

数理最適化を利用した大学生の外出利用と 栄養バランスに関する論考

A research on out-of-home dining and nutrient intake balance of university
students using mathematical optimization

堀田 敬介¹

Keisuke Hotta

Abstract

自炊が苦手で欠食の多い大学生が外出を利用することで栄養バランスのとれた食事を摂ることが可能なのか、そしてその際、価格も抑えられたメニューの組合せは存在するのかを検証する。外食チェーン店のメニューを対象に、四群点数法により基準値に合致したメニューで価格最小化を求める最適化モデルを提示し、得られた解の分析・考察を行う。すると、1日に限定すれば価格を抑えて求める解が得られるが、外食メニューで良く指摘されるとおり、脂質・塩分が高めで、かつその他の栄養素が摂取不足になることもわかった。さらに、これらの栄養バランスをとろうとすると価格が高めとなる解が得られることもわかり、栄養バランスと価格とのトレードオフとなる。

1 はじめに

大学生の中には、親元を離れ1人暮らしをしている学生も多い。各機関の調査によると、大学生の自宅通学者は6割弱、1人暮らしは4割強とのことである [18, 24]。人が心身共に健康に生活する上で食生活は大事であるが、大学生の食事情は決して良いものではない。それを示す多くの調査結果がある。朝倉らは現役学生にアンケート調査を実施し結果を分析、考察している [1, 2]。また、全国大学生協連では学生の意識と行動に関する研究会の一環として、学生の食事情に関して、アンケート調査や写真記録調査など様々な調査・分析の研究報告をしている [12]。その他、大学生の食生活を報じた記事や報告は数多くある (cf. [3, 11, 13, 26])。その中で指摘されていることの一つに、学生の意識の2極化がある。これは自炊派か外食派かや、自宅通学か1人暮らしかという居住形態の違いがもたらす差という意味ではない。自身の身体や健康を気遣い、栄養バランスを考慮して食に気を遣っている意識の高い少数派の学生がいる一方で、多くの学生は全く無頓着であり、偏った栄養摂取や欠食などにみられる摂取量の不足があるということである。無頓着なのは、食に対しての意識の低さと知識の不足からくるのだろう。

朝食の欠食が多くなりがちな大学生のために、昨今は各大学で学食を朝1時限目の開始前から始めるだけでなく、100円朝食などを提供して積極的に朝食をとってもらおうという試みも行われている [27]。また、大学生協がなぜ学生の食生活が乱れるのかの原因を指摘し、それを改善しつつ費用と栄養バランスの面を比較考慮し、栄養バランスもとれ価格も抑えた食事 (1日平均1500円) を提供でき、かつ費用を親が自然と負担できる仕組みなど、非常にわかりやすく良い提案などもなされている [22]。しかし、これらは学生がこのような恵まれた環境にいる場合に限られる。

学生の食生活が乱れる、偏る主な原因を列挙すると、「自炊が面倒・できない・続かない・食材管理が大変」「食事より他のもの・コト (趣味・睡眠など) を優先しがち」「食事を菓子等で代用」「欠食が多い」「外食・中食ですます」などである。

¹文教大学 経営学部 教授

学生の食に対する懐事情に関しては、例えば、昼食にはワンコイン（500円）程度使うというアンケート調査（cf. [11, 12, 13]）などにもあるように、1食当たり平均500円で1日1,500円程度であろう。しかし、アンケート結果からは必ずしも懐事情が寒くて食事にあてるお金が少ない学生ばかりではないし、食費よりその他のものにより多くの費用をかけたがる傾向があるという報告もある（cf. [12]）。食がどれほど健康に寄与するかという知識・認識の不足と、物質的に豊かで食に対する欲求が低いために、手間暇や費用を惜しむ傾向があるのだろう。

次に、外食と中食の現況を整理しよう。外食産業の昨今は厳しい状況にあると言われるが、市場全体の規模は図1の通りである。図1は、日本フードデータサービス協会がはじき出した市場規模の

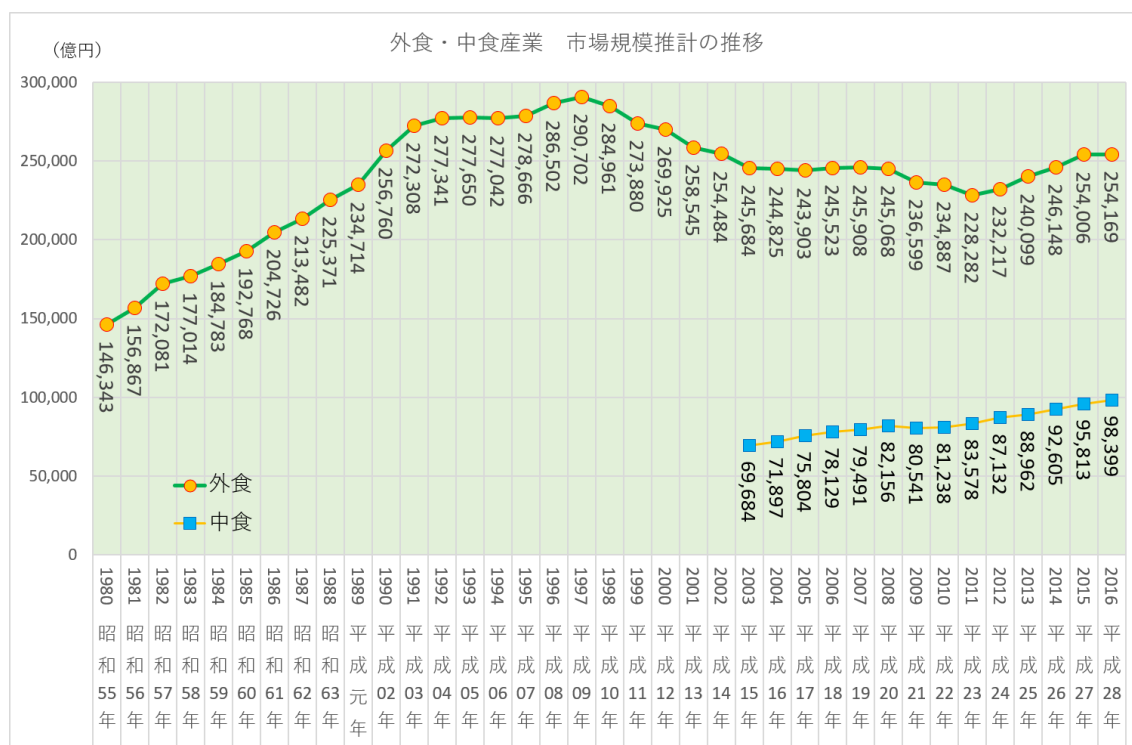


図1: 外食・中食産業の市場規模推計値の推移

推計値を1980(S55)年から2016(H28)年についてグラフ化した[20]。単位は億円である。1980年代は右肩上がりの成長を続け、その後鈍化したものの1997年に29兆円のピークを迎える。それから2003年にかけて徐々に減少し、24兆円規模でいったん落ちつく。2009年からまた減少するが、2011年より増加に転じ、2015年は25兆円規模を回復、2016年も同様である。

家庭内で食事をする内食や家庭外で食べる外食に対し、中食を摂るという選択も人々の間に浸透してきた。日本惣菜協会の惣菜白書によると、中食（惣菜）²の市場規模は2004年に7兆円を越えて以降、2008年に8兆円、2014年に9兆円をそれぞれ突破するなど堅調に増加しており、2017年には

²「惣菜白書（2017年版ダイジェスト）」[19]による中食（惣菜）とは、『市販の弁当や惣菜など、家庭外で調理・加工された食品を家庭や職場・学校・屋外などに持ち帰ってすぐに（調理加熱することなく）食べられる、日持ちのしない調理済食品』である。『事業所向け給食および、調理冷凍食品やレトルト食品など比較的保存性の高い食品』は除外されている

10兆円を越える見込みだそうである [19]。2003年以降を図1に追記してある。

さて、意識の高くない多くの学生が、それほど手間暇も費用もかけることなく、栄養バランスのとれた食事を摂ることは不可能だろうか？手間暇をかけずに安くという点では中食が好ましいが、意識の高い学生や社会人と異なり、購入品目がおにぎりだけ、カップラーメンだけなど偏りすぎる傾向がある (cf. [3, 11, 12, 26])。そこで、本研究では外食産業が提供しているメニューのみで、栄養バランスのとれた食事を、かつ、お金を潤沢に使えとは言えない学生がリーズナブルな価格で得ることが出来るのか考えたい。

本研究では使われている食材の品質については問わない。現在では、ハウス栽培、品種や地域を変えた露地栽培、水耕栽培、品種改良、バイオテクノロジー等の工夫や知恵、冷凍技術、国際貿易、物流の発展などのおかげで、多くの食材を一年中手に入れることができるが、同じ食材でも産地や作り手によって品質は異なるし、その食材の旬の時期とそれ以外の時期で含まれる栄養素の量も異なる (cf. [16, 17, 29, 30])。特に、スーパーやコンビニで売られている中食や弁当の食材、安価な値段で提供される外食チェーン店の料理に使われる食材は、高品質のものが使われることは多くはないだろうと推察される³。しかし、その違いについての詳細なデータはない。よって、本研究ではこれら食材の品質の違いについては言及しないこととする。

栄養バランスのとれた食事かどうかについての指標として、ここでは四群点数法を用いる [4, 7]。四群点数法とは、

『食品を栄養素の特徴別に4つのグループ(食品群)に分け、それぞれの特徴に沿って、各グループの食品をどれくらい食べたらよいか』 ([4] p.3)

を示した値である。四群点数法のはじまり、日本人の食生活の変遷とそれに合わせた歴史的経緯、現在の形になるまでは [7] に詳しい。身体活動レベル・性別に応じた大学生の一日に必要な点数を考慮し、そもそも栄養バランスのとれた料理の組合せが得られるか、得られた場合に価格をおさえた利用の仕方があるか、その方法を提供する。

四群点数法の各食品群の内容と対応食材は、表1の通りである。

表1: 4つの食品群と対応食品類 ([4] p.2-3より)

食品群	第1群		第2群		第3群			第4群		
摂取効果	栄養バランスを完全にする		肉や血を作る良質蛋白質		体の調子をよくする			力や体温となる		
対応食品	乳/乳製品	卵	魚介/肉	豆/豆製品	野菜	芋	果物	穀類	油脂	砂糖

[4, 7] では、日本人に不足しがちな栄養素が何で、どの食品群からどのように食べたら良いのかの指針を詳細に提示している。また、第1~3群までの点数を優先的に満たすよう食品を選び、第4群は体重などを考慮して増減し、ふさわしい量をとるよう推奨している。よって、ダイエットをする場合は、第1~3群を満たしながら、第4群の量をコントロールするのがよいと提案している。

この四群点数法を用い、各値が各々の基準値を満たすように最適化モデルを構築し、料理を選択する指針とする。さらに、この得られた結果について、栄養素の点でみた場合、それぞれの栄養素が食

³高品質の食材が使われている場合は、それが「売り」になるため、そのような宣伝がなされる。よって、わざわざ宣伝されていない、ということから推測できる

事摂取基準・目安値に合致するかどうか確認する。各料理の栄養素含有量は [5]，食事摂取基準値は [7] による。

本論文の構成は次の通りである。次節で四群点数法と一日に必要な栄養素摂取の基準値に関して述べ、3 節で点数を満たしながら目的を達成するための最適化モデルを提示し、4 節で各種の設定のもとで計算された結果を示し分析を行う。最後に結論と今後の課題を述べる。

2 四群点数法と栄養素摂取量

四群点数法における各食品群の一日に必要な点数は、年齢、性別、および日常生活における活動内容に依存する [4]。身体活動レベルとは、あまり動かない人 (I) からよく動く人 (III) まで 3 段階 (I, II, III) に分けられている。同書で提示されている 3 段階の身体活動レベルとその活動内容は表 2 の通りである。

表 2: 身体活動レベル毎の活動内容 ([4] p.63 表 1)

身体活動レベル	I(低い)	II(普通)	III(高い)
日常生活の内容	生活の大部分が座位で、静的な活動が中心	座位中心の仕事だが、職場内での移動や立位での作業・接客等、あるいは通勤・買物・家事、軽いスポーツ等のいずれかを含む	移動や立位の多い仕事への従事者。あるいは、スポーツなど余暇における活発な運動習慣をもっている

本研究の対象は大学生であり、18～22 歳の年齢層を想定している。四群点数法の年齢別では、18～29 歳に該当するので、年齢についてはこのデータを用いる。すると、基準構成点数は性別と身体活動レベル毎に表 3 の通りとなる。

表 3: 4 つの食品群の一日に必要な点数構成 ([4] p.63 表 2 より抜粋)

性	群	第 1 群		第 2 群		第 3 群			第 4 群			合計
		乳/乳製品	卵	魚介/肉	豆/豆製品	野菜	芋	果物	穀類	油脂	砂糖	
男	I	2.5	1.0	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	14.0	2.0	0.5	27.0
	II	2.5	1.0	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	17.0	3.0	0.5	31.0
	III	2.5	1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	1.0	19.5	3.5	1.0	35.0
女	I	2.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9.0	1.5	0.5	20.0
	II	2.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	11.5	2.0	0.5	23.0
	III	2.0	1.0	2.5	1.5	1.0	1.0	1.0	14.0	2.5	0.5	27.0

表 3 より、男女とも第 1,2,3 群の摂取量は、身体活動レベルにかかわらずほぼ同じであり、第 4 群が身体活動レベル毎に大きく異なる設定となっていることがわかる。これは他の年齢層についても同様である [4]。

四群点数法では、1 点がおよそ 80kcal となるよう設定されており、合計点数が 20 点の場合 1600kcal と換算される。80kcal が 1 点であるのは、『1 回に食べる食品のエネルギー量が 80kcal に相当するものが比較的多く、覚えやすいから [4]』 だそうである。同書では、1 つ 1 点となる例として『卵 1 個』

『鰻1尾』『ジャガイモ1個』, 1つ2点となる例として『ご飯軽く1杯』『食パン6枚切りの1枚』などをあげている。

なお, 人が一日に必要なエネルギー量の推定値は, 標準体重に基づいた求め方もあり, 「推定エネルギー必要量 (kcal) = 基礎代謝基準値 (kcal/kg) × 標準体重 (kg) × 身体活動レベル係数 {1.5(I), 1.75(II), 2(III)}」である [9, 21]. 例えば, 54歳男性で身体活動レベル II の場合, 2,450kcal となる。年齢 18~29 歳の各活動レベル・性別に応じた食事摂取基準値は, 以下の通りである [7]. 表 4 の一

表 4: 一日に必要な栄養素の基準値 ([4] p.78-83 表 5-2~5-7 より抜粋)

性別	活動レベル	栄養素	エネルギー	蛋白質	脂質	炭水化物	食塩相当量	カリウム	食物繊維
		基準値	kcal	g	g	g	g	mg	g
男	I	推平必	2300	50	-	-	1.5	-	-
		推奨量	-	60	-	-	-	-	-
		目安量	-	-	-	-	-	2500	-
		目標下	-	75	51	288	-	3000	20
		目標上	-	115	77	374	8.0	-	-
	II	推平必	2650	50	-	-	1.5	-	-
		推奨量	-	60	-	-	-	-	-
		目安量	-	-	-	-	-	2500	-
		目標下	-	86	59	331	-	3000	20
		目標上	-	133	88	431	8.0	-	-
	III	推平必	3050	50	-	-	1.5	-	-
		推奨量	-	60	-	-	-	-	-
目安量		-	-	-	-	-	2500	-	
目標下		-	99	68	381	-	3000	20	
目標上		-	153	102	496	8.0	-	-	
女	I	推平必	1650	40	-	-	1.5	-	-
		推奨量	-	50	-	-	-	-	-
		目安量	-	-	-	-	-	2000	-
		目標下	-	54	37	206	-	2600	18
		目標上	-	83	55	268	7.0	-	-
	II	推平必	1950	40	-	-	1.5	-	-
		推奨量	-	50	-	-	-	-	-
		目安量	-	-	-	-	-	2000	-
		目標下	-	63	43	244	-	2600	18
		目標上	-	98	65	317	7.0	-	-
	III	推平必	2200	40	-	-	1.5	-	-
		推奨量	-	50	-	-	-	-	-
目安量		-	-	-	-	-	2000	-	
目標下		-	72	49	275	-	2600	18	
目標上		-	110	73	358	7.0	-	-	

日に必要とされる栄養素の目安は, [7] p.78-83 より必要な箇所を抜粋した。

表 4 の [基準値] にある 5 つの言葉の意味は次の通りである ([7] p.77). [推平必] は, 推定平均必要量 (EAR: estimated average requirement) の略で『ある集団に属している 50% の人が必要量を満たすと推定される摂取量』である。[推奨量 (RDA: recommended dietary allowance)] とは, 『ある集団に属しているほとんどの人 (97~98%) が必要量を満たすと推定される摂取量』である。[目安量 (AI: adequate intake)] とは, 『ある集団に属している人が良好な栄養状態を維持するために十分な量』であり, 『栄養素の摂取不足・摂取過剰を判断するための基準』となる。また, [目標下][目標上]

は、目標量 (DG: tentative dietary goal for preventing life-style related diseases) の下限と上限で、『生活習慣病の予防 (病気にならないように、また重症化しないようにする予防) を目的として設定された指標』である。日本人の食事摂取基準 2015 年版 (厚生労働省) [9] で幾つかの栄養素について設定されている。

3 最適化モデルによる定式化

一般的、古典的な栄養問題は、栄養素を含む食材をどの程度の量食べるかという形で、線形計画問題として定式化し提示されることが多い (cf. [8, 25])。しかし、日本における外食では提供されるメニューの中から食べる料理を選ぶことが一般的なので⁴、その料理を選択する (食べる) か選択しない (食べない) かの 0-1 整数計画問題となる。

日本の習慣的には 1 日の食事回数は 3 食が標準であろう。1 食あたりの量を少なめにして 1 日 4 食、5 食にした方がよいなど様々な説はあるようだし、食べる時間帯が重要という話もあるが、本研究のモデルでは食事回数 (メニューとして選ぶ数) は問わないこととする。つまり、得られた解をどの時間にどの順番でどう組み合わせるかについては提示せず、摂食者の自由とする。

店舗 $i \in I = \{1, 2, \dots\}$ で提供される料理 $j \in J_i = \{1, 2, \dots\}$ について、価格 p_{ij} とする。店舗 i の料理 j における第 l 群の点数を d_{ijl} , ($l = 1, 2, 3, 4$) とする。

0-1 変数 x_{ijk} は、対象とする期間 K 日の中で第 k 日目 ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$) に、店舗 i の料理 j を食べるとき 1, 食べないとき 0 とする。

対象とする期間 K を 1~7 と変更しながら、それぞれ解く。つまり、例えば $K = 1$ の場合は、1 日だけのメニューを考え、 $K = 3$ の場合は、各日で制約を満たしながら 3 日間のメニューを考える、ということである。このとき、与えられた期間内で各メニューは 1 回のみ選ぶことができるとする。

$$\min. \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \frac{p_{ij}}{|K|} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (3.1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{ijl} x_{ijk} \geq r_l \quad (\forall k \in K, l \in \{1, 2, 3, 4\}) \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{ijl} x_{ijk} \leq r_l + \Delta \quad (\forall k \in K, l \in \{1, 2, 3, 4\}) \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq 1 \quad (3.4)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (\forall i, j, k). \quad (3.5)$$

目的関数 (3.1) は対象期間 K 日間の一日当たりの平均価格であり、これを最小化する。制約式のうち、式 (3.2) は、第 k 日における第 l 群の必要点数を満たすよう要求しており、式 (3.3) は、それが過剰摂取にならないよう制限をかけている。式 (3.4) は、対象期間 K 日間で、同じ料理は高々 1 回選択できるとする条件を表している。

このモデルでは店舗数の条件はないので、解が朝・昼・夕の 3 回分の食事と丁度同じ 3 店舗を訪れるという結果になるとは限らないことに注意されたい。一日あたり訪れる店舗数が 1 店舗や 2 店舗と少ない場合は、同じ店舗を 1 日に 2, 3 度訪れることになり、4 店舗以上利用する結果が提示され

⁴海外では食材・惣菜等の量り売りがよくあり、食べたい量だけ購入できる店舗が多いが、日本国内ではまだ少ない

た場合は、1日に4店舗以上訪問することになる。もし、一日あたり訪れる店舗数を3に限定したい場合は、式(3.6)を制約に追加すればよい。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} x_{ijk} \leq 3 \quad (\forall k \in K) \quad (3.6)$$

ただし、本研究においては店舗数にはこだわらず、この制約は用いない。

4 結果

本研究で今回対象としたのは外食チェーン18店舗、238メニューである。対象店舗略称と扱うメニュー数は次の通りである。

Coc(14), Cop(12), Han(14), Ita(14), Kfc(14), Kin(13), Mcd(14), Mos(14), Nan(14),
Neg(14), Oty(12), Rin(14), Sab(10), Sai(14), Ste(14), Vol(11), Wat(12), Yos(14)

順番は略称のアルファベット順、括弧内が取り扱いメニュー数を示す。

各メニューの食品四群点数と栄養素のデータは[5]による。ただし、群毎の内訳食品点数のデータは示されていないため、四群の4つの点数のみのデータを用いた。価格は、各店舗のメニュー表かHP公開情報による、消費税8%込みの値である。価格の調査期間は2015年秋から2017年春とやや長い間、現在の価格と異なる可能性がある点や、既に提供されていない料理が含まれる可能性がある点に注意されたい。

対象年齢は、主な大学生が含まれる18~29歳のみとし、男女別、身体活動レベル(I, II, III)別の6種類について計算した。求解にはMIPソルバーのcplex12.7.1を用いた。計算機環境は、CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700K CPU(4.00GHz), memory: 32.0GB, Windows10(64bit)を使用した。1日分($K=1$)の最適解を求める場合は、パラメータ Δ の設定値にかかわらず、0.1秒未満である(cf. 表13)。

$\Delta=1$ の場合の1日分の最適解は、性別、身体活動レベル別に以下となった。

表5: 1日分($K=1$)の最適解 [$\Delta=1.0$]

性 活	価格 円	エネ kcal	蛋白 g	脂質 g	炭化 g	食塩 g	カリ mg	コレ mg	繊維 g	1 群	2 群	3 群	4 群	合 計
男 I	1,449	2,257	74.7	87.5	291.7	12.2	1,729	152	11.2	4.0	4.3	3.0	17.0	28.3
II	1,567	2,345	66.6	87.2	317.4	11.4	1,297	72	10.3	3.6	4.6	3.0	20.5	31.7
III	1,687	2,482	67.0	106.7	307.9	11.4	1,756	153	13.3	3.7	4.6	3.1	24.0	35.4
女 I	1,329	1,674	50.4	61.3	229.2	8.8	1,304	73	7.9	3.3	3.7	3.0	11.0	21.0
II	1,319	1,933	59.4	73.0	258.7	10.1	1,503	107	9.6	3.3	3.7	3.0	14.2	24.2
III	1,419	2,208	71.7	83.6	291.1	11.6	1,706	140	11.1	3.3	4.3	3.0	17.0	27.6

表5より、四群の点数を満たしながら一日当たりの価格を、男性は1,450~1690円、女性は1,400円前後でとることが可能であるとわかった。しかし、四群の各群においてパラメータ $\Delta=1.0$ としているため、基準値から+1点(合計で最大+4点)まで許容する解を求めており、場合によっては1点以上乖離するものもある。パラメータ Δ を0.0~0.5まで0.1刻みで6通りの場合について計算した結果は以下の表6,7となる。

表6,7より、 $\Delta=0.0$ の場合、つまり基準値に丁度合致することのみを許容する解も全てについて存在することがわかったが、価格は100~300円程度高くなる。 $\Delta=0.5$ と設定した時の最適解(基

表 6: 1 日分の最適解 [男性, $\Delta = 0.0 \sim 0.5$]

Δ	性 活	価格 円	エネ kcal	蛋白 g	脂質 g	炭化 g	食塩 g	カリ mg	コレ mg	繊維 g	1 群	2 群	3 群	4 群	合計
0.5	男	1,449	2,257	74.7	87.5	291.7	12.2	1,729	152	11.2	4.0	4.3	3.0	17.0	28.3
0.1-0.4	I	1,477	1,985	49.9	68.9	285.1	9.5	1,098	38	8.6	3.6	4.0	3.0	16.6	27.2
0.0		1,654	1,921	63.6	84.4	230.3	9.2	1,228	124	9.1	3.5	4.0	3.0	16.5	27.0
0.4-0.5	男	1,577	2,182	59.0	94.6	268.4	9.8	1,553	120	11.8	3.7	4.0	3.1	20.9	31.7
0.1-0.3	II	1,582	2,205	57.1	88.2	291.5	11.5	1,833	129	14.8	3.5	4.0	3.0	20.5	31.0
0.0		1,582	2,205	57.1	88.2	291.5	11.5	1,833	129	14.8	3.5	4.0	3.0	20.5	31.0
0.2-0.5	男	1,687	2,482	67.0	106.7	307.9	11.4	1,756	153	13.3	3.7	4.6	3.1	24.0	35.4
0.1	III	1,774	2,564	84.2	96.7	335.7	14.0	1,438	270	15.2	3.5	4.5	3.0	24.1	35.1
0.0		1,966	2,612	72.6	74.5	384.2	13.0	1,364	167	14.3	3.5	4.5	3.0	24.0	35.0

表 7: 1 日分の最適解 [女性, $\Delta = 0.0 \sim 0.5$]

Δ	性 活	価格 円	エネ kcal	蛋白 g	脂質 g	炭化 g	食塩 g	カリ mg	コレ mg	繊維 g	1 群	2 群	3 群	4 群	合計
0.5	女	1,375	1,422	50.1	69.3	151.2	8.2	1,347	127	14.0	3.2	3.5	3.1	11.1	20.9
0.4		1,389	1,667	49.2	79.1	188.6	8.8	1,489	97	9.6	3.3	3.1	3.2	11.4	21.0
0.2-0.3	I	1,439	1,680	70.8	76.9	180.9	9.8	1,491	162	14.5	3.1	3.0	3.1	11.1	20.3
0.1		1,475	1,514	63.0	52.3	196.9	8.6	892	45	10.8	3.0	3.0	3.1	11.0	20.1
0.0		1,895	1,502	61.1	80.2	136.0	10.8	1,550	391	10.6	3.0	3.0	3.0	11.0	20.0
0.2-0.5	女	1,425	1,781	63.6	79.3	227.8	11.2	1,132	104	12.1	3.0	3.1	3.2	14.1	23.4
0.1	II	1,540	1,849	72.2	74.0	247.4	12.9	785	70	9.1	3.0	3.1	3.0	14.1	23.2
0.0		1,695	1,566	41.9	52.3	243.0	8.7	902	45	8.3	3.0	3.0	3.0	14.0	23.0
0.4-0.5	女	1,419	2,208	71.7	83.6	291.1	11.6	1,706	140	11.1	3.3	4.3	3.0	17.0	27.6
0.1-0.3	III	1,515	2,084	67.1	80.4	306.9	13.1	988	94	8.8	3.0	4.1	3.0	17.1	27.2
0.0		1,810	2,075	76.7	83.6	290.3	11.9	2,091	248	18.2	3.0	4.0	3.0	17.0	27.0

準値から合計で最大+2点まで許容する)が、基準値からの乖離もそれほど悪くなく、価格も抑えられる解を導き出すことがわかる。従って、以降 $\Delta = 0.5$ とする。

$\Delta = 0.5$ の場合の、各区分における1日の最適解の具体的なメニューは以下の通りである。表8が男性で表6の $\Delta = 0.5$ の場合の具体的なメニュー内容であり、同様に、表9が女性で表7の $\Delta = 0.5$ の場合のメニュー内容である。

さて、 $\Delta = 0.5$ の場合の男女・各身体活動レベルにおける結果(表6, 7の各1段目)を摂取基準値(表4)と比較すると、解には男女差や身体活動レベルとは関係なく、幾つかの傾向が出ていることがわかる。まず、蛋白質は基準値の範囲に綺麗におさまっている。エネルギーと炭水化物の2つは適量かやや少な目である。ここまでは問題ない。それ以外の4項目は基準値から外れた値が目立つ。カリウムと食物繊維はいずれもかなり小さい値であり、摂取量は目標下限値よりとても少ないことがわかる。脂質は目標上限を超えて取り過ぎであり、食塩相当量に至っては目標上限を大幅に超える場合がある。

家庭料理に比較して外食は脂肪分と塩分量が多いという指摘があるとおり(cf. [3])、四群点数法では許容範囲に収まっているも、外食のメニューは栄養素によって悪い結果が出ており、脂質・塩分については指摘通りの答えとなった。これは、四群点数制約が緩め($\Delta = 1.0$) やきつめ($\Delta = 0.1 \sim 0.4$) の場合も同様である(表5, 6, 7)。四群点数制約をきっちり守った場合($\Delta = 0.0$) に、幾つかの項目で改善がみられる程度である(表6, 7)。

表 8: 1日分の最適解 [男性, $\Delta = 0.5$] メニュー

性 活	店 舗	品名	価格 円	エネ	蛋白	脂質	炭化	食塩	カリ	コレ	繊維	1	2	3	4	合 計
				kcal	g	g	g	g	mg	mg	g	群	群	群	群	
男 I	Kfc	コーンサラダ	250	82	2.3	0.5	17.8	0.5	130	0	3.3	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
	Mcd	チーズバーガー	130	324	15.3	14.5	33.0	2.1	226	45	1.6	0.7	0.6	0.0	2.8	4.1
	Mcd	チキンクリスプ	100	385	12.4	19.8	39.4	2.0	199	34	1.7	0.0	0.6	0.0	4.2	4.8
	Sai	ミラノ風ドリア	299	548	19.2	18.3	73.7	2.7	745	48	0.4	3.3	0.0	0.0	3.6	6.9
	Wat	炭火焼コーンバター 牛丼	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1
	Yos		380	674	20.4	22.4	97.8	3.0	0	0	0.0	0.0	3.1	0.1	5.2	8.4
男 II	Coc	やさいかレー	597	829	13.1	19.7	144.1	3.2	669	13	4.4	2.4	0.3	0.9	9.1	12.7
	Han	ヘルシーかき揚げ	140	239	1.5	15.7	22.9	0.2	0	0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.7	3.0
	Han	鶏の唐揚げ	100	101	7.7	6.6	2.8	0.6	0	0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.7	1.3
	Mcd	チーズバーガー	130	324	15.3	14.5	33.0	2.1	226	45	1.6	0.7	0.6	0.0	2.8	4.1
	Mos	フィッシュバーガー	320	445	16.3	26.1	35.6	1.8	229	37	1.6	0.6	2.5	0.0	4.4	7.5
	Wat	炭火焼コーンバター	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1
男 III	Coc	やさいかレー	597	829	13.1	19.7	144.1	3.2	669	13	4.4	2.4	0.3	0.9	9.1	12.7
	Han	ちくわ磯辺揚げ	110	126	3.4	8.1	9.9	0.7	0	0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.0	1.6
	Han	ヘルシーかき揚げ	140	239	1.5	15.7	22.9	0.2	0	0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.7	3.0
	Mcd	ハンバーガー	100	275	12.3	10.6	32.4	1.5	203	33	1.5	0.0	0.6	0.0	2.8	3.4
	Mcd	チーズバーガー	130	324	15.3	14.5	33.0	2.1	226	45	1.6	0.7	0.6	0.0	2.8	4.1
	Mos	フィッシュバーガー	320	445	16.3	26.1	35.6	1.8	229	37	1.6	0.6	2.5	0.0	4.4	7.5
Wat	炭火焼コーンバター	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1	

表 9: 1日分の最適解 [女性, $\Delta = 0.5$] メニュー

性 活	店 舗	品名	価格 円	エネ	蛋白	脂質	炭化	食塩	カリ	コレ	繊維	1	2	3	4	合 計
				kcal	g	g	g	g	mg	mg	g	群	群	群	群	
女 I	Coc	野菜サラダ	185	19	0.8	0.1	4.2	0.0	148	0	1.3	1.1	0.0	0.2	0.0	1.3
	Kfc	コーンサラダ	250	82	2.3	0.5	17.8	0.5	130	0	3.3	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
	Mcd	チーズバーガー	130	324	15.3	14.5	33.0	2.1	226	45	1.6	0.7	0.6	0.0	2.8	4.1
	Mcd	鯛マフィン	200	308	10.3	16.1	30.6	1.9	185	20	2.0	0.8	0.4	0.0	2.7	3.9
	Mos	フィッシュバーガー	320	445	16.3	26.1	35.6	1.8	229	37	1.6	0.6	2.5	0.0	4.4	7.5
	Wat	炭火焼コーンバター	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1
女 II	Coc	野菜サラダ	185	19	0.8	0.1	4.2	0.0	148	0	1.3	1.1	0.0	0.2	0.0	1.3
	Han	ちくわ磯辺揚げ	110	126	3.4	8.1	9.9	0.7	0	0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.0	1.6
	Kfc	コーンサラダ	250	82	2.3	0.5	17.8	0.5	130	0	3.3	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
	Mcd	チーズバーガー	130	324	15.3	14.5	33.0	2.1	226	45	1.6	0.7	0.6	0.0	2.8	4.1
	Mcd	チキンクリスプ	100	385	12.4	19.8	39.4	2.0	199	34	1.7	0.0	0.6	0.0	4.2	4.8
	Wat	炭火焼コーンバター	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1
Yos	納豆定食	360	601	24.3	24.3	93.5	4.0	0	0	0.0	1.2	1.3	0.1	4.9	7.5	
女 III	Kfc	コーンサラダ	250	82	2.3	0.5	17.8	0.5	130	0	3.3	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
	Mcd	ハンバーガー	100	275	12.3	10.6	32.4	1.5	203	33	1.5	0.0	0.6	0.0	2.8	3.4
	Mcd	チキンクリスプ	100	385	12.4	19.8	39.4	2.0	199	34	1.7	0.0	0.6	0.0	4.2	4.8
	Sai	ミラノ風ドリア	299	548	19.2	18.3	73.7	2.7	745	48	0.4	3.3	0.0	0.0	3.6	6.9
	Wat	炭火焼コーンバター	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1
	Yos	牛丼	380	674	20.4	22.4	97.8	3.0	0	0	0.0	0.0	3.1	0.1	5.2	8.4

次に、 $\Delta = 0.5$ について、同じメニューは2度食べないという条件のもとで、数日分のメニューを計算した結果が表 10, 11 である。日数を2日間から7日間まで計算した。このうち、例として男性・身体活動レベル I・7日分の場合について、最適解の具体的なメニュー内容を表 12 に示す。

男性に関する表 10 のうち、身体活動レベル III の、日数 6 日と 7 日の 2 つは近似解であり、MIP ソルバーのその時点でのギャップがそれぞれ 3.86%, 4.56% である。いずれも Out Of Memory で終了時に得られた解となる。それ以外で得られている解は全て最適解である。女性に関する表 11 のうち、身体活動レベル I の日数 5~7 日の三箇所の空欄は、実行不能（解なし）となった。また、身体活動レベル II の日数 7 日の空欄は、20314.22 秒（=約 5.6 時間）までで解を1つも見つけられなかった（実行不能かどうか不明）ことを意味する。身体活動レベル III の日数 7 日は、男性の場合と同様、Out Of Memory で終了時に得られた近似解であり、最適解ではない。このときのギャップは 3.43% であった。

日数 2~7 日 ($K = 2, \dots, 7$) の男性の最適解・近似解については、1日 ($K = 1$) の場合と同様の傾向がみてとれる。まず、 $K = 1$ の場合と同様、蛋白質は男女とも基準値の範囲におさまっている。エネルギーと炭水化物の 2 つが適量かやや少なめの値を示しているのも同様である。やはり問題となるのは、脂質と塩分が摂取過剰となり、カリウムと食物繊維が摂取不足となることである。価格的には、同じメニューを一度しか使えないので、日数が増えるにつれて高くなる傾向がみてとれる。ただし、これは理論的に必ずそうなるわけではないことに注意されたい。日数 K の範囲が広い場合の実行可能領域が、狭い場合のそれを含むとは限らないからである⁵。1日当たり平均 1,600 円~2,250 円程度の費用の解が出ており、大学生としてはやや厳しい高め価格かもしれない。1日平均 2,100 円程度ならば、1週間で約 15,000 円、1ヶ月で約 60,000 円となるため、続けるとしても1週間が限度であろう。

男女とも1日に限定すれば、1,500 円で済ますことが出来るが、同じメニューは2度使えないことを前提とすると、2日以上続けていくと価格が厳しくなることがわかった。

日数 2~7 日 ($K = 2, \dots, 7$) の女性の解についても、大体においては $K = 1$ の場合と同様だが、やや傾向が異なる場所が散見される。まず、既に見たように女性の身体活動レベル I で、日数 $K = 5, 6, 7$ の場合に実行不可能となる。実行可能な解が一つもないというのは、四群点数で女性、特に身体活動レベル I のあまり身体を動かさない女性の基準を満たすためには、外食メニューだけではかなり厳しいということであろう。

実行可能解がある場合は、エネルギーと炭水化物の 2 つが適量かやや少なめの値だが、適量であることが多い。とくに、身体活動レベル III についてはエネルギーの全日数と、炭水化物の過半数が適量である。脂質と塩分が過剰摂取となるのは男性と同様だが、カリウムは日数 $K = 4, 5, 6$ について適量である。カリウム（日数 $K = 2, 3$ ）と食物繊維は摂取不足である。価格帯は、女性の方が必要量が少ないこともあり、男性の解よりも若干おさえられているが、それでも1日平均 1,500 円程度~2,100 円程度となる。実行不可能解の1つ手前の解（女 I, $K=4$ ）（女 II, $K=6$ ）では 2,300 円と高めの解が出ているのは、組合せ的に条件を満たす実行可能領域が狭まり、目的関数を下げる良い解が得

⁵例えば、 $K = 2$ の実行可能解を考えると、 $K = 1$ の最適解を所与として2日目の解だけを見つめようとする、実行可能な解が得られるとは限らない。即ち、 $K = 2$ の実行可能領域が $K = 1$ の最適解を含むとは限らない、ということである。従って、その場合 $K = 2$ の最適値と $K = 1$ の最適値の間の大小関係については特に何も言えない。もし、 K_1, K_2 ($K_1 + 1 = K_2$) について K_2 の実行可能領域が K_1 の最適解を含むのならば、必ず「(K_2 の最適値) \geq (K_1 の最適値)」が成り立つ。ただし、 $K_1 + 1 < K_2$ の場合、即ち、日数に2日以上差がある場合は、実行可能領域を含んでも必ずしも成り立たない場合があることに注意せよ

表 10: 日数 2~7 日 ($K = 2, \dots, 7$) 分の最適解 [男性, $\Delta = 0.5$]

性 活	日 数	価 格 円	エ ネ kcal	蛋 白 g	脂 質 g	炭 化 g	食 塩 g	カ リ mg	コ レ mg	繊 維 g	1 群	2 群	3 群	4 群	合 計
男 I	2	1,604	2,051	69.9	86.3	267.4	10.3	1,721	123	11.9	3.6	4.2	3.0	16.6	27.4
	3	1,795	2,127	70.9	124.8	289.8	10.9	2,264	204	13.7	3.7	4.2	3.1	16.8	27.8
	4	1,928	2,152	77.0	93.7	264.5	11.5	1,987	346	11.1	3.7	4.2	3.1	16.7	27.6
	5	2,030	2,145	74.5	125.5	271.9	12.0	1,951	422	11.2	3.6	4.3	3.1	16.6	27.5
	6	2,112	2,157	73.3	141.8	266.8	11.7	2,005	381	11.4	3.6	4.3	3.1	16.6	27.6
	7	2,253	2,167	73.6	132.2	273.1	12.1	2,204	350	12.8	3.7	4.2	3.0	16.7	27.6
	男 II	2	1,654	2,411	76.7	93.9	329.8	11.6	2,085	149	12.6	3.8	4.3	3.0	20.9
3		1,769	2,390	77.1	133.2	328.4	12.4	2,116	141	12.9	3.7	4.3	3.0	20.7	31.7
4		1,863	2,431	84.5	157.4	323.6	12.4	2,342	219	14.7	3.7	4.3	3.0	20.7	31.7
5		1,946	2,446	82.1	152.2	333.6	12.4	2,308	390	14.3	3.6	4.2	3.1	20.8	31.7
6		2,031	2,462	83.3	146.8	328.3	14.2	2,096	337	14.3	3.6	4.3	3.0	20.8	31.7
7		2,084	2,493	84.6	139.4	331.3	14.7	2,080	361	13.4	3.6	4.2	3.0	20.6	31.5
男 III		2	1,797	2,762	79.4	102.3	400.9	13.8	2,317	154	12.8	3.8	4.7	3.1	24.2
	3	1,881	2,737	86.1	147.7	375.7	14.2	2,309	152	14.9	3.7	4.6	3.1	24.3	35.6
	4	1,955	2,755	90.5	136.4	379.3	13.9	2,042	218	13.4	3.8	4.8	3.0	24.2	35.8
	5	2,023	2,779	90.1	156.6	374.4	13.5	2,345	250	14.5	3.6	4.8	3.0	24.2	35.6
	(6)	2,133	2,768	93.1	158.5	367.3	16.1	2,103	345	14.3	3.6	4.7	3.1	24.1	35.5
	(7)	2,217	2,794	88.8	152.3	371.9	15.2	2,257	354	14.6	3.7	4.7	3.0	24.2	35.7

表 11: 日数 2~7 日 ($K = 2, \dots, 7$) 分の最適解 [女性, $\Delta = 0.5$]

性 活	日 数	価 格 円	エ ネ kcal	蛋 白 g	脂 質 g	炭 化 g	食 塩 g	カ リ mg	コ レ mg	繊 維 g	1 群	2 群	3 群	4 群	合 計
女 I	2	1,719	1,454	44.2	115.6	196.4	7.5	1,748	176	13.7	3.3	3.3	3.2	11.4	21.1
	3	1,985	1,498	53.4	100.3	185.4	9.8	1,969	180	10.9	3.3	3.1	3.0	11.2	20.7
	4	2,313	1,577	55.8	96.5	193.3	11.8	2,529	366	15.0	3.2	3.2	3.1	11.2	20.6
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	女 II	2	1,516	1,891	75.4	87.4	235.4	9.7	2,324	292	13.6	3.4	3.1	3.1	14.2
3		1,707	1,740	58.2	110.5	232.9	10.9	1,895	99	11.3	3.1	3.2	3.1	14.3	23.7
4		1,864	1,777	60.3	106.9	226.4	9.9	2,015	299	12.1	3.2	3.2	3.1	14.2	23.7
5		2,041	1,816	60.2	125.0	231.9	10.3	2,253	256	13.6	3.2	3.2	3.1	14.2	23.7
6		2,303	1,836	64.8	116.9	231.0	11.6	2,395	274	14.7	3.2	3.2	3.1	14.4	23.8
7		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
女 III		2	1,587	2,160	69.4	84.9	291.8	10.8	1,378	141	7.8	3.2	4.3	3.0	17.1
	3	1,708	2,188	76.1	90.9	289.6	9.7	1,854	306	10.1	3.2	4.2	3.0	17.2	27.7
	4	1,865	2,055	69.9	111.6	274.6	9.5	2,327	319	14.0	3.2	4.2	3.0	17.1	27.6
	5	1,954	2,098	74.6	132.6	278.2	11.2	2,142	233	12.6	3.1	4.3	3.0	17.3	27.8
	6	2,065	2,124	72.6	137.2	273.9	12.0	2,329	418	14.4	3.3	4.3	3.0	17.3	27.9
	(7)	2,164	2,163	77.1	133.7	270.7	13.4	2,243	385	13.2	3.3	4.3	3.0	17.3	27.8

表 12: 7日分の最適解 [男性, 活動レベル I, $\Delta = 0.5$] メニュー

日数	店舗	品名	価格 円	エネ kcal	蛋白 g	脂質 g	炭化 g	食塩 g	カリ mg	コレ mg	繊維 g	1 群	2 群	3 群	4 群	合計
1	Rin	つけちゃん	540	502	20.3	11.1	77.0	5.0	0	0	0.0	0.0	1.3	0.8	4.2	6.3
	Sab	ヒレカツと...	780	843	23.1	138.7	138.7	5.1	1,363	33	9.9	0.1	0.8	1.9	7.7	10.5
	Sai	ミラノ風ド...	299	548	19.2	18.3	73.7	2.7	745	48	0.4	3.3	0.0	0.0	3.6	6.9
	Ste	じっくり煮...	799	321	10.9	22.1	18.0	1.3	333	34	1.1	0.2	2.0	0.4	1.4	4.0
2	Coc	やさいかレ...	597	829	13.1	19.7	144.1	3.2	669	13	4.4	2.4	0.3	0.9	9.1	12.7
	Han	ちくわ磯辺...	110	126	3.4	8.1	9.9	0.7	0	0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.0	1.6
	Wat	炭火焼コー...	290	244	5.1	12.0	30.0	1.9	429	25	4.2	0.0	0.0	1.9	1.2	3.1
	Yos	牛ねぎ玉丼	480	786	28.3	29.1	101.1	3.7	0	0	0.0	1.2	3.1	0.2	5.3	9.8
3	Kfc	コールスロ...	200	92	0.9	7.5	5.9	0.5	128	0	1.1	0.0	0.0	0.3	0.9	1.2
	Neg	麦とろセツ...	500	477	10.9	3.2	98.4	3.4	603	5	5.4	0.0	0.3	0.8	4.9	6.0
	Rin	野菜たっぶ...	734	732	28.2	24.5	99.0	9.2	0	0	0.0	0.0	1.3	1.5	6.4	9.2
	Sai	フレッシュ...	299	202	14.3	16.1	3.5	0.4	219	29	0.5	1.8	0.0	0.1	0.6	2.5
	Sai	サラミとバ...	399	592	29.9	26.5	61.4	2.9	327	50	2.9	1.7	1.7	0.0	4.0	7.4
	Ste	どん彩り野...	399	107	4.3	6.8	8.4	0.5	313	10	2.2	0.0	0.9	0.4	0.0	1.3
4	Coc	野菜サラダ	185	19	0.8	0.1	4.2	0.0	148	0	1.3	1.1	0.0	0.2	0.0	1.3
	Coc	タマゴサラ...	257	101	7.7	5.6	4.4	0.3	212	228	1.3	1.1	0.0	0.2	0.0	1.3
	Han	ヘルシーか...	140	239	1.5	15.7	22.9	0.2	0	0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.7	3.0
	Kfc	コールスロ...	250	150	1.5	12.2	9.5	0.8	207	0	1.8	0.0	0.0	0.4	1.5	1.9
	Sai	若鳥のグリ...	499	536	35.6	32.6	21.2	1.6	850	136	2.2	0.1	4.1	0.9	1.6	6.7
	Wat	大阪キャベ...	390	461	13.3	23.7	47.4	2.3	398	309	2.8	1.3	0.0	0.2	4.3	5.8
	Yos	旨辛カレー	350	610	11.4	11.4	114.7	2.9	0	0	0.0	0.0	0.3	0.8	6.5	7.6
5	Ita	モッツアレ...	550	656	19.1	34.3	64.6	2.6	419	62	2.8	3.0	0.0	0.0	5.2	8.2
	Kfc	コーンサラ...	250	82	2.3	0.5	17.8	0.5	130	0	3.3	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
	Oty	特製大戸屋...	648	853	36.0	38.0	119.0	3.4	1,068	305	7.0	1.0	1.8	1.0	6.9	10.7
	Oty	四元豚とた...	810	654	19.0	22.0	95.0	4.4	1,207	40	5.9	0.0	2.4	1.0	4.8	8.2
6	Ita	カマンベ...	630	693	24.1	35.3	64.3	3.0	340	97	2.3	3.8	0.8	0.0	4.1	8.7
	Rin	餃子 5 個	270	199	4.7	14.1	13.1	0.7	0	0	0.0	0.0	0.3	0.2	2.0	2.5
	Sab	ヒレカツと...	780	933	25.3	146.3	146.3	5.7	1,366	25	8.8	0.1	0.8	2.0	8.8	11.7
	Vol	ローストビ...	842	395	13.4	28.0	17.3	1.1	573	51	1.3	0.0	2.4	0.8	1.7	4.9
7	Cop	キムチ 4 種...	650	119	3.5	3.6	19.0	2.1	700	3	4.5	0.0	0.0	0.8	0.7	1.5
	Oty	鶏と野菜の...	666	1,003	37.0	46.0	149.0	5.5	1,421	99	6.8	0.0	2.5	1.7	8.3	12.5
	Sab	ふんわり卵...	890	1,021	37.1	112.3	112.6	6.1	1,063	821	5.0	3.5	1.3	0.5	7.5	12.8
	Wat	ささみ串	290	46	9.7	0.3	0.5	0.9	197	28	0.2	0.0	0.6	0.0	0.0	0.6

られにくいことの現れであろう。

それぞれ計算に要した時間は下表 13 の通りである。先に述べたとおり、男・III・6~7日、女・III・7日の3箇所の時間(括弧内の数値)は、Out Of Memory で終了するまでの時間であり、女・I・5~7日間の3箇所の時間(下線付きの数値)は実行不能であることがわかるまでの時間。女・II・7日間の1箇所の時間(下線付き括弧内の数値)は、その時点まで解未発見・実行可能性不明である。それ以外は、最適解を得て終了するまでの時間となる。

日数が5~7日 ($K = 5, 6, 7$) となると、計算終了までに十数分から数時間を要する場合がある。しかし、時間がかかっている場合でも、数秒で下界とのギャップが10~5%の実行可能解を見つけている。つまり、長くかかっている時間の殆どは下界の改善、最適性の保証に費やされている。日数5~7日 ($K = 5, 6, 7$) における、求解時間の詳細を表 14 に示す。

表 14 の [sec][obj.val][gap] は、それぞれアルゴリズムが求解中の途中の目安時間 (sec), そのとき得られている暫定解の目的関数値 (obj.val), 最適解とのギャップ (gap) 上限を示している。cplex の cpu-time の表示は常時でなく、10 回程度の反復毎に表示されるため、それぞれの解が得られてから最初に表示された時間を示してある。従って、実際に求まった時間はそれより早いことに注意され

表 13: 求解時間 (sec.)

日数	男性			女性		
	I	II	III	I	II	III
1	0.03	0.02	0.05	0.03	0.05	0.03
2	0.14	0.17	0.33	0.23	0.11	0.27
3	1.94	1.84	4.55	0.88	0.61	0.66
4	19.75	42.76	70.95	1.50	6.53	43.94
5	138.31	207.09	1,310.23	<u>92.28</u>	17.67	545.17
6	744.08	1,421.55	(7,960.48)	<u>0.31</u>	114.78	1,493.58
7	21,359.00	13,057.77	(7,059.74)	<u>0.09</u>	(20,314.22)	(13,655.20)

たい。また、目的関数値とギャップは、その時間が表示された時点で求まっている最良解についてのものであることに注意されたい。最終的に最適解が求まるまで4段階の目安時間を示しているが、上から順に、最初の実行可能解の発見、ギャップ10%未満の解発見時、ギャップ5%未満の解発見時、ギャップ0%時即ち最適解を得て終了した時刻である。目安時間(sec)の4つ目が表13に示したものと同一時間となる。なお、既に述べたとおり、男性・III・6~7日と女性・III・7日は最適解を得て終了したのではなく、メモリーオーバーで終了した際に得られている最良解の最適解とのギャップ上限であり、表中に示してあるとおり0.00%ではない。

この問題に対しては、最適の保証はなくともそこそこ良い解が見つければ十分で、それらを数秒で求めることができるため、計算時間の点では十分実用的であることがわかった。しかし、実際に摂取することを考えると価格の点で厳しく、栄養素も偏る解となっていることもわかった。

さて、四群点数法を満たすだけでは、栄養素のうち脂質と塩分は過剰摂取に、カリウムと食物繊維は摂取不足になってしまうことがわかった。これらを満たすように制約を追加し、最適化モデルを解き直す。具体的には、以下の制約を追加する。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{ijl} x_{ijk} \leq r_l \quad (\forall k \in K, l \in \{5, 6\}) \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{ijl} x_{ijk} \geq r_l \quad (\forall k \in K, l \in \{7, 8\}) \quad (4.2)$$

ただし、式(4.1)の $l = 5, 6$ は、脂質と塩分を表し、それぞれ基準値(目標上限)以下となるよう要請しており、式(4.2)の $l = 7, 8$ は、カリウムと食物繊維に対応し、それぞれ基準値(目安量)以上となるよう要求している。

式(4.1)(4.2)を追加した最適化モデルを $\Delta = 0.5$, $K = 1$ について解くと、表15の最適解が得られる。計算時間はいずれも1秒未満である。

表 14: $K = 5, 6, 7$ における最良値の推移と求解時間詳細

日数	男性 I			男性 II			男性 III		
	sec	obj.val	gap	sec	obj.val	gap	sec	obj.val	gap
5	0.58	¥2,162	20.65%	0.22	¥2,168	17.34%	0.22	¥2,293	15.70%
	26.16	¥2,105	9.33%	14.66	¥2,017	9.36%	4.53	¥2,132	9.06%
	70.63	¥2,030	4.02%	47.73	¥1,959	4.60%	49.16	¥2,058	4.83%
	138.31	¥2,030	0.00%	207.09	¥1,946	0.00%	1,310.23	¥2,023	0.00%
6	0.52	¥2,556	29.81%	0.67	¥2,244	16.46%	0.51	¥2,343	13.98%
	26.13	¥2,156	8.68%	4.67	¥2,089	9.28%	5.16	¥2,237	9.69%
	153.19	¥2,112	4.33%	205.80	¥2,038	4.62%	791.63	¥2,137	4.84%
	744.08	¥2,112	0.00%	1,421.55	¥2,031	0.00%	7,960.48	¥2,133	3.86%
7	0.83	¥3,470	44.86%	0.75	¥2,561	22.92%	0.97	¥2,514	16.39%
	804.50	¥2,337	8.92%	24.17	¥2,180	9.01%	20.75	¥2,335	9.95%
	2,464.88	¥2,270	4.84%	141.88	¥2,111	4.84%	2,504.83	¥2,224	4.95%
	21,359.00	¥2,253	0.00%	13,057.77	¥2,084	0.00%	7,059.74	¥2,217	4.56%
日数	女性 I			女性 II			女性 III		
	sec	obj.val	gap	sec	obj.val	gap	sec	obj.val	gap
5	-	-	-	0.44	¥2,360	26.87%	0.30	¥2,166	23.51%
	-	-	-	5.38	¥2,083	7.54%	15.48	¥1,986	9.36%
	-	-	-	15.42	¥2,060	2.77%	196.13	¥1,984	4.56%
	-	-	-	17.67	¥2,041	0.00%	545.17	¥1,954	0.00%
6	-	-	-	0.76	¥2,997	37.50%	0.38	¥2,385	26.83%
	-	-	-	18.09	¥2,349	9.90%	50.63	¥2,122	9.17%
	-	-	-	61.64	¥2,312	4.25%	240.09	¥2,078	4.64%
	-	-	-	114.78	¥2,303	0.00%	1,493.58	¥2,065	0.00%
7	-	-	-	-	-	-	4.50	¥2,654	28.21%
	-	-	-	-	-	-	506.39	¥2,215	9.21%
	-	-	-	-	-	-	2,708.69	¥2,165	5.00%
	-	-	-	-	-	-	13,655.20	¥2,164	3.43%

表 15: 4 栄養素の制約追加後の 1 日分の最適解 [$\Delta = 0.5$]

性	価格	エネ	蛋白	脂質	炭化	食塩	カリ	コレ	繊維	1	2	3	4	合計
活	円	kcal	g	g	g	g	mg	mg	g	群	群	群	群	
男 I	2,821	1,744	37.8	67.3	255.8	7.5	2,974	34	21.4	3.5	4.1	3.5	16.5	27.6
II	2,438	2,123	42.5	80.9	312.4	7.9	2,882	52	20.6	3.5	4.2	3.0	20.6	31.3
III	3,001	2,386	48.6	100.5	329.8	7.8	2,632	164	20.9	3.6	4.7	3.1	24.5	35.9
女 I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III	2,381	1,742	30.9	72.7	249.8	6.0	2,402	31	18.0	3.5	4.1	3.0	17.0	27.6

表 15 の女性・活動レベル I と II は残念ながら実行不能（解なし）であった。それ以外は最適解を得られ、脂質・塩分・カリウム・食物繊維の 4 栄養素が適正な値になった。しかしながら、今度はこれまで適正かやや少なめであった蛋白質と炭水化物が摂取不足になってしまった。価格も、四群点数を満たすだけの最適解（表 6, 7）と比較してかなり高くなり、男性・II を除いてほぼ倍の値段となってしまった。もはや懐事情の厳しい大学生が毎日の食費として購うものとしては現実的な答えではない。

さらに、摂取不足となってしまった 2 栄養素（蛋白質、炭水化物）について、下限制約を追加した最適化モデルを考えることも出来る。その場合、式 (4.2) について、 $l = 9, 10$ ($l = 9$ が蛋白質、 $l = 10$ が炭水化物に対応) を考え、基準値（目標下限、ただし、蛋白質は 4 つある基準値のうち、目標下限ではなく、最も値の小さい推定平均値を用いた）を設定して追加すればよい。この最適化モデルを $\Delta = 0.5$, $K = 1$ で解いた結果、男女とも全活動レベルで実行不能（解なし）となってしまった。扱ったデータの範囲では、外食メニューのみで、四群点数・栄養素全てを適正值・推奨値にする組合せは存在しないことになる。

5 まとめ

本研究では、大学生が外食メニューに特化して食事摂取を行った場合、栄養バランスをとりつつリーズナブルな価格で過ごすことが出来るのかどうか検証した。1 日に限定すれば、1 食平均ワンコイン（500 円）、1 日 1,500 円程度で、四群点数を全て満足する解が得られることがわかった。また、同じメニューを 2 度使わない条件の下で日数 2~7 日の解を求めると、価格が高めとなり 1,600 円~2,200 円程度となる。また、外食メニューでは四群点数を満たす場合でも脂質や塩分が高めでカリウムや食物繊維が不足しがちな答えが出ることがわかった。これらを満たすような解を求めることは可能だが、価格がさらにより高くなることもわかった。女性の結果についてはカリウムは適正值を得られている解の方が多いことや、外食メニューではより条件が厳しくなる女性の身体活動レベル I については、日数 5~7 日についてそもそも実行不可能であることもわかった。

今回四群点数を元に結果を提示したが、実際のメニューを考慮する場合には、より内容を吟味する必要がある。四群点数法では、より細かい分割を示しており、例えば、1 群 3 点の場合、その内訳は乳・乳製品から 2 点、卵 1 点などとなる。データが詳細な点数を示していないため、本研究においては、食品点数ではなく群点数にもとづく結果を示した。その結果、従来からの成分による摂取量基準と、四群点数法による摂取基準で乖離が見られた。実際、四群点数を満たしつつ、栄養素を満たす解が見つかるため、栄養素が偏る解が出る原因の一つは食品点数で計算していないことにあると思われる。従って、各メニューの四群食品点数（群内訳点数）が示されれば、より現実に即した結果の提示ができるようになると予想される。

しかし、いずれにせよ今回の結果からわかることは、外食のみで栄養バランスを考慮しようとする、比較的リーズナブルな外食チェーン店が多く含まれていたデータでも、費用を抑えられないということがはっきりと示されたことである。最適化モデルの価格最小化最適解であるので、これ以上安い組合せはない、と証明された。

価格が高めとなる原因や栄養バランスの問題で考えられることは、全ての外食メニューを扱っているわけではない、という制限に起因しているかもしれない。データが増える、即ち、実行可能領域が増えれば最適解は改善されるからである。しかし、限定されているとは言え、計算に用いた全ての外食チェーンが、摂食者の行動範囲内にあるということは稀であろうし、あったとしても、対象となっ

たメニューを食べ歩く労力は大きく、現実的とはいえない。今回の結果より、やはり外食だけでその要望を満たすのは難しいということである。素直に、自身の行動範囲内で自炊や中食などを組合せ、一日の栄養バランスを考慮した方が手間暇がかからないのである。

また、今回の結果は、栄養バランスのとれた安価な新メニューの考案に大いに寄与できる。様々な店舗のメニューを組み合わせ、安価で栄養バランスを考慮した解が得られたということは、1店舗でそれを実現出来る可能性がある、ということの意味する。提示された1日分の最適解をもとに原材料からその組合せを紐解いて3食分の食事として組み直せば、新たなメニューの考案に繋がるだろう。

今後の課題としては、まず1つ目としてモデルの改良などによる計算時間の短縮があげられる。日数 K を増やしていくと急激に求解時間が増え、かつ解が求まらないことがある。対称性を排除するなど、変数設定やモデルの設定に改良の余地がある。

2つ目として、より現実的な案として外食ではなく中食を積極的に利用した場合を扱うことである。ただし、この場合には問題点が幾つかある。1店舗に限ったとしても食品点数が膨大となること、各食品の詳細なデータ（四群点数值）が不明であること、価格が不安定であること（食品の性質上、鮮度の違いで値段が異なる、例えば、作成後一定時間が来て売れ残っているものは値段が下がることや、原材料の費用の変動により通常価格が日毎に異なる）などの理由により、データの取得が困難を極めることである。

従って、場所と量を限定し、例えば大学内の生協・学食で量り売りで提供されるものに限定するなどすれば、大学生の中食状況の改善や適切なメニューの提示支援に繋がると思われる。

謝辞

本研究の実施にあたり、データの調査、特に各メニューの価格調査について、研究所所属学生諸君の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。また、査読者の方より有益なコメントを頂きました。感謝致します。

参考文献

- [1] 朝倉由美子, 武田康代, 西山千穂子: 大学生および短期大学生の食生活と健康意識の調査 中間報告 その1 豊橋創造大学短期大学部研究紀要 **24** (2007) 11-16.
- [2] 朝倉由美子, 武田康代, 西山千穂子: 大学生および短期大学生の食生活と健康意識の調査 (第2報) 豊橋創造大学短期大学部研究紀要 **26** (2009) 1-19.
- [3] 小川綾子: 管理栄養士が見た大学生の食生活の実体 (1), (2). Eatreat イートリート 食と健康と コラム. <https://eat-treat.jp/columns/105> (2017.1.18), <https://eat-treat.jp/columns/106> (2017.1.18).
- [4] 香川芳子 監修: なにをどれだけ食べたらいいの? 第2版. 女子栄養大学出版部 (2012).
- [5] 香川芳子 監修: 外食のカロリーガイド 改訂版. 女子栄養大学出版部 (2013).
- [6] 香川芳子 監修: 食品成分表 2015. 女子栄養大学出版部 (2015).

- [7] 香川芳子 監修, 川端輝江 編: 実践で学ぶ女子栄養大学のバランスのよい食事法 第2版. 女子栄養大学出版部 (2015).
- [8] 久保幹雄, J.P. Pedroso, 村松正和, A. Rais: あたらしい数理最適化 -Python 言語と Gurobi で解く. 近代化学社 (2012).
- [9] 厚生労働省: 日本人の食事摂取基準 2015 年版. http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/eiyou/syokuji_kijyun.html (2015).
- [10] 黒田剛司: 大学生の料理事情。スパイスまで使う大学生は全体の 7.1 % とごくわずか, Students Lab. <http://lab.oceanize.co.jp/students-cooking/> (2016/5/16).
- [11] 黒田剛司: 大学生の食事情。食事を作るのが面倒なときはカップラーメンという大学生が約半数, Students Lab. <http://lab.oceanize.co.jp/students-instant-ramen/> (2016/7/20).
- [12] 全国大学生生活協同組合連合会: 現代学生の食事模様 ～学生は具体的に何をどのように食べているのか, 第 26 回「学生の意識と行動に関する研究会」概要, <http://www.univcoop.or.jp/about/life/vol37-01.html> (2017/10 閲覧).
- [13] TOWN WORK マガジン: 学生のランチ事情! 平均予算は 461 円. https://townwork.net/magazine/job_wpaper/st_trend/8133/ (2016/5/6).
- [14] 高田光子: 料理献立作成エキスパートシステムの最適化に関する研究. http://orchid.ics.narawu.ac.jp/ppt/2001/takada_ppt.pdf (2001).
- [15] 辻明日夏, 倉重賢治, 亀山嘉正: ファジィ数理計画法を用いた料理の選択. 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌) Vol.20, No.3 (2008) 337-346.
- [16] 辻村卓: 野菜のビタミンとミネラル. 女子栄養大学出版部 (2003).
- [17] 辻村卓: 野菜の旬と栄養価. 農畜産業振興機構「月報 野菜情報」2008 年 11 月号, <http://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/joho/0811/joho01.html> (2008/11).
- [18] 日本学生支援機構: 平成 26 年度 学生生活調査. http://www.jasso.go.jp/about/statistics/gakusei_chosa/2014.html (2016/3).
- [19] 日本惣菜協会: <http://www.nsouzai-kyoukai.or.jp/> (2017/10 閲覧).
- [20] 日本フードサービス協会: データからみる外食産業. http://www.jfnet.or.jp/data/data_c.html (2017/10 閲覧).
- [21] 農林水産省: 食事バランスガイド. http://www.maff.go.jp/j/balance_guide/index.html (2017/10 閲覧).
- [22] 広島大学生協: 食生活の重要性と大学生の食事の実態, https://vsign.jp/hiroshima/meal/students_reality (2017/10 閲覧).

- [23] 深貝侑司: 外食産業の栄養を考える -ダイエット問題の応用-, 文教大学情報学部 2015 年度卒業論文 (2015).
- [24] ベネッセ教育総合研究所第 2 回 大学生の学習・生活実態調査報告書 [2012 年], <http://berd.benesse.jp/koutou/research/detail1.php?id=3159> (2017/10 閲覧).
- [25] 堀田敬介: えくせるであそぶ. 創成社 (2005).
- [26] PotSpot 編集部: 一人暮らしの男子大学生の食事に 1 週間密着してみた, PotSpot. <http://pot-spot.jp/studentfood/> (2017/10 閲覧).
- [27] マイナビ学生の窓口: 大学生の朝の味方! 「100 円朝食」を学食で提供している大学 17 選, <https://gakumado.mynavi.jp/gmd/articles/39262> (2016/7/28).
- [28] 三野陽子, 小林一郎: ユーザのスケジュールを考慮したダイエットのためのレシピ推薦. DEIM Forum (2009) A2-1.
- [29] 文部科学省 科学技術・学術審議会 資料調査分科会: 日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂). http://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365295.htm (2015).
- [30] 吉田企世子 監修: 旬の野菜の栄養事典 改訂版. エクスナレッジ (2011).