

2006/09/29 リスク工学グループ演習最終発表会

P R E S E N T A T I O N

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～

第5班

田口 元寿・武末 祐樹・塚本 忠嗣  
アドバイザー 庄司 学



# 発表の流れ

1. 背景・目的
2. 感染症の定義と種類
3. 航空ネットワークを介した感染症拡散モデル
4. 拡散シミュレーションモデルを用いた数値実験
5. まとめ

# 1-1. 背景・目的

## 感染症の脅威

- ・甚大な**死亡者数**
- ・新興感染症の発生
- ・広域な**蔓延** 等

マラリア	年間150～200万人の死亡
結核	年間300万人が死亡
ペスト	1830年代:2～3000万人死亡

## 新種の感染症(SARS等)の出現



**新感染症の対策報告**  
鹿大プロジェクトが講座

鹿児島大学が新型肺炎（SARS）や鳥インフルエンザなどの対策に立ち上げた「新興感染症対策研究プロジェクト」の市民講座が十三日、同大であった。関係者約百人が出席。医、獣医学の研究者が「鹿児島は畜産県で感染すると打撃が大きい」などとプロジェクトの意義を訴えた。

同プロジェクト委員長の大学院医歯学総合研究科の丸山征郎教授が一人の交流が進み、新しい感染症はすぐ全世界に広がる。国内で発生した高病原性鳥インフルエンザは野鳥が媒介したことが分か

鹿児島大学が新型肺炎（SARS）や鳥インフルエンザなどの対策に立ち上げた「新興感染症対策研究プロジェクト」の市民講座が十三日、同大であった。関係者約百人が出席。医、獣医学の研究者が「鹿児島は畜産県で感染すると打撃が大きい」などとプロジェクトの意義を訴えた。

同プロジェクト委員長の大学院医歯学総合研究科の丸山征郎教授が一人の交流が進み、新しい感染症はすぐ全世界に広がる。国内で発生した高病原性鳥インフルエンザは野鳥が媒介したことが分か

南日本新聞(2004年6月15日)

り、農学部の高瀬公三教授は出水のツルについて言及。二〇〇一、〇四年の調査で感染例がなかったことを報告した。

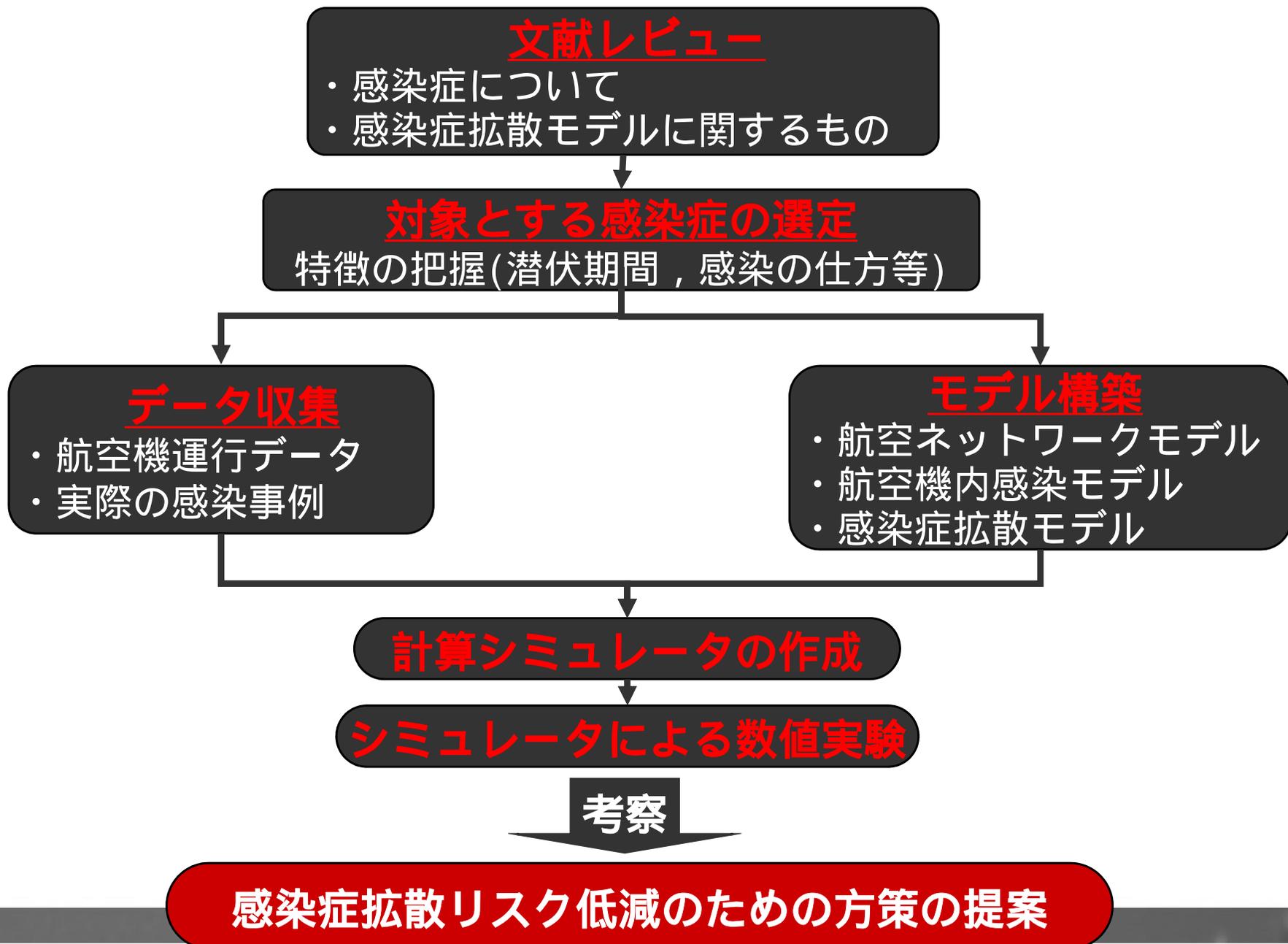
## 拡散リスクの増加

【研究目的】

# 航空機による感染症拡散リスク低減策の考案



## 1-2. 背景・目的 本研究の流れ

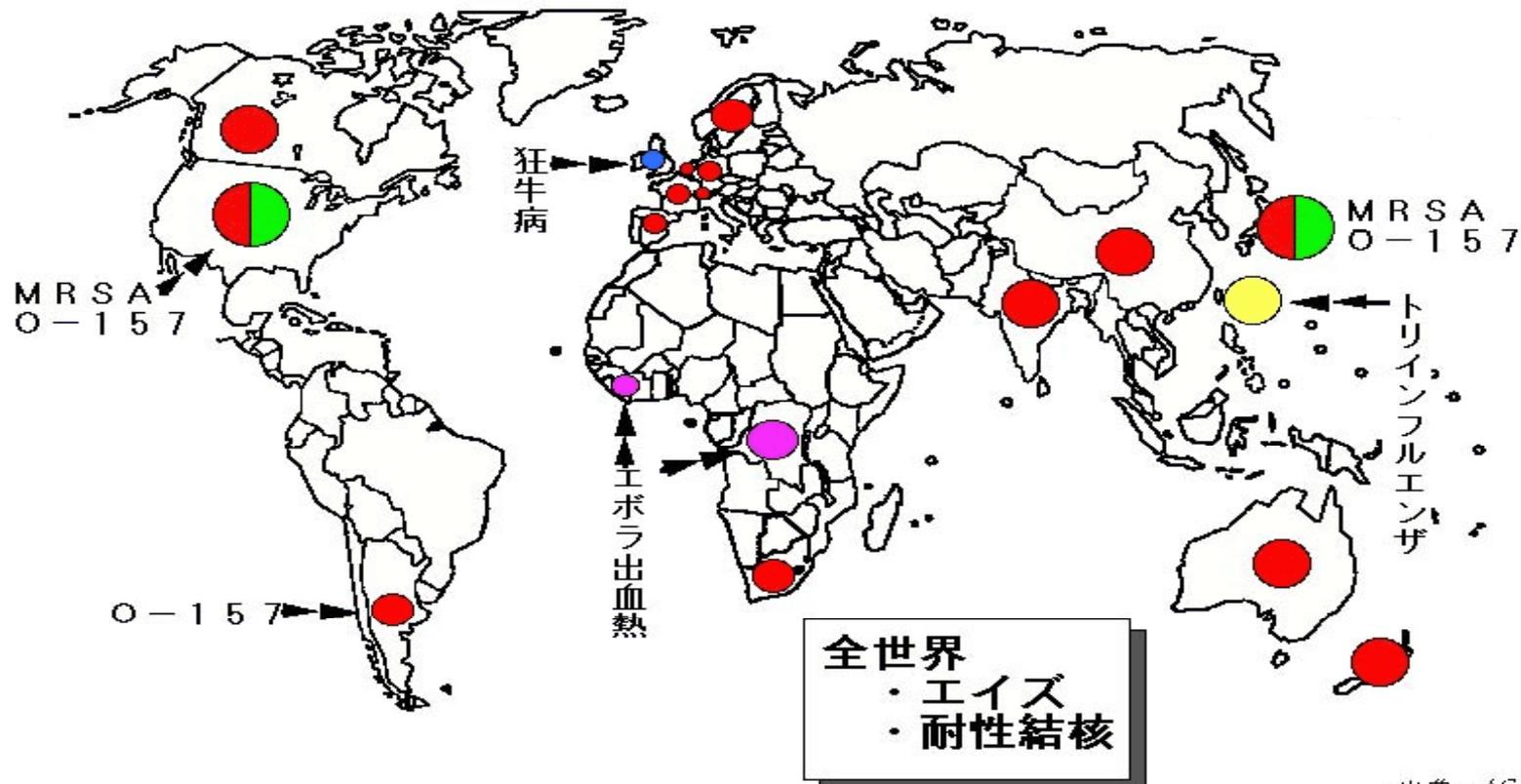


## 2-1. 感染症について

**感染症とは**

水, 土, 空気, 動物(人を含む) 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

(長崎県医療政策課HP より)

**世界に蔓延する様々な感染症**

国際保険医療交流センターHP(<http://www.acih.com/emd-map.html>)より

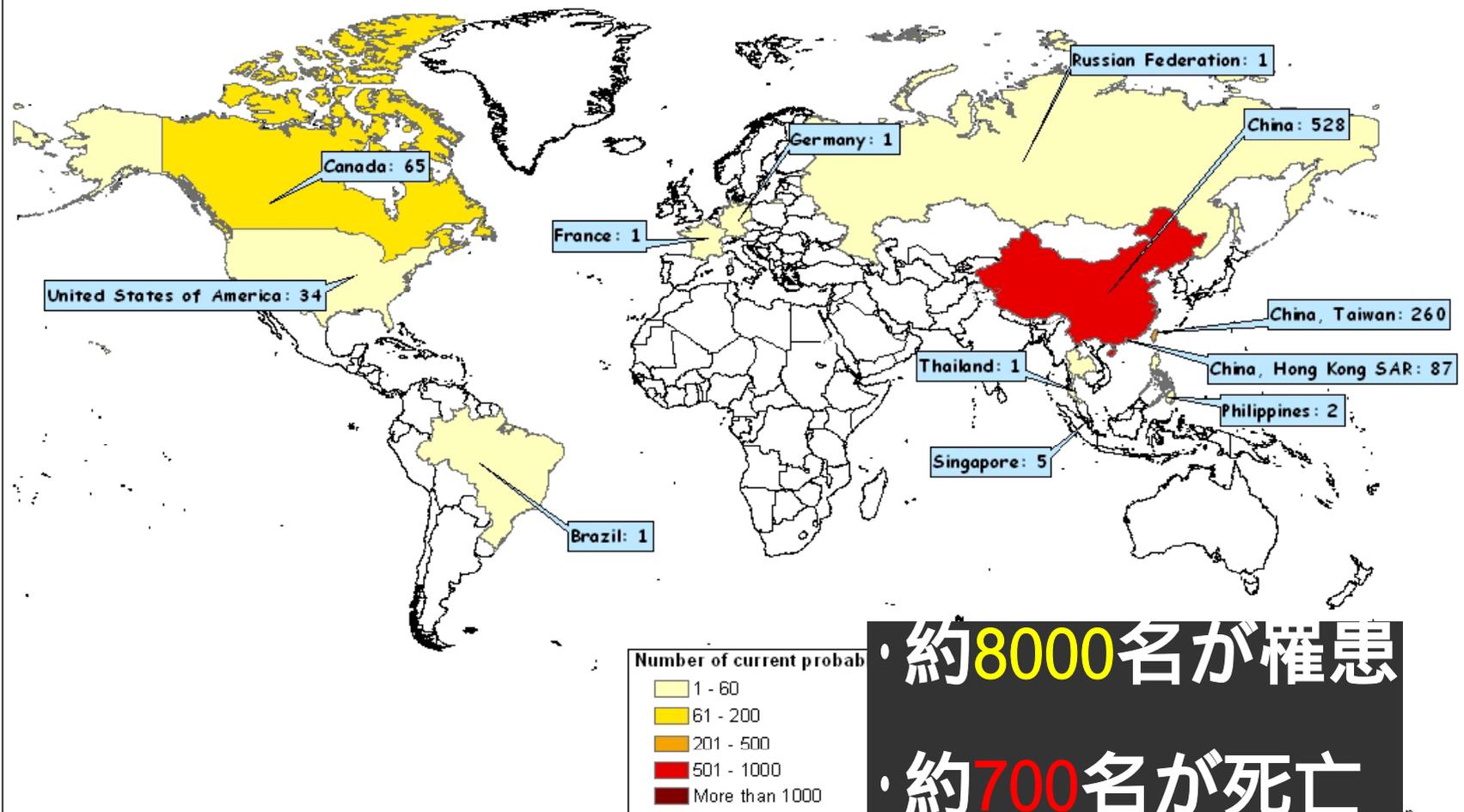
出典: ACIH



## 2-2. 感染症について

## 新しい感染症例 SARS (Sever Acute Respiratory Syndrome)

SARS: Number of Current Probable Cases as of 12 June 2003, 17:00 GMT+2



・約8000名が罹患

・約700名が死亡



The presentation of material on the maps contained herein does not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or areas or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

Map Production: Public Health Mapping Team  
Communicable Diseases (CDS)  
© World Health Organization, June 2003

WHO([http://www.who.int/csr/sars/map2003\\_06\\_12.jpg](http://www.who.int/csr/sars/map2003_06_12.jpg))より



## 2-3. 感染症について

## 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(感染症法)による感染症の分類

第1類 感染症	感染力,罹患した場合の重篤性に基づく総合的な観点から見た危険性が極めて高い感染症(現在7疾患)	エボラ出血熱,クリミア・コンゴ出血熱,重症急性呼吸器症候群(病原体がSARSコロナウイルスであるものに限る),痘そう,ペスト,マールブルグ病,ラッサ熱
第2類 感染症	感染力,罹患した場合の重篤性に基づく総合的な観点から見た危険性が高い感染症(現在6疾患)	急性灰白髄炎,コレラ,細菌性赤痢,ジフテリア,腸チフス及びパラチフス
第3類 感染症	感染力,罹患した場合の重篤性に基づく総合的な観点から見た危険性は高くないが,特定の職業への就業によって感染症の集団発生を起こしうる感染症(現在1疾患)	腸管出血性大腸菌感染症
第4類 感染症	動物又はその死体,飲食物,衣類,寝具その他の物件を介して人に感染し,国民の健康に影響を与えるおそれのある感染症(現在30疾患)	E型肝炎,ウエストナイル熱,A型肝炎,エキノコックス症,黄熱,オウム病,回帰熱,Q熱,狂犬病,高病原性鳥インフルエンザ など
第5類 感染症	国が感染症発生動向調査を行い,その結果等に基づいて必要な情報を国民や医療関係者等に提供・公開していくことにより,発生・拡大を防止すべき感染症(現在42疾患)	アメーバー赤痢,急性ウイルス性肝炎(A型及びE型を除く),クロイツフェルト・ヤコブ病,劇症型溶血性レンサ球菌感染症,後天性免疫不全症候群,髄膜炎菌性髄膜炎,先天性風疹症候群,梅毒,破傷風 など
指定 感染症	既知の感染症の中で1類から3類に準じた対応の必要性が生じた感染症で,1年を限度として政令で指定するもの	現在指定なし
新感染症	人から人に伝染すると認められる疾病であって,既知の感染症と病状等が明らかに異なり,その伝染力及び罹患した場合の重篤度から判断した危険性が極めて高い感染症	現在指定なし

危険性が極めて高い第1類感染症に着目



### 3. 本研究で対象とする感染症

#### Sever Acute Respiratory Syndrome (重症急性呼吸器症候群)

▶ **病原体** SARSコロナウイルス (**SARS-CoV**)

▶ **感染方法**

主に接触感染又は飛沫感染  
(但し、空気感染も否定されていない)

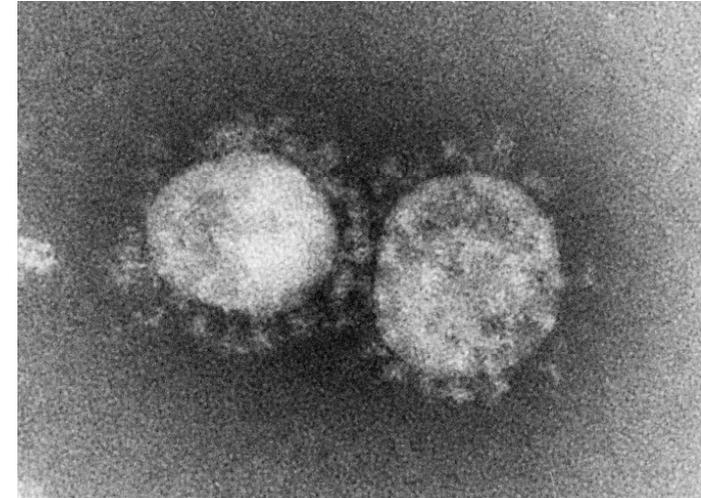
▶ **感染力**

感染力が最も高まるのは、発症後10日  
(ヒトで感染源になるのは有症者のみ)

潜伏期間は2～10日，平均5日

▶ **航空機内感染例**

航空機内 (B737-300型機，120名搭乗) において、スーパースプレッディング事例が報告されている



**SARS-CoV**

国立感染症研究所SARS診断グループ撮影

これらの特徴より，**対象とする感染症をSARSとする**

## 5. SARSの航空機内感染事例

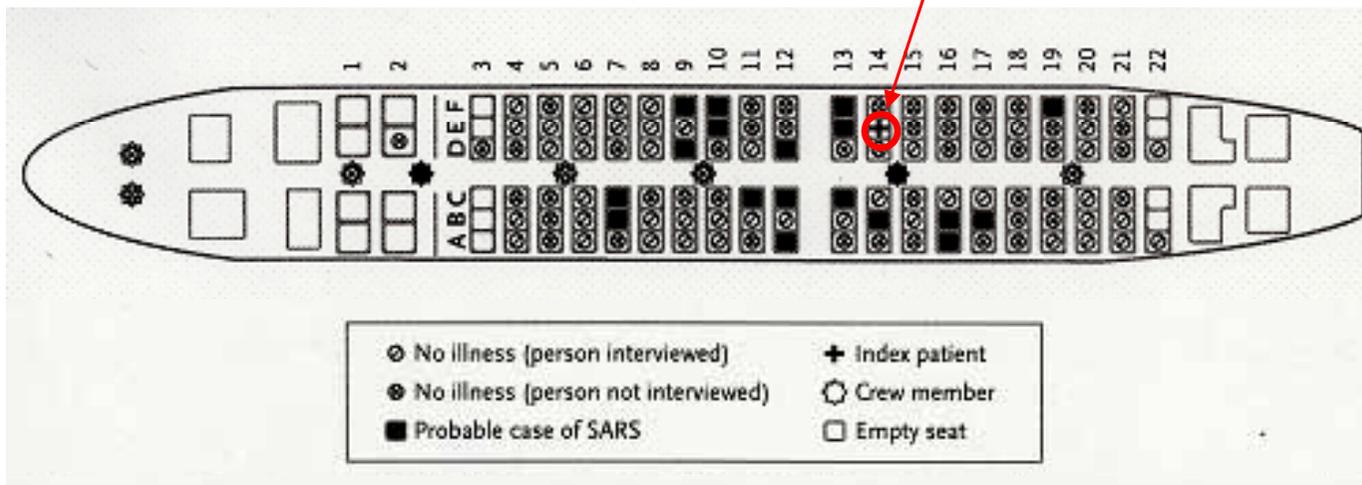
## SARSのスーパープレッディング事例

状況

- 2003年3月21日
- 香港発北京行き（B737-300型機）
- 120名が搭乗（乗務員6名，乗客112名，搭乗率80%）
- 飛行時間：約3時間
- SARSに感染した1名の有症者が搭乗

結果

22名が感染（搭乗者の18.3%）



Sonja J.Olsen, Ph.D., Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome on Aircraft, 2003



## 6. 感染症拡散リスク分析の枠組

本研究での**感染症拡散リスクの定義**

航空機を介して拡散する**2次感染者数**

航空機内感染 = スーパースプレディング  
による悲観的シナリオ

**Scenario Planning Approach** による分析

**リスクマネージメントに必要な方策の検討**

対策例

**サーベイランス（監視）**

ex) 渡航者への注意の呼びかけ

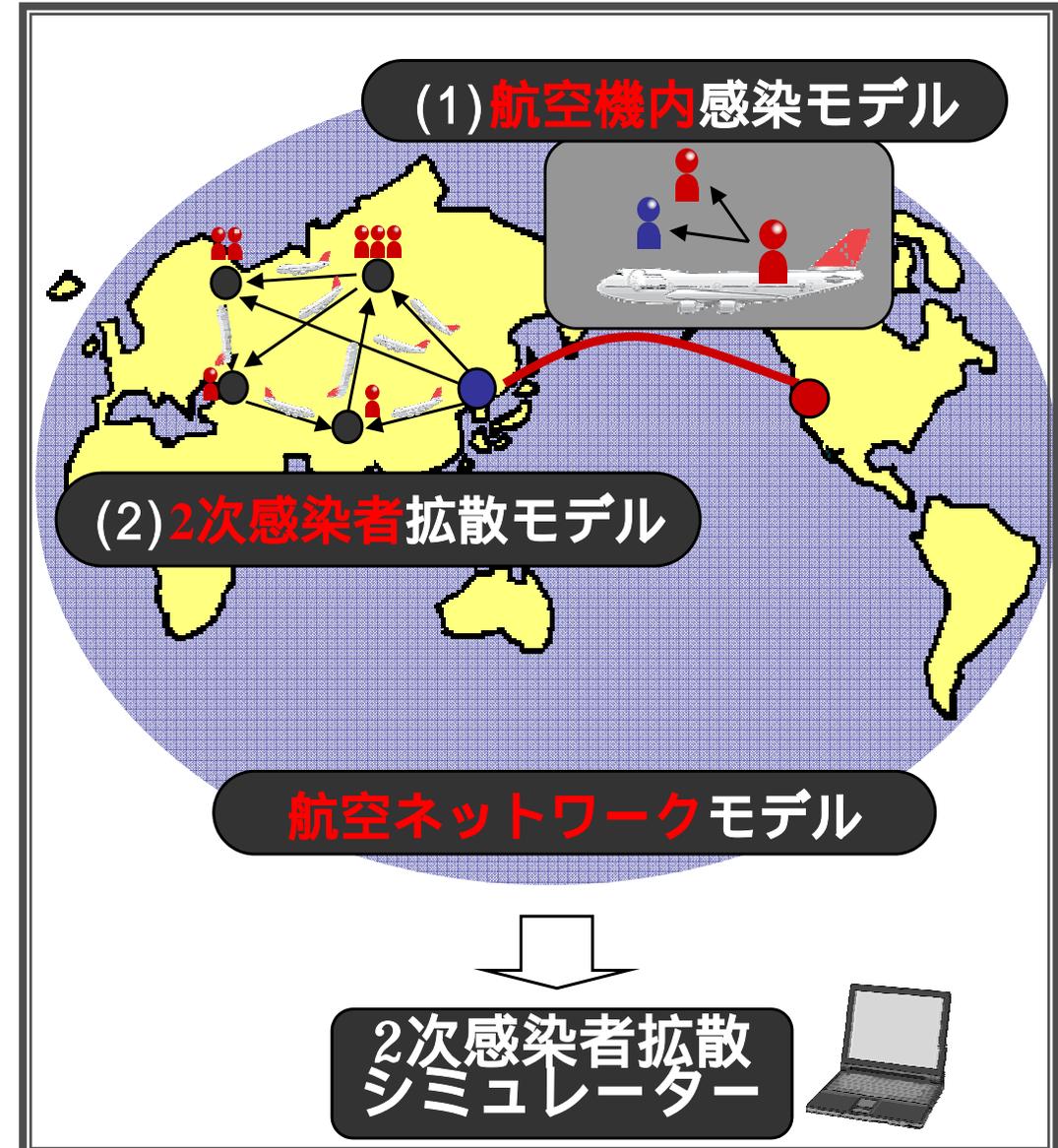
**検疫による感染者拡散防止**

ex) サーモグラフィーを用いたスクリーニング

**航空機内の感染防止**

ex) 高性能フィルターの設置, マスクの配布

きめ細かな**モデル**の構築  
**シミュレーター**の作成

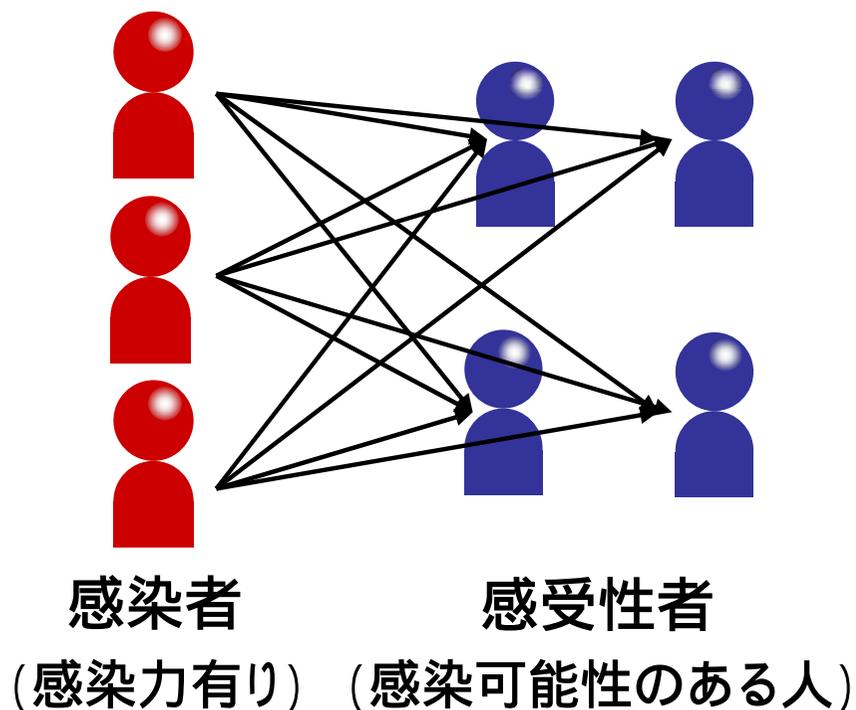


## 7-1. 感染症流行モデル(KMMモデル)

## (1)KMMモデルの概念

## 感染症流行モデル:ケルマン・マッケンドリック(KMM)モデル

## KMMモデルの概念



感染者と感受性者の  
均等接触を仮定

感染者と感受性者の組合せ数

||

感染者数と感受性者数の積  
に比例して感染者が増加する

## 7-2. 感染症流行モデル(KMMモデル)

## (2)KMMモデルの定式化

## ケルマン・マッケンドリック(KMM)モデル式

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

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

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

$$S(t) + I(t) + R(t) = N$$

$S(t)$  : ある時刻  $t$  における**感受性**人口

$I(t)$  : ある時刻  $t$  における**感染**人口

$R(t)$  : ある時刻  $t$  において**隔離**された人口

$N$  : 系内人口

$\beta$  : 感染率

$\gamma$  : 除去率



## 8-1. 本研究における航空機内感染モデルの仮定(条件)

KMMモデル: 航空機内感染モデルとして**直接適用できない** ▶ **モデルの修正**



### 航空機内での感染

- ▶ **感染率** → 航空機内空間を共有する時間による
- ▶ **2次感染者の感染力** SARSの潜伏期間は**短くても2日程度**
  - ▶ SARSは**発症しないと感染力は発現しない**
    - ▶ **2次感染者は感染力を発現しない**
- ▶ **航空機内の除去** 航空機搭乗中の**2次感染者の死亡、隔離は考えない**
  - ▶ **機内での除去率は考慮しない**

### 航空機内で発生する2次感染者

**発症している感染者の数と航空機内の感受性者の積に比例**  
**感染率は時間の関数**

$$\Delta I = \beta(t) \cdot S \cdot I$$

$$S + I = n$$

$n$ : 航空機の搭乗者数

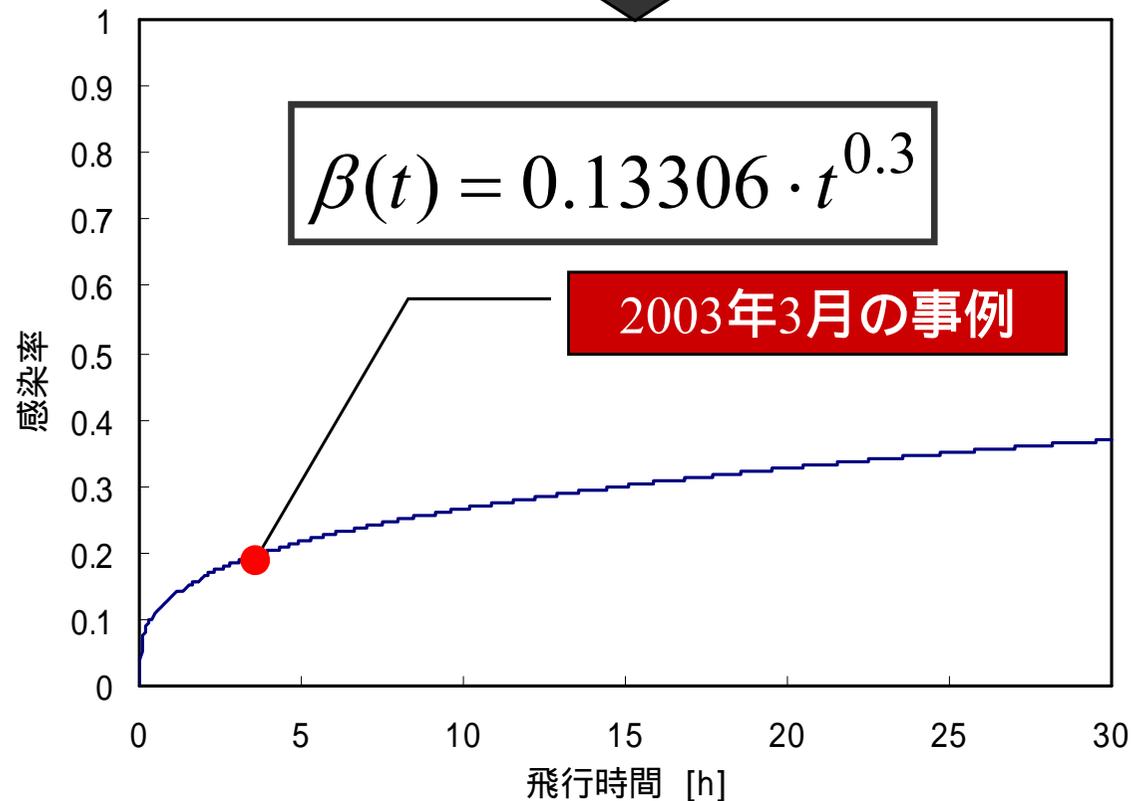


## 8-2. 本研究における航空機内感染モデルの仮定(条件)

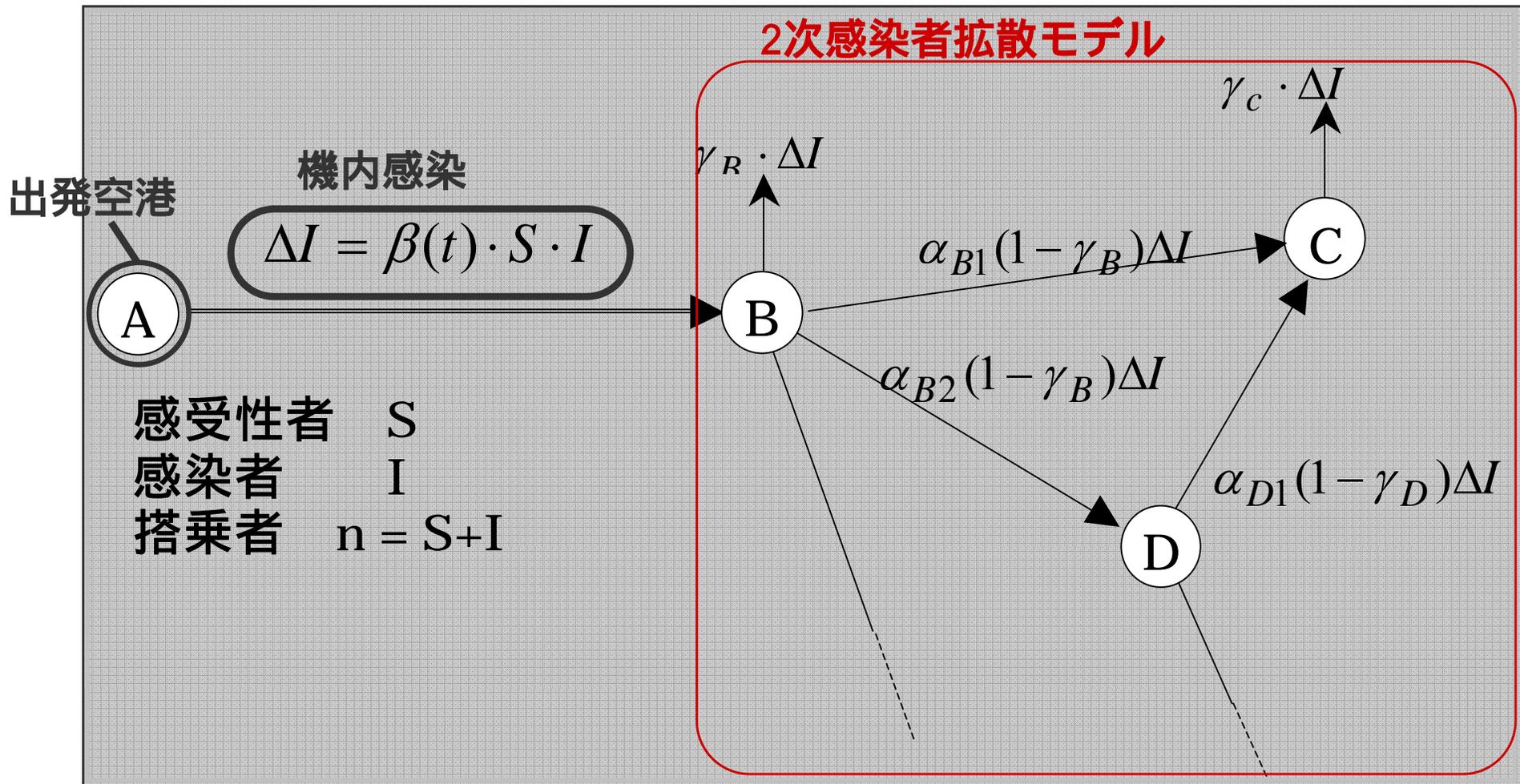
感染率関数  
( $t$ )

2003年3月の**スーパースプレディング事例**での飛行時間と感染率を考慮

時間の指数関数と仮定



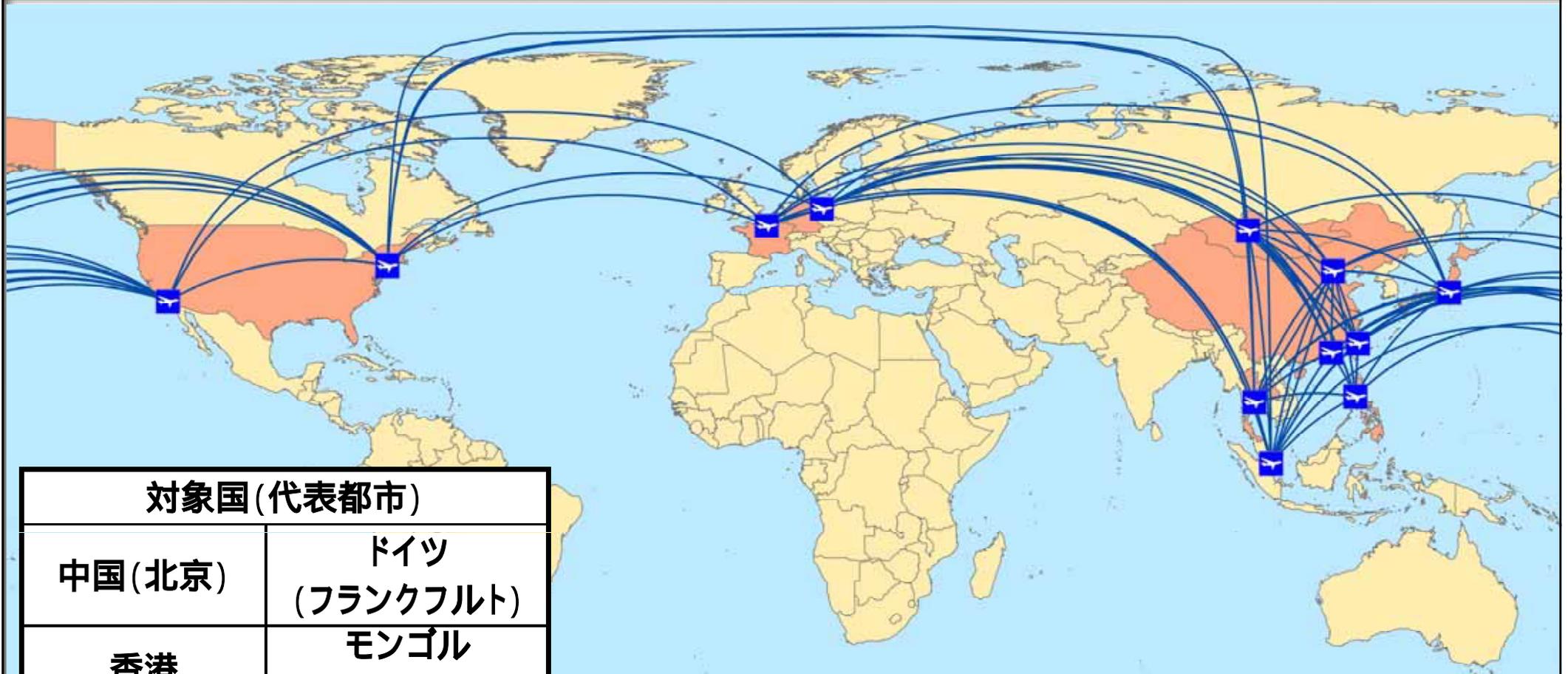
## 9. 2次感染者拡散モデルの構築



航路の重み付け係数： $\alpha_{Bi} = \frac{\text{航路の年間出発旅客者数}}{\text{空港Bでの年間出発旅客者数}}$  ( $\sum_{i=1}^n \alpha_{Bi} = 1$ )  
 (各航路への**分担率**)



## 10. 航空ネットワークモデル



対象国(代表都市)	
中国(北京)	ドイツ (フランクフルト)
香港	モンゴル (ウランバートル)
米国 (NY, LA)	シンガポール
台湾(台北)	フィリピン (マニラ)
タイ(バンコク)	フランス(パリ)

- ▶ 日本とSARS輸入症例の多かった10の国と地域を対象
- ▶ 各代表空港の乗換え率(1- )を既存研究から仮定
- ▶ 渡航者数はICAOデータによる(データの無い航路については実際の就航数, 使用機材から推定)

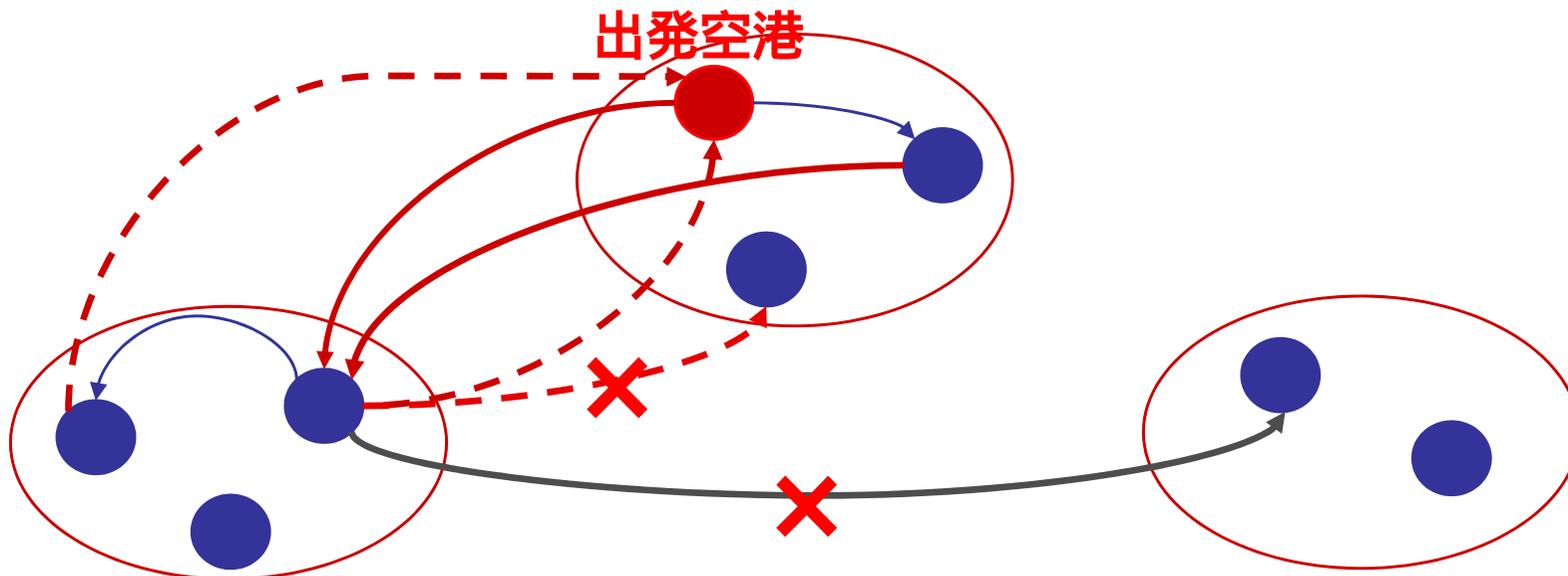
# 11. 渡航者の乗り継ぎアルゴリズム

## 乗り継ぎアルゴリズム

対象都市（空港）を3つのエリアに分類する。

エリア	ヨーロッパエリア	アジアエリア	アメリカエリア
対象都市	フランクフルト パリ	北京 香港 東京 台北	ニューヨーク ロスアンゼルス

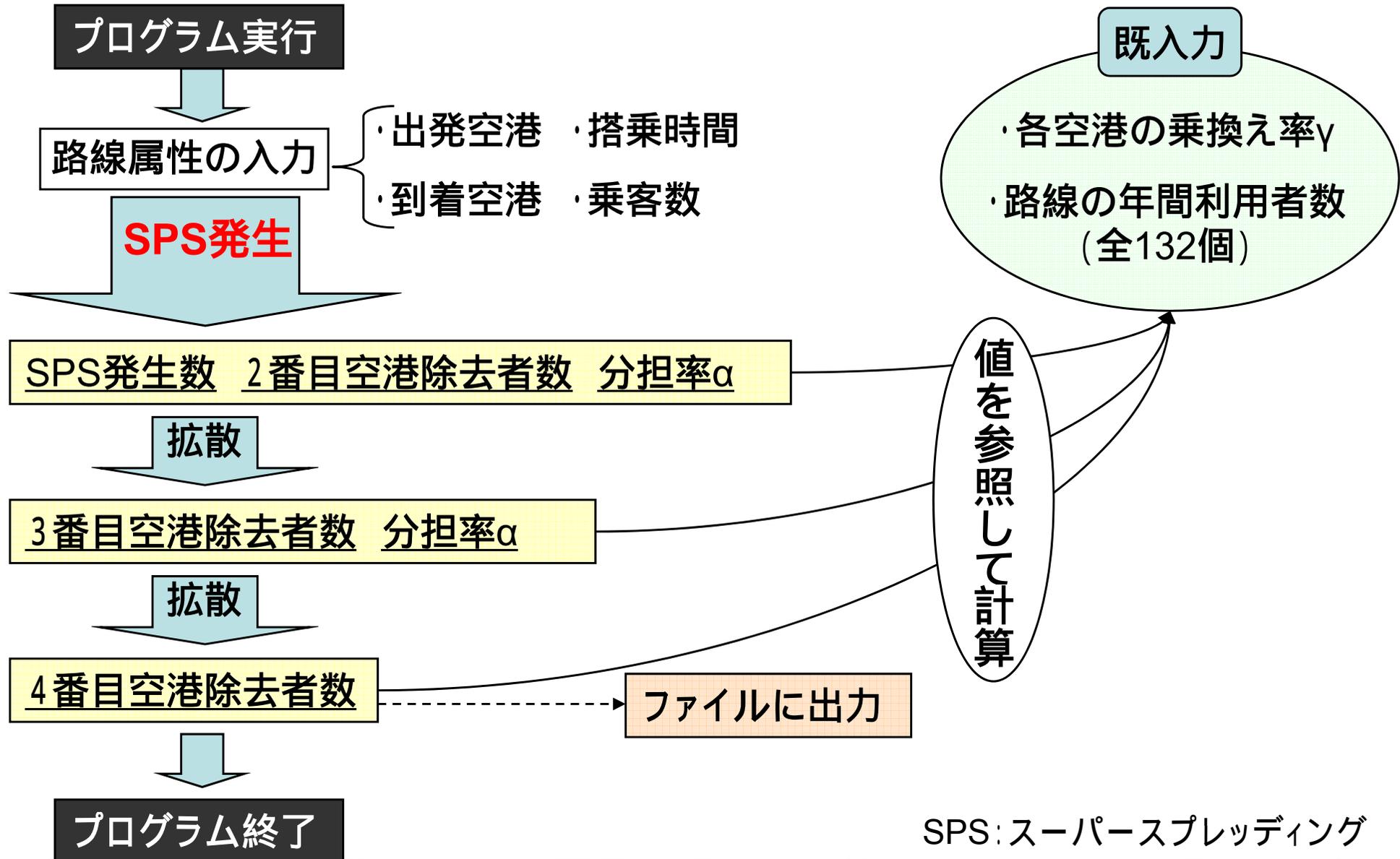
エリア間の長距離移動は、出発空港を起点とする往復以外は**1回のみ**とする。



渡航する感染者は、多くても**3回**の乗り継ぎで目的地に到達する

## 12-1. 数値実験による拡散シミュレーション

## (1) 拡散シミュレーターの計算アルゴリズム



## 12-2. 数値実験による拡散シミュレーション

## (2) シミュレータによる数値実験

## 目的

各stakeholderの視点から

**行政的視点** (拡散のサーベイランス)2次感染者流入リスクの高い  
地域と航路の把握**検疫者の視点**検疫による2次感染者拡散数の  
減少効果**航空会社の視点**機内感染率を下げた場合の  
効果

## 数値実験

構築した航空ネットワーク全航路  
( $12 \times 11 = 132$ 通り)における  
スーパースプレディングシミュレーション全航路に検疫除去確率0.5を  
適用して再計算より、東京へ流入する結果を抽出  
(**出発空港別**、**航路別**)それぞれの**上位3航路**の を  
1/2に設定して再計算

## 13-1. 数値実験の結果（行政的視点）

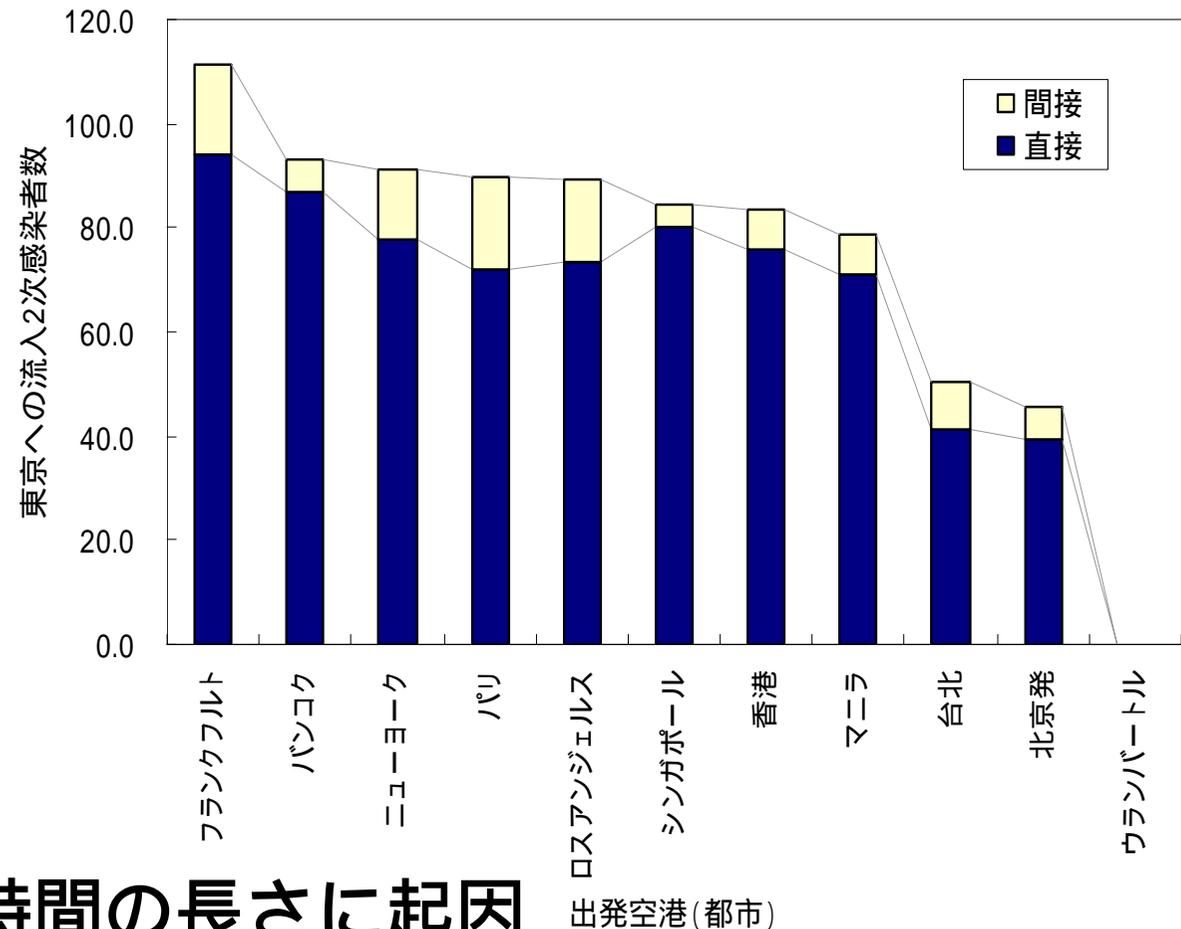
## (1) 出発空港に注目した東京への感染者流入数の比較

**間接：**

スーパースプレディングが起きた飛行機が東京以外の空港に到着する場合

**直接：**

スーパースプレディングが起きた飛行機が直接東京に到着する場合



- ・ 欧米各空港出発便 飛行時間の長さ起因
- ・ バンコク出発便 機体の大きさに起因

どの航路に危険性が存在するのかということについて「間接」に注目して考えるために、航路別に比較

# フランクフルト出発便における間接2次感染者の拡散

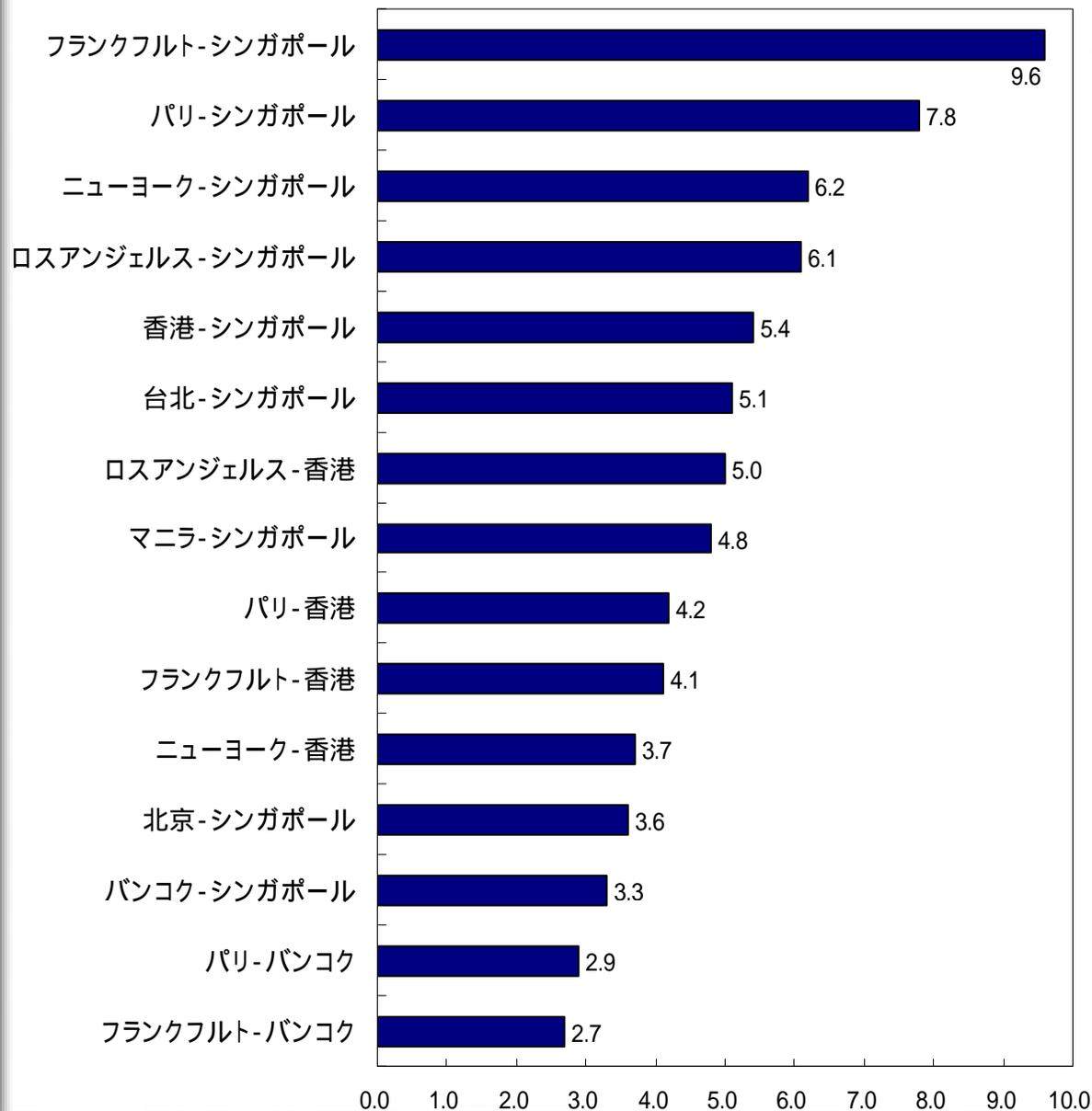


- ・シンガポール, LAなどへの長距離移動で2次感染者が多数発生
- ・シンガポール, バンコクなどアジア各都市を経由して東京へ流入



## 13-2. 数値実験の結果（行政的視点）

## (2) 航路に着目した東京への間接2次感染者流入数の比較



・東京への流入リスクが最も高い航路は、

**フランクフルト出発  
シンガポール到着**

・欧米エリア 東京について

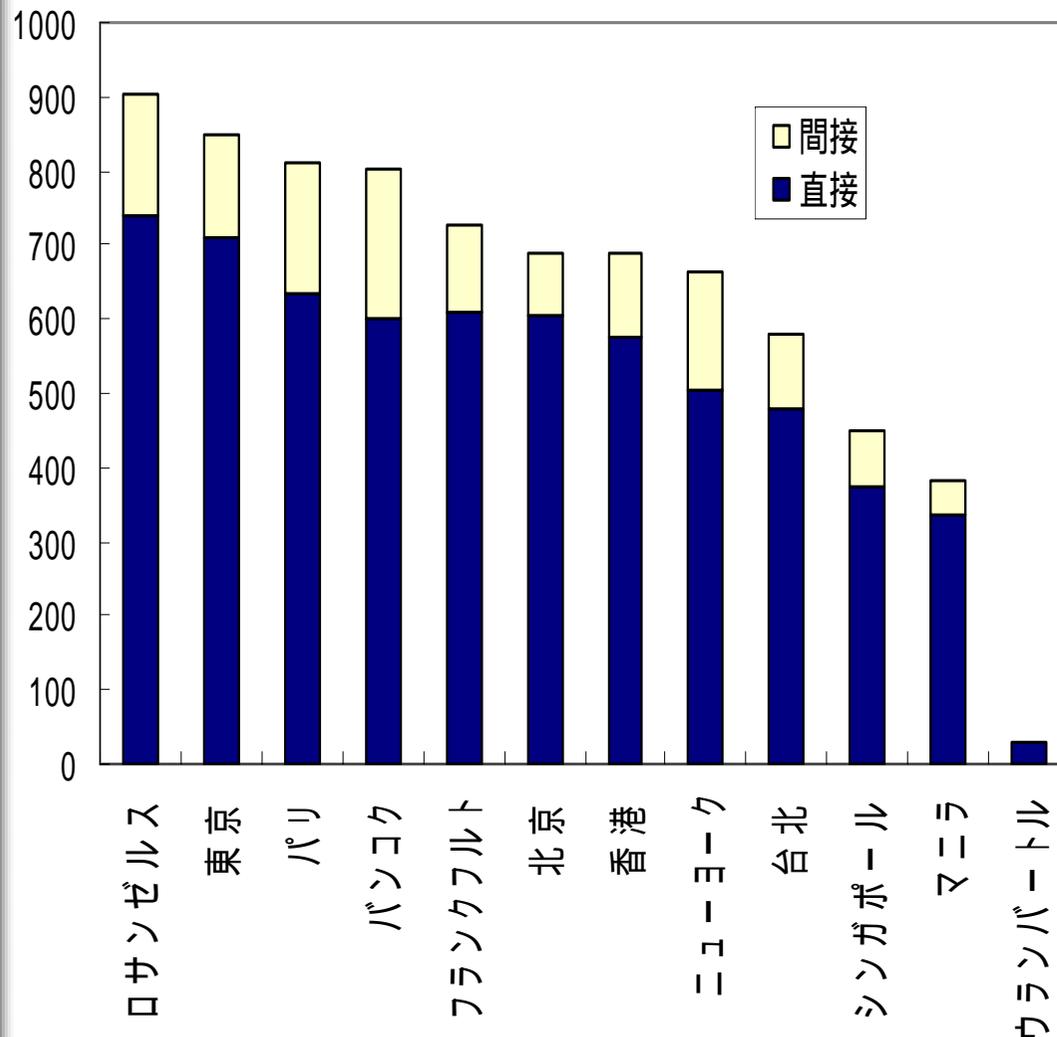
出発便で大量に発生した2次感染者が、アジアのハブ空港であるシンガポールを経由して日本に流入

・アジアエリア 東京について

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

## 13-3. 数値実験の結果(行政的視点)

## (3)各空港に流入する二次感染者数(積算)



・2次感染者の流入リスク  
が最も高い都市

ロसानジェルス

・東京も二次感染者流入  
リスクが高い

・間接流入数が最も多い  
都市はバンコク



## 13-4. 数値実験の結果(行政的視点)

## (4) 東京における感染者流入リスクへの早期警戒 (1~3より)

## ▶ 日本にとって警戒すべき地域

フランクフルト  
バンコク  
ニューヨーク

における症例報告



航空機を介した感染者の流入危険  
が増している



## ▶ 特に影響を与える航路

フランクフルト - シンガポール  
パリ - シンガポール  
ニューヨーク - シンガポール

に対して警戒する必要がある

## ▶ ロスアンゼルスでの輸入症例の報告

航空ネットワークへの感染者流入危険が高い

## WHOのSARSアラートのPhase

Phase		疫学的状況
Phase 0		人間社会でのSARSの伝播なし
Phase 1		散発的な症例の報告
Phase 2	Level 1	1ヶ所における伝播連鎖
	Level 2	非国際間の2ヶ所以上での伝播連鎖
Phase 3		国際的な拡散
Phase 4		アウトブレイクの低減
Phase 5		世界的な封じ込め

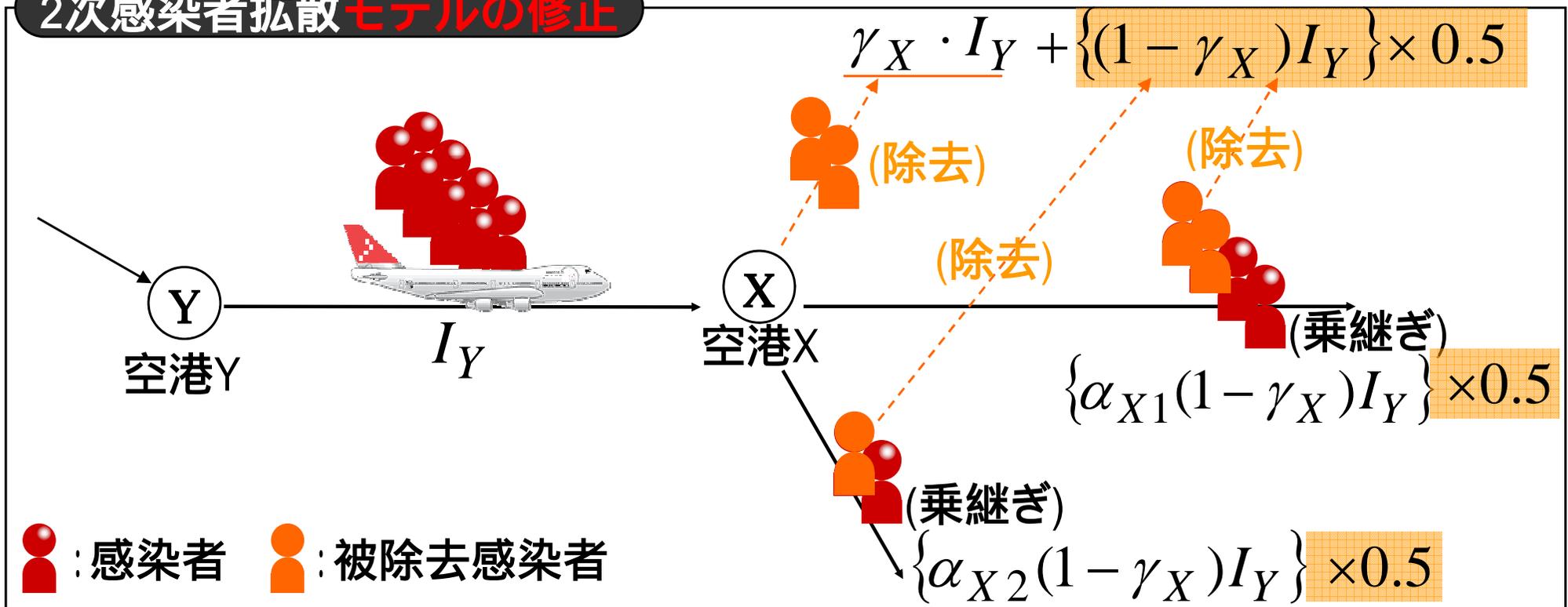
## 13-5. 数値実験の結果（検疫者の視点）

## (5) 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

## 仮定

- ・ 潜伏期間にある感染者の発見が可能である
- ・ 乗り継ぎを行おうとする感染者の**50%**を検疫により除去可能

## 2次感染者拡散モデルの修正



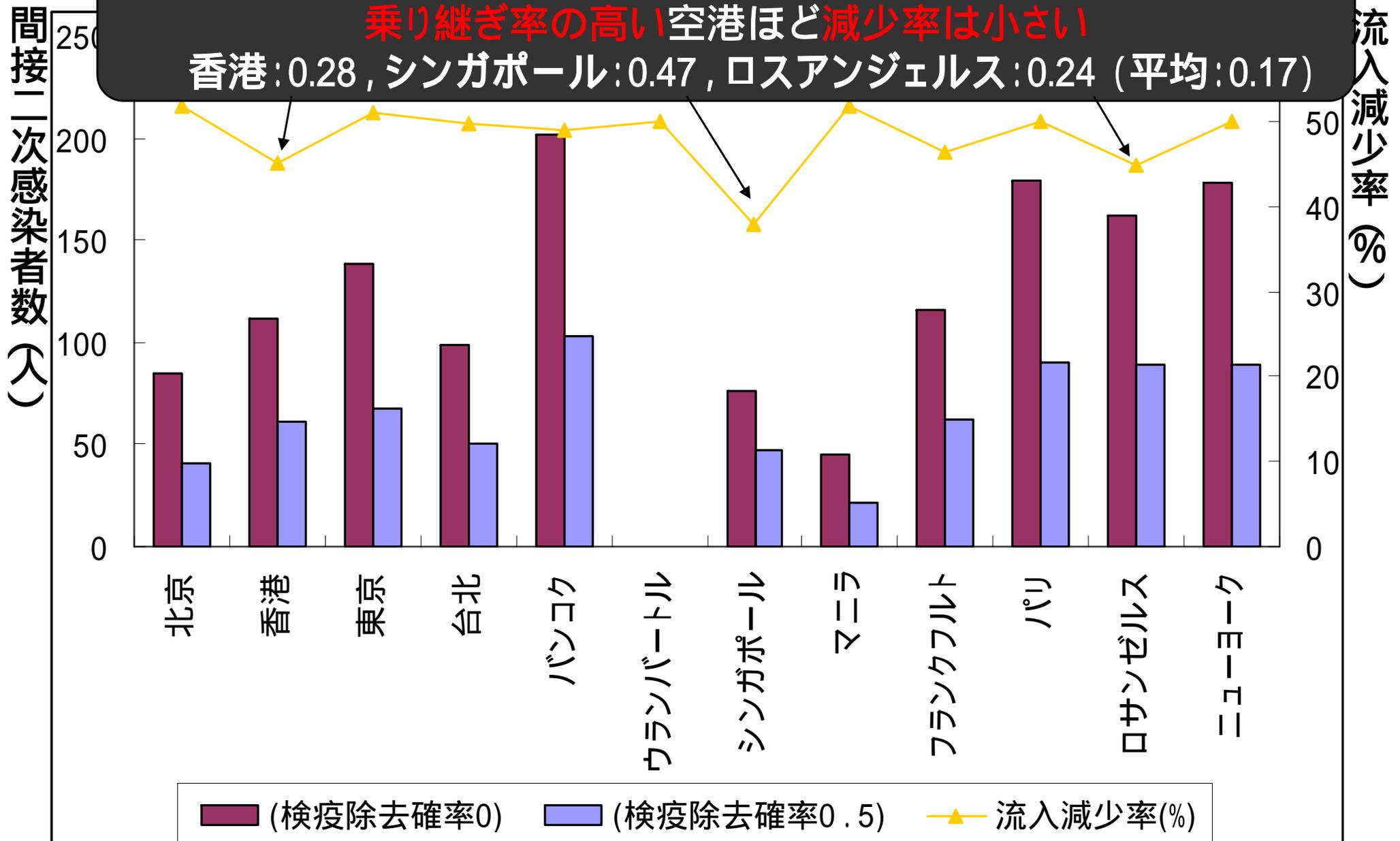
空港Xにおいてこれまで乗り継ぎを行う2次感染者のうち、その**半分**を検疫によって**除去**する。

### 13-6. 数値実験の結果 ( 検疫者の視点 )

各空港で全体的に概ね50%流入者数を減少できる .

乗り継ぎ率の高い空港ほど減少率は小さい

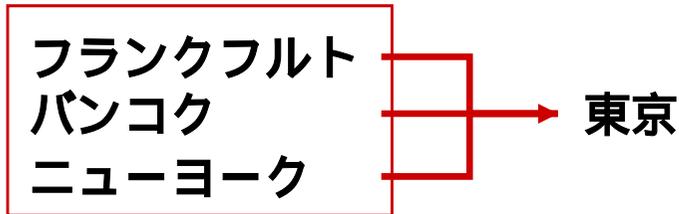
香港:0.28 , シンガポール:0.47 , ロサンゼルス:0.24 ( 平均:0.17)



# 13-7. 数値実験の結果 (航空会社の視点)

## (7) 航空機内感染の防止効果の評価

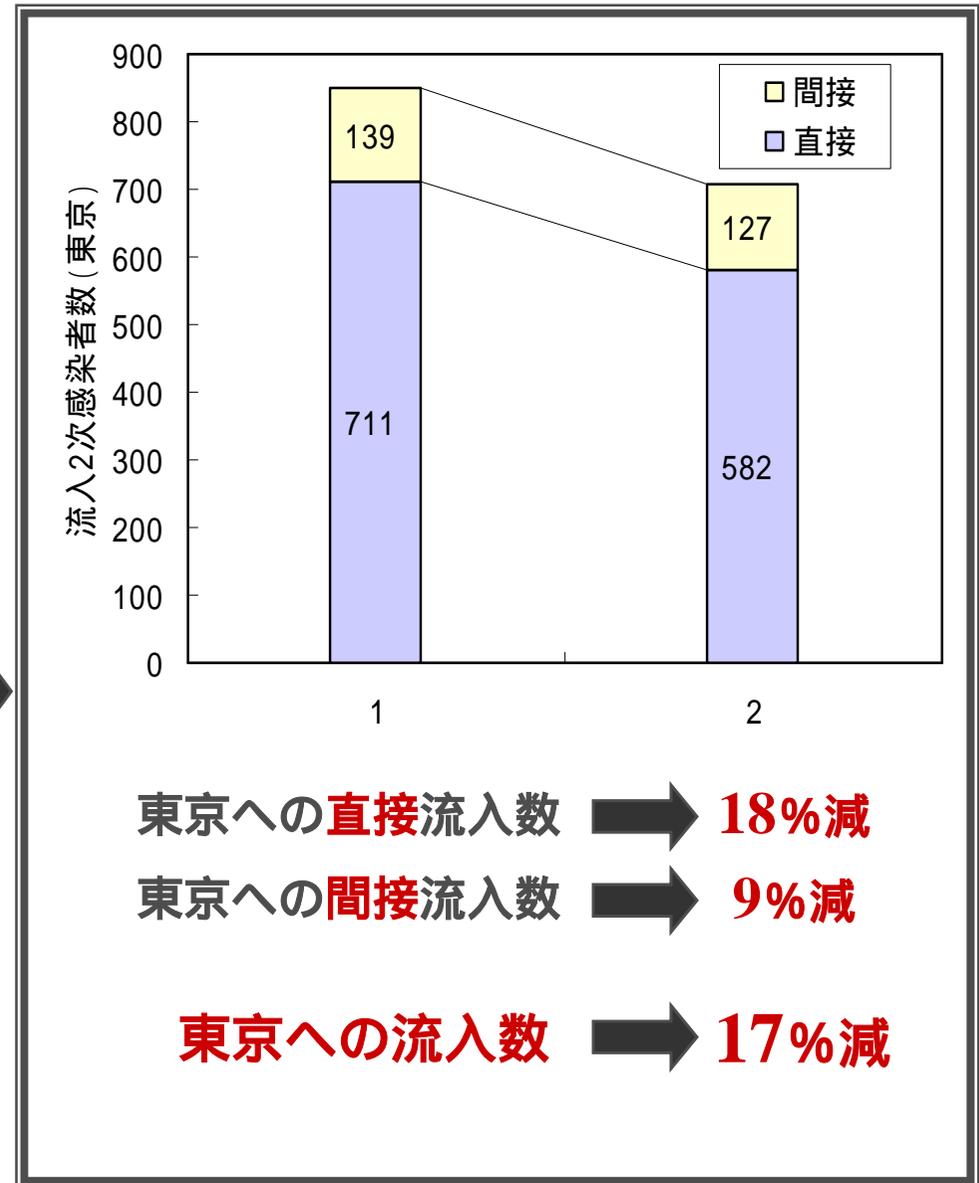
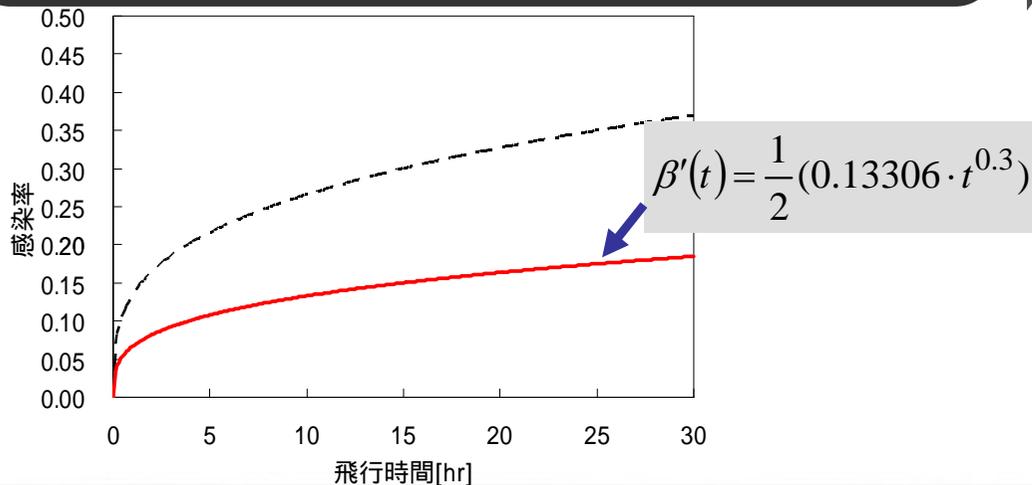
東京に流入する2次感染者が多くなる出発空港



東京に流入する間接2次感染者が多くなる航路

- フランクフルト - シンガポール
- パリ - シンガポール
- ニューヨーク - シンガポール

6航路で機内感染が半分に低減できた場合



## 14. まとめ

1. 航空ネットワークを介した感染症の拡散モデルを構築し、その拡散リスクについて定量的に把握することができた。
2. 本研究の仮定のもとで、感染症拡散リスクに対する分析として以下の成果が挙げられた。
  - (1) 東京への2次感染者流入リスクの高い地域と路線の特定
    - 東京への2次感染者流入リスクの高い国や路線を特定することができた。
  - (2) 対象都市において2次感染者が流入しやすい都市の特定
    - ロスアンゼルス、東京、パリなどが航空機による感染者流入リスクが高いことがわかった。
  - (3) 航空機を介した2次感染者拡散への検疫の効果
    - 検疫により潜伏期間にある感染者の半数に対して渡航を制限できると仮定した場合、感染者の拡散が全体で48.1%削減できることがわかった。
  - (4) 航空機内における感染率低減の効果
    - 東京に注目した場合、特定の都市、航路における機内での感染率を低減させることで感染者流入リスクを約17%低減できることがわかった。



## 15. 今後の課題

- **航空ネットワークの拡張**
  - より多くの都市を結ぶネットワークの拡張とシミュレーションアルゴリズムの開発
- **詳細な渡航者データの必要性**
  - ICAOデータに記載されていないデータに対するより詳細な調査
- **感染率関数の妥当性**
  - スーパースプレディング以外の事例も含めた感染事例の考慮
- **具体的な方策とその低減効果の解明**
  - 機内マスクや機内空気清浄フィルタなどによる感染率の低減効果の定量的把握
- **便数や搭乗者数を説明変数とした2次感染者流入リスク最小化のための最適システムの構築**
  - 便数や機体をより細かく考慮に入れたモデルの考案

