食料供給システムの物質・エネルギー解析と 低炭素型の食生活に関する研究

長沼 悠介¹・立花 潤三²・後藤 尚弘³

¹非会員 元豊橋技術科学大学 環境・生命工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

²正会員 富山県立大学 環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

E-mail: tatibana@pu-toyama.ac.jp

³正会員 豊橋技術科学大学 環境・生命工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: goto@ens.tut.ac.jp

本研究では、代表的な食料8種類について、食料供給システム（食料生産・流通・消費）における食料フローを解析し、1965年から2005年までの各消費量、食品ロス量、食料供給に係る投入エネルギー及び二酸化炭素排出量を明らかにした。二酸化炭素排出量は2005年において約5,400万t-CO₂（日本の二酸化炭素総排出量の約4.5%）であることが明らかになった。また、国民が摂取した熱量（摂取熱量）と食料供給に要した熱量（投入エネルギー）の乖離幅と食品廃棄物量に関係があることが明らかになった。そして、必要とする栄養素量を満たしながら、投入エネルギーが最も少ない低炭素型の食生活を線形計画法によって明らかにした。その結果、穀類・豆類・肉類等の摂取を増加し、野菜類・魚介類等の摂取を減少させる解が得られた。この食生活を日本人全員が行うと、年間で約500万t-CO₂の削減が可能である。

Key Words : food system, sustainability, food waste, CO₂, eating habits

1. 序論

(1) はじめに

a) 食品廃棄物

平成 20 年の食品廃棄物排出量が約 1800 万 t であり、その内訳は一般廃棄物が約 1500 万 t、産業廃棄物が約 300 万 t である¹⁾。食品廃棄物^{注1)}は一般廃棄物では約 30%、産業廃棄物では約 1%を占めている。日本は食料の半分以上を輸入しているのにも関わらず、食品資源の約 2 割を廃棄しているという報告もある²⁾。

食品リサイクル法の改正により、食品資源の再生利用率は年々上昇しており、平成 19 年度では、食品製造業が 81%、食品卸売業が 62%、食品小売業が 35%、外食産業が 22%となっているが、近年では、再生利用率の増加率は頭打ちの傾向が見られる³⁾。また、同法は食品関連業者にのみ発生抑制を義務付けているため、家庭からの食品廃棄物の再生利用率は 10%にも至っていない。

b) 供給熱量と摂取熱量

わが国では、農林水産省は 1960 年から、食料需給の全般的動向を把握するため、「食料需給表」¹⁾を作成している。また、厚生労働省が 1947 年から、国民の栄養

摂取及び生活習慣を明らかにするために、「国民栄養・健康調査」⁴⁾を実施している。各資料には、国民 1 人 1 日当たりの「供給熱量」と国民 1 人 1 日当たりの「摂取熱量」が記載されている。供給熱量は国内消費仕向量から可食分の純食料を算出し熱量換算したもので、摂取熱量は国民が摂取した食料を熱量換算したものである。供給熱量と摂取熱量の変遷を図-1 に示す。供給熱量が全て摂取されていると仮定すれば、供給熱量と摂取熱量の値は等しくなるが、両者の値は異なっている。2010 年の時

図-1 供給熱量と摂取熱量の変遷^{1,5)} (1965-2009)

点で、両者の乖離幅は約 610 kcal である。農林水産省はこの差は食品の廃棄や食べ残しの目安としている⁹⁾。

c) 食事摂取基準値

「日本人の食事摂取基準」⁹⁾は、男女別や年代別の熱量や各種栄養素の摂取推奨量等の基準値を示している。それによると男女ともに各年代で、摂取基準値よりも実際の摂取熱量が低いことがわかる。これより、食品廃棄の原因は、食品を過剰に摂取しているためではないことがわかる。むしろ、日本人はより多くの食料を摂取しなければならないのに、供給されている食料を摂取せず廃棄していることがわかる。

d) 食品由来の二酸化炭素排出量の変遷

農林業・水産業・食料品業の、1990 年から 2010 年までの二酸化炭素排出量の変遷を図-2 に示す⁹⁾。水産業と食料品業は 1990 年代前半以降、農林業は 2000 年代前半以降から減少傾向になっている。この原因の一つとして、図-2 が国内分を算出しているため、食料自給率の低下がこのような結果になったと思われる。1990 年に 48%であった自給率は、2010 年で 39%と、9%減少している。特に水産業では、1990 年の 79%に対して、2010 年は 54%と、25%減少している。また、水産業では単位生産額当たりのエネルギー消費量（金額熱量原単位）が大きい漁業の割合が減少し、金額熱量原単位が小さい養殖業の割合が増加していることも、原因の一つとして考えられる。

以上より、我が国の食料需給システムにおいて、食料生産のための熱量や食品廃棄物増加などの環境問題と、栄養摂取が基準値よりも低いライフスタイルの問題が混在している。

(2) 既往研究

a) 食料需給システムに関する研究

小幡（2012）⁹⁾は、食料自給率の低下と食料の供給熱量と摂取熱量の乖離幅の増加や環境負荷の増加との関連性を指摘している。佐藤（2007）⁹⁾は、産業連関表とエネルギーバランス表を用いて食料部門のエネルギー・環境負荷の解析や経済への影響分析を行った。食料品に対する年間の直接・間接エネルギー消費量は、総消費量の

12.2%を占め、食料自給率を平成 27 年度目標値まで高めた場合、エネルギー消費量と二酸化炭素排出量はいずれも 0.65%増と微増であると考察した。

Apaiah et al.（2006）¹⁰⁾は、オランダ国内の豚挽き肉、乾燥豆から作られたたんぱく質食品等のサプライチェーンの環境負荷を、エクセルギー解析を用いて分析した。乾燥豆から作られたたんぱく質食品のサプライチェーンは、豚挽き肉のそれよりも約 1.2 倍効率的であることを明らかにしている。

b) 食品廃棄物・食品ロスに関する研究

世界の食品廃棄物と食品ロスに関しては FAO の報告書¹¹⁾が世界各地域のデータを示している。日本はアジア先進工業地帯として中国や韓国とともに分類されている。

須藤・菱田（2010）¹¹⁾は、我が国の食品ロス発生要因として、食品リサイクル法に拡大生産者責任が定められていないことを指摘している。

Kantor et al.（1997）¹²⁾はアメリカにおける食料サプライチェーン中に発生する食品ロスの種類と要因を調査した。そして、10 種類の食料に対して、小売り、外食、消費者のそれぞれの食品ロス率を算出し、全体で 27%の食品ロスが生じていると推定した。

Parfitt et al.（2010）¹³⁾は先進国及び発展途上国等における食品廃棄物の定量化と将来予測を行った。発展途上国や移行国では、食料サプライチェーンのインフラ（冷蔵貯蔵など）が整っていないため、食料が腐敗しやすくサプライチェーンの上流で廃棄物発生量が多いが、先進国では消費段階での廃棄物が多いことを指摘した。

c) 食料生産の投入されるエネルギーに関する研究

野口・齋藤（2008）¹⁴⁾は、機械化された水稻生産の直接・間接エネルギーを求める手法を提案した。そして、過去の機械化水稻生産との比較から、機械や資材の製造エネルギーの減少や農薬・化学肥料の少量散布による低熱量消費型水稻生産の可能性を示した。仁平（2003）¹⁵⁾は、日本における 32 の作物生産の投入・産出熱量について、1970 年から 1990 年までを算出し、いも類を高位効率作物（投入産出熱量比：6.8～9.1）、穀類と豆類を中位効率作物（1.7～3.9）、果実と露地野菜を低位効率作物（0.6～1.1）、施設作物を極低位効率作物（0.04）と区分した。吉川ら（2009）¹⁶⁾は、輸入食料・飼料の環境負荷を考慮した産業連関表による二酸化炭素排出原単位の作成を目的とし、小麦と豚肉の輸入と国内生産のライフサイクルインベントリ分析を行った。その結果輸入製品の環境負荷の方が低いことが明らかになった。

d) 食料摂取の栄養に関する研究

澤田（1991）¹⁷⁾は、所得（特に農業以外）の成長が栄養の限界価値を低下させる一方、栄養の相対価格は栄養の価値に正の有意な効果を与えていることを示唆した。

久保ら（1988）¹⁸⁾は、食品を栄養素の含有成分比によ

図-2 食料関係の二酸化炭素排出量の変遷⁹⁾ (1990-2010)

り7つの食品群に分類し、各種栄養素の摂取量を最適にするための多目的栄養摂取計画モデルを構築した。

(3) 研究目的

持続可能な社会の形成のためには、生活に欠かすことができない「食」の持続可能性について考慮することが必要不可欠である。これまで食品リサイクル法などの法の整備や、地産地消・旬産旬消や CFP(Carbon Footprint of Products)の取り組みを通じて国民意識の向上を図るなど、様々な対策が施されている。また、「食」の環境負荷に関する研究も今日まで数多く行われている。しかし、地産地消は都市部では限界があり、CFPは対象商品が食料品以外も含めて現時点で約630点であり⁷⁾、普及数が少ないなどの問題がある。既往研究では、食料の流通・消費段階を含まないものや、熱量や栄養素の必要摂取量、食品ロスの熱量を考慮していない場合が多い。

本研究では、「食」の持続可能性を食品ロス量と食品ロスによる二酸化炭素排出量の観点から提案することとした。つまり、持続社会の一つである低炭素化に焦点を絞った。代表的な食料8種類について、食料供給システム(食料生産・流通・消費)における食料フローを解析し、食品ロス量とそれによる二酸化炭素排出量を計算する。そして、国民が必要とする栄養素量を満たしながら、投入エネルギーが最も少ない「低炭素型の食生活」を線形計画法によって明らかにする。

2. 食料生産に伴う環境負荷評価

(1) 手法

a) 対象とする食料需給システム

本研究での対象食料は、過去の信頼できるデータが存在し、かつ、摂取量の多い代表的な食料として、穀類・いも類・豆類・野菜類・果実類・肉類・魚介類・乳製品の8種類とした。食料の消費形態は「食品産業(加工品)」「外食産業」「世帯」の3つとし、流通過程で「卸売り」や「小売り」がある。これらが絡み合ったのが食品フローである。各消費形態・流通過程で食品ロスが発生する。ここで、食品ロスとは、本来可食部分であるが廃棄される廃棄物のことである。食品廃棄物とは、食品ロスと不可食部分の和であるが、本研究では不可食部分は考慮しないこととした。また、本研究では食料生産に要したエネルギー量を「投入エネルギー」と定義した。さらに、本研究では食料生産に伴う投入エネルギー量を評価することを目的としているので、卸売りや小売りにおいては、化石燃料の投入エネルギーは考慮せず、食品廃棄物の発生のみを考慮した。

b) 食料需給システムの食料フローの算出

国内生産量に輸入量を足して輸出量を引いた値が国内仕向量であり、不可食部分も含まれている。この不可食部分を排除したものを純食料とした。データは農林水産省の食料需給表⁹⁾を用いた。

純食料から各消費形態へのフローは式(1)によって算出した²⁰⁾。算出は産業連関表がある1965年-2005年まで5年ごととし、産業連関表の産出表の生産者価格を用いて、各食料における各消費形態毎の取引金額の比を算出し、それに産業連関表と同じ年の純食料量を乗じた。

$$M(i, j) = \frac{O(i, j)}{\sum_i O(i, j)} \times F(j) \quad (1)$$

M : 食料消費量(t) O : 産出額(円) F : 純食料量(t)

O_{ALL} : 食料として使用される産出額合計(円)

i : 食料消費形態(食品産業、外食産業、世帯)

j : 食料の種類(穀類、いも類、豆類、野菜類、果実類、肉類、魚介類、乳製品)

各消費形態の純食料量に食品ロス率を乗ずる(式(2))。純食料量に、算出した食品ロス量を引いた食料量を、本研究では「消費量」と定義する。

$$M_{LOSS}(i, j) = M(i, j) \times R_{LOSS}(i, j) \quad (2)$$

M_{LOSS} : 食品ロス量(t)

R_{LOSS} : 重量あたりの食品ロス率(%)

食品ロス率は農林水産省報告書²⁾の値を用いる。2001年の報告書以降は、世帯の食品ロス率データのための公表である。そのため、外食産業、食品卸売業、食品小売業の食品ロス率は、2000年の値を他の年にも適用した。ただし、食品製造業の食品ロス率は、「商品の廃棄のみで原材料の廃棄を考慮していない」²¹⁾との指摘もあることから別途算出した。農林水産省公表の「食品廃棄物等の年間総発生量及び発生抑制の実施量」²²⁾の廃棄としての処分量が、式(1)で算出した食品産業の消費量(純食料に相当)に対する割合を求めた。また、食品産業へは食品卸売業から食料が流通するとしたので、この割合に食品卸売業の食品ロス率を足したものを食品産業の食品ロス率とし、食品卸売業の食品ロスを食品産業に含めて算出した。同様に、外食産業の食品ロス率は外食産業と食品卸売業の食品ロス率の和、世帯の食品ロス率は世帯と食品小売業の食品ロス率の和として算出した。

c) 投入エネルギーと摂取熱量

投入エネルギーは産業連関表産出表の各食料の生産に伴う生産者価格に、産業連関表による環境負荷原単位データブック²³⁾(以下3EID)の金額熱量原単位を乗じて熱量に換算した。計算式を式(3)に示す。

$$E_{INPUT} = \sum_{j=1}^8 \left\{ \sum_{i=1}^3 (O(i, j) \times C_H(j)) + \sum_k (O(k, j) \times C_H(k)) + \sum_l (O(l, j) \times C_H(l)) \right\} \quad (3)$$

E_{INPUT} ：食料の投入エネルギー(kcal) O ：産出額(円)

C_H ：金額熱量原単位(kcal/円) k ：原料段階の分類

l ：農林水産等で使用される化学肥料等その他の分類

式(3)の右辺第1項は消費段階での投入エネルギーを、第2項は各食料の原料段階での投入エネルギーを、第3項は農林水産や畜産で使用される化学肥料や飼料の投入エネルギーを表している。なお、それぞれの段階において化石燃料の投入エネルギーが含まれている。 k, l の分類を表-1に示す。

また、日本は食料の半分以上を輸入に依存しているので、本研究では3EIDの「輸入品国内生産仮定型」を適用した。ただし、大規模農園等の海外の原単位は、日本の原単位よりも小さい可能性があり¹⁶⁾、本研究で求める

表-1 各食料産業連関表における原料段階、その他の分類

	原料段階	化学肥料や飼料等その他
穀類	—	化学肥料、農薬
いも類	—	化学肥料、農薬
豆類	—	化学肥料、農薬
野菜類	—	化学肥料、農薬
果実類	—	化学肥料、農薬
肉類	肉鶏、豚、肉用牛、その他の畜産	飼料
魚介類	海面漁業、海面養殖業、内水面漁業・養殖業	海面養殖業、内水面養殖業
乳製品	酪農	飼料

図-3 消費形態別の穀類の消費量の変遷（5年毎）

図-4 消費形態別の野菜類の消費量の変遷（5年毎）

値は現実より大きい可能性がある。

摂取熱量は、厚生労働省の「国民健康・栄養調査」²⁴⁾の各食料の1人1日あたりの摂取熱量より算出した。

d) 食料生産に伴う二酸化炭素排出量の算出

食料生産に伴う二酸化炭素排出量は式(3)の金額熱量原単位の換わりに、3EIDの金額二酸化炭素排出原単位を乗ずることで算出した。食品ロスに由来する二酸化炭素排出量（食料生産に伴う二酸化炭素排出量のうち食品ロス分）は、各食料の二酸化炭素排出量に食品ロス率を乗じて算出した。従って、食品ロスの処理、発酵等による二酸化炭素、メタン等は考慮していない。

(2) 結果

a) 食料需給システムの形態別食料消費量

各食料における消費形態別の消費量の変遷を図-3 から図-5 に示す。穀類は、世帯消費が減少する一方で外食・食品産業での消費が増加してきたことが分かる。野菜類は外食・食品産業での消費が一時増加しその後大きな変化がなく推移している。肉類は外食・食品産業での消費が増加傾向を示した。

b) 食料需給システムの食品ロス量

各食料の消費形態別の食品ロス量の変遷を図-6 から図-8 に示す。野菜類の食品ロス量が他の食料と比較して多くなっている。また、その内訳として世帯からの食品ロスが多いことが分かる。なお食品産業の食品ロス量は2(1b)に示すように不可食部分が含まれており世帯、外食産業のそれよりも多く見積もられている。全体的に

図-5 消費形態別の肉類の消費量の変遷（5年毎）

図-6 消費形態別の穀類の食品ロス量の変遷（5年毎）

2000年を境に各食料の食品ロス量が減少していることがわかる。外食産業に関しては2000年に改正の食品リサイクル法の影響が、世帯に関しては食品ロス量の算定方法の変更²⁹⁾や消費者の意識の高まり²⁹⁾などが考えられる。

c) 食料生産に伴う投入エネルギーと食料摂取による摂取熱量

各食料の食料生産に伴う投入エネルギーと食料摂取に

図-7 消費形態別の野菜類の食品ロス量の変遷（5年毎）

図-8 消費形態別の肉類の食品ロス量の変遷（5年毎）

図-9 穀類の投入エネルギーと摂取熱量の変遷(1965-2009)

図-10 野菜類の投入エネルギーと摂取熱量の変遷(1965-2009)

よる摂取熱量の変遷を図-9 から図-11 に示す。各食料の摂取1kcalあたりの投入エネルギーの変遷を図-12に示す。穀類、野菜類、肉類ともに、摂取熱量は大きく変わらないが投入エネルギーが増加しているのが分かる。図-12をみると、特に魚介類と野菜類の増加が顕著である。

d) 食料生産に伴う二酸化炭素排出量の結果

食料生産に伴う二酸化炭素排出量の変遷を図-13に示す。1965年以降、食料生産に伴う二酸化炭素排出量は増加し続け、1985年のピーク時には約5倍まで増加し、2009年には約5000万tCO₂となった。食料生産に伴う二酸化炭素排出量の割合は、日本の全二酸化炭素排出量⁶⁾の約4.5%(2005年)となった。食品ロス由来の二酸化炭素排出量は、食料生産に伴う二酸化炭素排出量の約5.3%である。なお、図-2では二酸化炭素排出量は減少して

図-11 肉類の投入エネルギーと摂取熱量の変遷(1965-2009)

図-12 各食料の摂取1kcalあたりの投入エネルギーの変遷

図-13 食料生産に伴う二酸化炭素排出量の変遷

図-14 食料別の生産に伴う二酸化炭素排出量の変遷（5年毎）

表-2 熱量換算係数 (kcal/g)

穀類	いも類	豆類	野菜類	果実類	肉類	魚介類	乳製品
3.59	0.9	4.15	0.28	0.54	2.16	1.32	0.62

表-3 熱量換算係数 (kcal/g)

	2000	2005
食品廃棄物による熱量ロス量	515	380
供給熱量と摂取熱量の乖離幅	695	669
供給熱量と摂取熱量の乖離幅（補正）	495	469

いるが、図-13 では増加を示している。これは、図-2 は国内生産に関連する排出量のみを対象としているが、図-13 では輸入分も算入しているためである。

また、図-14 に食料別の食料生産に伴う二酸化炭素排出量を示す。魚介類が最も多く、次いで穀類、肉類が多い結果となった。1985年以降、魚介類の自給率の低下や漁業から養殖業への転換により、魚介類の食料生産に伴う二酸化炭素排出量は減少したが、2005年の時点でも多くの割合を占める。

e) 供給熱量と摂取熱量の乖離幅と食品廃棄物による熱量ロスの関係性

図-1 で示した供給熱量と摂取熱量の乖離幅と算出した食品廃棄物による熱量ロスを比較した。なお、図-1 における供給熱量は統計表⁴⁾の粗食料_{注2)}を元にした数値である。この粗食料には不可食部分の廃棄物も含まれると考えられるため、食品ロスではなく、食品廃棄物による熱量ロスを比較対象とした。

まず、重量を熱量に換算する係数 (kcal/g) を、統計表⁴⁾から求めた。求めた換算係数を表-2 に示す。

次に、熱量換算係数 (kcal/g) と食品ロス量 (g) から食品ロスによる熱量ロス (kal) を算出した。また、食品ロスによる熱量ロスと、食品ロス量と不可食部分の比から、食品廃棄物による熱量ロスを求めた。

乖離幅が増加する以前の1965年から1975年の乖離幅は、一定で推移しており、その幅は約200kcalである²⁾。1975年以降はこの乖離幅が増加しているため、この増加分は高度経済成長後の食生活の変化の影響と考えられる。

このため、1965年から1975年の乖離幅である200kcalは通常の生活で避けられない乖離幅とした。乖離幅から200kcalを引いた補正值と、食品廃棄物による熱量ロスを比較を表-3 に示す。なお、食品廃棄物のデータは環境省公表のデータ²⁾を用いたため、2000年と2005年の推計とした。

表-3 より、食品廃棄物による熱量ロスと供給熱量と摂取熱量の乖離幅の補正值が、2000年ではほぼ同等、2005年では約20%の差異が生じた。これより、乖離幅の原因及びその熱量の行方が食品廃棄物である可能性が示唆された。より詳細な検証には、各部門の食品廃棄物の積み上げデータなどを用いた評価が必要となる。

3. 「低炭素型の食生活」の検討

本章では、前章までに行った食料需給システムにおけるエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の算定手法を用いて、低炭素型の食生活の可能性を検討する。本研究では「低炭素型の食生活」を、摂取基準値の熱量及び栄養素量の摂取を満たしながら、より投入エネルギーが低い食生活と定義する。

なお、前章の結果では食品ロスによる二酸化炭素排出量を推計する一方で、本章の計算では食品ロス量を変数とせずに、食品摂取のパターンを変数としている。これは、食生活の変化が間接的に二酸化炭素排出量の多い食品を減らすと考えたからである。食品ロスを直接へらす加工技術、流通形態、料理方法の変化は重要な変数ではあるが、本研究では含まないとした。

(1) 手法

a) 栄養素の摂取基準値について

本研究で用いる食料8種類の摂取熱量は、全体の熱量摂取量の約8割にあたるため、国が定める摂取基準値の8割の値を本研究の摂取基準値と設定した。また、年代・男女別人口の加重平均を求め摂取基準値とした。

b) 定式化

$$\text{目的関数： } E_{\text{input}} \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\text{制約条件： } \sum_{j=1}^8 p_j \cdot n_j^r \geq N_r \quad (5)$$

$$p_j \leq P_j \quad (j=1,2,\dots,8) \quad (6)$$

j : 食料品種, P_j : 食料品種 j の生産量(t), n_j^r : 食料品種 j に含まれる栄養素 r の量(g/t), N_r : 栄養素 r の摂取基準値(t/year), P_j : 食料品種 j の過去最大摂取量(t/year)

本問題は、各種栄養素量と熱量の摂取基準値を満たす

ことを制約条件として、投入エネルギーの最小化を目的関数とする線形計画問題となる。最大摂取量と最小摂取量は1953～2009年の各食料摂取量の最大・最小を用いた。

c) 低炭素型の食生活のシナリオ

シナリオ設定においては、「熱量の摂取のみを考慮する場合」「熱量の摂取と三大栄養素の摂取を考慮する場合」「熱量の摂取と三大栄養素とビタミンの摂取を考慮する場合」の3つを想定しそれぞれ「制約条件なし」「最大摂取量を制約条件とする」「最大摂取量と最小摂取量を制約条件とする」とした合計9シナリオを設定した(表-4)。

シナリオ①～③では熱量のみ基準値を満たしていれば良いが、シナリオ⑦～⑨では熱量と三大栄養素とビタミンの全ての基準値を満たす必要がある。シナリオ⑨が最も実生活に近い。

(2) 結果

a) 低炭素型の食生活の最適化

各食料の摂取熱量、投入エネルギーの2009年推計値と各シナリオの最適値を表-5に示す。表-5には各食料の摂取熱量の合計、摂取熱量1kcalあたりの投入エネルギーも掲載し、各シナリオ間で比較できるようにした。

表-4 シナリオの条件と番号

考慮項目	制約条件	シナリオ番号
熱量のみ	なし	①
	最大摂取熱量	②
	最大摂取熱量と最小摂取熱量	③
熱量と三大栄養素	なし	④
	最大摂取量*	⑤
	最大摂取量と最小摂取量*	⑥
熱量と三大栄養素とビタミン	なし	⑦
	最大摂取量*	⑧
	最大摂取量と最小摂取量*	⑨

*：熱量，栄養素，ビタミンの摂取を含む

表-5 低炭素型の食生活の最適化の結果

単位 [kcal]	2009	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
穀類	7850	00	1401	1244	00	1433	1054	00	1387	1042
いも類	380	00	844	844	1063	844	844	9945	844	844
豆類	650	1606	1203	1203	538.7	1203	1203	5375	1203	1203
野菜類	700	00	00	510	00	00	510	742	00	510
果実類	670	00	00	124	00	00	124	00	730	227
肉類	1740	00	00	145	00	1932	1774	00	1932	1778
魚介類	1130	00	00	729	00	00	729	00	00	729
乳製品	880	00	00	63	00	1028	1028	00	1028	1028
摂取熱量	1400	1606	1606	1606	1601	1933	1903	1606	1961	1674
投入エネルギー	4950	743.6	2298	2060	1023	3704	4588	1659	3844	4600
摂取熱量 1kcal あたりの 投入エネルギー	3.54	0.46	1.43	1.28	0.64	1.92	2.74	1.03	1.96	2.75

b) 二酸化炭素排出量

食料摂取における二酸化炭素排出量の2009年推計値と各シナリオの最適値を図-15に示す。考慮項目が少ないほど、また制約条件も少ないほど、二酸化炭素排出量を抑制できた。最も実生活に近いシナリオ⑨では、約500万tCO₂を削減できることが明らかになった。これは、2009年推計値の7%に相当する。

c) 食品ロス量

食品ロス量の2009年推計値及び各シナリオの最適値を図-16に示す。二酸化炭素削減量のグラフと異なり、考慮項目や制約条件等で規則性が見られなかった。熱量と三大栄養素とビタミンを考慮し、最大摂取熱量と最小摂取熱量を制約条件として一番実生活に近いシナリオ⑨では、2009年の食品ロス量と比較して123%に増加する。また、シナリオ④とシナリオ⑦は約400%の増加という大きい値となった。この原因として、いも類の食品ロス率が考えられる。いも類の食品ロス率は、13%と他の食品に比べて大きい(表-6)。いも類は投入エネルギーが低いため、低炭素型の食生活では摂取が多くなるが、その分いも類の食品ロスも増加し、結果として全体的に食品

図-15 2009年推計値と各シナリオの最適値の比較
(数字は2009年を100とした時の二酸化炭素排出量)

図-16 2009年と各シナリオの食品ロス量の比較
(数字は2009年を100とした時の食品ロス量)

表-6 各食料の食品ロス率(%)

穀類	いも類	豆類	野菜類	果実類	肉類	魚介類	乳製品
2.2	13.0	5.5	10.3	10.0	4.4	5.8	2.3

ロスが増加したのだと考えられる。

d) 低炭素型の食生活について

最も実生活に近いシナリオ⑨と 2009 年の摂取熱量を比較する。表-5 より、シナリオ⑨は、穀類・いも類・豆類・肉類・乳製品の摂取を増加し、野菜類・果実類・魚介類の摂取を減少させる食生活である。穀類・いも類・豆類はそれぞれ、投入エネルギーが低いことが増加する結果になったと考える。一方、漁業・養殖業に多量の燃料が必要であること、野菜類・果実類は投入エネルギーに対する摂取熱量が低いため、最適化においてそれぞれ摂取熱量が抑制されたものと考えられる。また、肉類や乳製品も投入エネルギーは大きい、たんぱく質や脂質を効率良く摂取するために必要不可欠であり、結果的に摂取熱量が増加したと考えられる。

野菜類・果実類が摂取熱量に対して投入エネルギーが多いことはシナリオ①-⑥における野菜類・果実類の優先順位を低いものとし野菜類・果実類の摂取不足が懸念されるため、シナリオ⑦-⑨でその解消を図った。しかし、ビタミンを考慮項目に含むか含まないかの違いであるシナリオ⑥と⑨では、野菜類と果実類の摂取熱量は大きく変化しなかった。これより、野菜類・果実類の不足を補うためには、ビタミン以外の栄養素も考慮する必要があることが明らかになった。

シナリオ⑨では食品ロス量が増加するという結果が得られた。本研究は食品廃棄物の処理は考慮しておらず、処理に伴う熱量投入も考慮していない。ただし、食品ロスが持つ熱量は投入エネルギーよりも小さく、食品ロスの増加による熱量ロスの増加よりも、投入エネルギーの減少の方が全体へ与える影響が大きいことから今回は食品ロスの増加に関しては十分な考察は行っていない。しかしながら、将来的には食品ロス量も考慮した多目的最適化を検討する必要があるだろう。

e) 低炭素型の需給システムの提案

シナリオ⑨の食生活の場合、野菜類・果実類・魚介類の摂取熱量が減少分は、食料自給率や輸送エネルギーなどを考慮して、国内生産の縮小ではなく輸入量の削減で対応することが望ましいと考える。一方、摂取熱量を増加させるべき食料については、国内での生産量を増加させることが望ましい。特に豆類は、1965年に25%だった自給率が2010年では8%まで減少したが、本研究では2009年の約2.2倍に増加させるべきとの結果になった。豆類の自給率が伸び悩む原因として、単収が低くかつ豊凶変動があり収益が安定しないこと、機械化が遅れ多労を要することが作付意欲を減少したことがあげられる²⁰⁾。しかし、低炭素化を考慮した農業政策において豆類の国内生産量増加は、一つの方向性として検討されるべきであると考ええる。

4. 結論

本研究では、食料フローと食品ロス量の算出による環境負荷評価を行ったとともに、食生活が抱える問題である環境負荷低減と必要栄養素摂取という環境・生活の両面からの解決を試みる「低炭素型の食生活」の検討を行った。

食料生産に伴う二酸化炭素排出量は2009年において約5000万tCO₂であり、日本の二酸化炭素総排出量の約4.5%を占め、減少傾向ではあるが高い水準であることが明らかになった。また、供給熱量と摂取熱量の乖離幅と食品廃棄物による熱量ロス量の値がほぼ同等になり、乖離幅の熱量ロスは廃棄物となっている可能性が高いことが判明した。しかしながら、より詳細な分析をするためには各部門の食品廃棄物量を積み上げて食品廃棄物による熱量ロスを計算し、評価することが望まれる。

また、線形計画法を用いて基準値以上の熱量及び栄養素量の摂取を満たしながら、投入エネルギーが最も少ない食生活の最適解を求めた。その結果、穀類・いも類・豆類・肉類・乳製品の摂取を増加し、野菜類・果実類・魚介類の摂取を減少させる解が得られた。そして、2009年の食料由来の二酸化炭素排出量に対して、年間で約500万tCO₂の削減が可能であることが明らかになった。

本研究の結果は、消費者への情報提示や農業政策や指針の決定だけでなく、線形計画法を用いた食料摂取の最適解を求める新たな手段として、食生活に関する環境問題の解決手法の提案が可能だと期待できる。

注

- (1) 食品廃棄物とは食品由来の廃棄物であり、食品ロスとはそのうちの可食部分である。本研究では廃棄物や炭酸ガス排出に関する場合は食品廃棄物、食品由来と統一した。なお、食料需給、食料自給率等、慣例的に「食料」が用いられている場合はそのまま「食料」を用いた。
- (2) 粗食料とは 国内消費仕向量－(飼料用＋種子用＋加工用＋減耗量) のことであり、国内消費仕向量とは 国内生産量＋輸入量－輸出品±在庫量で定義される。

参考文献

- 1) 環境省：食品廃棄物の処理状況（平成20年度），
<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html>
- 2) 農林水産省：食品ロスの削減に向けて（平成24年），
http://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/pdf/0902shokurosu.pdf
- 3) 財団法人食品産業センター，食品リサイクル法，
<http://www.shokusan.or.jp/kankyo/shoku/>
- 4) 農林水産省：食料需給表（平成22年度版），
<http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/index.html>

- 5) 農林水産省：食料・農業・農村白書（平成 21 年度版），
http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h21_h/trend/part1/terminology.html#ykg004
- 6) 独立行政法人国立環境研究所：温室効果ガスインベントリオフィス，<http://www.gio.nies.go.jp/index-j.html>
- 7) 小幡 範雄：食に関連した環境負荷の削減と持続可能な食と農に関する研究，政策科学，Vol.19, No.3, pp.249-267, 2012
- 8) 佐藤 善暁：産業連関表を用いた食料品部門のエネルギー・環境負荷分析，筑波大学第三学郡国際総合分類卒業論文，2007
- 9) Apaiah, R. K., Linnemann, A. R., van der Kooij, H. J. : Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chain, Food Research International, Vol.39, No.1-11, 2006
- 10) FAO : Global Food losses and Food Waste, 2011
- 11) 須藤 裕之，菱田 次考：わが国の食料自給率と食品ロスの問題について，名古屋文理大学紀要，第 10 号，2010
- 12) Kantor, L. S., Lipton, K., Manchester, A., Oliveira, V. : Estimating and addressing America's food losses, FoodReview, Vol.20, Issue1, pp.2-12, 1997
- 13) Parfitt, J., Barthel, M., Macnaughton, S. : Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050, Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences, Vol.365, No.1554, pp.3065-3081, 2010
- 14) 野口 良造，齋藤 高弘：インベントリ分析による機械化水稲生産のエネルギー消費・効率の考察，農業情報研究，Vol.17, No.1, pp.20-30, 2008
- 15) 仁平 尊明：日本における作物生産の投入・産出エネルギーの算出，人文地理学研究，No.27, pp.13-32, 2003
- 16) 吉川 直樹，天野 耕二，島田，幸司：輸入食料・飼料の環境負荷を考慮した産業連関表による CO₂ 排出原単位の作成，第 4 回日本 LCA 学会研究発表会，2009
- 17) 澤田 学：栄養摂取コストの推計：昭和 32～56 年全国平均農家，帯広畜産大学研報 I, Vol.17, pp.185-190, 1991
- 18) 久保 勇，長沢 啓行，西山 徳幸：栄養摂取計画における多目的意思決定システム，日本経営工学会誌，Vol.39, No.2, pp.76-82, 1988
- 19) 社団法人産業環境管理協会：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム，<http://www.cfp-japan.jp/>
- 20) 唯是 康彦，三浦 洋子：食料消費資料の数量的整合性—食品ロスの統計を中心にして—，統計学，Vol.87, pp.28-42, 2004
- 21) 農林水産省大臣官房統計情報部：食品ロス統計調査報告 9（平成 12 年度），2002，農林統計協会，pp.1-81
- 22) 農林水産省大臣官房統計情報部：食品循環資源の再生利用等実態調査結果の概要（平成 21 年度結果），2011
- 24) 厚生労働省：国民健康・栄養調査，http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyou_chousa.html
- 25) 農林水産省
http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h22_h/trend/part1/topics/t3_02.html
- 26) 三神 彩子：環境に配慮した食生活「エコ・クッキング」が地球環境問題の改善に与える影響，日本調理科学会誌，Vol.45, No.5, 323-331(2012)
- 27) 環境省：環境統計集，
<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html#shokuhinrisaikuru>
- 28) 農林水産省：消費者の部屋 Q&A，
http://www.maff.go.jp/j/heyakodomo_sodan/0308/05.html

(2014. 8. 4 受付)

RESEARCH OF MATERIAL AND ENERGY ANALYSIS ON FOOD SUPPLY SYSTEM AND LOW CARBON EATING HABITS

Yusuke NAGANUMA, Junzo TACHIBANA and Naohiro GOTO

For sustainable society, it is important to realize food supply and demand system which is low environmental load. Previous studies about the system focused on only an aspect, for example lifestyle, economy or environmental aspect. In this study we aimed at both environmental load and lifestyle.

Firstly, we analyzed material flow on food supply-demand system by input output table. Then we estimated amount of food consumption, food loss, energy input to production of food and carbon dioxide emissions. As the result, this study found that approximately 50 million [t-CO₂] carbon dioxide emissions in 2009. This is accounting for 4.5% of the total carbon dioxide emissions in Japan.

In the next, we investigated possibility of the food supply-demand system which reduce environmental load and meet the quantity of nutritive substances which need to intake each day. To estimate we used linear programming whose limiting condition were quantity of nutritive substances and objective function were minimization of environmental load. As the result, environmental load was minimized when the intake of Cereals, Potatoes, Beans, Meat and Dairy products increased, while Vegetables, Fruits and Seafood reduced. When all Japanese people realize this diet system, the reduction of carbon dioxide must be 5 million [t-CO₂] per year in approximately.