

実社会における施設内密集度評価のための シミュレーション構築

加藤 悠宇汰¹ 大場 春佳¹ 水野 信也^{1,a)}

概要: 新型コロナウイルスの蔓延により、世界中でウイルス感染防止の施策が行われている。コロナ禍以前は、混雑が発生した場合、人の密集は当然のことと認識されていたが、現在は人の密集を発生させない取り組みをしなければならない。しかしながら、建造物や施設構造の変更は容易でないため、人の動線の分散や滞在時間の短縮などで、密集を防ぐ必要がある。適切な施設内での密集回避のためには、現実的なシミュレーションで評価を行う必要がある。混雑度を評価する手法に待ち行列理論があるが、待ち行列理論およびそのシミュレーションは、人と人との間隔、待ち行列と建物構造との関係、経路上の混雑を考慮していない。そこで、本研究では、施設密集度を定義して、待ち行列シミュレーション上に実在する施設環境を取り込み、待ち行列理論では確認することができない混雑や密集を施設密集度として評価できるシミュレーション環境を提案する。これにより、今後の社会に必須となる施設密集度を実モデルとして評価でき、社会にフィードバックできると考えられる。

A Simulation for evaluation of in-facility density in the real world

1. はじめに

新型コロナウイルスの蔓延により、世界中でウイルス感染防止の施策が行われている。コロナ禍以前は、混雑が発生した場合、人の密集は当然のことと認識されていたが、現在は人の密集を発生させない取り組みをしなければならない。しかしながら、建造物や施設構造の変更は容易でないため、人の動線の分散や滞在時間の短縮などで、密集を防ぐ必要がある [1-3]。適切な施設内での密集回避のためには、まず現在の密集度を評価する必要がある。混雑度を評価する手法に待ち行列理論がある。待ち行列理論は数学的な理論に裏付けされたものであり、定常性の仮定のもとで待ち行列の長さや待ち時間から混雑度を可能である。待ち行列理論の中でも BCMP 待ち行列ネットワークは [4-6]、ネットワークタイプに開放型、閉鎖型、混在型を選択でき、サービスタイプも 4 種類用意され、客クラスも定義可能であることから、幅広いモデルに適用可能である。しかし、膨大な再帰計算が必要など大規模モデルへの適用が課題で

あった [7,8]。また待ち行列理論およびそのシミュレーションは、定常性の仮定が必要、人と人との間隔、待ち行列と建物構造との関係、経路上の混雑を考慮していないことから、現実モデルとの乖離が懸念されていた。

本研究では、現在の新型コロナウイルス感染対策のために、施設密集度を定義して、各施設における密集度の評価を行い、施設における取り組みに関する情報を与える。今回は、数学的に裏付けられた待ち行列理論をベースに考え、ネットワークモデルとして柔軟性が高い BCMP 待ち行列ネットワークを採用する。施設内での密集度を評価するために閉鎖型ネットワークで考えていく。この閉鎖型 BCMP ネットワークを用いて、最初に施設内での理論値で特に平均系内人数を算出することで、施設内の拠点における密集度を評価する。次に、同モデルに対してシミュレーションを実行することで、開場時の客の挙動、ソーシャルディスタンスの影響、客の移動における経路上の混雑等を計測していく。待ち行列理論をベースにして施設における基本密集度を得たあと、待ち行列理論では確認することができない混雑や密集を施設密集度として評価できるシミュレーション環境を提案する。これにより、今後の社会に必須となる施設密集度を実モデルとして評価でき、社会にフィードバックできると考えられる。

¹ 静岡理科大学
Shizuoka Institute of Science and Technology, Fukuroi,
Shizuoka 437-8555, Japan

a) mizuno.shinya@sist.ac.jp

2. BCMP 待ち行列ネットワークモデルの定式化

ここでは BCMP 待ち行列ネットワークモデル (以下, BCMP) の定義を確認して, 理論値を求める手法を述べる. BCMP は開放型と閉鎖型両方が可能であるが, 本研究では一定の客が施設にいた場合の密集度がその施設構造の密集に対する耐性と考え, 閉鎖型ネットワークでの評価を行う. 以下, BCMP はすべて閉鎖型ネットワークとして扱う.

2.1 BCMP 待ち行列ネットワークモデルの定義

最初に本研究で利用する閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークモデルを確認する.

- (1) ネットワーク内には $N(N \geq 1)$ 個のノードが存在する
- (2) 客は $R(R \geq 1)$ 種類のクラスの中のいずれかのクラスに属する. 今回は客の属しているクラスから他のクラスへの変更はないものとする.
- (3) 網内に $K(K \geq 1)$ 人の客がいるとき, ノード $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ にいるクラス $r \in \{1, 2, \dots, R\}$ の客数を $k_{n,r}$ で表し, $K = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N k_{n,r}$ である
- (4) 客はマルコフ連鎖 $P = (p_{(n,r),(n',r')})$ に従って網内を移動する. 今回は閉鎖型を採用しているので, $p_{0,(n,r)} = 0, p_{(n,r),0} = 0$ となる. ここで状態 0 は網外部を示している. また今回客のクラス変更はないことから, $p_{(n,r),(n',r')} = 0, n, n' \in \{1, 2, \dots, N\}, r, r' \in \{1, 2, \dots, R\}, r \neq r'$ となる
- (5) $\alpha_{n,r}$ をノード n , クラス r における客の到着率とする
- (6) ノードでのサービスタイプは以下の 4 タイプである
 - FCFS (First-Come First-Served)
 - Processor Sharing
 - Infinite Server
 - LCFS-PR (Preemptive-Resume Last-Come, First-Served)
- (7) ノード n での窓口数を $m_n(m_n \geq 1)$ とする
- (8) ノード n において, クラス r の客に対するサービス率を $\mu_{n,r}$ で表す

2.2 BCMP 待ち行列ネットワークモデルの特性量算出過程

BCMP 待ち行列ネットワークにおいては, 客クラス, サービスタイプ, 窓口数など多くの要素を扱う. ここでは閉鎖型 BCMP の特性量を算出するまでの過程を述べる. BCMP の特性量算出には, 平均値解析法など各ノードでの平均系内人数を求める手法が提案されているが, ここでは確率分布の算出に注目することで, より柔軟な分析ができると考え, 量み込み法を用いることにする.

2.2.1 閉鎖型 BCMP における環境パラメタ設定

ノード数: N , 客クラス数: R , 網内の客数: K , 網内の

客クラスごとの推移確率: P , 各ノードでの窓口数: m_n , ノードでの客クラスに対するサービス率: $\mu_{n,r}$ を与える.

2.2.2 到着率 $\alpha_{n,r}$ の算出

次に与えられている推移確率から到着率 $\alpha_{n,r}$ を算出する. 到着率 $\alpha_{n,r}$ は次の方程式から得られる.

$$\alpha_{n,r} = \sum_{\nu=1}^R \sum_{i=1}^N \alpha_{i,\nu} P_{(i,\nu),(n,r)} \quad (1)$$

今回は閉鎖型であり, 客のクラス間の移動は仮定していないので, $\alpha_{1,r} = 1, (1 \leq r \leq R)$ とおく. (1) を書き換えると,

$$\alpha = \alpha P \\ (P^T - I)\alpha = 0 \quad (2)$$

となり, (2) と解いていく. ここで I は単位行列であり, $\alpha_{1,r} = 1, (1 \leq r \leq R)$ である.

2.2.3 正規化定数 $G(K)$ の算出

BCMP 閉鎖型では, 定常分布を求める場合に正規化定数を利用する. 正規化定数は次の式で定義される.

$$G(K) = \sum_{\sum_{i=1}^N S_i = K} \prod_{i=1}^N F_i(S_i) \quad (3)$$

ここで,

$$K = (k_1, k_2, \dots, k_R) \quad (4)$$

$$S_i = (k_{i,1}, k_{i,2}, \dots, k_{i,R}) \quad (5)$$

$$k_r = \sum_{i=1}^N k_{i,r} \quad (6)$$

となり,

$$\sum_{i=1}^N S_i \\ = (k_{1,1}, k_{1,2}, \dots, k_{1,R}) + \dots + (k_{N,1}, k_{N,2}, \dots, k_{N,R}) \\ = (k_1, k_2, \dots, k_R) \\ = K$$

が成り立つ. ここで $F_i(S_i)$ は次の式となる.

$$F_i(S_i) = \begin{cases} k(i)! \frac{1}{\beta_i(k(i))} \left(\frac{1}{\mu_i}\right)^{k(i)} \prod_{r=1}^R \frac{1}{k_{i,r}!} \alpha_{i,r}^{k_{i,r}} & FCFS \\ k(i)! \prod_{r=1}^R \frac{1}{k_{i,r}!} \left(\frac{\alpha_{i,r}}{\mu_{i,r}}\right)^{k_{i,r}} & PS, LCFS - PR \\ \prod_{r=1}^R \frac{1}{k_{i,r}!} \left(\frac{\alpha_{i,r}}{\mu_{i,r}}\right)^{k_{i,r}} & IS \end{cases}$$

ここで, $k(i)$ は各ノードでクラス毎集約した数値であり, $k(i) = \sum_{r=1}^R k_{i,r}$ である. また $\beta_i(k(i))$ は

$$\beta_i(k(i)) = \begin{cases} k(i)! & k(i) \leq m_i \\ m_i! m_i^{k(i)-m_i} & k(i) \geq m_i \\ 1 & m_i = 1 \end{cases}$$

である。ここで式 (3) を畳み込み法で処理するために、次の式を取り入れる。

$$G_n(\mathbf{k}^{(n)}) = \sum_{\mathbf{k}^{(n-1)} + \mathbf{S}_n = \mathbf{k}^{(n)}} G_{n-1}(\mathbf{k}^{(n-1)}) F_n(\mathbf{S}_n) \quad (7)$$

ここで、 $G_1(\cdot) = F_1(\cdot)$ であり、 $\mathbf{k}^{(n)}$ は、

$$\mathbf{k}^{(n)} = \sum_{i=1}^n \mathbf{S}_i = (k_1^{(n)}, \dots, k_R^{(n)}) \quad (8)$$

となる。 $k_r^{(n)}$ は $1 \leq r \leq R$ である。つまり $\mathbf{k}^{(n)}$ は、ノード番号が 1 から n に制限した場合の各クラスで集約した人数ベクトルであり、 $\mathbf{k}^{(N)} = \mathbf{K}$ である。式 (7) を用いる場合、 $G(\mathbf{K}) = G_N(\mathbf{K}^{(N)})$ で正規化定数 $G(\mathbf{K})$ を求めることができる。

2.2.4 周辺分布の算出

次に、各ノードに各クラスの客が滞在している確率を求めていく。この周辺分布は次の式で得られることが知られている。

$$\pi_i(\mathbf{k}) = \frac{F_i(\mathbf{k})}{G(\mathbf{K})} G_N^{(i)}(\mathbf{K} - \mathbf{k}) \quad (9)$$

ここで、 $G_N^{(i)}(\mathbf{k})$ の畳み込み式は、

$$G_N^{(i)}(\mathbf{k}) = G(\mathbf{k}) - \sum_{j=0}^{\mathbf{k}} \delta(j) F_i(j) G_N^{(i)}(\mathbf{k} - j) \quad (10)$$

$$G_N^{(i)}(\mathbf{0}) = G(\mathbf{0}) = 1, i = 1, \dots, N$$

である。ここで、

$$\delta(j) = \begin{cases} 0 & j = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である。

2.3 閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークの数値計算例

今回は実社会モデルとして、静岡県浜松市にある浜名湖ガーデンパークを例とする。浜名湖ガーデンパークには 30 を超える園内スポットが存在して、今回この各スポットを拠点として扱う。今回の閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークで扱う条件は表 1 になる。図 1 は今回利用する浜名湖ガーデンパークの全体図である。

表 1 閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークの設定条件

項目	値
場所	浜名湖ガーデンパーク
拠点数	33 拠点
客クラス数	2 クラス
客数	100 (各クラス 50 人)
ネットワークタイプ	閉鎖型
窓口数	各拠点で 1 つずつ
サービス率	各拠点 $\mu_i = 1(\text{minute})$

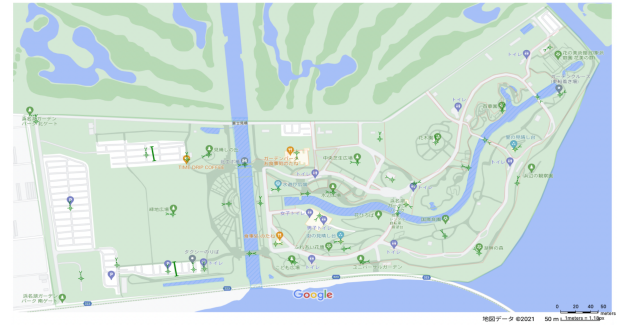


図 1 浜名湖ガーデンパークの全体図

推移確率は次の重力モデル [9](11) によって作成する。今回の重力モデルパラメタは、 $(\alpha, \beta, \eta) = (1.0, 1.0, 0.5)$ とし、重力モデル正規化定数 $C = 0.1475$ としている。拠点の人気度は 5 または 10 を拠点毎設定しており、拠点間の距離は直線距離を用いている。

- $f_{i,j}$: 拠点 i から拠点 j への総移動量,
- q_i : 拠点 i の人気度,
- r_j : 拠点 j の人気度,
- $d_{i,j}$: 拠点 i と拠点 j との距離,
- C : 重力モデルにおける正規化定数,

$$f_{i,j} = C \frac{q_i^\alpha r_j^\beta}{d_{i,j}^\eta}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

2.4 BCMP 特性量算出のための技術要素

今回閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークの平均系内人数などの特性量を求めるとき、式 (3) を畳み込みを利用して式 (7) で求めていく。ここでは再帰計算を行うことから、膨大なメモリと計算量を要する。実社会モデルを扱う場合、テーマパークなど拠点数や系内人数が多い場合が考えられる。大規模なモデルに対応できるように、メモ化 (memoization) を式 (7) に利用することで、再帰計算で既に計算した値を保持して値の再利用を行う。これにより、大幅な計算量の削減が可能になる。また今回の数値計算で用いた計算環境は表 2 のようになる。

表 2 閉鎖型 BCMP 理論値算出のための計算環境

項目	内容
プログラム言語	python3.6
計算資源	OCTOPUS(大阪大学)
Processor	Intel Xeon Gold 6126 (Skylake/2.6GHz 12core) 2 units
Memory	192GB
利用ノード数	1

この計算環境で拠点数とクラス数は固定で網内の人数を増やしたときの計算時間を示したものが図 2 になる。網内の人数 $K = 100$ の場合でも 81 分で計算が可能となっている。今回の理論値算出にはメモ化を利用したが、メモ化を

利用しない場合、 $N = 33, R = 2, K = 5$ の条件下でも約 4 時間の計算時間が必要となることから、メモ化の効果が確認できる。

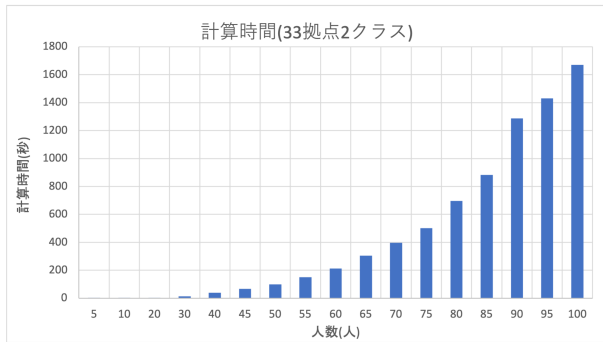


図 2 $N = 33, R = 2$ のときの網内の人数を変えた場合の理論値算出までの計算時間

今回の閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークの平均系内人数を表したものが図 3 となる。

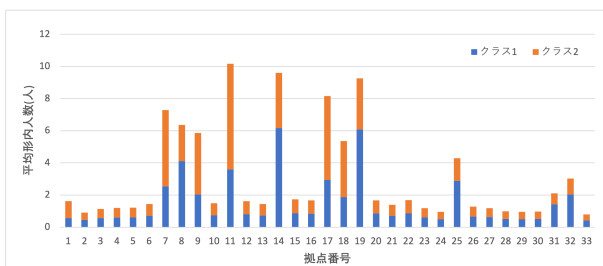


図 3 BCMP の平均系内人数

2.5 BCMP を利用した施設密集度の定義

BCMP から得られる特性量を用いて、施設密集度 D の定義を以下のように行う。拠点ごと決められた収容客数を超えた場合に、 D にペナルティ値を加えている。

$$D = \sum_{n=1}^K (|L_n - CP_n| + PT_n * I(\bar{A}_n)) \quad (12)$$

- L_n : 拠点 n における平均系内人数, $L_n = \sum_{r=1}^R L_{n,r}$
- CP_n : 拠点 n における最大収容客数
- PT_n : 拠点 n におけるペナルティ値
- A_n : 拠点 n で安定が保たれている状態
- $I(A_n)$: 事象 A_n に対する指示関数
[ペナルティ条件]
- L_n が CP_n を超えた場合

3. BCMP 待ち行列ネットワークモデルに対するシミュレーション構築

BCMP 待ち行列ネットワークモデルに対する理論値算出は前章で述べた。待ち行列理論は数学的に裏付けられた

説得力の高い値を提供するが、定常性の仮定、ノード間の移動時間・距離を考慮しない、施設の物理的な制約を反映しにくいなど、実社会のモデルに適用するには問題が残る。先に述べたように、BCMP 待ち行列ネットワークは客のクラスタイプや 4 つのサービスタイプを持ち、定常分布算出まで可能なモデルである。この BCMP をベースとしてモデル構築を行い、実社会で必要とする物理的な制約などを反映したシミュレーションモデルと連携することによって、実社会に必要なモデルを提供していくことが可能になる。今回シミュレーションで利用したソフトウェアは表 3 になる。この 2 つのソフトウェアで Anylogic [10] は数値的な評価を行い、Unity で [11] 作成したシミュレーションは視覚的な密集度の確認に利用している。

表 3 利用したソフトウェア

ソフトウェア名	特徴
Anylogic	有料ソフトウェア
	歩行者ライブラリ [12] を利用
	地理的情報は独自に設定
	歩行速度は最大 10m/s 主に数値的な評価に利用
Unity	Personal 版 (無料) を利用
	主に視覚的な密集評価に利用

3.1 BCMP に対するシミュレーション連携の有効性

BCMP に対して、シミュレーション連携で得られるメリットは表 4 のようになる。

表 4 BCMP シミュレーション連携のメリット

BCMP の課題	シミュレーション対応
施設開場時の客の動向	シミュレーション開始時の動向を確認 定常になるまでの時間を計測可能
待ち行列の物理的制約	実際の施設構造を考慮して、 どの程度待ち行列を作れるか検討 待ち行列が作られた場合の施設内密集度を計測可能
客の経路移動	ソーシャルディスタンスを考慮
	施設内の動線を考慮する
	客の移動時間を考慮する
	経路上の密集度を計測可能 客クラスの移動速度を反映可能

3.2 BCMP シミュレーションの精度の確認

最初に BCMP シミュレーションの精度の確認を行う。図 4 は閉鎖型 BCMP ネットワークの理論値とシミュレーション値 (全期間の平均) に対する平均系内人数の RMSE (Root Mean Square Error) をとったものである。横軸は時刻 (単位: 分) であり、縦軸の RMSE が時間の経過につれて改善されていることがわかる。1000 分経過時の RMSE の値は

0.521 であり、拠点あたりの誤差としては許容範囲と考えられる。これからも理論値を利用する場合は、その環境での一定時間経過後である必要があることがわかる。

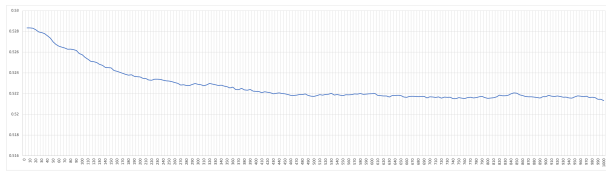


図 4 シミュレーション時刻に対する RSME の値推移

3.3 移動経路の影響

ここでは、シミュレーションにおいて移動経路を設定した場合の影響について考察する。待ち行列理論では通常移動経路は考慮しないため、現実のモデルとの差異が発生する可能性がある。図 5 は移動経路を設定した場合の影響例の一つである。ここでは川に対して橋でないと移動できない設定をしている。また図の上下 2 箇所には橋があるが、上の橋は幅が狭いが、下の橋は幅が広い。このシミュレーションでは網内に 1000 人滞在する設定であるが、施設内の人口が増えると拠点以外での待ちが発生する。これは拠点間の移動時間にも影響して、理論値との差異を大きくする要素である。



図 5 移動経路を設定した場合の影響例

3.4 移動速度の影響

待ち行列理論では移動速度や移動時間は考慮されないが、実モデルでは当然考えなければならない要素である。待ち行列理論では、サービス終了後、直ちに次の拠点に移動してサービスを受けるか待ち行列に並ぶ。しかし、拠点間を移動する場合、移動速度が遅いと当然次の拠点到着まで時間がかかり、理論値の差異が起こると考える。図 6 はある時刻において待ち行列に並んでいない人数をグラフに

したものである。サービス中の可能性もあるが、移動速度が早いパターンでは移動途中の客は少ないが、移動速度が遅い客は移動途中である可能性が高い。

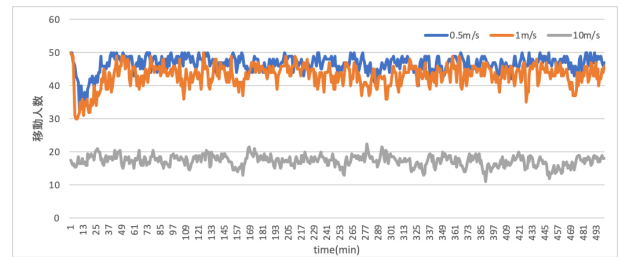


図 6 移動速度を考慮した場合の待ち行列に並んでいない人数

3.5 構造物に対する待ち行列の形の検討

施設における構造物の影響も考慮しなければならない。待ち行列を直線で考えるだけでなく、直線の場合の制約や構造物に依存した形が必要になる。図 7 は待ち行列の形を設定した場合の人口密度の例である。左側のように直線で設定した場合、待ち行列の後方での滞留が大きい。右側のように折れ曲がった形で設定した場合、密集を避ける必要があるが、後方部分の影響は少なくなる。理論値において待ち行列の長さが得られた場合、拠点においてどのような形状の待ち行列にするかを検討できる。

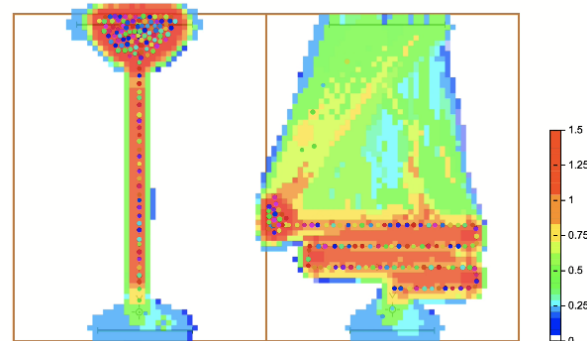


図 7 待ち行列の形を設定した場合の人口密度

4. さいごに

本研究では、新型コロナウイルス感染対策として施設内密集度評価として閉鎖型 BCMP 待ち行列ネットワークを用いて理論値を算出することで、施設内密集度の評価を行った。BCMP は待ち行列理論の中でも柔軟性の高いモデルであり、ネットワークタイプや客クラスの設定が可能である。施設密集度に関する基本情報は、この BCMP から取得することで、全体的な評価が可能である。待ち行列理論は移動時間や移動経路の制約などの仮定が無いなど、実モデルと隔たる部分が否めない。そこで本研究では動的なシミュレーションを構築することで、BCMP だけでは得

ることの出来なかった情報を得た。今回は移動経路、移動速度、待ち行列の形状について考察を行い、移動経路を設定した場合、拠点以外の部分でも客の滞留場所が発生してしまい、移動時間がさらにかかってしまうなど影響が明らかになった。

今後の課題として、施設内が密集しないように、拠点数、拠点場所、滞在時間、滞在人数、網内の人数をパラメータとして移動経路、移動時間を考慮しながら密集を分散させる最適化が必要になる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21K11774 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Alsaedy, Alaa AR, and Edwin KP Chong: “Detecting regions at risk for spreading covid-19 using existing cellular wireless network functionalities,” *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology.*, Vol. 1, pp. 187–189 (2020)
- [2] Fang, Zhiming, et al.: “How many infections of covid-19 there will be in the” diamond princess”-predicted by a virus transmission model based on the simulation of crowd flow.,” *arXiv preprint arXiv.*, 2002.10616 (2020)
- [3] Karako, Kenji, et al.: “TAnalysis of COVID-19 infection spread in Japan based on stochastic transition model,” *Bioscience trends.* (2020)
- [4] Baskett, F., Chandu, K. Mani, Muntz, R.R., Palacios, F.G.: “Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers,” *Journal of the ACM.*, Vol. 22, No. 2, pp. 248–260 (1975)
- [5] Harrison, J.M., Williams, R.J.: “On the Quasireversibility of a Multiclass Brownian Service Station,” *The Annals of Probability. Institute of Mathematical Statistics.*, Vol. 18, No. 3, pp. 1249–1268 (1990)
- [6] 笠原正治: “待ち行列理論とシミュレーション,” 電子情報通信学会「知識ベース」, (2010).
- [7] 池ヶ谷克基, 大場春佳, and 水野信也: “最適拠点配置への待ち行列モデルの利用,” 経営情報学会 全国研究発表大会要旨集 2019 年秋季全国研究発表大会, (2019).
- [8] 大場春佳, 水野信也: “大規模 BCMP 待ち行列ネットワークの実社会利用に向けて,” 経営情報学会 2021 年度年次大会, (2021)
- [9] Anderson, James E: “The gravity model,” *Annu. Rev. Econ.*, Vol.3, (2011)
- [10] AnyLogic: Simulation8 Modeling Software Tools & Solutions for Business(online),
入手先 (<https://www.anylogic.com/>) (2021.08.09).
- [11] Unity: Unity のリアルタイム開発プラットフォーム — 3D/2D、VR/AR のエンジン (online),
入手先 (<https://unity.com/ja>) (2021.08.09).
- [12] AnyLogic: 歩行者ライブラリ (online),
入手先 (<https://www.anylogic.jp/features/libraries/pedestrian-library/>) (2021.08.09).