

# 人の限定合理性を超越した行動変容支援に向けた情報プラットフォームの設計

大越 匡<sup>1,a)</sup> 西山 勇毅<sup>3</sup> 佐々木 航<sup>1</sup> 栄元 優作<sup>1</sup> 中澤 仁<sup>2</sup>

**概要：** ユビキタスコンピューティングシステムとして、例えば睡眠、食事、運動、学びといった人の多くの行動における行動変容を支援するための研究が数多くなされてきた一方、現状の取り組みは、人間が合理的であろうとするが種々の能力の限界によって限られた合理性しかもてない「限定合理性」(bounded rationality) を超えて人間を支援できていない。本研究では、この限定合理性を超越する情報技術の実現を目指し、その概念を整理し、解決手法における方針と情報アーキテクチャへの要件を明らかにする。

**キーワード：** 行動変容, 情報提示, 限定合理性, 情報システム

## 1. はじめに

スマートフォンをはじめとしたモバイル・ウェアラブル機器の急速な普及、クラウド技術による簡便にスケーラブルなサーバ構築・デプロイ技術、高級開発言語や種々のフレームワークの充実、機械学習技術の急速な進展といった昨今のユビキタスコンピューティング技術の発展により、情報を用いて人の行動変容を実現し、Quality of Life (QoL) の向上や心・身・社会的なウェルビーイング向上に寄与する情報システムが数々研究され、実現されてきた。

しかしこれらの既存の取り組みは、人間が合理的であろうとするが種々の能力の限界によって限られた合理性しかもてない概念を整理した「限定合理性」(bounded rationality)[11] を超えて人間を支援できていない。例えば限定合理性のひとつに「視野の限界」が存在する。ユビキタスコンピューティング時代の到来とともにユーザへもたらされる情報の量が増え続ける一方、ユーザの「注意」の量が基本的には変わらないことから、「情報過多」や「割り込み過多」が起きており、受信する情報のごく一部しか、ユーザは実際に認知や理解できていない状況が生まれている。筆者らの既存の取り組み [4], [5], [6], [7], [8], [9] では、情報をユーザに提示するタイミングについて、ユーザの認知負荷

や心理負荷を下げ、アクセス率を有意に上げるタイミングをモバイルセンシングおよび機械学習技術で発見することに成功し、実験室内外および製品環境での評価を通じてその効果を実証してきた。しかし、これらの既存の取り組みにもかかわらず、情報システムは根本的に「限定合理性」を超えて人間の支援を実現出来るとは言えず、緩和的解決手法では無く、根本的にこの限界を超越する手法が求められているのが現状である。

本稿では、これら既存の行動変容技術に関する限界である「限定合理性」についてその概念を整理した後、それを超越する情報システムの実現に向けた本研究の手法について、その方針と情報アーキテクチャへの要件を明らかにする。本稿では、2章にてユビキタス・コンピューティングにおける様々なこれまでの行動変容研究について紹介する。次に3章では、サイモンが提唱した限定合理性について、塩沢によるさらなる3要素への整理も含めて紹介する。4章では、特に3要素のうちの1つである「視野の限界」に対する既存の研究について述べた後、5章では、合理性の限界を広げる情報技術について紹介する。その後6章で、本研究手法の情報アーキテクチャに対する要件を整理する。7章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 背景

これまで筆者ら研究を含め、情報を用いて行動惹起や行動変容に関する研究が多く行われてきた。最も多く普及するICT機器であるスマートフォンをはじめとしたモバイル・ウェアラブル機器を使ったセンシング技術、機械学習技術、モバイル機器とクラウドを接続する高速なワイヤ

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科  
Graduate School of Media and Governance, Keio University  
<sup>2</sup> 慶應義塾大学 環境情報学部  
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University  
<sup>3</sup> 東京大学生産技術研究所  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
a) slash@ht.sfc.keio.ac.jp

レスネットワーク技術の発展により、食事、睡眠や学びといった人の生活の基本的な要素についての行動変容、さらには組織における行動変容等、人々の暮らしの多くの活動や局面を支援するシステムが研究開発されている。

## 2.1 個人生活における行動変容支援

栄元ら [13] は、グループ内において食事画像の共有とその「健康度合い」で対戦するソーシャルメディアにもとづく食事の行動変容に関する研究を行った。三大死因の発症リスクを高める生活習慣病の予防には、日々の食生活改善が大きな効果をもたらすとされている。食事の写真撮影を食事内容の記録手法に、「グループでのゲーム要素」、および「食事内容に対する他者の評価」を加えることで、グループ全体での低負荷での食事の行動変容を促進する手法を開発した。本アプリケーションを用いて被験者 10 人を対象に 28 日間の評価実験を実施した結果、提案手法では既存の食事記録システムと比較して食事記録回数が 20% 上昇し同時に記録負担が低減した。さらに行動変容ステージモデルの評価指数の 1 つである自己効力感を増加させる効果を確認できた。

食事と共に睡眠もまた人間生活において欠かせない基本行動である。1 日 6 時間睡眠を取る人の場合、単純に計算して生涯 80 年のうち 20 年を睡眠に消費する。人の一生の中で最も多くの時間を費やす行動のひとつと言える。睡眠の質は、我々の覚醒中の生活における仕事の効率や広範なウェルビーイングに影響するため、ICT 技術で支援できれば、我々の生活の QoL が高まると考えられる。センシング技術の発展により、侵襲性の低い体温計を腹部に装着することで、継続的に体温を測定することが可能になった。勝又ら [2] は、睡眠前および睡眠中の体温を継続的に測定し、起床後にユーザが入力する睡眠や心身の体調に関するアノテーションデータと共にモデルを作る事で、体温やその変化と体調の関係を明らかにした。被験者による実験結果からは、ユーザ毎に作成するパーソナライズドモデルにおいて、全体的に精度の高いモデル作成が行えることが判明した。

## 2.2 集団における行動変容支援

西山ら [15] は、情報の提示手法によって個人だけで無くチームにおける行動変容の促進について明らかにした。従来ライフログデータは、上記の食事や睡眠といった行動の様に、主として個人を対象として行動変容の促進に活用されてきた一方、企業や団体などの組織、スポーツチームといった集団を対象して活用が進むと考えられる。しかし一方で、集団には個人とは異なりそれぞれ内部的な人間関係が存在するため、これまでの個人を対象とした行動変容促進手法が集団に対して効果的であるかは明らかではない。そこで西山らは、集団の行動変容を促進するモデルと

して、既存手法の「競争」と「協力」の要素を組み合わせた 6 種類の集団の行動変容促進モデルを提案し効果の検証を行った。被験者 2 集団 (64 名) に対する 3 週間にわたる評価実験からは、チーム目標と直接的に関係ない活動では行動変容への効果が低く、日頃からチーム単位で競争を行っているチームでは「チーム間での競争要素」を用いたモデルが最も行動変容への効果が高くなる可能性が示された。

「学び」もまた、長くなる生涯においてより多くの人が長期に取り組む活動である。多くの学生は学習に対して多大なストレスを感じており、その中でも半数以上が学習における動機づけが生じないという問題を抱えている。他者比較から生じる動機づけを狙った研究が盛んに行われている一方で、これらは学生自身の意思で取り入れることが困難な仕組みとなっている。羽柴ら [12] は、誰もが容易に利用可能な手法で学習への動機づけ向上を目的とした手法の開発と評価を行った。学習記録アプリケーション “Stuguin” に、他ユーザの記録を表示する機能を付加し、表示の手法による行動変容の差異を評価した。(1) 自身の平均学習時間よりも少ない学習時間の記録、(2) 同程度の学習時間の記録、(3) 多い記録、(4) ランダムな記録を表示する 4 手法を、被験者 38 名に対して 8 週間比較評価した結果、自身の平均学習時間よりも多い学習時間の記録を表示したグループは、平均学習時間が約 9 分増加する等の効果が判明した。これより、他者の記録表示が学習への動機づけの向上に有効である可能性が示された。

## 3. 限定合理性

しかしこうした行動変容支援に関するこれまでの研究にもかかわらず、現在の支援手法において限界があることを本章では示す。

サイモンは、経済主体としての人間において、合理的であろうとするが種々の能力の限界によって限られた合理性しかもてないことを、「限定合理性」(bounded rationality) と整理した [11]。

塩沢 [14] は、限定合理性が、「情報獲得」および「生体内での情報処理」双方を含むことを指摘し、以下の 3 点に再構成している。

- 視野の限界：存在する多種多様な情報の受信を人の有限な認知能力や有限な時間が阻害する。
- 合理性の限界：受信した様々な情報から最適な行動を決定する過程を人の感情が阻害する。
- 働きかけの限界：情報をすべての人に伝達する過程を世界の規模や制約が阻害する。

### 3.1 シナリオ例

例えば、「〇〇川流域に氾濫危険情報が発表されました」という情報を、同河川流域の人が受信したとする。ウェアラブルデバイスやモバイルデバイス、インプラントデバイ

ス等により拡張された人は、様々なモダリティでこの情報を少なくとも物理的には受信可能と考えられる。しかし受信した情報が、人間に通知される時点での情報過多により人の認知に至らなかったり、認知されても受信者の立場において避難の意思決定には情報が不足している（もしくはそう感じる）等の理由により最適な避難行動が阻害されることがある（視野の限界）。また十分な量の情報を受信者が認知できても、「ここまで水は来ないだろう」といった認知の歪み（正常性バイアス等）をはじめとする理由で合理的な意思決定が阻害される場合がある（合理性の限界）。さらには、氾濫危険情報を発信する自治体の側にたてば、そのような情報を発信しても、流域の人々全員に情報が伝わり全員の避難行動を実現できるわけではない（働きかけの限界）。

このような限定合理性にまつわる限界は、2章で述べたような様々なこれまでの行動変容支援研究においても、定常的に発生しているのが現状である。食生活の行動変容を支援するシステムが「今日の夕食の対決結果は以下の通りです」と情報提示したり、睡眠支援システムが「今日より良い睡眠を取るにはもっと体温を上げて寝ると良いでしょう」と情報提供しても、情報が認知されない場合（視野の限界）や、各種の認知の歪みや一時の感情に起因した判断など、必ずしも合理的な意思決定が行われるとは限らない。

このように、行動変容支援のための ICT システムが発信する情報は、発信者の意図通りに受容されず、受容されたとしても行動変容につながるとは限らない。

#### 4. 視野の限界に対するこれまでの研究

筆者らはこれまで、とくに「視野の限界」における限界緩和のため、プッシュ型情報通知の動的適応に関する研究を行ってきた。多様なモバイル・ウェアラブル機器等を通じて多種多様なサービスから情報を受信する時、ユーザ自身の「注意」（アテンション）は貴重な資源となり、コンピューティングにおける重要なボトルネックとなる。平均的ユーザは1日に100回もの情報通知を受け [3]、また2025年には人は平均して18秒に1回何らかのインタラクションを通じて情報を獲得すると予想される [10]。

これまでの多くの研究は、サービス提供側の視点から、レコメンデーションサービスのようにどのような情報（What）をユーザにパーソナライズして提供するかを考察してきた。一方ユーザ側の視点からすると、利用する多種多様なサービスからの情報が所かまわず push 型で通知されてくるのが現状である。どのようなタイミング（When）で情報を提示すれば情報をより受け入れてもらえるかという研究は、これまで全くされていなかった。

筆者らはこのタイミングに関する分析を行い、実際に普及しているモバイル・ウェアラブル機器を使い、非侵襲かつ実時間に「情報受容性を向上させる最適なタイミング」

を導出する基盤技術「Attelia」を開発し、その効果を明らかにした。本技術はモバイルセンシング技術、モバイル機械学習技術、通知の動的スケジューリング技術から構成され、その特長は、民生用モバイル OS プラットフォームで動作できる可搬性、ユーザの物理行動やデバイス操作パターンをセンサ情報として利用し特別な生体センサ（脳波センサ等）を不要にできる非侵襲性、既存 OS やアプリケーション群への改変を必要とせず適用できる高適用性、及び当該タイミング検知の実時間性にある。[4]、?では、ユーザ実機環境での評価実験から、本技術が検知したタイミングで提示した情報通知が、既存のランダムなタイミングにおけるそれと比較してユーザの認知負荷を33.3%有意に減少させる効果を明らかにした。[6]では、複数のモバイル/ウェアラブル機器を組み合わせて本技術を動作させる事で、同効果が更に高まることを示した。

さらに様々な情報提供システムにおける効果検証を行う中、筆者らはヤフー株式会社と共同で、1,000万人以上が使用する同社のスマートフォンアプリケーション製品「Android版Yahoo!JAPAN」に本技術を統合し、実際の製品、実際のユーザ、そこで配信される実際のニュースからなる「プロダクション環境」における本技術の効果を実証した。[7]では、世界の同製品ユーザ68万人以上を対象にした大規模な効果検証を実施し、情報への反応時間の半減（49.7%）、クリック率やサービスエンゲージメント率の上昇といった有意な効果を、世界で初めて実製品環境上で明らかにした。またさらなる大規模データ解析により、ユーザの性別・年代・職業等属性による効果の差異 [8] も明らかにした。その後、さらに2年間にわたる技術改良を行った結果、本技術の効果はさらに最大で約10倍高まり、多様な情報コンテンツや緊急通知との併用効果など多くの効果/現象が明らかとなった [9]。これら一連の研究開発と実証の成果を受け同技術は実用化を達成し、現在1,000万人以上のユーザが本技術の恩恵を享受して、日々受け取りやすいタイミングで情報を受信している。

#### 5. 合理性の限界を広げる情報技術

本研究課題では、前述のようなこれまでの取り組みをもとに発展させ、情報によって人の合理性の限界を大きく広げる技術の研究開発に取り組む。図1と下記に、具体的な取り組みを述べる。

##### 5.1 合理性状態の推定とそれに基づく情報通知

二重過程理論 [1] によれば、人の脳は自律的システムと分析的システムとで構成され、いずれが優位であるかによって、感情に流されやすい状態とそうでない状態（人の合理性状態）を区別する。前述のプッシュ通知タイミングの最適化技術は、自律システムが優位となる瞬間を見つけだして通知することで、「とりあえず通知を開く」という行動を



図 1 合理性の限界を広げる情報技術

惹起する。これを起点として本研究では、人の現在と近未来の合理性状態を推定・予測可能とするモデルを構築し、また人の合理性状態にもとづいて情報の通知タイミングを高度に制御する技術を確立する。

## 5.2 限定合理性の限界を超える情報提供

限定合理性の限界を超える情報提供として、通知の根本目的がユーザに何らかの行動を起こさせることである点に着目し、ユーザに知らせ（通知: notification）てボトルネックである注意資源を消費するのではなく、ユーザの行動により直接作用する（通動: behavification）方式による行動変容実現に取り組む。

通動では、図 2 に「通動」の概念を比較して示す。例えば「今日はあと 5000 歩歩きましょう」といった既存方式の通知では、ユーザがそれを認識・理解して行動を実行するために、注意や知的処理（二重過程理論におけるシステム 2）を必要とする。一方通動方式では、「今日さらに 5000 歩歩行が必要」という行動目標を情報システム内で形式化し、ユーザが利用中のナビゲーションサービスが適応動作してルート进行调整し、最短経路より多くユーザを歩かせることを指向する。ユーザがあらかじめ許可する範囲内で、ユーザには知らせず注意資源をバイパスして直接行動に働きかけることができれば、注意にまつわるユーザの負担を減らしながら本来目的の「歩行」行動が実現できると考えられ、本問題への新しい解決策とすることができる。本研究ではこのような通動の実現性と有効性を問う。

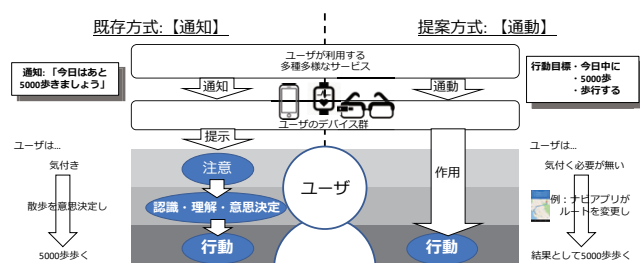


図 2 通動と通知概念比較

## 6. 情報アーキテクチャへの要件

このような技術を研究開発するにあたり、情報アーキテクチャにもとめられる要件について整理する。

### 6.1 限定合理性の推定

ユーザの合理性の推定技術に対する要件として、(1) 低もしくは非侵襲性、(2) 実時間性の 2 点をあげる。同技術は、典型的には、ユーザのモバイル・ウェアラブル機器や生体センサなどからのセンシング、および機械学習技術によって実現出来ると考えられる。

人間の合理性を推定する場合に取り扱う具体的な人間の情報には、大きく分けて、(1) 合理性状態を示す生体データや、(2) 合理性状態を反映した行動データがあげられる。前者の例としては脳波が上げられ、また後者の例としては、合理的な判断ができるかどうかを明かにするために設計される質問への回答や、その他のユーザ自身の行動があげられる。生体センサや、モバイル・ウェアラブル機器を使ったセンシングからこういったデータを取得する場合、体データやユーザからの注釈を用いて初期のモデルを構築すると同時に、並行して「合理性状態を反映する行動」に関するデータを取得し関連を解析することで、最終的には後者のデータによるモデル構築を行えることが、将来の大規模実証を想定した場合に求められる低/非侵襲性の面で望ましい。

実時間性もまた合理性推定に求められる一方、複数の時間的粒度が考えられる。「朝起床後数時間以内」、「夜間」といった、1 日のうち数時間単位での合理性の推定、および「数秒～数分単位で刻々と変化する合理性状態の推定」といった、複数の異なる時間的粒度での推定技術が求められる。この場合、合理性の推定はその実時間性要件に応じて、ユーザの手元のデバイス（エッジ側）およびクラウド側の双方で適切に分担して処理される必要がある。前者の場合、各種センサから取得されたデータはサーバに送信され、サーバ側で状態推定が行われる時間的および資源的猶予があると考えられる。一方、後者の場合は、ユーザのエッジ側スマートフォンなどの機器で状態推定処理がより実時間性をもって行われる必要があると考えられる。

### 6.2 限定合理性の限界を超える情報提供

図 3 に通動情報基盤の基本設計構想を示す。限定合理性の限界を超える情報提供技術に対する要件としては、(1) 通動を許可範囲をユーザが柔軟に設定できる許可設定の柔軟性、および (2) 実現行動に関する通動とシステムの資源間

での需給マッチング性能があげられる。なお情報提供にはスマートフォンといったモバイル機器、および Augmented Reality(AR) 機器の利用を構想する。

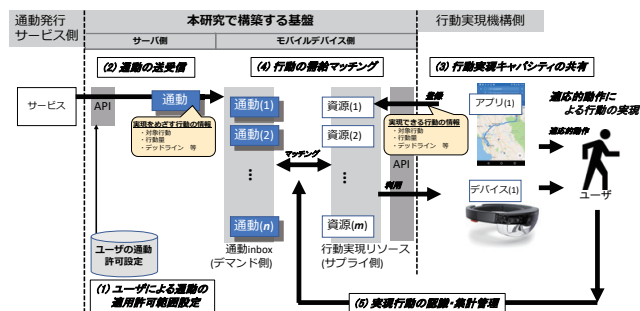


図 3 通勤情報基盤の基本構想

- (1) 通勤許可範囲の設定：ユーザは、自身への通勤実行を許可できるテーマ、状況、送信元サービス等の許可設定を行う。API と Android 端末上でのインタフェースを構築する。
- (2) 通勤の送受信：Web サービス向けの通勤送信 API を開発する。サービスが「実現目標行動」に関する情報を設定し通勤を基盤へ発行すると、本基盤のサーバを通じ、ユーザデバイスへ配送され、「通勤 inbox」へ蓄積される。
- (3) 行動実現キャパシティの共有：ユーザが利用中のアプリケーションやデバイス等が、実現出来る行動と量等に関する情報を「資源」として基盤に登録できる API を開発する。
- (4) 行動の需給マッチング：通勤と資源間で行動の需給調整を行い、利用する資源を決定する。決定を伝達した先のアプリやデバイス側で、行動実現のための動作が実施される。
- (5) 実現行動の認識・集計管理：これまで開発した各種の行動認識技術を用い、実際に実現した行動量を認識し、本基盤内へ送信して、目標に対する進捗を管理する。

## 7. まとめと今後の課題

本稿では、これまで行われてきた様々な行動変容を IT 技術で支援する研究から見いだされた新たな問題である、情報と人の限定合理性に着目した。筆者らのこれまでの取り組みとして、主に「視野の限界」緩和に挑む適応的情報通知技術について紹介した後、限定合理性を超越する情報技術について、その取り組みと情報アーキテクチャへの要件を明らかにした。本研究は、現在システムのプロトタイプ設計と実装を行っている。本技術を情報基盤技術として多くのアプリケーションやサービスに適用生をもった形で構築し、広範な評価を通じてその有効性を明らかにしていくことが、今後の課題である。

## 参考文献

- [1] Kahneman, D.: *Thinking, fast and slow*, Macmillan (2011).
- [2] Katsumata, K., Noda, Y., Isokawa, N., Katayama, S., Okoshi, T. and Nakazawa, J.: SleepThermo: the affect of in-cloth monitored body temperature change during sleep on human well-being, *Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ACM, pp. 1174–1177 (online), DOI: 10.1145/3341162.3347079 (2019).
- [3] Mehrotra, A., Musolesi, M., Hendley, R. and Pejovic, V.: Designing content-driven intelligent notification mechanisms for mobile applications, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, ACM, pp. 813–824 (2015).
- [4] Okoshi, T., Ramos, J., Nozaki, H., Nakazawa, J., Dey, A. and Tokuda, H.: Attelia: Reducing user's cognitive load due to interruptive notifications on smart phones, *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2015*, pp. 96–104 (online), DOI: 10.1109/PERCOM.2015.7146515 (2015).
- [5] Okoshi, T., Nozaki, H., Nakazawa, J., Tokuda, H., Ramos, J. and Dey, A. K.: Towards attention-aware adaptive notification on smart phones, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 26, pp. 17–34 (online), DOI: 10.1016/j.pmcj.2015.10.004 (2016).
- [6] Okoshi, T., Ramos, J., Nozaki, H., Nakazawa, J., Dey, A. K. and Tokuda, H.: Reducing users' perceived mental effort due to interruptive notifications in multi-device mobile environments, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing - UbiComp '15*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 475–486 (online), DOI: 10.1145/2750858.2807517 (2015).
- [7] Okoshi, T., Tsubouchi, K., Taji, M., Ichikawa, T. and Tokuda, H.: Attention and engagement-awareness in the wild: A large-scale study with adaptive notifications, *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2017*, IEEE, pp. 100–110 (online), DOI: 10.1109/PERCOM.2017.7917856 (2017).
- [8] Okoshi, T., Tsubouchi, K. and Tokuda, H.: Real-world large-scale study on adaptive notification scheduling on smartphones, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 50, pp. 1–24 (online), DOI: 10.1016/J.PMCJ.2018.07.005 (2018).
- [9] Okoshi, T., Tsubouchi, K. and Tokuda, H.: Real-World Product Deployment of Adaptive Push Notification Scheduling on Smartphones, *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining - KDD '19*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 2792–2800 (online), DOI: 10.1145/3292500.3330732 (2019).
- [10] Reinsel, D., Gantz, J. and Rydning, J.: The digitization of the world: from edge to core, *Framingham: International Data Corporation* (2018).
- [11] Simon, H. and MARCH, J.: *Administrative behavior organization*, New York: Free Press (1976).
- [12] 羽柴彩月, 佐々木航, 大越匡, 中澤仁: 他ユーザの記録表示を通じた学習の動機づけ向上, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2018-UBI-5, No. 5, 情報処理学会, pp. 1–7 (2018).
- [13] 栄元 優作, 西山 勇毅, 大越 匡, 中澤



- 仁：HealthyStadium：他者評価とゲーミフィケーションを用いた食習慣改善ソーシャルメディア，情報処理学会論文誌，Vol. 60, No. 10, pp. 1881–1895 (2019).
- [14] 塩沢由典：複雑系経済学，生産性出版 (1997).
- [15] 西山勇毅，大越匡，米澤拓郎，中澤仁，高汐一紀，徳田英幸：ライフログデータを用いたチームの行動変容促進，情報処理学会論文誌，Vol. 56, No. 1, pp. 349–361 (2015).