

ファジィ線形計画法による食料消費行動の最適化

ガンガ伸子（長崎大学教育学部）

1. 緒言

家庭において食事計画（献立）を立てる際には、どの食品を組み合わせたら栄養バランスの良い食事になるか、できれば食費も抑えたいなど、栄養や経済性に配慮する。最小の食料費で計画ができて、栄養バランスがとれたメニューはどのような食品で構成されるかという、栄養・経済合理性を追求したメニューとその費用は線形計画法（Linear Programming）によって求めることができる。これまでも、栄養の適正基準を満たす食品の組み合わせから最低費用のメニューを求める試み¹⁾²⁾がなされており、栄養条件だけでなく食習慣も取り入れて食料費の最小化を行った分析³⁾⁴⁾もある。

本研究の目的は、厚生労働省「日本人の食事摂取基準（2010年版）」⁵⁾をもとに、栄養摂取量と食品消費量に関する制約条件を課して、最小の費用で実現できる望ましい食事を計画することであるが、通常の線形計画法を基礎としてファジィ理論を導入したファジィ線形計画法（Fuzzy Linear Programming）を適用する。クリスプに栄養摂取量や食料費を定式化するよりも、だいたいこのぐらいという曖昧さを取り扱うファジィのほうが、より現実的な家計の行動を表すことができると考えられるので、ファジィ線形計画法を適用しその有用性を検討することとした。

2. 通常の線形計画法とファジィ線形計画法

(1) 通常の線形計画法

通常の線形計画法とは、与えられた制約条件のもとで、1つの目的関数を最小あるいは最大にするような解を求めることである。 n 次元行ベクトル $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 、 n 次元列ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 、 m 次元列ベクトル $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$ 、 $m \times n$ 行列 $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ を用いて、行列形式で以下のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{minimize(or maximize)} & z = \mathbf{c}\mathbf{x} \\ \text{subject to} & \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

制約条件および目的関数は線形であり、すべての(決定)変数 x_j には非負条件が課せられている。

(2) ファジィ線形計画法

Zimmermannによって構築されたファジィ線形計画法では、通常の線形計画問題に対してファジィ目標とファジィ制約が設定される⁶⁾⁷⁾。

$$\left. \begin{array}{l} cx \leq z_0 \\ Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

ただし、「 \leq 」はファジィ不等号を表している。この問題には、「目的 cx をだいたい z_0 以下にしたい」というファジィ目標と、「制約 Ax をだいたい b 以下にしたい」というファジィ制約が与えられている。このファジィ目標とファジィ制約が意思決定に関して同じ役割を果たすと考えると、目標と制約は、次のようにまとめることができる。

$$\left. \begin{array}{l} Bx \leq b' \\ x \geq 0 \end{array} \right\}, \quad B = \begin{bmatrix} c \\ A \end{bmatrix}, \quad b' = \begin{bmatrix} z_0 \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

ファジィ不等式 $Bx \leq b'$ の i 番目の不等式 $(Bx)_i \leq b'_i$ $i=0, \dots, m$ に対して、メンバシップ関数を用いて、意思決定者のあいまい性を表すと次のようになる。

$$\mu_i((Bx)_i) = \begin{cases} 1 & ; (Bx)_i \leq b'_i \text{ のとき} \\ 1 - \frac{(Bx)_i - b'_i}{d_i} & ; b'_i \leq (Bx)_i \leq b'_i + d_i \text{ のとき} \\ 0 & ; (Bx)_i \geq b'_i + d_i \text{ のとき} \end{cases} \quad (4)$$

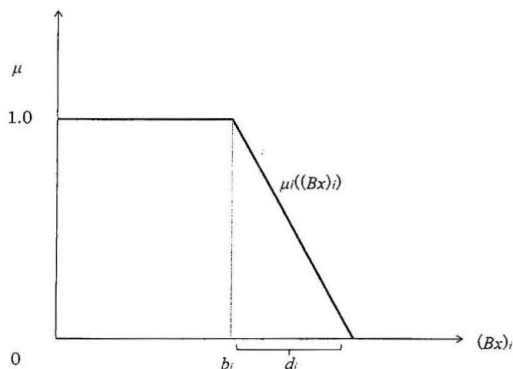


図1 線形メンバシップ関数

このようなメンバシップ関数は図1に示すとおり、 i 番目の制約が完全に満たされる場合、つまり、 $(Bx)_i$ の値が b'_i より小さければメンバとして所属が認められ 1.0 が与えられる。意思決定者が主観的に設定する許容幅 d_i 以上に満たされない場合、つまり $b'_i + d_i$ より大きければ所属が認められないので 0 となる。その中間

の場合、 b'_i から $b'_i + d_i$ までは0から1.0の間の数をとることになり、 b'_i に近いほど1.0に近い値が与えられ、 $b'_i + d_i$ に近いほど0に近い値が与えられる。

以上のようなメンバーシップ関数をもつファジィ線形計画法に、補助変数 λ を導入すると、次に示すように通常の線形計画法に変換することができる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Maximize } \lambda \\ \text{subject to } \lambda \leq 1 + b''_i - (B'x)_i \quad i = 0, \dots, m \\ x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

ここでは、 $b''_i = b'_i/d_i$ 、 $(B'x)_i = (Bx)_i/d_i$ としている。

3. 線形計画モデルによる最適化

(1) 線形計画モデルの設定とデータ

はじめに、(1)式で示す通常の線形計画法によって、できるだけ少ない費用で望ましい食事計画をたてるには、どのような食品をどれだけ消費するとよいか、そのときの費用はいくらになるかということを求める。制約条件 b のうち、栄養摂取量に関するものは、次に示す制約①～⑤で、厚生労働省「日本人の食事摂取基準（2010年版）」を参考に、男性30～49歳、身体活動レベルⅡ（ふつう）の1日当たりの推定必要量、目標量等を用いた。また、制約⑥⑦は食品消費量に関する制約条件であるが、制約⑥で米を1日210g以上消費することとしたのは、理想的な栄養バランスと評価される「日本型食生活」の消費習慣を維持するためである。「日本型食生活」とは、米を中心として肉・魚・野菜・海藻・豆類等がバランスよく加わったものである。1980年農政審議会の答申「80年代の農政の基本方向」の中で、欧米諸国と比べて優れた栄養バランスをもつ日本型食生活が高く評価されたように、日本型食生活と呼ばれる栄養バランスの良い食生活が実現したのが1980年頃であり、1980年当時の主食用米の消費量（国民1人1日当たり供給純食料：農林水産省「食料需給表」）が210.0gであることから、日本型食生活の消費習慣を維持するために、米210g以上消費することを制約条件に取り入れた。また、制約⑦では、野菜を350g以上消費することとした。2000年、厚生省（当時）によって始められた21世紀における国民健康づくり運動（健康日本21）でも野菜350g以上摂取することが数値目標とされた⁸⁾が、現実には、成人平均の野菜の摂取量は295.3g（厚生労働省「平成21年国民健康・栄養調査」）と野菜不足の状態にある。生活習慣病の予防の観点から、野菜350g以上の摂取が望ましいとされているので、食品消費量の制約条件に加えた。

制約①：2,650kcal ≤ エネルギー摂取量

制約②：50g ≤ たんぱく質摂取量

制約③：総エネルギーの20% ≤ 脂質摂取量 < 総エネルギーの25%

制約④：総エネルギーの50% ≤ 炭水化物の摂取量 < 総エネルギーの70%

制約⑤：550mg ≤ カルシウムの摂取量

- 制約⑥：6.5mg ≤ 鉄の摂取量
 制約⑦：2,500mg ≤ カリウムの摂取量
 制約⑧：600 μgRE ≤ ビタミンAの摂取量
 制約⑨：1.2mg ≤ ビタミンB₁の摂取量
 制約⑩：1.3mg ≤ ビタミンB₂の摂取量
 制約⑪：13mgNE ≤ ナイアシン
 制約⑫：85mg ≤ ビタミンCの摂取量
 制約⑬：コレステロール ≤ 750mg
 制約⑭：19g ≤ 食物繊維の摂取量
 制約⑮：食塩の摂取量 ≤ 9g
 制約⑯：210g ≤ 米の消費量
 制約⑰：350g ≤ 野菜の消費量

次に、食事計画を立てるうえで選択可能な食品の種類は表1に示すとおり、総務庁統計局「家計調査」の素材の項目84食品($n=84$)で、その消費量は x_1, x_2, \dots, x_n である。この消費量は、皮や芯などの廃棄率を考慮した量である。 a_{ij} は*i*栄養素が*j*食品に含まれる量を示す。栄養素量は、「五訂増補日本標準食品成分表」⁹⁾によるものである。各食品1単位当りの価格 c_1, c_2, \dots, c_n は総務省統計局『家計調査年報』(品目分類)の平均価格(全国：二人以上の世帯のうち勤労者世帯)(2009年)のデータを用いた。

線形計画法の計算には、Lindo Systems Inc.のLingo12.0を使用した。

(2) 計算結果と考察

計算結果は表2に示すとおりで、栄養摂取量と食品消費量に関する制約条件を満たす食事計画は、米210g、小麦粉274.1g、さんま61.2g、煮干し7.2g、牛乳111.0g(約108ml)、バター19.4g、卵176g、もやし405.6g、ばれいしょ200.7g、にんじん31.1gの10食品で構成され、食料費は1日407.8円であった。実際の食料費は1人1日当たり718.3円(総務省統計局「家計調査年報(2009年)」二人以

表1 選択可能な食品一覧(全84食品)

穀類(8種類)	米(01093), 食パン(01028), 生うどん・そば(01036), 乾うどん・そば(01041), スパゲッティ(01063), 中華めん(01047), 小麦粉(01015), もち(01117)
魚介類(25種類)	まぐろ(10253), あじ(10003), いわし(10047), かつお(10086), かれい(10100), さけ(10134), さば(10154), さんま(10173), たい(10192), ぶり(10241), いか(10345), たこ(10361), えび(10319), かに(10335), あさり(10291), しじみ(10297), かき(10282), ほたけ貝(10311), 塩さけ(10138), たらこ(10202), しらす干し(10056), 干しあじ(10006), 干しいわし(10053), 煮干し(10045), かつお節・削り節(10091)
肉類(6種類)	牛肉(11004), 豚肉(11115), 鶏肉(11221), ハム(11175), ソーセージ(11166), ベーコン(11183)
乳卵類(5種類)	牛乳(13003), 粉ミルク(13009), バター(14017), チーズ(13040), 卵(12004)
野菜・海藻(31種類)	キャベツ(06061), ほうれんそう(06267), はくさい(06233), なぎ(06226), レタス(06312), ブロッコリー(06283), もやし(06267), かんしよ(02006), ばれいしょ(02017), さといも(02010), だいこん(06132), にんじん(06212), ごぼう(06084), たまねぎ(06153), れんこん(06317), たけのこ(06148), さやまめ(06010), かぼちゃ(06046), ぎゅうり(06065), なす(06191), トマト(06182), ピーマン(06245), 生しいたけ(06011), 干しいたけ(06013), わかめ(09099), こんぶ(08014), 豆腐(04032), 梅干し(07022), だいこん漬(08138), はくさい漬(06235), こんぶつくだ漬(08023)
果物(9種類)	りんご(07148), みかん(07027), グレープフルーツ(07062), オレンジ(07040), ぶどう(07116), メロン(07134), いちご(07012), パナナ(07107), キウイフルーツ(07054)

注) ()内の数字は「食品成分表(五訂増補版)」の食品番号を示す。

上の世帯のうち勤労者世帯)であるので、線形計画法によって求められた最小費用は、実際の食料費の56.8%に相当する。これは、実際の食料費の内56.8%は栄養摂取のために支払っていると言いかえることができよう。食料費の最小化という課題において、カロリー単価(1kcal当たり支出額)の低い、米・小麦粉・ばれいしょのようなでんぷん質食品が多くメニューに含まれるということは、必然的なことである。魚介類においては、さんまや煮干しといったいわゆる大衆魚が選択され、栄養価の高い乳卵類からも牛乳・バター・卵が選ばれている。選択された食品はいずれも、廉価で栄養価の高いものである。

また、線形計画法によって求められた最小費用メニューの栄養素量は、表3に示すとおりで、制約条件は満たしているものの、コレステロールは上限とする750mgにほとんど達しており、生活習慣病のリスクを減らすためには、もう少しコレステロール摂取を控えるのが望ましいと思われる。卵は価格の優等生と呼ばれるだけあって、最小費用メニューでは欠かせない食品ではあるが、176gの量というのはMサイズ3個程度で、食事バランスガイド¹⁰⁾からみても、一般感覚からしても多く摂りすぎているように感じられる。

食品消費量の制約に関して、米は主食であるにもかかわらず、米の消費量は制約条件の210gだけが最小費用メニューに含まれ、その一方で、米を上回る量の小麦粉が選択された。これには、小麦粉と比較して米の価格の高さが原因していると思われる。また、野菜の消費量の制約に関して、とりわけもやしの量が多くなった。もやしは成長が早く、天候に左右されずに生産されるので、安価安定した野菜である。その他、家庭常用野菜のにんじんも含まれている。

表2 線形計画モデルによる最小費用メニュー (g)

食料費	407.8円
米	210.0
小麦粉	274.1
さんま	61.2
煮干し	7.2
牛乳	111.0
バター	19.4
卵	176.0
もやし	405.6
ばれいしょ	200.7
にんじん	31.1

4. ファジィ線形計画モデルによる最適化

(5)式に示すように、ファジィ線形計画モデルを設定した。食料費は線形計画法の解407.8円から、できれば400~500円にしたいというファジィ目標を設定した。ファジィ制約について、ファジィ部分をつけたのは、エネ

表3 最小費用メニューのエネルギー・栄養素量

	制約条件(上限、下限値)	最小費用メニューの栄養	
		通常の線形計画モデル	ファジィ線形計画モデル
エネルギー	kcal	2650.0	2740.7
たんぱく質	g	50.0	63.0
脂質	g	73.6	58.9
炭水化物	g	331.3	445.5
カルシウム	mg	550.0	550.1
鉄	mg	6.5	9.3
カリウム	mg	2500.0	2500.1
ビタミンA	μgRE	600.0	600.0
ビタミンB1	mg	1.2	1.2
ビタミンB2	mg	1.3	1.3
ナイアシン	mgNE	13.0	13.0
ビタミンC	mg	85.0	85.0
コレステロール	mg	750.0	523.3
食物繊維	g	19.0	20.1
食塩相当量	g	9.0	1.3

ルギーとコレステロールの摂取量についてである。現実の食事計画においては、どんなに正確にカロリー計算しても、摂取エネルギーには多少の幅が生じる。そ

ここで、エネルギー摂取量も 100kcal のファジィ部分をつけた。また、コレステロールも生活習慣病リスクの観点から、750mg 以上の摂取は許されないが、できれば 600mg 以下にしたいというファジィ制約をつけた。その他の栄養摂取量に関する制約条件には、ファジィ部分をつけず、線形計画法の制約条件と同じ設定にした。このようなファジィ線形計画モデルの計算結果は表 4 に示すとおり、食料費は 409.3 円で、通常の線形計画モデルよりわずか 1.5 円増えただけであった。しかし、最小費用メニューをみると、エネルギーは通常の線形計画モデルの計算結果よりも 90.7kcal 増え 2740.7kcal になった。卵については 111.8g と通常の線形計画モデルの計算結果よりも 64.2g も減少しており、その結果、表 3 に示すようにコレステロール摂取量は 750mg から 523.3mg に減少するという改善がみられた。

表4 ファジィ線形計画モデルによる最小費用メニュー

食料費	409.3円
米	210.0
小麦粉	305.5
さんま	68.9
煮干し	4.6
牛乳	185.0
バター	21.5
卵	111.8
キャベツ	8.6
もやし	363.5
ばれいしょ	184.5
にんじん	36.8

5. まとめ

通常の線形計画法とファジィ線形計画法によって、最小の費用で実現できる望ましい食事計画を行った。栄養摂取量および食料消費量に関する制約条件のもと、最小の食料費で実現できるメニューを求めたところ、でんぷん質食品が多く、また、家庭に常備されているような廉価で栄養価の食品が多く含まれていた。そのなかでも価格の優等生と呼ばれる卵の量が多いため、食料費の最小化には大いに役立つ食品ではあるが、コレステロールが多く含まれるために、コレステロール摂取量の上限值に達してしまった。

そこで、この問題にファジィ線形計画法を適用した。食料費をファジィ目標とし、エネルギーとコレステロールに関するファジィ制約をつけたファジィ線形計画モデルを設定し、最小費用メニューを計算した結果、エネルギーは増加したが、食料費はごくわずかな増加にとどまった。また、コレステロール摂取量は大幅に減少させることもできた。ファジィ線形計画法を適用することにより、通常の線形計画法ではできなかった、だいたいこのぐらいの量の栄養を摂取したいという制約条件を設定することができ、より実用的な食事計画が可能になると思われる。

本研究は、2010年度長崎大学教育学部学部長裁量経費から助成を受けて実施したものである。

引用文献

- 1)堤伸子, "わが国の食料消費行動の変化と特徴-日韓の比較を中心として-", 家族経済と国民経済の変動に関する研究 (平成7年度~平成9年度科学研究費補助金 (基盤研究(A)(2)) 研究成果報告書, 筑波大学図書館, 1998, p.175-197
- 2)ガンガ伸子, 食品栄養価の変化が家計の食料費最適化計画に及ぼした影響について, 日本家政学会誌, Vol.16, No.7, 2010, p.417-420
- 3)唯是康彦, 三浦洋子, 食生活における栄養・経済合理性の一考察, 家計経済研究, 2004, No.63, p.55-59
- 4) 大町 一磨, ガンガ伸子, 家計の食料消費に関する最適化計画, 長崎大学教育学部教育実践総合センター紀要, No.9, 2010, p.139-148
- 5)厚生労働省, "日本人の食事摂取基準 (2010年版)", 2009, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/sessyu-kijun.html> (accessed 2009-12-04)
- 6)Zimmermann, H. J., Description and optimization of fuzzy systems, International Journal of General Systems, Vol.2, No.4, 1976,p.209-215, 1976
- 7)坂和正敏, 乾口雅弘, "2.2 ファジィ線形計画法", ファジィ OR, 朝倉書店, 2001, p. 26-29
- 8)健康日本 21 推進全国連絡協議会, 健康日本 21 (各論: 栄養・食生活), <http://www.kenkounippon21.gr.jp/kenkounippon21/about/kakuron/index.html> (accessed 2011-02-01)
- 9)オールガイド五訂増補食品成分表 2008, 実教出版, 2008
- 10)農林水産省・厚生労働省, 「食事バランスガイド」, 2005, <http://www.maff.go.jp/j/syokuiku/nozomasiisyokuseikatu.html#bg> (accessed 2011-02-01)