

食材の代替を伴って食品ロスを最小化するレシピ推薦方法

前田 康成¹

1) 北見工業大学・地域未来デザイン工学科

要約： 食品ロスは世界中で大きな問題になっている。従来研究において料理レシピの推薦方法が数多く提案されているが、食品ロスによる総コストは最小化されていない。本研究では、食品ロスの総コストを最小化する料理レシピの推薦方法を動的計画法によって実現する。食材ソーラスを使って既存レシピ中の食材を他の食材で代替することによる新しいレシピ生成を伴うレシピ推薦方法を提案し、提案方法の有効性を実験によって確認する。実験によって、提案方法の食品ロスが経験則による推薦方法の食品ロスよりも小さいことが確認できた。提案方法は家庭の食品ロスの削減に寄与することが期待される。提案方法の最適解は理論的限界でもあり、理論的限界は他の推薦方法の評価に利用できる。提案方法のヘルスケアへの応用は今後の課題である。

キーワード： 料理レシピ、推薦、食品ロス、食材の代替、食材ソーラス、動的計画法

Recommendation Method for Recipes Minimizing Food Loss by Substitution of Ingredients

Yasunari MAEDA¹

1) *School of Regional Innovation and Social Design Engineering, Kitami Institute of Technology*

Abstract: Food loss is a big problem all over the world. Many recommendation methods for cooking recipes are proposed in previous research. But the total cost of food loss is not minimized in the previous research. In this research dynamic programming is applied to minimize the total cost of food loss in recommendation method for cooking recipes. A new recommendation method is proposed. In the proposed method new recipes are created by substituting the ingredients in existing recipes with other ingredients using ingredient thesaurus. The effectiveness of the proposed method is shown by some experiments. In the experiments the food loss of the proposed method is confirmed to be smaller than the food loss of the empirical recommendation method. The proposed method is expected to contribute to the reduction of food loss in households. The optimal solution of the proposed method is also a theoretical limit. The theoretical limit can be used to evaluate other recommendation methods. The application of the proposed method to healthcare is a topic of the future.

Keywords: cooking recipe, recommendation, food loss, substitution of ingredient, ingredient thesaurus, dynamic programming

Yasunari MAEDA

165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507, Japan

Phone: +81-157-26-9328, Fax: +81-157-26-9344, E-mail: maedaya@mail.kitami-it.ac.jp

1. はじめに

近年、まだ食べられる食品が廃棄される食品ロスによる世界的な被害が発生している。日本でも平成29年度の推計で612万トンの食品ロスが発生しており、家庭で発生した食品ロスに限定しても284万トンである[1]。日本では環境省及び農林水産省が食品リサイクル法に基づいて食品ロスの削減を推進している。ICT（情報通信技術）分野では料理レシピを公開する多くの料理レシピサイトが開設されているが、入力した食材を使用するレシピ検索など、家庭の余剰食材の有効活用に資するサイト[2][3]も多い。

他方、料理メディア分野ではさまざまな料理レシピの検索・推薦[4][5][6][7]や生成[8][9]に関する検討が行われている。レシピ推薦の従来研究の中には食品ロス対策に資する研究もある。例えば、従来研究[6]では食品ロスをなるべく小さくするような日々のレシピと食材の購入の仕方を推薦する。しかし、食材の消費期限／賞味期限や既に家庭にある余剰食材への対応は検討していない。また、従来研究[7]では、賞味期限を考慮して期限が近い余剰食材を使用するレシピを優先して推薦する。しかし、食品ロスによるコストの最小化は検討していない。

レシピに従って調理する場合に、レシピに記載された食材に対して家庭の余剰食材のみでは不足することがある。対処方法として、不足食材の追加購入があるが、家庭にある他の余剰食材での代替もある。後者は、食材を代替しても美味しく食べることができるという、料理をする人の経験や知識の活用である。従来研究[8][9]では、このような食材の代替可能性に関する知識を利用して、既存レシピ中の食材を他の食材に代替して新たなレシピを作成する。食材の代替可能性は食品ロス対策としても有効だと考えられる。

そこで、本研究では食材の代替と余剰食材の消費期限を考慮して、食品ロスによる総コストを最小化するレシピ推薦方法を検討する。具体的には動的計画法[10]を適用し、食材の代替を考慮したもとの余剰食材の余剰量と消費期限までの残日数の情報に基づいて、対象期間中の食品ロス（廃棄）による総コストを最小化する計画的なレシピ選択（余剰食材の消費）を推薦する。推薦対象のレシピは既存レシピと既存レシピ中の食材を代替した新レシピである。

2. 準備

2.1 食材シソーラス

本研究では、従来研究[9]と同様に、食材の代替可能性に関する人の知識を食材シソーラスとして利用するので、最初に食材シソーラスについて説明する。家庭で豚肉が入った肉野菜炒めを調理しようとした際に、冷蔵庫に豚肉がなかった場合を考える。このようなとき、料理に不慣れな人はレシピに記載された豚肉を買いに行く。他方、料理に慣れている人は、豚肉の代わりに冷蔵庫にある鶏肉を使用することがある。これは、豚肉の代わりに鶏肉を使用しても美味しく食べられるという知識あるいは経験に基づく行動である。

仮にこのような食材の代替可能性に関する知識がまとめられたものが存在すれば、料理に不慣れな人でもそれを参照することによって食材の代替が可能になる。このような考えに基づいて、従来研究[9]では食材の代替可能性に関する知識をまとめたものを、食材シソーラスと定義している。

2.2 記号等の定義

本研究で使用する記号等を定義する。 g_i は*i*番目の食材で、 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_{|G|}\}$ は食材集合を示す。 $w_s(i)$, $1 \leq i \leq |G|$ は食材 g_i の余剰量（グラム）で、余剰がない食材 g_i は $w_s(i) = 0$ である。 $c(i)$, $1 \leq i \leq |G|$ は食材 g_i の単価（1グラムあたりの購入価格、円）で、 $ex(i)$, $1 \leq i \leq |G|$ は食材 g_i の消費期限までの残日数である。食材の単価は市場価格などに依存して変動することがある。よって、新たに余剰が発生した際に単価が変動していれば、食材の単価を更新する必要がある。 $ex(i) = 1$ が消費可能な最後の日を示し、 $ex(i) = 0$ になると $c(i)w_s(i)$ （円）の食品ロス（廃棄）のコストが発生し、余剰量 $w_s(i)$ が0に更新される。余剰がない食材 g_i ($w_s(i) = 0$ の食材 g_i)は、便宜上、 $ex(i) = 0$ とする。

r_i は*i*番目のレシピで、 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{|R|}\}$ はレシピ集合である。 $f(r_i, j) \in F(r_i)$, $1 \leq f(r_i, j) \leq |G|$ はレシピ r_i の*j*番目の食材の番号（添え字）、 $F(r_i)$ はレシピ r_i で使用する食材の番号の集合である。 $w_r(f(r_i, j))$ は食材 $g_{f(r_i, j)}$ の1人前の使用量（グラム）を示す。ただし、*N*人前の場合には*N*人前の量に読み替える。3章で紹介するアルゴリズム（数式）ではすべてのレシピで*N*は同じと仮定している。よって、レシピのデータを準備する際にはすべてのレシピで*N*を統一する必要がある。

本研究では、従来研究[9]と同様に、食材の代替可能性に関する人の知識を食材シソーラスとして利用する。 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{|B|}\}$, $1 \leq b_i \leq |G|$ は食材シソーラス中の被代替食材（元食材）の食材番号の集合を示し、 b_i は

i 番目の被代替食材の食材番号である. $A(b_i) = \{a(b_i, 1), \dots, a(b_i, |A(b_i)|)\}$ は被代替食材 g_{b_i} を当該食材で代替しても美味しく食べられるという意味で代替可能な食材 (代替食材) の食材番号の集合を示し, $a(b_i, j)$ は被代替食材 g_{b_i} の j 番目の代替食材の食材番号である. $M(r_i) = \{m(r_i, 1), \dots, m(r_i, |M(r_i)|)\} \subseteq F(r_i)$ は既存料理レシピ r_i の食材の中で食材シソーラス中の被代替食材である食材の食材番号の集合を示し, $m(r_i, j)$ はレシピ r_i の j 番目の被代替食材の食材番号である.

2.3 本研究の問題設定

本研究では議論を簡便にするために, 使用可能な食材はレシピ推薦時に家庭にある余剰食材のみとし, 食材の追加購入は対象外とする. 有限の T 日間で T 回 (1日1回) のレシピ推薦を対象とし, 各回でレシピ1個を推薦する.

本研究は食品ロスの最小化に関する基礎研究の初期検討である. そのため, 上記のようになるべく簡便な問題設定とした. 今後, 本研究の拡張研究としてより現実に近い問題設定 (より複雑な最適化問題) を検討する. また, 本研究 (今後の拡張研究も含めて) は必ずしも提案方法の実用化を目指すものではない. 食品ロスを最小化する最適解を算出する提案方法は計算量などの視点から実用化に適さない可能性もある. しかし, 提案方法による最適解は理論的境界でもある. よって, 提案方法で最適解が算出可能な規模の問題設定のもとで, 他のレシピ推薦方法の評価 (理論的境界に対してどの程度の差か評価) に利用することも可能である.

3章で説明する提案方法ではレシピ集合から1つのレシピのみ選択する. より現実に近い複数レシピによる献立に対応するためには, いろいろな拡張が考えられる. 例えば, レシピ集合を主菜, 副菜, 汁物の部分集合に分割しておき, それぞれの部分集合から1つのレシピ (計3レシピの組) を選択 (推薦) するような拡張がある.

本研究では, 提案方法の具体的なシステム化や利用形態などは想定していない. 本研究では特定しないが, 例えばレシピ集合については, 全利用者が利用可能な大規模なレシピ集合, 個別の利用者ごとに作成された中規模なレシピ集合, 毎回の利用時に利用者が入力 (設定) する小規模なレシピ集合などいろいろなパターンが考えられる. 食材シソーラスなども同様である.

3. 食材の代替を考慮して食品ロスを最小化するレシピ推薦方法の提案

本研究で提案するレシピ推薦方法は,

ステップ1: 食材シソーラスの既存レシピへの適用
 ステップ2: 動的計画法による推薦レシピの選択
 の2ステップで構成される.

3.1 ステップ1: 食材シソーラスの既存レシピへの適用

ステップ1では既存のレシピ集合 R に対して食材シソーラスを適用して, 既存レシピ中の被代替食材を代替食材に代替することによって新レシピを作成して推薦候補となるレシピ集合を拡張する. 新レシピを作成する食材シソーラスの適用アルゴリズムでは, 既存料理レシピ r の被代替食材の番号集合 $M(r)$ の各要素 $m(r, j)$ について, 順番に代替食材 $g_{a(m(r, j), k)}$ の組合せを列挙することによって, 新レシピを作成する. 当該アルゴリズムを以下に示す.

```
for ( $i_1 = 0$  から  $|A(m(r, 1))|$  の繰返し)
  for ( $i_2 = 0$  から  $|A(m(r, 2))|$  の繰返し)
    ...
      for ( $i_{|M(r)|} = 0$  から  $|A(m(r, |M(r)|))|$  の繰返し)
         $i_1, i_2, \dots, i_{|M(r)|}$  に応じた新レシピ  $r'$  の作成
```

新レシピ r' は既存レシピ r 中の被代替食材 $g_{m(r, 1)}, g_{m(r, 2)}, \dots, g_{m(r, |M(r)|)}$ を代替食材 $g_{a(m(r, 1), i_1)}, g_{a(m(r, 2), i_2)}, \dots, g_{a(m(r, |M(r)|), i_{|M(r)|})}$ で代替したレシピである. ただし, $g_{a(m(r, j), i_j=0)} = g_{m(r, j)}$ とすることによって, 既存レシピ中の被代替食材 $g_{m(r, j)}$ も含めて組合せを列挙する. 上記のアルゴリズムで作成されるレシピには既存レシピも含まれるので, 当該アルゴリズムで作成される全レシピの集合を食材シソーラス適用後の拡張料理レシピ集合 R' とする. ステップ2のレシピ推薦方法では, 拡張料理レシピ集合 R' を対象として処理を進める.

3.2 ステップ2: 動的計画法による推薦レシピの選択

当該時点での余剰食材の状況を示す余剰量 $W_s = (w_s(1), w_s(2), \dots, w_s(|G|))$ と消費期限までの残日数 $EX = (ex(1), ex(2), \dots, ex(|G|))$ の組 (W_s, EX) を, レシピ推薦問題における状態とする. 後述のレシピ推薦アルゴリズム中の t 回目の推薦時の状態変数を $X_t = (X_{t,1}, X_{t,2})$ と表記し, 余剰量 $X_{t,1} = (X_{t,1,1} = w_s(1), \dots, X_{t,1,|G|} = w_s(|G|))$, 消費期限までの残日数 $X_{t,2} = (X_{t,2,1} = ex(1), \dots, X_{t,2,|G|} = ex(|G|))$ とする.

t 回目の推薦レシピ番号用の変数を Y_t , $1 \leq Y_t \leq |R'|$ とすると, t 回目に推薦可能なレシピは $w_s(i) \geq w_r(i)$, $\forall i \in F(r_{Y_t})$ が成立するレシピ (余剰食材のみで調理可能

なレシピ)である。\$t\$回目の推薦時の状態\$X_t\$は\$t+1\$回目の推薦時の状態\$X_{t+1}\$に以下の手順で更新される。最初に\$t\$回目の推薦レシピ\$r_{Y_t}\$での使用後の余剰量に更新する。

$$w_s(i) = \begin{cases} w_s(i) - w_r(i), & i \in F(r_{Y_t}); \\ w_s(i), & i \notin F(r_{Y_t}). \end{cases} \quad (1)$$

次に消費期限までの残日数を更新する。

$$ex(i) = \begin{cases} ex(i) - 1, & w_s(i) > 0; \\ 0, & w_s(i) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

次に\$t\$回目の推薦時の状態\$X_t\$でレシピ\$r_{Y_t}\$を推薦したもとの、\$t+1\$回目の推薦時の消費期限までの残日数が式(2)で0になり発生する食品ロスの廃棄によるコスト\$loss(X_t, Y_t)\$を算出し、廃棄後の余剰量に更新する。

$$loss(X_t, Y_t) = \sum_{w_s(i) > 0, ex(i) = 0} c(i)w_s(i). \quad (3)$$

$$w_s(i) = 0, w_s(i) > 0 \text{かつ} ex(i) = 0. \quad (4)$$

食材を廃棄しない場合のコストは\$loss(X_t, Y_t) = 0\$である。式(1), 式(2), 式(4)による更新後の余剰量を\$W'_s\$, 消費期限までの残日数を\$EX'\$とすると、\$t+1\$回目の推薦時の状態は\$X_{t+1} = (X_{t+1,1} = W'_s, X_{t+1,2} = EX')\$である。

動的計画法で食品ロスの総コストを最小化するレシピ推薦アルゴリズムを示す。当該アルゴリズムでは、\$T\$回目のレシピ推薦の処理から1回目の処理まで遡りながら\$T\$回のレシピ推薦問題を解く。\$T\$回目と\$T\$回目以外で処理が異なる。最初に\$T\$回目のレシピ推薦の処理を示す。

$$v(X_T, T) = \min_{Y_T \in R'(X_T)} loss(X_T, Y_T), \quad (5)$$

ただし、\$R'(X_T)\$は状態\$X_T\$において推薦可能なレシピの番号集合である。\$v(X_T, T)\$は状態\$X_T\$における最小コストを示し、最小コストに対応するレシピ番号\$Y_T\$が最適なレシピ番号である。なお、\$R'(X_T)\$が空集合の場合(状態\$X_T\$で推薦可能なレシピがない場合)には、\$T\$回のレシピ推薦に失敗したと解釈し想定可能な最大のコストとして\$v(X_T, T) = \sum_{i, w_s(i) > 0} c(i)w_s(i)\$とする。

次に\$t\$回目 (\$t < T\$) のレシピ推薦の処理を示す。

$$v(X_t, t) = \min_{Y_t \in R'(X_t)} loss(X_t, Y_t) + v(X_{t+1}, t+1), \quad (6)$$

ただし、\$v(X_t, t)\$は\$t\$回目の推薦時の状態\$X_t\$における\$t\$回目以降の最小総コストを示し、最小総コストに対応するレシピ番号\$Y_t\$が最適なレシピ番号である。なお、\$R'(X_t)\$が空集合の場合には、\$T\$回目と同様に処理する。式(6)は動的計画法の考え方に基づく再帰的な処理になっており、\$v(X_{t+1}, t+1)\$で\$t+1\$回目以降を先読みすることによって\$t\$回目以降の総コストを最小化する。

提案方法の計算量は式(5)および式(6)の処理回数に比例する。式(6)は再帰的な処理になっており、\$t\$回目の

\$v(X_t, t)\$を計算するために\$t+1\$回目の\$v(X_{t+1}, t+1)\$を再帰的に呼び出している。最初にこの呼び出し回数が最も多くなる場合を考えると、\$T\$に関する指数オーダー\$O(|R'|^T)\$である。\$t\$回目の式(6)で\$t+1\$回目の\$v(X_{t+1}, t+1)\$を最大で\$|R'|\$回呼び出すため、\$O(|R'|^T)\$となる。再帰呼び出しのたびに\$v(X_{t+1}, t+1)\$を計算するのであれば、計算量も\$T\$に関する指数オーダー\$O(|R'|^T)\$である。

しかし、一般的に動的計画法では、計算済の\$v(X_{t+1}, t+1)\$の値を記憶しておいて、同じ状態に対して2度目以降は再計算を回避して記憶しておいた値を利用すること(メモ化再帰)によって計算量が軽減されることが多い。本研究の問題設定のもとでは、それまでに推薦(選択)したレシピの組合せが同じであれば、推薦した順番が異なっても同じ状態になる。\$t\$回目の推薦時の異なる状態数(処理回数)の最大は以下の組合せ数になる。

$$\begin{aligned} \binom{t+|R'|-2}{|R'|-1} &= \frac{(t+|R'|-2)!}{(t-1)!(|R'|-1)!} \\ &= \frac{(t+|R'|-2)(t+|R'|-3)\cdots t}{(|R'|-1)!} = \prod_{i=1}^{|R'|-1} \frac{t-1+i}{i}. \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)より、メモ化再帰によって計算量(処理回数, 異なる状態数)が\$t\$に関する多項式オーダーに軽減されることがわかる。また、推薦対象となる拡張料理レシピ集合\$R'\$を小さくできれば、処理回数をさらに軽減できることもわかる。なお、メモ化再帰を実施するかどうかは、問題の規模や使用する計算機環境によって判断すればよい。

実際にレシピ推薦問題を提案方法で解く場合には、各状態で選択可能なレシピ数\$|R'(X_t)|\$は拡張料理レシピ集合の要素数\$|R'|\$よりも小さい場合が多い。また、それまでの推薦レシピの組合せが異なる場合でも状態が一致することもある。実際の処理回数の例については、4章の実験の中で報告する。

4. 実験

提案方法の有効性を検証するために、2つの適用例を示す。

4.1 適用例1

1つ目の適用例の対象となる既存レシピ名と使用する食材量(グラム, 4人前)を表1に示す。なお、調味料等

は省略している。調味料等の省略は例を簡便にするためであり、本来は調味料等も提案方法の適用対象（調味料等も食材）である。食材シソーラスを表2に示す。表1の既存レシピに表2の食材シソーラスを適用して、既存レシピ中の被代替食材を代替食材に置き換えた新レシピを表3に示す。表1と表3を合わせた全レシピが推薦の対象レシピである。余剰食材の余剰量（グラム）、単価（円／グラム）と消費期限までの残日数を表4に示す。既存レシピは料理レシピサイト等[2][3]、食材シソーラスは料理レシピサイト等[11][12]、食材の単価は農林水産省の食品価格動向調査等[13]を参考にした。牛肉の単価は輸入牛肉コースである。ここでは4人前の結果を示すが、仮に2人前のレシピ推薦を行いたい場合には、レシピ中の食材量を2人前に換算して提案方法を適用する。

表1. 例1の既存レシピと使用食材（グラム、4人前）

既存レシピ	使用食材
秋刀魚の竜田揚げ	秋刀魚200
秋刀魚のトマト煮	秋刀魚200, 玉葱200, トマト240
牛すき煮	牛肉300, 玉葱200
トマトすき焼き	牛肉300, 玉葱200, トマト240
鮭の南蛮漬	鮭300, 玉葱200, きゅうり100
鮭の塩焼き	鮭300

表2. 例1の食材シソーラス

被代替食材（既存レシピ）	代替食材（新レシピ）
秋刀魚	鰯
きゅうり	ズッキーニ

表3. 例1の新レシピと使用食材（グラム、4人前）

新レシピ	使用食材
鰯の竜田揚げ	鰯200
鰯のトマト煮	鰯200, 玉葱200, トマト240
新: 鮭の南蛮漬	鮭300, 玉葱200, ズッキーニ100

推薦回数を $T = 3$ として、既存レシピ（表1）と食材の代替を考慮した新レシピ（表3）に対して動的計画法による推薦方法（提案方法）を適用した、食品ロスのコストを最小化するという意味で最適なレシピ推薦を表5に示す。適用例1でのメモ化再帰を実施しない場合の動的計画法の処理回数は22、メモ化再帰を実施する場合は16だった。

表4. 例1の余剰食材

	余剰量 (グラム)	単価 (円/ グラム)	残日数
秋刀魚	0	0.7	0
鰯	200	0.9	1
鮭	300	2.5	3
牛肉	300	2.8	2
玉葱	400	0.2	3
トマト	240	0.8	3
きゅうり	0	0.4	0
ズッキーニ	100	1.7	3

表5. 例1の提案方法による最適なレシピ推薦

1回目	鰯の竜田揚げ
2回目	トマトすき焼き
3回目	新: 鮭の南蛮漬
食品ロス	0円

表5の提案方法による推薦では、既存レシピ中の秋刀魚を余剰食材の鰯で代替した鰯の竜田揚げと、既存レシピ中のきゅうりを余剰食材のズッキーニで代替した新: 鮭の南蛮漬を推薦することにより、食品ロスの廃棄によって発生する総コストを0円に最小化している。推薦レシピの順番が異なったり、他のレシピを推薦すると、食材の廃棄が発生したり、途中で推薦可能なレシピがなくなり総コストが0円よりも大きくなる。

提案方法に対する比較対象として、以下の比較1と比較2の推薦ルール（経験則）に基づくレシピ推薦を表6に示す。

比較1：消費期限までの残日数が最小の余剰食材を優先して使用し、かつなるべく多くの余剰食材を使用するレシピを優先する。

比較2：消費期限までの残日数が最小の余剰食材を優先して使用するが、消費期限まで余裕のある（翌日以降でも消費可能な）食材の使用は必要最低限にする。

比較1と比較2は消費期限までの残日数が最小の余剰食材を優先して使用する点は共通しているが、なるべく多くの食材を使用する比較1となるべく少ない食材を使用する比較2でルールとしての性質は真逆である。しかし、表6のレシピ推薦結果を見ると、比較1、比較2ともに食品ロスが発生している。比較1では3回目のレシピ推薦後に消費期限切れになるズッキーニ100グラムの廃棄コストが発生し、比較2では3回目のレシピ推薦後に消費期

限切れになるトマト240グラムの廃棄コストが発生している。

表6. 例1の比較1, 比較2のレシピ推薦

	比較1	比較2
1回目	鰯のトマト煮	鰯の竜田揚げ
2回目	牛すき煮	牛すき煮
3回目	鮭の塩焼き	新:鮭の南蛮漬け
食品ロス	170円	192円
廃棄食材	ズッキーニ 100グラム	トマト 240グラム

適用例1では、毎回の推薦時に消費期限までの残日数が1日であるメイン食材(鰯, 牛肉, 鮭)が余剰食材に含まれる設定になっている。よって、消費期限まで残日数が1日のメイン食材(鰯, 牛肉, 鮭)を使用するレシピを推薦するという点は提案方法, 比較1, 比較2すべてで共通している。しかし、提案方法では1回目には使用食材数が最少の鰯の竜田揚げを推薦しているが、2回目および3回目には使用食材数が最多のトマトすき焼きと新:鮭の南蛮漬けを推薦している。提案方法では単純な比較1や比較2とは異なる柔軟な推薦結果になる。これは、式(5)および式(6)の動的計画法の処理による、次回以降のレシピ推薦を先読みした計画的なレシピ推薦の結果である。

4.2 適用例2

次に2つ目の適用例を示す。適用例1と同様に、既存レシピ名と使用する食材量(グラム, 4人前), 食材シソーラス, 新レシピ, 余剰食材の余剰量(グラム), 単価(円/グラム)と消費期限までの残日数, 推薦回数を $T = 3$ とした場合の提案方法による最適なレシピ推薦, 提案方法に対する比較対象の比較1と比較2によるレシピ推薦を表7~表12に示す。適用例2でのメモ化再帰を実施しない場合の動的計画法の処理回数は18, メモ化再帰を実施する場合は15だった。

適用例2でも、適用例1と同様に提案方法による最適なレシピ推薦では食品ロスによる総コストを0円に最小化しているが、比較対象である比較1と比較2では廃棄コストが発生している。比較1ではさやいんげん100グラムの廃棄コストが発生し、比較2ではさやいんげん100グラムと里芋400グラムの廃棄コストが発生している。提案方法によるレシピ推薦では1回目には比較2同様に使用する

る食材が少ない鯖のムニエルを推薦しているが、2回目には使用食材が多い里芋と鶏胸肉の炒めを推薦している。

表7. 例2の既存レシピと使用食材(グラム, 4人前)

既存レシピ	使用食材
ジャガ芋と牛肉の炒め	牛肉300, ジャガ芋400, さやいんげん100
舌平目のムニエル	舌平目400
鶏もも肉ときゅうりの炒め	鶏もも肉400, きゅうり400
舌平目とジャガ芋のオープン焼き	舌平目400, ジャガ芋400
鶏胸肉の照り焼き	鶏胸肉300

表8. 例2の食材シソーラス

被代替食材(既存レシピ)	代替食材(新レシピ)
牛肉	鶏胸肉
鶏もも肉	鶏胸肉
舌平目	鯖
ジャガ芋	里芋
きゅうり	ズッキーニ

表9. 例2の新レシピと使用食材(グラム, 4人前)

新レシピ	使用食材
ジャガ芋と鶏胸肉の炒め	鶏胸肉300, ジャガ芋400, さやいんげん100
里芋と牛肉の炒め	牛肉300, 里芋400, さやいんげん100
里芋と鶏胸肉の炒め	鶏胸肉300, 里芋400, さやいんげん100
鯖のムニエル	鯖400
鶏胸肉ときゅうりの炒め	鶏胸肉400, きゅうり400
鶏もも肉とズッキーニの炒め	鶏もも肉400, ズッキーニ400
鶏胸肉とズッキーニの炒め	鶏胸肉400, ズッキーニ400
鯖とジャガ芋のオープン焼き	鯖400, ジャガ芋400
舌平目と里芋のオープン焼き	舌平目400, 里芋400
鯖と里芋のオープン焼き	鯖400, 里芋400

表10. 例2の余剰食材

	余剰量 (グラム)	単価 (円/ グラム)	残日 数
牛肉	0	2.8	0
鶏もも肉	0	1.2	0
鶏胸肉	700	0.8	3
舌平目	0	2.7	0
鯖	400	1.3	1
ジャガ芋	0	0.4	0
きゅうり	0	0.4	0
さやいんげん	100	2.0	3
ズッキーニ	400	1.7	3
里芋	400	1.1	3

表11. 例2の提案方法による最適なレシピ推薦

1回目	鯖のムニエル
2回目	里芋と鶏胸肉の炒め
3回目	鶏胸肉とズッキーニの炒め
食品ロス	0円

表12. 例2の比較1, 比較2のレシピ推薦

	比較1	比較2
1回目	鯖と里芋のオーブン焼き	鯖のムニエル
2回目	鶏胸肉とズッキーニの炒め	鶏胸肉の照り焼き
3回目	鶏胸肉の照り焼き	鶏胸肉とズッキーニの炒め
食品ロス	200円	640円
廃棄食材	さやいんげん 100グラム	さやいんげん100 グラム, 里芋400 グラム

適用例2でも、適用例1と同様に提案方法による最適なレシピ推薦では食品ロスによる総コストを0円に最小化しているが、比較対象である比較1と比較2では廃棄コストが発生している。比較1では3回目のレシピ推薦後に消費期限切れになるさやいんげん100グラムの廃棄コストが発生し、比較2では3回目のレシピ推薦後に消費期限切れになるさやいんげん100グラムと里芋400グラムの廃棄コストが発生している。提案方法によるレシピ推薦では1回目には比較2同様に使用する食材が少ない鯖のム

ニエルを推薦しているが、2回目には使用食材が多い里芋と鶏胸肉の炒めを推薦している。

4.3 有効性の確認

上記の2つの適用例から、本研究の提案方法による食品ロスは上記比較1や比較2のような単純な経験則の食品ロスよりも小さくなる傾向を確認できた。これは、食品ロスの削減という課題に対して、本研究のようにレシピ推薦に関する最適化問題を解くことによる対処の有効性を示すものと考えられる。また、適用例では食材センサーズを利用した食材の代替による新レシピを推薦することによって食品ロスを最小化している。これは、食品ロスの削減という課題に対して、食材センサーズを利用した食材の代替の有効性を示すものと考えられる。

また、提案方法による最適解は理論的境界でもあるので、上記の比較実験は経験則の比較1や比較2が理論的境界(今回の適用例では食品ロス0円)に対してどの程度の差になるかという評価実験でもある。今回の評価実験から経験則の比較1や比較2では理論的境界を達成できないことがあることを確認できる。

4.4 適用例1のR言語のソースコード

参考として、適用例1の提案方法による最適なレシピ推薦を算出するためのR言語によるソースコードを以下に示す。

```

num_R <- 9 # レシピ数 (既存6、代替3)
num_G <- 8 # 食材数
w_s <- matrix(0, num_G) # 余剰量
w_s <- c(0, 200, 300, 300, 400, 240, 0, 100) # 余剰量の初期設定
g_name <- c("秋刀魚", "鰯", "鯖", "牛肉", "玉葱", "トマト", "きゅうり", "ズッキーニ")
c <- matrix(0, num_G) # コスト単価 (グラムあたり)
c <- c(0.7, 0.9, 2.5, 2.8, 0.2, 0.8, 0.4, 1.7) # コスト単価 (グラムあたり) の設定
ex <- matrix(0, num_G) # 消費期限までの残日数
ex <- c(0, 1, 3, 2, 3, 0, 3) # 消費期限までの残日数の設定
r_name <- c("秋刀魚の竜田揚げ", "秋刀魚のトマト煮", "牛すき煮", "トマトすき焼き", "鯖の南蛮漬け", "鯖の塩焼き", "鰯の竜田揚げ", "鰯のトマト煮", "新・鯖の南蛮漬け")
w_r <- matrix(0, num_R, num_G) # レシピ中の食材使用量
w_r[1,] <- c(200, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
w_r[2,] <- c(200, 0, 0, 0, 200, 240, 0, 0)
w_r[3,] <- c(0, 0, 0, 300, 200, 0, 0, 0)
w_r[4,] <- c(0, 0, 0, 300, 200, 240, 0, 0)
w_r[5,] <- c(0, 0, 300, 0, 200, 0, 100, 0)
w_r[6,] <- c(0, 0, 300, 0, 0, 0, 0, 0)
w_r[7,] <- c(0, 200, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
w_r[8,] <- c(0, 200, 0, 0, 200, 240, 0, 0)
w_r[9,] <- c(0, 0, 300, 0, 200, 0, 0, 100)
T <- 3 # 選択回数
v_pre <- hash() # メモ化再帰用のv変数
d_pre <- hash() # メモ化再帰用のレシピ変数
num_all_node <- 0 # メモ化再帰なしの処理回数
num_all_hash <- 0 # メモ化再帰ありの処理回数

```

```

v <- function(x1, x2, t) {
  num_all_node <- num_all_node+1 # メモ化再帰なしの処理回数
  x1_label = paste(x1, collapse = ",")
  x2_label = paste(x2, collapse = ",")
  label = paste(x1_label, x2_label, t, sep = ",") # ハッシュキー
  if(has.key(label, v_pre)==TRUE) { # メモ化再帰の確認
    return(c(v_pre[[label]], d_pre[[label]]))
  } else {
    num_all_hash <- num_all_hash+1 #メモ化再帰ありの処理回数
    check_r <- matrix(0, num_R) # レシピの選択可否チェック
    num_check_r <- 0 # 選択可のレシピ数
    for(i in 1:num_R) {
      check <- 1
      for(j in 1:num_G) {
        if(x1[j]<w_r[i, j]) {
          check <- 0
        }
      }
      check_r[i] <- check
      num_check_r <- num_check_r+check_r[i]
    }
    if(num_check_r==0) {
      cat("\n")
      cat(t, "期", " 余剰量", x1, " 残日数", x2, "\n")
      cat(" 選択可能レシピなし 当期ロス", sum(c*x1), "\n")
      v_pre[[label]] = sum(c*x1)
      d_pre[[label]] = -1
      return(c(sum(c*x1), -1))
    } else {
      id_check_r <- matrix(0, num_check_r) #選択可レシピ番号
      i1 <- 1
      for(j in 1:num_R) {
        if(check_r[j]==1) {
          id_check_r[i1] <- j
          i1 <- i1+1
        }
      }
      v_temp <- matrix(0, num_check_r)
      loss_temp <- matrix(0, num_check_r)
      x1_dash <- matrix(0, num_check_r, num_G) # 次期の余剰量
      x2_dash <- matrix(0, num_check_r, num_G) # 次期の消費期
      限までの残日数
      for(i in 1:num_check_r) {
        for(j in 1:num_G) {
          x1_dash[i, j] <- x1[j]-w_r[id_check_r[i], j]
          if(x1_dash[i, j]>0) {
            x2_dash[i, j] <- x2[j]-1
            if(x2_dash[i, j]==0) {
              loss_temp[i] <-
                loss_temp[i]+c[j]*x1_dash[i, j]
              x1_dash[i, j] <- 0
            }
          } else {
            x2_dash[i, j] <- 0
          }
        }
      }
      if(t==T) {
        v_temp[i] <- loss_temp[i]
      } else {
        v_temp[i] <- loss_temp[i]
        +v(x1_dash[i, ], x2_dash[i, ], t+1)[1]
      }
    }
    cat("\n")
    cat(t, "期", " 余剰量", x1, " 残日数", x2, "\n")
    cat(" 選択レシピ", id_check_r[which.min(v_temp)],
      r_name[id_check_r[which.min(v_temp)]],

```

```

"当期ロス", loss_temp[which.min(v_temp)],
"v", min(v_temp), "\n")
cat("次の期", " 余剰量", x1_dash[which.min(v_temp), ],
" 残日数", x2_dash[which.min(v_temp), ], "\n")
if(t==1) {
  cat("メモ化再帰なしの処理回数:", num_all_node,
"  メモ化再帰実施時の処理回数:",
  num_all_hash, "\n")
}
v_pre[[label]] = min(v_temp) # メモ化再帰実施
d_pre[[label]] = id_check_r[which.min(v_temp)]
return(c(min(v_temp), id_check_r[which.min(v_temp)]))
}
}
cat("v(w_s, ex, 1)\n", v(w_s, ex, 1), "\n")

```

5. 考察

5.1 考察

提案方法の計算量について3章で、メモ化再帰を実施しない場合にはレシピの推薦回数 T に関する指数オーダー $O(|R'|^T)$ 、メモ化再帰を実施する場合には多項式オーダーであることを説明した。メモ化再帰も重要だが、実際の動的計画法の処理回数の軽減のためには推薦対象となる拡張料理レシピ集合 R' をできるだけ小さくすることも重要である。

食材の代替は3.1節のアルゴリズムで実施するが、仮に既存レシピ中の被代替食材数が2でそれぞれ代替食材数が3だと、元の既存レシピを含めて $(3+1)^2 = 16$ 個のレシピ(既存1, 新15)が生成される。4章の適用例では1つの既存レシピに対して被代替食材数は最大で2、代替食材数は1なので、元の既存レシピを含めて最大で $(1+1)^2 = 4$ 個のレシピ(既存1, 新3)が生成されていた。適用例では簡便のため小規模な食材ソーラスを利用したが、実際には1つの既存レシピに対して数十の新レシピが生成されることも珍しくない。同じ既存レシピから生成された任意の2つの異なる新レシピを比較すると、使用食材は最低でも1つは異なる。よって、提案方法を適用した際に同じ既存レシピから生成された数十の新レシピすべてが選択可能な状態は少ないと考えられる。しかし、新レシピが多ければ同じ状態で選択可能なレシピ数も多くなる可能性が高い。本研究では新レシピをすべて拡張料理レシピ集合 R' に含めるが、処理回数の軽減のためには何らかの基準/工夫で拡張料理レシピ集合 R' に含める新レシピ数を抑制することが重要である。

2.3節で提案方法による最適解は理論的境界でもあることを説明した。つまり、本研究の提案方法はレシピ推薦方法として食品ロスを最小にするレシピ推薦を実施し、かつ提案方法で算出される最適解(最小の食品ロス)

は他のレシピ推薦方法の評価に利用可能な理論的境界でもある。現状ではレシピ推薦に関するベンチマークテストなどは存在しないので、このような理論的境界の提供も重要と考える。

5.2 今後の課題

本研究そのものは本学会の対象分野とは直接関係していないが、本研究はヘルスケア支援の視点からの拡張が可能である。従来研究[14][15]では既存レシピに対して食材シソーラスを適用して新レシピを生成する際にカロリーや栄養素の含有量に制約を設けることによって、メタボ対策レシピや特定疾病向け療養食レシピの発想支援を検討している。メタボ対策と特定疾病向けの基本的な違いは着目する対象が、カロリー（メタボ対策）か特定の栄養素（特定疾病向け）かの違いである。

具体的な方法について、鉄分の摂取量を増やしたい場合を例に説明する。食材シソーラスを作成する際に本研究では単に代替可能性（代替しても美味しく食べられる）に基づいて作成するが、鉄分の摂取量を増やしたい場合であれば、代替可能性に加えて代替後の食材の方が鉄分の含有量が多い場合のみ食材シソーラスに登録することが考えられる。ただし、これは必須ではない。必須の処理は代替後のレシピにおける鉄分の含有量が目標値（例えば1人前10ミリグラム以上など）を達成した場合のみ新レシピとして採用する選別処理である。従来研究[14][15]では、このように既存レシピに食材シソーラスを適用してメタボ対策／特定疾病向け療養食の新レシピを生成する方法を検討している。最終的に選別処理があるので、食材シソーラス作成時に鉄分を考慮していない本研究と同様の食材シソーラスでも対応可能である。

本研究に適用する場合であれば、着目している栄養素の含有量が条件を達成した代替後のレシピのみ、推薦対象となる拡張料理レシピ集合 R' に含める。5.1節の考察において提案方法の処理回数の軽減のためには新レシピ数を抑制することが重要であることを説明したが、ヘルスケア支援の視点に基づく上記の拡張は新レシピ数の抑制にも寄与する。

代替後のレシピに対する選別処理による新レシピ数の抑制という視点からヘルスケア支援以外でも、個人あるいは特定の家族向けの選別処理が考えられる。一般的に単純に食材シソーラスを適用するのみでは、代替後のレシピ集合には利用者の嗜好に適さないレシピも含まれる。そこで、個人のプロフィール情報として食材の好き嫌いの情報を登録しておき、嫌いな食材を含むレシピ

の排除、好きな食材を多く含むレシピの新レシピとしての採用などによって個人の嗜好への対応と新レシピ数の抑制を両立できる。

また、既存の食材シソーラスの代替食材から個人が嫌いな食材を削除すること、あるいは個人が好きな食材のみ代替食材として登録することによって、個人の嗜好に対応した食材シソーラスの作成も可能である。

本研究では議論を簡便にするために、使用可能な食材はレシピ推薦時に家庭にある余剰食材のみとし、食材の追加購入は対象外とした。しかし、現実には日々の買い物で食材を追加購入し、追加購入によって新たな余剰食材が発生する。よって、より現実的な問題設定として食材の追加購入および新たな余剰食材を考慮した推薦アルゴリズムが考えられる。この場合には、同じ食材でも少量で単価が高めの商品と多量で単価が低めの商品などの選択も重要になる。少量の商品であれば新しい余剰食材になる可能性は低く、発生してもごく少量である。他方、多量の商品であれば新しい余剰食材が多量に発生する可能性が高い。本研究の簡便な問題設定のもとでは意思決定対象は推薦レシピの選択（消費する余剰食材の選択）のみだった。本研究を食材の追加購入を考慮するように拡張する場合には、意思決定対象を推薦レシピと購入商品の組の選択に拡張した定式化を行うことになる。

本研究の提案方法による最適解が理論的境界でもありと既に説明したが、上記のような拡張研究で算出される最適解も同様に拡張された問題設定に対する理論的境界になる。よって、拡張研究においても本研究同様に最適解を算出するアルゴリズムを提案できれば、その最適解を利用することによって、拡張された問題設定に対する他の推薦方法の評価も可能である。

処理回数の軽減のための工夫として、新レシピ数の抑制について上記で説明したが、動的計画法の近似解法による軽減も考えられる。動的計画法における近似解法は従来から検討されており、本研究の提案方法にも容易に適用可能な例として、本来解きたい T 回のレシピ推薦問題の代わりに、 T' 回 ($T' < T$) の動的計画法の問題を $T - T' + 1$ 回繰返し解く近似解法がある。まず1回目のレシピ推薦のために1回目から T' 回目の T' 回分の問題を解いて、その1回目のレシピを推薦する。次に2回目のレシピ推薦のために2回目から $T' + 1$ 回目の T' 回分の問題を解いて、その2回目のレシピを推薦する。このように1回分ずつづらしながら短期間の問題を繰返し解く。最終的に $T - T' + 1$ 回目から T 回目の T' 回分の問題の解はそのまま

$T - T' + 1$ 回目から T 回目の推薦レシピとする。この近似解法であれば、本研究の提案方法の T を T' に読み替えることによって容易に適用できる。

6. まとめ

本研究では、食材の代替を考慮したもとの動的計画法を用いて家庭の余剰食材を有効活用することによって、食品ロスによるコストを最小化するレシピ推薦方法を提案した。従来研究でも余剰食材の有効活用は検討されているが、食材の代替を考慮したもとの食品ロスの最小化は検討されていない。実際に提案方法によって食材の代替を考慮したもとの、食品ロスを最小化するレシピ推薦が可能であることを実験によって確認した。

本研究は基礎研究の初期検討であるため、簡便な問題設定としたが、今後は、5.2節で今後の課題として挙げた拡張研究など、より現実に近い問題設定を検討する。

参考文献

- [1] 農林水産省：食品ロス量（平成29年度推計値）の公表について，2020。
<https://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/kankyoi/200414.html>, 参照 (2020. 4. 19)
- [2] Cookpad Inc. : クックパッド,
<https://cookpad.com/>, 参照 (2020. 4. 11)
- [3] Oishi kenko Inc. : おいしい健康,
<https://oishi-kenko.com/>, 参照 (2020. 4. 11)
- [4] 石原和幸, 上田真由美, 平野靖, 梶田将司, 間瀬健二: FF-IRFを用いた個人嗜好レシピ推薦手法の有効性検証, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2007-77, pp. 51-56, 2008.
- [5] 荻米志帆乃, 藤井敦: 栄養素等摂取バランスを考慮した料理レシピ検索システム, 電子情報通信学会論文誌D, Vol. J92-D, No. 7, pp. 975-983, 2009.
- [6] 鄭美玲, 井上悦子, 中川優: 食材の使い切りを考慮した期間的な料理レシピセットの推薦, 第3回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, E3-4, Feb. 2011.
- [7] 木原ひかり, 上田真由美, 中島伸介: 余剰食材の使い切りを考慮したレシピ推薦手法の提案, 第3回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, E3-3, Feb. 2011.
- [8] 志土地由香, 井手一郎, 高橋友和, 村瀬洋: 料理レシピマイニングによる代替可能食材の発見, 電子情報通信学会論文誌A, Vol. J94-A, No. 7, pp. 532-535, 2011.
- [9] 前田康成, 吉田秀樹, 鈴木正清: 地産地消レシピ発想支援方法に関する一考察, 電子情報通信学会論文誌A,

Vol. J94-A, No. 7, pp. 536-539, 2011.

[10] 鍋島一郎: 動的計画法, 森北出版, 東京, 1968.

[11] Cookpad Inc. : 秋刀魚(いわし)の竜田揚げ(から揚げ), <https://cookpad.com/recipe/1533590>, 参照 (2020. 4. 18)

[12] 食べいろナビ: ズッキーニは生でも美味しい! あく抜きの方法と食べ方を紹介!,

<https://tabemono-jiten.com/zucchini-nama/>, 参照 (2020. 4. 18)

[13] 農林水産省: 食品の価格動向,

<https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/kouri/index.html>, 参照 (2020. 4. 11)

[14] 前田康成, 梶井文人, 吉田秀樹, 鈴木正清: メタボ対策料理レシピ発想支援方法に関する一考察, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.13, No.1, pp.81-86, 2011.

[15] 前田康成, 梶井文人, 鈴木正清: 特定栄養素を調整する新規料理レシピ発想支援方法に関する一考察, 電気学会論文誌C, Vol.131, No.9, pp.1654-1655, 2011.



前田康成 (まえだやすなり)

平成7年早大・理工卒。平成9年同大学院理工学研究科修士課程修了。日本電信電話(株), 東日本電信電話(株), 北見工大助手, 助教, 准教授を経て平成28年同大学教授, 現在に至る。博士(工学)。統計的決定理論の学習問題への応用に関する研究に従事。電子情報通信学会等各会員。