

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

都道府県版シミュレーションモデルの作成

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 杉山雄大 国立健康危機管理研究機構 国立国際医療研究所 糖尿病情報センター
研究分担者 三浦克之 滋賀医科大学 NCD 疫学研究センター
研究代表者 池田奈由 医薬基盤・健康・栄養研究所 栄養疫学・政策研究センター
研究協力者 高橋 裕 専修大学 商学部
研究協力者 五領田小百合 山形大学 農学部

研究要旨

食塩の過剰摂取は血圧を上昇させるため、高齢化が進む社会では特に食塩摂取量の継続的な把握と管理が不可欠である。本研究は、我が国における食塩摂取量の削減が、高血圧の有病者数および外来医療費に及ぼす影響を評価することを目的とした。全国および47都道府県を対象として、食塩摂取量、人口、高血圧有病者数、高血圧医療費に関するサブモデルをもとに、システムダイナミクスによるシミュレーションモデルを構築した。食塩含有量の高い食品と低い食品、および食塩摂取量の多い人々と少ない人々をそれぞれ対象とするストック・フロー図の並行流を構築し、20歳以上の1日当たり食塩摂取量の平均値を算出した。人口および高血圧有病者数については、男女別に40～79歳を対象として10歳ごとの加齢連鎖モデルを構築した。性別年齢階級別に得られた高血圧有病者数をもとに、高血圧外来医療費を算出した。2012年から2023年の政府統計を用いてモデルのパラメータを較正し、全国モデルを構築した。さらに、2012年における各都道府県の食塩摂取量および高血圧者割合の全国との差をもとに、全国モデルを偏位させて各都道府県のモデルを構築した。シミュレーションにより推計された変化を各シナリオ間で比較した。その結果、2012年から2040年までの基本シミュレーション結果では、高食塩食品を46.3%削減し、高食塩摂取者を33.1%減少させることで、食塩摂取量は10.1g/日から8.7g/日へと13.9%減少するものと推計された。2040年までに食塩摂取量が6.9g/日に減少する場合、男性では高血圧の有病者数および外来医療費がそれぞれ2.3%および2.0%減少し、女性ではそれぞれ8.8%および8.3%減少すると推計された。シナリオ別の推計により、高食塩食品および高食塩摂取者の両者の割合を減らすことで高血圧の有病者数および外来医療費が最も減少することが示唆された。都道府県別モデルにおいても、シミュレーションによる同様の変化が示された。本シミュレーションモデルは、全国および各都道府県の政策立案者が、医療費削減を目的とした減塩施策を推進する際に有用な示唆を与えられらる。

A. 目的

国民健康・栄養調査[1,2]によると、我が国の20歳以上における1日当たり食塩摂取量の平均値は減少している。しかし、食塩摂取量は2024年時点でも9.6gと依然として高く[3]、世界保健機関(WHO)の推奨値(5g未満)[4]および日本人の食事摂取基準(男性7.5g未満、女性6.5g未満)[5]を上回っている。我が国における食塩摂取量の約70%は、しょうゆや味噌などの一般的な調味料に起因している[2]。したがって、個人の食習慣だけでなく、食環境も改善することが重要である。近年、我が国では「健康的で持続可能な食環境戦略イニシアチブ」や「健康日本

21(第三次)」をはじめとする、減塩を目的としたさまざまな取組が実施されている[6-8]。

食塩の過剰摂取は血圧を上昇させるため、高齢化が進む社会では特に食塩摂取量の継続的な把握と管理により、高血圧、ひいては心血管疾患を予防する必要がある[9]。高血圧の有病割合は低下傾向にあるものの、我が国では依然として約40～60%と高水準にある[10]。2023年の推計によると、1,600万人が高血圧の治療を受けており[11]、高血圧治療には1.7兆円が費やされる見込みで、これは2022年の総医療費46.7兆円の3.6%に相当する[12]。しかし、我が国における

高血圧の管理率は低く、米国が 50～60%であるのに対し、我が国では 20～30%にとどまっている [10]。減塩をはじめとする高血圧の予防により、効果的な高血圧管理を実施する必要がある。

シミュレーション研究は、慢性疾患に対する公衆衛生介入の有効性を示すうえで有用である [13]。システムダイナミクスはシミュレーション手法の一つであり、慢性疾患予防のモデル化に用いられている [14]。米国における心血管疾患の上流・下流予防をモデル化した「予防影響シミュレーションモデル」(PRISM) [15,16] のシミュレーターは、地方自治体が政策介入を選択し、その結果として生じる変化を確認できる形で提供されている (<https://prism-simulation.cdc.gov/app/cdc/prism/#/>)。系統的レビュー[14]には、わが国における糖尿病性腎症の予防をモデル化した 1 件の論文[17]が含まれていた。システムダイナミクスは、我が国における減塩介入の健康および経済への影響をモデル化するためにも用いられている [18]。これらの全国モデルを用いたシステムダイナミクス研究に基づき、減塩が高血圧の有病者数および外来医療費に及ぼす影響を検討するため、全国および都道府県別のモデルを構築した。

B. 研究方法

1. 全国モデルの開発

全国のシステムダイナミクスモデルは、食塩摂取量、人口、高血圧有病者数、高血圧医療費の 4 つのサブモデルをもとに構築した。食塩摂取量サブモデルは、20 歳以上の固定された仮想人口および固定された数の食品を対象に構築した。固定された仮想人口を用いる理由は、共通のパラメータを都道府県別モデルに適用し、高血圧有病者数サブモデルで他のパラメータを較正するためである。簡略化のため、食品の総数と総人口は小数点以下の値を含めても構わないという条件のもと、それぞれ 1,000 食品、10 万人とした。人口、高血圧有病者数、および高血圧医療費のサブモデルは、政府統計値を参照データとして、パラメータをサブモデルごとに順に較正した。本モデルは Vensim Professional 10.2.0 (Ventana Systems Inc., Harvard, MA, USA) [19] を用いて構築した。時間の単位は年とし、開始時間、終了時間、および時間ステップをそれぞれ 2012 年、2040 年、および 0.0625 年に設定した。

1.1 食塩摂取量サブモデル

固定された仮想人口と固定された食品数に基づいて、2 つのストック・フロー図を並行流として食塩摂取量のサブモデルを構築した (図 1) [20]。まず、高食塩と低食塩の 2 種類の食品に関するストックを設定し、これらをフローで接続した。また、食塩摂取量が多い人々と少ない人々の 2 つのストックを設定し、これらをフローで接続した。これらのフローは、1 日の食塩摂取量の長期的な減少傾向[21]を反映するため、左 (高いほう) から右 (低いほう) への向きとした。

低食塩食品のストックは、人々の食塩摂取量の変化に関連付けられ、低食塩摂取者のストックは食品の食塩含有量の変化に関連付けられた。高食塩食品および低食塩食品には、それぞれ 14g および 6g の食塩が含まれていると仮定した。これらの値は、2012 年の国民健康・栄養調査 [21]における 20 歳以上の 1 日当たりの食塩摂取量の平均値 10.4 g とその標準偏差 4.2 g をおおよそ反映したものである。食品の総数は 1,000 に固定され、2012 年には当初 10%が低食塩食品であると仮定した。食品の食塩含有量は、高食塩食品と低食塩食品の割合に基づいて、それぞれ 14g と 6g の加重平均として算出した。高食塩食品のストックから低食塩食品のストックへのフローの変化率 (図 1 の「change rate of salt content (食塩含有量の変化率)」) は、年率 0.04 と設定した。総人口は 10 万人に固定し、低食塩摂取者の初期割合は最適化により決定した。

本研究では一貫して、制約なし最適化手法としてパウエル法を用い、シミュレーション結果と参照データの絶対値の差の合計が最小となるように最適化ベースの較正を実行した。パラメータの変動を、既存の知識と一致する妥当な範囲内に制限することにより、多重識別可能性 (multiple identifiability) が発生しないようにした[22]。高食塩摂取群から低食塩摂取群への流入率 (図 1 中の「change rate of salt intake (食塩摂取量の変化率)」) も最適化により算出した。これらのパラメータは、2012 年から 2023 年までの国民健康・栄養調査における 20 歳以上の参加者の平均 1 日当たり食塩摂取量に基づき較正した。なお、2020 年および 2021 年の調査は新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の影響により中止された [21]。1 日当たりの食塩摂取量は、高食塩摂取者と低食塩摂取者の割合に基づき、それぞれ 14 g および 6 g を加重平均して算出した。性別の 1 日当た

り食塩摂取量は、2012 年の国民健康・栄養調査[21]における 20 歳以上の参加者の平均食塩摂取量に基づき、男女合計の平均値との差だけ一貫して高値または低値となるように設定した。

1.2 人口サブモデル

人口サブモデルは、男性および女性の加齢連鎖を示す 2 つのストック・フロー図(図 2) [20] をもとに構築した。各加齢連鎖は、40～79 歳の 10 歳ごとの年齢階級に応じた 4 つのストックを持ち、2012 年の人口を初期値として設定した[23]。各ストック間のフローの遷移率は、10 年の逆数に相当する 0.1/年に設定した。39 歳の人口は、男女別に 40～49 歳のストックに入るフローとした。39 歳の人口は過去の総務省統計局「人口推計」の年次データ(2012～2019 年)から取得し、2019 年時点の 18～38 歳の人口を、それぞれ 2020～2040 年に 39 歳に達する人数とした[23]。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)に起因する死亡数の急激な変化を避けるため、2020 年以降の統計値は使用しなかった。加齢によるフローに加え、各ストックでは死亡および移動による流出も設定しており、これらは各ストックの人口にそれぞれのパラメータを乗じて算出した。これらのパラメータは、2012 年から 2019 年までの年次ごとの人口および性・年齢階級別死亡数[23,24]に基づき較正した。参照データの標準誤差の逆数を較正の重み付け係数として使用した。

1.3 高血圧有病者数サブモデル

高血圧有病者数サブモデルは、高血圧有病者の男女 2 つの加齢連鎖で構築した。本サブモデルの加齢連鎖の基本構造は、人口サブモデルと同様とした。各ストックの初期値については、2012 年の国民健康・栄養調査データ(厚生労働省の承認済み)を用いて、性別および年齢階級ごとの人口に高血圧有病割合(収縮期血圧 ≥ 140 mmHg かつ/または拡張期血圧 ≥ 90 mmHg、降圧剤の服用有無は問わず)をかけ合わせ、高血圧有病者数を算出した。40～49 歳のストックへの流入については、2012～2023 年の国民健康・栄養調査データ(2020 年および 2021 年を除く)における 30～39 歳の高血圧有病割合に基づき、各ストックの初期値と同様の掛け算を用いて男女別に 39 歳の高血圧有病者数を算出した。なお、30～39 歳の高血圧有病割合については、2023 年のデータを 2040 年

まで継続して使用した。加齢に加えて、各ストックでは高血圧の発症による流入と死亡による流出のフローも示した。高血圧の発症者数は、性別・年齢階級別に食塩摂取量サブモデルから得られる高食塩摂取者の割合、人口サブモデルから得られる該当人口規模、および各性別年齢階級別パラメータの積として算出した。日本の人口を代表する全国的なコホートからの調査結果[25]に基づき、性別年齢階級別の死亡数はそれぞれのストックからの一般の死亡率の 1.6 倍であると仮定して算出した。性別年齢階級別の流入フローのパラメータ値は、2012 年から 2023 年まで(2020 年および 2021 年を除く[21])、人口と性別年齢階級別高血圧有病割合の積に基づく各ストックの高血圧有病者数に対して上述の重みを用いて較正した。

1.4 高血圧医療費サブモデル

高血圧医療費サブモデルはストック・フロー図を含まず、高血圧有病者数サブモデルから得られた性別年齢階級別の高血圧有病者数のストックをもとに構築した。高血圧医療費は外来医療費のみを対象とし、高血圧有病者数と 1 人当たり外来医療費の積として算出した。性別年齢階級別の高血圧 1 人当たり外来医療費は、医療給付実態調査[26]の 2012 年から 2019 年までの高血圧に関する年間外来医療費に対して前述の重みを用いて較正することにより推定した。

2. 都道府県モデルの開発

全国モデルの構造をもとに基本的に同じパラメータ値を用いて、47 都道府県別モデルを個別に構築した。パラメータ値の唯一の例外として、人口サブモデルにおける死亡および移動の流出に関するパラメータは、各都道府県における 2012 年から 2019 年まで各年の性別年齢階級別の人口および死亡数[20,21]に基づき、前述の重みを用いて較正した。

食塩摂取量サブモデルでは、2012 年の国民健康・栄養調査[21]における 20 歳以上の 1 日当たり食塩摂取量の各都道府県と全国との差を、高食塩食品(14 g)および低食塩食品(6 g)の食塩含有量に適用し、都道府県別の 1 日当たり食塩摂取量を算出した。高血圧有病者サブモデルでは、厚生労働省の許可を得た国民健康・栄養調査の個人レベルデータに基づき、2012 年における 40～79 歳の高血圧有病割合の各都道府県と全国との比を用いて、都道府県別の高血圧有病者

数を算出した。

全国モデルを組み込んだ Vensim Professional 10.2.0 における都道府県別モデルの各パラメータを、Stella Architect version 4.0 (ISEE Systems, Inc., Lebanon, NH, USA) [27]に組み込んだ全国モデルの各配列 (array) に転記した。

3. モデルの妥当性検証

モデルの妥当性は以下の 3 つの方法で評価した。第一に、全国モデルにおいて参照データごとに性別年齢階級別にモデルの適合度を評価した。平均絶対パーセント誤差 (mean absolute percentage error, MAPE) [20] は、食塩摂取量サブモデルにおける固定された仮想人口の 1 日当たりの食塩摂取量、人口サブモデルにおける人口と死亡数、高血圧有病者数サブモデルにおける高血圧有病者数、および高血圧医療費サブモデルにおける高血圧外来医療費について、性別年齢階級別に計算した。第二に、パラメータを性別、年齢階級間で比較し、大きな差がないことを確認した。第三に、性別年齢階級別のシミュレーション結果について、全国モデルと都道府県別モデルを比較し、挙動の類似性を評価した。

4. 感度分析

モンテカルロ多変量感度テスト[22]を用いて感度分析を実施した。合計で 200 回のシミュレーション用のサンプルを生成し、0、5、25、50、75、95、100 の各パーセンタイル境界でのパラメータ変動を計算した。食塩摂取量サブモデルにおける 2 組の各パラメータについて、80%から 120%までの範囲の変化を食塩摂取量、高血圧有病者数、および高血圧医療費に適用した。1 組目には、低食塩食品数の初期値、低食塩摂取者割合の初期値、食塩含有量の変化率、および食塩摂取量の変化率の 4 つのパラメータを含めた。2 組目には、高食塩食品の食塩含有量と低食塩食品の食塩含有量を 1 組目の 4 つのパラメータに加えた 6 つのパラメータを含めた。さらに、高血圧有病者数サブモデルにおける高血圧有病者の性別年齢階級別死亡率の乗数 1.6 を 1.4 から 1.8 までの範囲で変更し、高血圧有病者数と高血圧医療費に適用した。

5. シナリオ

全国モデルおよび都道府県別モデルを用いて、2012 年から 2040 年までの期間についてシミュレーションを実施した。さらに、食

品および人口の変化率に定数を乗じた場合の食塩摂取量、高血圧有病者数、および高血圧医療費への影響をみるため、3 つの仮想シナリオを設定した。極端な変化を示すため、倍率として 3 を設定した。

シナリオ 1：食品の変化率を 3 倍に設定

シナリオ 2：人々の変化率を 3 倍に設定

シナリオ 3：食品と人口の変化率の両方を 3 倍に設定

(倫理面への配慮)

国民健康・栄養調査の匿名データは、厚生労働省に調査票情報の利用申請を行い、承認を得て利用した。

C. 研究結果

1. モデルの妥当性の検証

シミュレーション結果は、参照データに良好に適合していた。パラメータは、性別および年齢階級間で大きな差を認めなかった。性別年齢階級別のシミュレーション結果は、全国モデルと都道府県別モデルでほぼ同様であった。

MAPE は、固定された仮想人口の 1 日当たりの食塩摂取量については 1.0%であり、人口、死亡、および高血圧医療費については性別年齢階級別で 10%未満であった (表 1)。高血圧有病者数の MAPE は、40 歳代の男女で約 20%、60 歳代の男女で約 15%であった。

2. 感度分析

1 日当たり食塩摂取量に関する 2 組目のパラメータの多変量変化 (図 3b) は、1 組目のパラメータの多変量変化 (図 3a) よりも、0 パーセンタイルと 100 パーセンタイルの境界間の範囲が大きかった。2 組目のパラメータの多変量変化では、2040 年の高血圧有病者数および高血圧医療費の 0%と 100%のそれぞれの境界のシミュレーション結果は、ベースランと比較して、高血圧有病者数では 93.1%と 107.7% (図 3c)、高血圧医療費では 93.0%と 107.8% (図 3d) であった。さらに、性別年齢階級別の高血圧有病者の死亡率の乗数 1.6 の多変量変化により、2040 年の高血圧有病者数については 0%と 100%の範囲でベースランと比較してそれぞれ 98.2%と 101.7%、高血圧医療費については 97.7%と 102.3%というシミュレーション結果が得られた。

3. ベースランにおける全国モデルのシミュレーション結果

食塩摂取量サブモデルにおけるパラメータの最適化の結果、低食塩摂取者割合の初期値は 48.7%、高食塩摂取者から低食塩摂取者への変化率は年 0.0786 と決定された。高食塩食品および高食塩摂取者の減少に伴い、食品の一日分の食塩含有量は 2012 年の 13.2g/日から 2040 年には 9.9g/日に減少し(図 4)、食塩摂取量は 2012 年の 10.1 g/日から 2040 年には 8.7 g/日へと低下すると推定された(表 2)。

人口サブモデルにおいて、男女ともに人口は減少したが、女性の減少傾向がより顕著であった。高血圧有病者数および高血圧医療費のサブモデルにおいては、男女とも数値の減少傾向を示したが、男性の減少割合がより大きかった。男性の 40 歳代および 50 歳代における高血圧有病者数の減少割合は女性よりも大きかった(図 5)。

4. 全国モデルのシナリオ別シミュレーション結果

食塩摂取量サブモデルにおいて、シナリオ 1 はシナリオ 2 と比較して高食塩食品への影響がより大きいことが示された。シナリオ 2 はシナリオ 1 と比較して高食塩摂取者および食塩摂取量に与える影響が大きく、シナリオ 3 はこれらの変数に対して最も大きな影響を示した(表 3)。

高血圧有病者数および高血圧医療費のサブモデルにおいては、シナリオ 2 はシナリオ 1 に比べて高血圧有病者数および高血圧医療費に与える影響が大きく、シナリオ 3 は男女ともにこれらの変数に最も大きな影響を示した。2040 年におけるベースランのシミュレーション結果との差は、高血圧有病者数、高血圧医療費とも、男性よりも女性で大きかった。

5. 都道府県別モデルのシミュレーション結果

2012 年の食塩摂取量は、沖縄県で 8.3 g/日、岩手県で 11.7 g/日であったが、ベースランのシミュレーションでは、それぞれ 6.9 g/日および 10.3 g/日まで低下した(表 4)。鳥取県と東京都では、人口、高血圧有病者数、および高血圧医療費において 10 倍以上の差があった。都道府県モデルを用いて各シナリオのシミュレーションを実施したところ、全国モデルと同様の結果を示した。

D. 考察

本研究は、全国および都道府県別のシス

テムダイナミクスモデルを用いて、食塩摂取量の減少が我が国における高血圧の医療費に与える影響を評価した初めての研究である。全国モデルに基づき、各都道府県の人口サブモデルを用いて都道府県別モデルを構築し、都道府県別に 3 つのシナリオを用いて高血圧有病者数と高血圧医療費を算出した。本研究で用いた全国モデルに基づく都道府県別モデルの開発手法は、慢性疾患に対する他の公衆衛生介入にも応用可能である。

日本人は、食塩摂取量の約 70%を調味料から摂取する都道府県共通の食環境を有すると考えられる[2]。そのため、固定人口 10 万人を対象に 1 日当たりの食塩摂取量を算出し、高食塩摂取者の割合を全国および各都道府県の人口に適用した。2012 年には、1,000 種類の食品のうち、任意に 10%のみが低食塩食品であると分類した。すなわち、食塩含有量が 14g の高食塩食品が 90%、6g の低食塩食品が 10%という構成による加重平均は、2012 年時点で 13.2g であった。2012 年の 1 日当たり食塩摂取量 10.4 g [21] とこの値との差は、スーパーマーケット、コンビニエンスストア、レストランにおける調味料の豊富な入手可能性によって説明できると考えられる。国民健康・栄養調査の参照データを用いた 1 日当たりの食塩摂取量のシミュレーション結果(図 4)が示すように、1 日当たりの食塩含有量は参照データとほぼ一致し、MAPE は 1.0%であった。また、食品の 1 日当たりの食塩含有量は 2012 年の 13.2g/日から 2040 年には 9.9g/日へと 25%減少したが、1 日当たりの食塩摂取量は 2012 年の 10.1g/日から 2040 年には 8.7g/日へと 14%減少した。したがって、これらの結果は 1 日当たりの食塩含有量を 1 日当たりの食塩摂取量よりも大幅に削減する必要があることを示すと考えられる。感度分析の結果、1 日の食塩摂取量を直接変化させる高食塩食品と低食塩食品の食塩含有量を 1 組目のパラメータに追加した場合、1 日の食塩摂取量のシミュレーション結果の 0 パーセントイルと 100 パーセントイルの間の範囲は大きくなったものの、2040 年のベースランにおけるシミュレーション結果の妥当な範囲内(高血圧有病者数で 14.6% (93.1%~107.7%)、高血圧医療費で 14.8% (93.0%~107.8%))に収まることが示された。さらに、感度分析の結果、1 組目のパラメータに含まれる低食塩食品数の初期値(全食品の 10%)は高血圧有病者数と高血圧医療費に実質的

な影響を与えないことも示された。

2012～2040 年のベースランのシミュレーションにおいて、食塩摂取量および人口の減少にともない、高血圧有病者数および高血圧医療費はいずれも約 50%減少することが示された。40～79 歳の各年齢階級の人口分布は男女でほぼ同等であった（男性では 40 歳代 25.9%、50 歳代 23.3%、60 歳代 28.4%、70 歳代 22.4%、女性では 40 歳代 27.9%、50 歳代 24.4%、60 歳代 28.2%、70 歳代 19.5%）。しかし、ほとんどの年齢階級において、人口の最大値は女性よりも男性で遅れて観察された（40 歳代、50 歳代、60 歳代、70 歳代で男性はそれぞれ 2016 年、2020 年、2012 年、2024 年、女性それぞれ 2015 年、2012 年、2012 年、2019 年）。そのため、2012 年から 2040 年にかけての人口変化の割合は、男性よりも女性で大きかった。

本研究では、降圧剤による治療を受けているか否かにかかわらず、収縮期血圧 ≥ 140 mmHg かつ/または拡張期血圧 ≥ 90 mmHg を高血圧と定義した。これは、降圧薬の服用者数は高血圧の有病割合、医師による処方、薬の入手しやすさなど、複数の要因によって決まり、これを考慮するとモデルが複雑化するためである。そこで、性別年齢階級別の高血圧外来医療費をもとに較正することで、一人当たり高血圧医療費を算出した。これは今後のモデル改善における課題である。もう一つの理由としては、本研究の焦点が、生活習慣の改善を求めることなく降圧剤の使用を促進することではなく、生活習慣改善の一つとしての減塩が、高血圧に関連する医療費支出へ及ぼす影響を検討することにあつたためである。この定義に基づき、高血圧有病者数サブモデルにおける高血圧発症の流入量は、高食塩摂取量の割合を乗じて算出した。この流入パラメータを性別年齢階級別に比較すると、男性の値は一貫して女性より低く、特に 60 代男性では負の値を示した（60 代の男性は-0.0035、女性は 0.0104）。この性差が、各シナリオにおける男女間の高血圧有病者数と高血圧医療費の差を招いていると考えられる。この枠組は因果関係ではなく相関関係に基づいているが[20]、モデルを簡略化するために、高食塩摂取と高血圧発症との間の確立された関係を適用した[9]。この方法は、高食塩摂取者の割合を減らすことで高血圧有病者数を減らすことができることを示しているため、人口レベルでの減塩に関する政策的示唆を与えるものである。ただ、この点も将来のモデ

ル開発における重要な課題である。また、乗数 1.6 を 1.4 から 1.8 の間で変化させて、シミュレーションした変化に対する感度分析も行った。高血圧有病者数と高血圧医療費の 0%と 100%の範囲でのシミュレーション結果は、2040 年の基本実行でのシミュレーション結果の狭い範囲内に収まり、高血圧有病者数では 3.5% (98.2%～101.7%)、高血圧医療費では 4.6% (97.7%～102.3%) であった。高血圧有病者数の MAPE は、40 代の男女で約 20%、60 代の男女で約 15% であった。これは、特に 40 代の男女について、2023 年の高血圧の有病割合が 2040 年にも適用されるという強い仮定に起因している可能性がある。ただ、このような強い仮定の影響は、若い年齢階級では高血圧の一人当たり医療費が少なかったため、比較的小さいものであった（40 歳代、50 歳代、60 歳代、70 歳代で男性はそれぞれ 12,344.4、21,758.6、44,145.7、65,286.6、女性それぞれ 17,267.6、28,016.3、47,716.0、70,117.7）。

さらに、各ストックからの死亡による流出には乗数 1.6 を用いたが、この値は血圧カテゴリーにおける相対リスクの範囲内に収まっていた [24]。この値を各性別年齢階級において 1.4～1.8 の範囲で変更しても、較正された流入パラメータに大きな変化は認められなかった。

本研究では、減塩が高血圧の医療費に及ぼす影響を評価するために食品および人口の変化率を用いているが、各変化の具体的な測定方法については特定していない [18]。我々の先行研究では、我が国における非感染性疾患予防を目的とした減塩介入の健康面および経済面での効果を検討し、低食塩（減塩）食の採用よりも食品製品の改良の方が、より大きな効果をもたらす可能性を示した。本研究では、高血圧および複数のシナリオに焦点を当てるために簡略化モデルを用いたが、食品の変化を促進する観点からは、食品製品の改良の重要性についても強調されるべきである。

本研究にはいくつかの制約がある。第一に、本研究では高血圧に限定して分析を行った。高血圧は心血管疾患や慢性腎臓病などの慢性疾患の主要なリスク因子であり [9]、これらの疾患の治療は我が国の医療費に大きく寄与している。米国の PRISM [15,16] のような慢性疾患向け公衆衛生介入の包括的モデルが、現行モデルを拡張することによって今後構築されるべきである。第二に、高血圧による死亡は高血圧有病者

数サブモデルに組み込まれているものの、シナリオに応じた死亡者数の変化は人口サブモデルにはフィードバックされなかった。2024年の死亡率（10万人当たり）は高血圧性疾患（9.8）が全死亡率（1334.5）の0.7%を占めるに過ぎないため[24]、この省略による影響は現在のモデルでは軽微であるように思われる。しかし、高血圧は慢性疾患のリスク因子である。この問題は、現在のモデルに心血管疾患および慢性腎臓病を組み込むことで解決すべきと考えられる。第三に、食塩摂取量サブモデルにおける変化率および高血圧有病者数サブモデルにおける都道府県ごとの高血圧有病者数と全国高血圧有病者数の比については、すべての性別年齢階級で同一のパラメータを用いた。このため、詳細なシミュレーションが十分に行われなかった可能性はあるが、国民健康・栄養調査における性別年齢階級別サンプル数が比較的少ないことから、極端な結果が生じることは回避された。第四に、食塩摂取量サブモデルにおける変化率や高血圧有病者数サブモデルにおける死亡率乗数など、同一の構造パラメータを適用した。この方法では、都道府県ごとの食文化、人口動態、医療へのアクセスといった違いを考慮していない。より柔軟なモデリング手法を用いることで、地域レベルのモデルの適用性を向上させることができると考えられる。

E. 結論

全国および都道府県別のシステムダイナミクスモデルは、食塩摂取量の減少により、2040年までに高血圧有病者数および高血圧医療費を低減できる可能性があることを示した。これらのシミュレーションモデルは、全国および地方自治体の政策立案者が、我が国における医療費削減を目的とした減塩施策を推進する際に、有用な示唆を与える可能性がある。

F. 研究発表

1. 論文発表

Nishi N, Sugiyama T, Goryoda S, Takahashi Y, Miura K, Ikeda N. Impact of Salt Reduction on Medical Expenditure for Hypertension in Japan: National and Subnational Simulation Models. *Nutrients* 2026;18(6):933. <https://doi.org/10.3390/nu18060933>

2. 学会発表

Nishi N, Sugiyama T, Goryoda S, Miura K, Ikeda N. Simulation of average salt intake and its changes by scenario until 2040 in Japan. 第36

回日本疫学会学術総会・第3回国際疫学会西太平洋地域合同学術集会, 長崎市, 出島メッセ長崎, 2026年1月29日.

西 信雄. 減塩の公衆衛生的・医療経済学的効果に関する都道府県版シミュレーションモデル. 第84回日本公衆衛生学会総会, シンポジウム74 (公募シンポジウム) 「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的・医療経済学的効果」, 静岡市, グランシップ (静岡県コンベンションアーツセンター), 2025年10月31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. Saito A, Imai S, Htun NC, Okada E, Yoshita K, Yoshiike N, Takimoto H. The trends in total energy, macronutrients and sodium intake among Japanese: findings from the 1995–2016 National Health and Nutrition Survey. *Br J Nutr* 2018;120:424–434.
2. 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* 2022;129:690–703.
3. 厚生労働省健康・生活衛生局健康課栄養指導室. 令和5年国民健康・栄養調査報告. 2025年. <https://www.mhlw.go.jp/content/001435384.pdf> (2026年3月23日アクセス可能)
4. World Health Organization (WHO). Guideline: Sodium Intake for Adults and Children. 2012. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241504836> (2026年3月23日アクセス可能)
5. 厚生労働省健康・生活衛生局健康課栄養指導室. 「日本人の食事摂取基準」(2025年版) 策定検討会報告書. <https://www.mhlw.go.jp/content/10904750/001316585.pdf> (2026年3月23日アクセス可能)
6. 厚生労働省. 健康的で持続可能な食環境戦略イニシアチブ. <https://sustainable-nutrition.mhlw.go.jp/> (2026年3月23日アクセス可能)
7. 厚生労働省. 健康日本21 (第三次).

- 2023年.
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/kenkou/kenkounippon21_00006 (2026年3月23日アクセス可能)
8. Ikeda N, Yamaguchi M, Kashino I, Sugiyama T, Miura K, Nishi N. Evaluation of public health and economic impacts of dietary salt reduction initiatives on social security expenditures for cardiovascular disease control in Japan. *Hypertens Res* 2025;48:1265–1273.
9. Ohya Y, Sakima A, Arima H, Fukami A, Furuhashi M, Ishida M, Ishimitsu T, Kai H, Matsumura K, Miura K, et al. Key highlights of the Japanese Society of Hypertension Guidelines for the management of elevated blood pressure and hypertension 2025 (JSH2025). *Hypertens Res* 2025;48:2500–2511.
10. Hisamatsu T, Miura K. Epidemiology and control of hypertension in Japan: a comparison with Western countries. *J Hum Hypertens* 2021;38:469–476.
11. 厚生労働省. 令和5年(2023)患者調査の概況. 2024.<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/23/index.html> (2026年3月23日アクセス可能)
12. 厚生労働省. 令和4(2022)年度国民医療費の概況. 2024年.
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-iryohi/22/index> (2026年3月23日アクセス可能)
13. Smith BT, Smith PM, Harper S, Manuel, DG, Mustard CA. Reducing social inequalities in health: the role of simulation modelling in chronic disease epidemiology to evaluate the impact of population health interventions. *J Epidemiol Community Health* 2013;68:384–389.
14. Wang Y, Hu B, Zhao Y, Kuang G, Zhao Y, Liu Q, Zhu X. Applications of System Dynamics Models in Chronic Disease Prevention: A Systematic Review. *Prev Chronic Dis* 2021;18:E103.
15. Orenstein, D.R, Homer, J, Milstein, B, Wile, K, Pratibhu, P, Farris, R. Modeling the local dynamics of cardiovascular health: Risk factors, context, and capacity. *Prev Chronic Dis* 2008;5:A63.
16. Hirsch G, Homer J, Trogon J, Wile K, Orenstein D. Using Simulation to Compare 4 Categories of Intervention for Reducing Cardiovascular Disease Risks. *Am J Public Health* 2014;104:1187–1195.
17. Sugiyama T, Goryoda S, Inoue K, Sugiyama-Ihana N, Nishi N. Construction of a simulation model and evaluation of the effect of potential interventions on the incidence of diabetes and initiation of dialysis due to diabetic nephropathy in Japan. *BMC Health Serv Res* 2017;17:833.
18. 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(11):478.
<https://doi.org/10.3390/systems12110478>
19. Ventana Systems, Inc. Vensim Professional 10.2.0. <https://vensim.com/software/> (2026年3月23日アクセス可能)
20. Sterman JD. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*; Irwin McGraw Hill: New York, NY, USA, 2000.
21. 厚生労働省. 国民健康・栄養調査. https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyou_chousa.html (2026年3月23日アクセス可能)
22. User Guide—Vensim Introduction & Tutorials.
https://vensim.com/documentation/users_guide.html (2026年3月23日アクセス可能)
23. 総務省統計局. 人口推計.
<https://www.stat.go.jp/data/jinsui/index.html> (2026年3月23日アクセス可能)
24. 総務省統計局. 人口動態調査.
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00450011&tstat=000001028897> (2026年3月23日アクセス可能)
25. Iida M, Ueda K, Okayama A, Kodama K, Sawai K, Shibata S, Tanaka S, Hashimoto T, Horibe H, Minowa M, Yanagawa H. Impact of elevated blood pressure on mortality from all causes, cardiovascular diseases, heart disease and stroke among Japanese: 14 year follow-up of randomly selected population from Japanese—Nippon data 80. *J Hum Hypertens* 2003;17:851–857.
26. 厚生労働省. 医療給付実態調査.
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/iryohoken/database/zenpan/iryokuyufu.html> (2026年3月23日アクセス可能)
27. ISEE Systems, Inc. Stella Architect (Version 4.0).
<https://www.iseesystems.com/store/products/stella-architect.aspx> (2026年2月2日アクセス可能)

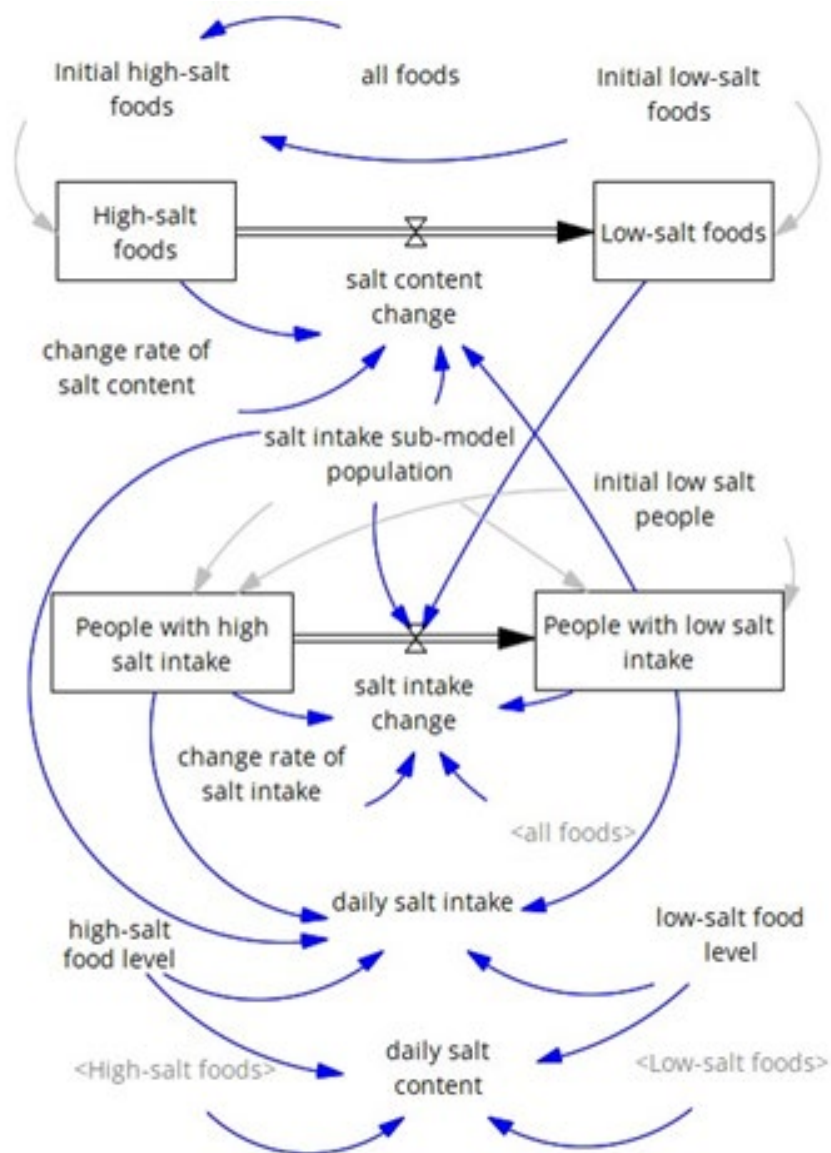


図 1. 食塩摂取量サブモデルの構造

長方形はストックを表す。二重矢印付きのパイプはストック値を変化させるフローを示す。パイプの中央にあるバルブは流量を調整する。青色の矢印は要素間の因果関係を表す。灰色の矢印は初期値を受け取るストックへのリンクを表す。灰色のテキストはモデルの他の場所ですでに使用されている潜在変数を示す。

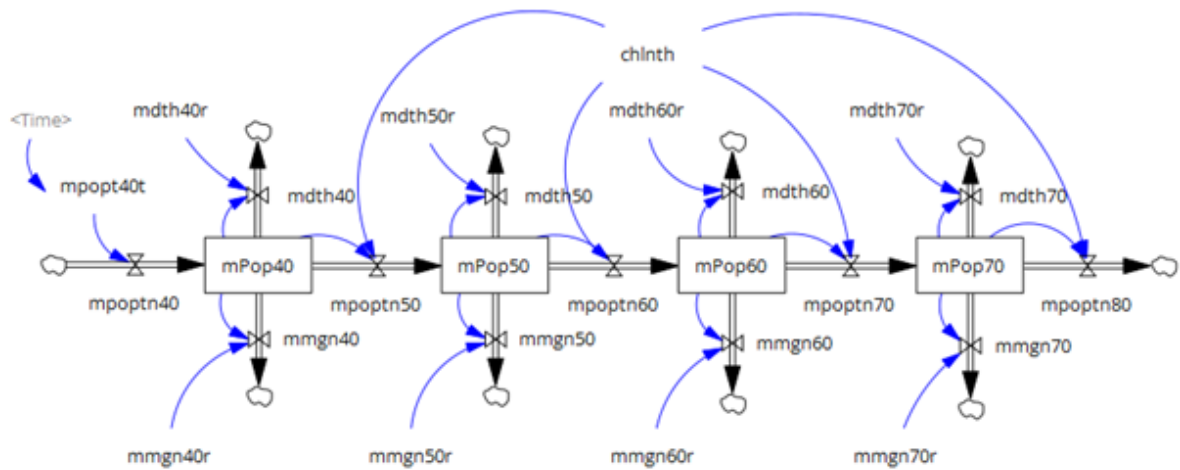


図 2. 人口サブモデルの構造（男性）

長方形はストックを表す。雲はシステム境界外のストックを表す。二重矢印付きのパイプはストック値を変化させるフローを示す。パイプの中央にあるバルブは流量を調整する。青色の矢印は要素間の因果関係を表す。灰色のテキストはモデルの他の場所ですでに使用された潜在変数を示す。

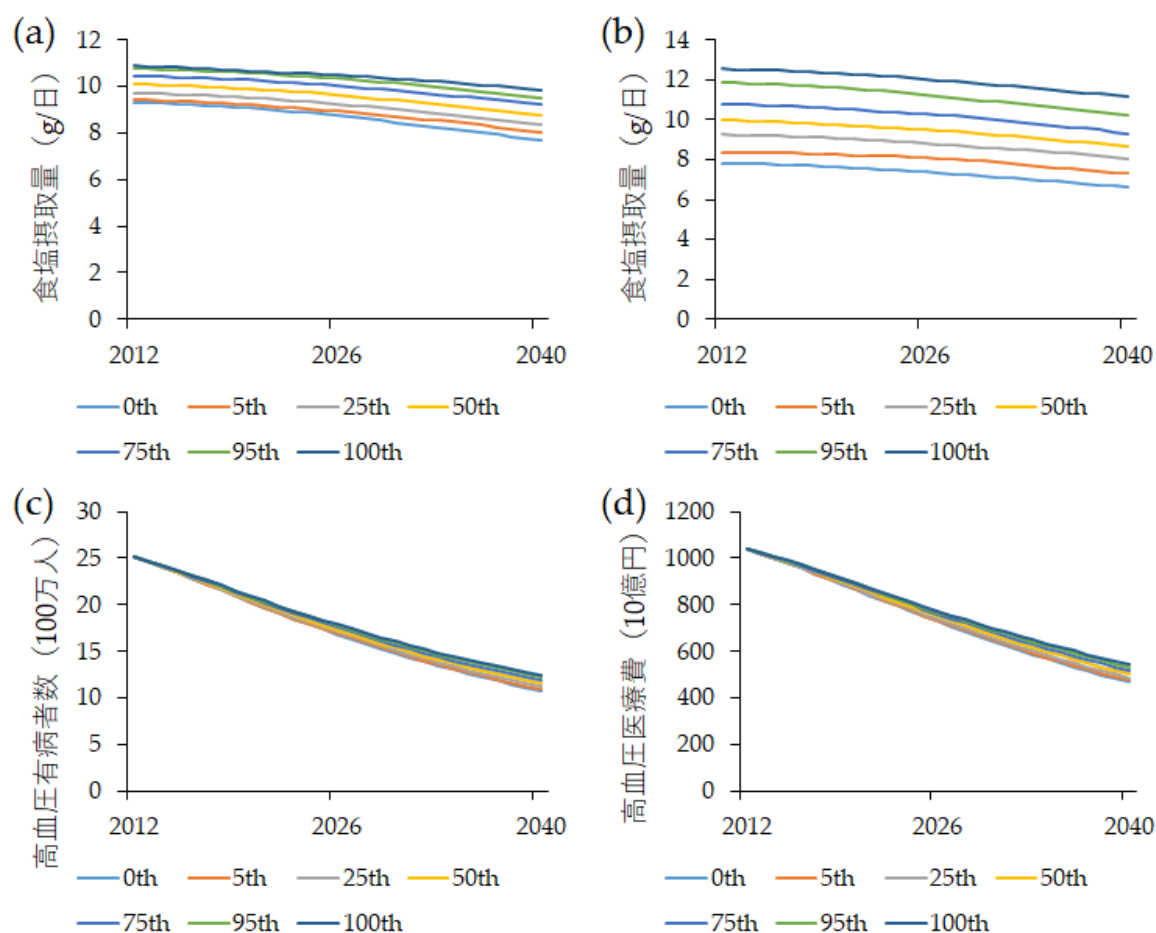


図 3. 食塩摂取量サブモデルでパラメータ値を 80% から 120% の間で変化させた 200 回のシミュレーションのサンプルに基づくモンテカルロ多変量感度分析における 0、5、25、50、75、95、および 100 パーセンタイル境界のシミュレーション結果

低食塩食品の初期値、低食塩摂取者の割合の初期値、食塩含有量の変化率、および食塩摂取者数の変化率 (1 組目のパラメータ) を使用した 1 日の食塩摂取量 (a) と、高食塩食品の食塩含有量、低食塩食品の食塩含有量、低食塩食品の初期値、低食塩摂取者の割合の初期値、食塩含有量の変化率、および食塩摂取者数の変化率 (2 組目のパラメータ) を使用した 1 日の食塩摂取量 (b)、高血圧有病者数 (c)、および高血圧医療費 (d)

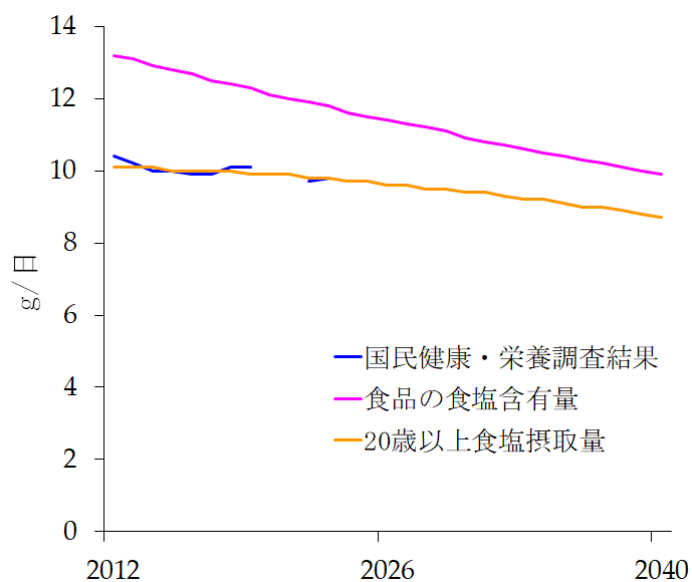


図 4. 国民健康・栄養調査における 20 歳以上の 1 日当たりの食塩摂取量（2012～2019 年、2022 年、2023 年）ならびに食塩摂取量サブモデルでのベースランにおける 2012 年から 2040 年までの食品の食塩含有量と 20 歳以上 1 日当たり食塩摂取量のシミュレーション結果

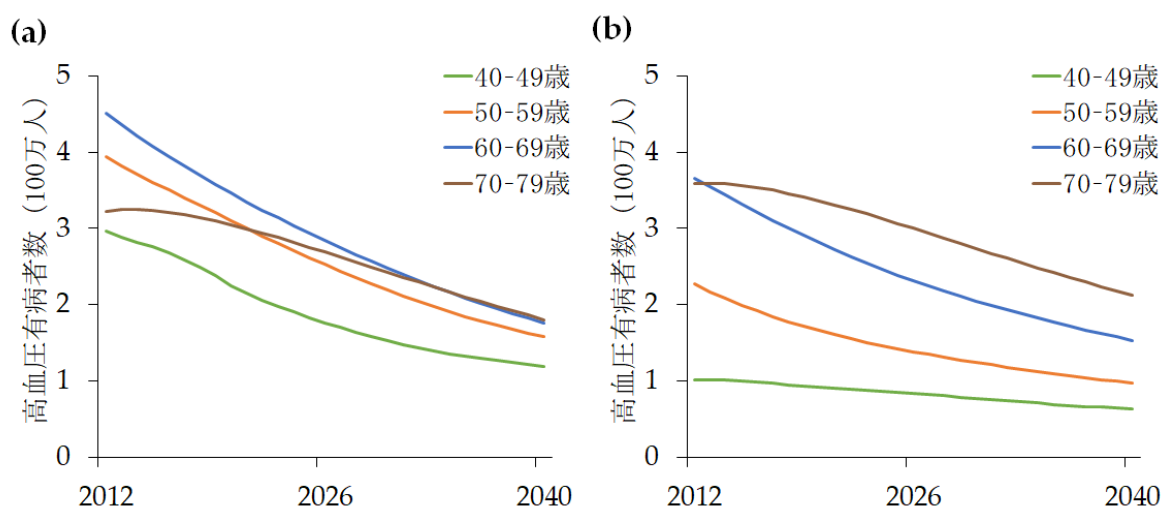


図 5. ベースランにおける 2012 年から 2040 年までの性別年齢階級別高血圧有病者数のシミュレーション結果 ((a) 男性、(b) 女性)

表 1. 人口サブモデル、高血圧有病者数サブモデル、および高血圧医療費サブモデルの各パラメータの性別年齢階級別平均絶対パーセント誤差 (%)

	男性 (年齢、歳)				女性 (年齢、歳)			
	40-49	50-59	60-69	70-79	40-49	50-59	60-69	70-79
人口サブモデル								
人口	2.0	1.3	2.8	2.6	3.9	1.4	2.7	2.5
死亡	7.7	4.0	3.3	2.5	2.8	5.5	2.9	2.4
高血圧有病者数サブモデル								
高血圧有病者数	23.9	7.0	13.0	8.4	19.2	8.9	15.7	5.7
高血圧医療費サブモデル								
高血圧医療費	6.7	4.5	3.0	2.8	2.6	2.2	4.5	2.5

表 2. 全国モデルにおけるベースランのシミュレーション結果

	2012 年	2026 年	2040 年	2012 年から 2040 年への変化 (%)
食塩摂取量サブモデル				
高食塩食品数	900	676	483	-46.3
高食塩摂取者数	51,313	45,415	34,322	-33.1
食塩摂取量 (g/日)	10.1	9.6	8.7	-13.9
人口サブモデル				
男性人口 (100 万人)	31.6	30.8	27.7	-12.3
女性人口 (100 万人)	33.2	30.8	26.5	-20.2
高血圧有病者数サブモデル				
男性高血圧有病者数 (100 万人)	14.6	9.8	6.3	-56.8
女性高血圧有病者数 (100 万人)	10.5	7.5	5.2	-50.5
高血圧医療費サブモデル				
男性高血圧医療費 (10 億円)	531.9	377.5	244.3	-54.1
女性高血圧医療費 (10 億円)	507.8	373.8	259.8	-48.8

表 3. 全国モデルにおけるシナリオ別シミュレーション結果

	2040 年におけるシミュレーション結果				2040 年におけるベースランとの差 (%)		
	ベースラン	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3
食塩摂取量サブモデル							
高食塩食品数	483	242	459	201	-50.0	-5.1	-58.5
高食塩摂取者数	34,322	30,793	16,652	10,639	-10.3	-51.5	-69.0
食塩摂取量 (g/日)	8.7	8.5	7.3	6.9	-3.2	-16.2	-21.7
高血圧有病者数サブモデル							
男性高血圧有病者数 (100 万人)	6.3	6.3	6.2	6.2	-0.3	-1.7	-2.3
女性高血圧有病者数 (100 万人)	5.2	5.2	4.9	4.8	-1.0	-6.6	-8.8
高血圧医療費サブモデル							
男性高血圧医療費 (10 億円)	244.3	243.7	240.6	239.3	-0.2	-1.5	-2.0
女性高血圧医療費 (10 億円)	259.8	257.4	243.7	238.3	-0.9	-6.2	-8.3

表 4. 都道府県別モデルにおけるベースランのシミュレーション結果の最小値と最大値

	2012 年	2026 年	2040 年	都道府県
最小値 (2012 年)				
食塩摂取量 (g/日)	8.3	7.8	6.9	沖縄県
人口 (100 万人)	0.30	0.28	0.23	鳥取県
高血圧有病者数 (100 万人)	0.14	0.09	0.06	鳥取県
高血圧医療費 (10 億円)	5.8	4.0	2.5	鳥取県
最大値 (2012 年)				
食塩摂取量 (g/日)	11.7	11.2	10.3	岩手県
人口 (100 万人)	6.58	6.47	5.98	東京都
高血圧有病者数 (100 万人)	1.82	1.41	1.06	東京都
高血圧医療費 (10 億円)	72.3	58.4	44.3	東京都