令和 6-7 年度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)
(総合)研究報告書

最適化法を用いた食品摂取量の提示に関する文献レビュー

研究分担者　山口美輪[1,2]、岡田知佳[1]、
研究代表者　片桐　諒子[3]

[1]国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所

[2]立命館大学

[3]千葉大学大学院情報学研究院

【研究要旨】

本研究は、日本における新たな食品ベースの食事ガイドラインを作成するための基礎資料を提供することを目的とし、最適化法を用いて食事摂取量を提示した研究のスコーピングレビューを行った。

方法:PubMed、Web of Science、Google Scholar の文献検索データベースから、最適化法を用いて一般成人の最適な食品摂取量を提案した研究を対象とした。対象者や使用データなどの基本的特徴、制約条件、最適化の分析方法、結果、限界点に関する情報を抽出し、要約した。

結果:文献検索データベースから抽出された 898 件から、最終的に 40 件を分析対象とした。全体の 45%が環境負荷の軽減を目的に含めていた。食事摂取に関するデータは、国民栄養調査からの利用が 65%(n=25)、独自調査からの利用が 35%(n=14)であった。最適化で最も利用されたのは線形計画法 78%(n=31)で、 包絡分析法を用いたのは 13%(n=5)であった。制約条件に含めた栄養素数は中央値 27(最小 3、最大 35)で、全体 60 の参照文献のうち対象国内の食事摂取基準を参照した研究が最も多かった(47%, n=28)。制約条件には、環境負荷の指標として温室効果ガス排出量(43%)が最も多く、次いで食品価格(35%)であった。限界点として制約条件のトレードオフが記載されていたのは、食品と栄養素(45%)、食品・栄養素と環境(25%)、食品・栄養素と価格(13%)であった。

考察:本結果から、目的に環境負荷の軽減を含めた研究が 5 割近くみられたことから、この課題が重要視される傾向がみられた。対象研究では国民栄養調査の利用が多く、国民の平均的な食事摂取量の最適化を図るためには有用なデータである。最適化の手法においては、線形計画法が最も多く使用されていたが、非線形の関係を考慮した他の手法や併用も積極的に利用可能なことが示された。包絡分析法を用いた研究では、相対的に効率的な食品の構成に焦点を置いた食事が提案された。現時点では研究はそれほど多くないが、今後の利用増加が予想される。いずれの最適化法も、実現性を高めることに重点をおいていた。同時に、制約条件のトレードオフは重要な考慮事項であった。実現性を踏まえた上で、どの制約条件の優先度を上げるか、研究目的によって特徴がみえた。

結論:本レビューは、ある条件下の最適な食品摂取量を示した研究の全体像を明らかにした。今後、最適化された食事の実装とその効果に関するさらなる研究が必要である。

A. 背景と目的

2025 年 4 月から使用が予定されている「日本人の食事摂取基準(2025 年版)」は、エネルギーと各栄養素の基準値が示されているが、

この基準を満たすための具体的な食品とその摂取量についてはまだ示されていない。健康日本 21(第三次) が示す「栄養・食生活」6つの目標を達成するためにも [1]、適切な食事ガイドを通して、全ての世代で国民が健康的な食品選択ができることが期待される。

ドイツでは、国民に適切な食事摂取量を示す食事ガイドラインにおいて、最適化アルゴリズムを用いた[2]。最適化法は、ある目標達成のために、複数の制約(条件)の中から最も良いものを選び出すための数学的な手法であり、幅広い制約に対応する手法と特定の制約に合わせた手法に分類できる[3]。最適化法の中で代表的な手法のひとつである線形計画法は、特定の制約に合わせて最適な解が算出される手法である。Okubo et al.(2015) [4] は、日本の成人において、栄養目標を達成するための最適な食事摂取パターンを、線形計画法の最適化モデルを用いて設計した。また、線形計画法の考え方を応用した包絡分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)は、評価対象の相対的効率を測定するための手法で、複数の入力と出力の間の相互作用を捉えることができる[5]。日本では、食事の文化的受容性や栄養価が高く、価格が手ごろで、環境負荷が少ない食事の探索を目的として包括分析法を用いたモデルが実証された[6]。

このように、最適化法を用いて適切な食事摂取量を示す研究が複数発表されている中で、これらの研究をレビューした研究が存在すれば、日本人の適切な食事ガイドを作成する手法として、この最適化法が有用であるかを検討するための基礎資料となると考えられる。しかし、調理済み食品[7]、低栄養[8]、価格[9, 10]を考慮した適切な食品摂取量を算出する方法論の中で最適化法(主に線形計画法)について記載されたレビューはあるが、食品摂取量を示す目的として最適化法を用いた研究の特徴を整理した報告は、調べた限りでは見られない。また、食事の美味しさや実現可能性など、最適化法の考慮すべき点を整理することで、本手法を用いる際に対応策の検討が可能になる。

そこで本研究は、最適化法を用いて最適な食品摂取量を示した研究の目的・対象、制約条件、結果、限界点をレビューすることを目的とした。。

B. 方法

本研究では、最適化法を用いて最適な食品摂取量を示した研究を網羅的に概観するため、バイアスリスクの評価などを行わないスコーピングレビューを行うこととした。

本研究では個人情報を扱わないため、「人を対象とする生命科学・医学系研究に関する倫理指針」に該当しない。

１．文献検索

文献検索データベースは、PubMed、Web of Science、Google Scholar を用いた。研究者 2 名が独立して 2024 年 5 月 30 日から 6 月 3 日の間に検索し、結果の一致を確認した。PubMed 及び Web of Science の検索式は表 1、Google Scholar の検索設定は表 2 に示す。包絡分析法は、従来の最適化法を展開した手法のため、文献検索においては、検索式を別に行った。

次に、タイトルと要旨を確認する 1 次スクリーニング、原文を確認する 2 次スクリーニングを順に行った。1 次、2 次スクリーニングとも、以下の条件を基に研究を抽出した。1 次スクリーニングは研究者 2 名が独立して 2024 年 6 月 7 日から 7 月 23 日まで実施し、2 次スクリーニングは研究者 1 名が 2024 年 8 月 7 日から 2025 年 1 月 29 日まで実施し、別の 1 名が確認を行った。

① 最適化法 (Optimization)、または包絡分析法 (Data Envelopment Analysis) の利用

② 最適な食品摂取量を提案する目的
③ 健康の維持増進、及び疾患予防のための食事
④ 18 歳以上の一般成人対象（妊産婦、および療養患者は含まない）
⑤ 英語の原著論文

２．分析方法

得られた情報を基に、以下の内容で整理した。

１）対象文献の基本情報

対象文献の基本情報を把握するため、研究実施国、目的、対象者、利用データを整理した。利用データは、調査の種類（国を代表する栄養調査[以下、国民栄養調査とする]または国以外の機関が行う独自調査)、調査年、食事調査法に分類した。対象者の年齢について、65 歳以上を含めた文献の合計数と全体に対する割合を算出した。

２）分析方法と制約条件

最適化法と包絡分析法の分析方法、および制約条件を分類した。また、選択した分析法に基づき、どのような項目を制約条件として含めたかを調べた。項目は、環境負荷（温室効果ガス排出量、水・土地・化石燃料の使用量)、食品価格、食事摂取（現状のエネルギー摂取量、推奨エネルギー量、統一のエネルギー摂取量、特定食品・栄養素)に分類した。分類した項目については、該当数と全体に対する割合を算出した。

３）制約条件に含めた栄養素と基準値設定のための参照先

健康的な食事とするために制約条件に含めた栄養素数をまとめた。また、栄養素摂取量の基準値の参照先を、研究実施国の食事摂取基準、食事ガイドライン、健康的な食事指標（インデックス)、政府機関からの出版物、国連機関からの出版物、学術機関からの出版物に分類した。栄養素数は中央値、最小値、最大値を算出した。分類した項目については、該当数と全体に対する割合を算出した。

３)摂取量を提示した食品数、結果の概要、最適化条件のトレードオフ

摂取量を提示した食品数を示し、結果の概要を示した。食品数は中央値、最小値、最大値を算出した。最適化した食品摂取量を男女別、及び世代別に提示した有無を調べた。なお、1 つ以上の世代別に分析している研究は、世代別とした。

最適化法または包絡分析法に関する限界点として、分析過程で生じた最適化条件のトレードオフに関して以下のように分類した：食品と栄養素、食品・栄養素と価格、食品・栄養素と環境。

C. 結果

１．対象研究

検索式で抽出された文献 898 件（PubMed 547 件、Web of Science 337 件, Google scholar 14 件）から重複文献を除外し、765 件で 1 次スクリーニングを実施した。対象文献の基準を満たさない 578 件を除外し、178 件を 2 次スクリーニングした結果、最終的に 40 件を分析対象とした（図 1)。

2. 対象研究の基本情報

実施国は、全体に対して 78%（n=31)が欧米であった。研究の目的の中で、健康的な食事に加えて環境負荷を含めた研究が 45%(n=18)みられた(表 3)。自国の食事ガイドの作成資料としたのは、7.5%（n=3)だった。対象者は中央値 1,711 名(最小:31 名、最大 37,687

名）を対象とした。65 歳以上の高齢者を含んだ研究は 53%（n=21）であった。分析に用いた食事摂取量のデータは、国民栄養調査からの利用が 65%（n=26）、独自調査からの利用が 35%（n=14）であった。これらの調査の中で、食事記録法 50%（n=20）、24 時間思い出し法 43%（n=17）、 食物摂取頻度調査票（FFQ: food frequency questionnaire）18%（n=7）、食事歴法 2.5%（n=1）によって食事調査が行われた（3 件の併用を含む）。FFQ は、24 時間思い出し法との併用の国民栄養調査 1 件以外、独自調査での利用であった。

3. 分析方法と制約条件

従来の最適化法で用いられたのは、線形計画法 78%（n=31）、非線形計画法 15%（n=6）、包絡分析法 13%（n=5）、層的クラスタリング分析 2.5%（n=1）であった。このうち、線形計画法に加えて非線形計画法を併用した 2 件、階層的クラスタリング分析を併用した 1 件がみられた。 栄養素摂取量以外で考慮された制約条件は（複数選択を含む）、温室効果ガス排出量 43%（n=17）、水・土地・化石燃料の使用量 7.5%（n=3）、食品価格 35%（n=14）であった。総エネルギー摂取量に関して、対象者の現状摂取量を考慮したものが 48%（n=19）、推奨量としたのは 38%（n=15）、その他 2000 kcal/日または 2500 kcal/日で摂取量を統一したものが 15%（n=6）みられた。

4. 制約条件に含めた栄養素

制約条件に含めた栄養素数は、中央値 27（最小 3、最大 35）であった（図 2）。栄養素の種類と基準値は、計 60 の参照資料のうち、対象国内の食事摂取基準を参照した研究が最も多く（47%, n=28）、次いで世界保健機関（WHO: World Health Organization）や国際連合食糧農業機関（FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations）などの国連機関の出版物であった（17%, n=10）（図 3）。

5. 分析結果及び制約条件のトレードオフ

提示された食品数は中央値 23（最小値 5、最大値 126）であった（表 4）。食品摂取量を男女別に示したものが 45%（n=18）、世代別に示したものが 23%（n=9）であった（併記含む）。全体を通して最適化されたモデルの下で食品摂取量が示されたが、全ての制約条件を適切に満たすことの限界点を記載した研究は 78%（n=31）であった。制約条件のトレードオフとして特にあげられたのは、食品と栄養素数が 45%（n=15）、食品・栄養素と価格が 13%（n=5）、食品・栄養素と環境が 25%（n=10）であった（併記含む）。

D. 考察

本研究のレビューより、ある条件下の最適な食品摂取量を示すには、最適化法（特に線形計画法）及び包絡分析法のモデルが有用であることが示唆された。ただし、制約条件がトレードオフになる可能性も考慮する必要がある。

7 割が欧米からの報告であり、目的に環境負荷を含めた研究は 4.5 割であった。地球環境に配慮した食事への対策は、グローバルレベルで関心の高い課題である[11, 12]。本結果から、環境負荷を軽減する食事に関する研究は、欧米を中心に進んでいる可能性がある。食事摂取のデータについては、国民栄養調査からの利用が 6 割を超えていた。各国で調査方法は異なるが、各世代の分布が比較的均等に収集され[13]、国内の平均的な食事摂取量の情報が得られる国民栄養調査の 2 次利用は、最適化された食事の一般化を目指すためには有用である。食事記録法及び 24 時間思い出し法の食事調査法の利用の傾向は、諸外国の国民栄養調査を調べたレビュー研究と同じであった[14]。FFQは限られた食品数から摂取量を推定する点で限界点はあるものの、比較的簡易に妥当性のある摂取量が推定できるので[15]、独自調査に有用である。

分析で用いられたのは、線形計画法が約 8 割と最も多かった。線形計画法は、線形の関連であることを前提に、比較的容易に定式化して最適解を求めることができる[16]。しかし、非線形の関連を含む場合は近似的な解となることがある。非線形計画法を用いた 4 つの研究は、制約条件と食事摂取量の最適化に非線形の関連を仮定したことになる[17-20]。また、最適化法は、受容性を考慮した制約条件を含まない場合、最適化した食事は実現性の低い食品項目で構成される可能性がある[21]。今回の調査で対象者における現状の総エネルギー摂取量を保つことを制約条件に含めた研究が約半数みられたことから、受容性を考慮することの重要性が示唆された。

一方で、包絡分析法を使用した5つの研究は、総エネルギー摂取量を 2000-2500 kcal/日に統一し、ある条件下で相対的により効率的な食品または栄養素の構成に焦点を置いていた[21-24]。包絡分析法は、実現性が高く文化的受容性が高い食事であることを前提に分析されるため、現状の総エネルギー摂取量を考慮した制約条件を設けなかったと考えられる。包絡分析法は、効率的な評価対象単位（DMU：Decision Making Unit）、ここでは食事（食品・栄養素の構成）を比較基準として、非効率な食事が現在よりも同程度かより健康的で他の条件にも近い食事が示される[21]。

また、分析に限らず食品価格は 3.5 割程度の研究が考慮しており、実現性を高めるためには重要な項目である。所得や家族構成によって受入れ可能な価格は異なるため、対象者に合わせた価格なのか、国内の平均的なデータから設定された価格なのか、注意が必要である。

制約条件として環境負荷を用いた半数の研究の中で、温室効果ガス排出量を用いた研究が最も多く、次いで水、土地、化石燃料の使用量であった。EAT ランセット委員会が示した環境負荷の指標にもこれらが含まれており、近年重要視されている[11]。EAT ランセット委員会は、環境負荷の少ないプラネタリーヘルスダイエットを示し、総摂取エネルギー2500 kcal/日に基づき、牛肉などの赤肉を主とする動物性食品の摂取量を抑え、砂糖や精製穀物を削減し、植物性食品を中心とした食品構成になっている。プラネタリーヘルスダイエットと 2 型糖尿病の発生率の低さと関連していたことや、がんや心血管疾患の発生率が少なかったことが示された[25]。一方で、動物性食品が少ないことによる必要栄養素の摂取不足が懸念されている。最適な食品の組合せや摂取量を示すため、最適化法が利用されていると考えられる。

制約条件に含めた栄養素数は、主に対象国の食事摂取基準が主であった。食事ガイドラインや政府機関からの出版物は、食事摂取基準とも関連していることから、重要な参照先であることが分かる。また、WHO や FAO などから出版されたビタミン、ミネラル[26]やアミノ酸[27]、脂肪酸[28]、糖類[29]の摂取に関する情報は、国内の食事摂取基準を補足する資料として有用である。本対象研究で健康的な食事指標として利用されていたのは、PRIME (Preventable Risk Integrated ModEl)[30]、NRF (Nutrient Rich Food Index) 9.3[31]、NRD (Nutrient Rich Diet) 9.3[32], 15.3[6, 33, 34]であった。いずれも、食事の総合的な栄養バランスを評価するための指標であり、諸外国の食事とも比較しやすいことが利点である。

本対象研究では、示された食品数の中央値は 23 であった。特定の食品に焦点をあてた研究は少ないなど、研究目的によって示す食品数は異なるはずである。結果として示す食品数、および栄養素を含む制約条件に入れる項目数が多い場合は、分析が複雑になり、モデル化が難しくなると予想される。本研究結果の食品数の最大値 126 が、結果の解釈をする上でも現実的な上限値と考えられる。対象研究では、最適化した食品摂取量を男女別に提示したのは全体の 4.5 割でやや多く、世代別は

約 3 割とやや少なかった。男女別、及び世代別の制約条件を設けることに加え、食事の特性を踏まえた最適化の食品摂取量を示すことは、今後の実装の点から重要である。また、制約条件のトレードオフも重要な検討事項である。必須とする制約条件を狭めると、他の制約条件が満たし難くなる傾向にある。また、実現可能性を重視する場合は、現在の食事からの改善の程度が低くなる可能性もある。最適化を検討する際は、制約条件のトレードオフは発生することを前提とする必要がある。

本研究は、対象者個々の食事摂取量のデータを用いた最適化法の分析方法と結果について整理した。研究によっては、国内の家計調査[35]や、FAO（国際連合食糧農業機関）が提供する、諸外国の食料需給に関する包括的なデータベースなどを用いて平均化した食事摂取量のデータを用いた研究も存在する[36]。ただし、性別や世代別などの対象者の特徴に沿った食事ガイドラインを作成するためには、対象者の基本情報の整理を含めた本レビューが重要な資料となる。

しかし、本研究にはいくつかの限界点が存在する。1つ目は、選択バイアスである。2 名の研究者によって確認を行ったものの、対象研究の見落としは否定できない。また、検索データベースが 3 種類に限られたことも、抽出研究が限定された可能性がある。2つ目は、本研究は、 食事の最適化に関する研究について包括的に理解するためにスコーピングレビューを用い、対象研究の質的な評価は加味しなかった。今後、システマティックレビューや、最適化の食事の効果についてのメタアナリシスが必要となる。3つ目は、本研究によって最適化された食事の実現性の程度は明らかにされなかった。実装化のためには、科学的根拠に基づく介入を日常の食事として実施するときの阻害要因や促進要因の検証が必要である。

E. 結論

本研究により、食事の最適化に用いる手法は線形計画法が最も多く、包絡分析法は現在の食事や食文化を保ちながら環境への負荷を抑制させることを重視した研究に用いられていたことが明らかになった。 日本の新たな食品ベースの食事ガイドライン作成のためには、目的を明確化し、最適化の手法を決定することが重要である。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

Yamaguchi M, Okada C, Katagiri R. A Scoping Review of Dietary Optimization Studies Proposing Food Intake Levels. 第36回日本疫学会学術総会. 2026 年 1 月 28 日～ 30 日. （於：出島メッセ長崎）

H. 知的所有権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

I. 参考文献

1. **健康日本 21（第三次）** [https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/kenkounippon21_00006.html]
2. German Nutrition Society (DGE) **Gut essen und trinken – die**

DGE-Empfehlungen. In.; 2024.

3. Shamir R: **The Efficiency of the Simplex Method: A Survey**. *Management Science* 2019, ***33***(3):301–334.
4. Okubo H, Sasaki S, Murakami K, Yokoyama T, Hirota N, Notsu A, Fukui M, Date C: **Designing optimal food intake patterns to achieve nutritional goals for Japanese adults through the use of linear programming optimization models**. *Nutr J* 2015, **14**:57.
5. Anderson TR, Rouse P, Borja R, Hernandez IP, Tobar F, Setiowijoso L: **Extending Productivity Research Frontiers: DEA Resource of Datasets and Errata**. *Journal of Productivity Analysis* 2003, **19**(2):271-275.
6. Sugimoto M, Temme EHM, Biesbroek S, Kanellopoulos A, Okubo H, Fujiwara A, Asakura K, Masayasu S, Sasaki S, Van't Veer P: **Exploring culturally acceptable, nutritious, affordable and low climatic impact diet for Japanese diets: proof of concept of applying a new modelling approach using data envelopment analysis**. *Br J Nutr* 2022, **128**(12):2438-2452.
7. Osendarp S, Rogers B, Ryan K, Manary M, Akomo P, Bahwere P, Belete H, Zeilani M, Islam M, Dibari F *et al*: **Ready-to-use foods for management of moderate acute malnutrition: considerations for scaling up production and use in programs**. *Food Nutr Bull* 2015, **36**(1 Suppl):S59-64.
8. Mahal A, Karan AK: **Adequacy of dietary intakes and poverty in India: trends in the 1990s**. *Econ Hum Biol* 2008, **6**(1):57-74.
9. Henson S: **LINEAR-PROGRAMMING ANALYSIS OF CONSTRAINTS UPON HUMAN DIETS**. *Journal of Agricultural Economics* 1991, **42**(3):380-393.
10. Fletcher LR, Soden PM, Zinober ASI: **LINEAR-PROGRAMMING TECHNIQUES FOR THE CONSTRUCTION OF PALATABLE HUMAN DIETS**. *Journal of the Operational Research Society* 1994, **45**(5):489-496.
11. The Eat-Lancet Commission: **Summary Report of the EAT-Lancet Commission: Food Planet Health**. In.; 2019.
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization: **Sustainable healthy diets – Guiding principles**. In. Rome; 2019.
13. 越田 詠, 岡田 知, 岡田 恵, 松本 麻, 村井 詩, 瀧本 秀: **日本と諸外国における国を代表する栄養調査の比較**. *栄養学雑誌* 2019, **77**(6):183-192.
14. Okada E, Nakade M, Hanzawa F, Murakami K, Matsumoto M, Sasaki S, Takimoto H: **National Nutrition Surveys Applying Dietary Records or 24-h Dietary Recalls with Questionnaires: A Scoping Review**. *Nutrients* 2023, **15**(22):4739.
15. Cade J, Thompson R, Burley V, Warm D: **Development, validation and utilisation of food-frequency**

questionnaires - a review. *Public Health Nutr* 2002, **5**(4):567-587.

16. Billionnet A: **Redundancy Allocation for Series-Parallel Systems Using Integer Linear Programming**. *IEEE Transactions on Reliability* 2008, **57**(3):507-516.
17. Dussiot A, Fouillet H, Wang J, Salomé M, Huneau JF, Kesse-Guyot E, Mariotti F: **Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc-a diet optimization study in French adults**. *The American journal of clinical nutrition* 2022, **115**(3):958-969.
18. Kesse-Guyot E, Allès B, Brunin J, Fouillet H, Dussiot A, Mariotti F, Langevin B, Berthy F, Touvier M, Julia C *et al*: **Nutritionally adequate and environmentally respectful diets are possible for different diet groups: an optimized study from the NutriNet-Santé cohort**, vol. 116. United States; 2022.
19. Scarborough P, Kaur A, Cobiac L, Owens P, Parlesak A, Sweeney K, Rayner M: **Eatwell Guide: modelling the dietary and cost implications of incorporating new sugar and fibre guidelines**. *BMJ open* 2016, **6**(12):e013182.
20. Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot MJ, Darmon N: **Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption?** *PloS one* 2018, **13**(2):e0191767.
21. Kanellopoulos A, Gerdessen JC, Ivancic A, Geleijnse JM, Bloemhof-Ruwaard JM, Van't Veer P: **Designing healthier and acceptable diets using data envelopment analysis**. *Public health nutrition* 2020, **23**(13):2290-2302.
22. Mertens E, Kuijsten A, Kanellopoulos A, Dofková M, Mistura L, D'Addezio L, Turrini A, Dubuisson C, Havard S, Trolle E *et al*: **Improving health and carbon footprints of European diets using a benchmarking approach**. *Public health nutrition* 2021, **24**(3):565-575.
23. Sugimoto M, Temme EHM, Biesbroek S, Kanellopoulos A, Okubo H, Fujiwara A, Asakura K, Masayasu S, Sasaki S, Van't Veer P: **Exploring culturally acceptable, nutritious, affordable and low climatic impact diet for Japanese diets: proof of concept of applying a new modelling approach using data envelopment analysis**. *The British journal of nutrition* 2022, **128**(12):2438-2452.
24. Mertens E, Biesbroek S, Dofková M, Mistura L, D'Addezio L, Turrini A, Dubuisson C, Havard S, Trolle E, Geleijnse J *et al*: **Potential Impact of Meat Replacers on Nutrient Quality and Greenhouse Gas Emissions of Diets in Four European Countries**. *SUSTAINABILITY* 2020, **12**(17).

25. Ojo O, Jiang Y, Ojo OO, Wang X: **The Association of Planetary Health Diet with the Risk of Type 2 Diabetes and Related Complications: A Systematic Review**. *Healthcare (Basel)* 2023, **11**(8).
26. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations: **Vitamin and mineral requirements in human nutrition**. In., 2nd ed edn. Geneva (Switzerland); Rome (Italy); 2004.
27. World Health Organization FaAOotUN, United Nations University,: **Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation**. In. Geneva: World Health Organization; 2007.
28. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization: **Interim Summary of Conclusions and Dietary Recommendations on Total Fat & Fatty Acids, From the Joint FAO/WHO Expert Consultation on Fats and Fatty Acids in Human Nutrition**. In. Geneva: World Health Organization; 2008.
29. World Health Organization: **Guideline: Sugars intake for adults and children**. In. Geneva: World Health Organization; 2015.
30. Verly E, Jr., Machado Í E, Meireles AL, Nilson EAF: **Avoidable diet-related deaths and cost-of-illness with culturally optimized modifications in diet: The case of Brazil**. *PLoS One* 2023, **18**(7):e0288471.
31. Vieux F, Maillot M, C DR, Drewnowski A: **Designing Optimal Breakfast for the United States Using Linear Programming and the NHANES 2011-2014 Database: A Study from the International Breakfast Research Initiative (IBRI)**. *Nutrients* 2019, **11**(6).
32. Kanellopoulos A, Gerdessen JC, Ivancic A, Geleijnse JM, Bloemhof-Ruwaard JM, Van't Veer P: **Designing healthier and acceptable diets using data envelopment analysis**. *Public Health Nutr* 2020, **23**(13):2290-2302.
33. Mertens E, Kuijsten A, Kanellopoulos A, Dofková M, Mistura L, D'Addezio L, Turrini A, Dubuisson C, Havard S, Trolle E *et al*: **Improving health and carbon footprints of European diets using a benchmarking approach**. *Public Health Nutr* 2021, **24**(3):565-575.
34. Mertens E, Biesbroek S, Dofková M, Mistura L, D'Addezio L, Turrini A, Dubuisson C, Havard S, Trolle E, Geleijnse JM *et al*: **Potential Impact of Meat Replacers on Nutrient Quality and Greenhouse Gas Emissions of Diets in Four European Countries**. *Sustainability* 2020, **12**(17).
35. Eini-Zinab H, Sobhani SR, Rezazadeh A: **Designing a healthy, low-cost and environmentally sustainable food basket: an optimisation study**. *Public Health Nutr* 2021, **24**(7):1952-1961.

36. Liu X, Xin L, Li X: **The global nutrition can be greatly improved with diet optimization**. *Resources, Conservation and Recycling* 2024, **202**:107343.
37. Alaini R, Rajikan R, Elias SM: **Diet optimization using linear programming to develop low cost cancer prevention food plan for selected adults in Kuala Lumpur, Malaysia**. *BMC Public Health* 2019, **19**(Suppl 4):546.
38. Brink E, van Rossum C, Postma-Smeets A, Stafleu A, Wolvers D, van Dooren C, Toxopeus I, Buurma-Rethans E, Geurts M, Ocké M: **Development of healthy and sustainable food-based dietary guidelines for the Netherlands**. *Public Health Nutr* 2019, **22**(13):2419-2435.
39. Brouzes CMC, Darcel N, Tomé D, Bourdet-Sicard R, Youssef Shaaban S, Gamal El Gendy Y, Khalil H, Ferguson E, Lluch A: **Local Foods Can Increase Adequacy of Nutrients Other than Iron in Young Urban Egyptian Women: Results from Diet Modeling Analyses**. *J Nutr* 2021, **151**(6):1581-1590.
40. Clerfeuille E, Maillot M, Verger EO, Lluch A, Darmon N, Rolf-Pedersen N: **Dairy products: how they fit in nutritionally adequate diets**. *J Acad Nutr Diet* 2013, **113**(7):950-956.
41. Darmon N, Ferguson EL, Briend A: **Impact of a cost constraint on nutritionally adequate food choices for French women: an analysis by linear programming**. *J Nutr Educ Behav* 2006, **38**(2):82-90.
42. Donati M, Menozzi D, Zighetti C, Rosi A, Zinetti A, Scazzina F: **Towards a sustainable diet combining economic, environmental and nutritional objectives**. *Appetite* 2016, **106**:48-57.
43. Dos Santos Q, Sichieri R, Darmon N, Maillot M, Verly-Junior E: **Food choices to meet nutrient recommendations for the adult Brazilian population based on the linear programming approach**. *Public Health Nutr* 2018, **21**(8):1538-1545.
44. Dussiot A, Fouillet H, Perraud E, Salomé M, Huneau JF, Kesse-Guyot E, Mariotti F: **Nutritional issues and dietary levers during gradual meat reduction - A sequential diet optimization study to achieve progressively healthier diets**. *Clin Nutr* 2022, **41**(12):2597-2606.
45. Gao X, Wilde PE, Maras JE, Bermudez OI, Tucker KL: **The maximal amount of α-tocopherol intake from foods alone in US adults (1994-1996 CSFII) An analysis by linear programming**. In: *Vitamin E and Health. Volume 1031*, edn. Edited by Kelly F, Meydani M, Packer L; 2004: 385-386.
46. Hallinan S, Rose C, Buszkiewicz J, Drewnowski A: **Some Ultra-Processed Foods Are Needed for Nutrient Adequate Diets: Linear Programming Analyses of the Seattle Obesity Study**. *Nutrients* 2021, **13**(11).

47. Horgan GW, Perrin A, Whybrow S, Macdiarmid JI: **Achieving dietary recommendations and reducing greenhouse gas emissions: modelling diets to minimise the change from current intakes**. *Int J Behav Nutr Phys Act* 2016, **13**:46.
48. Johnson-Down L, Willows N, Kenny TA, Ing A, Fediuk K, Sadik T, Chan HM, Batal M: **Optimisation modelling to improve the diets of First Nations individuals**. *J Nutr Sci* 2019, **8**:e31.
49. Kramer GF, Tyszler M, Veer PV, Blonk H: **Decreasing the overall environmental impact of the Dutch diet: how to find healthy and sustainable diets with limited changes**. *Public Health Nutr* 2017, **20**(9):1699-1709.
50. Macdiarmid JI, Kyle J, Horgan GW, Loe J, Fyfe C, Johnstone A, McNeill G: **Sustainable diets for the future: Can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet?** *Am J Clin Nutr* 2012, **96**(3):632-639.
51. Maillot M, Vieux F, Amiot MJ, Darmon N: **Individual diet modeling translates nutrient recommendations into realistic and individual-specific food choices**. *Am J Clin Nutr* 2010, **91**(2):421-430.
52. Maillot M, Drewnowski A: **Energy Allowances for Solid Fats and Added Sugars in Nutritionally Adequate U.S. Diets Estimated at 17-33% by a Linear Programming Model**. *Journal of Nutrition* 2011, **141**(2):333-340.
53. Maillot M, Drewnowski A: **A Conflict Between Nutritionally Adequate Diets and Meeting the 2010 Dietary Guidelines for Sodium**. *American Journal of Preventive Medicine* 2012, **42**(2):174-179.
54. Maillot M, Monsivais P, Drewnowski A: **Food pattern modeling shows that the 2010 Dietary Guidelines for sodium and potassium cannot be met simultaneously**. *Nutr Res* 2013, **33**(3):188-194.
55. Masino T, Colombo PE, Reis K, Tetens I, Parlesak A: **Climate-friendly, health-promoting, and culturally acceptable diets for German adult omnivores, pescatarians, vegetarians, and vegans - a linear programming approach**. *Nutrition* 2023, **109**:111977.
56. Masset G, Monsivais P, Maillot M, Darmon N, Drewnowski A: **Diet optimization methods can help translate dietary guidelines into a cancer prevention food plan**. *J Nutr* 2009, **139**(8):1541-1548.
57. Perignon M, Masset G, Ferrari G, Barré T, Vieux F, Maillot M, Amiot MJ, Darmon N: **How low can dietary greenhouse gas emissions be reduced without impairing nutritional adequacy, affordability and acceptability of the diet? A modelling study to guide sustainable food choices**. *Public Health Nutr* 2016, **19**(14):2662-2674.
58. Sobhani SR, Rezazadeh A, Omidvar

N, Eini-Zinab H: **Healthy diet: a step toward a sustainable diet by reducing water footprint**. *J Sci Food Agric* 2019, **99**(8):3769-3775.

59. Song GB, Li MJ, Fullana-i-Palmer P, Williamson D, Wang YX: **Dietary changes to mitigate climate change and benefit public health in China**. *Science of the Total Environment* 2017, **577**:289-298.

60. Vieux F, Perignon M, Gazan R, Darmon N: **Dietary changes needed to improve diet sustainability: are they similar across Europe?** *Eur J Clin Nutr* 2018, **72**(7):951-960.

61. Zahra NL, Chandra DN, Mansyur M, Fahmida U: **Designing Optimal Food-Based Recommendations and Nutrient-Dense Canteen Menu for Oil and Gas Workers Using Linear Programming: A Preliminary Study in Oil and Gas Worksite in East Kalimantan, Indonesia**. *Nutrients* 2023, **15**(19).

62. Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot MJ, Darmon N: **Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption?** *PLoS One* 2018, **13**(2):e0191767.

63. Grasso AC, Olthof MR, van Dooren C, Broekema R, Visser M, Brouwer IA: **Protein for a Healthy Future: How to Increase Protein Intake in an Environmentally Sustainable Way in Older Adults in the Netherlands**. *J Nutr* 2021, **151**(1):109-119.

64. Eustachio Colombo P, Elinder LS, Nykänen EA, Patterson E, Lindroos AK, Parlesak A: **Developing a novel optimisation approach for keeping heterogeneous diets healthy and within planetary boundaries for climate change**. *Eur J Clin Nutr* 2024, **78**(3):193-201.

65. Dussiot A, Fouillet H, Wang J, Salomé M, Huneau JF, Kesse-Guyot E, Mariotti F: **Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc-a diet optimization study in French adults**. *Am J Clin Nutr* 2022, **115**(3):958-969.

66. Kesse-Guyot E, Allès B, Brunin J, Fouillet H, Dussiot A, Mariotti F, Langevin B, Berthy F, Touvier M, Julia C *et al*: **Nutritionally adequate and environmentally respectful diets are possible for different diet groups: an optimized study from the NutriNet-Santé cohort**. *Am J Clin Nutr* 2022, **116**(6):1621-1633.

67. Scarborough P, Kaur A, Cobiac L, Owens P, Parlesak A, Sweeney K, Rayner M: **Eatwell Guide: modelling the dietary and cost implications of incorporating new sugar and fibre guidelines**. *BMJ Open* 2016, **6**(12):e013182.

68. Nordman M, Lassen AD, Stockmarr A, van 't Veer P, Biesbroek S, Trolle E: **Exploring healthy and climate-friendly diets for Danish adults: an optimization study using quadratic programming**. *Frontiers*

in Nutrition 2023, **10**.

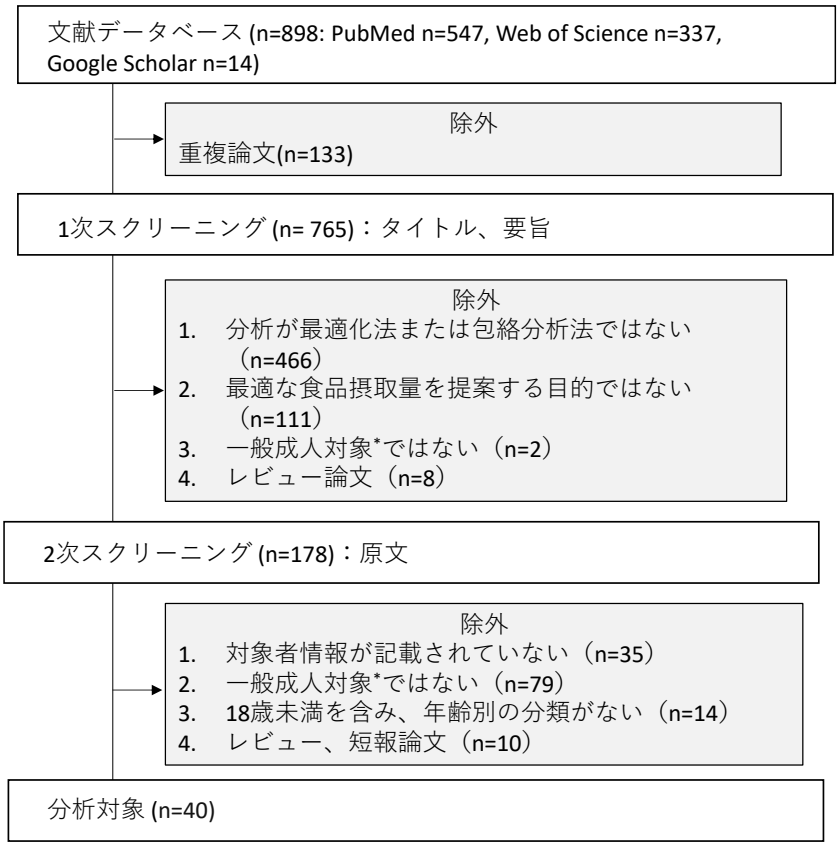
69. Heerschop SN, Kanellopoulos A, Biesbroek S, van 't Veer P: **Shifting towards optimized healthy and sustainable Dutch diets: impact on protein quality**. *Eur J Nutr* 2023, **62**(5):2115-2128.

表 1 文献データベース（PubMed、Web of Science）の検索式と抽出文献数

検索式	PubMed 抽出件数	Web of Science 抽出件数
(food OR dietary OR intake) AND ("diet optim*" OR "optim* diet" OR "food optim*" OR "optim* food" OR "linear programming" OR "data envelopment analysis") フィルター：Full text, Humans, English	547	337

表 2 文献データベース（Google Scholar）の検索設定と抽出文献数

検索の詳細設定	最適化法	包絡分析法
語順も含め完全一致*	“diet optimization”	“data envelopment analysis”
いずれかのキーワードを含む	“food” “diet” “optimization”	“food” “diet” “optimization”
含めないキーワード	“economic”	“economic”
言語；地域；最終更新；サイトまたはドメイン；検索対象の範囲	英語；全て；指定なし；.edu；そのページのリンク内	英語；全て；指定なし；.edu；そのページのリンク内
抽出件数	5	9



*一般成人は18歳以上で、妊産婦、及び療養患者は含まない。

図 1. 対象文献選定の流れ

表 3 対象研究の基本情報

著者	実施国	目的	対象者	食事データ			
				国民栄養調査	独自調査	調査年	食事調査法
Alaini et al. 2019[37]	マレーシア	がんのリスクを防ぐ低価格の食事メニューの検討	19 歳以上（大学学生および教職員）、男女 100 人		調査名なし	2007	食事記録法
Brinket al. 2019[38]	オランダ	健康的で環境負荷の少ない食事ガイド作成法の提示	19–30、31–50、51–69、70 歳以上、人数不明 [a]	DNFCS		2005-12	24 時間思い出し法
Brouzes et al. 2021[39]	エジプト	健康的な食事を提示するために栄養素強化食品の必要性の検討	19-30 歳、女性 130 人		調査名なし	2016-17	食事記録法
Clerfeuille et al. 2013 [40]	フランス	健康的な食事のための乳製品摂取に関する提示	18 歳以上、男女 1171 人	INCA1		1999	食事記録法（7 日間食事日記）
Darmon et al. 2006[41]	フランス	健康的で低価格の食事の提示	18 歳以上、女性 476 人		調査名なし	1994	食事歴法
Donati et al. 2016[42]	イタリア	健康的で環境負荷が少ない適正価格の食事の提示	18-20 歳、男女 104 人		調査名なし	2012	食事記録法
Dos Santos et al. 2018[43]	ブラジル	健康的な食事の提示	20 歳以上、男女 25324 人	NDS		2008-09	食事記録法
Dussiot et al. 2022a[44]	フランス	肉類の摂取量を下げた健康的な食事の提示	18-64 歳、男性 564 人 18-54 歳、女性 561 人	INCA3		2014-15	24 時間思い出し法
Gao et al. 2006[45]	アメリカ	ビタミン E を最大限に摂取するための食事の提示	19-50 歳、男性 1141 人 女性 1196 人 50 歳以上、男性 997 人 女性 1017 人	NHANES		2001-02	24 時間思い出し法
Hallinan et al. 2021[46]	アメリカ	未加工食品のみまたは超加工食品のみを使用した場合の健康的な食事の提示	21-59 歳、男女 857 人		SOSIII	2016-17	FFQ

Horgan et al. 2016 [47]	イギリス	健康的で環境負荷が少ない食事の提示	19-94 歳、男女 1491 人	NDNS		2008-11	食事記録法
Johnson-Down et al. 2019[48]	カナダ	健康的かつ適正価格で、食文化を考慮した食事の提示	19 歳以上（先住民）、男女 1387 人		FNFNES	2011-12	24 時間思い出し法
Kramer et al. 2017[49]	オランダ	健康的で環境負荷が少ない食事の提示	19-30、31-50、51-69 歳、男女 3819 人	DNFCS		2007-10	24 時間思い出し法（2 日間非連続）
Macdiarmid et al. 2012[50]	イギリス	健康的で環境負荷が少ない食事の提示	19-64 歳、女性 人数不明	NDNS		2000-01	食事記録法（食事日記）
Maillot et al. 2010[51]	フランス	食事摂取基準を満たす食事の個別提示	18 歳以上、男女 1711 人	INCA		1999	食事記録法（7 日間）
Maillot et al. 2011[52]	アメリカ	脂質と添加糖類由来のエネルギー摂取を減らした健康的な食事の提示	20-30 歳、男性 400 人　女性 377 人 31-50 歳、男性 756 人　女性 742 人 51 歳以上、男性 1012 人　女性 1008 人	NHANES		2001-02	24 時間思い出し法（1 日間）
Maillot et al. 2012[53]	アメリカ	食塩の摂取基準を厳格に準拠した食事の提示	20-30 歳、31-50 歳、51 歳以上、男女 4295 人	NHANES		2001-02	24 時間思い出し法
Maillot et al. 2013[54]	アメリカ	ナトリウム、カリウムの適正な摂取量となる食事の提示	20 歳以上、男女 4295 人	NHANES		2001-02	24 時間思い出し法
Masino et al. 2023[55]	ドイツ	ベジタリアンにおける健康的で環境負荷の少ない食事の提示	18-80 歳、男女　人数不明 [b]	NVS II		2005-06	24 時間思い出し法、及び FFQ
Masset et al. 2009[56]	アメリカ	がん予防のための食事の提示	25-65 歳、男性 60 人　女性 101 人		調査名なし	2006	FFQ
Okubo et al. 2015[4]	日本	健康的な食事の提示	30-49 歳、男性 40 人　女性 45 人 50-69 歳、男性 42 人、女性 47 人		調査名なし	2002-03	食事記録法

Perignon et al. 2016[57]	フランス	健康的で温室効果ガスを減らす適正価格の食事の提示	18 歳以上、男女 1899 人	INCA2		2006-07	食事記録法
Sobhani et al. 2019[58]	イラン	水の使用量を抑えた、健康的な食事の提示	20-64 歳、男性 296 人　女性 427 人		調査名なし	2016	FFQ
Song et al. 2017[59]	中国	健康的で温室効果ガスを減らす食事の提示	18-50 歳、男女 11160 人	CHNS		2004-11	食事記録法
Verly et al. 2023[30]	ブラジル	死亡率低下や入院率を下げる低価格の食事の提示	25 歳以上、男女 37687 人	NDS		2017-18	24 時間思い出し法
Vieux et al. 2018[60]	フィンランド、スウェーデン、イタリア、イギリス、フランス	健康的で温室効果ガスを減らす食事：欧州 5 か国比較	18-64 歳、 FINDIET2012 男性 569 人 女性 679 人 Riksmaten 2010 男性 588 人 女性 764 人 INRAN-SCAI-2005 男性 967 人 女性 1105 人 NDNS 男性 627 人 女性 751 人 INCA2 男性 930 女性 1323 人	National FINDIET Survey 2012、Riksmaten 2010、INRAN-SCAI、NDNS、INCA2		2005-12	48 時間思い出し法、食事記録法
Vieux et al. 2019[31]	アメリカ	健康的な朝食の提示	18 歳以上、男女 8269 人	NHANES		2011-14	24 時間思い出し法
Zahra et al. 2023[61]	インドネシア	健康的な食事への支援と具体的メニューの提示	30-49 歳、(石油ガス会社勤務)、男性 31 人		調査名なし	2020	24 時間思い出し法、及び食事記録法
Barré et al. 2018[62]	フランス	健康的で温室効果ガスの排出量を減らし、栄養素の吸収率が高い食事の提示	18 歳以上、男性 773 人 女性 1126 人	INCA2		2005-07	食事記録法
Grasso et al. 2021[63]	オランダ	高齢者における蛋白質の充足と温室効果ガス排出量の少ない食事の提示	56-101 歳、男性 644 人 女性 710 人		LASA	2014-15	FFQ

Eustachio Colombo et al.2024[64]	スウェーデン	健康的で温室効果ガスの少ない食事の提示	18-80 歳、男女 1797 人	Riksmaten Adults		2010-11	食事記録法
Dussiot et al. 2022b[65]	フランス	鉄と亜鉛の生体利用効率を高める健康的な食事の提示	18-64 歳、男性 564 人 18-54 歳、女性 561 人	INCA3		2014-15	24 時間思い出し法
Kesse-Guyot et al. 2022[66]	フランス	健康的で温室効果ガス排出量の少ない低価格な食事の提示	成人（平均 54.5 歳）、男女 29326 人		The NutriNet-Santé study	2014	FFQ
Scarborough et al. 2016[67]	イギリス	食事ガイドライン作成のための健康的で適正価格の食事の提示	19 歳以上、男女 1491 人	NDNS		2008-11	食事記録法
Nordman et al. 2023[68]	デンマーク	温室効果ガス排出量の少ない健康的な食事の提示	18-64 歳、男女 2492 人	DANSDA		2011-13	食事記録法
Heerschop et al. 2023[69]	オランダ	蛋白質が充足した温室効果ガス排出量が少ない食事の提示	18-79 歳、男女 4313 人	DNFCS		2012-16	24 時間思い出し法
Kanellopoulos et al. 2020[32]	オランダ	健康的な食事ガイドライン作成ための方法提示	20-40 歳､男性 121 人　女性 206 人 41-50 歳､男性 155 人　女性 203 人 50 歳以上、男性 625 人　女性 425 人		NQplus study	2011-13	FFQ
Mertens al. 2021[33]	デンマーク、チェコ､イタリア､フランス	健康的で温室効果ガス排出量の少ない食事の提示	18-64 歳、男女 DANSDA 1385 人、SIPS04 1386 人、INRAN-SCAI 1978 人、INCA2 1713 人	DANSDA、SISP04、INRAN-SCAI、INCA2		2003-08	食事記録法、または 24 時間思い出し法
Mertens al. 2020[34]	デンマーク、チェコ､イタリア､フランス	肉類の代替食品を使った温室効果ガス排出量の少ない健康的な食事の提示	18-64 歳、男女 DANSDA 1385 人、SIPS04 1386 人、INRAN-SCAI 1978 人、INCA2 1713 人	DANSDA、SIPS04、INRAN-SCAI、INCA2		2003-08	食事記録法または 24 時間思い出し法

Sugimoto et al. 2022[6]	日本	健康的で温室効果ガス排出量の少ない食文化を考慮した低価格の食事の提示	20-69 歳、男性 184 人　女性 185 人	調査名なし	2013	食事記録法

FFQ: food frequency questionnaire, INCA: Individual and National Study on Food Consumption, NDS: National Dietary Survey, NHANES: National Health and Nutrition Examination Survey, NDNS: UK National Diet and Nutrition Survey, DNFCS: Dutch National Food Consumption Survey, NVS II: Nationale Verzehrsstudie II, CHNS: China Health and Nutrition Survey, INRAN-SCAI: Italian National Food Consumption Survey, Riksmaten Adults: Swedish dietary survey Riksmaten Vuxna, DANSDA: Danish National Survey of Diet and Physical Activity, SISP04: Czech Food Consumption Survey, SOSIII: Seattle Obesity Study III, FNFNES: First Nations Food, Nutrition and Environment Study, LASA: Longitudinal Aging Study Amsterdam

[a] 1–18 歳も分析対象だが、最適化した食品摂取量を提案したのは 19 歳以上であった。実際に対象とした人数が明示されていなかったため、人数不明とした。

[b] 18-80 歳を対象としたが、最適化した食品摂取量を提案したのは 25–50 歳であった。実際に対象とした人数が明示されていなかったため、人数不明とした。

表 4 分析方法と制約条件 [a]

著者	分析法	環境負荷		食品価格	総エネルギー摂取量		
		温室効果ガス排出量	水・土地・化石燃料の使用量		現状量	推奨量	その他の量 [b]
Alaini et al. 2019[37]	LP			✓		✓	
Brinket al. 2019[38]	LP					✓	
Brouzes et al. 2021[39]	LP			✓		✓	
Clerfeuille et al. 2013 [40]	LP				✓		
Darmon et al. 2006[41]	LP			✓	✓		
Donati et al. 2016[42]	LP	✓	✓	✓		✓	
Dos Santos et al. 2018[43]	LP					✓	
Dussiot et al. 2022a[44]	LP				✓		
Gao et al. 2006[45]	LP					✓	
Hallinan et al. 2021[46]	LP			✓		✓	
Horgan et al. 2016 [47]	LP	✓			✓		
Johnson-Down et al. 2019[48]	LP			✓	✓		
Kramer et al. 2017[49]	LP	✓	✓		✓		
Macdiarmid et al. 2012[50]	LP	✓				✓	
Maillot et al. 2010[51]	LP				✓		

Maillot et al. 2011[52]	LP				✓	✓	
Maillot et al. 2012[53]	LP				✓		
Maillot et al. 2013[54]	LP					✓	
Masino et al. 2023[55]	LP	✓					✓
Masset et al. 2009[56]	LP			✓	✓		
Okubo et al. 2015[4]	LP					✓	
Perignon et al. 2016[57]	LP	✓		✓	✓		
Sobhani et al. 2019[58]	LP		✓		✓		
Song et al. 2017[59]	LP	✓			✓		
Verly et al. 2023[30]	LP			✓	✓		
Vieux et al. 2018[60]	LP	✓			✓		
Vieux et al. 2019[31]	LP					✓	
Zahra et al. 2023[61]	LP			✓		✓	
Barré et al. 2018[62]	LP、NLP	✓		✓	✓		
Grasso et al. 2021[63]	LP、NLP (QP)	✓			✓		
Eustachio Colombo et al.2024[64]	LP、HQ	✓				✓	
Dussiot et al. 2022b[65]	NLP					✓	
Kesse-Guyot et al. 2022[66]	NLP	✓		✓		✓	

Scarborough et al. 2016[67]	NLP			✓	✓		
Nordman et al. 2023[68]	NLP (QP)	✓			✓		
Heerschop et al. 2023[69]	DEA	✓			✓		
Kanellopoulos et al. 2020[32]	DEA						✓
Mertens al. 2021[33]	DEA	✓					✓
Mertens al. 2020[34]	DEA	✓					✓
Sugimoto et al. 2022[6]	DEA	✓		✓			✓

LP: Linear Programming（線形計画法）、NLP: Nonlinear Programming （非線形計画法）、HQ: hierarchical clustering（階層的クラスタリング分析）、QP: Quadratic Programming（二次計画法）、DEA: Data Envelopment Analysis（包絡分析法）

[a] 条件を含む項目は灰色セルと✓で示した。

[b] 2000kcal/日: Kanellopoulos et al. 2020, Mertens al. 2020, Mertens al. 2021, Sugimoto et al. 2022 (女性), Heerschop et al. 2023;
2500kcal/日: Masino et al. 2023, Sugimoto et al. 2022 (男性),

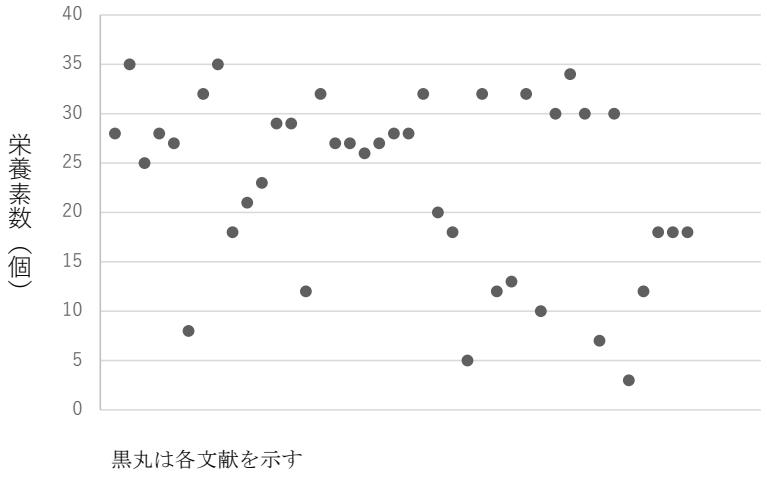


図 2　対象 40 文献における制約条件に含めた栄養素数

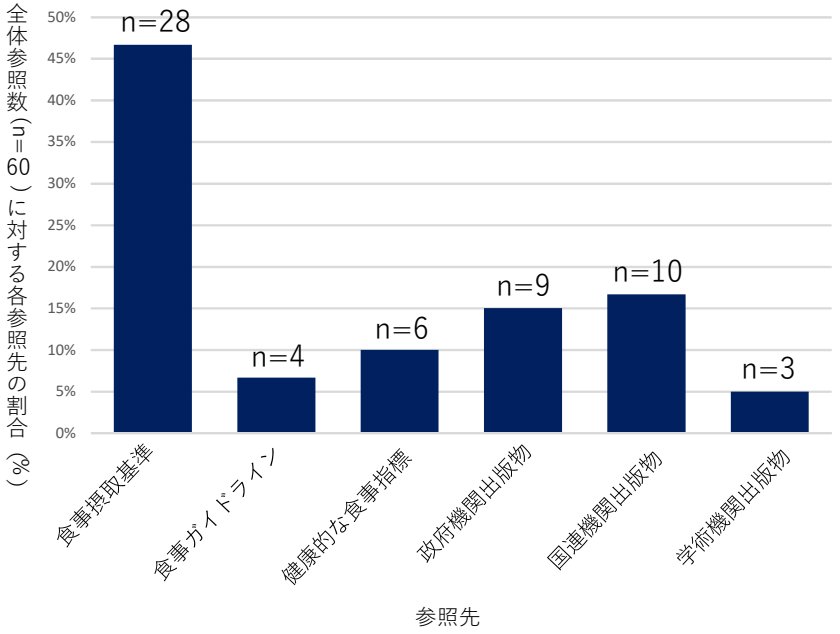


図 3　制約条件に含めた栄養素摂取量の参照先

表 4 分析結果及び制約条件のトレードオフ

著者	分析結果[a]				制約条件のトレードオフ[a]		
	食品数	男女別[b]	世代別	結果の概要	食品と栄養素	食品・栄養素と価格	食品・栄養素と環境
Alaini et al. 2019[37]	12			がん予防のための食事ガイドライン WCRF/AICR 2007、MDG 2010、および RNI 2017 を満たす各メニューが作成され、その費用は 1 日あたり 1.97 米ドル（1503kcal/日）、2.35 米ドル（1680kcal/日）、2.48 米ドル（1889kcal/日）であった。		✓	
Brinket al. 2019[38]	15	✓	✓	ほとんどの年代別グループにおいて全ての制約（十分なエネルギー量と栄養素、環境負荷の軽減）を満たす食事ガイドの"Wheel of Five"を基にした食事を示した。いくつかの食品群では、摂取量が群間で大きく異なった。	✓		
Brouzes et al. 2021[39]	19	NA		果物、野菜、乳製品、肉・魚・卵、伝統食のパスタ等を毎日十分摂取することで、モデル化した 12 種類の微量栄養素のうち 11 種類が充足する可能性があった。栄養素の中でも鉄が最も不足傾向にあった。強化食品の利用は、食事中の鉄最小値を推奨量の 40%から 60%超に増加させた。	✓		
Clerfeuille et al. 2013 [40]	17			果物と野菜（約 62%増）、でんぷん質食品（約 37%増）、乳製品（約 19%増）の割合が増加した。植物性食品と乳製品は増やす必要があるが、乳製品の種類としてはチーズを減らして牛乳とヨーグルトを増やす必要がある。			✓
Darmon et al. 2006[41]	21	NA		栄養推奨量を価格制約なしに達成する場合、平均的な食事よりも魚、果物、野菜が増加し、動物性脂肪とチーズが減少した。安価で健康的な食事を目指すには、ヨーグルト、菓子類、いも類を減らし、加工された果物、油脂と糖を添加したシリアル、種実類、豆類、果物ジュースなどを増やすことが示さ		✓	

				れた。			
Donati et al. 2016[42]	9			肉と魚の代わりに、植物由来のたんぱく質、乳製品、穀類を増やし、野菜や果物を十分摂取することで、健康面にも環境面にも配慮した食事となり、価格の変化も少ないことが示された。しかし、健康な成人において動物性食品摂取をゼロにする根拠はない。	NA	NA	NA
Dos Santos et al. 2018[43]	68			最適化された食事は、平均的な食事から果物（+92g）、豆類（+64g）、野菜（+43g）、牛乳（+12g）、魚介類（+15g）、全粒穀物（+14g）の摂取量が増加し、清涼飲料水（-90g）、米（-63g）、スナック菓子（-14g）、赤身肉（-13g）、加工肉（-9.7g）の摂取量が減少した。	✓		
Dussiot et al. 2022a[44]	45	✓		肉類摂取 10-50%減にし、果物や野菜、未精製穀類をその分増やすことで健康的な食事が達成される。50%以上の減少ではそれ以上の食事改善効果は小さい。	NA	NA	NA
Gao et al. 2006[45]	19			最適化された食事は、果物と野菜を 11 サービング、種実類を 0.6 サービング含んだ。種実類、果物、野菜摂取量の大幅な増加を要する食事は、多くの国民にとって実現性が低い。ビタミン E 含有量が高い食品を選ぶことで、α-トコフェロールの推奨量を満たす可能性が高まる。	✓		
Hallinan et al. 2021[46]	126			ビタミン D の基準を緩和した未加工食品のみ、または超加工食品のみの食事モデルが示されたが、未加工食品のみの食事は、超加工食品を使用した食事よりも大幅に高価だった。栄養素基準値を満たす食事には、超加工食品を含む加工食品と生鮮食品の両方を使用する必要がある。		✓	
Horgan et al. 2016 [47]	35			モデル化した食事は、それぞれ温室効果ガス排出量を 15%～27%削減した。野菜、果物、いも、種実類、朝食用シリアルや穀類全般を増やし、菓子類、加工肉、酒、白パンを減らすことで、健康面と環境面に配慮した食事が可能である。			✓

Johnson-Down et al. 2019[48]	49	✓		貧困層である先住民の場合、価格を上げずに全ての栄養素の基準を満たすのは困難であった。食物繊維、カルシウム、カリウム、ビタミン D などいくつかの栄養素を制約条件から外すことで、ある程度健康的で低価格の食事を達成できる。	NA	NA	NA
Kramer et al. 2017[49]	20	✓	✓	全ての性・年齢階級で、肉類とくに牛肉を減らすことが環境配慮につながった。アルコール、非アルコール飲料の削減も効果的であった。性、年齢別の栄養素必要量の違いは、最適化した食事の構成に大きな影響を与えた。	✓		
Macdiarmid et al. 2012[50]	82			制約条件を許容範囲にした場合、52 種類の食品を含む実現性のある食事となり、最適化前の食事よりも温室効果ガス排出量は 36%減少した。価格は英国の平均的な食費と同程度であった。肉類は適量に抑え、乳類は現状の摂取量とした食事でも健康と環境に配慮することは可能。	NA	NA	NA
Maillot et al. 2010[51]	41			個々に最適化した食事の半分は、普段摂取する食品の 5%未満が別の食品に置き換えられた。多くの食事に果物、野菜、穀物、豆類、ドライフルーツ、無塩種実類、低脂肪乳製品、魚介類が増加した。赤身肉、加工肉、チーズ、混合料理、塩系スナック類、甘味類は減少した。	✓		
Maillot et al. 2011[52]	8	✓	✓	エネルギー必要量に対応した食事では、野菜と果物の摂取が重視された。現状のエネルギー摂取量に対応した食事では、果物、野菜、全粒穀物の摂取量が多く、精製穀物と肉類の摂取量が少なかった。	NA	NA	NA
Maillot et al. 2012[53]	8	✓	✓	ナトリウム 2300mg/日の食事は栄養的に適切であるが、現在の食事から大きく逸脱する必要があった。ナトリウム 1500mg/日の食事は数学的なモデルでは不可能であった。達成可能なナトリウム量の少ない食事は、果汁、種実類が非常に多く、穀物と肉類が少なかった。	✓		
Maillot et al. 2013[54]	9	✓	✓	2010 年の食事ガイドラインのナトリウム、カリウム基準値に基づく食事は、国内の全食品ナトリウム含有量を 10%削減しても、栄養的に適切な食事との両立が難しいことが示された。食事量が少ないとカリウムの基準が満たさ	✓		

				れず、食事量が多いとナトリウムの基準が満たされない。			
Masino et al. 2023[55]	39	✓		雑食性の食事では、野菜、穀物、豆類、きのこ、魚の摂取量は、現状と比較して 63%から 260%増加し、温室効果ガス排出量が減少した。ヴィーガンの食事を除き、全ての最適化した食事は、現状よりも費用が削減された。	NA	NA	NA
Masset et al. 2009[56]	5	✓		主要な WCRF/AICR ガイドラインと食事ガイドラインを満たすモデルでは、現状から過度に逸脱することない食事が示された。全ての栄養素量を満たすためには、食品量の大幅な増加と、現状の食事から劇的な変化を必要とした。	✓		
Okubo et al. 2015[4]	23	✓	✓	各性別・年齢層において、対象栄養素の基準全てを満たす食事のためには、全粒穀物と低脂肪乳製品の摂取量を大幅に増やす必要があったが、野菜と果物はほぼ現状のままだった。食塩を含む調味料を大幅に（65～80%）削減する必要があり、目標達成が困難とみられた。	✓		
Perignon et al. 2016[57]	8	✓		温室効果ガス排出量を 30%程度削減した食事では、栄養面と価格面を両方考慮した食事が可能であった。より高い温室効果ガス排出量の削減には、実現性の低い食事への移行が必要であった。			✓
Sobhani et al. 2019[58]	6			現在の摂取量より、穀類を 37%、肉・魚介・豆・卵類を 28%、野菜を 45%減らし、油脂・菓子類を 8%、果実を 68%、乳類を 99%増やすことで、環境中の水の使用を半減させ、栄養素の摂取目標も達成できるが、たんぱく質源は肉類を減らす代わりに豆類を 14%増やす必要があった。			✓
Song et al. 2017[59]	28	✓		牛肉、豚肉、魚介類と米が温室効果ガスの発生に寄与している食品であった。これらの摂取を抑え、肉類は代わりに鶏肉にし、野菜や果物の摂取を増やすなどの食事変更を実施することで、健康面と環境面の両方に配慮した食事をすることが可能となった。			✓
Verly et al. 2023[30]	25			現在の野菜と果物の摂取量 166.7 g/日に対し、その量を 216.9～510.2 g/日にかなり増やすことで、2019 年の死亡者数を 12750～57341 人減少させるとの		✓	

				試算結果が示された。この食事変更により食事の価格は若干上昇するが、死亡数を減らしたことにより社会的な経済効果が見込まれた。			
Vieux et al. 2018[60]	10	✓		温室効果ガスを減らすには植物性食品の使用を増やし、動物性食品を減らす必要があることは共通しているが、鶏肉、魚、乳製品のいずれを減らすべきかの状況は国と性別によって異なっていた。食事の変更によって 62～78%の温室効果ガス削減が可能であることが示された。	NA	NA	NA
Vieux et al. 2019[31]	31			現在摂取の少ない乳製品、果物、シリアルの摂取をそれぞれ 10 倍程度に増やし、菓子パン、朝食用加工肉、加工食品、調理パンの摂取を 0 にすることで、他の食品の摂取状況をほとんど変更しなくても食事スコアが改善された。	✓		
Zahra et al. 2023[61]	55	NA		現在の摂取では、カルシウム、葉酸、多価不飽和脂肪酸、食物繊維の摂り方に課題があった。それを改善するための具体的な 14 日間の間食の置き換えメニューを作成でき、間食によるこれら栄養素の目標値に対する摂取状況は 1～13%から 14～32%に上昇した。	NA	NA	NA
Barré et al. 2018[62]	27	✓		環境に配慮して健康的な食事にする場合は野菜や果物を増やす一方で、肉類を 78～87%減らす必要があった。動物性食品をうまく活用しながら健康面・環境面に配慮した食事とする場合は、肉類の減少を 27～38%の減少に抑えることが可能であることが示された。			✓
Grasso et al. 2021[63]	25			全粒穀物、種実類、植物性のたんぱく質源を増やしつつ、肉類の摂取量は変えずに牛肉や加工肉を減らして代わりに鶏肉や豚肉にすることで、たんぱく質の摂取量やその質を保ちながら温室効果ガスの排出量を 50～60%低下させることが可能となった。			✓
Eustachio Colombo et al.2024[64]	24			クラスター分析と線形計画法を合わせた新しい方法により、赤身肉、加工肉、鶏肉、乳製品等を大幅に減らし、野菜、果物、いも類等を増やすことによって、健康面に配慮しながら温室効果ガスを 43～53%減少させることが可能で			✓

				あることが示された。			
Dussiot et al. 2022b[65]	11		✓	栄養素の基準を満たすための最適化では、赤身肉を減らし、全粒穀物の摂取を増やすとよいが、フィチン酸などの摂取が増えることで、鉄と亜鉛の吸収量が低下し、鉄欠乏性貧血の割合が 5%上昇する可能性が示された。吸収率の考慮は最適化に必要であると考えられた。	✓		
Kesse-Guyot et al. 2022[66]	23			ベジタリアンの食事は環境面も健康面も配慮できた食事であることが示された。肉類を摂取する場合でも、1 週間に 1 サービング程度まで減らし、野菜、果物、未精製穀物、豆類を増やすことで、健康的な食事で、価格と環境面にも配慮された食事として示された。	✓		
Scarborough et al. 2016[67]	5			穀類などの主食を 69%、野菜や果物を 54%増やし、豆・魚・卵・肉類などのたんぱく質源を 24%、乳製品を 21%、高脂質糖質類を 53%減らす食事をすることで、健康的な食事となり、価格は現在からほとんど変わらないことが示された。	✓		
Nordman et al. 2023[68]	25			ナッツを 230%、パンを 75%、卵を 47%増やし、赤身肉、ソフトドリンク、酒類を 90%、動物性脂肪を 76%減らすなどによって、健康も環境にも配慮した食事が示された。肉類に関しては、牛肉の代わりに豚肉と鶏肉を摂取することで、栄養素は充足することが示された。	✓		
Heerschop et al. 2023[69]	28	✓	✓	現在たんぱく質摂取量は、推奨量の 1.4～2.2 倍と十分にあることが示された。食事スコアの値と温室効果ガス排出量はトレードオフの関係にあり、現在の摂取量からの変更を 33%以内とした場合、温室効果ガス排出量は 12～16%減少し、たんぱく質は十分に摂取できることが示された。	✓		
Kanellopoulos et al. 2020[32]	65	✓	✓	DEA 法は、栄養素の摂取を最適にする食品を提案可能な方法であることが示された。各性年齢集団で増減すると効果的な食品は異なっていたものの、野菜と果物はすべての性年齢集団に共通していた。	NA	NA	NA

Mertens al. 2021[33]	20	✓		栄養素の摂取量を最適化するだけでは温室効果ガス排出量はあまり変化しなかったものの、温室効果ガスを減らすことを優先したモデルでは、赤身肉を卵、鶏肉、魚、乳製品等に置き換えることで、NRD15.3 スコアは 9%上昇し、温室効果ガスは 21%減少することが示された。			✓
Mertens al. 2020[34]	15	✓		肉の摂取量を減らして果物、野菜、豆、全粒穀物等の植物性食品の摂取量を増やすことで、温室効果ガスの排出量は抑えられることが示された。一方で、代替肉食品を使うことで、現在の食事からの類似性を保ちながら、温室効果ガスの排出量を同程度に抑えられることが示された。	✓		
Sugimoto et al. 2022[6]	30	✓		全粒穀物、果物、乳製品、豆類の摂取量を増やし、赤身・加工肉、菓子類、酒類、ソフトドリンク、調味料の摂取量を減らすことで、NRF15.3 スコアが 8～10%上昇し、温室効果ガスの排出量が 10～13%減少することが示された。ただし、それぞれの改善割合は、単独で最適化した場合よりも低下していた。	✓	✓	✓
平均（最小、最大）	23 (5, 126)						

WCRF/AICR: World Cancer Research Fund/ American Institute for Cancer Research, MDG: Malaysian Dietary Guidelines, RNI: Recommended Nutrient Intake, NA: not available

[a] 条件を含む項目は灰色セルと✓で示した。

[b] 男性のみ、または女性のみの対象者は NA とした。