

厚生労働科学研究費補助金（循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究事業）
食環境づくりの推進を通じた減塩の取組がもたらす公衆衛生学的効果及び
医療経済学的効果を推定するための研究
分担研究報告書

食環境づくりの推進を通じた減塩の取組の効果に関する全国版シミュレーションモデル

研究分担者 西 信雄 聖路加国際大学 大学院公衆衛生学研究科
研究分担者 湊 宣明 立命館大学 大学院テクノロジー・マネジメント研究科
研究分担者 杉山雄大 国立国際医療研究センター・研究所 糖尿病情報センター
研究代表者 池田奈由 医薬基盤・健康・栄養研究所 国立健康・栄養研究所
栄養疫学・政策研究センター
研究協力者 ファティン・アミナ・ビンティ・ハッサン
医薬基盤・健康・栄養研究所 国立健康・栄養研究所
栄養疫学・政策研究センター

研究要旨

減塩は、非感染性疾患予防および社会保障費抑制に向けた重要な公衆衛生施策である。本研究では、40歳以上の日本人を対象とし、2012年から2040年にかけての減塩介入による健康および費用面での効果を評価するため、システム・ダイナミクス・モデルを開発した。

モデルによるシミュレーションの結果、ベースラインのシナリオでは、循環器疾患（CVD）および慢性腎臓病（CKD）による障害調整生存年数（DALY）は、人口10万人あたりそれぞれ約55年および9.5年と推計され、2040年までに社会保障費として約40兆円の支出が見込まれた。義務的な食品の成分変更を実施した場合、CVDとCKDのDALYはそれぞれ5.7%および6.2%減少し、社会保障費も約6.7%削減されると予測された。自主的な成分変更の場合でも、DALYはそれぞれ4.7%および5.2%の減少が見込まれ、社会保障費は5.6%削減されると推定された。減塩食の普及促進により、CVDおよびCKDのDALYは2.8%および3.2%減少し、社会保障費は3.4%の削減につながると予測された。

以上の結果から、加工食品の減塩は、減塩食の普及促進よりも健康改善と社会保障費の抑制の両面でより大きな影響を及ぼす可能性が示された。

A. 目的

食塩の過剰摂取は、非感染性疾患（NCD）、特に日本人の死亡や身体障害の主な原因である循環器疾患（CVD）や慢性腎臓病（CKD）[1]の重大な食事上の危険因子である[2]。2021年には、日本におけるCVDによる障害調整生存年数（DALY）は約600万年、罹患数は約1,600万例、死亡数は約37万例と推定された。同年、CKDによるDALYは約92万年、罹患数は2,300万例、死亡数は5万例であった[3]。これらのNCDは個人の健康に影響を与えるだけでなく、日本の医療制度にも大きな財政的負担を強いており、国民医療費の30%以上を占めている[4]。この状況は、急速な高齢化により、さらに悪化している。2021年時点で、日本の人口の約29%が65歳以上であった[5]。こうした懸念の高まりを受けて、世界保健機関（WHO）は2025年までに平均食塩摂取量を30%削減することを推奨しており[6]、1人当たりの1日の

食塩摂取量を5g未満にすることを目標として掲げている[7]。世界的な取組に沿って、日本政府も国の健康増進キャンペーンで減塩を優先課題としている。2013年に開始された「健康日本21（第2次）」では、2022年までに成人の食塩摂取量を1日8gに減らすことを目標としていた[8]。その後の「健康日本21（第3次）」では、2032年までにこの値を1日7gにさらに引き下げるという目標を掲げた[9]。

世界的、国家的な取組にもかかわらず、食塩の過剰摂取はいくつかの国で観察されている[10]。日本では特にこの問題が顕著で、2019年の時点でも1日の平均食塩摂取量は約10gと変わりなく[11]、国家目標[8]と世界目標[7]の両方を上回っている。この食塩摂取量の多さは、味噌、醤油、塩などの調味料を含む伝統的な日本食によるところが大きく、1日の食塩摂取量の約70%を占めている[12]。食塩削減目標を達成するには、食品

業界を含むさまざまな利害関係者の協調的な取組が必要である[13]。日本では、産官学の連携により、特に減塩製品など、より健康的な食品の選択肢を増やすための取組が行われている[14,15]。WHOは、NCDを減少させるための費用対効果の高い戦略として食品の成分変更を提唱しており[16]、各国の目標を導き、成分変更の努力を加速させるべく、国際的なナトリウム基準値を提供している[17]。エビデンスによれば、包装食品中の食塩を減らすことで、疾病負担の軽減や医療費の削減など、大幅な健康改善と経済的利益が生まれることが示されている[18-21]。これを裏付けるように、日本での先行研究では、成分変更やその他の介入により1日の食塩摂取量を減らすことで、公衆衛生の成果を大幅に向上させることができると強調している[22]。

システム・ダイナミクス・モデリングは、医療[23-25]や公衆衛生政策[26-29]に関する先行研究で広く適用されてきた。その好例は、予防影響シミュレーションモデル（PRISM：Prevention Impacts Simulation Model）[30]である。これは、1990年から2040年までの米国における長期的な健康転帰を予測し、集団レベルの介入の費用対効果を評価するために設計された大規模なシステム・ダイナミクス・モデルである。このモデルは、さまざまなCVD介入政策を評価するために、いくつかの国で採用されている。例えば、ニュージーランドの公衆衛生研究[31]やシンガポールの研究[28,32]に適用されたシステム・ダイナミクス・モデルは、PRISMをガイドとして活用している。Georgeらによる最近の研究[33]では、システム・ダイナミクス・モデリングを用いて、イングランド南東部のケント州の住民を対象に、13種類の予防的介入が健康状態、医療の利用状況、および医療費に及ぼす影響をシミュレーションした。しかし、この方法は、日本の公衆衛生問題、特にNCDの予防において、さほど活用されていない。日本において[34]、年齢別システム・ダイナミクス・モデルを用いた研究は、1950年から2017年までの食塩摂取量の減少が心血管死亡率に及ぼす長期的影響について検討した研究1件のみである。そこで本研究では、システム・ダイナミクス・モデリングを用いて、減塩介入がCVDとCKDの予防に及ぼす長期的効果を評価するとともに、日本の国家レベルでの社会保障費の増加抑制効果についても評価することを目的とした（図1）。

B. 研究方法

1. システム・ダイナミクス・シミュレーション・モデル

システム・ダイナミクス・シミュレーションモデルを適用し、減塩政策がCVDとCKDの予防に及ぼす長期的効果と、血圧低下による社会保障費への影響を予測した。本研究では、Vensim DSS 10.2.0[35]を用いてシミュレーションモデルを開発し、検証した。

システム・ダイナミクスとは、複雑なシステムの時間経過に伴う挙動を分析するアプローチであり、さまざまな要素が互いにどのように影響しあうかを明らかにするものである。これは、間接的な関係やフィードバックループを考慮して複雑な問題の挙動を再現するため、長期的な政策分析には特に効果的なツールである[36]。この方法は、システムの構造とダイナミクスの両方を捉えるもので、研究者や政策立案者が変化の影響を理解し、特に結果までの経路が間接的であったり、遅延していたり、非線形フィードバックループの影響を受けていたりする状況において、介入の影響を予測するのに役立つ[37]。

システム・ダイナミクス・モデリングは通常、定性的な要素と定量的な要素の両方を含んでいる。定性的な側面では、システム内の因果交互作用を視覚化するために、因果ループ図（CLD）を作成することが多い[38]。CLDは、因果関係のリンクとフィードバックループを使用して、異なる変数が互いにどのように影響し合うかをマッピングし、矢印で因果関係を示す。各矢印は、その尾にある独立変数とその先頭にある従属変数との間の因果関係を示す。フィードバックプロセスには2つのタイプがある[37]。すべての矢印が正であるか、または負の矢印の数が偶数である強化プロセスと、負の矢印の数が奇数である均衡化プロセスである。フィードバックプロセスを強化すると、システムは指数関数的に成長または衰退する。一方、フィードバックプロセスを均衡化すると、これらの変化が相殺され、システムは均衡状態に達する。

定量的な側面では、システム要素がどのように相互作用し、経時的に変化するかを表すストック図とフロー図を作成する。これらの図において、箱型のアイコンで表されたストックは、疾患を伴う個人数あるいは貯水池の水量など、蓄積または枯渇する要素を示している。二重矢印で表されたフ

ローは、ストックへの流入（インフロー）とストックからの流出（アウトフロー）を表し、ストックレベルの変化を引き起こす要素の動きを示している。例えば、疫学研究では、ストックは疾病の有病率を表し、流入は新規症例を、流出は死亡または回復を表す。

2. モデルの概念化

食塩摂取量削減を目標とした介入の効果を評価するために、システム・ダイナミクス・モデルの概念的枠組みを構築した（図2）。このモデルは、食塩摂取量削減介入、食塩摂取量、非感染性疾患、社会保障費の4つの要素で構成されている。食塩摂取量削減の介入要素では、(1)国民の減塩食生活の普及、そして(2)企業による減塩に向けた食品の成分変更、の2つのアプローチを検討した。食塩摂取に関する主要評価項目は、日本の成人の平均食塩摂取量である。これは減塩食と食品の成分変更の両方の影響を受ける項目であった。非感染性疾患の項目では、高血圧、CVD、CKDの発生率と有病率を調査する。CVDとCKDは、食塩摂取が血圧上昇に与える影響を通じて間接的に影響を受ける疾患である。社会保障費には、社会保障制度でカバーされる医療費および介護費が含まれる。減塩介入により、疾病の有病率と関連コストの低減が期待される。

3. 動的仮説

動的仮説を立てるために、システム・ダイナミクス・モデルの定性的要素としてCLDを構築した（図3）。CLDには2つの強化ループ（R1とR2）と2つの均衡化ループ（B1とB2）が含まれている。動的仮説では、食生活において減塩の必要性を認識している人は、市場で入手可能な減塩製品を購入する傾向にあると想定する。こうした製品に対する需要の高まりは消費量の増加につながり、国民に減塩食を広く普及させることになる（R1）。製品の需要が増え続けるにつれて、食品業界は食品の成分変更を行うインセンティブが与えられる。その結果、減塩食品の選択肢が拡大し、より多くの人々がそれを購入するようになるため（R2）、消費全体がさらに促進され、このサイクルが強化される。

減塩食を推進する公衆衛生キャンペーンは、過剰な食塩摂取の危険性に関する認識を高め、食塩摂取量を減らすよう人々を動機付ける。より多くの人々が減塩の重要性を認識し、減塩製品を選ぶようになると、食事

からの食塩摂取量は全体的に減少する。この減少により、高血圧を生じる可能性が低下し、CVDとCKDの発生率が低下し、最終的には公衆衛生の取組が強化されると同時に、予防的ケアへの資金投入も増加することで、これらが支えられる（B1）。

食塩の過剰摂取は高血圧を引き起こし、慢性疾患の発生率を高めるため、政府は治療と予防の両方のケアに対する社会保障予算の拡大を迫られる。治療費に資金が割り当てられることで、早期高血圧患者が迅速な治療を受けられるようになる。早期介入は慢性疾患の進行を防ぎ、非感染性疾患の発症リスクを低減する（B2）。

4. モデルの構築

システム・ダイナミクス・モデリングの定量的要素として、CLDに概説された関係に基づいてストックフロー図を作成した。これらの図は、一般集団、食塩摂取量、NCD、社会保障費、減塩介入という相互に関連した5つのセクターを統合したものである。

4.1. 一般集団モデル

性別・年齢階級別（40～49、50～59、60～69、70～79、80～89、90歳以上）で層別化された年齢分布に基づいて、加齢連鎖コホート集団モデルを構築した。このモデルでは、これらの年齢層は順次関連するストック変数として扱われる（図S1）。モデルのキャリブレーションを改善するため、人口統計セクターに40歳未満の個人を表すストック変数を含めた。一般集団モデルには出生、死亡、純移動が組み込まれている。各年齢コホートと性別の集団サイズ $[5]$ は、以下の式を用いて算出した（表S1）。

$$P_{i=0,j}(\tau) = P_{i=0,j}(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (B_j + NM_{i=0,j} - D_{i=0,j} - T_{i+1,j}) dt \quad (1)$$

$$P_{i>0,j}(\tau) = P_{i>0,j}(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (T_{i-1,j} + NM_{i>0,j} - D_{i>0,j} - T_{i+1,j}) dt \quad (2)$$

$P_{i,j}(\tau)$ は年齢、 $i = \{0, 1, 2, \dots, 7\}$ 、性別による集団、 $j = \{0, 1\}$ は男女別集団、指数 $i = 0$ は40歳未満のコホート、 $i > 0$ は40歳以上のコホート、 τ は当年を表す。 B_j は年間出生数、 $NM_{i,j}$ と $D_{i,j}$ はそれぞれ純移動と純死亡を表し、 $T_{i-1,j}$ は前のコホートから次のコホートへの流出、 $T_{i+1,j}$ は次の年齢コホートへ

の流入率を表す。

出生数はモデルに入力され、最初は 40 歳未満の個人のストック変数に配置され、次のように決定される。

$$B_j = br_j \times FW \quad (3)$$

br_j は男女別の出生率を示す (表 S3) [39]。 FW は 15~49 歳の女性の数を表し、以下のよう計算される。

$$FW = \sum_{i=0}^1 P_{j=1} \times fr_{FW} \quad (4)$$

$\sum_{i=0}^1 P_{j=1}$ は、40 歳未満 ($i=0$) から 40 歳代 ($i=1$) までの女性の総数を指す。 fr_{FW} は、生殖年齢の女性の割合である。

各コホートの生存者は、90 歳以上の最終コホートを除き、現在のコホートの最後の年から次のコホートの最初の年 ($T_{i+1,j}$ 、例：49 歳から 50 歳) への移行率に従って、次のコホートに移行する。

$$T_{i+1,j} = \frac{P_{i,j}}{C} \times fr_{P_{i,j}} \quad (5)$$

$P_{i,j}$ は性・年齢別の人数を表し、 C は各コホートにおける平均持続期間 (40 歳未満は 40 年、10 歳ごとの各コホートは 10 年) を表し、 $fr_{P_{i,j}}$ は各年齢群の集団に占める割合を表す。非生存者は、年齢別死亡率に基づく死亡を反映した流出としてモデルから除外された [40]。その数は時間を通じて一定であると想定された (表 S2)。流入と流出の差である純移動も、各コホート集団に加味されている。純移動率 (一定、かつ流出の場合はマイナス) は年齢層別に決定された (表 S2) [41]。

4.2. 食塩摂取モデル

食塩摂取モデルは、現在の平均食塩摂取量 [11] と減塩目標量 (図 4) [8] に基づく食塩消費量のダイナミクスを表している。

数学的には、現在の平均食塩摂取量は以下のように計算する。

$$NaCl_j(\tau) = NaCl_j(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (\Delta NaCl_j) dt \quad (6)$$

$NaCl_j(t_0)$ は調査期間開始時の平均食塩摂取量を示す。

食塩摂取量の変化率 ($\Delta NaCl_j$) は以下のように計算する。

$$\Delta NaCl_j = \quad (7)$$

$$\frac{\left(\frac{perceived_{NaCl}}{NaCl_j}\right) \times \%A_{LSD} \times gaps_{NaCl_j}}{AT_{\Delta NaCl}}$$

$\frac{perceived_{NaCl}}{NaCl_j}$ は認知された平均食塩摂取量と実際の平均食塩摂取量の比率を表し、 $\%A_{LSD}$ は減塩食を採用している集団の割合を表し、 $AT_{\Delta NaCl}$ は集団が食塩摂取量を減らすために必要な平均調整時間を表す [42]。このモデルには、減塩食の採用による平均食塩摂取量への影響を評価するために $\%A_{LSD}$ を含む。

食塩摂取目標量 ($goal_{NaCl}$) と現在の平均食塩摂取量 ($NaCl_j$) との差 ($gaps_{NaCl_j}$) は以下のように計算した。

$$gaps_{NaCl_j} = goal_{NaCl} - NaCl_j \quad (8)$$

4.3. NCD モデル

食塩摂取が血圧を上昇させることによって CVD と CKD の有病率に及ぼす影響を示すために、NCD モデルを開発した。NCD モデルは、高血圧、CVD、CKD の 3 つのサブモデルで構成され、疾病イベントと障害を予測する (図 S2-S4)。一般集団モデルと同様に、疾患モデルは性別によって異なる加齢連鎖プロセスとして構築した。一旦高血圧、CVD、CKD に罹患すると、死亡するまでその罹患状態が続き、未病の状態に戻ることはないことを考慮し、サブモデルには疾患からの回復は含まれていない [43]。

高血圧サブモデル

高血圧サブモデル (図 S2) は、正常血圧から高血圧への移行を示し、当初正常血圧に分類された個人が、最終的にどのように高血圧集団の一部になるかを記述している。加齢は、正常血圧 (NHTN) と高血圧 (HTN) の 2 つの健康状態に分けられる。収縮期血圧が 140mmHg 未満、拡張期血圧が 90mmHg 未満であれば NHTN、収縮期血圧が 140mmHg 以上、拡張期血圧が 90mmHg 以上の場合、または降圧薬を使用している場合は HTN とみなされる [11]。

式 (9) は、NHTN 集団の現在の状態 ($NHTN_{i>0,j}(\tau)$) が、前のコホート ($T_{i-1,j}^{NHTN}$) から移行した NHTN 集団の割合とともに増加する一方、HTN の発症 ($I_{i>0,j}^{HTN}$)、高血圧以外の事象による死亡 ($D_{i>0,j}^{NHTN}$)、NHTN 集団の次の年齢コホートへの移行 ($T_{i+1,j}^{NHTN}$) によって減少することを表している。

$$NHTN_{i>0,j}(\tau) = NHTN_{i>0,j}(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (T_{i-1,j}^{NHTN} - I_{i>0,j}^{HTN} - D_{i>0,j}^{NHTN} - T_{i+1,j}^{NHTN}) dt \quad (9)$$

式(10)は、各コホート(表 S4) [44]の HTN 集団が、前のコホートからの HTN 患者 ($T_{i-1,j}^{HTN}$) と HTN の偶発症例 ($I_{i>0,j}^{HTN}$) によって増加することを示している。これは、死亡 ($D_{i>0,j}^{HTN}$) と、HTN 集団の次の年齢コホートへの移行 ($T_{i+1,j}^{HTN}$) によって減少する。

$$HTN_{i>0,j}(\tau) = HTN_{i>0,j}(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (T_{i-1,j}^{HTN} + I_{i>0,j}^{HTN} - D_{i>0,j}^{HTN} - T_{i+1,j}^{HTN}) dt \quad (10)$$

具体的には、HTN の罹患率は、正常血圧集団 ($NHTN_{i>0,j}$)、高血圧発症リスク ($risk_j$)、新規 HTN 集団の割合 ($fr_{i>0}^{HTN}$) の積であり、以下のようなになる。

$$I_{i>0,j}^{HTN} = risk_j \times NHTN_{i>0,j} \times fr_{i>0}^{HTN} \quad (11)$$

最後に、死亡率は式(12)で示すように HTN 集団と HTN 患者の部分死亡率の積である。

$$D_{i>0,j}^{HTN} = HTN_{i>0,j} \times dr_{i>0}^{HTN} \quad (12)$$

CVD サブモデル

CVD サブモデルは、血圧と CVD リスクの正の相関に基づいている(図 S3)。各コホートの現在の CVD 集団(表 S4) [3]は以下のように計算した。

$$CVD_{i>0,j}(\tau) = CVD_{i>0,j}(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (T_{i-1,j}^{CVD} + I_{i>0,j}^{HTNCVD} + I_{i>0,j}^{otherisk} - D_{i>0,j}^{CVD} - T_{i+1,j}^{CVD}) dt \quad (13)$$

有病率は、前コホートから合流する CVD 患者集団の割合 ($T_{i-1,j}^{CVD}$)、および、HTN ($I_{i>0,j}^{HTNCVD}$) やその他の危険因子 ($I_{i>0,j}^{otherisk}$) に関連する CVD の発生率とともに増加する。CVD 集団は、死亡 ($D_{i>0,j}^{CVD}$) (表 S5) [3]、および、CVD 集団が次のコホートに移行する割合 ($T_{i+1,j}^{CVD}$) により減少する。HTN に起因する CVD 発生率は以下のように計算した。

$$I_{i>0,j}^{HTNCVD} = risk_j \times fr_{i>0,j}^{CVD} \times HTN_{i>0,j} \times \frac{CVD_{i>0,j}}{P_{i>0,j}} \quad (14)$$

$fr_{i>0,j}^{CVD}$ は CVD の初回発症の割合を示し、 $\frac{CVD_{i>0,j}}{P_{i>0,j}}$ は CVD 集団の割合を示す。

CKD サブモデル

推算糸球体濾過量 (eGFR) は、システム・ダイナミクス・モデルを適用した先行研究において、CKD の定義と CKD の各ステージの算出に使用されている[28,45]。eGFR のデータが不足しているため、本研究では日本における CKD 総有病率を用いた[3]。一般に、CKD サブモデルは CVD サブモデルと類似しており(図 S4)、各コホートの CKD 集団(表 S4) [3]は以下のように計算した。

$$CKD_{i>0,j}(\tau) = CKD_{i>0,j}(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} (T_{i-1,j}^{CKD} + I_{i>0,j}^{HTNCKD} + I_{i>0,j}^{CVDCKD} - D_{i>0,j}^{CKD} - T_{i+1,j}^{CKD}) dt \quad (15)$$

$I_{i>0,j}^{HTNCKD}$ は HTN に伴う CKD の発生率、 $I_{i>0,j}^{CVDCKD}$ は CVD に伴う CKD の発生率である。

障害調整生存年数

本研究では、健康アウトカムとして障害調整生存年数 (DALY) を組み入れた。各疾患の DALY は、損失生存年数 (YLL) と障害生存年数 (YLD) の合計として計算した[2]。YLL は、平均余命と比較した早死による損失年数と定義される。CVD ($YLL_{i>0,j}^{CVD}$) と CKD ($YLL_{i>0,j}^{CKD}$) の YLL は以下のように計算した。

$$YLL_{i>0,j}^{CVD} = D_{i>0,j}^{CVD} \times AYL_{i>0,j}^{CVD} \quad (16)$$

$$YLL_{i>0,j}^{CKD} = D_{i>0,j}^{CKD} \times AYL_{i>0,j}^{CKD} \quad (17)$$

$AYL_{i>0,j}^{CVD}$ と $AYL_{i>0,j}^{CKD}$ は、それぞれ CVD と CKD による平均損失生存年数を示す。平均損失生存年数は、Global Burden of Disease Study 2019 [3]から入手したデータセットを用いて、損失生存年数を死亡者数で除して算出した(表 S5~S8) [2]。

YLD は、疾患の有病率と障害の重みの積として定義される。CVD ($YLD_{i>0,j}^{CVD}$) と CKD ($YLD_{i>0,j}^{CKD}$) について以下のように計算した。

$$YLD_{i>0,j}^{CVD} = CVD_{i>0,j} \times DW_{i>0,j}^{CVD} \quad (18)$$

$$YLD_{i>0,j}^{CKD} = CKD_{i>0,j} \times DW_{i>0,j}^{CKD} \quad (19)$$

$DW_{i>0,j}^{CVD}$ と $DW_{i>0,j}^{CKD}$ はそれぞれ CVD と CKD の障害の重みを表す。障害の重みは状態の重篤度を反映し、0 (損失や負担なし) から 1 (死亡) の範囲である[46]。障害の重みは、障害共存年数を疾患有病率で除して計算した(表 S4~S8) [2]。

4.4. 社会保障支出モデル

CVD と CKD に起因する合併症は、医療セクターと個人の両方の観点から支出に大きな影響を与える。個々の患者は、薬代、頻

繁な受診、病気による収入減の可能性などで高額な自己負担を強いられ、経済的な困難に直面し、生活の質や必要なケアへのアクセスに影響が及ぶ可能性がある。しかし、我々のシミュレーションモデルでは、個人が負担する費用については考慮していない。図 5 の社会保障支出モデルは、食塩の過剰摂取に関連する疾病に関連する医療費と介護費 (LTC 費) の構造を概説している。日本における非感染性疾患集団の増加が、医療・介護両セクターの年間支出にどのような影響を与えるかを、ストック変数として具体的に示している。

日本の国民医療費は年々着実に増加しており、2019 年には国内総生産の 7.93% に達した[4]。本研究では、医療セクターにおける高血圧、CVD、CKD の患者の治療費用の発生により、医療費のストック変数 (表 S9) [4]が増加すると仮定した。したがって、これらの費用の年間累積率 (ΔMCE) は以下のように計算される。

$$\Delta MCE = MTC_{HTNCVDCKD} \times fr_{MCE} \quad (20)$$

$MTC_{HTNCVDCKD}$ は高血圧、CVD、CKD の総医療費を示し、 fr_{MCE} は医療費全体の変化の割合を示す。

治療費は以下のように計算した。

$$MTC_{HTNCVDCKD} = (AC_{CVD} \times \sum_{j=1}^6 CVD_j) + AC_{HTN.MT} \quad (21)$$

$$TC_{HTN.MT} = \sum_{j=1}^6 HTN_j \times AC_{HBP MED} \times AU_j^{HBP MED} \quad (22)$$

AC_{CVD} と AC_{CKD} はそれぞれ CVD と CKD の患者一人当たりの平均費用[47]を示し、 $TC_{HTN.MT}$ は高血圧の治療にかかる総費用を示し、 $AC_{HBP MED}$ は降圧薬の平均費用[48]を示し、 $AU_j^{HBP MED}$ は投薬中の高血圧患者の平均人数を示す[11]。

介護保険 (LTCI) 制度では、LTC の主な財源は保険料である[49,50]。LTCI は、65 歳以上の第 1 区分と 40~64 歳の第 2 区分に分けられ、各区分で LTCI の規定に基づき異なる保険料率が適用される[51]。助成金や投資など、その他の LTC の資金源は本調査の範囲外であるため分析から除外した。LTC の年間支出の増加は以下の式で求められる ($\Delta LTCE$) :

$$\Delta LTCE = \frac{LTCE_{CVDCKD} \times TIME STEP \times fr_{LTCE}}{AT_{LTCE}} \quad (23)$$

$LTCE_{CVDCKD}$ は、CVD と CKD を有する個人の介護費の合計を表す。これには、LTC を必要とする高齢者が負担する費用も含まれる。LTC 費用と調整時間の変化率をそれぞれ fr_{LTCE} と AT_{LTCE} とする。さらに、社会保障支出モデルは、社会保障費が予防のための医療費と治療のための医療費にどのように分けられるかを示している。本研究では、社会保障費は、減塩に向けたメディアキャンペーンなど公衆衛生のイニシアチブを支援する場合は予防医療に配分される一方、患者が病状から回復する割合を増加させるための医療をカバーする場合は治療医療に配分されると想定する。

4.5. 減塩介入モデル

減塩介入モデル (図 6) は、日本における先行研究[52]のほか、イノベーションを採用すると、まだ採用していない他の人に「伝染」することを示す一般的なイノベーション普及モデル[37]を基に構築されている。このプロセスは社会的伝染または口コミとして知られている。このモデルは 2 つの介入サブモデルで構成されている。図 6 の上部は、集団に減塩食品と減塩食の導入を促す健康増進キャンペーンのサブモデルを示し、下部は製品の成分変更のサブモデルを示す。

健康増進キャンペーンのサブモデル

健康増進キャンペーンのサブモデルでは、減塩食の潜在的採用者は、減塩食の必要性を認識しているものの、いまだ変更を行っていない個人と定義される[53]。消費者は、より多くの情報を得て動機づけられ、食塩関連のラベルについてより理解を深めることができれば、減塩製品を購入する可能性が高くなる[54]。このストック変数は、健康増進キャンペーンの認知率[55]や、社会保障費のこれらの介入策への配分割合[56]の影響を受ける。

採用者とは、すでに減塩食を採用している人や、食塩摂取量が平均より少ない人、減塩食を好む人のことである。潜在的な採用者は、すでにこの行動を実践している個人と遭遇すると、減塩食を採り入れる。これは、モデルで「口コミによる採用」と示されているように、集団内でのコミュニケーションの影響を反映している。このサブモデルは、

数学的には以下のように表すことができる。

$$WOM_{LSD} = PA_{LSD} \times c \times af \times \frac{A_{LSD}}{MS} \quad (24)$$

WOM_{LSD} は潜在的採用者における減塩食の採用、 PA_{LSD} は採用者との相互作用の影響、 A_{LSD}/MS は市場規模（集団全体）を表している。接触率 c は、特定の期間内に減塩食を採用するよう説得された潜在的な採用者の数を測定するものである。採用率 af は、潜在的な採用者が既存の採用者と接触した際に採用する確率を表す。キャリブレーションに基づき af を 2% とする。この模倣効果は、減塩食採用者のストックへの流入率である採用率に影響を与える。減塩食の採用率 (AR_{LSD}) を以下のように計算した。

$$AR_{LSD} = WOM_{LSD} \times SS_{LSP} \times taste_{LSP} \quad (25)$$

SS_{LSP} は市場における減塩食品の入手可能性を、 $taste_{LSP}$ は減塩食品の味に対する消費者の嗜好を示す。味覚は食品の選択に大きく影響する[57]。 SS_{LSP} と $taste_{LSP}$ は、減塩介入モデルの下部の製品成分変更サブモデルからリンク付けられている。この採用効果は、2つの重要な現象を示している。すなわち、(1) 潜在的採用者数の変化は採用率に影響を与え、それによって潜在的採用者数のバランスに影響が生じる現象と、(2) 採用率の変化が採用者数の指数関数的な変化につながるという現象である。本研究において、比率 $\frac{A_{LSD}}{MS}$ は食塩摂取量を減らした人の割合を表しており、減塩食品への需要を反映していると想定している。

製品成分変更サブモデル

製品成分変更サブモデルは、高食塩食品と低食塩食品という 2 つのストック変数で構成される。このフロー率は「製品成分変更率」と表示され、減塩製品に対する需要、減塩製品の選択肢を提供する事業者の数、非感染性疾患と食品製品成分変更に関連する政策に影響される。前述の減塩食採用サブモデル（上段）との関連では、減塩食の採用が増えれば、減塩製品に対する需要が高まり、食品事業者はこうした製品の成分変更を迫られると予想される。健康への配慮や食塩摂取量の削減を目的とした政府の政策も、企業が自社製品の健康面や栄養面での成果を改善する動機付けとなっている[58]。この食品成分変更サブモデルは、数学的には以下のように表すことができる。

$$FR_{LSP} = DD_{LSP} \times HSF \times Companies_{LSP} \times Intervention_{FR} \quad (26)$$

FR_{LSP} は減塩製品の成分変更、 DD_{LSP} は減塩食品に対する需要、 HSF は高食塩食品数、 $Companies_{LSP}$ は製品を生産または成分変更している食品事業者数、 $Intervention_{FR}$ は自主的改革と義務的改革の両方に対する効果推定値を指す。

5. パラメータ化とデータソース

シミュレーション期間は2012年から2040年で、日本の40歳以上の成人に焦点を当てている。シミュレーションの開始年として2012年を選んだのは、減塩食品のデータがこの年に初めて入手可能になったからである。表1は、モデルのベースラン設定に使用した主要パラメータと初期値の一覧である。

6. シナリオの前提

本研究では、食塩摂取量の削減を目的とした3つの政策シナリオを検証する。ベースランでは、減塩食を採用する集団の割合と製品成分変更の割合は、シミュレーション全体を通して、それぞれ初期値の2%と5%で一定のまま推移した。このベースランは、3つのシナリオを比較する際の参考となる。シナリオ1では、減塩食を奨励し、消費者の行動に影響を与えることに焦点を当てた。このシナリオでは、減塩行動の採用に関連する先行研究から、減塩食を採用する個人の割合が当初の2%から12%に増加した[63]。シナリオ2は、自主的な食品成分変更である。先行研究[55,64]によると、製品成分変更の割合は5%から15%に増加した。シナリオ3では、義務的な成分変更が導入された。シナリオ2と同様に、先行研究[55,64]に従って、製品成分変更の割合は当初の5%から20%に増加した。表2は、シナリオ分析における政策変数の変化を示している。

7. 検証テスト

システム・ダイナミクスでは、モデルの構造とシミュレーションされた動作の両方に対する信頼性を構築するために、いくつかの検証テストが使用される。これらのテストは、モデルが実世界の挙動をどの程度再現しているかを評価し、根本的なシステム・ダイナミクスを正確に表現していることを確認するものである[37,65]。本研究では、医療費と介護費の変数について行動再現テストと統計的測定を行い、過去のデータと比

較した。統計的評価では、決定係数、平均絶対誤差、二乗平均平方根誤差、Theil の不等式統計の 4 つの指標を評価した。

(倫理的配慮)

本研究は文献等の公表資料を用いて行ったもので個人情報には取り扱わなかった。

C. 研究結果

1. モデルの検証

図 7 に示す行動再現テストの結果は、医療費と介護費に関するモデルの予測を、2012 年から 2019 年までの参考データと比較したものである[4,61]。この比較により、モデルがうまく調整されていることが確認された。表 3 は、医療費と介護費の決定係数、平均絶対誤差、二乗平均平方根誤差、Theil の不等式統計などの統計誤差測定値をまとめたものである。決定係数は両変数とも 95%を超えた。両変数の平均絶対誤差は 0.5 未満であり、モデル値が実際のデータに近いことを示唆している。同様に、両変数の二乗平均平方根誤差は 0.4 以下であり、このモデルを用いたデータの予測が比較的正確であることを示している。Theil の統計の結果、シミュレーションと実際のデータとの誤差のほとんどは小さく、偏りや不等分散によるものではないことが示された。バイアス (U^m) と不等分散 (U^s) の要素はゼロに近かったことから、このモデルは系統的な過大評価や過小評価をすることなく、実際のデータを正確に反映し、変動をよく捉えていることを示している。共分散成分 (U^c) は 1 に近く、モデルが実際のデータの全体的な傾向とパターンを正確に捉えていることを示している。したがって、このモデルは実際のシステムの挙動を正確に再現できると結論づけるのが妥当である。

2. ベースラン分析

図 8 は 2012 年から 2040 年にかけて、減塩介入を行わなかった場合の CVD と CKD の患者数の予測を示している。CVD と CKD の有病率はこの期間に徐々に増加し、特に 70 歳代と 80 歳代で急激な増加が予想されている。この上昇傾向は、主に日本の高齢化によってもたらされている。

2040 年までに、CVD 患者の数は 70 歳代男性で最も多くなり、約 340 万人に達すると予測されている。これに次いで、80 代が約 280 万例、60 代が約 270 万例と続く。女性では、80 歳代が最も CVD 患者数が多く、

約 470 万人と予測され、70 歳代の女性がそれに続き、約 420 万人と推定されている。全体として、CVD 有病率は高齢男性よりも高齢女性の方が高いと予想される。さらに、CKD の有病率は 80 歳代で最も高く、男性で約 390 万人、女性で約 490 万人と推定されている。これらの結果から、シミュレーション期間を通じて、CVD と CKD の症例数は 40 歳代や 50 歳代においてより少ないことが明らかになった。

3. シナリオの分析

表 4 と図 9 は、29 年間の減塩シナリオにおける主要な出力変数の動的変化のシミュレーション結果である。平均食塩摂取量は、2040 年までに 1 日 8g という目標値に向かって徐々に減少している(図 9a, b)。図 9e, f はさらに、食塩摂取量の減少と、食品成分の変更や減塩食の普及による健康状態の改善が、社会保障費の削減につながることを示している。

ベースランと比較すると、義務的成分変更と自主的成分変更の両方が、減塩食の採用増加とともに、食塩摂取量、疾病負担率、社会保障支出を減少させた。このことは、これらのシナリオの挙動を見れば明らかであり、赤線で表されるベースランの挙動と比べて、より低い結果を示している。ベースランでは、2040 年までに、CVD と CKD の累積 DALY は、それぞれ 10 万人当たり約 55 年と 9.5 年になると予測され、社会保障費に約 40 兆円(医療費は約 39 兆円、介護費は約 41 兆円と推定)が拠出されることになる。

シナリオ 1 では、CVD による累積 DALY を 2.8%削減できる可能性があり、これは 10 万人当たり 53.5 年に相当する。CKD では、DALY が 3.2%減少し、これは 10 万人当たり 9.2 年に相当する。このシナリオでは、社会保障費の削減額は約 3.4%(医療費は 3.5%、介護費は 3.4%)となり、それぞれ医療費で約 37 兆円、介護費で約 39 兆円の削減につながる。シナリオ 2 では、CVD と CKD の累積 DALY はそれぞれ 4.7%と 5.2%減少し、CVD は 10 万人当たり 52.4 年、CKD は 10 万人当たり 9 年となった。この削減は、社会保障費の 5.6%減(医療費 5.6%減、介護費 5.5%減)、医療費約 36 兆円、介護費約 39 兆円の削減につながる。

シナリオ 3 では、CVD の DALY が 5.7%減少し、人口 10 万人当たり 51.9 年となり、CKD の DALY は 6.2%減少し、10 万人当たり 8.9 年となった。このシナリオでは、社会

保障費が 6.7%減少（医療費 6.7%、介護費 6.6%）し、医療費は約 36 兆円、介護費は約 38 兆円の削減となる。興味深いことに、DALY について測定した疾病負担は、CVDの方がCKDよりも有意に大きかった。しかし、経済的負担を比較すると、介護費用は医療セクターの費用をわずかに上回っている。

D. 考察

ベースラン分析によるシミュレーション結果、高齢者の CVD と CKD の有病率は、集団の高齢化に伴って 2 倍以上になると予測された。これらの知見は、疾患の有病率が年齢とともに増加し、加齢が慢性疾患の最も重要なリスク因子の一つであることを示した先行研究と一致していた [66]。したがって、これらの予測は、日本における非感染性疾患の管理がますます難しくなっていることを浮き彫りにし、的を絞った医療戦略と資源計画の必要性を強調している。

本研究では、WHO の減塩戦略の 2 つの重要な要素、すなわち消費者行動の修正と食品の成分変更 [67] を組み入れた。シミュレーションの結果、3 つの減塩対策をすべて実施した場合、食事からの食塩摂取量は徐々に減少し、日本の健康日本 21 の食事目標 [8] で定められた 1 日 8g に近づくことが示唆された。しかし、それでも WHO 世界行動計画のナトリウム 30%削減目標には届かず、WHO SHAKE テクニカル・パッケージ [68] に沿ったより包括的な戦略が必要とされた。これらの減塩は、疾病負担の軽減と社会保障費の削減につながると期待された。このことは、日本における過去の研究でも裏付けられており、心血管死亡率の経時的な低下は、食塩摂取量の低下とその血圧低下作用に部分的に起因している可能性が示唆されている [69,70]。同様に、Lackland ら [71] の研究では、食塩摂取量の削減が血圧管理と慢性疾患の予防に極めて重要であり、効果的な減塩政策が大幅な健康改善につながる可能性があることが強調されている [72]。

さらに、本研究のシミュレーション結果は、食品企業による食品成分変更は、集団の摂食行動採用戦略と比較して、健康アウトカムの改善により大きな影響を与えることを明確に示した。また、義務的な成分変更政策は、自主的な成分変更よりもわずかに利点が大きかった。この利点は、より多くの企業が高食塩製品から低食塩製品に移行し、減塩製品の選択肢が増え、積極的に食塩摂取量を減らそうとしない消費者であっ

ても、減塩食を容易に採用できるようにするための義務的な政策によるものであった [15]。このアプローチは、消費者の適応を加速させただけでなく、集団の健康状態の改善と大幅なコスト削減につながり、食塩摂取量の削減が費用対効果に優れ、コスト削減にもつながるといった証拠を裏付けるものとなった [58,73]。さらに、消費者が時間をかけて徐々に減塩製品の味に慣れていくためには、継続的な製品の成分変更が不可欠であった [74]。したがって、効果的な減塩のためには、栄養教育による食習慣の改善と、成分変更された製品の入手可能性の向上という、複合的なアプローチが必要であることが示唆された。消費者の意識を高めることは重要であったが、知識だけでは影響が限定的であったため、食品の成分変更なしに世界および国家の減塩目標を達成することは困難であったろう [14]。

本研究にはいくつかの限界があり、特にシミュレーションやモデリング研究の文脈においては、今後の研究で考慮すべきである。第一に、今回のモデルでは減塩加工品と調味料を区別していない。第二に、このモデルは、食塩摂取量の変化が 2012 年から 2040 年まで持続すると想定しているが、消費者の需要に応じて企業が高食塩製品に回帰した場合、この想定は成り立たない可能性がある。第三に、本研究では特定の 2 つの介入策に焦点を当て、食品表示など他の介入策の潜在的利益を無視している。第四に、本研究のモデルには、減塩製品の研究開発の遅れや味覚テストの必要性は含まれていない。こうした遅れは、より健康的な選択肢の市場導入を遅らせ、減塩戦略の全体的な効果に影響を及ぼす可能性がある。今後の研究では、減塩製品の研究開発を促進する方法を模索するとともに、減塩食を成功裏に普及させるために重要な、消費者の味覚に関する認識を調査すべきである。第五に、実施結果の改善単位あたりの費用など、戦略の費用対効果を推定していない。第六に、減塩を選択した人は、そのような行動をとらなかった人よりも摂取レベルが低い可能性を考慮しなかった。この見落としは、食塩摂取量とその影響に関する調査結果の正確性に影響を及ぼす可能性がある。第七に、本研究の分析では、消費者が成分変更した製品を受け入れるかどうかは、その入手可能性に基づいていると想定しているが、これらの製品に対する個人の認識に関連する要因のデータは考慮していない。第八に、本研究の

介護サブモデルでは、在宅サービス、介護施設、地域密着型サービスなど、さまざまな介護サービスに対する高齢者の需要を区別していなかった。また、日常生活動作の発生率も無視していた。この見落としは、介護支出総額の過小評価につながる可能性がある。今後の研究では、長期的な要件とコストをより正確に評価するために、これらの側面に取り組むべきである。最後に、システム・ダイナミクスは複雑な実世界のシステムをモデル化するのに有用なツールであるが、モデルを構築する際には一定の仮定に依存する。また、本研究の結果は、シミュレーション分析を用いた仮説実験に基づいている点にも注意すべきである。調査結果の信頼性を高め、政策実施を支援するためには、さらなる開発と分析が必要である。モデルの改良を続けながら、構造方程式の改良や構造的な不確実性の考慮など、その定式化と構造を修正・強化していく。

E. 結論

本研究は、現在と将来の減塩政策の影響を評価するために、関連する社会保障費を組み込みながら、高血圧から CVD および CKD の負担への進行をマッピングした、日本初の統合的なシステム・ダイナミクス・モデルを提示するものである。減塩介入のシミュレーションによると、食塩摂取量を減らすことで、日本の高齢者における CVD および CKD に関連する DALY の 3~6% を予防できる可能性が示唆された。これらの疾患にかかる人が減り、より健康で生産性の高い集団が増えることを意味する。食塩摂取量が減れば、高血圧の割合が低下し、心臓発作、脳卒中、腎不全の発生を大幅に減らすことが期待できる。したがって、これらの慢性疾患を予防できれば、医療費や介護費を約 3~7% 節約できる可能性がある。このモデルはより詳細な分析を提供し、政府関係者や一般市民にとって貴重な教育ツールとなる。また、構築されたモデルは、相互に関連する要素や重要な変数の挙動パターンについて理解を深めるものである。今回のシミュレーションと実験の結果は、減塩に関する仮説の今後の展開を裏付けるものであり、さらなる研究のための試験環境を提供するほか、非感染性疾患と食塩の過剰摂取に関連するコスト削減を目的とした政策展開のための道筋を提供する。

F. 研究発表

1. 論文発表

- Hassan FA, Nishi N, Minato N, Sugiyama T, Ikeda N. Health and Economic Effects of Salt Reduction Interventions for Preventing Noncommunicable Diseases in Japan: A System Dynamics Simulation Study. *Systems* 2024, 12, 478.
2. 学会発表
- Hassan FA, Minato N, Sugiyama T, Nishi N, Ikeda N. Impacts of Salt Intake Reduction Interventions on Medical and Long-term Care Costs in Japan. 42nd International System Dynamics Conference. Bergen, Norway, August 6, 2024.
 - ファティン・アミナ・ビンティ・ハッサン, 湊 宣明, 杉山雄大, 三浦克之, 西 信雄, 池田奈由. System Dynamics Model of the Health and Cost Effects of Salt Reduction Interventions in Japan. 第71回日本栄養改善学会学術総会, 大阪市, 大阪公立大学 杉本キャンパス, 2024年9月8日.

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

引用文献

1. World Health Organization. Noncommunicable Diseases. Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases> (accessed on 11 March 2024).
2. GBD 2021 Diseases and Injuries Collaborators. Global Incidence, Prevalence, Years Lived with Disability (YLDs), Disability-Adjusted Life-Years (DALYs), and Healthy Life Expectancy (HALE) for 371 Diseases and Injuries in 204 Countries and Territories and 811 Subnational Locations, 1990–2021: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet* 2024, 403, 2133–2161.
3. Institute for Health Metrics and Evaluation. Global Burden of Disease 2019. Available online: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/> (accessed on 30 October 2024).
4. 厚生労働省. 国民医療費の概要. Available online: <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/37-21.html> (2024年3月11日アクセス).

5. 総務省統計局. 2012年10月1日現在の人口推計. Available online: https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200524&tstat=00000090001&cycle=7&year=20120&month=0&tclass1=000001011679&result_back=1&tclass2val=0 (2024年3月11日アクセス).
6. World Health Organization. NCD Global Monitoring Framework, Geneva, Switzerland, 2011. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/ncd-surveillance-global-monitoring-framework> (accessed on 11 March 2024).
7. World Health Organization. Guideline. Sodium Intake for Adults and Children, 2012. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241504836> (accessed on 11 March 2024).
8. 厚生労働省. 国民の健康の増進の総合的な推進を図るための基本的な方針, 2012. Available online: https://www.pbhealth.med.tohoku.ac.jp/japan21/pdf/kenkounippon21_01e.pdf (2024年3月11日アクセス).
9. 厚生労働省. 健康日本21(第三次). Available online: https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/kenkou/kenkounippon21_00006.html (2024年3月18日アクセス).
10. World Health Organization. Noncommunicable Diseases Data Portal. Available online: <https://ncdportal.org/> (accessed on 12 September 2024).
11. 厚生労働省. 国民健康・栄養調査. Available online: https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyuu_chousa.html (2024年3月11日アクセス).
12. Matsumoto, M.; Tajima, R.; Fujiwara, A.; Yuan, X.; Okada, E.; Takimoto, H. Trends in Dietary Salt Sources in Japanese Adults: Data from the 2007–2019 National Health and Nutrition Survey. *Br. J. Nutr.* 2023, 129, 690–703.
13. Vyth, E.L.; Steenhuis, I.H.; Roodenburg, A.J.; Brug, J.; Seidell, J.C. Front-of-Pack Nutrition Label Stimulates Healthier Product Development: A Quantitative Analysis. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 2010, 7, 65.
14. Takemi, Y. Creating a Healthy Food Environment as a Radical Population Approach and Japanese Initiatives. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* 2022, 68, S78–S80.
15. 土橋 卓也. 日本人はどこまで食塩を減らせるか? 栄養学雑誌. 2020, 78, 49–56.
16. World Health Organization. Tackling NCDs “Best Buys” and Other Recommended Interventions for the Prevention and Control of Noncommunicable Diseases. 2017. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-NMH-NVI-17.9> (accessed on 11 March 2024).
17. World Health Organization. WHO Global Sodium Benchmarks for Different Food Categories. 2021. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240025097> (accessed on 11 March 2024).
18. Cobiac, L.J.; Vos, T.; Veerman, J.L. Cost-Effectiveness of Interventions to Reduce Dietary Salt Intake. *Heart* 2010, 96, 1920–1925. <https://doi.org/10.1136/hrt.2010.199240>.
19. Murray, C.J.; Lauer, J.A.; Hutubessy, R.C.; Niessen, L.; Tomijima, N.; Rodgers, A.; Lawes, C.M.; Evans, D.B. Effectiveness and Costs of Interventions to Lower Systolic Blood Pressure and Cholesterol: A Global and Regional Analysis on Reduction of Cardiovascular-Disease Risk. *Lancet* 2003, 361, 717–725.
20. Rubinstein, A.; García Martí, S.; Souto, A.; Ferrante, D.; Augustovski, F. Generalized Cost-Effectiveness Analysis of a Package of Interventions to Reduce Cardiovascular Disease in Buenos Aires, Argentina. *Cost Eff. Resour. Alloc.* 2009, 7, 10.
21. Smith-Spangler, C.M.; Juusola, J.L.; Enns, E.A.; Owens, D.K.; Garber, A.M. Population Strategies to Decrease Sodium Intake and the Burden of Cardiovascular Disease. *Ann. Intern. Med.* 2010, 152, 481–487.
22. Miura, K.; Ando, K.; Tsuchihashi, T.; Yoshita, K.; Watanabe, Y.; Kawarazaki, H.; Matsuura, H.; Kusaka, M.; Kai, H.; Kawamura, M.; et al. [Scientific Statement] Report of the Salt Reduction Committee of the Japanese Society of Hypertension(2) Goal and Strategies of Dietary Salt Reduction in the Management of Hypertension. *Hypertens. Res.* 2013, 36, 1020–1025.
23. Hassan, F.A.; Minato, N. A System Dynamics Analysis of Malaysian Healthcare Resources. *Int. J. Jpn. Assoc. Manag. Syst.* 2017, 9, 61–69.
24. Hassan, F.A.; Minato, N. A Systems Thinking Analysis of Healthcare Supply and Demand Management. *Int. J. Jpn. Assoc. Manag. Syst.* 2019, 11, 103–110.
25. Ansah, J.P.; Matchar, D.B.; Love, S.R.; Malhotra, R.; Do, Y.K.; Chan, A.; Eberlein, R. Simulating the Impact of Long-Term

- Care Policy on Family Eldercare Hours. *Health Serv. Res.* 2013, 48 Pt 2, 773–791.
26. Karanfil, Ö. Dynamics of Medical Screening: A Simulation Model of PSA Screening for Early Detection of Prostate Cancer. *Systems* 2023, 11, 252.
 27. Homer, J.; Wile, K.; Yarnoff, B.; Trogdon, J.G.; Hirsch, G.; Cooper, L.; Soler, R.; Orenstein, D. Using Simulation to Compare Established and Emerging Interventions to Reduce Cardiovascular Disease Risk in the United States. *Prev. Chronic Dis.* 2014, 11, 140130.
 28. Ansah, J.P.; Wei, S.T.Y.; Min, T.L.S. An Evaluation of the Impact of Aggressive Diabetes and Hypertension Management on Chronic Kidney Diseases at the Population Level: A Simulation Analysis. *Syst. Dyn. Rev.* 2020, 36, 497–522.
 29. Ansah, J.P.; Islam, A.M.; Koh, V.; Ly, V.; Kol, H.; Matchar, D.B.; Loun, C.; Loun, M. Systems Modelling as an Approach for Understanding and Building Consensus on Non-Communicable Diseases (NCD) Management in Cambodia. *BMC Health Serv. Res.* 2019, 19, 2.
 30. Homer, J. PRISM: The Prevention Impacts Simulation Model. Reference Guide for Model Version 3s, For RTI International and CDC, Voorhees, NJ, May 2015. Available online: https://www.academia.edu/22881706/PRISM_The_Prevention_Impacts_Simulation_Model_Reference_Guide_for_Model_Version_3q (accessed on 12 September 2024)
 31. Kenealy, T.; Rees, D.; Sheridan, N.; Moffitt, A.; Tibby, S.; Homer, J. A “whole of System” Approach to Compare Options for CVD Interventions in Counties Manukau. *Aust. N. Z. J. Public Health* 2012, 36, 263–268.
 32. Ansah, J.P.; Inn, R.L.H.; Ahmad, S. An Evaluation of the Impact of Aggressive Hypertension, Diabetes and Smoking Cessation Management on CVD Outcomes at the Population Level: A Dynamic Simulation Analysis. *BMC Public Health* 2019, 19, 1105.
 33. George, A.; Badrinath, P.; Lacey, P.; Harwood, C.; Gray, A.; Turner, P.; Springer, D. Use of System Dynamics Modelling for Evidence-Based Decision Making in Public Health Practice. *Systems* 2023, 11, 247.
 34. Sugiyama, T.; Ikeda, N.; Minowa, K.; Nishi, N. Estimation of the Effect of Salt-Intake Reduction on Cardiovascular Mortality Decline between 1950 and 2017 in Japan: A Retrospective Simulation Study. *Nutrients* 2022, 14, 3747.
 35. Ventana System Inc. Vensim DSS 10.2.0. Available online: <https://vensim.com/software/> (accessed on 10 September 2024).
 36. Sterman, J.D. Learning in and about Complex Systems. *Syst. Dyn. Rev.* 1994, 10, 291–330.
 37. Sterman, J.D. *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*; Irwin McGraw-Hill: Boston, MA, USA, 2000.
 38. Hassan, F.A.; Minato, N. Smartphone-Based Healthcare Technology Adoption in Malaysian Public Healthcare Services. *Int. J. Jpn. Assoc. Manag. Syst.* 2018, 10, 95–104.
 39. 国立社会保障・人口問題研究所. 人口統計資料集 2024. Available online: https://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Popular/P_Detail2024.asp?fname=T04-01.htm (2024年7月26日アクセス).
 40. 厚生労働省. 人口動態調査 2012; 厚生労働省: 東京, 日本, 2012年. Available online: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00450011&tstat=000001028897> (2024年9月12日アクセス).
 41. Immigration Services Agency. Immigration Control Statistics in 2012; Immigration Services Agency: Tokyo, Japan, 2012 Year. (In Japanese)
 42. Brown, A.D.; Bolton, K.A.; Clarke, B.; Fraser, P.; Lowe, J.; Kays, J.; Hovmand, P.S.; Allender, S. System Dynamics Modelling to Engage Community Stakeholders in Addressing Water and Sugar Sweetened Beverage Consumption. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 2022, 19, 118.
 43. Ito, C.; Kurth, T.; Baune, B.T.; Brinks, R. Illness-Death Model as a Framework for Chronic Disease Burden Projection: Application to Mental Health Epidemiology. *Front. Epidemiol.* 2022, 2, 903652. <https://doi.org/10.3389/fepid.2022.903652>.
 44. NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). Worldwide trends in hypertension prevalence and progress in treatment and control from 1990 to 2019: A pooled analysis of 1,201 population-representative studies with 104 million participants. *Lancet* 2021, 398, 957–980. Available online: <https://www.ncdrisc.org/data-downloads-hypertension.html> (accessed on 5 July 2024).
 45. Yinusa, A.; Faezipour, M.; Faezipour, M.A. Study on CKD Progression and Health Disparities Using System Dynamics Modeling. *Healthcare* 2022, 10, 1628.

46. Struijk, E.A.; May, A.M.; Beulens, J.W.J.; de Wit, G.A.; Boer, J.M.A.; Onland-Moret, N.C.; van der Schouw, Y.T.; Bueno-de-Mesquita, H.B.; Hoekstra, J.; Peeters, P.H.M. Development of Methodology for Disability-Adjusted Life Years (DALYs) Calculation Based on Real-Life Data. *PLoS ONE* 2013, 8, e74294.
47. 厚生労働省. 医療給付実態調査. Available online: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00450389&tstat=000001044924&cycle=0&tclass1=000001044945&tclass2=000001064470&tclass3val=0> (2024年7月24日アクセス).
48. 厚生労働省. 平成30年度調剤医療費(電算処理分)の動向について. Available online: https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_06935.html (2024年7月24日アクセス).
49. 厚生労働省. 介護分野の最近の動向について. Available online: <https://www.mhlw.go.jp/content/12300000/01099975.pdf> (2024年8月20日アクセス).
50. 厚生労働省. 第2号被保険者にかかる介護保険料について. Available online: https://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/osirase/jigyo/18/dl/h30_hihokensha.pdf (2024年8月20日アクセス).
51. Ministry of Health, Labour and Welfare. Long-Term Care Insurance System. Available online: <https://www.mhlw.go.jp/content/12300000/00614772.pdf> (accessed on 24 July 2024).
52. Nishi, N. A System Dynamics Model of Salt Reduction at a National Level. In *Proceedings of the System Dynamics Society*, Cambridge, MA, USA, 21–25 July 2013.
53. 内閣府食育推進室. 食育に関する意識調査. Available online: <https://www.maff.go.jp/j/syokuiku/ishiki.html> (2024年3月18日アクセス).
54. Andrews, J.C.; Netemeyer, R.G.; Burton, S. The Nutrition Elite: Do Only the Highest Levels of Caloric Knowledge, Obesity Knowledge, and Motivation Matter in Processing Nutrition Ad Claims and Disclosures? *J. Public Policy Mark.* 2009, 28, 41–55. <https://doi.org/10.1509/JPPM.28.1.41>.
55. Collins, M.; Mason, H.; O'Flaherty, M.; Guzman-Castillo, M.; Critchley, J.; Capewell, S. An Economic Evaluation of Salt Reduction Policies to Reduce Coronary Heart Disease in England: A Policy Modeling Study. *Value Health* 2014, 17, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2014.03.1722>.
56. 日本総合研究所. 健康支出 (Health expenditure) における予防支出推計の改善に向けて「社会保障施策に要する経費」を用いた再推計. Available online: <https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/jrireview/pdf/13437.pdf> (2024年7月24日アクセス).
57. Jessen, N.; Damasceno, A.; Padrão, P.; Lunet, N. Levels of Salt Reduction in Bread, Acceptability and Purchase Intention by Urban Mozambican Consumers. *Foods* 2022, 11, 454.
58. Fanzo, J.; McLaren, R.; Bellows, A.; Carducci, B. Challenges and Opportunities for Increasing the Effectiveness of Food Reformulation and Fortification to Improve Dietary and Nutrition Outcomes. *Food Policy* 2023, 119, 102515.
59. 日本高血圧学会. JSH 減塩食品リスト掲載品の販売状況 2023. Available online: https://www.jpnsh.jp/data/salt_foodlist_sales.pdf (2024年3月11日アクセス).
60. Statistics Bureau of Japan. National Accounts. Available online: <https://www.e-stat.go.jp/en/stat-search?page=1&layout=normal&toukei=00100409&survey=gdp&metadata=1&data=1> (accessed on 18 March 2024).
61. National Institute of Population and Social Security Research. The Financial Statistics of Social Security in Japan. Available online: https://www.ipss.go.jp/site-ad/index_english/security-e.html (accessed on 11 March 2024).
62. 厚生労働省. 介護保険事業状況報告. Available online: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00450351&tstat=000001031648&cycle=8&tclass1=000001169206&tclass2val=0> (2024年8月20日アクセス).
63. Du, X.; Fang, L.; Xu, J.; Chen, X.; Bai, Y.; Wu, J.; Wu, L.; Zhong, J. The Association of Knowledge, Attitudes and Behaviors Related to Salt with 24-h Urinary Sodium, Potassium Excretion and Hypertensive Status. *Sci. Rep.* 2022, 12, 13901.
64. Ikeda, N.; Yamashita, H.; Hattori, J.; Kato, H.; Nishi, N. Economic Effects of Dietary Salt Reduction Policies for Cardiovascular Disease Prevention in Japan: A Simulation

- Study of Hypothetical Scenarios. *Front.Nutr.*2023, 10, 1227303.
65. Sterman, J.D. Appropriate Summary Statistics for Evaluating the Historical Fit of System Dynamics Models. *Dynamica* 1984, 10, 51–66. Available online: <https://systemdynamics.org/wp-content/uploads/assets/dynamica/volume-10/10-2/4.pdf> (accessed on 18 March 2024).
 66. Atella, V.; Piano Mortari, A.; Kopinska, J.; Belotti, F.; Lapi, F.; Cricelli, C.; Fontana, L. Trends in Age-related Disease Burden and Healthcare Utilization. *Aging Cell* 2019, 18, e12861.
 67. World Health Organization. Reducing Salt Intake in Population. Report of a WHO Forum and Technical Meeting, Paris, France, 5–7 October 2006. Available online: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/43653/9789241595377_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed on 20 August 2024).
 68. World Health Organization. The SHAKE Technical Package for Salt Reduction; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2016.
 69. Iso, H. A Japanese Health Success Story: Trends in Cardiovascular Diseases, Their Risk Factors, and the Contribution of Public Health and Personalized Approaches. *EPMA J.*2011, 2, 49–57.
 70. Miura, K. Epidemiology and Prevention of Hypertension in Japanese: How Could Japan Get Longevity? *EPMA J.*2011, 2, 59–64.
 71. Lackland, D.T.; Carey, R.M.; Conforto, A.B.; Rosendorff, C.; Whelton, P.K.; Gorelick, P.B. Implications of Recent Clinical Trials and Hypertension Guidelines on Stroke and Future Cerebrovascular Research. *Stroke* 2018, 49, 772–779.
 72. Wang, M.; Moran, A.E.; Liu, J.; Coxson, P.G.; Penko, J.; Goldman, L.; Bibbins-Domingo, K.; Zhao, D. Projected Impact of Salt Restriction on Prevention of Cardiovascular Disease in China: A Modeling Study. *PLoS ONE* 2016, 11, e0146820.
 73. Bibbins-Domingo, K.; Chertow, G.M.; Coxson, P.G.; Moran, A.; Lightwood, J.M.; Pletcher, M.J.; Goldman, L. Projected Effect of Dietary Salt Reductions on Future Cardiovascular Disease. *N. Engl. J. Med.*2010, 362, 590–599.
 74. World Health Organization. WHO Salt Reduction; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2020. Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/salt-reduction> (accessed on 11 March 2024).
 75. Homer, J.B.; Hirsch, G.B. System Dynamics Modeling for Public Health: Background and Opportunities. *American Journal of Public Health* 2006, 96, 3, 452–458.

図表

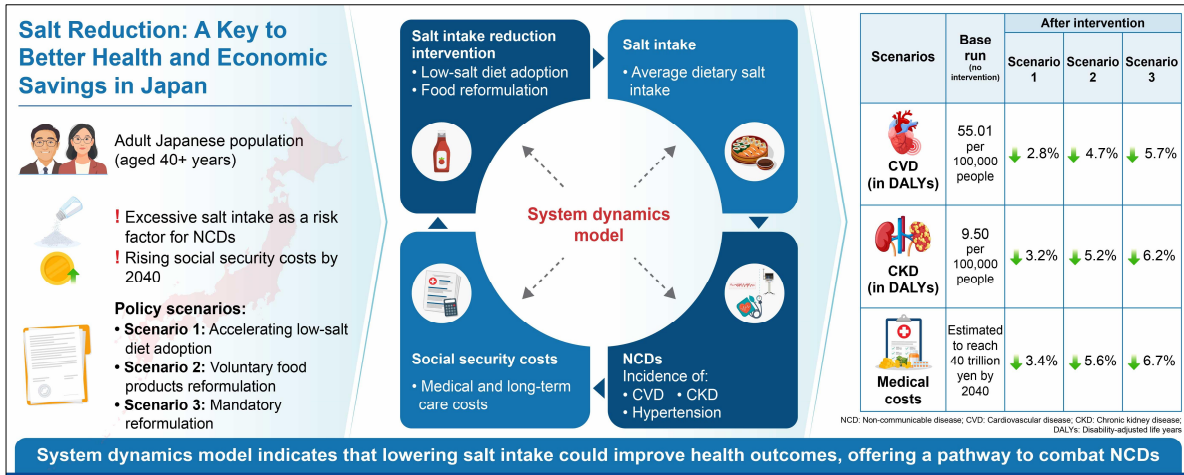


図 1. 本研究の目的の概要図

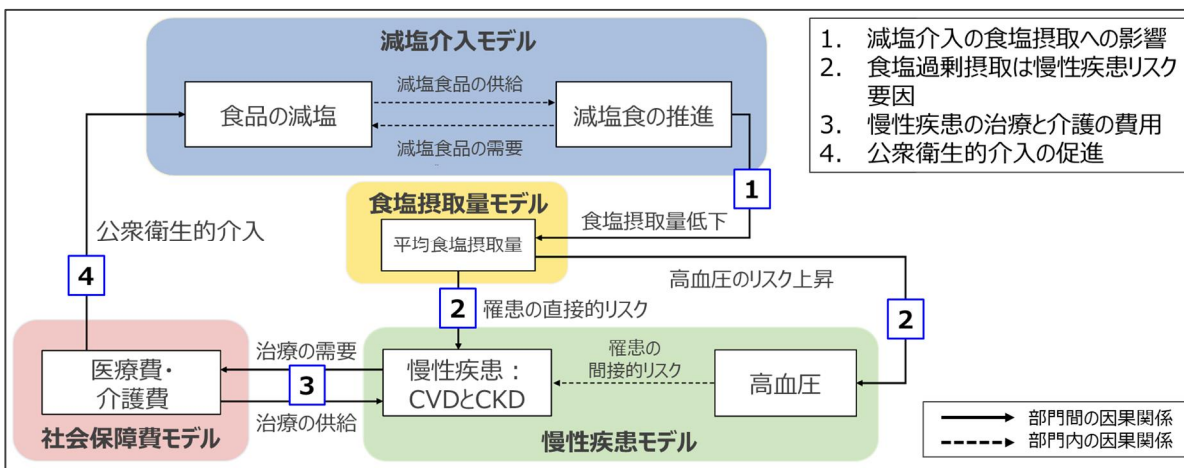


図 2. 減塩介入による健康および経済効果を評価するためのシステム・ダイナミクス・シミュレーションモデルの概念的枠組み。実線矢印はセクター間の因果関係を、破線の矢印はセクター内の因果関係を示す。CKD, chronic kidney disease; CVD, cardiovascular disease; NCD, noncommunicable disease.

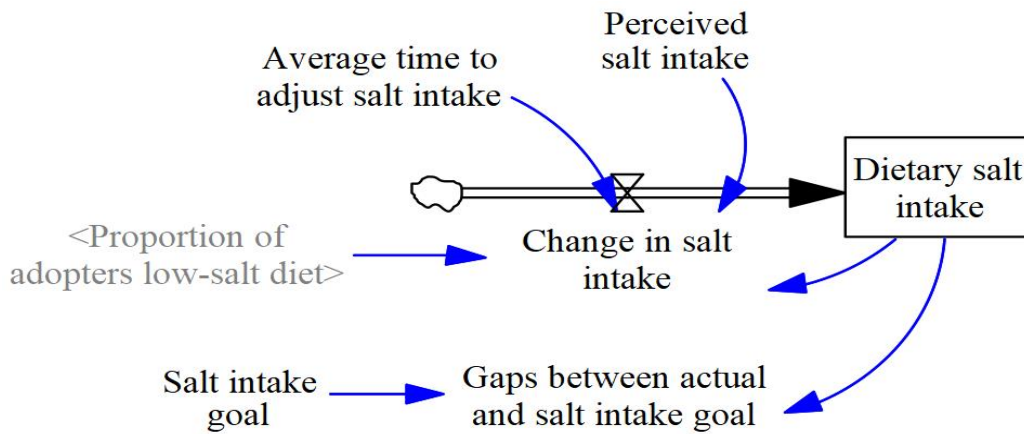


図4. 食塩摂取モデルのストック図とフロー図。グレーのフォントで示されたシャドー変数は、モデルの他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの発生源を示している。パイプ（二重矢印）は、ストック（長方形）の価値を変えるフローを示す。パイプの途中にあるバルブがフローをコントロールする。青矢印は、システム内の要素間のリンクを示す。

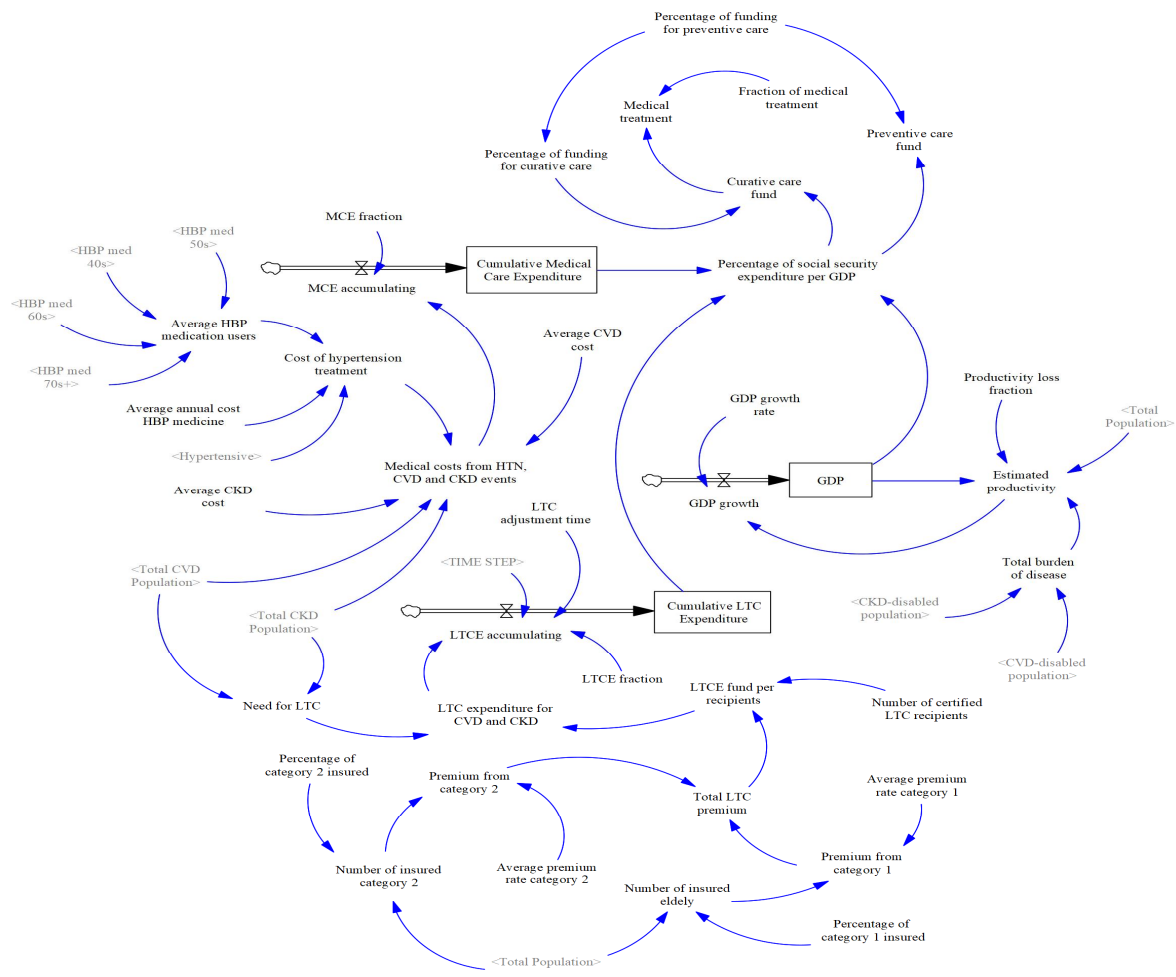


図5. 社会保障支出モデルのストック図とフロー図。グレーのフォントで示されたシャドー変数は、モデルの他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの発生源を示している。パイプ（二重矢印）は、ストック（長方形）の価値を変えるフローを示す。パイプの途中にあるバルブがフローをコントロールする。青矢印は、システム内の要素間のリンクを示す。

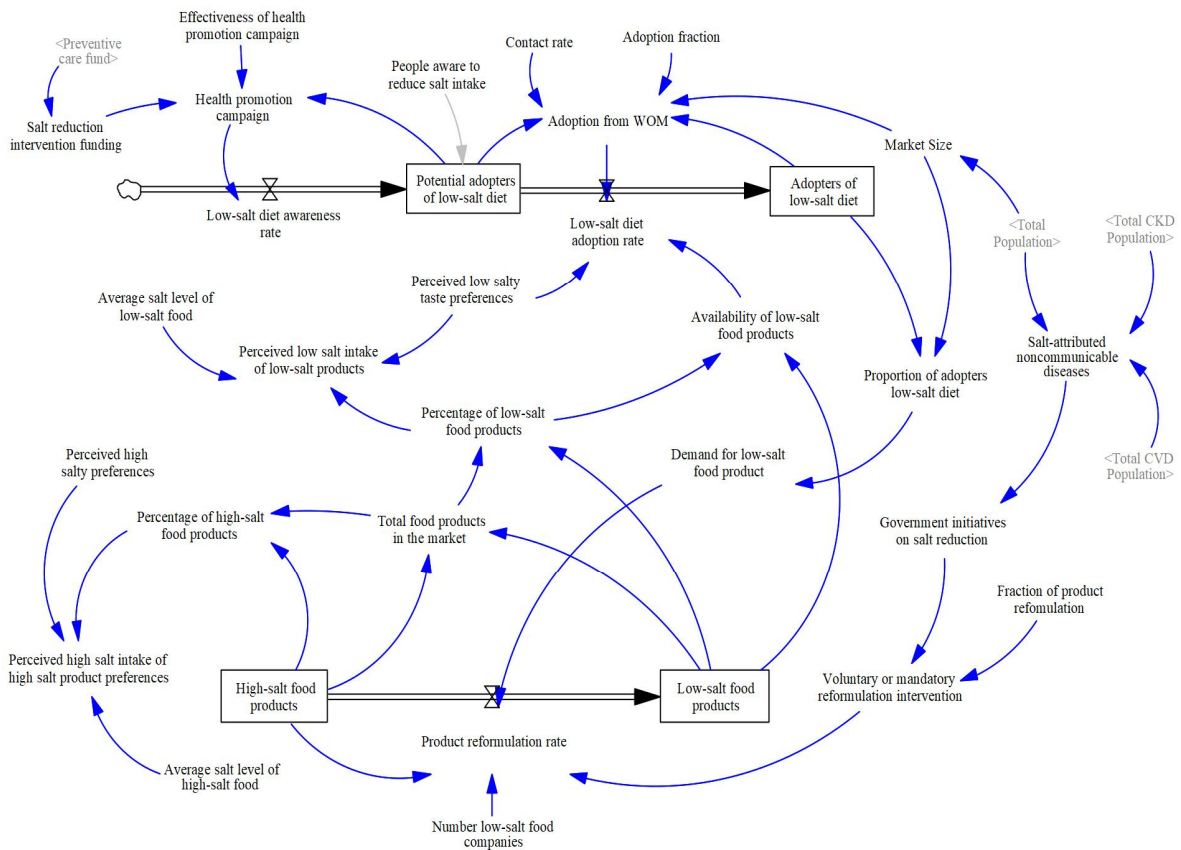
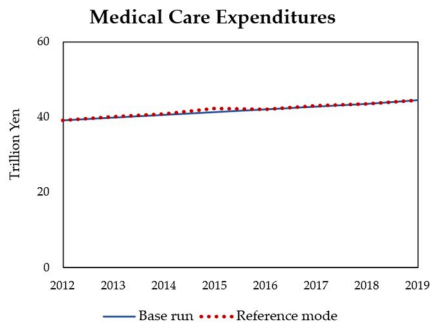
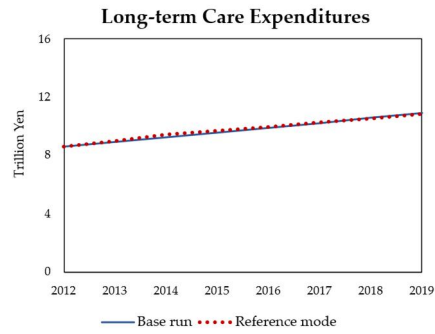


図6. 減塩介入セクターのストック図とフロー図。CKD は慢性腎臓病、CVD は循環器疾患、WOM は口コミ。グレーのフォントで示されたシャドー変数は、モデルの他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの発生源を示している。パイプ（二重矢印）は、ストック（長方形）の価値を変えるフローを示す。パイプの途中にあるバルブがフローをコントロールする。青矢印は、システム内の要素間のリンクを示す。

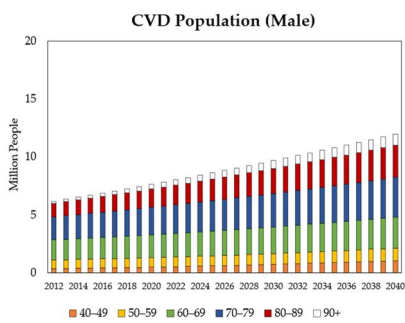


(a)

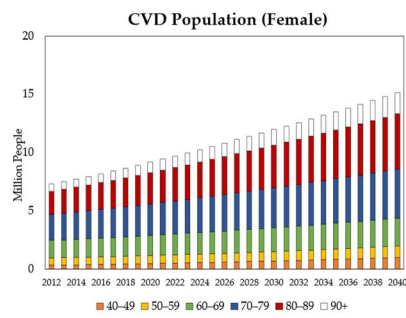


(b)

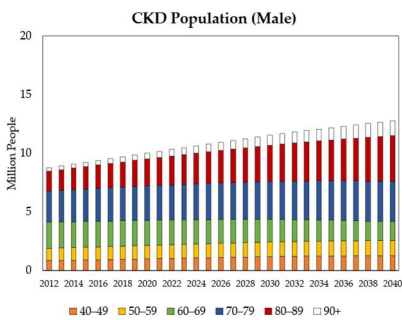
図7. シミュレーションモデルによって推定されたベースランの結果と医療費ならびに介護費の実値との比較 (2012~2019年) [4,61]。 (a) 医療費、 (b) 介護費。



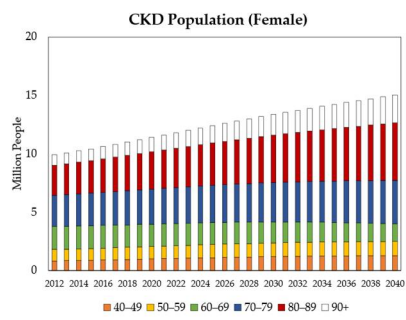
(a)



(b)



(c)



(d)

図8. システム・ダイナミクス・シミュレーションモデルにより予測された、減塩介入を行わない場合のCVDとCKDの患者数(2012年から2040年までの日本における10歳ごとの年齢群および性別によるシミュレーション)。(a) CVDの男性集団、(b) CVDの女性集団、(c) CKDの男性集団、(d) CKDの女性集団。CKD, chronic kidney disease; CVD, cardiovascular disease.

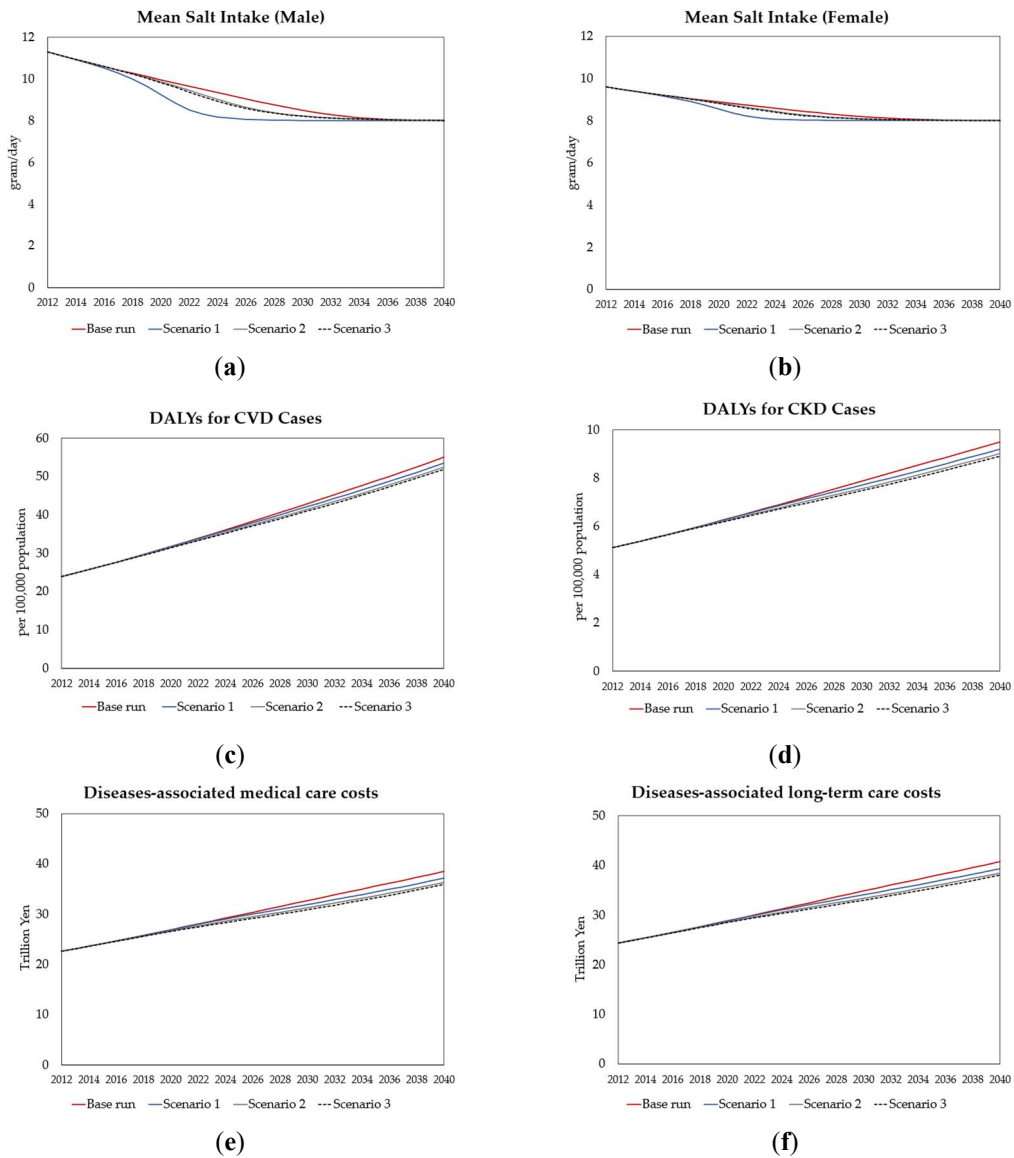


図9. 介入シナリオ案のシミュレーション結果。(a)男性の平均食塩摂取量、(b)女性の平均食塩摂取量、(c)CVD 症例の DALY、(d)CKD 症例の DALY、(e)疾患関連医療費、(f)疾患関連介護費。シナリオ1：減塩食の普及促進、シナリオ2：自主的な成分変更、シナリオ3：義務的な成分変更。CKD, chronic kidney disease; CVD, cardiovascular disease; DALYs, disability-adjusted life years.

表1. ベースラン設定の主要パラメータと初期条件のリスト

パラメータ	初期値	単位	ソース
1日あたりの平均食塩摂取量 (男性)	11.3	グラム	[11]
1日あたりの平均食塩摂取量 (女性)	9.6	グラム	[11]
1日あたりの食塩摂取目標量	8	グラム	[8]
低塩食品の数	34	製品	[59]
低塩食品企業の数	12	無次元	[59]
健康増進キャンペーン	0.02	無次元	[55]
減塩を意識する人々	94,998,675	人	[53]
国内総生産	4,994,239	億円	[60]
予防医療費の割合	0.3	無次元	[56]
国民医療費	392,117	億円	[4]
血圧の薬代	36,500	円	[48]
循環器疾患の平均費用	721,164	円	[47]
腎臓病の平均費用	678,086	円	[47]
長期介護費用	8,641,640	百万円	[61]
平均保険料カテゴリー 1	59,664	円	[49]
平均保険料カテゴリー 2	56,366	円	[50]
カテゴリー 1 被保険者の割合	0.243	無次元	[62]
カテゴリー 2 被保険者の割合	0.335	無次元	[50]
認定長期介護受給者の数	5,611,000	人	[62]

JPY は日本円 ; LTC は長期介護

表2. シナリオ分析の前提

シナリオ	政策介入変数	
	減塩食採用率	製品改質率
基本実行	0.02	0.05
シナリオ 1	0.12 [63]	該当なし
シナリオ 2	該当なし	0.15 [55,64]
シナリオ 3	該当なし	0.20 [55,64]

シナリオ 1 : 減塩食の導入加速、シナリオ 2 : 自主的な成分変更、シナリオ 3 : 義務的な成分変更。

表3. モデルの統計的検証の結果

パラメータ	R ²	MAE	RMSE	ザイル不平等統計		
				U ^m	U ^s	U ^c
医療費	0.959	0.250	0.401	0.271	0.004	0.725
長期介護費用	0.992	0.067	0.091	0.295	0.156	0.549

R²、決定係数 ; MAE、平均絶対誤差 ; RMSE、平均二乗誤差 ; U^m、バイアス ; U^s、分散比 ; U^c、共分散比率。

表4. システム・ダイナミクス・シミュレーションモデルにより予測される、2040年における日本の40歳以上の集団の循環器疾患および慢性腎臓病による障害調整生存年数（人口10万人当たり）と、これらの疾患に関連する医療・介護支出

結果変数	シナリオ			
	基本実行	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
循環器疾患による障害調整生存年数	55.01 (該当なし)	53.48 (-2.78%)	52.43 (-4.69%)	51.87 (-5.70%)
慢性腎疾患による障害調整生存年数	9.50 (該当なし)	9.20 (-3.15%)	9.01 (-5.15%)	8.91 (-6.19%)
疾患に関連する医療費、兆円	38.50 (該当なし)	37.17 (-3.46%)	36.34 (-5.62%)	35.91 (-6.73%)
疾患に関連する長期介護費用、兆円	40.76 (該当なし)	39.38 (-3.40%)	38.51 (-5.53%)	38.06 (-6.64%)

括弧内の数字は、基本実行に対する変化を示している。NA、該当なし。シナリオ1：低塩食の採用促進；シナリオ2：シナリオ3：強制的な改質。

補足：日本における非感染性疾患予防のための減塩介入の健康および経済効果に関するシステムダイナミクス・シミュレーション研究

補足資料 S1. システムダイナミクス・モデル

システムダイナミクス・モデルは、広範な実証データに基づいて導出された微分方程式および代数方程式によって数学的に表現される[75]。これらの方程式は、ストックの蓄積およびネットフローの統合を記述する。ストックとフローの一般的な数学的表現は以下の式 (S1~S4) によって示される。ストック方程式は、ある時点におけるストックの値が、初期値と流入・流出の差分（純増減）によって決定されることを示す。つまり、式 (S2) は特定の期間におけるストックの変化量を計算する。流入が流出を上回る場合、ストックは増加し、逆であれば減少する。式 (S3) は、ストックに対する流入率が現在のストック水準および他の要因によりどのように変動するかを示し、式 (S4) は、ストックからの流出率が同様の要因によりどのように決定されるかを表している。

$$Stock(\tau) = Stock(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} [Inflow(\tau) - Outflow(\tau)] dt \quad (S1)$$

$$Net\ change\ flow = Inflow(\tau) - Outflow(\tau) \quad (S2)$$

$$Inflow(\tau) = f(Stock(\tau), X(\tau)) \quad (S3)$$

$$Outflow(\tau) = g(Stock(\tau), X(\tau)) \quad (S4)$$

ここで、 $Stock(\tau)$ は時点 τ におけるストックの蓄積量、 $Stock(t_0)$ は初期時点 t_0 におけるストック量、 $Inflow(\tau)$ および $Outflow(\tau)$ はストックへの流入および流出の速度を表す。 f は補助変数 $X(\tau)$ を含むストックに依存した流入関数、 g は流出関数である。

補足資料 S2. 全国版モデルに使用したデータ

以下の表は、システムダイナミクス・モデルにおいて初期パラメータ値およびモデルの較正に使用されたデータを示している。

表 S1. 2012 年における年齢階級・性別ごとの人口（単位：千人）【5】

年齢階級（歳）	男性（千人）	女性（千人）
<40	27,125	26,044
40-49	8,914	8,760
50-59	7,789	7,843
60-69	8,960	9,492
70-79	6,178	7,470
80-89	2,729	4,682
≥90	333	1,194

表 S2. 2012 年における年齢階級別の死亡および移動【40, 41】

年齢階級（歳）	死亡数[40]	死亡率 (%/年)	移動数[41]	移動率 (%/年)
<40	23,639	1.854×10^{-4}	-41,256	-3.235×10^{-4}
40-49	25,765	2.021×10^{-4}	-21,719	-1.703×10^{-4}
50-59	58,350	4.576×10^{-4}	-11,125	-8.724×10^{-5}
60-69	155,479	1.219×10^{-3}	-3,593	-2.818×10^{-5}
70-79	286,048	2.243×10^{-3}	-770	-6.039×10^{-6}
80-89	410,567	3.220×10^{-3}	-140	-1.098×10^{-6}
≥90	291,451	2.286×10^{-3}	-202	-1.584×10^{-6}

※死亡率および移動率は、2012 年の総人口を分母として計算。

表 S3. 2012～2019 年の総人口、出生数および出生率【5, 39】

年	総人口（千人）[5]	出生数[39]		出生率（人口千人当り）	
		男児	女児	男児	女児
2012	127,515	531,781	505,451	4.170	3.964
2013	127,298	527,657	502,160	4.145	3.945
2014	127,083	515,572	488,037	4.057	3.840
2015	127,095	515,468	490,253	4.056	3.857
2016	126,933	502,012	475,230	3.955	3.744
2017	126,706	484,478	461,668	3.824	3.644
2018	126,443	470,851	447,549	3.724	3.540
2019	126,167	443,430	421,809	3.515	3.343

※出生率は、男児（または女児）の出生数をその年の総人口で除して算出。

表 S4. 2012 年における日本の年齢階級・性別の高血圧、循環器疾患（CVD）、および慢性腎臓病（CKD）の有病率

年齢階級（歳）	男性			女性		
	高血圧[44]	CVD [3]	CKD [3]	高血圧[44]	CVD [3]	CKD [3]
40-49	3,565,369	357,628	815,648	2,156,610	342,532	834,439
50-59	3,115,398	765,641	1,055,687	1,930,855	631,445	976,544
60-69	3,583,768	1,732,074	2,246,791	2,336,820	1,491,468	1,970,781
70-79	2,471,040	1,985,053	2,653,200	1,839,027	2,230,856	2,676,593
80-89	1,091,529	1,153,035	1,693,770	1,152,654	1,971,691	2,573,653
≥90	133,191	189,887	295,152	293,949	638,516	886,467

表 S5. 2012 年における日本の年齢階級・性別の循環器疾患による死亡数、損失生存年（YLL）、および障害生存年（YLD）【3】

年齢階級 (歳)	男性			女性		
	死亡	生存損失年	障害生存年数	死亡	生存損失年	障害生存年数
40-49	4,048	181,785	26,842	1,282	57,514	19,319
50-59	9,145	322,075	55,701	2,751	97,110	33,362
60-69	22,899	603,649	118,422	8,049	210,362	74,380
70-79	40,023	701,952	136,793	22,950	395,590	107,881
80-89	58,613	659,789	92,478	65,762	713,950	114,551
≥90	22,487	189,189	17,629	71,770	595,737	47,972

表 S6. 2012 年における日本の年齢階級・性別別の慢性腎臓病による死亡数、損失生存年（YLL）、および障害生存年（YLD）【3】

年齢階級 (歳)	男性			女性		
	死亡	生存損失年	障害生存年数	死亡	生存損失年	障害生存年数
40-49	207	9,269	10,108	91	4,100	8,106
50-59	674	23,585	16,905	251	8,794	12,631
60-69	2,340	61,351	32,422	995	25,969	24,189
70-79	4,987	87,340	35,199	3,039	52,284	28,907
80-89	8,337	93,477	23,073	8,572	92,998	27,831
≥90	3,465	29,112	6,283	8,458	70,212	16,568

表 S7. 2012 年における日本の年齢階級・性別の循環器疾患による平均生存損失年および障害ウェイト

年齢階級 (歳)	男性		女性	
	平均生存損失年	障害ウェイト	平均生存損失年	障害ウェイト
40-49	44.91	0.075	44.86	0.056
50-59	35.22	0.073	35.30	0.053
60-69	26.36	0.068	26.14	0.050
70-79	17.54	0.069	17.24	0.048
80-89	11.26	0.080	10.86	0.058
≥90	8.41	0.093	8.30	0.075

※平均生存損失年は、循環器疾患による損失生存年を同疾患による死亡数で割って算出している。障害ウェイトは、循環器疾患による障害生存年を同疾患の有病数で割って算出している。

表 S8. 2012 年における日本の年齢階級・性別の慢性腎臓病による平均生存損失年および障害ウェイト

年齢階級 (歳)	男性		女性	
	平均生存損失年	障害ウェイト	平均生存損失年	障害ウェイト
40-49	44.78	0.012	45.05	0.010
50-59	34.99	0.016	35.04	0.013
60-69	26.22	0.014	26.10	0.012
70-79	17.51	0.013	17.20	0.011
80-89	11.21	0.014	10.85	0.011
≥90	8.40	0.021	8.30	0.019

※平均生存損失年は、慢性腎臓病による損失生存年を同疾患による死亡数で割って算出している。障害ウェイトは、慢性腎臓病による障害生存年を同疾患の有病数で割って算出している。

表 S9. 医療費および介護費の検証に使用した値 (2012～2019 年)

年	医療費 (億円) [4]	介護費 (百万円) [61]
2012	392,117	8,641,640
2013	400,610	9,019,096
2014	408,071	9,470,099
2015	423,644	9,700,356
2016	421,381	9,958,681
2017	430,710	10,278,244
2018	433,949	10,564,893
2019	443,895	10,892,132

補足資料 S3. 年齢鎖モデル

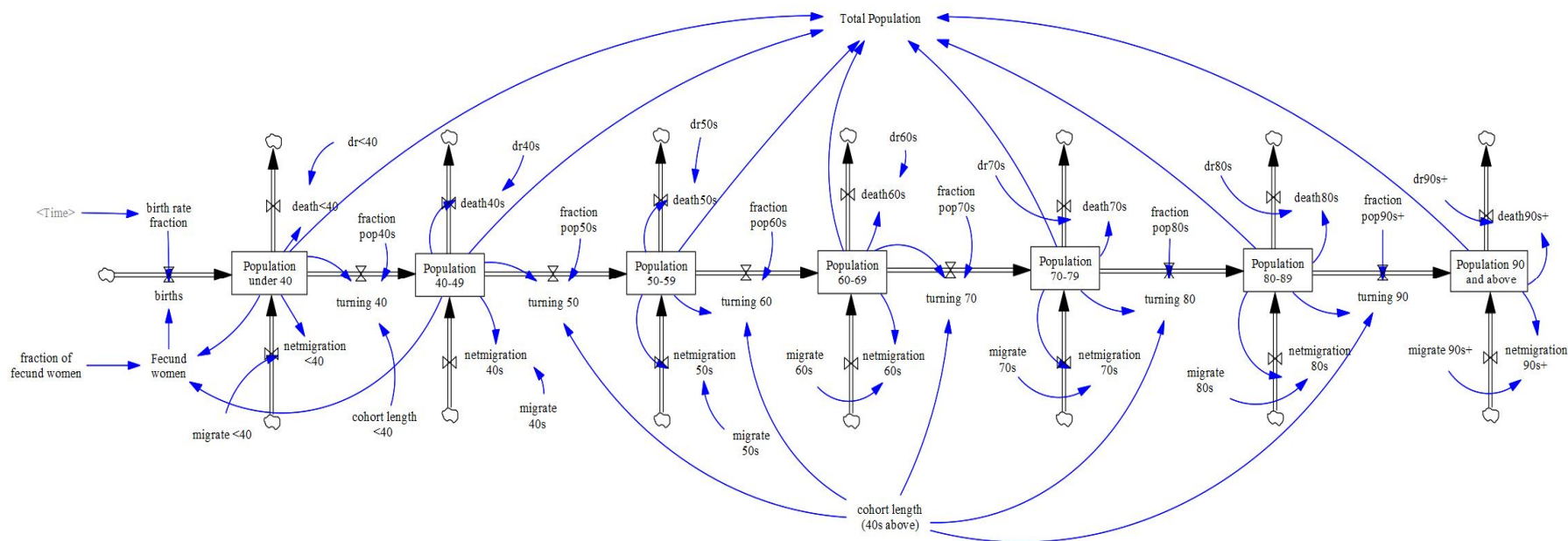


図 S1 : 人口モデルのストック・フローダイアグラム

グレーの文字で示されたシャドウ変数は、モデル内の他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの出入り口を示している。パイプ（二重矢印）はストック（四角）の値を変化させるフローを示し、パイプ中央のバルブはフローの制御を表す。青い矢印は、システム内の要素間の関係を示す。「<40」は40歳未満、「40s」は40～49歳、「50s」は50～59歳、「60s」は60～69歳、「70s」は70～79歳、「80s」は80～89歳、「90s+」は90歳以上の個人を表す。drは死亡率（death rate）、popは人口（population）を示す。

※モデルの詳細な説明は本文の「2.4.1 一般人口モデル」に記載されている。

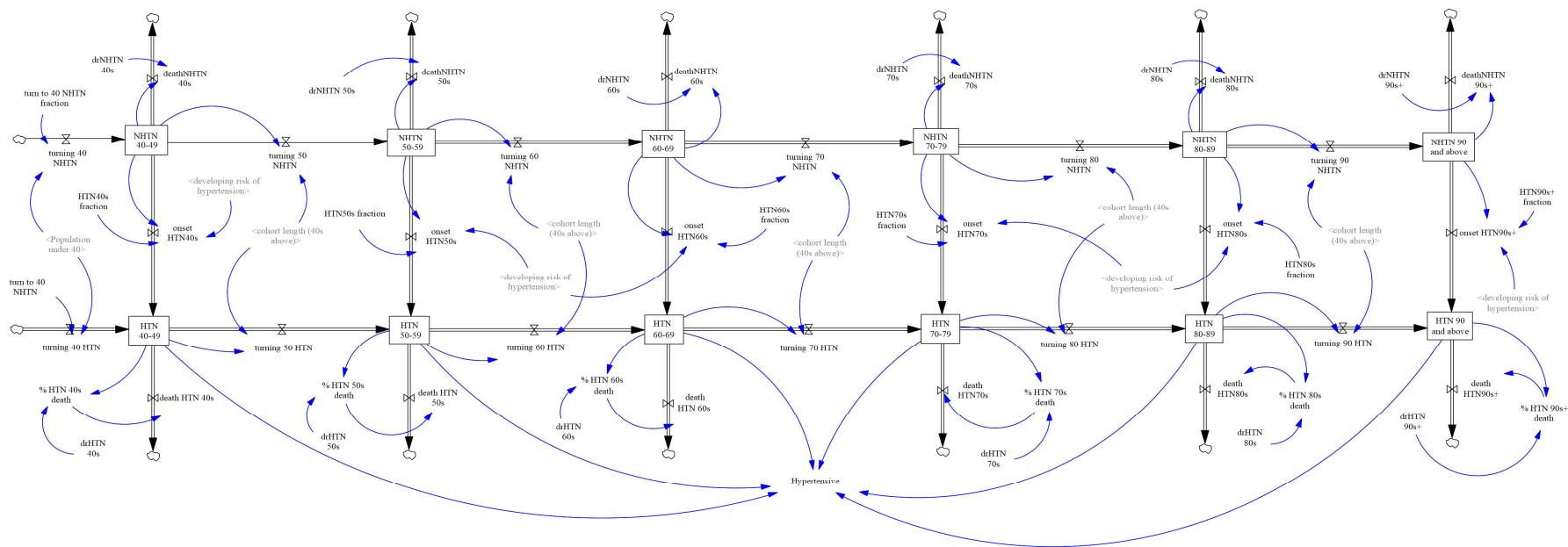


図 S2 : 高血圧サブモデルのストック・フローダイアグラム

グレーの文字で示されたシャドウ変数は、モデル内の他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの出入り口を示している。パイプ（二重矢印）はストック（四角）の値を変化させるフローを示し、パイプ中央のバルブはフローの制御を表す。青い矢印は、システム内の要素間の関係を示す。「<40>」は40歳未満、「40s」は40～49歳、「50s」は50～59歳、「60s」は60～69歳、「70s」は70～79歳、「80s」は80～89歳、「90s+」は90歳以上の個人を表す。dr は死亡率（death rate）、HTN は高血圧者（hypertensive）、NHTN は正常血圧者（normotensive）を表す。

※モデルの詳細な説明は本文の「2.4.3 非感染性疾患モデル：高血圧サブモデル」に記載されている。

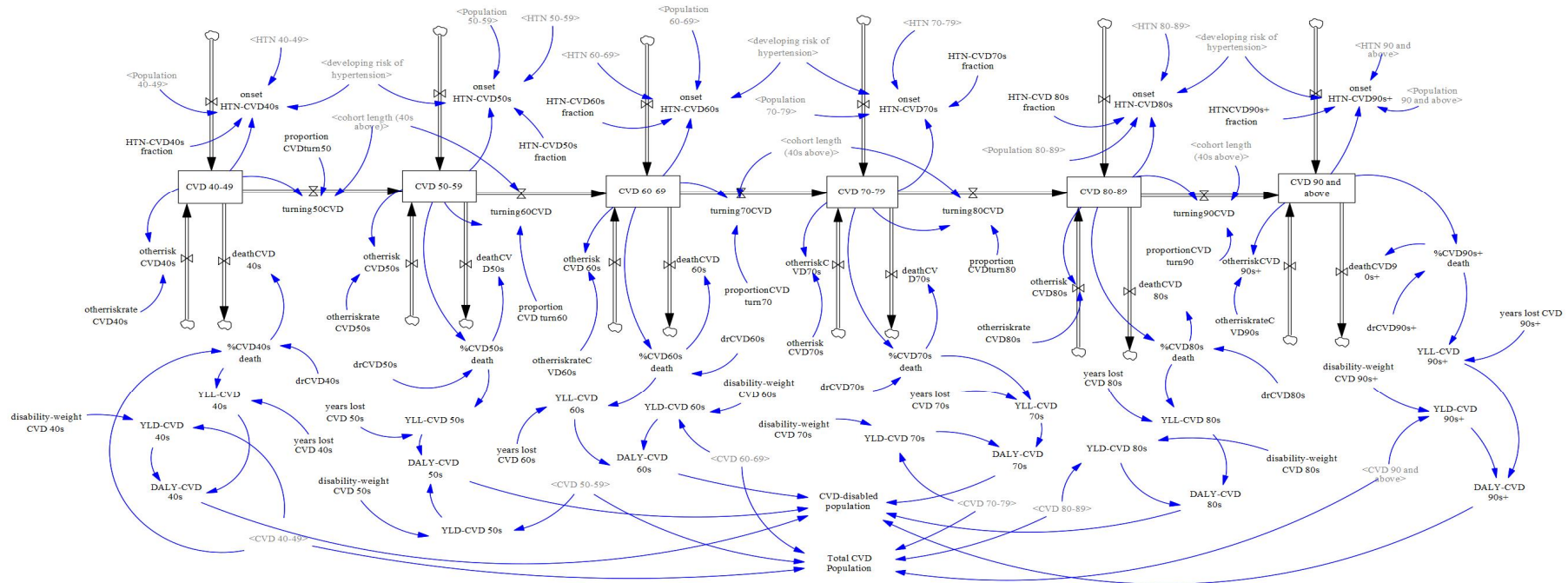


図 S3 : 循環器疾患サブモデルのストック・フローダイアグラム

グレーの文字で示されたシャドウ変数は、モデル内の他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの出入り口を示している。パイプ（二重矢印）はストック（四角）の値を変化させるフローを示し、パイプ中央のバルブはフローの制御を表す。青い矢印は、システム内の要素間の関係を示す。「<40」は40歳未満、「40s」は40～49歳、「50s」は50～59歳、「60s」は60～69歳、「70s」は70～79歳、「80s」は80～89歳、「90s+」は90歳以上の個人を表す。drは死亡率（death rate）、CVDは循環器疾患（cardiovascular disease）、DALYは障害調整生存年（disability-adjusted life years）、HTNは高血圧者（hypertensive）、YLDは障害生存年（years lived with disability）、YLLは損失生存年（years of life lost）を表す。

※モデルの詳細な説明は本文の「2.4.3 非感染性疾患モデル：循環器疾患サブモデル」に記載されている。

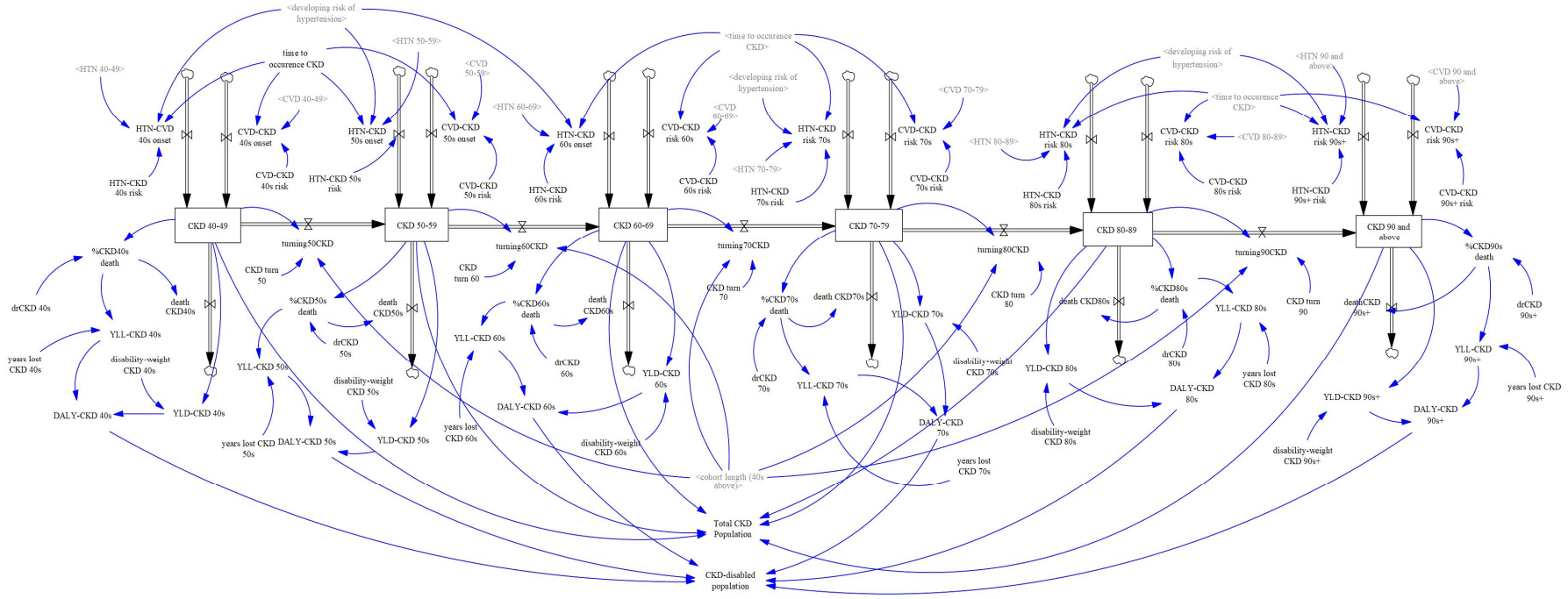


図 S4：慢性腎臓病サブモデルのストック・フローダイアグラム

グレーの文字で示されたシャドウ変数は、モデル内の他の場所に現れる元の変数を表す。雲のようなアイコンは、モデル外のフローの出入り口を示している。パイプ（二重矢印）はストック（四角）の値を変化させるフローを示し、パイプ中央のバルブはフローの制御を表す。青い矢印は、システム内の要素間の関係を示す。「<40>」は40歳未満、「40s」は40～49歳、「50s」は50～59歳、「60s」は60～69歳、「70s」は70～79歳、「80s」は80～89歳、「90s+」は90歳以上の個人を表す。drは死亡率（death rate）、CKDは慢性腎臓病（chronic kidney disease）、DALYは障害調整生存年（disability-adjusted life years）、HTNは高血圧者（hypertensive）、YLDは障害生存年（years lived with disability）、YLLは損失生存年（years of life lost）を表す。
 ※モデルの詳細な説明は本文の「2.4.3 非感染性疾患モデル：慢性腎臓病サブモデル」に記載されている。