

新興感染症患者の療養先割当を対象とした マッチングメカニズムに基づく提案手法の有効性評価

○川本恭平 貝原俊也 國領大介 藤井信忠 (神戸大学)

Evaluation of the effectiveness of medical care facility allocation method based on matching mechanisms for patients with emerging infectious diseases

*K. Kawamoto, T. Kaihara, D. Kokuryo and N. Fujii (Kobe University)

概要 科学的根拠に基づき、新興感染症患者の療養先割当を病院・宿泊療養施設・自宅から決定することは喫緊の課題である。これまでに我々は、患者と療養先双方の意思を割当に反映できる療養先割当手法をマッチングメカニズムに基づき提案した。本稿では、新興感染症のまん延する状況をエージェントベースモデリングで作成し、DAメカニズムに基づく提案手法ならびにDAメカニズムを拡張したPLDA-TQに基づく提案手法をシミュレーション上で実施する。そして、患者の意思決定に影響する外生効果に着目してパラメータを変化させることで各提案手法の有効性を評価する。

キーワード: マッチング理論, 受入保留メカニズム, 新興感染症, エージェントベースモデリング

1 はじめに

近年、人や物の移動の高速化、大量化に伴って感染症が短期間でかつ広範囲にまん延しやすくなっており、感染爆発(パンデミック)に対する脅威が大きくなりつつある。感染者に対して療養先をどう決定するか(以下、療養先割当)は、対象となる感染症の感染経路における分類によって異なる。高い危険性を孕む感染症と分類されるものは感染者全員を原則入院としていたが、COVID-19流行においては医療提供体制のひっ迫緩和を目的として、入院以外に宿泊療養および自宅療養が正式に行われることとなった。しかしながら、入院調整などの患者対応に目詰まりが生じており療養先割当に対する患者の意思反映に課題が残っている。また感染抑制を達成するために、病床や宿泊部屋を効率的に活用するという療養先の意思を療養先割当に反映させることも課題として挙げられている¹⁾。

上記に述べた患者と療養先の意思反映を目指し、我々はこれまでに受入保留(DA: Deferred Acceptance)メカニズムに基づく手法と、濱田らによるプライオリティリストに基づくタイプ優先枠を考慮した受入保留メカニズム(PLDA-TQ: Priority List based Deferred Acceptance mechanism with Target Quotas)²⁾を用いた手法を提案した³⁾。本稿では、より現実的な状況を想定した社会シミュレーションにて、ヒトエージェントの意思決定における準拠集団からの影響度合を変化させた場合に提案手法の有効性が保たれるのかを検証する。

2 対象モデル

対象モデルは、仮想都市モデル、病態遷移モデル、感染プロセスモデル、ヒトエージェント活動モデル、療養先エージェント活動モデルおよび療養先割当モデルより構成される。なお療養対象となる人物を患者と呼ぶ。

2.1 仮想都市モデル

本稿で対象とする仮想都市モデルでは、ワクチンや特効薬の確立されていない新興感染症が初めてまん延する状況を想定する。そしてこの仮想都市は、 D 個の地区(d_1, d_2, \dots, d_D)および $A (\geq D)$ 個のエリア(a_1, a_2, \dots, a_A)で構成され(Fig. 1)、人口規模としてはPOP人を想定する。各エリアには、 I 個の病院($h_{11}, h_{12}, \dots, h_{1I}$)と J 個の宿泊療養施設($h_{21}, h_{22}, \dots, h_{2J}$)、および1人~4人の住人で構成される K 個の住宅($h_{31}, h_{32}, \dots, h_{3K}$)が存在し、全住宅において少なくとも19歳以上の人物が1人住んでいる。以下では自身の住む住宅を指す際は自宅と呼ぶ。また人の勤務先となる C 個の会社、通学先となる ES 個の小学校、 JS 個の中学校、 HS 個の高校および通園先となる KG 個の幼稚園が存在する。これらの数の和は L に一致する。

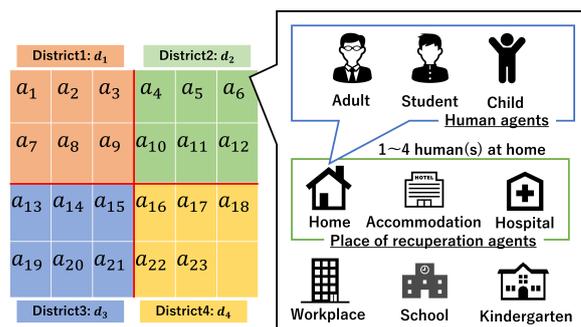


Fig. 1: Example of the virtual city model ($D = 4, A = 23$)

対象モデルでは人や新興感染症に感染した人が療養する可能性のある病院および宿泊療養施設をエージェントとして扱う。また仮想都市に存在する全患者の自宅を概念的に1つのまとまりと捉えた自宅群もエージェントとして扱う。以下では人をヒトエー

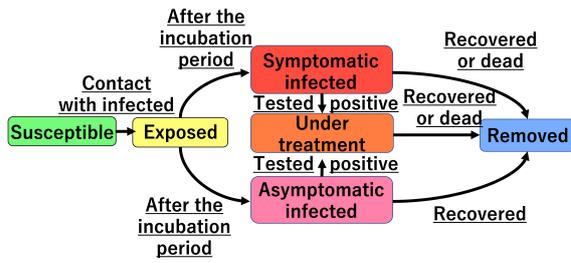


Fig. 2: Overview of the human agent's disease transition

ジェント、病院と宿泊療養施設および自宅群をまとめて療養先エージェントと呼ぶ。

ヒトエージェントは病態、療養対象の有無、年齢、所属集団および療養先エージェントに対する選好順序を属性として持つ。選好順序はヒトエージェントが持つ全ての療養先エージェントに対する療養先としての好ましさの順位を表す。任意のヒトエージェントにおいて同じ順位となる療養先エージェントは存在しない、すなわち全く同じ好ましさとなる療養先エージェントは存在しないものとする。後述する無症状感染状態または有症状感染状態に遷移した際に最終的な選好順序を確定させる。

療養先エージェントは患者に対する受入上限および患者に対する優先順序を属性として持つ。前者は病床や宿泊部屋数から見積もられる受入可能な患者数を表し、自宅群における受入上限は患者数に一致する。ある療養先エージェントに割り当てられている患者数の総和が受入上限と一致するとき、その療養先エージェントは空きがない状態となる。後者は各患者に対し決定した受入を優先すべき順位を表す。病院と宿泊療養施設の合意のもと、各療養先エージェントに対し公的機関が順序を決定する。療養先割当実施直前に優先順序を確定させる。

2.2 病態遷移モデル

患者が都道府県や保健所等の公的機関から指定された場所で療養するよう要請される場合におけるヒトエージェントの病態変化を表現するものを病態遷移モデルと呼ぶ。そして、感染症数理モデルの一種であるSEIRモデルの感染状態(I)を有症状(Is)と無症状(Ia)に分け、療養状態(U)を加えたSEIsIaURモデル⁴⁾を参考にしてFig. 2の通りに構築する。各状態についてその詳細を以下に述べる。

- **感受性状態 (Susceptible):**
感受性状態のヒトエージェント(以下、感受性者)は、他者への感染力を有するヒトエージェント(以下、スプレッダー)と接触することで潜伏状態へ遷移する。遷移確率はスプレッダーとの関係性および年齢によって異なる。
- **潜伏状態 (Exposed):**
潜伏状態のヒトエージェントは潜伏期間 IP が経過した後、確率 POS で有症状感染性に、確率 $(1 - POS)$ で無症状感染性へ遷移する。また遷移2日前からスプレッダーとなる。

- **有症状感染状態 (Symptomatic infected):**
有症状感染性のヒトエージェントは軽症・中等症・重症の3種類に分類されるとともにスプレッダーの性質を有する。回復または死亡に至るまでには TTR 日を要し、その間1日ごとに確率0.2516で感染が判明する。感染が判明した際には、該当する感染者と住宅を共にする者および感染元となった者についても確率0.2516で感染が判明する。感染が判明した者は療養先割当の対象となり、療養状態へと遷移する。
- **無症状感染状態 (Asymptomatic infected):**
無症状感染性のヒトエージェントは、有症状感染性のヒトエージェントと同様にスプレッダーとなるとともに回復するまでには TTR 日を要する。他のヒトエージェントの感染判明に伴って感染が判明した場合、療養状態へと遷移する。
- **療養状態 (Under treatment):**
療養中のヒトエージェントは病院、宿泊療養施設、自宅のいずれかで、回復または死亡するまでの期間 TTR から感染性状態となっていた日数を引いた分だけ療養する。自宅にて療養する者のみスプレッダーとなる。
- **回復または死亡状態 (Removed):**
回復または死亡したヒトエージェントは他者への感染力を持たない。また他の病態への遷移は起こらない。

2.3 感染プロセスモデル

新興感染症がヒトエージェント間で伝播する過程を表現した感染プロセスモデルでは、文献⁵⁾を参考に感受性者とスプレッダーが同じ空間に存在し、接触があった場合に感染伝播の判定が行われるものとする。以下では、感染伝播における空間が同じ地区またはエリアの場合を市中感染、同じ住宅の場合を家庭内感染、同じ所属集団の場合を所属集団内感染と呼ぶ。

感受性者とスプレッダーが接触する確率を表す接触率は、感受性者とスプレッダーが同一地区にいる場合に $cr_{district}$ を、同一エリアにいる場合に cr_{area} を、同一住宅にいる場合に cr_{home} を、同一の所属集団に属する場合に cr_{group} を用いる。市中感染と家庭内感染において感染伝播の形が複数考えられる場合、接触率は cr_{home} , cr_{area} , $cr_{district}$ の順で優先的に計算される。またスプレッダーが自宅療養をしている場合に発生する感染伝播は家庭内感染のみで、その際の接触率には補正係数 $cr_{correct}$ が掛かる。新興感染症の持つ感染力が tr であるとき、感染伝播率 ir は $tr \times cr$ で計算される。

2.4 ヒトエージェント活動モデル

ヒトエージェント活動モデルは、ヒトエージェントにおける自宅、職場、学校等の移動および他人との接触を伴うような活動をモデル化したものである。本モデルにおけるヒトエージェントは、感染プロセ

モデルにおいて説明した接触を伴う活動を1日ごとに実施する。療養状態あるいは有症状感染性状態の人が普段の行動パターンを取るとするのが困難であることから⁵⁾、活動内容はFig. 2に示した病態遷移モデルにおける状態によって変化が生じるものとする。以下ではヒトエージェントが各状態ごとにを行う活動について述べる。

2.4.1 感受性および潜伏状態のヒトエージェントの活動

感受性状態および潜伏状態のヒトエージェントの活動は家庭内活動、所属集団内活動、エリア内活動、地区内活動の4つで構成される。これらの活動はそれぞれ家庭内感染、所属集団内感染、市中感染のリスクが伴う。感受性者が活動により感染した場合、1日の終わりに潜伏状態の活動へ変化する。潜伏状態のヒトエージェントは潜伏期間後に無症状感染性または有症状感染性のものへと変化する。

2.4.2 感染状態のヒトエージェントの活動

感染状態のヒトエージェントの最初の活動は、検査対象となるかによって異なる。検査対象となりかつ感染が判明した場合には、即時に療養中における活動に切り替わる。検査対象とならず有症状である場合は家庭内活動のみが行われる。検査対象とならず無症状である場合は感受性者と同じく家庭内活動、所属集団内活動、エリア内活動、地区内活動を行う。感染状態のヒトエージェントはスプレッダーでもあるため家庭内感染を引き起こす可能性がある。回復または死亡したかどうかを判定し、そうであった場合には回復または死亡状態の活動へ変化する。

2.4.3 療養状態のヒトエージェントの活動

療養状態のヒトエージェントの最初の活動は自身の療養先を決定することである。2.6節で説明する療養先割り当てモデルにより療養先を確保できたヒトエージェントのうち、療養先が自宅のヒトエージェントは家庭内活動を行う。それ以外は活動を行わない。有症状感染状態ヒトエージェントと同じく、回復または死亡した場合は回復または死亡状態の活動へ変化する。

2.4.4 回復または死亡状態のヒトエージェントの活動

回復または死亡したヒトエージェントはまず状態が回復か死亡なのかを初めに判定する。回復したヒトエージェントの活動は家庭内活動、所属集団内活動、エリア内活動、地区内活動の4つで構成される。新興感染症への免疫を獲得しているため市中感染、所属集団内感染、家庭内感染による再感染のリスクはない。死亡したヒトエージェントは活動を行わない。回復、死亡状態ともに他の状態への遷移は起こらず活動内容が一定となる。

2.5 療養先エージェント活動モデル

療養先エージェント活動モデルは療養先エージェントの社会的活動をモデル化したものである。全療養先エージェントにおいて最初に行う活動は、療養

先割当が決定した患者を受け入れることである。病院および宿泊療養施設エージェントについては、患者の受入に加え感染者数増加などの状況に合わせて病床・宿泊部屋の追加確保を実施する。大阪府による確保計画⁶⁾を参考に、この活動が行われる条件をあらかじめ定められた受入病床・宿泊部屋数の追加で確保基準を満たすこととし、その基準は病床と宿泊療養施設でそれぞれ4段階および3段階のフェーズ分けがなされるものとする。

病床フェーズ1においては病床使用率が45%以上になった場合に病床フェーズ移行宣言を発動し、各病院について初期病床数35床からさらに24床の病床を追加で確保する。病床フェーズ2および3においてもそれぞれ病床使用率が45%、70%以上になった場合に病床フェーズ移行宣言を発動し、各宿泊施設について初期部屋数59部屋からさらに20床、40床の病床を追加で確保する。同様に、宿泊部屋フェーズ1および2においても宿泊部屋使用率がそれぞれ45%、60%以上になった場合に宿泊部屋フェーズ移行宣言を発動し、各宿泊施設において初期部屋数12部屋から13部屋、6部屋の宿泊部屋を追加で確保する。なお病床はフェーズ移行宣言後14日をかけて徐々に確保され、宿泊部屋はフェーズの移行宣言後7日経過した時点で一括して確保される。

2.6 療養先割り当てモデル

患者から療養先エージェントへの割り当てをモデル化した療養先割り当てモデルについて、割り当ては1日に1度行われるものとする。そして、患者の症状に応じて必要となる医療提供レベルが異なることを反映するため、患者の各症状における療養先エージェントの受入に制約を課す。無症状者および軽症者については全療養先エージェントが受入可能である。ただし病院は病床に空きが、宿泊療養施設は宿泊部屋に空きがある場合のみとする。中等症者については原則として空きのある病院のみが受入可能である。どの病院も空きがない場合にはいずれかの病院に空きが生じるまで自宅待機を行う。重症者は病院のみが受入可能である。ここで、重症者を割り当て可能な病床は他の症状の患者が割り当てられる病床と異なる重症者専用病床であるものとする。Fig. 3は上記の受入制約を踏まえた上で実現し得る療養先を症状別に表したものである。

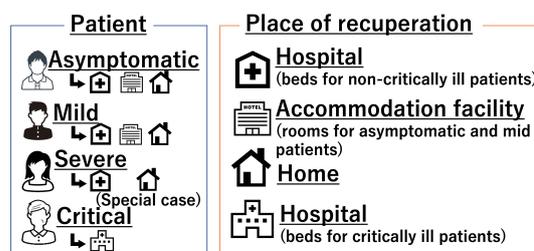


Fig. 3: Possible allocation in consideration of acceptance constraints

3 手法 I: DA メカニズムに基づく療養先割当手法

本章では前報³⁾にて提案した DA メカニズムに基づく療養先手法 (手法 I) を示す。手法 I では療養先割当を $(P, H, T, \tau, X, \succ_P, \succ_H, q_H)$ の組で定義する。記号の意味は次の通りである。

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ は n ($\leq POP$) 人の患者の集合を意味する。
- $H = H_1 \cup H_2 \cup H_3$ は m ($= I + J + 1$) 個の療養先エージェントの集合を意味する。
 - $H_1 = \{h_{11}, \dots, h_{1I}\}$ は I 個の病院の集合を意味する。
 - $H_2 = \{h_{21}, \dots, h_{2J}\}$ は J 個の宿泊療養施設エージェントの集合を意味する。
 - $H_3 = \{h_3\}$ は 1 個の自宅群の集合を意味する。
- $T = \{t_1, t_2\}$ は 2 種類のタイプの集合であり、 t_1 は無症状および軽症を、 t_2 は中等症をそれぞれ意味する。
- τ は 患者の集合からタイプ集合への関数 $\tau: P \rightarrow T$ を意味する。 $\tau(p)$ は患者 p のタイプを返す。
- $X = \{(p, h) \mid p \in P \text{ s.t. } \tau(p) = t_1, h \in H\} \cup \{(p, h) \mid p \in P \text{ s.t. } \tau(p) = t_2, h \in H_1 \cup \{\emptyset\}\}$ は割当の集合を意味する。なお (p, h) は患者 p が療養先エージェント h に割り当てられることを意味する。
- $\succ_P = (\succ_{p_1}, \dots, \succ_{p_n})$ は患者が持つ選好順序のベクトルを意味する。 P に属する任意の患者 p が持つ療養先エージェントに対する厳密な選好順序を \succ_p とする。
- $\succ_H = (\succ_{H_1}, \succ_{H_2}, \succ_{H_3})$ は療養先エージェントが持つ優先順序のベクトルを意味する。
 - $\succ_{H_1} = (\succ_{h_{11}}, \dots, \succ_{h_{1I}})$ は病院が持つ優先順序のベクトルを意味する。 H_1 に属する任意の病院 h_{1i} が持つ患者に対する厳密な優先順序を $\succ_{h_{1i}}$ とする。
 - $\succ_{H_2} = (\succ_{h_{21}}, \dots, \succ_{h_{2J}})$ は宿泊療養施設が持つ優先順序のベクトルを意味する。 H_2 に属する任意の宿泊療養施設 h_{2j} が持つ患者に対する厳密な優先順序を $\succ_{h_{2j}}$ とする。
 - $\succ_{H_3} = (\succ_{h_3})$ は自宅群が持つ優先順序のベクトルを意味する。 \succ_{h_3} は自宅群 h_3 が持つ患者に対する厳密な優先順序を表す。
- $q_H = (q_{H_1}, q_{H_2}, q_{H_3})$ は療養先エージェントの受入上限のベクトルを意味する。

- $q_{H_1} = (q_{h_{11}}, \dots, q_{h_{1I}})$ は病院の受入上限ベクトルを意味する。 H_1 に属する任意の病院 h_{1i} の受入上限を $q_{h_{1i}}$ とする。
- $q_{H_2} = (q_{h_{21}}, \dots, q_{h_{2J}})$ は宿泊療養施設の受入上限のベクトルを意味する。 H_2 に属する任意の宿泊療養施設 h_{2j} の受入上限を $q_{h_{2j}}$ とする。
- $q_{H_3} = (q_{h_3})$ は自宅群の受入上限のベクトルを意味する。 q_{h_3} は自宅群の受入上限を表す。

3.1 手法の流れ

手法 I は次の Step 1~Step 4 の手順から成る。

- **Step 1:** 患者 p に選好順序 \succ_p を、療養先エージェント $h \in H$ の受入条件 q_h を提出させ、マッチング回数 c を 1 に設定する。
- **Step 2:** 療養先の割当が決まっていない患者はそれぞれ第 c 希望の療養先エージェントに希望を出す。
- **Step 3:** 療養を希望した患者がいる療養先エージェント h において、希望者数が q_h 以下の場合、希望した患者の療養先として仮マッチする。 q_h を超えている場合には療養先エージェントの優先順序 \succ_h の高い方から q_h まで仮マッチし、仮マッチしなかった患者はリジェクトする。
- **Step 4:** すべての患者が仮マッチをした場合、仮マッチを正式な割当として終了する。そうでなければ $c := c + 1$ として Step 2 に戻る。

3.2 手法 I により得られる割当の特性

手法 I は療養先割当に DA メカニズムをそのまま適用させるものであり、患者にとって最適な安定マッチングが得られる。加えて前項の Step 3 で希望者が受入上限未満である療養先については、その希望者の意思が完全に反映される。これらのことから、手法 I では患者の意思を特に反映した割当が得られると言える。

4 手法 II: PLDA-TQ に基づく療養先割当手法

本章では手法 I よりも療養先エージェントの意思を反映でき、かつ患者の症状を考慮した割当を得ることのできる療養先割当手法を提案する。それには療養先割当に対し、最低限割当られるべき患者数を意味する個別下限制約および優先して割当られるべき症状の患者数を意味するタイプ下限制約を追加する。これらの下限制約の課された制約付きマッチングを個別下限制約付きタイプ優先マッチングと定義し、PLDA-TQ を用いて手法 II を提案する。手法 II では療養先割当を $(P, H, T, \tau, X, \succ_P, \succ_H, q_H, r_H, r_{H,T})$ の組で定義する。未定義の記号とその意味は以下の通りである。

- $r_H = (r_{H_1}, r_{H_2}, r_{H_3})$ は療養先エージェントの個別下限のベクトルを意味する。

- $r_{H_1} = (r_{h_{11}}, \dots, r_{h_{1I}})$ は病院の個別下限のベクトルを意味する。 H_1 に属する任意の病院 h_{1i} の個別下限を $r_{h_{1i}}$ と表す。
- $r_{H_2} = (r_{h_{21}}, \dots, r_{h_{2J}})$ は宿泊療養施設の個別下限のベクトルを意味する。 H_2 に属する任意の宿泊療養施設 h_{2j} の個別下限を $r_{h_{2j}}$ と表す。
- $r_{H_3} = (r_{h_3})$ は自宅群の個別下限のベクトルを意味する。 r_{h_3} は自宅群 h_3 の個別下限を表す。

- $r_{H,T} = (r_{H_1,T}, r_{H_2,T}, r_{H_3,T})$ は療養先エージェントのタイプ下限のベクトルを意味する。なお H に属する任意の療養先エージェント h_k について $r_{h_k,T} = (r_{h_k,t_1}, r_{h_k,t_2})$ である。

- $r_{H_1,T} = (r_{h_{11},T}, \dots, r_{h_{1I},T})$ は病院のタイプ下限のベクトルを意味する。 H_1 に属する任意の病院 h_{1i} のタイプ t に関する下限を $r_{h_{1i},t}$ と表す。
- $r_{H_2,T} = (r_{h_{21},T}, \dots, r_{h_{2J},T})$ は宿泊療養施設のタイプ下限のベクトルを意味する。 H_2 に属する任意の宿泊療養施設 h_{2j} のタイプ t に関する下限を $r_{h_{2j},t}$ と表す。
- $r_{H_3,T} = (r_{h_3,T})$ は自宅群のタイプ下限のベクトルを意味する。 $r_{h_3,t}$ は自宅群 h_3 のタイプ t に関する下限を表す。

4.1 プライオリティーリスト

プライオリティーリスト \succ_{PL} は、患者から療養先エージェントへの全ての割当についてを順序付けたリストである。割当先が同一の療養先エージェントとなる2つの割当 $(p, h), (p', h)$ の順序関係については \succ_H がそのまま \succ_{PL} となる。すなわち任意の患者 p, p' と任意の療養先 h に対して $(p, h) \succ_h (p', h)$ のとき、かつそのときに限り $(p, h) \succ_{PL} (p', h)$ が成り立つ。これにより \succ_{PL} に療養先エージェントの優先順序 \succ_H が反映される。割当先が異なる療養先エージェントとなる2つの割当 $(p, h), (p', h')$ の順位関係については $(p, h) \succ_{PL} (p', h')$ となるものを以下の8つの場合と定める。

1. 療養先エージェント h における患者 p の順位が h' における p' の順位よりもよい場合。
2. 病院 $h, h' \in H_1$ における p, p' の順位がそれぞれ同じで、病床使用率が h' よりも h が低い場合。
3. 宿泊療養施設 $h, h' \in H_2$ における p, p' の順位がそれぞれ同じで、宿泊部屋使用率が h' よりも h が低い場合。
4. 病院 $h, h' \in H_1$ における p, p' の順位および病床使用率が同じ、 h' よりも h の方が添字が小さい場合。

5. 宿泊療養施設 $h, h' \in H_2$ における p, p' の順位がと宿泊部屋使用率がそれぞれ同じで、 h' よりも h の方が添字が小さい場合。
6. 病院 $h \in H_1$ と宿泊療養施設 $h' \in H_2$ における p, p' の順位がそれぞれ同じ場合。
7. 病院 $h \in H_1$ と自宅群 $h' \in H_3$ における p, p' の順位がそれぞれ同じ場合。
8. 宿泊療養施設 $h \in H_2$ と自宅群 $h' \in H_3$ における p, p' の順位がそれぞれ同じ場合。

4.2 選択関数

選択関数は割当の集合を入力とし、選択者にとって最も望ましい割当の集合を出力とする関数である。療養先割当においては選択者を患者の集合および療養先エージェントの集合とし、それぞれに選択関数 $Ch_P : 2^X \rightarrow 2^X$ と $Ch_H : 2^X \rightarrow 2^X$ を与える。 Ch_P は任意の患者 p の選択関数 Ch_p を用いて $Ch_P(X') := \bigcup_{p \in P} Ch_p(X')$ と定義する。ここで X' は割当の集合 X の部分集合を意味する。 $Ch_p(X')$ は X'_p の中で p にとって最も好ましい割当を唯一の要素として持つ集合を返す関数であり、 $X' = \emptyset$ の場合 $Ch_p(X') = \emptyset$ とする。 $Ch_H(X')$ の操作は以下の **Step I**~**Step V** となるよう定義する。

- **Step I:** 選択関数の出力 Y' を \emptyset で初期化する。
- **Step II:** X' をリストとし PL に従い X' に含まれる割当をソートする。
- **Step III:** $i = 1$ から $|X'|$ の順に、 X' に含まれる i 番目の割当 $(p, h)(\tau(p) = t)$ に関して $|\{Y' \cup \{(p, h)\}\}_{h,t}| \leq p_{h,t}$ かつ $\sum_{h \in H} \max(p_h, |\{Y' \cup \{(p, h)\}\}_h|) \leq n$ が成立するならば、 Y' に (p, h) を追加する。ただし $h = \emptyset$ ならば常に Y' に追加する。
- **Step IV:** $X' := X' \setminus Y'$ とし、 $i = 1$ から $|X'|$ の順に X' に含まれる i 番目の割当 $(p, h)(\tau(s) = t)$ に関して $|\{Y' \cup \{(p, h)\}\}_h| \leq q_h$ かつ $\sum_{h \in H} \max(p_h, |\{Y' \cup \{(p, h)\}\}_h|) \leq n$ が成立するならば、 Y' に (p, h) を追加する。
- **Step V:** Y' を出力する。

4.3 手法の流れ

手法 II の **Step A**~**Step E** の手順から成る。

- **Step A:** 各患者に療養施設の選好順序 \succ_P を提出させ、療養先エージェントは優先順序 \succ_H と受入上限 q_H を設定する。
- **Step B:** $X_P := X$ とする。すなわち各患者が選択可能な割当の集合を、患者療養先割当問題における割当の集合に一致させる。
- **Step C:** $X'' := Ch_P(X_P)$ とする。すなわち X_P の中から各患者の選好順序で最も好ましい割当が選ばれる。

- **Step D:** $X''' := Ch_H(X'')$ とする. すなわち X' の中から療養先エージェント達 H が最も優先する受入可能な割当の集合が選ばれる.
- **Step E:** $X'' = X'''$ ならば X'' を出力して終了. そうでなければ $X_P = X_P \setminus \{X'' \setminus Ch_H(X'')\}$ として **Step C** に戻る.

4.4 手法 II により得られる割当の特性

PLDA-TQ は耐戦略的であり, 個別下限制約付きタイプ優先マッチングに合わせて新たに定義された安定性を満たし, 患者にとって最適な安定マッチングが得られることが示されている²⁾. これにより手法 II においても手法 I と同様に, 割当に参加するインセンティブを患者に対し担保できる. さらに手法 II では, 病院や宿泊療養施設に個別下限制約を適切に設けることで特定の療養先エージェント (特に全ての患者を割当可能な自宅群) へ大量に患者が割当られることを防ぎ, タイプ下限制約を病院に設けることで中等症者を優先して入院させることが可能となる. 加えて 4.3 節で示した **Step D** においては療養先エージェントの優先順序を反映した PL が X''' 出力の際に用いられるため, 手法 I と異なり療養先エージェントの意思が受入上限によらず考慮される. 以上から手法 II においては手法 I よりも療養先エージェントの意思がより反映され, かつ患者の症状を考慮された割当が期待できる.

5 計算機実験

COVID-19 の事例を対象モデルとして, シミュレーションモデリングツール AnyLogic において構築したシミュレーション上で療養先割当を行うことで提案手法の有効性を評価する. また 2021 年 2 月以前の感染症法に基づく療養先割当を対照実験 (コントロール) として実施する. この手法では重症者以外の全患者を感染判明順に入院させる. 全病院とも空きがない場合に患者は自宅に割り当てられる. また療養先エージェントの優先順序を決める必要がないため, その意思反映度合は評価しない.

5.1 実験条件および評価指標

シミュレーションは各エリアに感染者が 1 人がいる状況で開始し, 期間は 200 日とした. シミュレーション回数はそれぞれの手法で 10 回ずつとし, 実験条件は以下の通りに設定した.

5.1.1 選好順序生成規則

任意のヒトエージェントにおいて, その者が持つ療養先エージェントに対する選好は他のヒトエージェントあるいは社会から完全に独立して決定されるとは言いがたい. そこで, 個人の行動傾向が準拠集団全体の属性に依存して決まるという外生効果の概念を選好順序生成規則に取り入れる. 本稿では, 準拠集団を仮想都市の地区として, 同一の地区に属するヒトエージェントに対し共通した選好順序を提出するという傾向を与えることで外生効果を表す.

任意の患者 p の選好順序 \succ_p における療養先エージェント h の順位は, 次の効用関数 $u_p: H \rightarrow [0.0, 1.0]$

により得られる効用の大きさによって決定する. その患者の効用が大きいほど選好が高く, 同じ値をとる場合には療養先エージェントの添字が若い方がより順位が高くなるように \succ_p を定める.

$$u_p(h) = wu_{p,h} + (1.0 - w)u_h^{dist_p} \quad (1)$$

$u_{p,h}$ は患者 p と療養先エージェント h の組に対し $[0.0, 1.0]$ の一様乱数で生成される値であり, 各患者固有の好みを意味する. $dist_p$ は患者 p の住む地区を指す. $(u_h^{d_1}, \dots, u_h^{d_D})$ は同一区内の全患者に対し $[0.0, 1.0]$ の範囲で共通で生成される値であり, この値により外生効果をもたらされる. w は $[0.0, 1.0]$ の重み係数を意味し, この値が小さいほど外生効果が強くなる.

外生効果をもたらす $(u_h^{d_1}, \dots, u_h^{d_D})$ は 1 日ごとに決定されるものとし, その生成規則は地区の病床フェーズによって変化が生じるものとする. 以下では地区 $d_i \in \{d_1, \dots, d_D\}$ を例に $u_h^{d_i}$ の生成規則を説明する.

- 全病床フェーズ共通: $[0.0, 1.0]$ の一様乱数を m 個生成し, 値の大きい順に (rd_1, \dots, rd_m) とする.
- 病床フェーズ 1: 自宅群 h_3 について $u_{h_3}^{d_1} = rd_1$ とし, 任意の療養先エージェント $h' \notin H_3$ における $u_{h'}^{d_1}$ に対し (rd_2, \dots, rd_m) を重複を許さずランダムに代入する.
- 病床フェーズ 2: 任意の宿泊療養施設 $h_{2j} \in H_2$ における $u_{h_{2j}}^{d_1}$ に対し (rd_1, \dots, rd_j) を重複を許さずランダムに代入する. 次に自宅群 h_3 について $u_{h_3}^{d_1} = rd_{j+1}$ とする. 最後に任意の病院 $h_{1i} \in H_1$ の $u_{h_{1i}}^{d_1}$ に対し (rd_{j+2}, \dots, rd_m) を重複を許さずランダムに代入する.
- 病床フェーズ 3: 任意の病院 $h_{1i} \in H_1$ の $u_{h_{1i}}^{d_1}$ に対し (rd_1, \dots, rd_j) を重複を許さずランダムに代入する. 任意の宿泊療養施設 $h_{2j} \in H_2$ の $u_{h_{2j}}^{d_1}$ に対し $(rd_{j+1}, \dots, rd_{j+j})$ を重複を許さずランダムに代入する. 最後に自宅群 h_3 について $u_{h_3}^{d_1} = rd_m$ とする.
- 病床フェーズ 4: 病床フェーズ 2 に同じ.

5.1.2 優先順序生成規則

療養先エージェントは, 病床や宿泊療養部屋と言った資源の有効活用および感染症のまん延防止を果たせるように意思決定を行う必要があるため, 以下の家庭内伝播リスク関数 $RIH: P \rightarrow [0.0, 1.0]$ を定義する.

$$RIH(p) = \frac{\sum_{p' \in \{p'' \in P | \text{home}(p'') = \text{home}(p)\}} CR_p(p')}{RIH_{\max}} \quad (2)$$

$CR_p : P \rightarrow [0.0, 1.0]$ は入力となる患者 p' と患者 p における家庭内接触率を返す関数を意味する。 $home : P \rightarrow \{h_{31}, \dots, h_{3K}\}$ は患者 p を入力とし、その患者が住む住宅を出力とする関数を意味する。 RIH_{\max} は 1 人の患者において想定される最大の家庭内伝播リスクを意味し、本稿においては後述する接触率の設定から 1.5 とする。この式を用いて任意の療養先エージェント h の効用関数 $u_h : P \rightarrow [0.0, 1.0]$ を以下のように定義する。

$$u_h(p) = RIH(p) \quad \forall h \notin H_3 \quad (3)$$

$$u_{h_3}(p) = 1 - RIH(p) \quad (4)$$

h が自宅エージェントでない場合においては、式 (3) により家庭内伝播リスクが大きいほど得られる効用が大きくなる。一方 h が自宅エージェントである場合においては、式 (4) により家庭内伝播リスクが大きいほど得られる効用が小さくなる。療養先エージェントの効用が大きいほど優先度合が高く、同じ値をとる場合には患者の添字が若い方がより順位が高くなるように \succ_h を定めることで、家庭内伝播リスクが高いほど病院または宿泊施設への割当が優先され、逆に家庭内伝播リスクが低いほど自宅での療養が優先される。

5.1.3 実現効用

実際に療養先割当が行われたときに、患者または療養先エージェントが得る効用を実現効用と呼ぶものとする。実現効用は、割当確定前効用が決定したときから割当が確定されるまでに生じる効用割引を考慮し定義する。患者 p が療養先エージェント h に割当られたときに得る p の実現効用 ru_p は、割引効用理論の指数時間割引の概念を参考にして以下の式 (5) で定義する。

$$ru_p = \delta^{WT_p - 1} \cdot u_p(h) \quad (5)$$

δ は時間割引率を意味し、 WT_p は患者 p が最初に割当の対象となってから実際に療養先が確定するまでの日数を意味する。患者 p が療養先エージェント h に割当られたときに得る h の実現効用 ru_h は p が療養先を得られなかった際の割引率 γ を用いて以下の式 (6) で定義する。

$$ru_h = \gamma^{UA_p} \cdot u_h(p) \quad (6)$$

γ は患者 p が療養先を得られなかった際の効用割引率を意味し、 UA_p は患者 p が療養先を得られなかった回数を意味する。本稿においては効用割引が発生するよう $\delta = 0.7, \gamma = 0.7$ を仮定する。

5.1.4 仮想都市モデルにおける条件

COVID-19 のまん延第 1 波が起こる仮想都市は東京都 23 区を模し、地区数 $D = 4$ およびエリア数 $A = 23$ として作成する。住宅数 $K = 24007$ 、会社数 $C = 145$ 、幼稚園数 $KG = 4$ 、小学校数 $ES = 4$ 、中学校数 $JS = 3$ 、高校数 $HS = 2$ および人口 $POP = 44474$ は、国勢調査を元に実際の規模

から約 1/200 にスケールダウンした値を使用する。病院は地区について 1 つ、ランダムな地区に対してもう 1 つ追加で配置し、宿泊療養施設は各地区に対し 4 つ配置する。

5.1.5 病態遷移モデルにおける条件

潜伏期間 IP は文献⁷⁾を参考に平均 5.6、標準偏差 3.9 の対数正規分布に従う乱数により生成する。有症状感染性遷移確率 POS は文献⁸⁾を参考に $POS = 0.821$ と設定する。回復または死亡までの日数 TTR は文献⁹⁾を参考に $\mu = 10.0, \sigma = 1.0$ の正規乱数により生成する。重症化率および中等症率については文献¹⁰⁾を参考に次の Table 1 の通りに設定する。

Table 1: Severe and critical rate by age

Age	Severe Rate(%)	Critical Rate(%)
under 2 y/o	9.9	0.9
2~6 y/o	5.7	0.9
7~12 y/o	2.2	0.2
13~17 y/o	2.9	0.1
18~64 y/o	14.8	2.4
over 64 y/o	35.0	6.1

5.1.6 感染プロセスモデルにおける条件

潜伏および無症状性状態患者における COVID-19 の感染力は文献^{11, 12)}を参考に $ir_a = 0.068$ と設定する。有症状性状態患者における COVID-19 の感染力は文献¹¹⁾を参考に $ir_s = 0.26$ と設定する。接触率については鳥インフルエンザ A(H5N1) 流行時において推定された値¹³⁾を参考にして地区内接触率 $cr_{district}$ 、エリア内接触率 cr_{area} および自宅内接触率 cr_{home} を Table 2 に、所属集団内接触率 cr_{group} を Table 3 に示す通りに設定する。なお Table 2 の SUS は感受性者を、SPR はスプレッダーを意味する。

Table 2: Contact rate in district, area and at home

SUS	SPR	Anyone		0~18 y/o	over 18 y/o
		$cr_{district}$	cr_{area}	cr_{home}	cr_{home}
0~4 y/o		0.0000544	0.0000725	0.6	0.3
5~18 y/o		0.0000544	0.0002175	0.6	0.3
19~64 y/o		0.0001450	0.0005800	0.3	0.4
over 64 y/o		0.0002175	0.0008700	0.3	0.4

Table 3: Contact rate on affiliation group

Classification	cr_{group}
Kindergartener	0.2500
E.S. student	0.0435
J.H.S. student	0.0375
H.S. student	0.0315
Worker	0.0575

また接触率補正係数 $cr_{correct}$ については文献¹⁴⁾を参考に 0.47 とする。

5.1.7 評価指標

本実験の結果に対する評価指標は以下の通りである。なおここでの感染者数とは無症状感染性または有症状感染性状態に遷移したヒトエージェント数のことを指す。

- 総感染者数 NI : シミュレーション開始から終了までの感染者数.
- 1患者あたりの実現効用 RU_P : シミュレーション開始から終了までに患者が得た実現効用の総和を、割当の確定した患者数の和で除した値. 患者の意思の反映度合を表す.
- 1療養先あたりの実現効用 RU_Q : シミュレーション開始から終了までに全療養先エージェントが得た実現効用の総和を、割当の確定した患者数の和で除した値. 療養先エージェントの意思の反映度合を表す.
- 中等症者割当不成立回数 UA : 中等症者が自宅待機を強いられた回数.

5.2 実験結果

式 (1) に示した w を変化させた時の評価指標の値を Table 4~7 に示し、またその変化の様子を Fig. 4~6 に示す. † は手法 II とコントロール, ‡ は手法 I とコントロール, * は手法 I と手法 II の 10 試行の結果についてそれぞれ有意水準 5% で両側 t 検定を行った際に有意差が見られたことを意味する.

Table 4: Results of NI at each w

NI	Control		Method I		Method II	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0.0*†‡	16255.3	165.3	16279.0	350.8	15788.3	263.9
0.1*†‡	16400.1	128.8	16111.9	236.6	15638.5	216.9
0.2*†‡	16360.3	132.5	16082.0	248.8	15828.1	277.2
0.3†‡	16472.5	169.2	15988.4	467.3	15753.8	356.5
0.4†‡	16389.1	291.1	15850.2	437.8	15758.2	256.3
0.5†‡	16320.2	257.5	15822.7	281.7	15679.4	260.6
0.6†‡	16344.3	244.0	15785.9	337.7	15797.1	227.7
0.7†‡	16472.5	169.2	15740.2	424.5	15774.3	336.2
0.8†‡	16391.5	277.6	15736.9	269.9	15765.4	302.3
0.9†‡	16469.7	239.0	15807.1	206.2	15629.0	355.3
1.0†‡	16441.2	274.0	15744.7	320.5	15824.5	248.0

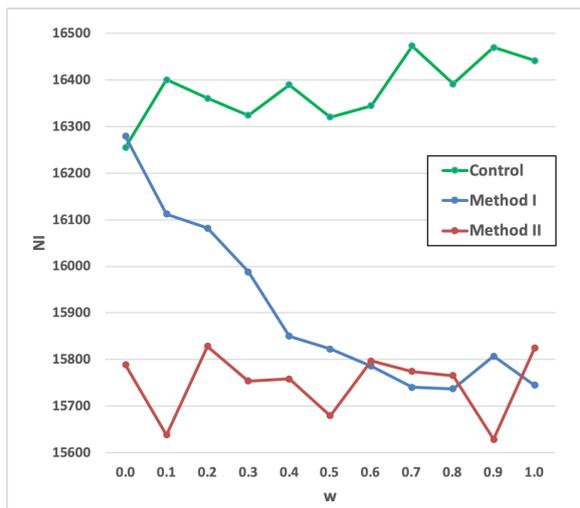


Fig. 4: Changes in NI at each w

NI については、Table 4 および Fig. 4 より $w = 0.0$ における手法 I の値を除いて提案手法がコントロールよりも感染者を減らすことに成功している. 特に手法 II においては全ての w において有意差が

見られ、かつ総人口 2% 分の感染抑制が達成されている. またコントロールの割当方法が w によって変化しないことを踏まえると、手法 II は w によらず一定の感染抑制効果を発揮することが分かる. 手法 I においては $w = 0.4$ 付近から $w = 1.0$ まで手法 II と同程度の感染抑制効果が得られているものの、 $w = 0.3$ 以下の値においては感染抑制効果が低くなっていることが分かる. 外生効果における定義から、 w が小さいほど各患者が外生効果の影響を強く受けてフェーズ 1 および 2 にて患者の多くが自宅療養を希望しやすくなる. 手法 I はそういった患者の意思をそのまま割当に反映させてしまうために家庭内感染のリスクが高まりこのようになったと考えられる.

Table 5: Results of RU_P at each w

RU_P	Control		Method I		Method II	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0.0*†‡	0.23	0.0325	0.65	0.051	0.56	0.0286
0.1*†‡	0.24	0.0231	0.66	0.036	0.56	0.0262
0.2*†‡	0.29	0.0229	0.68	0.029	0.58	0.0195
0.3*†‡	0.31	0.0062	0.68	0.031	0.60	0.0193
0.4*†‡	0.34	0.0204	0.71	0.023	0.63	0.0187
0.5*†‡	0.35	0.0190	0.74	0.010	0.66	0.0134
0.6*†‡	0.38	0.0092	0.76	0.011	0.69	0.0040
0.7*†‡	0.41	0.0062	0.80	0.010	0.74	0.0118
0.8*†‡	0.44	0.0072	0.83	0.008	0.78	0.0080
0.9*†‡	0.46	0.0065	0.87	0.011	0.82	0.0073
1.0*†‡	0.49	0.0037	0.92	0.009	0.87	0.0074

Table 6: Results of RU_Q at each w

RU_Q	Control		Method I		Method II	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0.0*	-	-	0.51	0.0168	0.56	0.0078
0.1*	-	-	0.49	0.0101	0.55	0.0094
0.2*	-	-	0.49	0.0153	0.54	0.0054
0.3*	-	-	0.47	0.0088	0.53	0.0050
0.4*	-	-	0.46	0.0089	0.53	0.0092
0.5*	-	-	0.46	0.0075	0.52	0.0107
0.6*	-	-	0.46	0.0090	0.52	0.0051
0.7*	-	-	0.46	0.0064	0.51	0.0062
0.8*	-	-	0.46	0.0074	0.51	0.0063
0.9*	-	-	0.46	0.0099	0.51	0.0079
1.0*	-	-	0.46	0.0089	0.50	0.0062

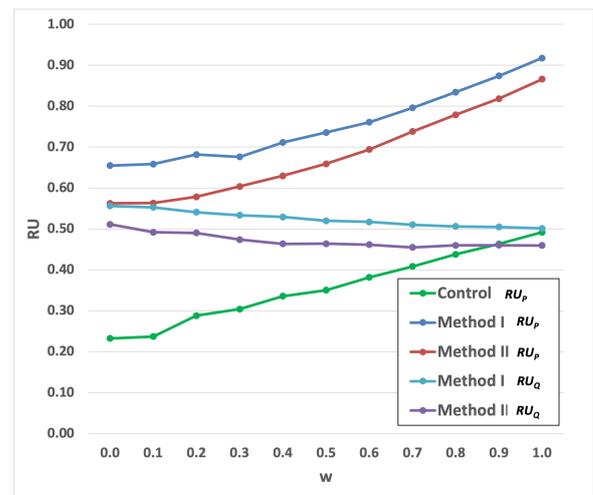


Fig. 5: Changes in RU_P, RU_Q at each w

RU_P については、Table 5 および Fig. 5 より w によらず常に提案手法がコントロールを上回っており、患者の意思を割当に反映できていると言える。手法 I と手法 II を比べると常に手法 I が高くなっておりその差が有意であるため、手法 I が患者の意思を特に反映できる手法であると言える。一方で RU_Q については Table 6 および Fig. 5 より手法 II と手法 I を比べると常に手法 II が高くなっており、かつその差が有意であることから、手法 II は療養先エージェントの意思を反映できる手法であると言える。特に病床フェーズ 1,2 で自宅療養を希望する患者の多くなる $w = 0.0$ から $w = 0.3$ では療養先の意思を反映した結果として期待される総感染者数の抑制効果が現れていることが NI の値より分かる。

Table 7: Results of UA at each w

UA	Control		Method I		Method II	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
$0.0^{*†}$	369.5	23.9	460.6	428.5	0.0	0.0
$0.1^{*†}$	369.2	40.7	572.6	289.9	0.0	0.0
$0.2^{*†}$	365.1	38.0	560.2	373.5	0.0	0.0
$0.3^{*†‡}$	360.9	22.8	699.6	438.6	0.0	0.0
$0.4^{*†}$	367.8	47.4	557.8	263.9	0.0	0.0
$0.5^{*†‡}$	344.2	28.7	576.2	102.6	0.0	0.0
$0.6^{*†}$	361.5	23.2	481.8	171.1	0.0	0.0
$0.7^{*†}$	360.9	22.8	345.4	175.6	0.0	0.0
$0.8^{*†‡}$	380.3	33.4	202.1	143.2	0.0	0.0
$0.9^{*†‡}$	360.3	29.2	60.2	76.3	0.0	0.0
$1.0^{*†‡}$	360.5	31.0	41.4	52.0	0.0	0.0

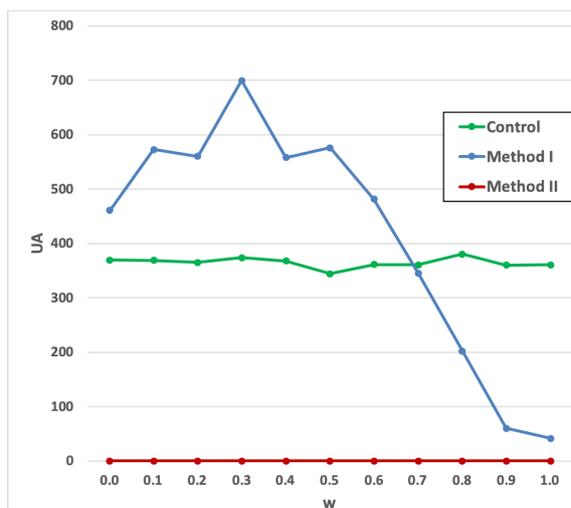


Fig. 6: Changes in UA at each w

UA については、Table 7 および Fig. 6 より手法 II が常に中等症者の割当不成立を起こしていないことが分かる。また $w = 0.7$ 以下となる w の範囲において手法 I の中等症者割当不成立が多く発生している。 $w = 0.0$ 付近にて手法 I の割当不成立回数が $w = 0.3$ の時の回数より小さいのは、病床フェーズ 1,2 までの病床の活用の仕方に起因していると考えられる。より具体的には病床フェーズ 1,2 においてもたらされる外生効果が病院に対する好みの度合を低くするものであり、この効果が強いとき手法 I では病院への割当が行われにくくなるために、病床使

用率に余裕が生まれ病床フェーズ 3 で多くの中等症者が入院できるようになるためと考えられる。

6 おわりに

本稿では、宿泊療養と自宅療養を活用する契機となった新興感染症 COVID-19 の療養先割当を対象に、マッチングメカニズムに基づいた提案手法の有効性を評価した。外生効果強度によらず多くの指標において提案手法はコントロールより有効であったが、選好傾向に偏りが生じる場合に手法 I は感染抑制と中等症患者への配慮に問題が生じた。手法 II はそういった場合に対しても他手法よりも有効であり、外生効果に対して頑健であった。今後の課題として、COVID-19 以外の感染症への適用や最適な割当を得る下限制約の生成規則の検討が挙げられる。

参考文献

- 1) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000799596.pdf>
- 2) 濱田, 倉田, 後藤, 横尾: 個別下限制約付きタイプ優先マッチング問題, 第 29 回人工知能学会全国大会論文集, 1/4 (2015)
- 3) 貝原, 藤井, 國領, 川本: 制約付きマッチングに基づいた新興感染症患者療養先割当手法の一提案, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, 258/263 (2021)
- 4) Arcede, Caga-anan, Mentuda, and Mammeri: Accounting for symptomatic and asymptomatic in a seir-type model of COVID-19, *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, **15**-34, 34/44 (2020)
- 5) Morimoto and Ishikawa: Assessment of intervention strategies against a novel influenza epidemic using an individual-based model, *Environmental Health and Preventive Medicine*, **15**-3, 151/161 (2010)
- 6) https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/37375/00371924/07_siryous3-1.pdf
- 7) Linton, et al.: Incubation period and other epidemiological characteristics of 2019 novel coronavirus infections with right truncation, *Journal of Clinical Medicine*, **9**-2, 538/546 (2020)
- 8) Mizumoto, Kagaya, Zarebski, and Chowell: Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the diamond princess cruise ship, yokohama, japan, 2020, *Eurosurveillance*, **25**-10, 1/5 (2020)
- 9) Anderson, Heesterbeek, Klinkenberg, and Hollingsworth: How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic?, *The Lancet*, **395**-10228, 931/934 (2020)
- 10) Bellino, et al.: COVID-19 disease severity risk factors for pediatric patients in italy, *Pediatrics*, **146**-4, 1/10 (2020)
- 11) Kuniya: Prediction of the epidemic peak of coronavirus disease in japan, 2020, *Journal of Clinical Medicine*, **9**-3, 789/795 (2020)
- 12) Sayampanathan, et al.: Infectivity of asymptomatic versus symptomatic COVID-19, *The Lancet*, **397**-10269, 93/94 (2021)
- 13) Germann, Kadau, Longini Jr., and Macken: Mitigation strategies for pandemic influenza in the united states, *Proc Natl Acad Sci USA*, **103**-15, 5935/5940 (2006)
- 14) Kucharski, et al.: Effectiveness of isolation, testing, contact tracing, and physical distancing on reducing transmission of SARS-CoV-2 in different settings, *The Lancet Infectious Diseases*, **20**-10, 1151/1160 (2020)