

感染防止対策緩和による集団免疫閾値の上昇：呼吸器ウイルス感染症での脱マスクを例に

東北大学大学院理学研究科 仙台市青葉区荒巻字青葉 6 - 3
本堂 毅*

概要

感染症では、一度感染をすれば中長期的に再感染を防ぐ免疫が生じるものがあるが、新型コロナウイルス感染症のように再感染が起こるものもある。後者の場合も、感染後の短期間は再感染しにくい状況が存在する時には、一時的な集団免疫的状况は成り立ちうる。そのため、新型コロナでは感染対策を放棄し、感染拡大により集団免疫的状况に近づくことが望ましいと考える者がある。本稿では狭義および一時的な集団免疫が成り立つための感染率の閾値（感染ピークに達するまでの社会全体の感染率）に及ぼす感染対策の影響を、主にマスク着用効果に着目して評価する。その結果、感染対策が緩められると、広義の集団免疫的状况に達する閾値が上昇するため感染がピークアウトしにくくなること、感染がピークアウトに達する状態ではより多くの感染者数が生じることが示される。

キーワード： 新型コロナウイルス感染症、集団免疫閾値、脱マスク、換気、空気感染

1 はじめに

日本では、新型コロナウイルス感染症の分類が 2023 年春に 5 類に変更されると共に、政府がマスク着用の推奨を止め、マスク着用率は低下してきた。その背景の 1 つには、マスク着用の有無に関わらず、感染が一定規模になれば自然にピークアウトとする思いこみが観察される。新型コロナの 5 類移行にあたっては、2023 年 2 月 8 日に京都大学の西浦博らによって「マスク着用の有効性に関する科学的知見」[1] と題された資料が新型コロナウイルス感染症アドバイザリーボードに提出されたが、マスク着用率が集団免疫閾値へ及ぼす影響については言及されておらず、その後も、そのような言及はどの専門家からも観察されない。

この状況は日本国内に限られるものではない。世界的な医学雑誌のデータベースである Pubmed で “herd immunity”（集団免疫）と “mask”（マスク）の 2 つキーワードを用いて検索を行うと 33 本の論文が見つかるが、いずれもマスク着用率が集団免疫閾値へ及ぼす影響を論じていない。“mask”をより一般的な概念である “NPI”（非医薬的介入）に変えても同様であり、この問題の重要性が、そもそも認識されていない可能性が高い。

そこで、本稿では、一般性ある理論疫学の教

* hondou@mail.sci.tohoku.ac.jp

科書的知見に基づいて、マスク着用が新型コロナウイルス感染症の（広義の）集団免疫に及ぼす影響を計算することにより、社会的感染対策が感染症の集団免疫に及ぼす影響を明らかにする。

2 用語と変数の定義

計算の前に、本稿の計算で用いる用語と変数を定義する。

- 実効再生産数 R : 1 人の感染者が何人に感染させるか、その平均の人数
- 基本再生産数 R_0 : 感染初期、あるいは再感染初期の実効再生産数
- R_{nm} (no mask) : 社会全体が屋内でノーマスクの場合の基本再生産数
- R_{wm} (with mask) : 社会全体で屋内ではマスクを着用する場合の基本再生産数
- $A_S (< 1)$: 屋内でマスクを着用する感染者が他人を罹患させる確率のノーマスク時との比
- $B_S (< 1)$: 屋内でマスクを着用する者が当該感染症に罹患する確率のノーマスク時との比

3 基本再生産数の数理解釈

まず、基本再生産数はウイルス固有のものではなく、その感染症が流行る社会全体での市民の免疫の働きや、（呼吸器ウイルス感染症であれば）換気の良さなどの条件をすべて反映する、すなわち社会的ファクターを含む数値であることに注意する。今回の計算では、新型コロナウイルス感染症を具体例として、社会全体でマスクを着ける場合と着けない場合の、集団免疫による感染ピーク時までの感染者数、すなわち、閾値となる感染率の違いを計算し、マスク

を着けないことによる感染率の増加率等を評価する。ここでは、ワクチン接種がなされていたり、既に罹患をしてある一定の免疫的効果を保持している状況も込みで考えて良い。すなわち、もともとの「基本再生産数」が「その感染症が流行る社会全体での市民の免疫の働きや換気の良さなどをすべて反映した数値」である以上、感染が始まった時、すなわち、感染症アウトブレイク初回を前提として理論疫学から導かれる知見は、再感染が始まった場合にも適用できる。すなわち、基本再生産数 R_0 を元にした計算方法や結果は、再拡大当初の実効再生産数を R_0 と見なすことで、第2波以降の感染拡大時にも同様に成り立つ。そのため、本稿では再拡大当初の実効再生産数も基本再生産数と呼ぶことにする。

本稿では一時的集団免疫を含む広義の集団免疫により感染ピーク（実効再生産数 $R = 1$ ）に達する場合に着目し、基本再生産数を評価した時点からピークに達するまでの「感染率」を評価する。（感染ピークに達するまでに2回感染する人もいるが、新型コロナウイルス感染症などでは、感染後数ヶ月程度は再感染を相応に防ぐことができるため [3]、今論考ではその間の再感染がないものと仮定して計算する。）

4 感染ピークまでの感染率

感染ピーク時までの感染率である集団免疫閾値 (herd immunity threshold) I_p （基本再生産数 R_0 を評価した時点から感染ピーク時までに感染した人数を全人口と比較した値）は、基本再生産数 R_0 と以下の関係にある [2]。

$$I_p = 1 - \frac{1}{R_0} \quad (R_0 \geq 1) \quad (1)$$

基本再生産数 R_0 が 1 であれば感染は広がらず、1 を越えて大きくなるにしたがって、ピー

ク時までの感染率が増えることが分かる。

(1) 式の妥当性は以下の計算で確認できる。

全人口の I_p が感染をした場合、「全人口に占める第○波で感染をしていない、すなわち（一時的を含む）免疫を持っていない人の割合」は $1 - I_p = 1 - (1 - 1/R_0) = 1/R_0$ である。初期の実効再生産数が R_0 の場合、 I_p の割合まで感染者が増えた時点で、1人の感染者が平均何人に感染させるかは以下の式に従う。

$R_0 \times (I_p \text{ の割合まで感染者が増えた場合に「全人口に占める感染をしていない人の割合」}) = R_0 \times 1/R_0 = 1$

1人の感染者が他者を感染させる平均の数が1となれば感染はピークを迎えるので、 I_p の割合まで感染者が増えた場合に感染はピークを迎えることが確かめられた。

この計算から分かるように、(1) 式は実効再生産数の定義から直接導出された公式であり、感染症モデルに依存しない。すなわち、理論疫学の教科書に必ず記載されている普遍的な公式である（図1）。

5 ノーマスクによる集団免疫閾値への影響

脱マスクの効果は、広義の集団免疫で感染がピークに達するまでの感染率 I_p がどれほど変化するか、その変化率（量）で見積もることができる。

5.1 市民全体がノーマスクの場合

ユニバーサマスク時と社会全体がノーマスク時の基本再生産数はそれぞれ、 R_{wm} , R_{nm} であるから、これらを (1) 式の R_0 に代入することにより以下の式を得る。

社会全体がノーマスクになった場合の感染

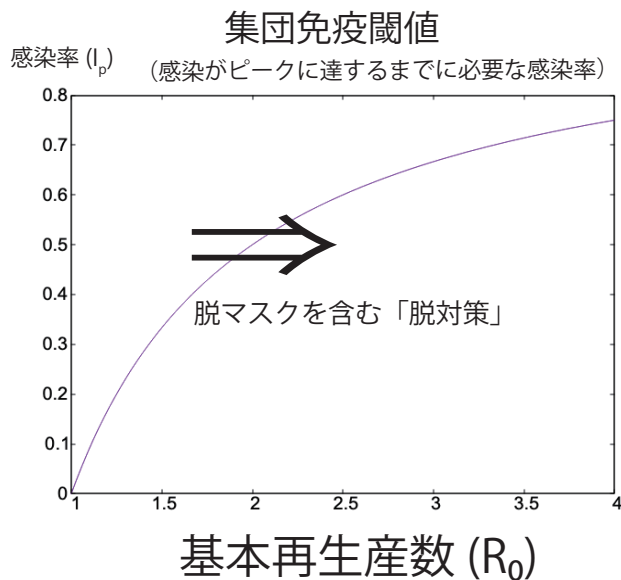


図1 感染がピークに達するまでに必要な感染率（集団免疫閾値）。

パンデミックが十分落ち着いた状況になる前に感染対策の一部が廃止されると、基本再生産数が大きくなる。基本再生産数が大きくなるにつれ、感染がピークに達するために必要な感染率が増加する。その結果、感染対策が十分行われている状況であればピークアウトするはずの感染率に達しても感染拡大がさらに続く結果となる。すなわち感染がピークアウトに達しにくい状況となる。感染は長期化し、感染者数が増大する。感染が長期化すると、その間に再感染 [3] する患者も増加するので悪循環となる。

拡大効果（倍率）

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{全員がノーマスクの場合のピーク時までの感染率}}{\text{全員がマスクを着けている場合のピーク時までの感染率}} \\
 &= \frac{1 - 1/R_{nm}}{1 - 1/R_{wm}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

先の定義により、 $R_{wm} = R_{nm} \times A_s \times B_s$ が成り立つから、 $R_{nm} = R_{wm}/A_s/B_s$ と変

形し、(2) 式に代入すると、(2) 式は

$$\begin{aligned} &= \frac{1 - 1/R_{wm}/(A_S B_S)}{1 - 1/R_{wm}} \\ &= \frac{1 - A_S B_S/R_{wm}}{1 - 1/R_{wm}} \quad (3) \\ &= \frac{R_{wm} - A_S B_S}{R_{wm} - 1} \end{aligned}$$

となる。この式はマスクの性能である A_S , B_S がどのような値の場合にも成り立つ一般公式であるが、具体例を見るために、 A_S , B_S に概数をあてはめてみよう。

米国 CDC で発表された最新の疫学研究 [4] によれば、屋内でマスクを着用する者が感染症に罹患する確率は、屋内でマスクを着用しない者に比べ、一般の不織布マスクで 66% 減少する。一方、理化学研究所などによる、マスクのエアロゾル捕集率に関する研究では、一般の不織布マスクを着用すると、エアロゾルを吸い込む割合が 7 割程度減少すると見積もられており [5]、CDC の研究と整合する。2023 年夏に英国ロイヤルソサエティの専門家委員会が行った研究レビューにおいても、マスクは感染拡大防止への公衆衛生的介入として大きな効果を持つことを認めており [6]、上の知見と整合している。

一般に、呼気のエアロゾル粒径分布は吸気の際の粒径分布よりも直径が大きい方に分布が偏っている。マスクのフィルター性能は、エアロゾルの直径が大きいものほど捕捉率が高いため、マスク着用による「他人を感染させない効果」は、自らの感染を防ぐ効果よりも高いことが知られている。マスクはこの相乗効果によって、公衆衛生的に大きな役割を果たす ($R_{wm} = R_{nm} \times A_S \times B_S$)。一方、CDC の疫学研究では、周囲の人たちもマスクを着用している場合に生ずる相乗的な効果は評価されていないため、屋内でマスクを着用する者の感

染防御効果が、実際より若干高く見積もられている可能性もある。

そこで本稿では、屋内でマスクを着用する感染者が他人を罹患させる確率と、屋内でマスクを着用する者が当該感染症に罹患する確率、それぞれのノーマスク時との比を、ざっくり 50% と仮定 ($A_S = 0.5$, $B_S = 0.5$) して計算を進める。式 (3) に戻れば、この仮定以外の条件を用いて計算を行うことで、仮定の数字が多少変化した場合でも主たる結果は変わらないことを確認できる。

この仮定を用いれば、社会全体がノーマスクになった場合の感染拡大効果 (倍率) である (2) 式は

$$\frac{R_{wm} - 0.25}{R_{wm} - 1} \quad (4)$$

と書ける (図 2)。

先と同様に、ほぼ全員がマスクを着用していた新型コロナの第 7 波、第 8 波での基本再生産数は 1 台前半 (1.5 程度以下。第 8 波ではほぼ 1.2 程度以下) と報告されている [7]。この状況で市民の殆どが脱マスクすれば、感染者の過半数は脱マスク政策により罹患することになると考えられる (図 3)。

5.2 市民の一部 (確率 p) だけがマスクを着用する場合

この場合、感染ピークに達するまでの感染率は (全員マスク着用時に比べて) どれだけ増えるだろうか。屋内でのマスク着用率を p として、ピークに達するまでの感染率を求める。計算を簡単にするため、社会全体で誰もマスクを着けていない場合の基本再生産数を仮に $R_{nm} = 4$ と仮定する。(屋内でのユニバーサルマスク着用により基本再生産数が 1 程度になる場合、 $A_S = B_S = 0.5$ が成り立てば $R_{nm} = 4$ 程度となる。)

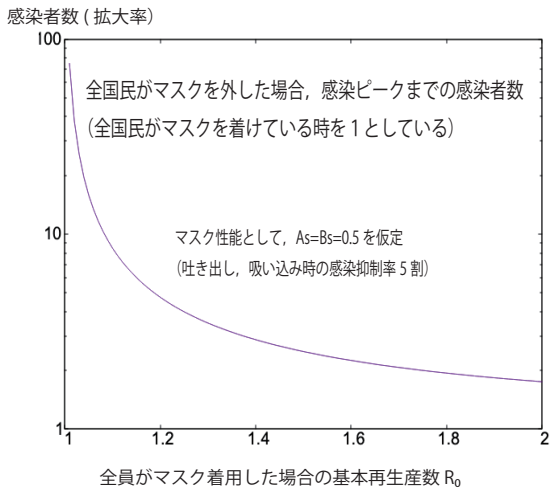


図2 脱マスクによる感染者数の拡大率
 ほぼ全員がマスクを着用していた新型コロナウイルス感染症の第8波での基本再生産数は1を少し越える程度と報告されているため、ピークアウトに必要な感染率（広義の集団免疫閾値）は、脱マスクにより大きく増加することが分かる。

基本再生産数を R_0 とした場合、感染ピーク時までの感染率 I_p [感染拡大後、その時点までの感染者数を全人口と比較した値] は (1) 式に従う。

$$I_p = 1 - \frac{1}{R_0} \quad (5)$$

ここで、屋内でマスクを着用しない場合の基本再生産数 R_{nm} は、社会全体で p の割合がマスクを着用する場合の基本再生産数 $R(p)$ と次の関係にある。

$$R(p) = R_{nm}[pA_s + (1-p) \times 1][pB_s + (1-p) \times 1]. \quad (6)$$

全員がマスクを着けるユニバーサルマスクの状態 ($p = 1$) では、 $R(1) = R_{nm} \times A_s \times B_s = R_{wm}$ 、全員がマスクを外している状況 ($p = 0$)

寄与率 マスク非着用によって感染が引き起こされる割合 (寄与率：感染ピークまでの総感染者中の割合)

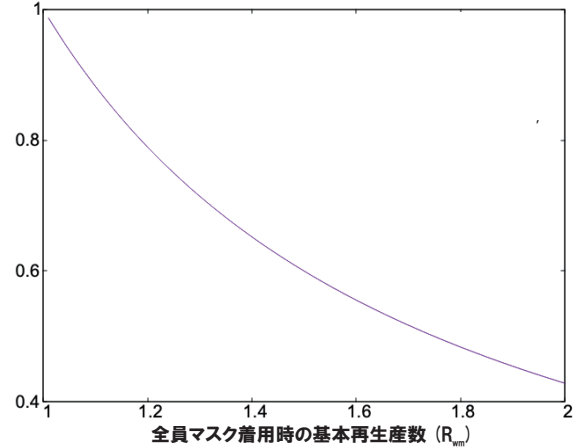


図3 マスク非着用により感染が起こされる割合（寄与率）。

国民全体がマスクを着用しなくなった場合に、感染者が脱マスクの影響で感染を起こした可能性（寄与率）。マスクの感染抑制効果として、呼気、吸気ともに50% ($A_s = B_s = 0.5$) を仮定。この寄与率は、感染症政策の変化に伴って生じる感染者の割合を示す。

では、 $R(0) = R_{nm}$ に帰着する。マスクの感染抑制効果として $A_s = B_s = 0.5$ 、基本再生産数に先ほどの仮定 $R_{nm} = 4$ を用いると、(7) 式は

$$R(p) = 4(1 - 0.5p)(1 - 0.5p) \quad (7)$$

となる。よって、この場合の感染ピーク時の感染率 I_p は

$$I_p = 1 - \frac{1}{4(1 - 0.5p)^2} \quad (8)$$

となる (図4)。

マスク着用率が下がると感染拡大のスピードが増えることは自明であろうが、(9) 式は、マスクの着用率低下によって、広義の集団免疫状態でピークアウトするために必要な（閾値となる）感染率も上昇する様子を示している。本稿ではマスクを例に定量的議論を行ったが、新

感染率 (I_p)

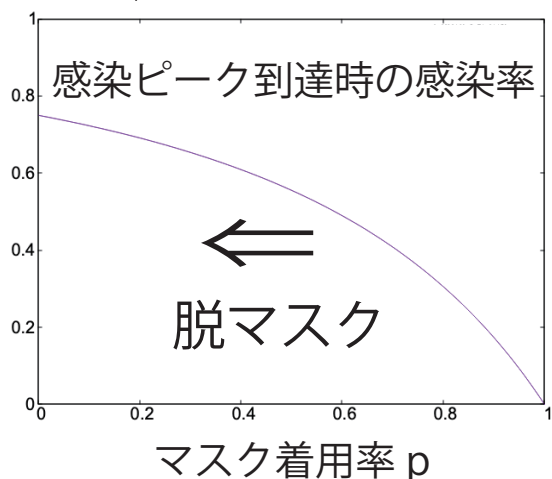


図4 マスク着用率と感染ピークまでの感染率

マスク着用率が減ると感染ピークの閾値が上がるため、ユニバーサルマスクであればピークアウトする感染率に達しても、さらに感染が拡大することになる。感染が長引けば、新型コロナ感染症の場合、感染による一時的免疫効果は薄れてくるので [3], 広義の集団免疫によるピークアウトはさらに条件が厳しくなり、悪循環となりうる。誰もマスクを着用していないときの基本再生産数は 4, $A_s = B_s = 0.5$ を仮定。

型コロナのように空気感染が主たる感染経路である場合、換気対策の緩和によっても（基本再生産数が高くなるため）感染ピーク到達に必要な感染率が高くなることは (1) 式から明らかである。巷では、「感染拡大によって（広義の）集団免疫状態になって感染が止まるのだから、マスクや換気などの感染対策は不必要である」という言説も流布されているが、これは明らかに間違いである。感染対策がおざなりになればなるほど、（広義の）集団免疫に到達しにくくなり、感染が社会を覆う可能性が高まる。新型コロナの場合、オミクロン株以降、従来株に比べて短い期間で再感染が生ずることが報告されているため [3], 感染収束が長引けば長引く

ほど、本稿の計算で無視した再感染者の寄与が増加するため、広義の集団感染的な収束（ピークアウト）がさらに起こりにくくなる悪循環に陥りやすくなる。

6 議論：パンデミック対策全体の中での本研究の位置

新型コロナウイルス感染症で、日本は未だに空気感染 (airborne transmission) [8] を認めておらず、換気対策にも十分な予算を掛けていない。また、欧米の多く国とは異なり、日本の夏は高温多湿となるため換気が困難になり、感染拡大が起こりやすい環境になる。実際、2022年の人口当たりの死者数は、先進7カ国 (G7) で最悪であり、2020年に比べて11倍にも達している。しかるに、公衆医学的判断に不可欠な日本独特の環境要因や換気改善対策の不足への認識もなく、必要な医学的知識も持たない生命倫理学者のイデオロギー的「提言」[9]に従って、2023年の春、日本では医学的合理性のある感染対策まで廃止された。その結果、日本は世界最悪レベルの感染や、それに伴う救急医療全体の逼迫が慢性化する状況を招いた。本稿が指摘した要因を考えれば、この状況は科学的に予見できるものであり、人災ともいえるだろう。

新型コロナ対策は「行動制限」であるという間違った理解が、一部の医師や経済学者などにも広まっているが、新型コロナのような感染症では、主たる感染経路に即した対策に集中することで感染拡大はコントロールできることへの理解も重要である。新型コロナでの実効再生産数は第8波まで低下傾向が続いていたため、科学的合理性と経済両立性に優れた感染症対策 [10] に集中すれば、十分な感染抑制 (実効再生産数 < 1) を達成することは容易と考えら

れる（感染者数が大きくなっているのは、オミクロン株が主流となったことで、感染症が患者から次の患者に伝わるために必要な時間（世代時間）が短くなったことが主要因である。実効再生産数が低い状況では、行動規制なしの穏和な対策で十分である）。このような合理的な感染対策は、狭義の感染症専門家や経済学者などだけでは策定不可能であり、感染経路、理論疫学、費用便益分析（CBA）の経済理論などをすべて、一定レベルでの理解した上での専門的かつ総合的判断を要する。本稿はそのために不可欠な知見を理論疫学の視点から示したものといえる。

7 まとめ

本稿では、脱マスクなどの感染対策緩和が感染拡大に与える影響を、特定モデルに依存しない、理論疫学の基礎知識から評価し、広義の集団免疫によって感染がピークに達して収束（ピークアウト）するまでに必要な感染率を理論的に評価した。その結果、対策の緩和を行うと基本再生産数が増加するため、広義の集団免疫により感染がピークアウトするために必要な感染率が上昇することが証明された。この知見は、一時的な集団免疫を含む、広義の集団免疫を持つ感染症一般に適用できる知見である。筆者の知る限り、少なくとも日本の理論疫学・公衆衛生学者からは指摘されていないものであり、世界的にも直接関係する文献は見当たらない。

感染収束は集団免疫によってもたらされると考え、感染対策を放棄するような施策が2023年時点の日本では少なからず採用されているが、この施策では、感染状況の一時的悪化だけではなく、感染者が増え続けても、感染収束が見通せないような深刻な状況に陥りやすくな

る。新型コロナのような感染症では、永続的な免疫が成り立たない。したがって、集団免疫に期待して感染対策を放棄するような施策は、厳しい感染状況を繰り返し発生させ、救急医療の機能不全や医療崩壊さえ起こす原因となる。実際、日本では救急医療の慢性的機能不全や医療崩壊が2023年になっても解消されていない。本論考の知見を踏まえた感染症対策の抜本的な見直しが必要と考えられる。

8 謝辞

本研究では、平田光司氏、川勝年洋氏、米村滋人氏との議論から多くの示唆を受た、田中麻莉子氏には原稿に貴重なコメントをもらった。また、科学研究費補助金 20H00002 の支援を受けている。

参考文献

- [1] 西浦博 他. マスク着用の有効性に関する科学的知見. 第116回(令和5年2月8日)新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード資料3-3-2, 2023. <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/001055263.pdf>
- [2] Vynnycky E, White R.G: An introduction to infectious disease modeling. Oxford University Press, Oxford, U.K. 2010.
- [3] Stein C, *et al.*: Past SARS-CoV-2 infection protection against re-infection: a systematic review and meta-analysis. *Lancet* **401**: 833-873, 2023.
- [4] Andrejko K L, *et al.* Effectiveness of Face Mask or Respirator Use in Indoor Public Settings for Prevention of SARS-CoV-2 Infection

- California, February - December 2021. MMWR, **71(6)**:212-216, 2022. <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/71/wr/mm7106e1.htm>
- [5] たとえば, 坪倉誠: 室内環境においけるウイルス飛沫感染の予測とその対策 <https://www.r-ccs.riken.jp/wp-content/uploads/2021/03/210304tsubokura.pdf> (2021). この資料中で「飛沫」と書いてある部分は「エアロゾル」とするのが正しい.
- [6] The BMJ, Covid-19: Lockdowns and masks helped reduce transmission, expert group finds. BMJ 382:1959-1960, 2023.
- [7] たとえば, 第 121 回 新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード 資料 3 - 2, (2023) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/001088923.pdf>
- [8] Wang C C *et al.*: Airborne transmission of respiratory viruses. Science **373**: 981, 2021. <https://doi.org/10.1126/science.abd9149>
- [9] 武藤香織 他: 今後の新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 対策における倫理的法的社会的課題 (ELSI) の観点からの提言. 第 113 回 新型コロナウイルス感染症対策アドバイザリーボード 資料 3 - 9, 2023. <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/001036023.pdf>
- [10] 本堂 毅: 感染抑制政策と経済. 臨床環境医学 **30**:56-59, 2022.