

航空ネットワークにおける感染症拡散リスクの評価 ～SARSを分析事例として～

田口 元寿 武末 裕樹 塚本 忠嗣

アドバイザー教員 庄司 学 講師

概要：本研究では、2002年から2003年にかけて世界各国で流行した重症急性呼吸器症候群（SARS）の事例を取り挙げ、航空ネットワークによる感染拡散モデルを作成し、シミュレーション実験を行う。さらに、これらを通じて航空ネットワークによる感染症拡散リスクへの対策について考察する。

1. 研究の背景と目的

(1) 研究の背景

現代社会においては、目覚ましい医学医療の進歩や衛生水準の向上により多くの感染症が克服されてきている一方で、新たな感染症の出現や既知の感染症の再興、また、国際交流の活発化に伴う国境を越えた感染症の拡散リスクの増大が懸念されている。

例えば、2002年から2003年にかけて世界中で流行した重症急性呼吸器症候群（SARS）の事例は記憶に新しい。SARSは2002年11月に中国広東省における最初の症例に端を発し、中国国内はもとより、感染者の航空機を介した移動等によって世界中に拡散した¹⁾。2003年7月11日に世界保健機構により収束宣言が行われたが、同月までに32の国と地域において8,096人の感染者と、774人以上の死者が報告されている²⁾。

感染症の拡散に関する研究は、その重要性から非常に多く蓄積されている。その中でも輸送ネットワークを介した感染症の拡散に関する研究は、19世紀のアメリカで数度に渡って発生したコレラの大流行と当時敷設された鉄道ネットワークに注目したPyle[1969]の研究に始まり、英国植民地への輸送経路と1918年にアフリカ北部で発生したインフルエンザ流行に関するPatterson and Pyle [1983]の研究や、14世紀に発生したユーラシア大陸における貿易ルートを紹介したペストの大流行に関するHerlihy[1997]の研究などがある³⁾。また、航空ネットワークと感染症の関係については、John B Jr. and Christian L³⁾[2006]の研究が新しい。

John B Jr. and Christian L[2006]はSARSを事例に取り上げ、症例が報告された各国間の航空ネットワークの時間的な近接性とSARSの発症時期、及び発症の容易性との関係について、両者の間には相関があるという結論を導いている。しかし、航空ネットワークを介した世界的な感染症の拡散が発生した場合において、各国への拡散の危険性がどれ程存在するのかという視点からの検討は未だ十分に行われていない。

(2) 研究の目的と流れ

こうした背景から本研究では、以下のステップにより航空ネットワークにおける感染症の拡散リスクを定量的に分析するとともに、感染症拡散リスクへの対策についての検討を行うことを目的とする。

1) 既往感染症に対して、感染力や罹患した場合の重篤性

の観点からレビューを行い、本研究で分析対象とする感染症を選択する。その際には、危険性が極めて高いとして、感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律¹⁾（感染症法）により第1種感染症に指定されている感染症を選択する。

- 2) 航空機内における感染症の伝播モデルを構築する。
- 3) 分析対象とする航空ネットワークについて、実際の都市間旅客数データに基づき、ネットワークモデルを構築する。
- 4) 3)で構築したネットワーク中の任意の航路上でスーパープレッディングが発生した場合に、同事例で発生した2次感染者がどのように各国に拡散するかについてシミュレーション実験を行う。
- 5) 4)のシミュレーション結果に基づき、感染者の拡散リスクの低減に必要なリスクマネジメントの方策について、世界的感染症拡散への早期警戒や感染症サーベイランス²⁾などの視点から考察する。

2. 研究対象とする感染症の選定

(1) 感染症について

感染症とは、水、土、空気、動物（人を含む）の中に存在する病原体が、人の体に浸入することによって引き起こされる疾患のことをいう⁴⁾。過去、人類は感染症により多大な苦難を経験してきている。ペスト、痘そう、コレラ等の感染症の流行は、時に文明を存亡の危機に追いやったこともあり、感染症の根絶は人類の悲願とも言える。

これに対し、20世紀の医学医療の進歩や衛生環境の著しい向上は、例えば数十億人の人命を奪った天然痘の根絶に成功するなど、感染症のリスクを軽減するために多大な貢献をしてきた。一方で、エイズウイルスや新型のエボラウイルスなどによる新たな感染症の出現や既知の感染症の再興、また国際交流の進展等に伴い、感染症は新たな私たちで今なお人類に脅威を与えている⁵⁾。

(2) 重症急性呼吸器症候群（SARS）について

SARSは、21世紀に出現した最初の感染症で、容易に伝播可能な新しい疾病である⁶⁾。中国南部の広東省を起源とした重症な非定型性肺炎の世界規模的流行が発生し、2003年に重症急性呼吸器症候群（SARS: Severe Acute Respiratory Syndrome）の名で報告された。同年3月には、世界保健機構（WHO）が異例の旅行勧告を発表し、「世界規模の

健康上の脅威」と位置づけている。

我が国では2002年4月に新興感染症に、ウイルスが特定された2003年6月に指定感染症に指定され、2003年11月より感染症法の改正に伴って第1類感染症としての報告が義務付けられるようになった。これまでに、国内で16の可能性例と52の疑い例が報告されたが、全ての症例は他の診断が付き取り下げられたか、あるいはSARS専門委員会でSARSの可能性が否定されている²⁾。

SARSの原因は、コロナウイルス科ヒトコロナウイルスに属する新型のSARSウイルス(SARS-CoV)である。感染経路は飛沫及び接触(糞口)感染が主体とされるが、空気感染の可能性も否定されていない。もっとも一般的には、感染性のある飛沫への暴露を伴う密接なヒト-ヒト感染で伝播していると考えられているが、ヒトで感染源となるのは有症者だけであり、現在のところ発症前の感染者が感染源となったという報告はなされていない²⁾。

SARSの潜伏期は2日から10日で、平均5日である。発病第1週に発熱、悪寒戦慄、筋肉痛など、突然のインフルエンザ様の前駆症状で発症する。発病第2週には非定型肺炎へ進行し、咳嗽(初期は乾燥)、呼吸困難が見られ、また下痢も多く報告されている。発症者の80%はその後軽快するが、中には急速に呼吸拍と酸素飽和度の低下が進行し、ARDS(急性呼吸窮迫症候群)に進行し死亡する例もある。死亡率は感染者の年齢等により大きく異なるが、全体として9.6%と推計されている。感染の伝播は主に発症10日前後をピークに起こる。

本研究においては、上記のようなSARSの持つ深刻性に加え、実際に航空機を利用した旅行者による世界的拡散が起こったこと、及び航空機内における感染事例が報告されていることから、分析対象とする感染症をSARSとした。

(3) SARSの航空機内感染について

航空機内におけるSARSの感染リスクは、非常に低いとされている一方で、これまでに航空機内で感染伝播が発生した事例が複数報告されている⁷⁾。

WHOは、これまでに40機体について、1人以上のSARS可能性例が有症状の期間に旅行したことを確認している。このうち5つの国際便において、症状のあるSARS可能性例から乗客、または乗務員へ感染伝播が発生したと考えられている。これらのフライトの1つでは、スーパースプレディングが発生している⁸⁾。スーパースプレディングとは、平均より遥かに多い2次感染者を生じる感染の伝播事例をいう。

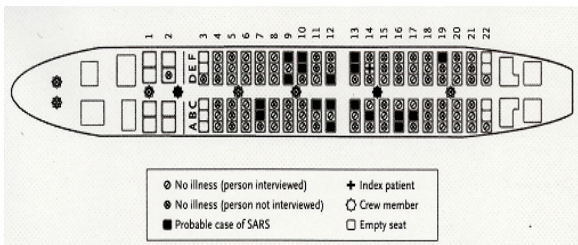


図1 スーパースプレディング事例での機内2次感染者発生状況⁸⁾(2003年3月15日)

スーパースプレディングが発生したのは、2003年3月15日の香港発北京行き航空機内であった。図1に、当該航空機内の搭乗図を示す。この機体(B737-300型機)には120名(乗客112人、搭乗率80%)が搭乗しており、

72歳の男性1名が咳を伴った発熱というSARSの兆候的な症状を呈していた。香港を出発して北京までは約3時間のフライトであったが、この症例は搭乗した22名の乗客及び2名の乗務員からなる24例のSARS可能性例クラスターと関係していたとされている⁸⁾。

3. 感染症の拡散リスク分析の枠組み

本研究では、航空機ネットワークにおける感染症拡散リスクを分析・調査し、これらに関するリスクマネージメントの方策を検討するために、航空機内感染モデル及び航空ネットワーク上での2次感染者拡散モデルを構築する。これらの2つのモデルを用いたシミュレーション実験を行い、感染症拡散リスクの定量的指標としてスーパースプレディングによるSARSの拡散2次感染者数を割り当てる(図2)。なお、以下本研究におけるシミュレーションは、スーパースプレディングに基づく悲観的シナリオであることに留意が必要である。

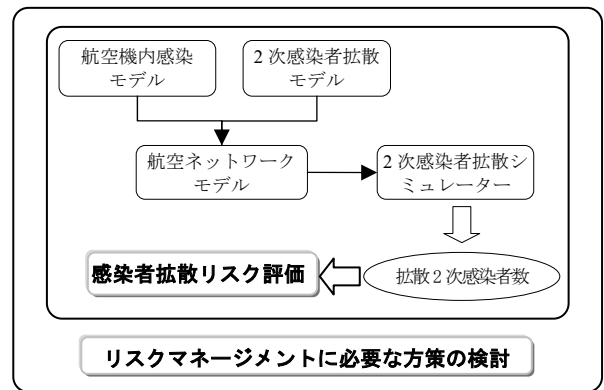


図2 感染者拡散リスク評価の枠組み

(1) モデル構築の目的

本研究において構築するシミュレーションモデルは、次の3つの視点からリスクアセスメントを行うことを目的とする。

a) 行政の視点

世界的流行発生(疑いを含む。)に対して日本の行うべき警戒強化への判断となる症例報告国を把握する。

b) 空港又は検疫関係者の視点

空港の検疫における感染者のスクリーニングが感染者の拡散防止に及ぼす影響を定量的に評価する。

c) 航空会社の視点

航空機内における感染確率を低減することによる感染者拡散防止に及ぼす影響を定量的に評価する。

(2) 航空機内感染モデル

a) KMMモデル

現在の感染症流行モデルの原型となっているのは、ケルマックとマッケンドリックによる数理モデルである⁹⁾。このモデルは局地的な封鎖人口に対する感染症の急速かつ短期的な流行に関するモデルであり、ホスト人口の出生、死亡などの人口動態は考慮されない。

今、 $S(t)$ 、 $I(t)$ 及び $R(t)$ をある時刻 t における感受性人口(susceptibles: 感染する可能性のある人口)、感染人口(infected/infections: 感染し、感染させる能力のある人口)、

隔離された人口 (recovered/removed : 病気からの回復による免疫保持者ないし隔離者・死亡者) とする. このとき, ケルマックとマッケンドリックのモデル (KMM モデル) は, 以下のような常微分方程式で示される.

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \cdot S(t) \cdot I(t) \quad \dots (3.1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \cdot S(t) \cdot I(t) - \gamma \cdot I(t) \quad \dots (3.2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot I(t) \quad \dots (3.3)$$

$$S(t) + I(t) + R(t) = N \quad \dots (3.4)$$

ここで β は感染率, γ は除去率と呼ばれる定数である. また, N は系内人口を表す.

式 (3.1) は, 減少する感受性人口, すなわち新たに生じる感染者数が, モデルが対象としている局地的な封鎖人口内において感受性者と感染者の均等な交流を仮定していることから, 感受性者と感染者の積に比例して増加することを示している. また, 式 (3.2) は, 新たに発生した感染者のうち, 一定の割合 (除去率) で死亡, 免疫保持あるいは隔離などの理由により感染の連鎖から除去される人口が発生することを示しており, これらの理由により除去されなかった感染者が, 式 (3.1) に従い新たな感染者を発生させるという, 感染伝播の連鎖を表現するモデルである.

b) 航空機内における感染伝播モデル

KMM モデルは, 隔離を考慮した封鎖人口における連続した感染伝播を表現するモデルであることから, 航空機内での感染伝播モデルとして直接適用することはできない. このため, 航空機内で発生する感染伝播について次のような仮定を設定し, モデルの修正を試みる.

① 航空機内における感染リスクと飛行時間について

航空機内における感染リスクは, 航空機のキャビンという狭小な空間を共有する時間に因るものと仮定する.

② 航空機内において発生する 2 次感染者について

過去の航空機内におけるスーパースプレディングにおいて発生した 2 次感染者が, 必ずしもその原因となった感染者の座席周辺に座っていなかったこと, 及び感染者が航空機の通路を移動する可能性があることなどから, 航空機内で発生する 2 次感染者については航空機内における感染者の座席位置を考慮せず, KMM モデルに準じて感受性者と感染者の積に比例すると仮定する.

③ 航空機内 2 次感染者の感染力について

SARS は 2 (2) で述べたとおり, 発症前の感染者が感染源となった事例がなく, SARS の潜伏期間は短くても 2 日程度とされていることから, 航空機内で発生した 2 次感染者は渡航中に感染力を発現しないものとする.

④ 航空機内での除去率について

航空機内感染において死亡, 隔離等の除去は考慮しない. 以上の仮定から, 航空機内において発生する 2 次感染者の数 ΔI は, 飛行時間を t として

$$\Delta I = \beta(t) \cdot S \cdot I \quad \dots (3.5)$$

で表すことができる. ここで S, I はそれぞれ航空機が発する時に搭乗していた感受性者及び感染者であり, 航空機的全搭乗者数を n とすると,

$$S + I = n \quad \dots (3.6)$$

である.

c) 感染率関数

感染率を $t=0$ において $R(t)=0$ であるという初期条件を満たす時間 t の指数関数であると仮定し, 過去に発生したスーパースプレディング事例での飛行時間, 及びその時の感染率から, 次のように仮定した.

$$\beta(t) = 0.13306 \cdot t^{0.3} \quad \dots (3.7)$$

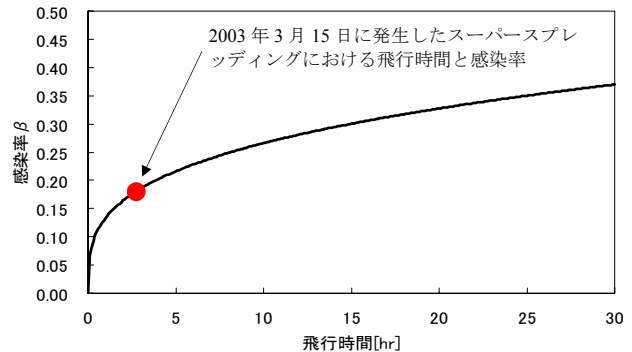


図 3 航空機内感染関数 (時間-感染率)

(3) 2 次感染者拡散モデル

スーパースプレディングによって発生した 2 次感染者の拡散モデルを図 4 に示す. ある航空機が空港 A を出発し, 空港 B に到着するまでに, 当該航空機内においてスーパースプレディングが発生したと仮定する. この航空機に搭乗していた感受性者数を S , 感染者数を I とすると, 空港 B に入港する 2 次感染者数は式 (3.5) により ΔI 人である.

空港 B における除去率 (乗り継ぎを行わない割合) を γ_B とすると, 乗換え率は $(1 - \gamma_B)$ で表される. ここで $\gamma_B \Delta I$ 人は乗り継ぎを行わず, $(1 - \gamma_B) \Delta I$ 人が次の目的地に向かうものとする. なお, スーパースプレディングの基となった発症している感染源は, 乗り継ぎを行わないとする.

空港 B を出発して次の各空港に向かう 2 次感染者数は, 乗り継ぎを行う 2 次感染者数に各航路の重み付け係数を乗じた数である. 重み付け係数 α は, 空港 B から出発する航路の数 (2 次感染者が当該空港に入港する航路を除く) を n としたとき,

$$\alpha_{Bi} = \frac{\text{航路 } i \text{ の年間出発旅客数}}{\text{空港 B での年間出発旅客数}} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_{Bi} = 1 \right) \quad \dots (3.8)$$

である.

渡航者は, 多くても 3 回の乗り継ぎで最終目的地に到達すると仮定し, 上記の計算を 3 回繰り返して各国と地域に累積する 2 次感染者数を算出する.

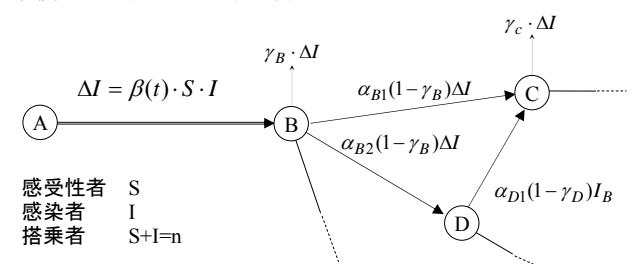


図 4 2 次感染者の拡散

(4) 航空ネットワークモデル

a) 対象都市（空港）および航路の設定

本研究における航空ネットワークモデルは、SARS が流行した 32 の国と地域のうち、輸入症例が多かった 10 の国と地域の都市及び東京において、最も旅客数が多い空港を当該地域の代表空港として 1 つ定め、それらの空港と実際に就航されている航空路線をもとに作成した。但し、米国については、東部と西部に 1 つずつ代表空港を設定した。作成した航空ネットワークモデルを図 5 に示す。

対象空港の乗り継ぎ率については、統計データが存在しないため、既往研究¹⁰⁾¹¹⁾をもとに設定した。

表 3 各空港での乗り継ぎ率

都市	代表空港	乗り継ぎ率 (1-γ)
北京	北京首都国際空港 (PEK)	0.05
香港	香港国際空港(HKG)	0.28
東京	新東京国際空港 (NRT)	0.10
ニューヨーク	JFK 国際空港 (JFK)	0.23
ロスアンゼルス	ロサンゼルス国際空港 (LAX)	0.24
台北	台北 (中世) 国際空港 (TPE)	0.12
バンコク	バンコク国際空港 (BKK)	0.14
フランクフルト	フランクフルト国際空港 (FRA)	0.28
ウランバートル	ウランバートル国際空港 (ULN)	0.01
シンガポール	シンガポール国際空港 (SIN)	0.47
マニラ	マニラ国際空港 (MNL)	0.05
パリ	シャルルドゴール国際空港 (CDG)	0.10

各航路における年間旅客者数を付表 3 に示す。対象空港間を結ぶ航路の年間出発旅客者数は ICAO (国際民間航空機構) の Traffic by flight stage/TFS¹²⁾のデータを用いた。また、対象空港から他空港に向かう航路の年間出発旅客者数の合計を以て、当該空港の年間出発旅客者数とした。但し、Traffic by flight stage/TFS に掲載されていない都市間の旅客者数については、下記の手順で旅客者数を仮定した。

- ① オンライン国際線時刻表¹³⁾により、1 月及び 6 月の

便数を計算し、その平均を月当りの便数と仮定する。

- ② ①の結果に各航空会社の使用する機材の座席数を乗じて月当りの旅客者数とし、これに 12 を乗じて年間旅客者数とする。
- ③ Traffic by flight stage/TFS のデータを基に、対象空港を出発する航空機の搭乗率の平均を求め、これを空港ごとの平均搭乗率とし、②の旅客者数に乘じる。

b) 2 次感染者の乗り継ぎに対する制限設定

2 次感染者の対象空港での乗り継ぎにおいて、特に非合理的で現実に即さない長距離迂回を行う乗り継ぎ (例: 香港を出発してロスアンゼルス経由でバンコクに向かう) を排除するため、次のような制限を設けた。

- ①対象都市 (空港) を 3 つのエリア (アジアエリア, ヨーロッパエリア, アメリカエリア) に分類する。
 - ②エリア間の長距離移動は、出発空港を起点とした往復の場合を除き、1 回のみとする。
- 分類したエリアと都市 (空港) を表 4 に示す。

表 4 対象都市 (空港) のエリア別分類

ヨーロッパエリア	アジアエリア	アメリカエリア
パリ フランクフルト	北京 香港 東京 台北 バンコク シンガポール マニラ	ニューヨーク ロスアンゼルス

4. 拡散シミュレーション実験

(1) シミュレーターの作成

構築した航空ネットワークを介して、本研究の対象とした都市に拡散する 2 次感染者数を計算するため、3(2)に示

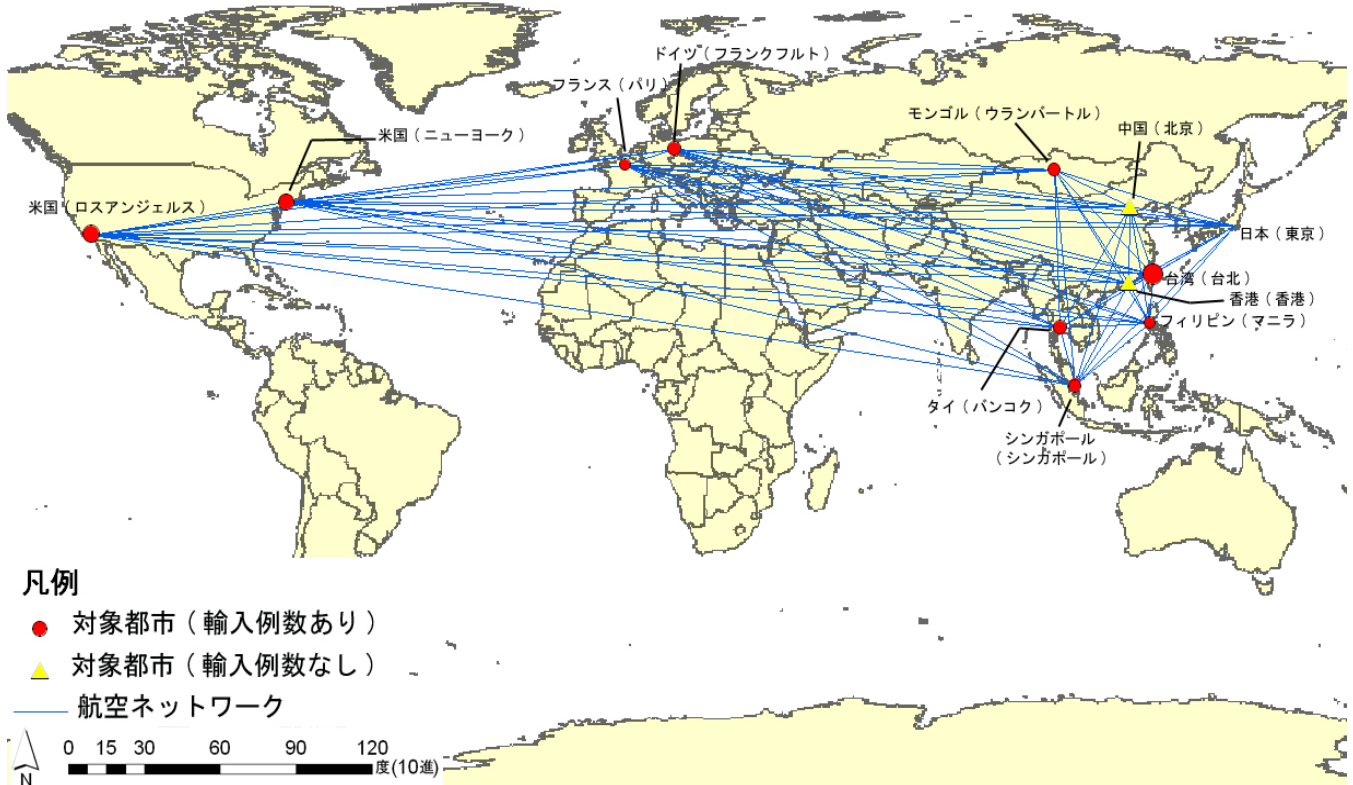
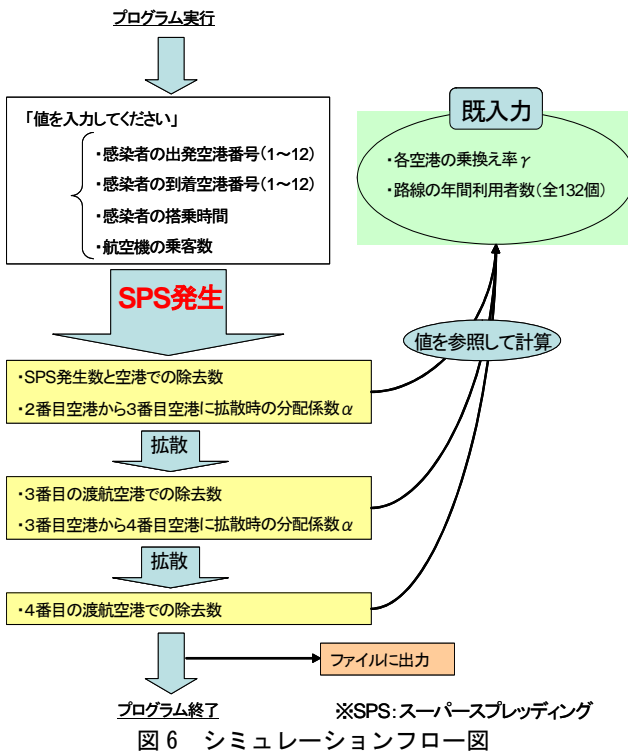


図 5 航空ネットワークモデル

した 2 次感染者拡散モデルに基づくシミュレーターを構築した。作成したシミュレーションのフローを図 6 に示す。

プログラムにはスーパースプレディング事例が発生する路線の情報（発着空港名，搭乗する感染者数，搭乗時間，）以外のパラメータはすでに入力されており，計算者はプログラムを立ち上げた後，画面表示に従って計算したい路線の情報を入力するだけで 12 空港（ノード）それぞれにおいて除去された 2 次感染者数の合計，および航空ネットワーク（リンク）上に残っている 2 次感染者数をファイルに出力することができる。本シミュレーションの性質上，スーパースプレディングが発生した航路のエリア分類（アジア，ヨーロッパ，アメリカ）によって 2 次感染者の各空港へと到着する過程の場合分けが必要であるため，スーパースプレディングが発生した航路の発着空港のエリア分類の全 9 つの組み合わせ分だけプログラムを用意した。なお本シミュレーションの計算回数は，リンク上に残留している 2 次感染者数がスーパースプレディング発生数の 1% 以下となるまでの回数である 3 回（乗り換え数が最大 3 回）とした。



(2) スーパースプレディング事例により発生する 2 次感染者数の計算

本研究で対象とした都市における代表空港を出発する航空機内に発症した感染者 1 人が搭乗した場合において，式(3.5)に基づき各航路で発生する最大の 2 次感染者数を計算した。結果を表 6 に示す。なお，飛行時間はオンライン国際線時刻表に基づく時間とした。また，搭乗者数は，各航路に就航する航空会社で用いられている航空機の最大座席数を基に仮定した。^{18) ~29)} 但し，同一路線において複数の航空会社が異なる航空機を運行している場合は，出発空港を拠点としている代表的な航空会社で主に利用されている航空機の最大座席数を搭乗者数とした。

(3) シミュレーション実験

a) 東京に 2 次感染者が流入するリスクの比較

① 出発空港に注目した比較

シミュレーションによって得られた結果から，東京に 2 次感染者が流入するリスクの比較を行った。

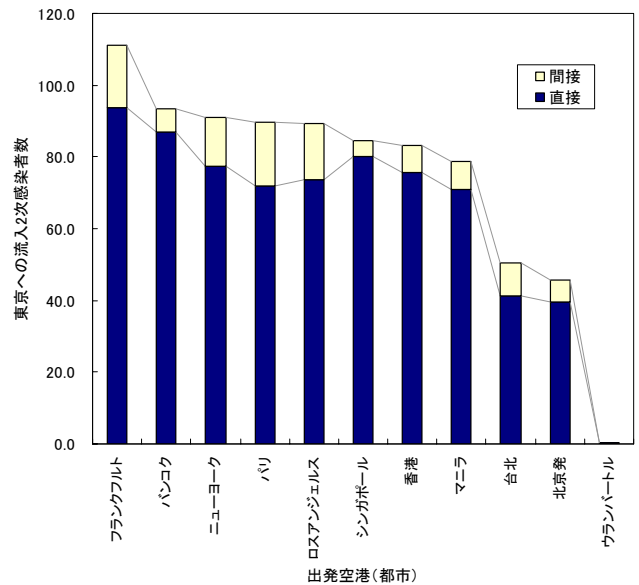


図 7 東京に流入する 2 時感染者数比較（出発空港別）

図 7 は，出発空港別に東京に到達する 2 次感染者数の比較を図示したものである。図中の「直接」は各空港を出発して直接東京に到着する航空機内でスーパースプレディングが発生した場合を示し，「間接」は各空港を出発して，東京以外の空港に到着する航空機内でスーパースプレディングが発生し，2 次感染者が乗り継ぎによって東京に流入した場合を示している。また「出発空港」とは，スーパースプレディングが発生する航空機の出発する空港を指す。

2 次感染者の流入に対する直接的な影響は航空機内で感染伝播が発生した場合の影響を反映しており，一方間接的な影響は，航空ネットワーク上の渡航者量を反映しているといえる。

図 7 から，全ての出発空港での場合において，直接的な影響が大きいことが確認できる。日本に多くの 2 次感染者が流入するリスクが高いのは，フランクフルト，バンコク，ニューヨークなどを出発した便内でスーパースプレディングが発生した場合であり，直接的にはフランクフルト，バンコク，シンガポールが，間接的にはパリ，フランクフルト，ロスアンゼルスなどが高い。

直接的な影響が大きいことは，各都市と東京を結ぶ航路の飛行時間，及び大型航空機の使用などが要因であると考えられる。一方，間接的な拡散は各空港での乗換えにより行われるため，ネットワーク上においてシンガポールや香港などの乗換え率の大きい，いわゆるハブ空港から東京への需要の高さ（旅客者数の多さ）が反映された結果となっていると考えられる。

直接的流入のリスクについては，各出発空港から東京に直接乗り入れる航空機に着眼することで，どの航路に危険性が存在するかという把握が可能である。一方，間接的流入のリスクについては，複数の乗換えを考慮する必要があるため，どの航路の要因が強く影響しているのかを把握することが難しい。そこで，以降では乗り継ぎを行う拡散者の拡散に焦点を当て，よりミクロな視点から分析を行う。

②航路に注目した東京への間接2次感染者流入数比較

①において東京への2次感染者の流入が特に多いフランクフルト、バンコク及びニューヨークを出発した便内でスーパースプレディングが発生した場合に、その発生した2次感染者がどの航路でどの程度移動したかを図に示した。同図から、各出発空港で間接的に各都市に移動する2次感染者が多い航路と少ない航路が存在することがわかる。特に東京に接続している航路に注目すると、各エリアをまたがる長距離移動により大量に発生した2次感染者が、シンガポールや香港などのアジア各都市を介して流入してきていることが確認できる。次に、日本における2次感染者の間接流入リスクに与える航路をより詳細に確認する。

図8は東京に間接的に流入する2次感染者数を路線別に比較したものである。これより、東京への間接流入リスクとして最も高い航路は、フランクフルト出発便内でスーパースプレディングが起こり、その飛行機がシンガポールに到着した場合であることがわかる。また、ヨーロッパエリア又はアメリカエリアからアジアエリアに向かう便で発生した2次感染者が、アジアエリアにおける代表的なハブ空港となっているシンガポールを経由して日本に流入する可能性が高いことや、アジアエリア内では香港や台北発の便で発生した2次感染者がシンガポールを経由して日本に流入する可能性が高いことなども確認できる。

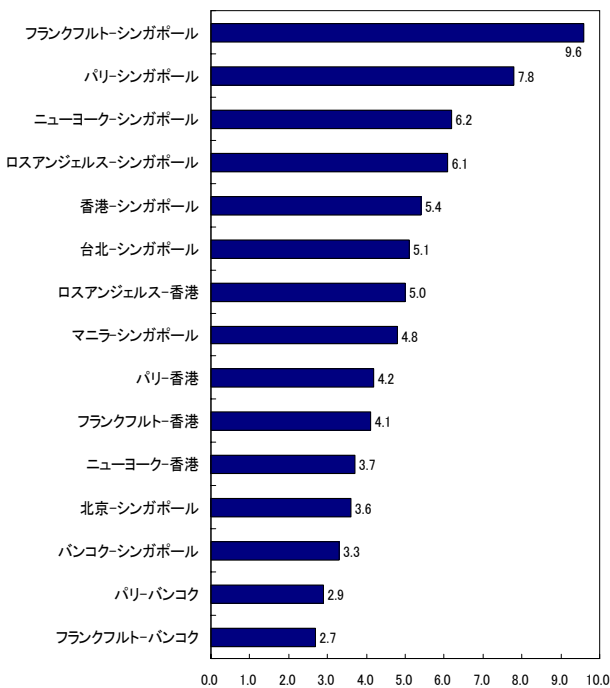


図8 東京に流入する2次感染者数比較（航路別）

b) 2次感染者の流入リスクが最も高い都市の把握

航空機を介した2次感染者の流入リスクが最も高い都市でSARS症例の輸入例が報告された場合には、航空機を介した感染者の拡散の可能性が比較的高いと判断できる。航空ネットワークに対する感染者のサーベイランスの一手段として、本研究で構築したシミュレーションにより2次感染者の流入リスクが高い空港を把握する。

各対象都市を出発した航空機内でスーパースプレディングが発生した場合において、各都市に流入する2次感染者数を積算した結果を図9に示す。

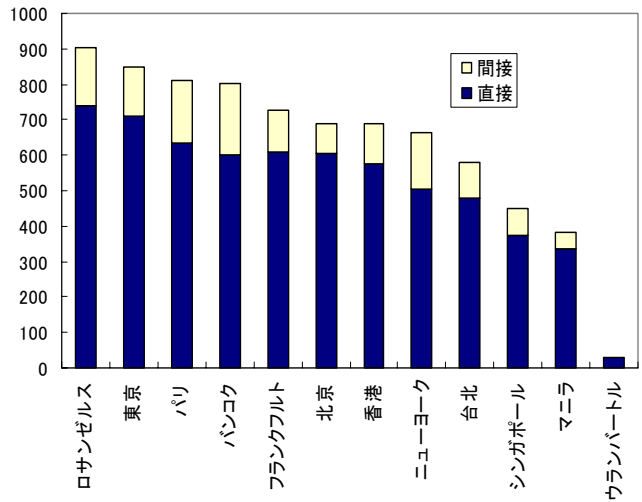


図9 各都市に流入する2次感染者数（積算）

図9から、ロサンゼルスや東京において航空機を介した2次感染者の流入リスクが特に高いことが分かる。

c) 検疫の精度向上による2次感染者拡散防止への影響の評価

現状では、潜伏期間にあるSARS感染者の発見は困難とされている¹⁵⁾が、潜伏期間にある感染者の早期発見が感染症の拡散防止に与える影響を評価するため、各空港において乗り継ぎを行おうとする感染者の50%を検疫で除去できた場合を仮定し、各国に流入する間接2次感染者数の変化を求める。本仮定の下での各空港のみかけの除去率 γ' は

$$\gamma' = \gamma + (1 - \gamma) \cdot 0.5 = 0.5 + 0.5 \cdot \gamma \quad \dots (4.1)$$

で与えられ、2次感染者拡散モデルは図10のように表現できる。これは、空港Xにおいてこれまで乗り換えることとしていた2次感染者のうち、その半分を検疫によって除去するというを表している。

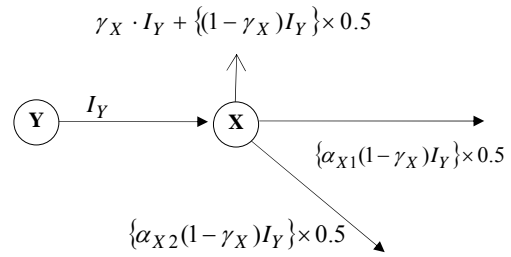


図10 2次感染者拡散モデル（検疫除去確率0.5の場合）

表5 みかけの除去率（検疫除去確率0.5の場合）

空港名	除去率 γ	みかけの除去率 γ'
北京首都国際空港	0.95	0.975
香港国際空港	0.72	0.860
新東京国際空港	0.90	0.950
JFK(国際空港)	0.77	0.885
ロサンゼルス国際空港	0.76	0.880
台北(中世)国際空港	0.88	0.940
バンコク国際空港	0.86	0.930
フランクフルト国際空港	0.72	0.860
ウランバートル国際空港	0.99	0.995
シンガポール国際空港	0.53	0.765
マニラ国際空港	0.95	0.975
シャルルドゴール国際空港	0.90	0.950

本仮定の下にシミュレーション実験を行った結果を表 6 に示す。

表 6 各都市の流入 2 次感染者数と都市別流入減少率 (検査精度 0.5 の場合)

都市名	検査効果		流入減少率 [%]
	なし	あり (検査除去確率 0.5)	
北京	85.3	41.1	51.8
香港	111.4	61.2	45.1
東京	138.6	68.1	50.9
台北	99.2	49.9	49.7
バンコク	201.2	102.7	49.0
ウランバートル	0.4	0.2	50.0
シンガポール	76.4	47.5	37.8
マニラ	44.8	21.6	51.8
フランクフルト	115.6	62.0	46.4
パリ	179.0	89.6	49.9
ロサンゼルス	162.3	89.4	44.9
ニューヨーク	178.4	89.3	49.9

表 6 より、各国の流入 2 次感染者数が概ね半減できることがわかる。特に検査効果が高い空港としては北京、マニラが、また低い空港としてはシンガポールが確認できる。得られた結果の最も大きな要因としては、乗り換え率が高いハブ空港における 2 次感染者の除去効果の大きさが挙げられる。つまり、ハブ空港で大きく削減された場合、他空港へ流入していた 2 次感染者の削減効果が大きく期待され、一方でハブ空港自体の間接流入数には大きく影響しないためと考えられる。

d) 航空機内における感染確率の低減が感染者拡散防止に及ぼす影響

航空機内での感染伝播の防止が感染者の流入リスクに与える影響を評価するため、(4) a) による警戒すべき地域から東京に向かう航路と、b) による警戒すべき航路において飛行時間による感染率の増加を半減できた場合における日本への流入 2 次感染者数の変化を求める。

上記の 6 航路における感染率関数のみを式(5.2)とし、他の航路における感染率関数は式(3.7)のままとして、日本へ流入する 2 次感染者を積算した。結果を図 11 に示す。

$$\beta^*(t) = \frac{1}{2}(0.13306 \cdot t^{0.3}) \dots (4.2)$$

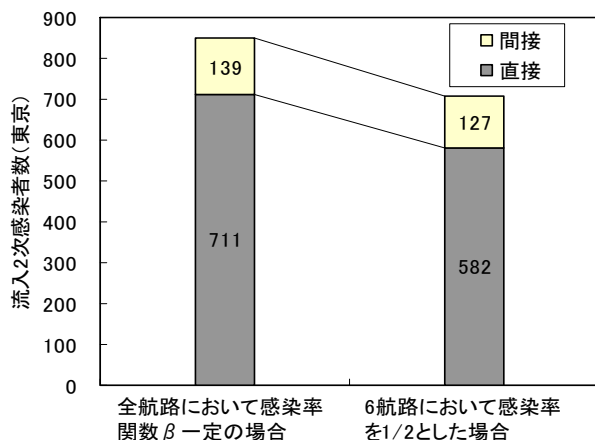


図 11 6 路線において感染率関数を変化させた場合の東京流入 2 次感染者数の変化

6 路線における感染率を半減できた場合、東京における

2 次感染者流入数は、直接で 18%、間接で 9%、全体で 17% 低減できることがわかった。

5. まとめ

(1) 日本における 2 次感染者流入リスクの早期警戒

a) WHO の SARS アラートについて

感染症の広域な流行を防止するためには、感染症の発生などに対する世界的な監視 (サーベイランス) や、感染症が確認された際の早期の対策を講じることが重要である。WHO は、2003 年の流行終息後に、SARS の再興の可能性を早期に注意喚起し、早急に適切な感染制御対策手法の導入を行い、迅速な診断を督促するとともに、公衆衛生上の対策を開始し、必要な場合は世界的警戒態勢を喚起するため、SARS アラート機構 (SARS への注意喚起のシステム)¹⁵⁾ を導入している。WHO は SARS の流行 (疫学的状況) をフェーズ 0 からフェーズ 5 まで分類しており¹⁶⁾、加盟国より症例の報告があるとその報告に基づきアラートを発する。

表 7 前流行、流行時の準備レベル (WHO)

段階	疫学的状況	
Phase0	人間社会で SARS-CoV ウイルスの伝播を示す証拠が報告されていない	
Phase1	SARS の散発的な症例の報告	
Phase2	Level1	1 箇所における伝播連鎖
	Level2	国際的な拡散の証拠がない場合における 2 箇所以上での伝播連鎖
Phase3	国際的な拡散	
Phase4	アウトブレイクの低減	
Phase5	世界的な SARS-CoV ウイルス伝播の封じ込め (流行の封じ込め)	

b) 警戒すべき地域と路線

本研究におけるシミュレーション実験より、Phase2 のアラートが発せられた場合において、症例報告が次の地域 (都市) である場合は、航空機ネットワークを介して日本に感染者の流入が危惧されるため、早期の警戒と対策・準備が必要であると言える。

- ① フランクフルト
- ② バンコク
- ③ ニューヨーク

また、phase3 (世界的な伝播拡散) に至った場合は、特に次の航路における渡航者のスクリーニングを重点的に行う必要がある。

- ① フランクフルト-シンガポール間航路
- ② パリ-シンガポール間航路
- ③ ニューヨーク-シンガポール間航路

(2) 2 次感染者が流入しやすい地域での症例報告

シミュレーション実験より、ロサンゼルス、東京及びパリなどにおいて、航空機による感染者の流入危険が大きいことがわかった。これらの地域において輸入症例が報告された場合には、航空ネットワークを介した感染者の拡散が起こっている可能性が高いため、症例を確認した国は早期に WHO などの国際機関に通報するとともに、世界的な拡散に対し特に警戒を強める必要があるといえる。

(3) 航空機を介した 2 次感染者拡散の防止と検査

a) 空港における検査の現状

日本に入国する海外渡航者の検査は、検査感染症⁴⁾の流

行地域（感染症法に定められた第1類感染症，コレラ，黄熱の流行地域）から入国する者に対し，「検疫質問票」に氏名，滞在国，過去3週間にあった症状等の必要事項を記入させ，検疫官が確認するという方法が一般的である．この方法は渡航者の自主性に因るところが大きい．

b) 検疫を強化した場合の効果の予測

シミュレーション実験により，検疫における感染者のスクリーニングにより感染者の半数に対して渡航を制限できれば，感染者の拡散を全体で48.1%低減でき，その効果が大きいことが確認された．感染症サーベイランスの強化とともに，検疫でのスクリーニングの精度向上に向けた技術的，法制的な取り組みが急務であると言えよう．

(4) 航空機内感染伝播の低減について

シミュレーション実験により，日本における感染者流入リスクを低減させるためには，直接日本に就航する航路のみでなく，日本以外の都市間を結ぶ航路においても機内感染を防止することが必要であること明らかになった．航空会社は，自社の就航路線で機内感染が発生した場合に影響を与える国を把握し，当該国や，当該国に就航する他の航空会社と連携して，機内感染防止に当ることが求められる．

補注

- 1 感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律（平成10年10月2日法律第114号）
- 2 感染症対策の樹立に結びつくような疾病情報を把握するシステム
- 3 検疫法（昭和26年6月6日法律第201号）第2条（検疫感染症）

参考文献

- 1) 世界保健機構：重症急性呼吸器症候群（SARS），厚生労働省健康局結核感染症課監訳，2003
- 2) 感染症情報センターホームページ：感染症の話，重症急性呼吸器症候群 http://idsc.nih.go.jp/idwr/kansen/k05/k05_06/k05_06.html（2006年5月にアクセス）
- 3) John T Bowen JR and Christian Laroe：Airline networks and the international diffusion of severe acute respiratory syndrome(SARS), *The Geographical Journal* vol. 172 P130-144, 2006, 6
- 4) 長崎県医療政策課HP：感染症とは，<http://www.pref.nagasaki.jp/iryoku/kansen/kansen1.htm>（2006年6月にアクセス）
- 5) 法令データ提供システム：感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律（平成10年10月2日法律第114号），<http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxsearch.cgi>（2006年7月にアクセス）．
- 6) 世界保健機構：重症急性呼吸器症候群(SARS)の疫学に関する統一見解文書，国立感染症研究所感染症情報センター訳，2003.，<http://idsc.nih.go.jp/disease/sars/update101who.pdf>（2006年7月にアクセス）
- 7) 感染症情報センターホームページ：SARSと空路の旅行，<http://idsc.nih.go.jp/disease/sars/update65-air.html>（2006年7月にアクセス）
- 8) Sonja J. Olsen, Ph. D et al.：Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome on Aircraft, *The NEW ENGLAND JOURNAL of MEDICINE*, 2003, <http://content.nejm.org/>（2006年6月にアクセス）
- 9) 稲葉寿：数理人口学，財団法人東京大学出版，2002
- 10) 佐々木哲人，中山晴幸：東アジアにおける空港特性の比較，日本大学社会交通工学科，2001，<http://www.trpt.cst.nihon-u.ac.jp/INFOLAB/index.html>（2006年8月にアクセス）
- 11) 佐々木哲人，中山晴幸：北米・西欧と日本の空港特性の比較，日本大学社会交通工学科，2000，<http://www.trpt.cst.nihon-u.ac.jp/INFOLAB/index.html>（2006年8月にアクセス）

- 12) 国際民間航空機構：Traffic by Flight Stage/TFS, 2001
- 13) tabiSAISON HP：オンライン国際線時刻表，<http://www.free-bird.co.jp/SAISON/ScheduleSearch/input.asp>（2006年8～9月にアクセス）
- 14) 福田光之：SARS危機管理の諸問題，秋田医報 8/1号，<http://www.mfukuda.com/isikai/kantougen.htm>
- 15) 感染症情報センター：SARSの集団発生終息後の期間におけるアラート，情報確認，公衆衛生上の管理，2003, 8 (<http://idsc.nih.go.jp/disease/sars/sars03w/04WHO-aug14.pdf>)
- 16) 世界保健機構：WHO SARS Risk Assessment and Preparedness Framework, 2004, 10 (http://www.who.int/csr/resources/publications/CDS_CSR_ARO_2004_2.pdf)
- 17) (財)国際保険医療交流センターHP：<http://www.acih.com/emd2003.html>（2006年9月にアクセス）
- 18) 中国国際航空 HP：<http://www.china-airlines.co.jp/>（2006年8月にアクセス）
- 19) シンガポールエアライン HP：http://www.singaporeair.com/saa/en_UK/index.jsp（2006年8月にアクセス）
- 20) キャセイパシフィック航空 HP：http://www.cathaypacific.com/cpa/ja_JP/homepage（2006年8月にアクセス）
- 21) タイ国際航空 HP：<http://www.thaiair.co.jp/index2.html>（2006年8月にアクセス）
- 22) ノースウエスト航空 HP：<http://www.nwa.com/jp/jp/>（2006年8月にアクセス）
- 23) エバー航空 HP：<http://www.evaair.com/html/b2c/japanese/>（2006年8月にアクセス）
- 24) アメリカン航空 HP：<http://www.aal.co.jp/>（2006年8月にアクセス）
- 25) コンチネンタル航空 HP：<http://www.continental.com/web/ja-JP/>（2006年8月にアクセス）
- 26) デルタ航空 HP：<http://www.delta.com/home/index.jsp>（2006年8月にアクセス）
- 27) エールフランス航空 HP：<http://www.airfrance.co.jp/index2.html?http%3A/www.airfrance.co.jp/>（2006年8月にアクセス）
- 28) 日本航空 HP：<http://www.jal.co.jp/>（2006年8月にアクセス）
- 29) 全日空 HP：<http://www.ana.co.jp/asw/index.jsp>（2006年8月にアクセス）
- 30) 中井健介：SARS（重症急性呼吸器症候群）の流行モデルとその広がり予測，中央大学理工学部情報工学科卒業論文，2004，<http://www.ise.chuo-u.ac.jp/ise-labs/taguchi-lab/pdf/r00d8101041.pdf>（2006年6月にアクセス）
- 31) 元山琢人，高堀章，永作浩：地域社会の風習・慣習及び経済規模と感染症拡散リスクとの関連，筑波大学大学院システム情報工学科リスク工学グループ演習，2005，<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~gshoji/kougi/sys/riskeng/G1.pdf>（2006年5月にアクセス）