合
o: マスクからの病原体浸透率	d: マスクの防御率

2.3 モデルの破綻と修正 1

図2のモデルにおいては、呼吸器感染症が流行している状況下でマスクを着用している状態から、一定の時間が経過するとマスクを着用していない集団へと移行するといった、通常は考えられない遷移状態が生じた。この原因として、マスクの着用割合を S に対してあてはめたことが考えられる。そこで図2のモデルを次の図3のように変更した。

図3のモデルでは、 S_n から S_m に移行する割合を w_1 、 I_n から I_m に移行する割合 w_2 とした。すなわち、マスクを着用している割合を集団 S に対しておくのではなく、マスクを着用していない人 S_n から着用する人 S_m への移行の割合とした。さらに図3で示された各集団の動態変化を微分方程式で示した。

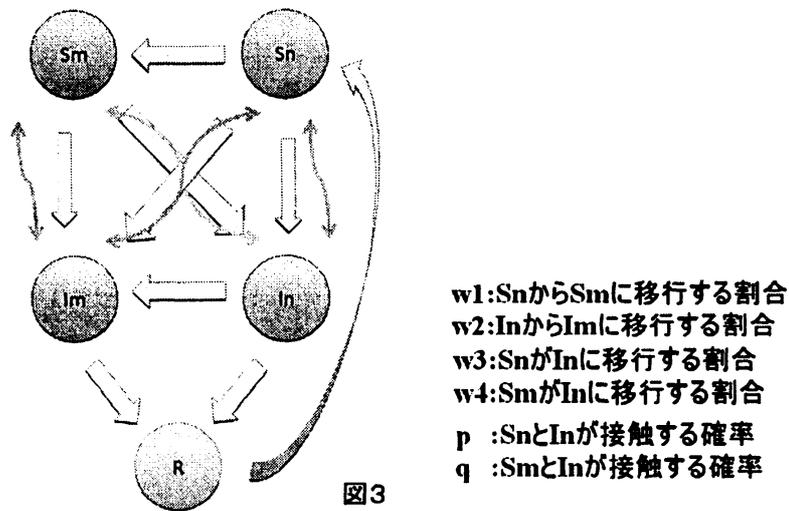


図3

$$\frac{dS_n(t)}{dt} = -a_0(1-p)(1-w_3)S_n(t)I_m(t) - apw_3S_n(t)I_n(t) - w_1S_n(t) + cR(t),$$

$$\frac{dS_m(t)}{dt} = -ado(1-q)S_m(t)I_m(t) - adqS_m(t)I_n(t) + w_1S_n(t),$$

$$\frac{dI_n(t)}{dt} = apw_3S_n(t)I_n(t) + adqw_4S_m(t)I_n(t) - b_2I_n(t) - w_2I_n(t),$$

$$\frac{dI_m(t)}{dt} = a_0(1-p)(1-w_3)S_n(t)I_m(t) + ado(1-q)(1-w_4)S_m(t)I_m(t) - b_1I_m(t) + w_2I_n(t),$$

$$\frac{dI_n(t)}{dt} = apw_3S_n(t)I_n(t) + adqw_4S_m(t)I_n(t) - b_2I_n(t) - w_2I_n(t).$$

2.4 モデルの破綻と修正 2

図3で示したモデルにおいて、再度問題点が生じた。感受者がマスクを着用し、 S_m の個体集団へと移行して、さらに感冒やインフルエンザなどに罹患して特定の症状が見られる場合、この集団では一度着用したマスクを外し、感染の割合を高めるような行動は示さないと考える。このため、モデルを図4の状態から図5へと変更した。

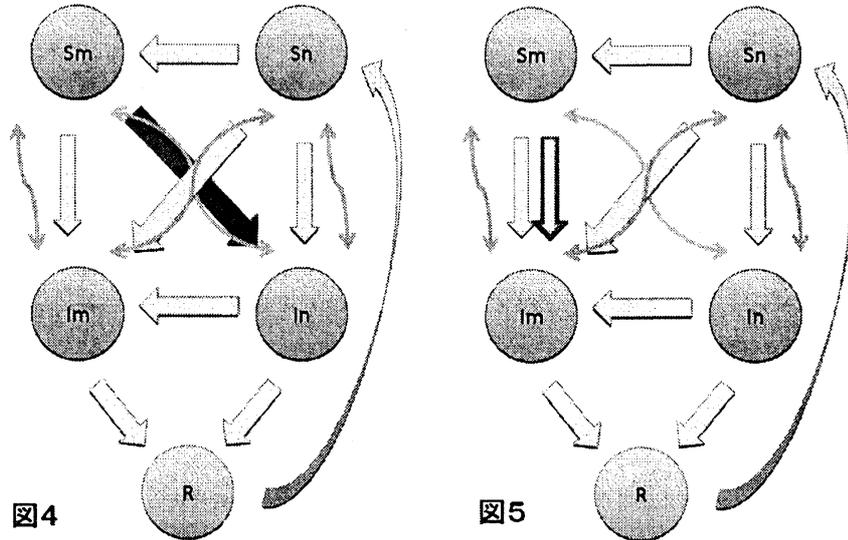


図5で示された各集団の動態変化を微分方程式で示した。

$$\begin{aligned} \frac{dS_n(t)}{dt} &= -a_0(1-p)(1-w_3)S_n(t)I_m(t) - apw_3S_n(t)I_n(t) - w_1S_n(t) + cR(t), \\ \frac{dS_m(t)}{dt} &= -a_0(1-q)S_m(t)I_m(t) - adqS_m(t)I_n(t) + w_1S_n(t), \\ \frac{dI_n(t)}{dt} &= apw_3S_n(t)I_n(t) - b_2I_n(t) - w_2I_n(t), \\ \frac{dI_m(t)}{dt} &= a_0(1-p)(1-w_3)S_n(t)I_m(t) + a_0(1-q)S_m(t)I_m(t) \\ &\quad + adqS_m(t)I_n(t) - b_1I_m(t) + w_2I_n(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} &= b_1I_m(t) + b_2I_n(t) - cR(t). \end{aligned}$$

3. 解析部

図5で示したモデルを使用してマスクの効果に対する解析を行った。モデルから導入された微分方程式中の各パラメータは確率もしくは割合を示しており、式への代入はランダムに抽出した値を使用した。

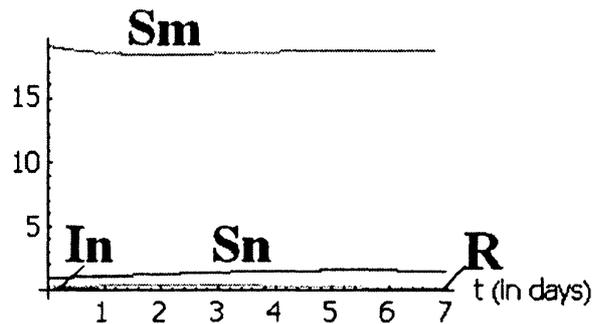


図6

図6. $N=20$ 、 I からの感染率 $=0.45$ 、回復率 $=0.45$ 、免疫消失率 $=0.7$ 、マスクのウイルス浸透率 $=0.01$ 、防御率 $=0.7$ 、 S_n から S_m への移行割合 $=0.5$ 、 I_n から I_m への移行割合 $=0.9$ 、 S_m から I_n へ移行する割合 $=0.1$ 、 S_n と I_n が出会う確率 $=0.8$ 、 S_m と I_m が出会う確率 $=0.8$ 、観察経過の日数は、インフルエンザの感染・発症から回復までに要する7日間とした。

図6で示した解析の結果では、マスクを着用したが感染した個体が出現しなかった。しかし、7日間マスクを着用した個体と着用していない個体が連続して接触することは考えにくいいため、時間の設定を短縮したもので解析を行った。

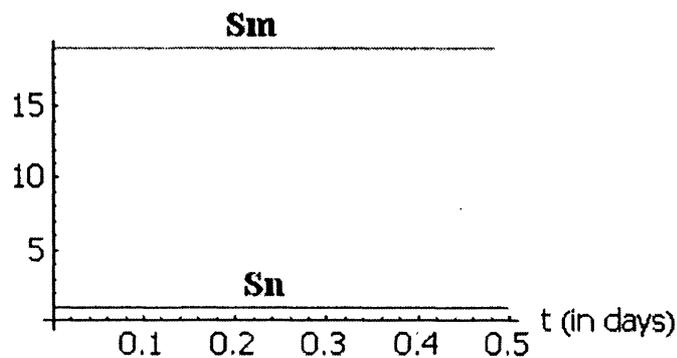


図7

図7 図6で示した解析結果のうち、日数を0.5日（12時間）とした。

マスクを着用している個体と着用していない個体、感染者の接触はごく限定された時間内で行われるが、短時間のうちではマスクの効果の有無がわからなくなるという結果が得られた。図6で示した解析に使用したパラメータをさらに変化させた結果を図8～図11に示した。

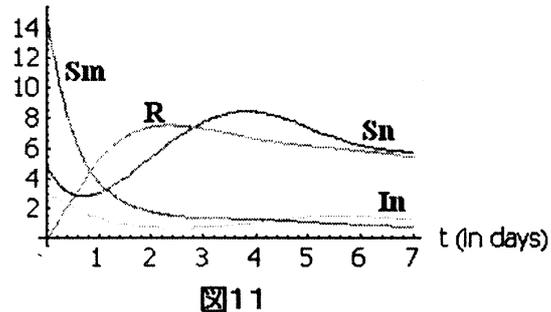
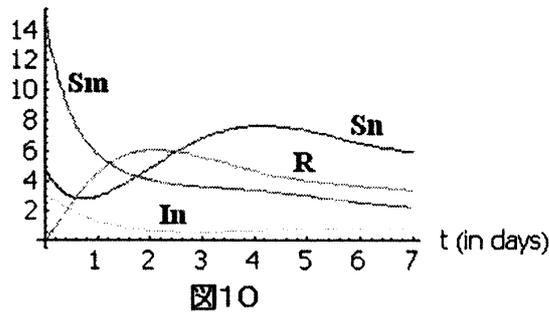
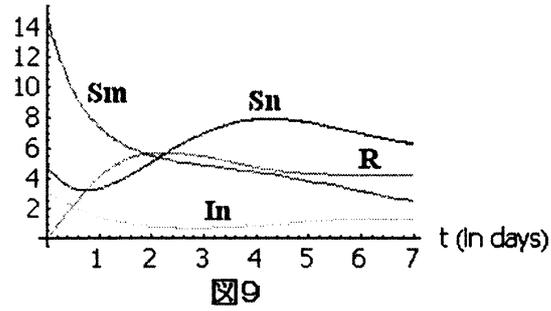
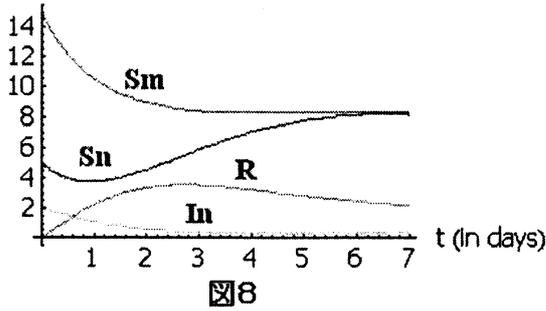


図8～11：各個体数は $N=20$ 、図8：Iからの感染率 $=0.45$ 、回復率 $=0.45$ 、免疫消失率 $=0.7$ 、マスクのウイルス浸透率 $=0.01$ 、防御率 $=0.7$ 、 S_n から S_m への移行割合 $=0.5$ 、 I_n から I_m への移行割合 $=0.9$ 、 S_m から I_n へ移行する割合 $=0.1$ 、 S_n と I_n が出会う確率 $=0.8$ 、 S_m と I_m が出会う確率 $=0.8$ 、 $x[0]=5$ 、 $z[0]=2$ 、 $g[0]=0$ の結果である。図9は、Iからの感染率 $=0.6$ 、回復率 $=0.7$ 、免疫消失率 $=0.7$ 、マスクのウイルス浸透率 $=0.01$ 、防御率 $=0.7$ 、 S_n から S_m への移行割合 $=0.5$ 、 I_n から I_m への移行割合 $=0.9$ 、 S_m から I_n へ移行する割合 $=0.1$ 、 S_n と I_n が出会う確率 $=0.8$ 、 S_m と I_m が出会う確率 $=0.8$ 、 $x[0]=5$ 、 $z[0]=3$ 、 $r[0]=2$ 、 $g[0]=0$ の結果である。図10は、防御率 $=0.95$ 、 $x[0]=5$ 、 $z[0]=3$ 、 $r[0]=2$ の結果である。また、図11は、ウイルスの浸透率 $=0.5$ の結果である。

4. 結果と考察

ネットワーク状の数理モデルを構築してその解析を行ったが、マスクを着用・不着用の割合や感染者との接触の仕方によってマスクの効果に大きな影響を与えることがわかった。また、単にマスクを着用することで効果が発揮されるわけではなく、マスクを通じたウイルスの浸透率（外部への排出率）や防御率も大きく影響することがわかった。さらに、マスクを着用した場合でも、感染した個体と接触する時間が長くなった場合や、接触する確率が高くなると感染する可能性が高くなることが考えられる。

マスクの非着用者がマスクを着用者へと移行することで感染症の増加の軽減に有用であると考えられる。しかし、マスクの着用だけでは感染症の抑制は難しいため、その他の要因、例えば手洗いやうがいなどの効果も加えることでさらに感染症のコントロールの精度を高めることができると考えられる。