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

全国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　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（国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所）
研究協力者　ファティン・アミナ・ビンティ・ハッサン
（国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所）

研究要旨
食塩の過剰摂取は、循環器疾患や慢性腎臓病のリスクを増加させる。本研究は、日本における食品企業による減塩の取組および減塩食品の利用者の増加による食塩摂取量の減少がもたらす公衆衛生学的および医療経済学的な効果を明らかにすることを目的とした。減塩の介入による平均食塩摂取量、食塩関連の疾患の有病率、医療費・介護費の変化を、システム・ダイナミクスモデルによる2040年までのシミュレーションにより評価した。その結果、減塩食品の利用者を増加させるシナリオに比べて、政策的に強制的な食品の改質や自発的な食品の改質を促進するシナリオにおいて、循環器疾患および慢性腎臓病に罹患する人数の減少ならびに医療費および介護費の削減が大きいことが見込まれた。特に強制的な食品の改質といった戦略を実行して食塩摂取量を減少させることは、大きな公衆衛生的効果および医療経済学的効果を生む可能性が示された。

A．目的

減塩の介入に関して我が国でもシミュレーションモデルにより医療経済学的評価が行われてきたが[1,2]、米国疾病予防管理センター（the Centers for Disease Control and Prevention: CDC）の The Prevention Impacts Simulation Model (PRISM) [3]のように、包括的なモデルをもとに自治体で利用可能なシミュレーションモデルを作成し、一般にウェブサイトで公開するには至っていない。本研究は、シミュレーション手法として PRISM と同様にシステム・ダイナミクス（system dynamics: SD）を採用し、主に循環器系の慢性疾患を対象に医療経済学的評価が可能な包括的なモデルを作成することを目的とした。

SD は米国マサチューセッツ工科大学(MIT)のジェイ・フォレスター教授によって 1950 年代に創始された。SD は時間の経過とともに変化するシステムの成長と平衡の相互作用を、コンピュータを使ってシミュレーションするための技法である。SD には主に二つのアプローチがあり、一つは「システム思考」で全体としてのシステムの構造、システム内の要素間の相互作用を分析するために用いるもの、もう一つは「モデリング＆シミュレーション」で定量モデルを構築し、時系列でのシステムの挙動を分析するものである。具体的には、因果ループ図やストック・フロー図を用いて、システム内の相互依存性やフィードバック構造をモデルとして再現する。因果ループ図は、システムを構成する主要な変数を同定し、特定の変数が他の変数にどのように影響を与えるかを分析することで、システムの内部に存在するフィードバック構造を明らかかする。ストック・フロー図は、システム内部のストック（蓄積）とフロー（流入・流出）の構造を図式化するためのツールである[4]。

B．研究方法

１．モデルの構造

モデルは日本の 40 歳以上の総人口を対象とした。

モデル全体を大きく 4 つのモデルで構成し（図 1）、それぞれ食塩摂取量モデル（salt intake model）、慢性疾患モデル（disease model）、医療費・介護費モデル（expenditure model）、減塩介入モデル（salt intake reduction intervention model）と名付け

た。

食塩摂取量モデルを起点に説明すると、各モデルは以下のような関係にある。

平均食塩摂取量（average dietary salt intake）は後述する減塩介入モデルにある「日本人における減塩食品の利用（population's low-salt diet adoption)」により低下が促進される。次に平均食塩摂取量は慢性疾患モデルにある高血圧および循環器疾患（CVD）と慢性腎臓病（CKD）の罹患のリスクとなる。さらに、CVD と CKD の治療が行われることによって、医療費・介護費モデルの費用が変化する。この費用の変化が公衆衛生的な介入となって、減塩介入モデルにある減塩食品への改質が促進され、減塩食品の利用者数が増加する。

各モデルは以下のような構造とした。

①食塩摂取量モデル（図 2）

平均食塩摂取量（average dietary salt intake）をストックとして、そこへのフローが一つのモデルとした。食塩摂取量の目値を 8g/日とし、平均食塩摂取量がそれを上回れば差が負となるように計算式を設定した。後述する減塩食品の利用者数や、平均食塩摂取量について一般に認識されている値（perceived average salt intake）と実際に調査で得られた値の比も平均食塩摂取量の変化の計算に組み入れた。平均食塩摂取量の初期値は 10.4g/日とした。

②慢性疾患モデル（図 3）

高血圧、CVD、CKD のそれぞれについてストック・フロー図を作成し、各罹患のフローを有病者のストックに流入させた。各ストックからは回復者および死亡者のフローを流出させた。非 CVD 者のストックには全人口のうち 40 歳を迎えた者が流入するようにした。さらに、これら 3 つのストック・フロー図について、高血圧有病者の中から CVD と CKD の発症があり、また CVD 有病者の中から CKD の発症があるように変数間を連結した。

③医療費・介護費モデル（図 4）

医療費、介護費、国内総生産（gross domestic product: GDP）のそれぞれについてストック・フロー図を作成し、CVD や CKD の有病者に対する医療および介護の費用がそれぞれのストックに流入するようにした。GDP については、医療ではなく減塩介入のような公衆衛生に投入される予算の計算に用いた。

④減塩介入モデル（図 5）

減塩食品の利用者と減塩食品への改質についてそれぞれストック・フロー図を作成し、先行文献[5]や一般的な拡散モデルを参考に、ヘルスプロモーション等による減塩の必要性の自覚が減塩食品の利用を促進し、減塩食品の利用者数の増加および政策の介入が減塩食品への改質を促進するよう各ストック・フロー図を連結した。

２．モデルの検証

2012 年以降の統計値（表 1）をもとにモデルの最適化を行い、2040 年までのシミュレーションを 0.0625 年の時間ステップで行った。このモデルの最適化により、減塩介入モデルにおける企業の減塩食品への改質について、その割合の初期値は 3%と算出された。また、減塩食品の利用者の割合について、その初期値は 4%と算出された。

モデルの作成とシミュレーションには Vensim DSS 10.1.1 を用いた。

表 1　主な変数に関するパラメーター値

パラメーター	初期値	文献
総人口（千人）	127,515	6
CVD 有病者数（人）	14,901,257	7
CKD 有病者数（人）	57,980,571	7
減塩の必要性を自覚している者の数	94,998,675	8
医療費（億円）	392.117	9
介護費（億円）	8,641,640	10
GDP（億円）	4,994,239	11

３．シナリオの設定

①基本シナリオ

モデルに設定した、企業における減塩食品への改質と減塩食品の利用者の割合の初期値、それぞれ 3%と 4%が維持されると仮定した。

②シナリオ 1

企業における減塩食品への改質と減塩食品の利用者の割合を、基本シナリオ以前の状態を想定して、いずれも 0%が維持されると仮定した。

③シナリオ 2

企業における減塩食品への改質を自発的なものと想定して、その割合が 2012 年から 2040 年にかけて 3%から 15%まで増加するものとした。

④シナリオ 3

企業における減塩食品への改質を強制的なものと想定して、その割合が 2012 年から 2040 年にかけて 3%から 20%まで増加するものとした。

⑤シナリオ 4

減塩食品の利用者の割合が 2012 年から 2040 年にかけて 4%から 14%まで増加するものとした。

（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は取り扱わなかった。

C．研究結果

主な変数のシナリオ別シミュレーション結果を図 6 に示す。

平均食塩摂取量（salt intake）、高血圧有病者数（HTN）、CVD 有病者数、CKD 有病者数、医療費（medical care expenditure: MCE）、介護費（long-term care expenditure: LTCE）のいずれにおいても、シナリオ 1 が最も高い値を、基本シナリオ（base case）が 2 番目に高い値を示した。

シナリオ 2 の自発的な食品の改質では、CVD と CKD に罹患する人数がそれぞれ 1290 万人と 3950 万人、また医療費と介護費がそれぞれ 36 兆円と 44 兆円になると見込まれた。シナリオ 3 の強制的な食品の改質では、CVD と CKD に罹患する人数がそれぞれ 1250 万人と 3860 万人、また医療費と介護費がそれぞれ 35 兆円と 43 兆円になると見込まれた。シナリオ 4 の減塩食品の利用者割合の増加では、CVD および CKD に罹患する人数がそれぞれ 1650 万人、4900 万人、また医療費と介護費がそれぞれ 45 兆円と 55.8 兆円になると見込まれた。

D．考察

本研究では、企業における減塩食品への改質と減塩食品の利用者の割合の変化による減塩の介入をもとに、高血圧、CVD、CKD の有病者数の変化から医療費・介護費の変化までを SD のシミュレーションモデルによりシナリオ別に評価した。我が国において、このような包括的な医療経済学的評価を行った初めての研究である。

シナリオ別の検討では、企業における減塩食品への改質に基づくシナリオ 2 とシナリオ 3 が、減塩食品の利用者割合の増加に基づくシナリオ 4 より、高血圧・CKD・CVD の有病者数の減少および医療費・介護費の減少の効果が大きいことが示唆されたが、シナリオ 4 においてもモデル内のフィードバックにより減塩食品の改質は少なからず促進されている。今回は企業における減塩食品への改質と減塩食品の利用者の割合の両者に直接介入するシナリオを検討しなかったが、今後の課題として介入の費用も考慮しつつ、最も費用対効果が高くなる総合的な介入のシナリオを検討する必要がある。

今回のモデルは、高血圧、CVD、CKD の有病者数や医療費、介護費までを含めた包括的なものであるが、今後医療経済学的評価を充実させるために障害調整生存年（disability-adjusted life year: DALY）をモデルに追加することが課題である。また、医療費・介護費の変化に人口の減少や高齢化を考慮するため[12]、年齢階級別の人口の変化をモデルに組み込むことも課題の一つである。さらに、食品群別の減塩可能量を考慮する場合は、本 SD モデルに詳細な情報を組み込むより、PRISM[3]でエクセルファイル（PRISM_Online_Lever_Setting_Workbook_2019.xlsx）を用いているように、別途予備的な計算を行い、その結果をモデルに反映させる方法も可能である。

本研究で作成したモデルは、今後改良を行った上で研究者や各自治体の関係者が利用可能なようにウェブサイトで公開することを目標としている。本報告書で示した結果は、あくまで現状のモデルでの推定値であり、2040 年までの高血圧・CVD・CKD の有病者数や医療費や介護費を予測するものではない。あくまでシナリオ別の特徴を見るために行った研究成果として理解されたい。

E．結論

全国を対象とするシミュレーションモデルを用いて、企業における減塩食品への改質と減塩食品の利用者の割合の変化による減塩の介入について包括的な医療経済学的評価を行った。高血圧、CVD、CKD の有病者数の変化から医療費・介護費の変化までを SD のシミュレーションモデルによりシナリオ別に評価した。特に強制的な食品の改質といった戦略を実行することにより食塩摂取量を減少させることは、大きな公衆衛生学的効果および医療経済学的効果を生む可能性が示された。今後本モデルの改良を行った上で、研究者や各自治体の関係者が利用可能なようにウェブサイトで公開することを目標としている。

F．研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

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

H. 引用文献
1. Ikeda N, Yamashita H, Hattori J, Kato H, Yoshita K, Nishi N. Reduction of Cardiovascular Events and Related Healthcare Expenditures through Achieving Population-Level Targets of Dietary Salt Intake in Japan: A Simulation Model Based on the National Health and Nutrition Survey. Nutrients. 2022; 14(17):3606. https://doi.org/10.3390/nu14173606

2. 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(18):3747. https://doi.org/10.3390/nu14183747

3. Homer J, Milstein B, Wile K, Pratibhu P, Farris R, Orenstein DR. Modeling the local dynamics of cardiovascular health: risk factors, context, and capacity. Prev Chronic Dis. 2008;5(2):A63.

4. 湊　宣明. 実践システム・シンキング 論理思考を超える問題解決のスキル. 講談社, 2016.

5. 西　信雄: 国家レベルの減塩に関するシミュレーションモデル. システムダイナミックス 12: 33-40, 2013

6. 総務省統計局. 人口推計（2022年10月1日国勢調査）
https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200524
（2024年3月29日アクセス可能）

7. Institute for Health Metrics and Evaluation. Global Burden of Disease, 2019.
https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/
（2024年3月29日アクセス可能）

8. 内閣府食育推進室. 食育に関する意識調査報告書. 平成24年3月.
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9929094/www8.cao.go.jp/syokuiku/more/research/h24/index.html
（2024年3月29日アクセス可能）

9. 厚生労働省. 令和元（2019）年度 国民医療費の概況.
https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/37-21.html
（2024年3月29日アクセス可能）

10. National Institute of Population and Social Security Research. The Financial Statistics of Social Security in Japan. 2021.
https://www.ipss.go.jp/site-ad/index_english/security-e.html
（2024年3月29日アクセス可能）

11. Statistics Bureau of Japan. National Accounts.
https://www.e-stat.go.jp/en/stat-search?page=1&layout=normal&toukei=00100409&survey=gdp&metadata=1&data=1
（2024年3月29日アクセス可能）

12. Nishi N, Ikeda N, Sugiyama T, Kurotani K, Miyachi M. Simulating the Impact of Long-Term Care Prevention Among Older Japanese People on Healthcare Costs From 2020 to 2040 Using System Dynamics Modeling. Front Public Health. 2020;8:592471. doi: 10.3389/fpubh.2020.592471.

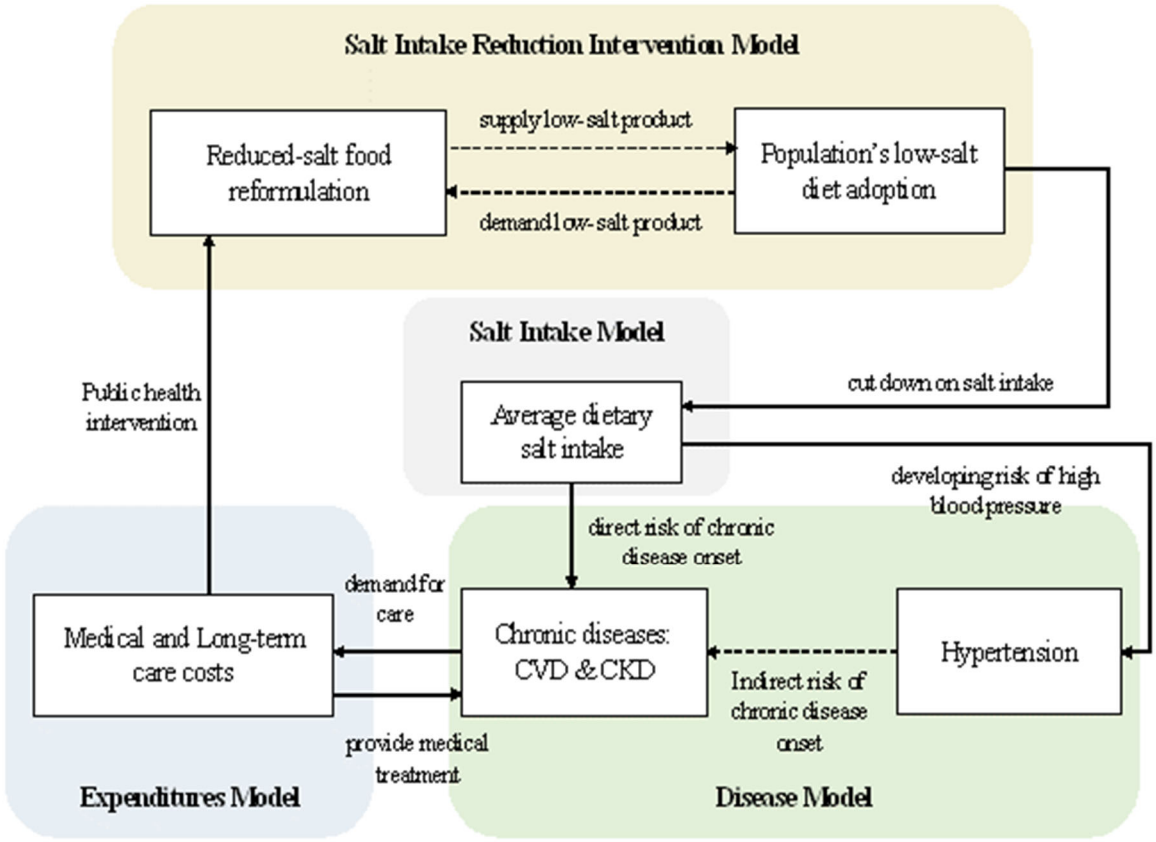

図 1　減塩介入に関するモデル全体の概要図

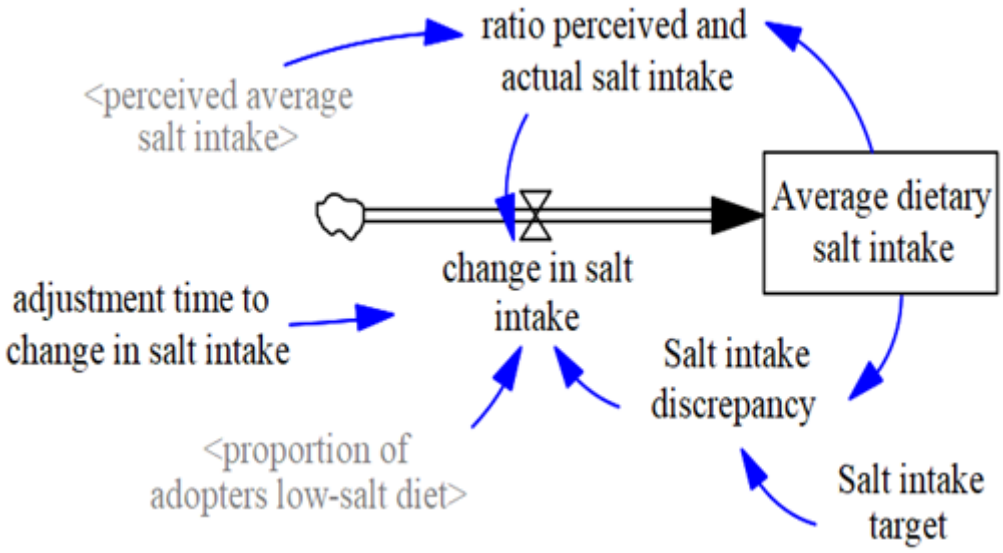

図 2　食塩摂取量モデル

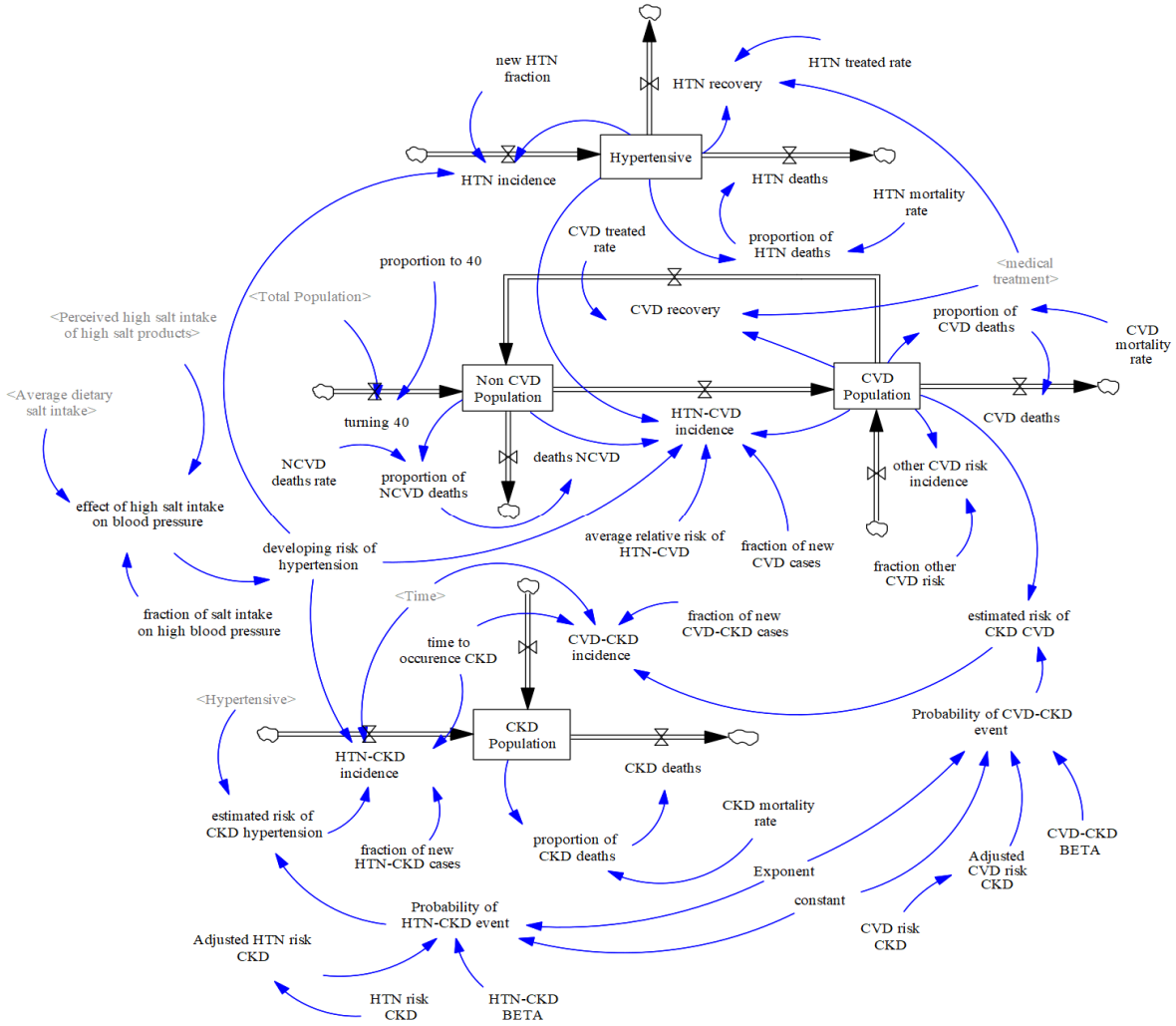
new HTN fraction
HTN recovery
HTN treated rate
Hypertensive
HTN incidence
HTN deaths
HTN mortality rate
proportion of HTN deaths
CVD treated rate
proportion to 40
<Total Population>
<medical treatment>
CVD recovery
proportion of CVD deaths
CVD mortality rate
<Perceived high salt intake of high salt products>
<Average dietary salt intake>
Non CVD Population
CVD Population
turning 40
HTN-CVD incidence
CVD deaths
NCVD deaths rate
proportion of NCVD deaths
deaths NCVD
other CVD risk incidence
effect of high salt intake on blood pressure
developing risk of hypertension
average relative risk of HTN-CVD
fraction of new CVD cases
fraction other CVD risk
<Time>
fraction of salt intake on high blood pressure
fraction of new CVD-CKD cases
estimated risk of CKD CVD
time to occurence CKD
CVD-CKD incidence
<Hypertensive>
Probability of CVD-CKD event
CKD Population
HTN-CKD incidence
CKD deaths
estimated risk of CKD hypertension
CKD mortality rate
fraction of new HTN-CKD cases
proportion of CKD deaths
Exponent
CVD-CKD BETA
Adjusted CVD risk CKD
constant
Probability of HTN-CKD event
CVD risk CKD
Adjusted HTN risk CKD
HTN risk CKD
HTN-CKD BETA

図 3　慢性疾患モデル

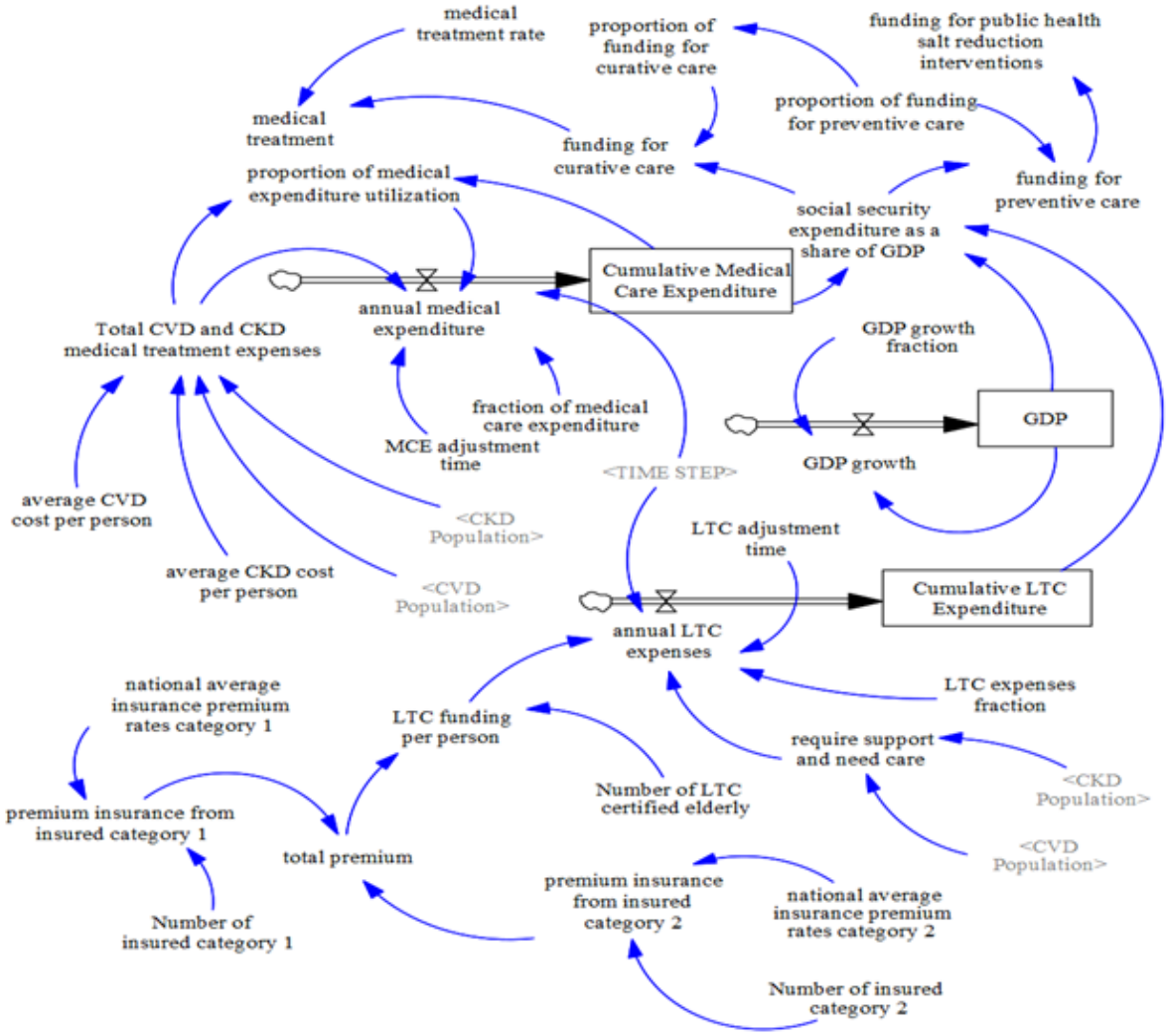

図 4　医療費・介護費モデル

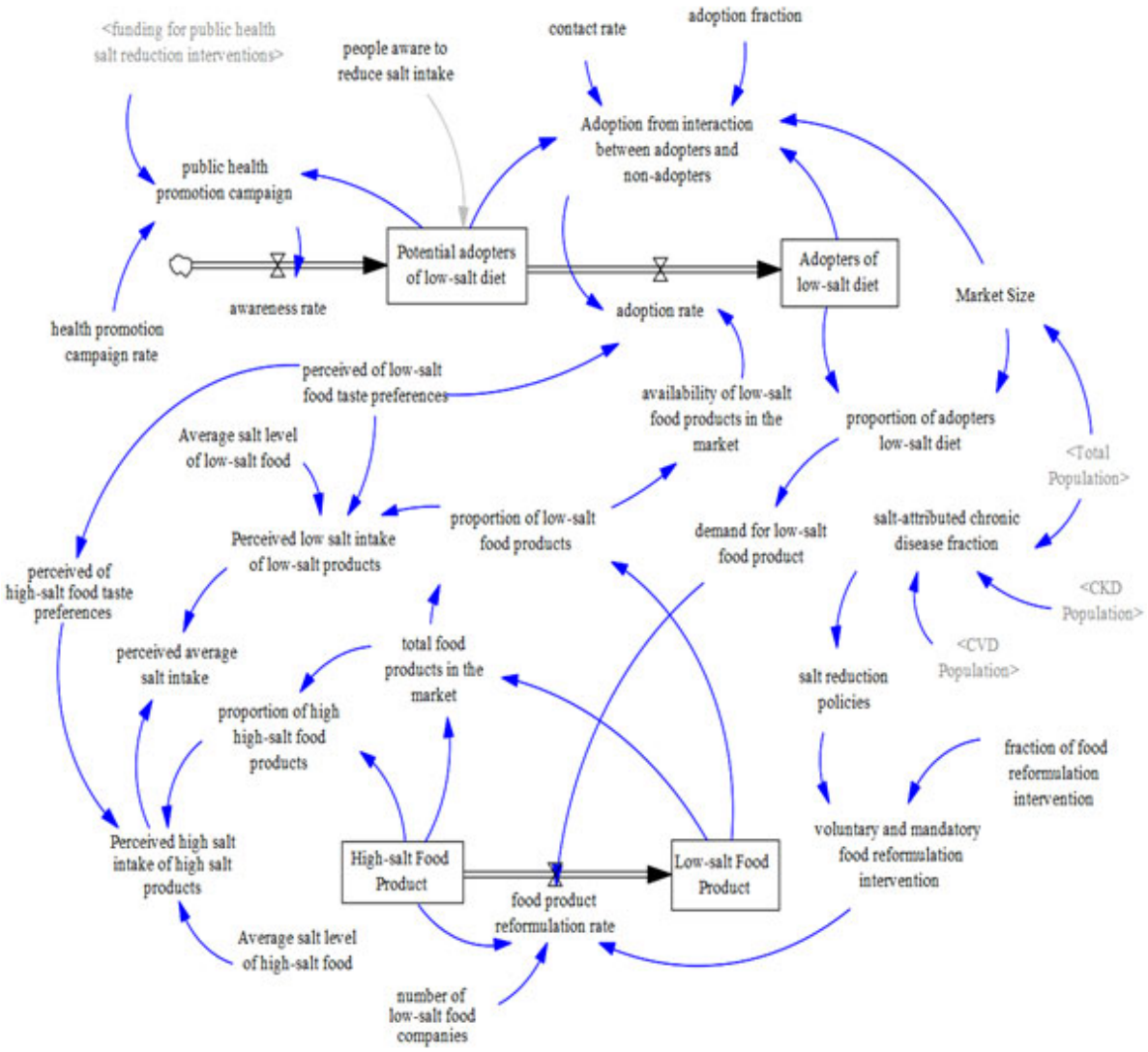
<funding for public health salt reduction interventions>
people aware to reduce salt intake
contact rate
adoption fraction
Adoption from interaction between adopters and non-adopters
public health promotion campaign
Potential adopters of low-salt diet
Adopters of low-salt diet
Market Size
awareness rate
adoption rate
health promotion campaign rate
perceived of low-salt food taste preferences
availability of low-salt food products in the market
proportion of adopters low-salt diet
Average salt level of low-salt food
<Total Population>
proportion of low-salt food products
demand for low-salt food product
salt-attributed chronic disease fraction
Perceived low salt intake of low-salt products
perceived of high-salt food taste preferences
<CKD Population>
perceived average salt intake
total food products in the market
<CVD Population>
salt reduction policies
proportion of high high-salt food products
fraction of food reformulation intervention
voluntary and mandatory food reformulation intervention
Perceived high salt intake of high salt products
High-salt Food Product
Low-salt Food Product
food product reformulation rate
Average salt level of high-salt food
number of low-salt food companies

図 5　減塩介入モデル

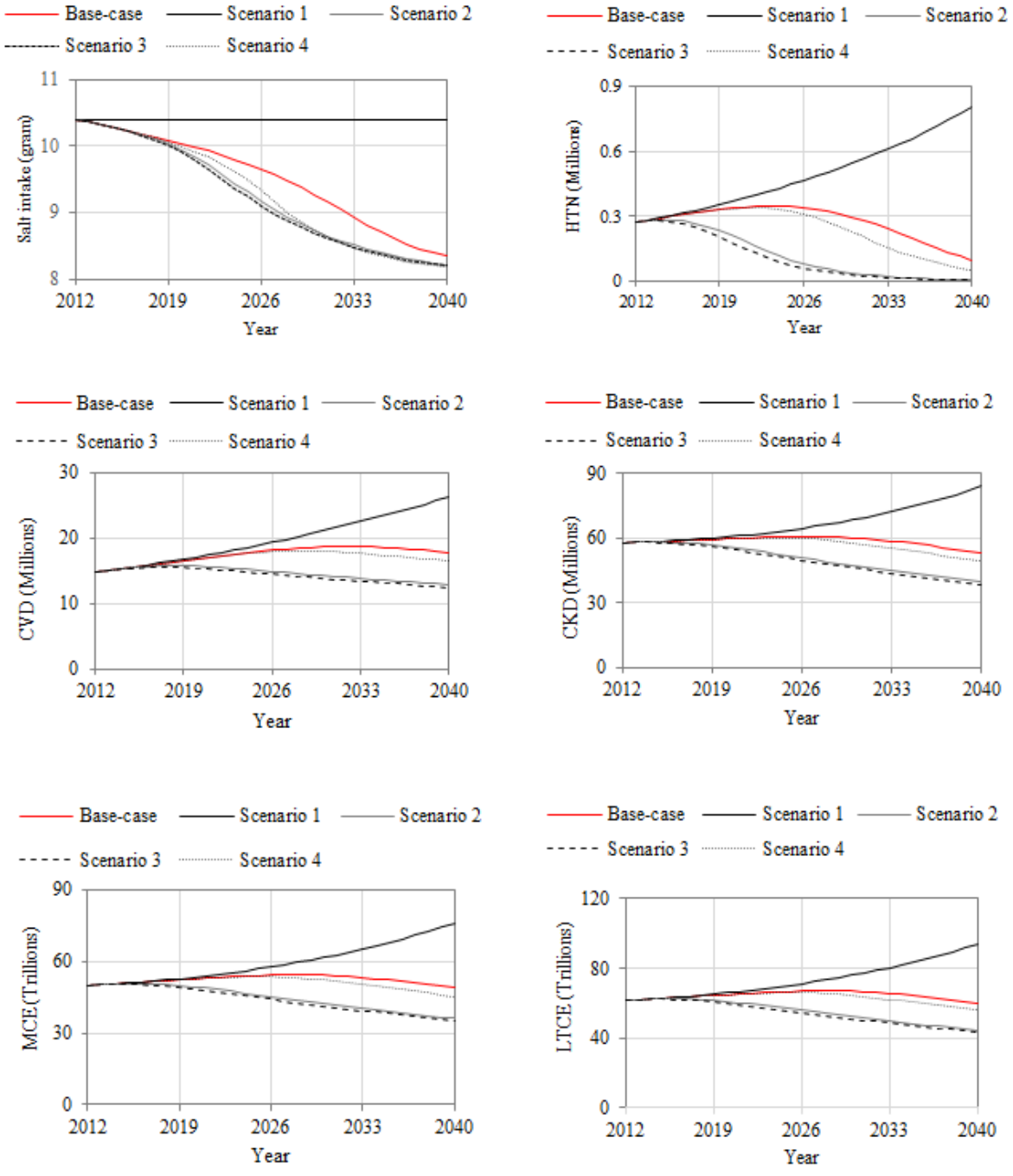

図６　主な変数のシナリオ別シミュレーション結果