

# 環境配慮型食材流通サプライチェーンにおける数理モデルの貢献

## Contribution of mathematical model for food supply chain considering environmental load

蓮池隆<sup>\*1</sup>

Takashi Hasuike

加島智子<sup>\*2</sup>

Tomoko Kashima

松本慎平<sup>\*3</sup>

Shimpei Matsumoto

<sup>\*1</sup> 大阪大学

Osaka University

<sup>\*2</sup> 近畿大学

Kinki University

<sup>\*3</sup> 広島工業大学

Hiroshima Institute of Technology

This paper proposes a mathematical model for food supply chain considering the environmental load, particularly garbage disposal, under several uncertainties of crop productions and demands. Our proposed model is formulated as a stochastic programming problem, and hence, it is hard to solve the formulated problem directly. Therefore, a scenario-based approach and deterministic equivalent transformations are introduced, and the exact and heuristic algorithms are developed.

### 1. はじめに

食材の生産から消費まで流通過程のサプライチェーンを、環境負荷低減、特に食材廃棄低減の観点から、また各流通段階での需要・供給量調整の観点から大局的に考察することは非常に重要である。著者らはこれまでに、食料産業に携わる各事業者の経営を支援するため、資源循環効率に着目し、(1)店舗間及び店舗と顧客間の情報共有による経営合理化・サービス向上を目指したシステム開発、および(2)生産現場である農家と小売店を含めたシステム開発し、食材ロスの削減を可能とする生産・流通・消費の情報共有システムの構築を進めている[加島2013]。これらは主に必要な情報収集がメインとなるため、上記の観点を客観的かつ合理的に考察するためには、数理モデルを構築することは必要不可欠であるため、本研究では食材流通全体のサプライチェーンの数理モデルに着目し、数理モデルが成し得る食材流通分野での貢献を検証する。

### 2. 本モデルで想定する食材流通過程

本研究では、特に飲食店における食材廃棄量最小化に焦点を当てる。地産地消を考慮し、食材は契約農家から仕入れることを想定する。また食材の種類は1種類のみに着目する。複数種になった場合においても、本研究と同様の議論は可能である。農家側からの食材生産量について、以下の仮定を設ける。

- 現在における出荷量の上限值は既知であり、またその日のうちに出荷したい下限値も存在する。ただし、下限値がない農家は下限値を0と設定する。

また飲食店や食材購入を一括に引き受ける小売店、および廃棄量削減に効果のある飲食店間での食材融通に関して、次の仮定を設ける。

- 各飲食店は、各農家から食材を一括購入する1つの小売店から食材を購入する。
- 飲食店はランチタイムから開店しており、夜のディナータイムまで営業している。つまり、需要の異なる2つの時間帯が存在する。
- 飲食店に渡った食材で、その日に使われず、また食材融通もなかったものは、全て廃棄処分とする。ただし、小売店に売れ残った食材は保管費用をかけて保存することができる。

- 情報共有システムの有効活用、つまり情報共有システムに参加するかしないかにより、食材廃棄量に差が出るのか、また飲食店や小売店で目標利益を確保することはできるのかを検証するため、情報共有システムに参加している飲食店間での食材共有は可能であるが、その分システムへの参加費が必要となる。

- 食材の融通は簡単のため、上記で仮定した2つの時間帯のはざまの時間帯のみ可能とする。

また消費者の需要は飲食店ごとに設定されるとし、その値は不確実性を有する、つまり確率変数で表現されると仮定する。さらに、消費者の需要も上記の2つの時間帯での前後で異なることと仮定する。

これらの状況を考慮した上で、数理計画問題で用いるパラメータを以下のように設定する。

(食材提供を行う契約農家)

$m$  : 食材適用を行う農家の総数

$S_i^{\max}$  : 農家  $i$  から最大出荷可能量

$S_i^{\min}$  : 農家  $i$  が要望する最低出荷量

$\bar{C}_i$  : 農家  $i$  との契約金額

(食材を一括購入し飲食店へ売る小売店)

$c$  : 各飲食店への1単位量あたりの食材販売価格(各店共通)

$h$  : 売れ残り食材に関する1単位量あたりの保管費用

$R_0$  : 小売店における目標売上額

$v_i$  : 農家  $i$  から購入する食材購入量(決定変数)

(飲食店)

$n$  : 飲食店の総数

$r_j$  : 飲食店  $j$  における食材1単位量あたりの売上

$s_j$  : 飲食店  $j$  における食材1単位量あたりの品切れ費用

$w$  : 売れ残り食材に関する廃棄費用(各飲食店共通)

$R_j$  : 飲食店  $j$  における目標売上額

$x_j$  : 飲食店  $j$  における小売店からの食材購入量(決定変数)

連絡先: 蓮池隆, 大阪大学大学院情報科学研究科, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, Tel: 06-6878-7872, Fax: 06-6879-7872, e-mail: thasuike@ist.osaka-u.ac.jp

$y_{kj}$ : 飲食店  $k$  から飲食店  $j$  が受取った食材融通量(決定変数,

$y_{kj} > 0$  なら  $j$  が受取り,  $y_{kj} < 0$  なら  $j$  が供給)

(消費者)

$D_{1j}$ : ある一定時刻までの飲食店  $j$  における消費者需要(確率変数)

$D_{2j}$ : ある一定時刻以降の飲食店  $j$  における消費者需要(確率変数). 本論文では簡単のため,  $D_{2j} = \alpha_j D_{1j}$  (ただし,  $\alpha_j$  は飲食店固有の値で固定値)と設定する.

$D_j$ : ある日の総需要.  $D_j = D_{1j} + D_{2j} = (1 + \alpha_j) D_{1j}$

(情報共有システム特有のパラメータ)

$CG_j$ : 各飲食店におけるシステムへの参加費用

$\gamma_j$ : システムに参加している飲食店  $j$  の食材廃棄負担率. この割合は  $CG_j$  の額により決定. 本研究では簡単のため,  $\gamma_j = 1 - \delta CG_j$ , ( $CG_j \leq 1/\delta$ ) とする.

### 3. 提案食材流通モデルの定式化と解法・数理モデルからの貢献

#### 3.1 食材流通モデルの確率最適化問題としての定式化

2章で設定した状況やパラメータ設定を基に, 食材流通モデルの最適化問題を確率最適化問題として構築していく. 目的関数は, 環境負荷の最小化が目的であるため, 各飲食店における食材廃棄量の総和であり, 食材廃棄量は食材購入量や食材融通量と消費者需要との差であることから, 次のように定式化される.

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n [(x_j + y_{kj}) - D_j]^+ \quad (1)$$

ここで,  $[z]^+ = \max\{z, 0\}$  である.

制約条件として, 小売店および各飲食店での目標売上額に関する制約が次のように与えられる.

(小売店)

$$\sum_{j=1}^n cx_j - \sum_{i=1}^m \bar{C}_i - h \left[ \sum_{i=1}^m v_i - \sum_{j=1}^n x_j \right]^+ \geq R_0 \quad (2)$$

(飲食店  $j$ , ( $j=1, 2, \dots, n$ ))

$$\begin{aligned} & r_j x_j - cx_j \\ & - s_j \sum_{k=1}^n \left[ [D_{1j} - x_j]^+ + [D_{2j} - ([x_j - D_{1j}]^+ + y_{kj})]^+ \right] \\ & - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (1 - \delta CG_j) w [(x_j + y_{kj}) - D_j]^+ - CG_j \geq R_j \end{aligned} \quad (3)$$

目的関数(1)や制約条件(3)の中で食材融通を考慮しているが, 食材融通量の限度を考慮した次の制約条件が設定される.

$$\sum_{k=1}^n y_{kj} \leq [x_j - D_{1j}]^+, \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

最後に各農家からの購入限度量制約と決定変数の非負制約が

$$\begin{aligned} S_i^{\min} \leq v_i \leq S_i^{\max}, \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ v_i, x_j, y_{kj} \geq 0, \quad (i=1, 2, \dots, m; j, k=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (5)$$

と導入され, これら制約条件(2)~(5)のもとで, 目的関数(1)の最適化を行う確率最適化問題が構築される.

この最適化問題において, 目的関数や制約条件に確率変数  $D_j$  が存在するため, 数理計画法の枠組みでは, 何らかの最適性基準を設定する必要がある. 本論文では最も基本的な期待値を確率変数が含まれている目的関数および制約条件に導入する.

#### 3.2 確率シミュレーションによるシナリオを用いた解法

確率変数  $D_j$  に対して, 様々な確率分布で対応できるように, またデータが蓄積されていけばそれをうまく有効活用できような解法を構築するため, 本研究では, 確率シミュレーションによるシナリオを用いた解法を利用する. データや情報が少ない場合は, 確率乱数を利用することになるが, データが蓄積されれば, シナリオを蓄積データとみなして, 下記手法を用いることが可能である. 本研究では, 確率変数  $D_j$  に対して下記のように, 生起確率でシナリオを  $S$  個の生成想定する.

$$\begin{aligned} D_j \rightarrow d_s = \{d_{s1}, d_{s2}, \dots, d_{sn}\} \\ \Pr\{D_j = d_s\} = p_s, \quad \sum_{s=1}^S p_s = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

このシナリオを用いることで, 目的関数の期待値は,

$$\sum_{s=1}^S p_s \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n [(x_j + y_{kj}) - d_{sj}]^+ \quad (7)$$

と表現できる. さらに目的関数内の  $\max$  関数  $[z]^+$  についても, 次のように新たな変数  $\xi_{skj}$  を導入することで, 最適性を失うことなく, 等価変換することが可能である.

$$[(x_j + y_{kj}) - d_{sj}]^+ = \begin{cases} \xi_{skj} \geq (x_j + y_{kj}) - d_{sj} \\ \xi_{skj} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

以上の期待値導入, および  $\max$  関数の変換を全ての確率変数および  $\max$  関数に操作することで, 主問題は線形計画問題として変換できることが示される.

変換後の問題は主問題と比較して, 決定変数や制約条件の数は増加しているものの, 線形計画問題であることから, 多少大規模となっても解くことが可能である. またシステム参加料も決定変数とした場合, 決定変数の双線形項が含まれるが, これも適切な上下限値設定することで, 線形不等式制約へと等価変換することが可能である. さらに利益最大化等を目的に加えた多目的計画問題を考慮した場合, ソフトコンピューティング手法などを利用して農家, 小売店, 飲食店の双方が満足できる解の導出が可能となる. このように本モデルをベースとして状況に合わせた様々な拡張モデルを構築することが可能になる.

#### 参考文献

[加島 2013] 加島智子, 松本慎平, 蓮池隆, 松井孝典, "食料産業における適切な食材管理を目指した生産・流通・消費の情報共有システム", 人工知能学会誌, 28(4), pp. 567-574, 2013.