

ナッジの設計における 進化シミュレーションの活用

小松 秀徳, 窪田 ひろみ, 田中 伸幸, 大橋 弘忠

人間の直感的な意思決定を支援し、よりよい選択を促す「ナッジ」の概念が提唱されてきた。その背景として、意思決定は合理性とその例外から成るとの前提があったが、近年では生物学的な進化に基づく、より深い合理性の存在が指摘されている。しかし、進化の知見をナッジの設計に活かす方法論は未だ提示されていない。本稿では、進化シミュレーションモデルを基に、実世界で有効なナッジを設計できることを示す。その一例として、血縁者の支援がリスクを小さく感じさせる効果をモデルから導出でき、またこれを情報提供の設計に活用して、実際にリスク忌避的な態度を緩和可能となることを明らかにする。

キーワード：ナッジ, 進化シミュレーション, 利他性

1. 背景

さりげない工夫によって望ましいと考えられる選択を促す仕組みは、行動経済学において「ナッジ」として定義されており [1-3]、公共目的のさまざまな成功事例が知られている。よく知られた応用例の一つに、人間が必ずしも個人の利益のみを追及するわけではなく、他人の行動に追随しやすい傾向もあることをベースとした、省エネルギー行動の促進を目的とするナッジがある。平均的な他世帯と比較して多くのエネルギーを消費していることを伝えるメッセージの有効性 [4] は、わが国においても確認されている [5, 6]。

ナッジの理論には、限定合理性 [7, 8]、向社会性 [9]、プロスペクト理論 [10] など、すでに確立された個別具体的なものが複数存在するが、これらを統一的に解釈する一貫した理論は、これまでのところ確立されていない。一方近年では、生物学的な進化論の観点から、人間の合理性をより深いレベルで捉える解釈が提唱されている [11-13]。この進化心理学と呼ばれる、人間の心理的な反応を生物学的な適応の結果得られたものとして捉える比較的新しい分野には、人間の意思決定に対する統一的な視点をもたらす可能性がある。ただし、進化の過程とは、人間の繁殖、生存、死亡の繰り返し

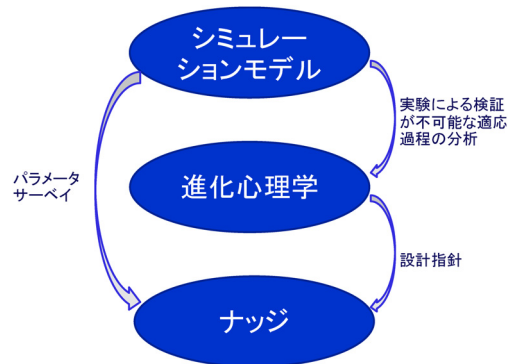


図1 ナッジの設計に対するシミュレーションモデルと進化心理学の寄与

返しであり、このダイナミクスを実世界において検証することは不可能である。

一方で、計算機シミュレーションは、人間の意思決定や反応の仕方がどのように進化してきたかについて知見を得る手段として活用できる。また最終的には、ナッジをより効率的に設計するためのプラットフォームとして活用できる可能性も秘めている（図1）。このような概念を実証するために、本稿では進化シミュレーションモデルから導き出された知見が、実世界でのナッジとしての情報提供に活用可能であることを示す。

人間のリスクへの反応は、世論、ひいては政治的な意思決定にまでも影響を与える場合がある。したがって、リスクへの反応に影響する要因を理解することは、政策科学としても重要な課題である [14]。こうした要因の一つとして、未来の世代に影響を与えると認知されるリスクが大きく認知される、という傾向が現象論的によく知られている [15]。しかし、このような現象について、なぜそれが生じ、どのようにして緩和可能

こまつ ひでのり
電力中央研究所グリッドイノベーション研究本部
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
komatsu@cripi.denken.or.jp
くはた ひろみ, たなか のぶゆき
電力中央研究所サステナブルシステム研究本部
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646
おおはし ひろただ
東京大学大学院工学系研究科
〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1

なのかについては明らかにされてこなかった。

この現象に対して定量的な理解を与えるものとして、本稿では血縁選択説 [16] に基づく進化のダイナミクスを模倣したシミュレーションモデル [17] を紹介する。さらにケーススタディとして、このシミュレーションモデルから得られた知見を活用した、リスクへの反応に関するナッジの適用事例について取り上げる。

2. 進化シミュレーションモデル

2.1 モデルの設定

進化シミュレーションは、生存を脅かすリスク（「リスク源」）とそこから得られる便益のトレードオフ環境下に置かれた個体が、死亡する、あるいは生き残った場合には便益を得る、という手順を繰り返し、その戦略を遺伝的アルゴリズム [18]（以下 GA とする）によって進化させていくモデル [17] である（図 2）。

各個体は、 $A(x) = 1 - x$ の確率で生存し、生存した場合のみ $R(x) = x$ の量の便益を得ることができる「ゲーム」に参加する。また、このゲームに j 回のみ参加する。 j は個体の寿命を表す外生パラメータである。ここで、 x ($0 \leq x \leq 1$) はリスクに対する各個体の態度を表す変数であり、生まれた時点で決定され、生存中に変更されることはない。また、各個体は変数として c ($0 \leq c \leq 1$) と d ($0 \leq d \leq 1$) をもつ。 c は利他行動のコストに相当し、全血縁者に対して自分が保有する便益をどれだけ渡すかの割合を表す。 d は、利他行動で渡す便益を、年齢差に応じてさらにどのような割合で分配するかを決定する。

各個体は、次の四つのフェーズを最大で j 回繰り返す。生存フェーズでは、リスクを生き残った個体が便益を獲得し、年齢値が 1 だけインクリメントされる。

続く利他行動フェーズでは、その時点で生存している自分にとっての全血縁者に対して、血縁者 1 個体につき 1 度だけ便益を配分する。利他行動を実施する個体は、自身の保有する便益を $cR(x)$ 減らす。便益を受け取る血縁者側では、利他行動の効率性を定義するパラメータ h によって増幅された量 $hcR(x)$ の便益を、血縁者全員分で合算した総量として受け取る。この総量 $hcR(x)$ の便益は、さらに血縁者間で分配する。具体的には、利他行動を実施する個体と便益を受け取る血縁者との年齢差に応じた重みづけの割合 d に基づき、各年齢差のグループごとに配分した後、同年齢の血縁者間で均等に配分する。なお、利他的な個体群はこの利他行動フェーズを実行するが、ベースラインとなるグループとして非利他的な個体群を進化させる際には、

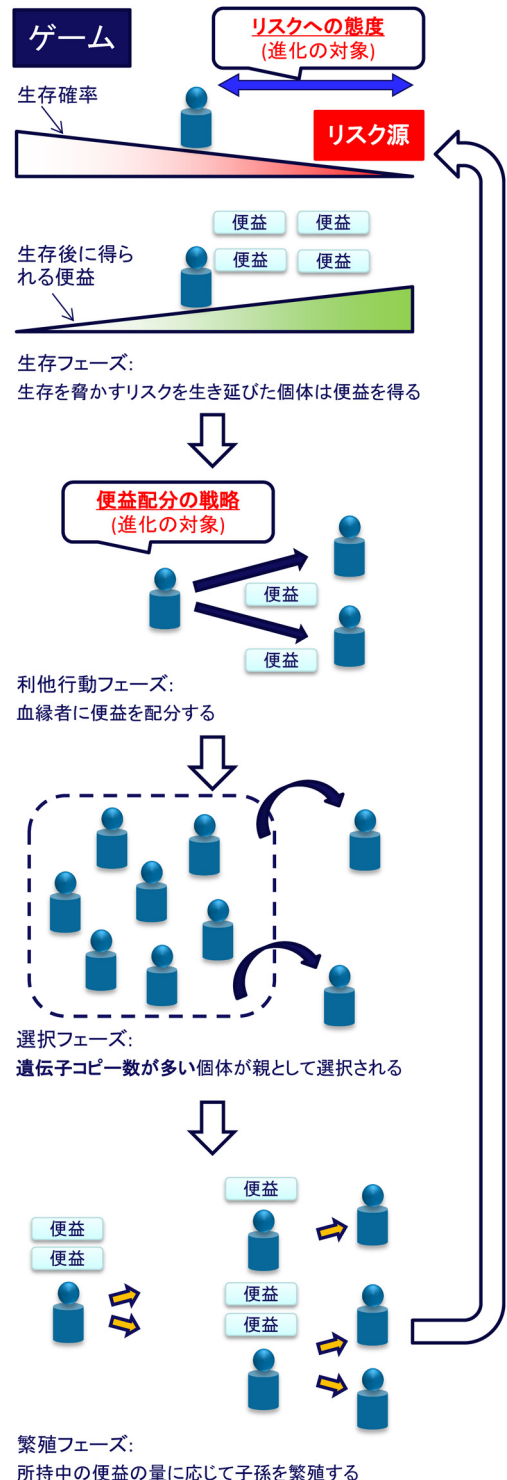


図 2 進化シミュレーションモデルの概念図

この利他行動フェーズをスキップする。

選択フェーズでは、各個体について、その時点に個体群中に存在する自身の遺伝子コピー数をカウントす

る。具体的には、血縁関係を表す木構造（自身の両親、さらに両親といった形式で祖先を記録した二分木）を用いて、二個体間の血縁度 r を次の式で導出する。

$$r = \sum 0.5^n \quad (1)$$

ここで n は、二個体が血縁木上で何ステップ離れた血縁関係にあるかを表す整数である。生存中の全共通祖先を経由するパスのうち、最も短いパスについて総和を取り r とし、これをさらにすべての血縁者に関して総和を取ることで、遺伝子コピー数を算出する。続いて、各個体の現時点での遺伝子コピー数を GA における目的関数として、親となる二個体をルーレット選択で選択する。このとき、選択された個体同士が同祖であることが明らかになった場合は親個体の選択をやり直す。なお、ここで遺伝子コピー数を目的関数として設定しているが、非利他的な個体群では便益の所持量が自身の繁殖数に直結し、かつ利他行動による遺伝子コピー数の変動は生じないため、結果的に自身が得られる便益の最大化が目的となる。

繁殖フェーズでは、選択フェーズで親として選ばれた個体が子孫個体を生成する。このとき、各個体が繁殖可能な個体数の最大値を $\text{round}(bS)$ とする。 b は、所有する単位量あたりの便益に対してどれだけの子孫を繁殖できるかを表すパラメータであり、定性的には環境の穏やかさに対応する。 S は便益の所有量であり、 round は四捨五入演算を表す。遺伝子型は、 x, c 、および利他行動によって血縁者に便益を渡す際の配分割合 d から構成され、これを実数 GA [19] によって進化させる。繁殖によって生成された子孫の数が $\text{round}(bS)$ に満たない場合は、選択フェーズに戻る。

2.2 感度解析

前節で紹介した進化シミュレーションモデルを用い、以下では感度分析として $b = 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ の四つのケース [17] について紹介する。

$b = 2.0, 2.5$ の場合は、 x はベースラインよりも大きい値へと収束し、リスク源により近い位置へと進化した ($b = 2.0$ については $p < 0.05$, $b = 2.5$ については $p < 0.001$, 以下統計的検定はいずれもウィルコクソンの符号順位検定による)。すなわち、 b の値が小さく、環境が厳しい場合には、利他的な個体群は利他性をもたない個体群と比べて、リスク選好的な振る舞いを示した。これに対して $b = 3.0, 3.5$ の場合、 x はベースラインよりも小さな値へと収束し、リスク源からより遠ざかった位置へと進化した ($b = 3.0, 3.5$ の場合、ともに $p < 0.001$)。すなわち、 b の値が大きく、環境が穏

やかな場合は、利他的な個体群は利他性をもたない個体群と比べて、リスク忌避的な振る舞いを示した。リスクコミュニケーションに関する研究分野では、未来の世代を脅かすと認知されるリスクはより大きく認知される傾向にあることが指摘されており [15]、こうした傾向は、現代のような穏やかな環境下に対してのみ当てはまる可能性がある。

上記は個体群全体の平均的な振る舞いについての分析であったが、こうした全体的な挙動とは別に、リスクへの態度は個体群の中でも多様性が見られる。この多様性に対して、どのような要因が影響するかを明らかにするために、以下の線型回帰モデルによる分析を実施した。

$$x^* = a_1 RB + a_2 \quad (2)$$

ここで RB は各個体が自身の血縁個体から受け取った便益の総量、 a_1 は係数、 a_2 は切片、 x^* は進化によって得られた、生存中の利他的な各個体のリスクへの態度を表す。前述の感度解析で用いた b に関する四つのパラメータ設定のうち、最も極端な設定として $b = 2.0, 3.5$ の二つの設定に注目すると、この線型回帰の係数の推定結果は、 $b = 2.0$ のとき $a_1 = 0.193$ ($p < 0.001$)、 $b = 3.5$ のとき $a_1 = 0.030$ ($p < 0.001$) となった。このことから、たとえ個体群全体が平均的にはリスク忌避的に振る舞うように進化したとしても、血縁者から支援されている個体はリスク源をより安全であると認知するようになることがわかる。この線型回帰分析では、血縁個体から受け取った利益の総量を説明変数として分析したが、代わりに個体群中に存在する各個体の遺伝子コピー数を説明変数とした分析も実施した。この場合の係数 a_1 は非有意となり、 x^* に対して影響を与えない結果となった。したがって、単に血縁者が個体群内に存在して支援をしない場合はほとんど、あるいは全くリスクへの態度に対して影響しないことが示唆される。

以上の分析結果から、実世界においても、未来の世代を脅かすと認知されるリスク源に対するリスク忌避的な態度は、血縁者からの支援を想起させることによって緩和可能ではないか、との仮説に至った。

3. 血縁者の支援を想起させる情報提供の効果

3.1 実験設計

上述の仮説を検証するために、実世界におけるインターネットアンケート調査を用いたランダム化比較実験によって、血縁者の支援を想起させるメッセージの

リスク忌避的な態度の緩和効果を評価した [20]。本分析ではケーススタディとして、工業化に起因する「大気汚染」をリスク源として選定した。

この実験でまず被験者は、日常生活で大気汚染が「未来の世代に」および「自分自身に」与える影響について、各々どれほど危険または安全と思っているかを回答した（この共通質問を Q_{pre} とする）。続いて被験者は 3 グループのいずれかにランダムに割り当てられ、各グループに対応する異なるメッセージを読んだ後、メッセージ提示前の質問（安全度・危険度）に再度回答した（この共通質問を Q_{post} とする）。グループ分けは、最も単純な情報（大気汚染のリスクと工業化のもたらす便益のみ記載）を提示するコントロール群（CG）、およびナッジとして設計した追加的な情報を提示される介入群 1（TG1）、介入群 2（TG2）の計 3 グループ（図 3）を設定した。

本調査は 2019 年 2 月 28 日から 3 月 1 日の間に実施した。被験者の条件は、日本に居住中であること、および 20 歳以上であることとし、調査会社のモニターからサンプリングした。割付条件は、性別についてのみ均等割り付けとした。得られた回答のうち、一貫性がない、あるいは年収などに非現実的な数値が記載されているなどのものは無効回答として除外した。最終的に有効回答数は 4,042、性比は 98.8、平均年齢は 45.4 歳であった。

3.2 情報提供による介入効果の推定

情報提供による介入が、大気汚染を危険と思う程度をどれだけ緩和するかを定量的に推定するために、線型回帰によるパネル解析を実施した（表 1）。ここで、被説明変数は Q_{post} と Q_{pre} の回答の差分を、「未来の世代に」、および「自分自身に」の二種類について算出したもの（正の場合は安全側に、負の場合は危険側に変化したことを表す）とした。また、回帰係数を決定するに際して、強制投入法を適用した。

TG1 と TG2 の介入効果は、「未来の世代に」と「自分自身に」のいずれについても統計的有意となり、正の値を示した。したがって、介入効果は設計意図のとおり、大気汚染を危険と認知する傾向を緩和させたことが示唆される。かつ、文字情報とイラストによる情報を組み合わせた TG2 の介入効果は、TG1 よりも大きくなった。女性であることは、男性であることよりも「未来の世代に」の介入効果を有意に高めた。年齢が若いことも、効果はやや小さめではあるが、介入効果に対して有意に正の影響を示した。パーソナリティ特性である Big Five [21] については、利他性との関連性が高い協調性が有意に介入効果に寄与した。神経症傾向は「未

工業化は私たちの親世代、さらにその親世代の働きによって一気に進み、工業製品だけではなく、道路、電気・ガス・水道といったインフラの利用や、食品や医薬品の大量生産を可能にするなど、現代の私たちの健康や日常生活の質をあらゆる面から支えています。また、私たちの世代によって進められている工業化の更なる発展は、未来の世代の子供たちの健康や日常生活の質を向上させると考えられます。

一方、工場や自動車の排煙に含まれる汚染物質は、呼吸器系疾患などの悪影響を及ぼす可能性がありますが、近年の日本では対策技術と規制によって改善が進んでいます。

▼ 以下の画像をご覧ください。 ▼

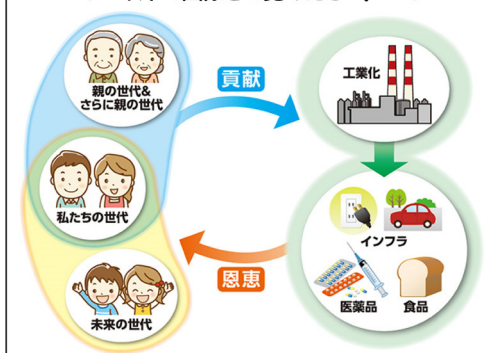


図 3 TG2 で提示されるメッセージ内容

CG では下線太字部とイラストは表示されない。TG1 ではイラストのみが表示されない。被験者の年齢が多様であることを踏まえて、「親の世代&さらに親の世代」と「私たちの世代」の人物の見た目は、被験者の年齢が 50 歳未満か否かに応じて切り替わる。

来の世代に」についてのみ、若干の正の寄与を示した。

続いて、提供された情報を読んだ際に、年上の血縁者からの支援を受けていると思ったか否かについて尋ね、この回答とメッセージの効果の相関を分析した。その結果、メッセージグループごとの相関係数は表 2 に示すとおりとなった。CG では「未来の世代に」と「自分自身に」のいずれにおいても、相関は非有意となったが、TG1 と TG2 ではいずれも有意に正の相関を示した。このことから、設計したメッセージが血縁者からの支援の認知を促進し、結果的に介入効果の大きさと連動していることが示唆される。

4. 総括

本稿では、実世界での介入としてのナッジが、人間の意思決定の生物学的な適応過程を模倣した進化シミュ

表1 パネル解析の結果

被説明変数		未来の世代に			自分自身に		
		係数の推定値	標準誤差	t 値	係数の推定値	標準誤差	t 値
切片		*-0.331	0.140	-2.367	-0.003	0.131	-0.027
介入	TG1	†0.057	0.032	1.790	**0.077	0.030	2.599
	TG2	***0.139	0.032	4.354	**0.086	0.030	2.881
属性値	性別 (男性 = 0, 女性 = 1)	***0.142	0.029	4.958	-0.005	0.027	-0.197
	年齢	***-0.005	0.001	-4.367	***-0.003	0.001	-3.458
パーソナリティ 変数 (Big Five)	外向性	0.008	0.006	1.435	0.004	0.005	0.722
	協調性	***0.029	0.007	4.297	*0.013	0.006	2.123
	勤勉性	-0.008	0.006	-1.318	-0.007	0.006	-1.257
	神経症傾向	*0.014	0.007	2.144	0.006	0.006	0.902
	開放性	0.006	0.006	0.948	-0.004	0.006	-0.728
調整済み R 二乗値				0.027			
有効回答数					4,042		

†, *, **, *** それぞれ 90%, 95%, 99%, 99.9%の確率で 0 とは異なることを示す。

表2 介入効果と血縁者からの支援の認知の相関

	未来の世代に	自分自身に
全サンプル	***0.069	***0.084
CG	0.032	0.035
TG1	***0.091	***0.109
TG2	*0.066	***0.096

*, *** それぞれ 95%, 99.9%の確率で 0 とは異なることを示す。

レーションモデルに基づいて設計可能であることを示した。

イラストを活用した情報提供による介入効果の上昇は、探索コスト [22] や情報過多 [23] による解釈が可能である。分量の多い文字情報のみでは、読み手に取って負荷が高く、結果的に本来その情報もっていた介入の効果を損ねてしまう可能性がある。イラストの提示は、こういった文字を読む探索コストを軽減し、より簡便な方法で情報を伝える効率的な手段として活用可能であることが示唆される。

リスクへの態度は、極端な場合、不必要な恐怖やパニックを生み、結果的に社会的厚生や公共財を損なうこともある。こうした状況に対して、単に正しい情報を提供するだけでは不十分であり、行動経済学においても指摘されてきたように、「情報提示の仕方（プレゼンテーション）は非常に重要」[24] となる。本稿で提示した情報提供手法は、人々が過度に大きな恐怖を抱いている場合に緩和するのに有用と期待される。本稿の実証分析では、工業化に由来する大気汚染をリスク源

として設定したが、血縁者の支援の感覚を増幅することでリスク忌避的な態度を緩和するという考え方自体は、より幅広くさまざまな状況で活用可能性がある。実際、本稿のナッジ手法はその他の日常生活における環境リスクに対しても有効である [25]。また、本稿執筆時点では未公表であるものの、未来の世代を脅かすと認知されるリスクとしての新技術などに対しても有効性を確認済みである。同様に、日本国内のみならず国外においても介入効果を確認しており、特定の文化に依存しない汎用性を有している可能性も示唆されている。

また、一般にナッジの効果検証には多数の被験者の参加が必要なランダム化比較実験を伴うため、新たなナッジを試行錯誤で設計すること自体にも多大な経済的コストがかかる。進化心理学の知見とシミュレーションモデルを組み合わせた枠組みは、より効率的なナッジ設計のためのアプローチとしても期待される。

なお、日本においては 2020 年から感染拡大が始まった新型コロナウイルスは、2022 年 7 月現在においても終息していない。人間のリスクに対する認知メカニズムは、本稿で着目した利他性以外にも、さまざまな要因によって影響を受ける。本稿で分析したデータは 2019 年時点のものである。新型コロナウイルスの感染拡大による影響は表れていないが、その後の分析では、本稿で示したナッジの効果が影響を受けることも明らかになっている。こうした社会的な大きな出来事などの、さまざまな外部要因に影響を受けにくい、ロバストなナッジを設計することも今後の課題である。

参考文献

- [1] R. H. Thaler and C. R. Sunstein, *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness*, Penguin Books, 2009. (遠藤真美訳, 『実践 行動経済学 健康, 富, 幸福への聡明な選択』, 日経 BP 社, 2009.)
- [2] B. Szasz, A. Palinkas, B. Palfi, A. Szollosi and B. Aczel, “A systematic scoping review of the choice architecture movement: Toward understanding when and why nudges work,” *Journal of Behavioral Decision Making*, **31**, pp. 355–366, 2018.
- [3] Cabinet Office, MINDSPACE: Influencing behaviour through public policy, <https://www.bi.team/wp-content/uploads/2015/07/MINDSPACE.pdf> (2022 年 7 月 19 日閲覧)
- [4] H. Allcott, “Social norms and energy conservation,” *Journal of Public Economics*, **95**, pp. 1082–1095, 2011.
- [5] H. Komatsu and K. Nishio, “An experimental study on motivational change for electricity conservation by normative messages,” *Applied Energy*, **158**, pp. 35–43, 2015.
- [6] T. Mukai, K. Nishio, H. Komatsu and M. Sasaki, “What effect does feedback have on energy conservation? Comparing previous household usage, neighbourhood usage, and social norms in Japan,” *Energy Research & Social Science*, **86**, 102430, 2022.
- [7] D. Kahneman, “Maps of bounded rationality: A perspective on intuitive judgment and choice,” T. Frängsmyr (ed.), *Nobel Foundation*, pp. 449–489, 2002.
- [8] G. Gerd and S. Reinhard, *Bounded Rationality: The Adaptive Toolbox*, MIT Press, 2002.
- [9] V. Capraro, G. Jagfeld., R. Klein, M. Mul and I. van de Pol, “Increasing altruistic and cooperative behaviour with simple moral nudges,” *Scientific Reports*, **9**, Article number 11880, 2019.
- [10] J. Mercer, “Prospect theory and political science,” *Annual Review of Political Science*, **8**, pp. 1–21, 2005.
- [11] P. Slovic, “Affect, reason, risk and rationality,” *Newsletter of the European Working Group: Multi-criteria Aid for Decisions*, **3**, pp. 1–5, 2006.
- [12] M. G. Haselton, G. A. Bryant, A. Wilke, D. A. Frederick, A. Galperin, W. Frankenhuys, and T. Moore, “Adaptive rationality: An evolutionary perspective on cognitive bias,” *Social Cognition*, **27**, pp. 733–763, 2009.
- [13] D. T. Kenrick, V. Grisevicius, J. M. Sundie, N. P. Li, Y. J. Li and S. L. Neuberg, “Deep rationality: The evolutionary economics of decision making,” *Social Cognition*, **27**, pp. 764–785, 2009.
- [14] G. A. Quattrone and A. Tversky, “Contrasting rational and psychological analyses of political choice,” *American Political Science Review*, **82**, pp. 719–736, 1988.
- [15] V. T. Covello, D. B. McCallum and M. T. Pavlova (eds.), *Effective Risk Communication: The Role and Responsibility of Government and Nongovernment*, Springer, 1989.
- [16] W. D. Hamilton, “The genetical evolution of social behavior,” *Journal of Theoretical Biology*, **7**, pp. 1–16, 1964.
- [17] 小松秀徳, 大橋弘忠, “利他性に起因するリスク忌避的な態度の進化—進化的マルチエージェントモデルによる分析—,” 日本シミュレーション学会論文誌, **8**, pp. 85–99, 2016.
- [18] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, 1996.
- [19] L. J. Eshleman and J. D. Schaffer, “Real-coded genetic algorithms and interval-schemata,” *Foundations of Genetic Algorithms*, **2**, pp. 187–202, 1993.
- [20] H. Komatsu, H. Kubota, N. Tanaka and H. Ohashi, “Designing information provision to serve as a reminder of altruistic benefits: A case study of the risks of air pollution caused by industrialization,” *PLoS ONE*, **15**, e0227024, 2020.
- [21] S. D. Gosling, P. J. Rentfrow and W. B. Swann, “A very brief measure of the Big-Five personality domains,” *Journal of Research in Personality*, **37**, pp. 504–528, 2003.
- [22] G. E. Smith, M. P. Venkatraman and R. R. Dhokakia, “Diagnosing the search cost: Waiting time and the moderating impact of prior category knowledge,” *Journal of Economic Psychology*, **20**, pp. 285–314, 1999.
- [23] C. Speier, J. Valacich and I. Vessey, “The influence of task interruption on individual decision making: An information overload perspective,” *Decision Sciences*, **30**, pp. 337–356, 1999.
- [24] D. Kahneman, *Thinking, Fast and Slow*, Straus and Giroux, 2011.
- [25] H. Komatsu, H. Kubota, N. Tanaka, M. Griffin, J. Link, G. Geher, and M. L. Fisher, “Cross-cultural comparison of nudging effects for environmental protection: A case-study of risk-averse attitudes toward disposable plastics,” *PLoS ONE*, **17**, e0277183, 2022.