

# データサイエンスによる COVID-19 感染者数の最小化を実現する ICT 機能の発見

代表研究者 大前 佑斗 日本大学 生産工学部 専任講師  
共同研究者 柿本 陽平 日本大学 生産工学部 助手

## 1 概要

2020 年より世界各国で COVID-19 の感染が拡大し、現在においても終息の兆しが見えない。そのため、マスク着用やアルコール消毒をはじめとして、テレワーク[1]、ロックダウン[2]、移動制限 [3]、空港検疫[4]、トレーシングアプリ[5] など様々な対策が実施されている。また、薬品的な介入として、COVID-19 のワクチンも開発された[6-8]。しかし、現実社会は感染者数の増大に寄与する要因、削減する要因などが複雑に混ざり合っているため、単一の対策の効果を検証することは難しい。そのため本研究では、マルチエージェントシミュレーション (MAS) や微分方程式のモデリングにより、対策の効果検証を行う。さらに、どのような ICT システムがあれば感染者数を十分に削減することができるのか、シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。

この前提を踏まえ本研究では、現在広く普及している接触確認アプリ COCOA や、ワクチン接種を支援する ICT システム、飲食店において感染リスクを減らす着座管理手法、実際の人流データを用いたハイリスクエリアの特定手法などについて、分析を進めた。本項はこれらの研究過程およびその結果について言及するものである。単年度の研究であったため、感染者数を最小化する環境は発見できなかったが、これを足がかりとし、今後も研究を継続していく予定である。

## 2 MAS による接触確認アプリ COCOA の効果検証 (1 次接触通知)

現在我が国において、COVID-19 接触確認アプリ COCOA が開発され、普及されている。一方、この感染者数削減効果の検証は十分ではなかった。そのため本研究では、感染伝播をシミュレーション可能な MAS に対し、COCOA を表現可能なパラメータを実装した。具体的には、アプリの利用率、感染者の登録率、接触通知が来たエージェントの外出自粛率のパラメータを有する。これにより、アプリを皆が利用し、陽性者はそれをアプリに登録し、接触通知が来た人は外出を自粛すると、感染者数が大幅に削減できることがわかった。一方で、そのうちのどれかが欠落すると、感染者数の削減効果が落ちることが確認されている。

本研究で使用するマルチエージェントシミュレータは乱数依存性が高く、応募当初は分析結果が収束していないという問題があった。これにより、COCOA を普及させた場合に感染者数が増えるなどの不適切な箇所が一部においてみられたが、シミュレーションシード数を 30 から 300 程度に増大させた結果、直感的に問題のない結果となった。この結果は、2021 年 11 月に富士技術出版社の論文誌 *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics* から出版された。なお、Core i5-8500, 8GB RAM の計算機において、人口規模 1000 人程度・シミュレーション期間 45 日間の場合、結果が収束するまでに 3,000 時間程度のシミュレーション時間が要求されたため、分析の複雑さをどこまで高めるかについては、議論の余地があることがわかった。

## 3 MAS 接触確認アプリ COCOA の効果検証 (2 次接触通知)

1 次接触通知機能を有する接触確認アプリ COCOA がある程度の普及を見せているが、それでもなお、COVID-19 の収束には至っていない。そのため、より多くの感染者数を削減する追加機能があることが望ましい。以上より本研究では、COCOA への新規機能の追加案として、2 次接触者への通知機能を提案する。通常の COCOA は、陽性登録を行った人と過去 2 週間に接触した人へと通知を発信するが、上述した新規機能では、接触通知が来た人 (すなわち、1 次接触者) と接触した人にも接触通知を発信する (すなわち、2 次接触者)。1 次接触者は COVID-19 に感染した可能性があるため、2 次接触者もまた、感染の可能性がある。そのため、このような人へも通知を行い、外出自粛を促せば、より多くの感染者を削減できると考えられる。実際にこの機

能を有する COCOA を MAS に実装し、その効果を検証した。その結果、アプリの利用率などのパラメータに影響するものの、基本的には、2次接触通知機能の導入により、従来の COCOA よりも多くの感染者を削減できることが確認された。そのため、本研究で提案する機能を実社会上的 COCOA に実装するというアプローチは、望ましいと言える。

これらの結果は、2021年8月に知能情報ファジィ学会論文誌「知能と情報」より出版された。研究費申請の応募当初より簡易的な分析は進められていたが、査読対応のため信頼性を向上させる必要が生じ、微分方程式のモデリング (SEIR モデル) と比較するなどの追分析を行なっている。これにより、1次接触通知機能および2次接触通知機能の導入が、SEIR モデル上の感染力パラメータをどの程度減らす効果があるのかについても、一定の示唆を得た。以上のように、研究費申請時よりも発展した内容が原著論文として出版されていることを付記しておく。

#### 4 微分方程式モデルによる COCOA の効果検証

2章、3章で述べたように、MAS を活用した接触確認アプリ COCOA の効果検証を行った実績がある。ただし、MAS は計算コストが高い分析手法であり、さらに確率過程を有するシミュレーションであることから、本質的な結果を取り出すために膨大な時間が必要となる。実際に、前述した MAS では計算コストの問題から人口規模が 1000 人程度の仮想社会でしかシミュレーションを行うことができなかった。この問題を解決するため、高速なシミュレーション手法である微分方程式を採択した。微分方程式による感染者数のシミュレーションは、SIR モデルなどをはじめとして、古くから研究されていた。しかし、SIR モデルは接触確認アプリ COCOA を表現する変数を有していない。そのため本研究では、接触確認アプリの効果検証可能な微分方程式、COCOA-SIR モデルを提案した。

本モデルは、人口全体のアプリ利用率、PCR 検査受診率、PCR 検査の偽陰性率、陽性者のアプリへの登録率、接触通知者の外出自粛率などを表現できるパラメータを有している。そのため、人々がどのようにアプリを利用すれば、どの程度の感染者数の削減効果が見込めるのか、シミュレーションすることが可能となる。実際の日本を想定した分析の結果、2021年5月時点の状況では十分な感染者数削減効果が見込めないことがわかった。このため、アプリの利用率や利用方法などを改善させた場合のシミュレーションを行った。その結果、使用方法を改善させることで、十分な感染者数の削減効果が認められることがわかった。本結果は、AIMS Press のオープンアクセスジャーナル *Mathematical Biosciences and Engineering* (IF=2.080) で出版された。

#### 5 ワクチンの接種者数の目標値の導出と ICT 活用

COVID-19 においては、モデルナやファイザーをはじめとして、様々なワクチンが開発されている。これらの多くは2回接種が推奨されており、1回接種者と2回接種者の感染予防効果が異なることが知られている。例えば、デルタ株においては、1回接種者の感染予防効果は 35.6%であり、2回接種者の感染予防効果は 88.0%である [9]。このため、ワクチンが有する感染者数削減効果を正確にシミュレートするには、1回接種と2回接種の異なる予防効果を表現できるような数理モデルの開発が必要となる。そのため本研究では、これを実現可能とする微分方程式、SIRVVD (susceptible-infected-recovered-vaccination1-vaccination2-death) モデルを開発した。

本モデルを利用して、「日本において 2020 年 2 月時点でワクチンがあれば、その後 1 年間の感染拡大状況はどのようになっていたのか」を調査した。その結果、感染予防効果が高く、ワクチンの接種速度が十分に早い場合、2020 年 4 月に観測された第一波、2020 年 8 月に観測された第二波、2021 年 1 月に観測された第三波がほぼなくなることがわかった。一方で、感染予防効果が低いワクチンを使用した場合、および、ワクチンの接種速度が遅い場合、感染拡大を十分に停止させることができないことが確認された。この結果は AIMS Press のオープンアクセスジャーナル *Mathematical Biosciences and Engineering* (IF=2.080) で出版された。

続いて、SIRVVD モデルの解構造を数理的に解析することで、COVID-19 の集団免疫を達成するために必要となる人口全体のワクチン接種率を求める手法を提案した。具体的には、いくつかの仮定を置くことで、SIRVVD モデルを連立かつ変数分離形の連立微分方程式へと帰着させ、感染者数に対する関数の解析的表現

を得た。これにより、感染者数の拡大・収束の境界となる条件を数理的な定理として記述することが可能となった。これを利用し、集団免疫を達成するために必要となるワクチン接種率を求めた結果、日本におけるデルタ株環境下でファイザー製のワクチンを利用した場合、人口全体の63%にワクチンを接種させることが必要となることがわかった。さらに、デルタ株と比較し強毒化・弱毒化した場合に要求されるワクチン接種率を包括的に求め、今後のワクチン接種戦略に対する一定の示唆を得た。本モデルは、IEEE のオープンアクセスジャーナル IEEE Access (IF=3.367) に採択され、出版されている。

本手法により、我が国において集団免疫を達成するために不足しているワクチン接種者数を解析的に求めることが可能となった。ワクチンの効果が時間とともに減衰していくことを考えれば、その不足分を早急に埋めるために、ICT システムを適切に活用していくことが重要となるだろう。

## 6 飲食店における感染リスク低減のための顧客配置アルゴリズムの提案

COVID-19 の感染拡大は散発的な感染ではなくクラスターによる感染が主な起因とされている。特に、飲食を伴う施設における感染クラスターの発生は多く報告されており、日本政府はこれまで幾度の緊急事態宣言により、飲食店の営業形態や営業時間を制限することで感染拡大を防いできた。このような対策は日本のみならず世界中で行われてきたが、感染拡大に対して一定の効果が期待できる一方、外食産業に対する経済的ダメージも深刻である。コロナ禍における店舗営業では消毒などによる店舗内の衛生管理などの感染予防対策が提示されており、特に顧客同士の物理的距離を確保することが感染拡大防止に大きく寄与することが Chu らにより報告されている[10]。一方、感染リスクを低下させるために物理的距離をむやみに取る場合、店舗の顧客収容能力は低下し、営業売上の低下を招く。そのため、必要な物理的距離を確保しつつ店舗の収容能力をむやみに低下させないような営業管理が必要となる。

飲食店舗における顧客の回転率を効率化し営業利益を向上させるような研究はこれまで数多くされている[11-13]。一方で、コロナ禍における社会では営業利益の追求のみならず感染拡大防止の観点も取り入れて店舗運営を行わなければならない。先行研究[14-16]では店舗における座席配置の初期レイアウトに着目し、コロナ禍において感染予防の観点から座席同士が物理的距離を確保しつつ店舗の収容能力も最大化するような手法が提案されている。飲食店舗における座席の初期レイアウトは重要であるが、感染リスクをさらに削減するためには、店舗営業中の顧客に対する適切な座席割当が重要な鍵となる。わずかな利益損失により大きな感染リスク削減効果を生み出すには、刻々と変わる顧客同士の位置関係や混雑状況に合わせて適切に管理し座席を割り当てることが望ましい。一方で、人間が手動で空間内の状況を把握し管理することは容易でないため、現状ではあらかじめ着席できない座席を定めて、顧客に座席を選択させるような静的な座席表による店舗の運営手法が一般的であると思われる。感染症が蔓延し、感染リスクが高いとされる飲食店においては動的な座席割当手法が求められるが、そのような研究は見られない。

そこで申請者らは店舗における顧客の位置関係に応じて、感染リスクを削減しつつ利益の低下を抑制する動的な座席割当システムの構築を前提とした座席割り当てモデルの提案を行った。提案したモデルは新規顧客の到着ごとに、その顧客をほかの顧客との距離から定義される感染リスクが最も小さくなるような座席に割り当てる。また、提案したモデルは店舗運営者が調整可能な単一のパラメータが与えられ、それを感染リスクの閾値とすることで、店舗の利益低下を抑制しつつ感染リスクを削減することが可能である。

実験では提案モデルを用いて1日の営業をシミュレーションした。また、現状よくとられている静的な座席表による運営を介在なしモデルとしてモデル化し、提案モデルと同条件でシミュレーションした。さらに営業終了時点における集客数と営業時間を通して累積した感染リスクを評価した。その結果、店舗が混雑しないような状況では静的な座席表による運営と比べて、集客数を低下させることなく感染リスクを10~66%削減できることが確認された。さらに提案モデルは、店舗が混雑し単一のパラメータにより決定される感染リスクの閾値に達するような状況では、店舗の状況に合わせてその収容能力を調整し感染リスクが閾値を超えないよう運営できることが確認された。

以上のように、本アルゴリズムは感染リスクを減少させる効果があることがわかった。そのため、提案モデルが導入されたシステムを社会に普及させることができれば、感染者数を削減できる可能性がある。本研究は電子情報通信学会研究会で発表されるとともに、現在、査読付き論文誌に投稿中である。

## 7 現実の人流データを用いたハイリスクエリアの特定

以上のように、本研究では感染者数を減らすために必要となる ICT システムの機能要件について分析を行ってきた。他方、現実社会のどの地域にそのようなシステムを導入するのかという問題もある。そのため本研究では、千葉県習志野市のポイント型人流データを活用して、カーネル密度推定法を用いて感染という側面でリスクが大きい箇所の特定を行なった。なお「感染リスクが大きい」とは、あるエリアに人口が密集していることを指す。

ある地域に対して人口に基づいた感染リスクの算出を行っている研究はいくつか報告されている。例えば対象地域上の人々の行動圏分析結果をもとに新型コロナウイルス感染症の感染予防対策を与えるような研究が Kato[17]や Rex[18]により、報告されている。一方でこれらの研究は、特定の地域における特性に基づいて感染予防対策を提案しており、その他の地域において有効な感染予防対策を与えるにはその地域の特性を考慮して行動圏を分析しなければならない。

本研究で準備したポイント型人流データは、2021 年 9 月における千葉県習志野市のものであり、習志野市の地域特性やこの期間に実施されていた政策などを考慮して人口分布を推定し、感染リスクの高いエリアを特定する。準備した人流データは 1 分ごとに取得された座標と日別 ID が紐づけられたログにより構成されている。人口密集エリアを正しく推定するためには「いつどこにどれだけの人が集まっているか」を見積もる必要がある。そのため、測定誤差の大きいログや移動速度が大きく公共交通機関や自動車を用いているようなログを含めると、人口密集地帯を正しく推定できない可能性がある。そのようなログは除外しデータの整理を行った。そのようにして整理された人流データは人口密集エリアを推定するために十分なデータ数が存在しないため、推定手法を用いず感染リスクが大きい箇所の特定を行うことは困難である。そこで本研究では残されたログの座標（緯度、経度）を入力として、習志野市全体の人口分布を出力とする推定手法を構築した。なお、習志野市の人口に対する真の確率密度分布は特定できないため、本研究ではノンパラメトリック手法として知られるカーネル密度推定法を用いた。構築した推定手法により、いわゆる密になりやすい施設属性や相対的な密集度合について検証した。

分析対象は 2021 年 9 月に取得された人流データとした。なお、平日と休日では人の行動は大きく異なる可能性があるため、分析対象を以下の二つに分けた。

- A) 2021 年 9 月 20 日以降の平日 (10:00-15:00)
- B) 2021 年 9 月 1 日以降の休日 (10:00-15:00)

ここで分析対象(A)を9月20日以降としているのは、一般的に一部教育機関が9月中旬まで夏休みとしている場合が多く、休日との区別がつかないためである。また、2021年9月は緊急事態宣言が発令されており、夜間の行動に大きく影響を与えていた可能性があるため、分析対象を日中とした。また、対象期間のすべてのログデータを分析に用いると同一ID(人物)のログが重複する可能性がある。そのため、10:00-15:00に取得された同一IDのログのうち最後に取得されたログのみを分析に用いた。さらに、測定誤差と移動速度にそれぞれ閾値100[m], 10[km/h]を与えそれ以上のデータは除外した。このようにして残ったデータは分析対象(A)と(B)でそれぞれ1,622個と1,714個であった。その結果、駅や商業施設、教育機関が存在している箇所がハイリスクエリアと判定されることがわかった。また、駅における感染リスクは平日休日問わず高くなる一方、平日では教育機関の感染リスクが高く、休日では商業施設の感染リスクが高いことが確認された。

このため、そのような箇所に感染者を削減できるようなICTシステムを導入することが望ましいと言える。本結果は情報ディレトリ学会の査読付き論文誌として出版されている。

## 8 おわりに

本研究では各種データサイエンス技術を活用し、COVID-19の感染者を削減するICTシステムの提案を行うとともに、それをどこに導入すべきかという検討を行った。表題にあるような最小化という点は未だ未達成ではあるが、一定の結果は得られたものを思われる。今後はより詳細な分析を進めるとともに、社会に対する実装なども検討し、研究を行なっていきたい。

## 【参考文献】

- [1] G. Buomprisco, S. Ricci, R. Perri and S. De Sio, "Health and telework: New challenges after COVID-19 pandemic", *Eur. J. Environ. Public Health*, vol. 5, no. 2, Feb. 2021.
- [2] H. Lau, V. Khosrawipour, P. Kocbach, A. Mikolajczyk, J. Schubert, J. Bania, et al., "The positive impact of lockdown in Wuhan on containing the COVID-19 outbreak in China", *J. Travel Med.*, vol. 27, no. 3, pp. 1-7, Mar. 2020.
- [3] T. Czypionka et al., "The benefits costs and feasibility of a low incidence COVID-19 strategy", *Lancet Regional Health-Eur.*, vol. 13, Feb. 2022.
- [4] T. Sekizuka, K. Itokawa, K. Yatsu, R. Tanaka, M. Hashino, T. Kawano-Sugaya, et al., "COVID-19 genome surveillance at international airport quarantine stations in Japan", *J. Travel Med.*, vol. 28, no. 2, Feb. 2021.
- [5] N. Ahmed, R. A. Michelin, W. Xue, S. Ruj, R. Malaney, S. S. Kanhere, et al., "A survey of COVID-19 contact tracing apps", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 134577-134601, 2020.
- [6] A. B. Vogel et al., "BNT162b vaccines protect rhesus macaques from SARS-CoV-2", *Nature*, vol. 592, no. 7853, pp. 283-289, Apr. 2021.
- [7] N. Doria-Rose et al., "Antibody persistence through 6 months after the second dose of mRNA-1273 vaccine for COVID-19", *New England J. Med.*, vol. 384, no. 23, pp. 2259-2261, Jun. 2021.
- [8] M. Scully, D. Singh, R. Lown, A. Poles, T. Solomon, M. Levi, et al., "Pathologic antibodies to platelet factor 4 after ChAdOx1 nCoV-19 vaccination", *New England J. Med.*, vol. 384, no. 23, pp. 2202-2211, Jun. 2021.
- [9] J. L. Bernal, N. Andrews, C. Gower, E. Gallagher, R. Simmons, S. Thelwall, et al., "Effectiveness of COVID-19 vaccines against the B.1.617.2 (delta) variant", *New England J. Med.*, vol. 385, no. 7, pp. 585-594, Aug. 2021.
- [10] Chu, D. K., et al., Physical Distancing, Face Masks, and Eye Protection to Prevent Person-to-person Transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: A Systematic Review and Meta-analysis, *Lancet*, vol. 395, pp. 1973-1987 (2020)
- [11] Kimes, S. E. and Robson, S. K., The Impact of Restaurant Table Characteristics on Meal Duration and Spending, *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, Vol. 45, No. 4, pp. 333-346 (2004).
- [12] Vidotto, A., Brown, K. N. and Beck, J. C., Managing Restaurant Tables using Constraints, *The Int. Conf. on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence*, pp.3--16 (2006).
- [13] Tanizaki, T. and Shimmura, T., Modeling and Analysis Method of Restaurant Service Process, 12th CIRP Conf. on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Vol. 62, pp.84-89 (2017).
- [14] Banon, L. and Banon, C., Improving Room Carrying Capacity within Built Environments in the Context of COVID-19, *Symmetry*, Vol. 12, No. 10, 1683 (2020)
- [15] Salari, M., et al., Social Distancing in Airplane Seat Assignments, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 89, 101915 (2020)
- [16] 小平行秀, LSI におけるセル配置手法を用いた身体的距離を考慮した座席レイアウト手法, 第 192 回システムと LSI の設計技術研究発表会, Vol. 25, No. 2020-SLDM-192, pp.1--5 (2020)
- [17] H. Kato, Development of a Spatio-Temporal Analysis Method to Support the Prevention of COVID-19 Infection: Space-Time Kernel Density Estimation Using GPS Location History Data, *Urban Informatics and Future Cities*, Springer Nature, pp.51-67, Cham, Switzerland (2021).
- [18] F. E. Rex, C. A. D. S. Borges, and P. S. Kafer, Spatial analysis of the COVID-19 distribution pattern in Sao Paulo State, Brazil, *Ciencia and Saude Coletiva*, vol.25, no.9, pp.3377-3384 (2020).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
SIR model-based verification of effect of COVID-19 Contact-Confirming Application (COCOA) on reducing infectors in Japan	Mathematical Biosciences and Engineering (査読あり)	2021年6月
COVID-19 の感染リスクを考慮した飲食店における着座管理モデル	電子情報通信学会技術研究報告集	2021年7月
2次接触者への通知機能を有する COVID-19 接触確認アプリ COCOA の感染者数削減効果の検証	知能情報フエジィ学会論文誌 (査読あり)	2021年8月
Effectiveness of the COVID-19 Contact-Confirming Application (COCOA) Based on Multi-Agent Simulation	Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (査読あり)	2021年11月
SIRVVD model-based verification of the effect of first and second doses of COVID-19/SARS-CoV-2 vaccination in Japan	Mathematical Biosciences and Engineering (査読あり)	2021年11月
千葉県習志野市における新型コロナウイルス感染予防対策のための人口密集エリアの推定と分類	情報ディレクトリ学会論文誌 (査読あり)	2022年4月
Theoretical Analysis of the SIRVVD Model for Insights into the Target Rate of COVID-19/SARS-CoV-2 Vaccination in Japan	IEEE Access (査読あり)	2022年4月
Mathematical Model Considering Effect of COVID-19 Contact-Confirming Application (COCOA) and “GoTo Travel Campaign”	Journal of Physics: Conference Series (査読あり)	2021年9月
SIRVD モデルによる COVID-19 ワクチン接種を考慮した日本国内の感染伝播シミュレーション	日本経営工学会論文誌 (査読あり)	2022年4月
Impact of removal strategies of stay-at-home orders on the number of COVID-19 infectors and people leaving their homes	International Journal of Innovative Computing, Information and Control (査読あり)	2021年6月