

ワクチン助成制度のシミュレーション分析 — ABMによるアプローチ

○薛 キョウ 市川 学 出口 弘 (東京工業大学)

Simulation Analysis of vaccination subsidy, with ABM approach

*Jiao Xue, Manabu Ichikawa and Hiroshi Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

Abstract— Vaccination subsidy is one of the major types of public health services. In order to evaluate the effectiveness of the subsidy, this research carries out an agent-based simulation to investigate the relationships between subsidy, vaccination intention and behavior. We introduce a model to evaluate vaccination awareness of individual by considering initial attitude towards vaccination, risk cognition, and subjective norms in a comprehensive manner. By integrating the vaccination awareness parameters into our epidemic model, we simulate vaccination decision process based on psychological and socio-demographic variables of each agent, and then represent the effectiveness of the subsidy along with the process of changing vaccination awareness. From this simulation result, the model suggests that vaccination subsidy is an effective infectious control policy in public health services field.

Key Words: Vaccination subsidy for seasonal influenza, Agent-based model, Decision Making in Immunization

1 はじめに

予防接種は、感染症対策の中での根本的対策の一つであり、国民を感染症の脅威から守っていくために重要である。ワクチンの助成制度は、伝染病への対処能力の向上を図ることを目的としており、予防接種を効果的に推進することができる。例えば、2007年4月、香川県三豊市・観音寺市では、水痘予防接種に対する公費補助制度を実施し、1～5歳の子供には4500円を助成した。この公費補助により、1歳児の摂取率は、三豊市では8.0%から17.2%に上がり、観音寺市では13.0%から28.9%に上がった。また、積極的にワクチン接種が行われた結果、感染症患者は減少し、医療費も節減された。公費補助により、両市平均の医療費では45.5万円節約された¹⁾。このように、感染症に対するワクチン接種のための公費補助は一定の効果があると考えられる。

日本では、季節性インフルエンザワクチンの予防接種は任意であり、全額自己負担が原則であるが、2001年の予防接種法改正に伴い65歳以上の高齢者のインフルエンザワクチン接種は、一部公費負担により実施することとなった。また、市町村によっては、予防接種率向上を図ることを目的として、医療費助成制度を導入し、特殊予防接種の対象者にある程度、ワクチン費用の負担を軽減している。例えば、2012～2013年のインフルエンザの流行シーズンにおける、宮城県石巻市では、3～13歳の住民に対し、接種料金を2000円を差し引いた。同じ宮城県の岩沼市では13歳未満を助成対象とし、3600円の助成を実施した。

本研究では、人間の主観的な接種意志を考慮し、人間各々の異質性を表現することが可能な手法としてエージェントベースシミュレーションを用い、接種意思決定、および予防接種を受けるために必要となる自己負担料の支払い意思額に影響を与える要因を明らかにし、また、ワクチン助成制度における、接種率への影響を検討することが本研究の目的である。

2 先行研究と本研究の位置づけ

従来の感染症問題に関する研究は、感染症発生と蔓延状況の研究が中心であり、流行を予測することに取り組んだ研究が多い。そのような中で、感染症の蔓延は疫学研究上で1つの大きな課題であるとともに、流行に対する防御対策の研究も重要である。ワクチン予防接種は、感染症対策として最も基本的かつ効果的な対策の一つであり、感染症の流行抑制に重要な要素になり得ると考える。社会全体として高い接種率を維持することにより、全体の免疫水準を維持することかを可能にし、感染症の拡大防止に効果が期待できる。また、接種費用について公費助成することは、接種率の向上を実現するために有効な手段であり、感染拡大防止に重大な影響を与えると推測できる。

2.1 ABMアプローチ

ワクチン助成制度の効果分析に関する既存研究では、実際のインフルエンザワクチンの接種統計データを用いたマクロな数値関係の推定と数理的なモデルが主流となっている²⁾。しかし、接種の主体はひとりひとりの人間であり、年齢、収入、健康状況等の属性により、ワクチン接種についての意思決定や予防効果が異なる。数理モデルでは、さまざまな人間の接種心理や感染症にかかわる要素などすべてが少数のパラメータに単純化される。数式には限界があり、結果として現実とモデルの間にはギャップが生じる場合が挙げられる。そこで、本研究では、これらを考慮し、それぞれ人間の属性を反映することが可能な手法としてエージェントベースモデリング (ABM) を用いて、ワクチン助成制度の評価を分析可能なモデルの構築を行う。ABMによる感染症の研究では、個々の人間エージェントをモデルの構成要素とすることで、現実世界と対応させやすく、数式以外の行動ルールを扱えることから人間の異質性もモデルの中に反映できる。

2.2 仮想都市におけるインフルエンザ流行シミュレーションモデル

ABMを用いた感染症シミュレーションの研究として、市川ら³⁾は、現実社会の例に基づいて、人間の生活空間を反映できる仮想空間を構築した上で、感染症の蔓延モデルを実装した。仮想空間内、人間の行動を真似たルールを用意することで、人間エージェントは意思決定主体として、決められたルールに従って、現実の人間のように、モデル内で活動を行うことが可能である。また、仮想空間における各々の人間活動により、感染が発生され、そこで、感染症蔓延のアルゴリズムと感染症の状態遷移をモデル上に実装し、生活空間を介する感染症の流行現象を表現することが可能となった。

しかし、仮想都市における感染症のシミュレーションでは、ワクチン接種は感染症蔓延をコントロールする有効な解決策であることを解明していたが、個人レベルのワクチン接種行動を表現してなかった。個々の人間の接種状況を表現するためには、ワクチン助成制度における接種モデルを感染症内部モデルとして共有することが必要であると考えた上で、本研究では、都市空間における感染症の発生と蔓延モデル、及び人間の接種意識を再現可能なモデルを構築する。

2.3 健康信念モデル (Health Belief Model)

人間の予防接種意識の分析手法について、本研究では、予防接種を含む保健予防行動の促進と阻害要因を分析するモデルである Health Belief Model (HBM)⁴⁾に基づいて、人間の異質性を表現可能な新しい接種意識の評価手法を提案する。

HBM 最初はアメリカの社会心理学者のグループによって提唱された。もともとは、結核無料検診車のような検診事業において、その受診者が少ないのは何故なのだろうという疑問に端を発し開発されたモデルであった。現在、この理論は拡大され、疾病を予防する活動を行うかどうかの決定に4つの主な構成要素が影響すると結論付けられた⁵⁾。行動を起こすには、以下のことが必要とされた。

- 1) 認知された脆弱性: **perceived susceptibility** : 自分がその状態になりやすいという信念。
- 2) 認知された重大性: **perceived severity** : その状態が重篤な結果をもたらすという信念。
- 3) 認知された利益: **perceived benefits** : 行動をとることが脆弱性や重大性を減らすという信念
- 4) 認知された障害: **perceived barriers** : 行動をとることのコストが利益よりも重くないという信念

HBMでは、接種行為とリスク、コストの関係があることを解明したが、シミュレーション上に表現する研究はなかった。本研究では、HBMの基本的な仕組みを継承し、予防接種に広く適応し発展する。本研究において、人間の接種意識に影響を与える重要な要因として、「認知された脆弱性」と「認知された重大性」は属性(年齢、性別、健康状況、社会関係等)から決定される。さらに、HBMを利用し、人間が自分は病気に罹りやすいかどうかの信念、それを避けることによる利益の認知や行動の影響を理論化する。

2.4 予防接種シミュレーションモデル

本研究では、仮想都市モデルにおける感染症の蔓延モデルを継承し、感染症内部モデルとして、ワクチン助成制度における予防接種シミュレーションモデルを構築する。また、HBMをベースとし、人間の接種意識の評価手法を設計する。モデルにおいては、人間エージェントは制度利用の受け入れ体制を整えていく中で、接種意識が変わる。個々の人間は意思決定を行う主体として考慮し、異質性を表現することが可能となる。さらに、行政もワクチン助成制度を導入してワクチン接種率向上に取り組む意思決定主体として考える。これらを定義したモデルから、都市におけるワクチン接種の実態を把握し、ワクチン助成制度に及ぼす影響を分析する。モデル全体的なイメージは Fig. 1 に示す。

3 モデル

本研究では、人間の主観的な心理と接種意志を考慮し、仮想空間における予防接種のシミュレーションモデルを構築する。本章では、構築するモデルについて説明する。

3.1 接種意識の仕組み

2010年4月万有製薬株式会社が公開した日本全国ワクチンに対する認知度や接種に対する意識調査結果⁶⁾によると、約70%の回答者はワクチン接種をためらう要因は「高額な費用負担」であった。また、「費用を公的に補助して欲しい」と望んでいることもわかった。費用負担がワクチン接種を阻む原因であり、公的な費用補助が求められていることが明らかになった。インフルエンザワクチン接種は予防接種に欠かせない部分であり、費用負担はインフルエンザ予防接種を阻む重要な要因と想定される。

また、インフルエンザの予防接種状況についてのアンケート⁷⁾(QLife、2010年11月)と保護者を対象にした小児期の任意接種ワクチンに対する意識調査⁸⁾(小野ら、2010年10月)の報告結果により、インフルエンザワクチンの場合、ワクチンを接種した理由について、最も頻度の多かった接種理由は「病気になるのが怖い」、次いで「ワクチンを接種するのは当然」、「医者、友人、家族からの勧め」、「症状の軽減」など理由であった。接種しない理由として多かったものは、「かかったことがない/かからないと思う」、「金額が高い」、「副作用が怖い」、「ワクチンを接種しても予防できるとは限らない」、「ワクチンを接種するきっかけがない」、「接種前に罹患」であった。アンケート調査の結果により、人間の接種行動と関わる要素は主に3つに集約されている。

- 1) 初期ワクチンへの認知 : 最初から高い健康意識を持つ、接種価格を気にせず、予防接種を必ず受ける。
- 2) 接種価格 : 費用負担は予防接種を阻む重要な要因と想定される。公的な費用補助が求められていることが明らかになった。
- 3) 社会結びつきのすすめ力 : 個人の接種意識は他人の接種状況に依存している。心理学では Subject Norms 現象という。

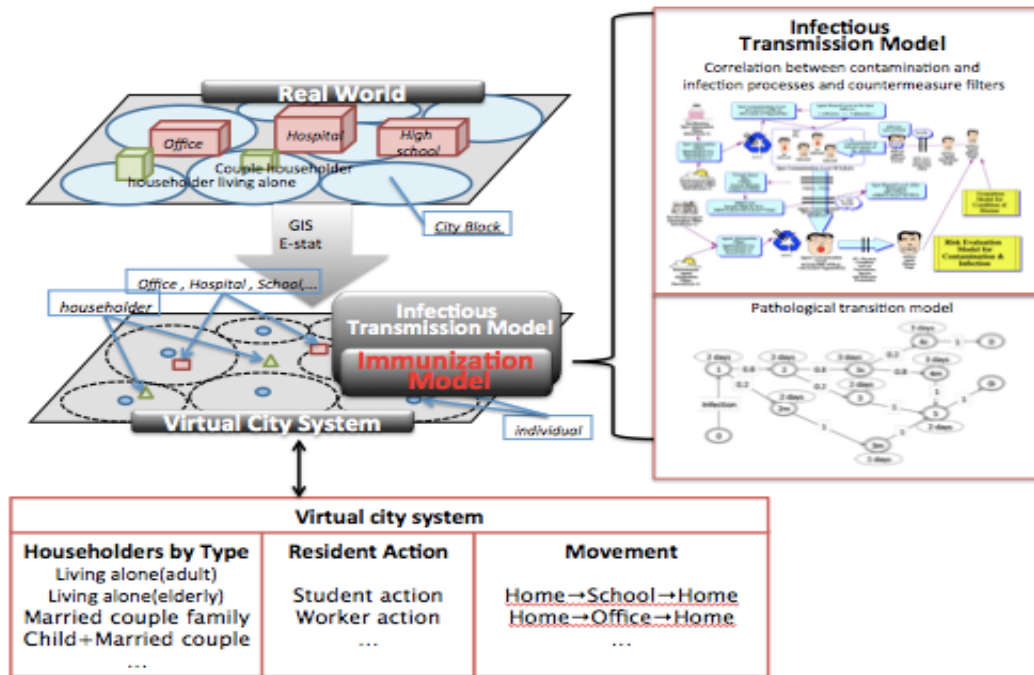


Fig. 1: The model structure as a whole

本研究では、様々な接種意識の影響要素を考慮した上で、価格影響の考察を深く掘り下げ、ほかの重点項目も追求し、人間エージェントの接種意識仕組みを設計する。人間エージェントの接種意識仕組みを Fig. 2 に示す。

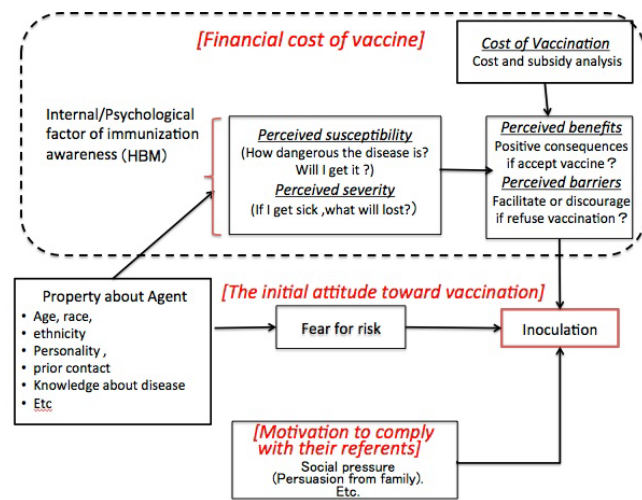


Fig. 2: Structure of immunization awareness.

本研究において、人間の接種意識は「初期ワクチンへの認知」、「接種価格」、「社会結びつき（政府、家族、友人、医者など）のすすめ力」三つの指標から決定される。特に、「接種価格」の評価部分では、HBMの要素を利用し、具体的な接種意識と接種行動の関係式を構築する。次では、各々指標の影響作用とモデル上の構築手法を説明する。

3.2 「初期ワクチンへの認知」からの影響

アンケートの結果において、政府は接種の推進及び伝染病への対処能力の向上を図ることを目的として、ワクチンの予防接種助成制度を実施していたが、現実の世界では、行政側の多大な努力にもかかわらず、季

節性インフルエンザのワクチンの有効性を認めず、予防接種を受けない人間がいる。対称的に、高い健康意識を持つ、接種価格を気にせず、予防接種を必ず受ける人間も存在する。

それを考慮し、本モデルでは、地域内全ての人間エージェントを「積極派」（無条件接種者）、「頑固派」（接種拒否者）と「一般」の3つのグループに分け、各グループの割合を推定する。

- 1) 頑固派：価格や、他人の接種行動とかかわらず、ワクチンの有効性を認めず、予防接種を絶対に受けない人。
- 2) 積極派：高い健康意識を持つ、接種価格を気にせず、「病気になるのが怖い」、「ワクチンを接種するのは当然」と思う、予防接種を必ず受ける人。
- 3) 一般：「接種価格からの影響」と「他人の接種行動からの影響」を受けしやすい人。

そこで、本研究では、ワクチン助成制度において、「一般」の人間の接種意識を向上させ、接種を推進する。

3.3 「接種価格」からの影響

「接種価格」からの影響の考察では、HBMに基づいて、人間の異質性を表現可能な新しい接種意識の評価手法を提案する。伝統的なHBMでは、接種行為とリスク、コストの関係があると示した。具体的な数値関係を解明してなかった。本研究では、HBMの因子を利用し、デシジョンツリーの手法を加え、接種リストと人間の主観的認知の関係式を構築する。さらに、接種価格により人間の接種意識の変化過程をシミュレーション上に表現する。

3.3.1 HBMの詳細

本研究では、HBMの基本的な仕組みを継承し、予防接種に広く適応し発展する。そこで、伝統的なHBM⁴⁾を引き継ぎ、4つの要素について説明する。

Table 1: 健康信念モデル HBM

要素	定義	パラメータ
認知された脆弱性	罹患リスクへの認知、(そもそも自分はインフルエンザになる)	接種する場合の罹患可能性、接種しない場合の罹患可能性、罹患した場合重症になる可能性
認知された重大性	罹患した場合、可能な経済損失、生産性損失(かかったらどれほど大変?)	罹患した場合、可能な経済損失と生産性損失
認知された有効性	ワクチンをうけることにより減らされる感染リスクの認知(接種して得?)	接種する場合、ポジティブな結果の発生可能性
認知された障害	ワクチンをうけることの心理的なコストの認知(行接種して損)	接種する場合、ネガティブな結果の発生可能性

Table 2: 「認知された脆弱性」の評価パラメータ

P_1	接種する場合の感染率
P_2	接種しない場合の感染率
P_3	感染した場合の重症率
$1 - P_3$	感染した場合の軽症率

各々の人間は4つの要素とパラメータを持つ。日常生活で、病気になる可能性(認知された脆弱性)と、病気や合併症になった場合の重大さ(認知された重大性)の両方を認知し、「自分は感染される」という「危機感」を感じる。また、予防接種について自分が感じるメリット(認知された有効性)とデメリット(認知された障害)を比べて、メリットのほうが大きいと思えた時、予防接種行動を行う可能性が高まると考えられる(健康信念モデルを理解するための簡略図⁹⁾: Fig. 3)。

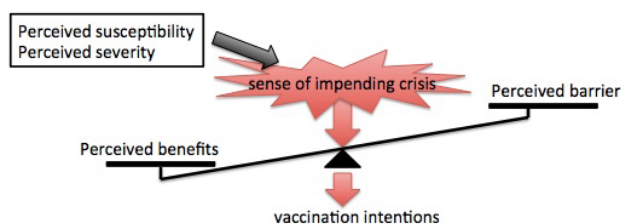


Fig. 3: Conceptual diagram of HBM.

[認知された脆弱性]

定義により、「認知された脆弱性」の評価パラメータを Table 2 に示す。

ここで、接種しない場合の感染率 P_2 の値は上記の仮想都市における感染症蔓延モデルから算出する。接種する場合の感染率 P_1 は P_2 とワクチンの有効性から求める。

ワクチンの有効性について、インフルエンザワクチンの接種では、個人レベルでの発症予防治療が異なり、ワクチン効果の異質性を考慮するべきである。本研究では、実際季節性インフルエンザワクチンの有効率¹⁰⁾を参考し、季節性インフルエンザにおいては、接種の

有効性 (Table 3) を設定する。

Table 3: 接種有効率

対象年齢	接種有効率
~ 65	70%~ 90%
65~ (一般)	30%~ 70%
65~ (介護老人)	30%~ 40%

ワクチンの接種により、

- ・ 健常者 (65 歳未満) のインフルエンザの発病率が 70%~90%減少
- ・ 一般高齢者 (65 歳以上) のインフルエンザによる入院が 70%~90%減少
- ・ 老人施設入所者のインフルエンザによる入院が 30%~40%減少

とした。

接種する場合の感染率 P_1 を以下に定義する。

$$P_2 = P_1 * K$$

そこで、K は Table 3 接種有効率の範囲内からランダム値を設定する。

感染した場合重症率 P_3 の値について、厚生労働省 2009 年 8 月 3 日から 12 月 13 日まで報告された年齢階級別重症化率のデータ¹¹⁾を参照し、設定する (Table 4)。

Table 4: 感染した場合の重症率 P_3

対象年齢	接種有効率
小児 (幼稚園児)	$P_3 = 0.008\%$
子供 (小中高)	$P_3 = 0.003\%$
成人 (20 歳~64 歳)	$P_3 = 0.003\% \sim 0.03\%$
高齢者 (65 歳以上)	$P_3 = 0.03\% \sim 0.05\%$

[認知された重大性]

感染した場合は、経済損失(検査・治療に要した費用)のほかに、生産性損失(病気にかかることによって生じる労働損失)も発生する。患者の日常生活を中断すると、その分の仕事、家事、勉強等が滞り、その埋めあわせを患者本人が負担することになり、実際の金銭の取引が行われていなくとも、社会的には負担が発生する。このような生産性損失は欠かせないものである。

「認知された脆弱性」の評価パラメータを Table 5 に示す。

Table 5: 「認知された重大性」の評価パラメータ

C_{se}	重症の場合、可能な経済損失と生産性損失
C_{sl}	軽症の場合、可能な経済損失と生産性損失

本モデルでは、 C_{se} と C_{sl} の数値では年齢により変わり、年齢が高くなるほどが大きくなる。高齢者 (65 歳以上) がインフルエンザにかかるると肺炎などの合併症を起こしやすいので、インフルエンザ罹患したことによる社会、経済的損失が一番高い¹²⁾。高齢者のための最も効果的な対策のインフルエンザの発生率と有病率の防止で、罹患率を減少させる合併症を減らすため、ワクチン接種は重要な役割を担っている。

エージェントの接種意思決定にとって重要なのは、ワクチン接種の有無による、可能な経済損失と生産性損失という点である。そこで、本研究では、インフルエ

ンザワクチンの有効性を認め、ワクチンの接種により、罹患率が増加することはないと仮定し、各エージェントに対し、接種をしない場合による損失の期待値が、接種による損失の期待値より大きいものとした。

[認知された有効性] と [認知された障害]

エージェントに対し、「認知された脆弱性」と「認知された重大性」は独立であり、両方を認識した上で、「危機感」を求める。「危機感」と「メリット」「デメリット」のバランスをあげている。

モデル上、「危機感」の評価を数値化するため、「支払い意思額」 $C(\text{pay})$ を導入する。各エージェントに対し、インフルエンザワクチンの接種価格 $C(\text{vac})$ が、支払い意思額 $C(\text{pay})$ より大きくなれば ($C(\text{pay}) > C(\text{vac})$)、デメリットよりメリットが多いと想定し、予防接種を受ける。

3.3.2 支払い意思額の算出

本研究では、インフルエンザワクチン接種のデシジョンツリーを作成し、「認知された脆弱性」、「認知された重大性」のパラメータを利用し、接種支払い意思額を評価するための理論式を導出する。さらに、「メリット」と「デメリット」を比較し、意思決定を行う。

そこで、各々のエージェントは意思決定者として、それぞれの選択肢の期待値を比較検討した上で、実際にとるべき選択肢を決定する。

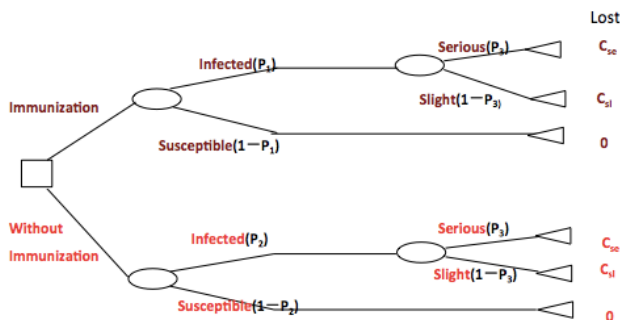


Fig. 4: Decision-making Tree.

デシジョンツリーは、ワクチン接種を行う場合とそうでない場合のそれぞれに生じる異なる可能性を示している。人間エージェントに対し、損失発生の不確実性が存在し、複数の状態があり、それぞれの状態が起きる確率 $P_i (i = 1, 2, 3)$ が与えられている、という環境の下で得られる効用の期待値は「接種をしない場合による損失の期待値」と「接種による損失の期待値」である。そこで、本研究では、期待効用仮説¹³⁾により、期待効用最大化公準に基づいて行動すると仮定し、 $C(\text{pay})$ の条件式を以下に導出する

そこで、そのための条件式を以下に導出する。

1) ワクチン接種を受けた時、損失の期待値：

$$E(\text{vac}) = P_1 P_3 C_{se} + P_1 (1 - P_3) C_{sl}$$

2) ワクチン接種を受けない時、損失の期待値：

$$E(\text{nov}) = P_2 P_3 C_{se} + P_2 (1 - P_3) C_{sl}$$

3) エージェントの支払い意思額：

$$C(\text{pay}) = E(\text{nov}) - E(\text{vac})$$

3.3.3 主観確率の導入、支払い意思額算出方法の改良

期待効用仮説により導出された式では、すべてのパラメータ（「認知された脆弱性」と「認知された重大性」のパラメータ）は客観的な数値である。エージェントは意思決定の主体として、意思決定の判断条件はただエージェントの固定属性（年齢、ワクチンの有効率など）、エージェントの行動、周りの感染状況など客観的条件であり、人間の主観認知偏差が回避された。

しかし、人間は主観的感覚があり、接種リスクが正しく認識されない場合も存在する。人間の意思決定では、利得より損失が大きく感じられ、人間は効用状態の期待値よりも効用状態の変化に注意を払う傾向があり、主観確率の推定は大きく偏ったものとなっていることが強調されるようになる。¹⁴⁾

例えば；ある時点に、あるエージェントに対し、2つのケースを考慮する。

case1 接種しない場合の損失 ($E(\text{nov})$) +1 = 接種する場合の損失 ($C(\text{vac})+E(\text{vac})$)

case2 接種しない場合の損失 ($E(\text{nov})$) +1000 = 接種する場合の損失 ($C(\text{vac})+E(\text{vac})$)

期待効用分析により、case1 と case2 の結果は同じであり、エージェントは接種しない。しかし、現実には、健康を重視する人、あるいはワクチンの効果を絶対的に信頼する人に対し、「接種する場合の損失」と「接種しない場合の損失」の差が小さい場合 (case1)、主観的に接種を受ける傾向がある。その際、期待効用分析によるオプション評価は対応できない。

本研究では、人間の主観的な心理と接種意志を現実になぞけるように表現するため、2つの主観確率変数 $W1(P)$ と $W2(P)$ を導入し、支払い意思額の算出方法を改良する。そこで、 $W1(P)$ はワクチン接種の有効性に対する主観認識であり、自分の健康状況の認識に対する主観認識では、 $W2(P)$ を利用し、算出する。

W1(P): 接種の有効性に対する主観認識。

インフルエンザワクチンの接種では、個人レベルでの発症予防治療が異なる。さらに、ワクチンが接種時期、働く病理メカニズムと関係するので、ワクチンの有効性を断言することができない。特に、インフルエンザワクチンの場合、予防接種を毎年うけていても発症することも存在する。そのゆえに、ワクチンの有効性を疑問視する言説は多くある。

人間はワクチンの有効性に対し、主観的な感覚がある。もし知り合いの中に、無効ワクチンの接種者が出れば、ワクチンに対する不信感が生じ、予防接種への意識は減少傾向があると想定される。それを考慮し、接種の有効性に対する主観認識は以下の通りに定義する。

$$W1(P) = 1 - (1 - P) * \frac{1}{1 + t}$$

そこで、 t は認識された接種無効率。エージェントの生活環境、人間関係より、 t の値が異なる。

$$t = \frac{\text{自分と同じ空間にいる接種無効の人数}}{\text{自分と同じ空間にいる接種人数}}$$

W1の性質

1): W1は確率変数Pに関する確率関数である、値域は[0, 1]:

$$W1 : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

2): W1は単調増加関数である。tの値を大きくすると、関数値が増加する。

$$t \propto W1(P)$$

ワクチンの無効接種人数が高いほど、ワクチンの有効性へ不信感が高まり、W1の値も高くなる。

3): 無効接種が一旦発生したら、誤認識が発生しやすく、主観認識された「接種した時の感染率」は必ず実際の「接種した時の感染率」より大きい。

$$if : t > 0 \text{ then } : W1(P) > P$$

W2(P): 自分の健康状況の認識に対する主観認識。

人間は自分の中の健康状況への認識程度により、予防接種に対する意識が変わる。例えば、感染症流行期間に、感染症と接触する機会はない人間では、自分の感染リスクに対し、“自分は安全で、感染されるリスクがない”と判断する傾向があり、主観的な感染リスクへの認知度が低い。逆に、無接種の場合罹患率は高くなるほど、人間は主観的に罹患リスクへの危機意識を感じ、自分が罹患するはずと思う傾向があり、主観的な罹患率の値は客観値より高いと想定する。

そこで、Prelec (1998)¹⁵⁾の意思決定の記述モデルに基づき、確率加重関数を利用し、確率値の決定に対する重み付けへと変換する確率加重関数を提案する。自分の健康状況の認識に対する主観認識を評価する主観確率関数W2(P)は以下の通りに定義する。

$$if r > a\%, \text{ then } W2(P) < P$$

$$W2(P) = W2^- = \exp(-(\ln P)^{1/r})$$

$$if r < a\%, \text{ then } W2(P) > P$$

$$W2(P) = W2^+ = \exp(-(\ln P)^r)$$

そこで、

$$r = \frac{\text{エージェントと関連している健康的な人数}}{\text{エージェントと関連している総人数}}$$

rはエージェントに対し、生活空間の健康率という。

W2の性質

1): W1と同じように、W2は確率変数Pに関する確率関数である。

$$W2 : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

また、確率加重が確率値に対して非線形であり、確率値が低い場合には相対的に確率値よりも高い確率加重を導き、確率値が高い場合には相対的に低い確率加重を導いていることである。

このような傾向は低確率を過大評価・高確率の過小評価していることを意味しており、これまで提唱された様々な確率加重関数がこの傾向を記述している。

2): If $r > a\%$;

認識された接種しない場合の罹患率<客観罹患率
このような傾向は高確率の過小評価していることを意味しており、W2は減少関数である。

$$if r \rightarrow \infty, \text{ then } W2 \rightarrow 0 \\ r \propto 1/W2;$$

3): If $r < a\%$;

認識された接種しない場合の罹患率>客観罹患率
W2は主観的に低確率を過大評価する傾向を表現する。

$$if r \rightarrow a\%, \text{ then } W2 \rightarrow P \\ r \propto 1/W2;$$

支払い意思額算出方法の改良

客観確率の代わり、主観確率W1とW2を支払い意思額の算出式に導入し、改良された支払い意思額の算式は以下になる。

1)' ワクチン接種を受けた時の主観的な損失の期待値:

$$E'(vac) = W1(P_1 P_3) C_{se} + W1(P_1 (1 - P_3)) C_{st}$$

2)' ワクチン接種を受けない時の主観的な損失の期待値:

$$E'(nov) = W2(P_2 P_3) C_{se} + W2(P_2 (1 - P_3)) C_{st}$$

3)' エージェントの主観支払い意思額:

$$C'(pay) = E'(nov) - E'(vac)$$

主観確率の導入では、アスピレーションレベルの接種オプション評価の方法であり、期待効用方法の修正である。

3.3.4 助成金額からの影響

各エージェントは、インフルエンザワクチンの接種価格が、支払い意思額より大きくなれば、接種する。ワクチン助成制度がある場合、インフルエンザワクチンの助成金額をC(sub)とする。制度の対象に対し、

$$If C'(pay) > C(vac) - C(sub)$$

ならば、予防接種を受ける。特に、

$$C(sub) = C(vac)$$

の場合、接種無料化となる。

3.4 「社会結びつきのすすめ力」からの影響

個人の接種意識が他人の接種状況に依存している場合である。本モデルでは、社会関係からの影響を考慮し、閾値モデルに基づいて、接種の必要条件を仮定する。閾値モデルは他人が持つ接種への意思決定に注目したところに特徴があり、社会関係からの影響を表せる可能性は十分にあると思われる。

そこで、はじめに、各エージェントの閾値を0.7~1までの乱数、ランダムな数値を割り振る。各エージェントが固有の閾値を持ち、同じ時間、同じ空間に接種した人数と総人数の比率が自らの閾値以上になるとエージェントの接種意識は「接種しない」から「接種」に転ずる。

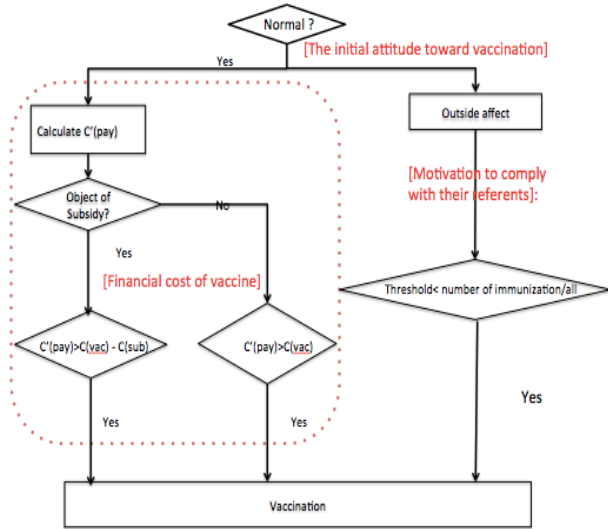


Fig. 5: Flowchart of decision-making process

3.5 接種の意思決定フローチャート

「一般」なエージェントを対象とし、接種の意思決定を以下の Fig. 5 に示す。

4 シミュレーション結果

本稿では、モデルの振る舞いを検証するため、仮想の都市モデル¹⁶⁾をベースにし、予防接種モデルを実装した。本稿のモデルを構築するにあたり、東京工業大学の出口研究室で開発された社会シミュレーション用言語 SOARS を利用した¹⁷⁾。仮想都市に利用した人口情報を Table 6 に示す。

年齢	人口数
1~ 19	1440
20~ 64	4970
65~	2553

4.1 助成制度の効果考察

モデルには、仮想空間のインフルエンザワクチン予防接種とインフルエンザの発生において、インフルエンザワクチン公費助成制度を導入するモデルを構築する。「頑固派」5%、「積極派」5%、パラメータ $a=80\%$ と設定する。また、助成制度の変化により、4つのシナリオをモデル上に導入する。

シナリオ 1：補助なし ワクチンの原価を 3600 円とする

シナリオ 2：子供助成制度（幼稚園児と小学生） 補助額：3600 → 1000 円とする

シナリオ 3：高齢者助成制度（65 歳以上） 補助額：3600 → 1000 円とする

シナリオ 4：ワクチン無料化 補助額：3600 → 1000 円とする

仮定したシナリオをそれぞれ導入した結果に関して説明する。シミュレーションを 10 回行った時、シナリオの導入により、感染症の変化に伴い、接種率も変化されました。各シナリオ接種率の変化を Fig. 6 に示す。そこで、横軸は 4 つのシナリオを用意し、縦軸は接種率を示す。

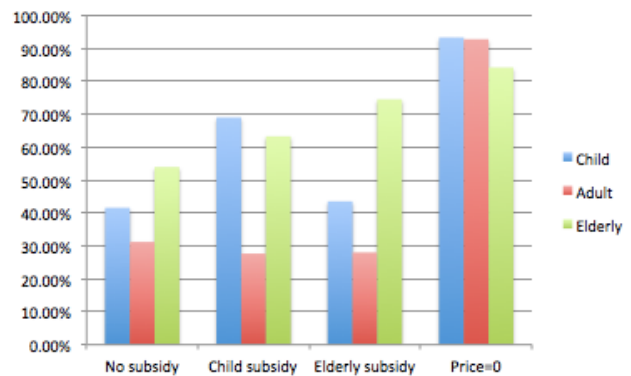


Fig. 6: Vertical -axis: immunization rate.

感染症伝播状況の変化を Fig. 7 に示す。そこで、横軸は感染症流行時間、縦軸は感染率を示す。

シミュレーション上では、ワクチン助成制度に伴い、接種率が向上し、感染症に対して抑制効果が生じる現象を表現した。具体的な接種率の数値を Table. 7 に示す。

Table 7: 接種率

年齢層	1~ 19	20~ 64	65~
補助なし	41.59%	31.21%	53.97%
子供助成制度	69.03%	21.67%	63.29%
高齢者助成制度	43.54%	28.01%	74.54%
ワクチン無料化	93.33%	92.78%	84.22%

シミュレーションの結果により、ワクチン助成制度における人間の接種意識を高めると、接種率が上がることが示された。シナリオ 2、子供向けのワクチン助成制度が導入された結果、導入前（シナリオ 1）より、子供の接種率が増加した。同じように、高齢者ワクチン助成制度（シナリオ 3）の実施には、助成対象の接種率を向上させた。新しいワクチン助成制度に伴い、制度対象の接種率を向上させることが可能であることが分かった。

高齢者助成制度を導入した結果、高齢者接種率が 1.4 倍以上に向上させた。同じ助成金制度を子供に導入した場合には、接種率の増幅は小さく、制度の助成対象により、制度の効果が異なることが示された。また、高齢者助成制度と子供助成制度の結果は、全体的な接種率の差額はただ 1.7680%。そこで、全体的な接種率が等しくなっても、接種したエージェントにより、全体の感染状況が異なると想定できる。

シナリオ 4 で接種無料化を設定し、各々の年齢層の接種率も高いが、「頑固派」が存在するので、すべてのエージェントが接種をうけることはできなかった。

この結果から、ワクチン助成制度における人間の接種意識を高めると、接種率が上がることがわかる。このことから、本モデルは人間接種意識変化のある程度の表現ができたモデルと考える。

4.2 個人レベルでの助成制度から影響の考察

マクロ的なワクチン助成制度における接種率が上がることを示されたが、次では、ミクロ的な各エージェントの接種意識変化過程について分析する。

そこで、任意のエージェントを抽出し、感染症流行期間に、支払い意思額の変化を示す。

抽出されたエージェントでは、以下の社会的な役割を持つ：

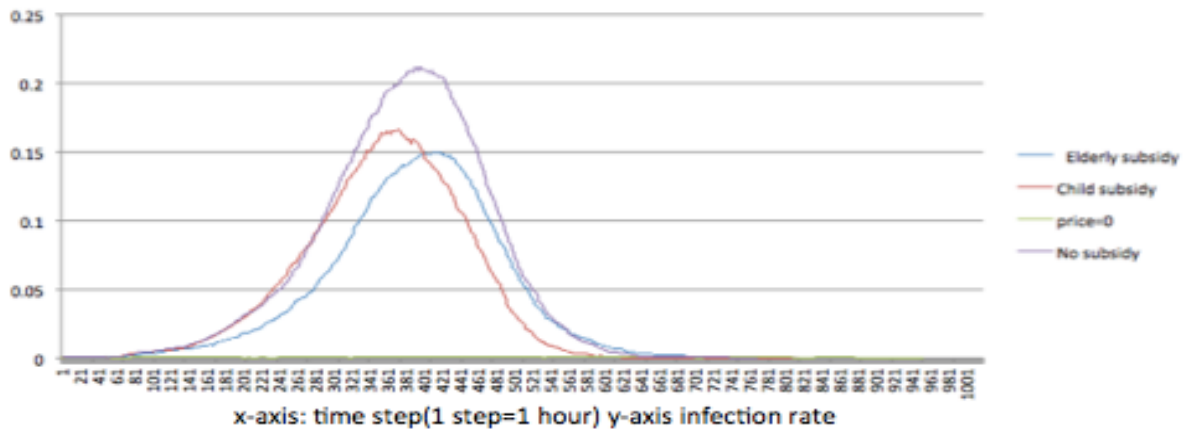


Fig. 7: Status of Epidemic Transmission with Different Subsidy Scenarios.

1. 学生 (20 歳以下)
2. ワクチン助成制度の対象ではない
3. 世帯構成：夫婦 + 子供
4. 8:00~16:00 の時間帯に、学校にいる
5. 8:00~16:00 の時間帯に、同じ学校には、いつも 167 名 ~ 216 名学生がいる

その学生エージェントの [支払い意思額] の変化を Table 8 に示す。

Table 8: エージェントの支払い意思額の変化

時間	学校に感染された人数	支払い意思額
2/08:00	1	6.53 円
4/08:00	2	8.75 円
...
9/09:00	17	2774.24 円
...
9/15:00	17	2774.34 円
...
10/9:00	3896.84 円, 感染された	

シミュレーション結果により、学校の感染人数が多いならば、支払い意思額も高くなる。また、この学生に対し、もし助成制度があれば、早めに接種する可能性がある。ただし、感染症が発生した後に接種する場合、予防接種が遅めに受けさせた事が生じる懸念もある。

5 主観レベルのオプション評価手法の考察

仮想空間の感染症蔓延に関する基本設計を継承し、「ワクチン助成制度における予防接種」の社会現象をシミュレーションする。また、内部モデルとして、HBM の構造をシミュレーション上に加え、仮想空間上に人間の接種意識を反映する。接種意識を評価する部分、本研究では、具体的な接種意識と接種行動の関係式を構築する。その中に、本研究では、伝統的な期待効用方法を修正し、2つの主観確率関数を導入し、アスペレーションレベルを上人間接種心理を表現する点が、本研究の特色である。そこで、2つの主観確率関数について、考察を行う。

5.1 W2 の考察

主観認識関数 $W2$ にはパラメータ $a\%$ に依存する。エージェントの生活空間の健康率 r は a より大きくなれば、主観確率は低い (例えば、周り全員が健康の場合、エージェントは主観的に罹患しないという認識を

Table 10: パラメータ $a\%$ の考察

age	1~ 19	20~ 64	65~
$a=0.8$	39.09%	28.87%	66.98%
$a=0.9$	43.54%	28.01%	74.54%
$a=0.95$	56.53%	32.02%	78.08%

する傾向がある)。小さいならば、主観確率は客観確率より高い (例えば、周り全員が罹患の場合、エージェントは主観的に罹患の危機感を拡大する傾向がある)。本章は、パラメータ $a\%$ について考察する。

まず、仮想空間内すべてエージェントの生活空間の健康率 r を抽出する。 r の散布図を Fig 8 に示す。エージェントの r 値を縦軸にし、各々のプロットはエージェント r 値を示す。

Fig. 8 により、多くのエージェントの生活空間の健康率 r は $0.9 \sim 1$ に集中される。そこで、 $a\%$ の値を 0.8 と設定し、エージェントが全体的に自分の健康状況に対し自信を持ち、主観的に認知された接種しない場合、感染率は低いと想定できる。

さらに、すべてのエージェントの r 値を Table 9 に示す。

r の統計結果を参考し、 $a\%=0.8$, $a\%=0.9$, $a\%=0.95$ 三つのシナリオを設定し、 $a\%$ の変化に伴い、接種率が大きく変化する。結果を Table 10 に示す。

結果では、臨界値 $a\%$ が高くなるほど、エージェント全体の主観罹患リスクが増加する、さらに接種率も向上することが分かる。このことから、パラメータ $a\%$ はモデル上に正しく表現されることと考えられる。

5.2 主観確率と客観確率の対比

主観認知レベルの予防接種意思決定におけるオプション評価手法の提案では、人間の主観意識を考慮し、期待効用分析より、現実性が高いと考えられる。

主観確率と客観確率の違いを考察するため、客観確率をシミュレーション上に導入する。結果は Table 11 を示す。

Table 11: 主観確率と客観確率の対比

age	1~ 19	20~ 64	65~
主観 W1, W2	43.54%	28.01%	74.53%
客観 W1, 主観 W2	56.32%	36.66%	71.61%
主観 W1, 客観 W2	23.94%	16.90%	38.22%
客観 W1, W2	26.84%	22.24%	49.43%

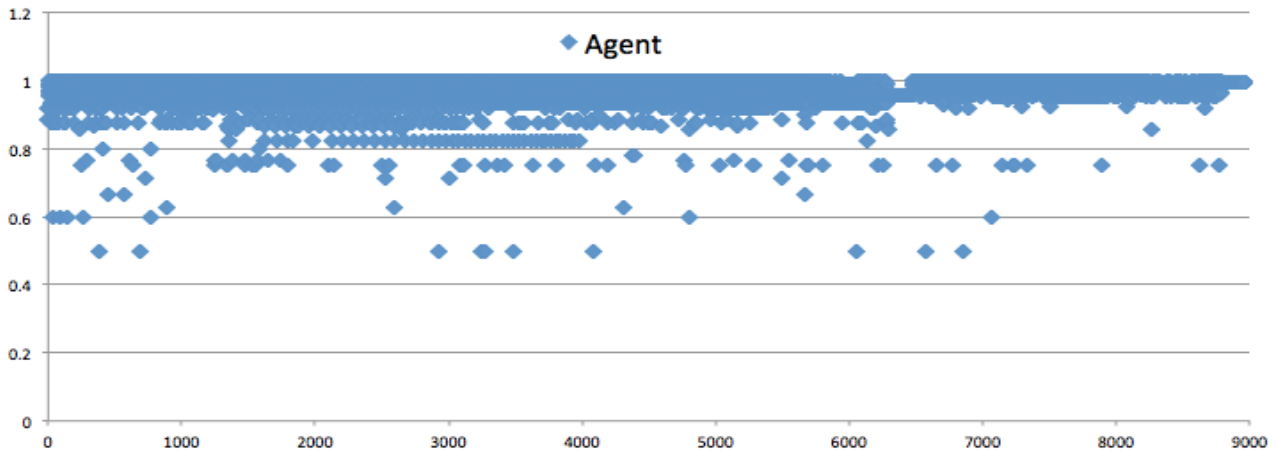


Fig. 8: Surroundings Health Situation of Each Agent; Vertical -axis: value of r , x-axis: agent number.

Table 9: 生活空間の健康率 r の統計データ

r	総人数	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	成人	高齢者
$r=1$	2115	126	107	56	48	1017	761
$[0.95, 1)$	3435	140	127	94	68	1554	1451
$[0.9, 0.95)$	3057	216	187	96	80	1521	961
$[0.8, 0.9)$	273	22	29	13	17	129	63
$(0, 0.8)$	84	8	7	1	0	21	47

シミュレーションの結果から、人間の主観的認識と客観世界の間には、ギャップが存在することが示された。予防接種に対し、主観の誤差がワクチン接種を阻む障壁であることが示された。

(主観 W1, W2) と (主観 W1, 客観 W2)、(客観 W1, 主観 W2) と (客観 W1, W2) の結果を対比し、分析する。W2 が客観であれば、接種率が高くなることが分かった。その原因は、人間は自分の健康状態が気になり、ワクチン接種を通し安心感を作る傾向があると想定できる。同じように、(主観 W1, W2) と (客観 W1, 主観 W2)、(主観 W1, 客観 W2) と (客観 W1, W2) の結果を対比した結果、W1 は客観であれば、エージェントがワクチンの効果を正しく認識すれば、接種率の向上が実現できる。そこで、一般市民にも予防接種の効果に対する信頼感を高め、理解を促すことで、接種率の向上が実現できると考えられる。

さらに、結果では2つの主観認識が互いに相殺することを示した。一方で、人間では、健康状況に気になり、接種願望が強くなる。しかし、ワクチンが有効性に対し、疑いがあるので、接種意識が低くなる。このことから、本モデルは現実の人間の接種に近づく、人間の接種心理をある程度の表現ができたモデルと考えられる。

6 まとめと今後の展望

本稿では、エージェントベースモデリング (ABM) を用い、仮想都市における感染症の蔓延モデルをベースにして、モデルにおいて、人間の主観的な心理と接種意志を考慮し、ワクチン接種意識を評価可能な予防接種モデルを構築した。接種意思決定、および予防接種を受けるために必要となる自己負担料の支払い意思額に影響を与える要因を明らかにした。

シミュレーション結果として、費用負担がワクチン接種を阻む障壁であり、ワクチン助成制度に伴い、接種率が向上し、感染症に対して抑制効果が生じる現象

を表現した。

現在のモデルにより、小児は自分の接種意思を持つ、自主的に接種行動を判断する。しかし、現実には小児の予防接種意思決定に対し、意思決定者は保護者であり、保護者の職業により、ワクチンの認知度に差がある。また、世帯総収入により、ワクチンの接種率に差もある。今後、小児の接種意思決定、学校と家庭、保護者の予防接種に対する意識などを考えるべきである。

接種を推進するためには、人間の接種意識を向上させることが必要である。感染症の流行は人々に依存するところが大きく、接種の推進及び伝染病への対処能力の向上を図ることを目的として、合理的なワクチン助成制度を導入するべきである。今後、合理的なシナリオを設定し、疾病の伝播を最大限に防止する。どの年齢層をワクチン助成制度の対象にすれば最も効果が上がることを検討することも、今後の課題である。

参考文献

- 1) 大日康史. 水痘予防接種に対する公費補助制度の政策評価, 感染症学雑誌. 35. 84(2): 159-164, 2010
- 2) Y Ibuka, S Bessho. Impact of Subsidy on Community-wide Health Outcomes: an Example of Influenza Vaccination. 日本経済学会 2012年6月
- 3) 市川学, 田沼英樹, 出口弘. 伊豆大島におけるインフルエンザ流行シミュレーションモデルの構築. 日本公衆衛生学会, 2009年10月
- 4) Marshall H. Becker: The Health belief model and personal health behavior. C. B. Slack, 1974年

- 5) 一目でわかるヘルスプロモーション:理論と実践ガイドブック, 国立保健医療科学院: 9-11 2007年3月
- 6) 日本人のワクチンに対する意識調査. 万有製薬株式会社,2010年4月
- 7) 「インフルエンザ予防接種」の費用実態を調査.QLife,2010年11月
- 8) 小野真, 沼崎啓. 保護者を対象に小児期の任意接種ワクチンに対する意識調査, 日本化学療法学雑誌 2010
- 9) 松本千明. 医療・保健スタッフのための健康行動理論の基礎. 医歯薬出版 p4, 2002年
- 10) Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR).Centers for Disease Control and Prevention: CDC, vol56. 2007
- 11) インフルエンザによる死亡数の推移, 厚生労働省(人口動態統計), 国立感染症研究所感染症情報センター月報 (IASR) 8月3日~12月13日, 2009年
- 12) Yasushi Ohkus: Policy evaluation for the subsidy for influenza vaccination in elderly. Vaccine;23(17-18):2256-60. March 2005
- 13) 荒井一博. 経済学入門第2版, 中央経済社. p87 2010年
- 14) Kahneman, Daniel, and Amos Tversky"Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk", Econometrica, XLVII , p263-291, 1979
- 15) Drazen Prelec: The Probability Weighting Function. Econometrica; Volume 66 Issue 3 Page 497 - 527. p.497. May 1998
- 16) 市川学, 出口弘. 生活空間を考慮した都市シミュレーション環境とその利用 JAWS 2010年10月
- 17) <http://www.soars.jp/>