

地域の食料品店による 災害時の食料提供の可能性に関する基礎的分析

横松 宗太¹・小谷 仁務²・伊藤 秀行³

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: yoko@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

²正会員 東京大学助教 大学院 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)
E-mail: hitomu.kotani@edu.k.u-tokyo.ac.jp

³正会員 株式会社ピーアイ物流企画 (〒 480-0103 愛知県丹羽郡扶桑町大字柏森字天神 287-2)
E-mail: pi0001@h3.dion.ne.jp

本研究では、地域コミュニティに立地するスーパーマーケット等の食料品店が災害時に地域住民に食料を提供する可能性を分析するための基礎モデルを示す。地域住民は食料品店のランニングストックを備蓄とすることによって、自宅における個人備蓄を減らすことができる。食料品店にとっては、地元住民がより頻繁に利用するようになれば日常的な利益が増加する可能性がある。本研究では在庫不足と災害到着によって営業が停止する random stopping time モデルを定式化し、地域の食料品店における共同備蓄の議論の基礎を提供することを目的とする。

Key Words: Disaster, relief goods, grocery, probability model

1. はじめに

本研究では、地域に立地する食料品店が、災害時において、売り場に並べられた食料品や在庫ストックを救援の食料として地域住民に提供する方策を提案する。地域住民は食料品店のランニングストックを備蓄とすることによって、自宅における備蓄の量を減らすことができる。しかしながら、そのような計画を実行するためには、民間企業である食料品店にもメリットがなければならぬ。なぜならば、災害時には帰宅途中の人々を始め、多くの人々が店に飲み物や食べ物を買いに来る。むしろ平常時よりも集中的な需要が生まれることも予想される。店の食料品を地域住民に無償で提供することは、客からの収益を犠牲にすることを伴うからである。

近年、企業の社会的責任 (corporate social responsibility) に関する議論が盛んになっている。また、地域貢献によって地元から高い評判を得ることは、長期的な give-and-take を通じて店もリターンを得ることになり、功利的な意味でも合理的な戦略となり得る。その一方で、多くの個人商店や中小規模のスーパーマーケットは、より短期的な視野によって倒産のリスクに対応している。よって、本計画が短期的にも食料品店を利用する可能性が示されれば、計画の実行可能性は高まることになろう。本研究では、住民が日常的に、より頻繁に地元食料品店を利用するようになれば、店の取引

規模全体が増大することによって平常時の店の利益が増える、入荷量やストック量が増大することによって、災害時に住民に提供される食料も増える、という直観的シナリオを示すとともに、その可能性をモデル分析によって検証することを目的とする。

災害に備えるために、常時 3 日分の食料をストックする必要性が唱えられている。広域で甚大な被害をもたらす南海トラフ巨大地震に対しては 1 週間以上の備蓄が望ましいとの指摘もある。十分な備蓄や救援物資ロジスティクスを実践するためのアイデアも多様に示されている。本研究では、これまで住民と自治体、政府の間の協同や連携と較べると検討が手薄であった、企業主体と住民のコーディネーションによる備蓄の形態を議論するための基礎モデルを提供する。

2. モデル

(1) 客の到着と災害の発生

ある地域で営業する食料品店について考える。食料品店は、スーパーでも個人商店でもよいし、八百屋や肉屋などを含んだ、ひとつの商店街を構成する商店の集合でもよい。以下、簡単化のため「店」と表記する。店において、商品を入荷する時間間隔を T とする。時点 $t = 0$ において商品を入荷し、時点 $t = T$ に次の入荷が行われるものとする。また、一度に入荷する食料品の量を Q とする。時点 t における店の食料品ストッ

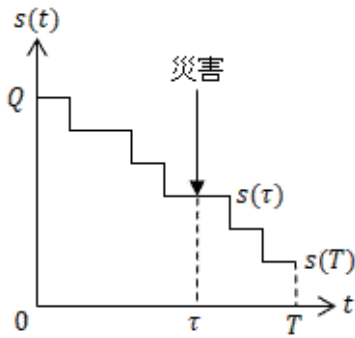


図-1 客の到着と食料品ストック, 災害の発生

クを $s(t)$ により表す．なお本モデルでは 1 種類の財としてモデル化し，商品の多様性については考えない．

一方，買い物客は到着率 λ のポアソン過程に従って到着するものとする．時点 t までに到着して買い物をした客の数を $n(t)$ により表す．また，全ての客が同じだけの量の食料品を購入すると仮定し，一人当たりの購入量を 1 単位に基準化する．個々の客の購入量を確率変数として扱うことは今後の課題とする．したがって時点 t までに売れた食料品の量は，購入した客の人数 $n(t)$ に一致する．食料品ストックと客数の間に以下の関係が成立する．

$$s(t) = Q - n(t) \quad (1)$$

店は時点 $t = 0$ に Q 人分の商品を入荷する．その後 Q 人が来店し， $s(t) = 0$ となったところで在庫切れとなる．なお本モデルでは，時点 T 以前に Q 人目の客が食料品を購入した状況を「在庫切れ」， $Q + 1$ 人目の客が店に到着した状況を「在庫不足」と呼ぶこととする．次節で述べるように，「在庫不足」に陥ると，店に負のインパクトが与えられる．

期間 $(0, T]$ における災害の到着をハザードモデルによって表現する． $\Psi(t)$ を時点 t までに災害が到着する確率とすると，時点 t までに災害が到着せずに微小時間間隔 $(t, t + dt]$ に災害が発生する確率は次式で与えられる．

$$\mu dt = \frac{\psi(t) dt}{1 - \Psi(t)} \quad \text{where } \psi(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (2)$$

$\psi(t)$ は $\Psi(t)$ の密度関数である．以下の関係が従う．

$$1 - \Psi(t) = e^{-\mu t} \quad (3)$$

上式は時点 t までに災害が発生しない確率を表す．

(2) 店の期待利益

店が商品を入荷してから次に入荷するまでの期間を 1 つのサイクルと考える．サイクルは終わり方によって，以下の 3 つの事象に分類される．

事象 N (Normal)：時点 0 から時点 T までに在庫不足も災害も発生しない．

事象 L (Lack of stock)：期間 $(0, T]$ のある時点 τ に在庫不足が発生してサイクルが終了する．それまでに災害は起こらない．営業時間にも関わらず在庫不足によって販売が終了することは評判の低下を招く．よって評判回復のための努力など，追加的な費用 B を要することになる．

事象 D (Disaster)：期間 $(0, T]$ のある時点 τ に災害が発生してサイクルが終了する．それまでに在庫不足は起こらない．災害発生時点で残っている食料品ストック $s(\tau)$ は，地域住民の避難所の食料として提供される．

確率空間全体を Ω により表すと，事象 N, L, D は以下の関係を満たす．

$$N \cap L = L \cap D = D \cap N = \phi \quad (4a)$$

$$N \cup L \cup D = \Omega \quad (4b)$$

ただし ϕ は空集合を表す．

各事象に関する店の期待利益を W_j ($j = N, L, D$) により表す．事象 N の期待利益 W_N は以下のように構成される．

$$W_N = \Pr\{\delta(T) = 0\} \cdot \sum_{n(T)=0}^Q \frac{(\lambda T)^{n(T)}}{n(T)!} e^{-\lambda T} \cdot V_N(n(T)) \quad (5a)$$

where

$$\Pr\{\delta(T) = 0\} = 1 - \Psi(T) = e^{-\mu T} \quad (5b)$$

$$V_N(n(T)) = n(T) + \varepsilon s(T) = n(T) + \varepsilon(Q - n(T)) \quad (5c)$$

ただし $\Pr\{\cdot\}$ は確率を表す． $\{\delta(t), t \geq 0\}$ は災害の計数過程であり， $\delta(t) = 0$ は時点 t までに災害が発生していないことを， $\delta(t) = 1$ はそれまでに災害が発生していることを意味する．また， $V_N(n(T))$ はあるサイクルにおいて $n(T)$ の量が売れたときの店の利益を表す．1 単位あたりの食料品の価格を 1 に基準化する．一方，時点 T で残った食料品ストック $s(T)$ は $\varepsilon (< 1)$ の価格によってある特定の業者買い取られるものと仮定する．次のサイクルで売ることができると考えてもよいが，その場合も，鮮度が下がるため，価格 ε は 1 よりも小さくなる．

事象 L の期待利益 W_L は次式のように表される．

$$W_L = \int_0^T \Pr\{\delta(\tau) = 0\} \cdot \Pr\{s(\tau) = 0\} \cdot \Pr\{dn(\tau) = 1\} \cdot V_L d\tau \quad (6)$$

すなわち時点 τ で在庫不足によって閉店するケースを， τ に関して積分している．積分の中の 3 つの確率の積は，時点 τ までに災害が発生せずに，時点 τ の期初の時点で在庫切れの状態であり，その期に客が到着して

在庫不足が発生する確率を表している． V_L は事象 L で得られる利益を表す．各項は以下のように与えられる．

$$\Pr\{\delta(\tau) = 0\} = e^{-\mu\tau} \quad (7a)$$

$$\Pr\{s(\tau) = 0\} = \Pr\{n(\tau) = Q\} = \frac{(\lambda\tau)^Q}{Q!} e^{-\lambda\tau} \quad (7b)$$

$$\Pr\{dn(\tau) = 1\} = \lambda d\tau \quad (7c)$$

$$V_L = Q - B \quad (7d)$$

式 (6) は以下のように整理される．

$$W_L = \frac{\lambda^{Q+1}(Q-B)}{Q!} \int_0^T \tau^Q e^{-(\lambda+\mu)\tau} d\tau \quad (8)$$

そして事象 D の期待利益 W_D は次式のように表される．

$$W_D = \int_0^T \Pr\{\delta(\tau) = 0\} \cdot \Pr\{d\delta(\tau) = 1\} \left[\sum_{n(\tau)=0}^Q \frac{(\lambda\tau)^{n(\tau)}}{n(\tau)!} e^{-\lambda\tau} \cdot V_D(n(\tau)) \right] d\tau \quad (9a)$$

where

$$\Pr\{d\delta(\tau) = 1\} = \mu d\tau \quad (9b)$$

$$V_D(n(\tau)) = n(\tau) \quad (9c)$$

$\Pr\{\delta(\tau) = 0\}$ は式 (7a) に等しい． $V_D(n(\tau))$ は事象 D で得られる利益であり， $n(\tau)$ が確率変数であるため確率変数である．

店の期待利益は以下のように表される．

$$EW = W_N + W_L + W_D - p_0 Q \quad (10)$$

p_0 は卸売価格であり， $p_0 Q$ は入荷費用に相当する．

(3) 災害時のストックの期待値

災害時に店に存在する食料品の量について，事象 D に関する条件付き期待値は以下のように表される．

$$E[s(\tau)|D] = \frac{1}{P(D)} \int_0^T \Pr\{\delta(\tau) = 0\} \cdot \Pr\{d\delta(\tau) = 1\} \cdot \left[\sum_{n(\tau)=0}^Q \frac{(\lambda\tau)^{n(\tau)}}{n(\tau)!} e^{-\lambda\tau} \cdot s(\tau) \right] d\tau \quad (11a)$$

where

$$P(D) = \int_0^T \Pr\{\delta(\tau) = 0\} \cdot \Pr\{s(\tau) \geq 0\} \cdot \Pr\{d\delta(\tau) = 1\} d\tau \quad (11b)$$

$$s(\tau) = Q - n(\tau) \quad (11c)$$

$$\begin{aligned} \Pr\{s(\tau) \geq 0\} &= \Pr\{n(\tau) \leq Q\} \\ &= \sum_{n(\tau)=0}^Q \frac{(\lambda\tau)^{n(\tau)}}{n(\tau)!} e^{-\lambda\tau} \end{aligned} \quad (11d)$$

$\Pr\{\delta(\tau) = 0\}$ と $\Pr\{d\delta(\tau) = 1\}$ はそれぞれ式 (7a)，(9b) により与えられる．

(4) 住民による備蓄と支出

地域住民の人数を 1 に基準化する．単位時間あたりの店の利用頻度は λ である．一方，住民は地域の外の大型ショッピングセンターにも $\tilde{\lambda}$ の頻度で買い物に出かける．大型ショッピングセンターの方が価格が安く，1 単位当たり $\omega (< 1)$ であるものとする．また住民は自身で h の量の食料備蓄を行う．住民の単位時間あたりの消費水準 u と支出 Γ は以下のように表される．

$$u = \lambda + \tilde{\lambda} \quad (12a)$$

$$\Gamma = \lambda + \omega \tilde{\lambda} + \frac{\omega h}{\theta} \quad (12b)$$

ただし θ は食料備蓄が耐久する時間の長さを表す． θ を越えると買い換える必要がある．また，個人は備蓄用食料を大型ショッピングセンターで購入するものと仮定する．個人備蓄量 h は以下のように決まる．

$$h = H - E[s(\tau)|D] \quad (13)$$

H は災害後の 3 日間を生存するための食料の量を表している．本方策の導入によって，各個人は $E[s(\tau)|D]$ の量の食料を食料品店にて得ることを期待することができる．よってその分を差し引いた残りの必要量を個人で備蓄しておけばよい．また，消費水準 u の達成が与件であるとき，大型ショッピングセンターにおける買い物の頻度 $\tilde{\lambda}$ は λ の水準に依存する．

$$\tilde{\lambda}(\lambda) = u - \lambda \quad (14)$$

3. 誘因整合性条件

店が災害時の食料提供に合意するためには，その仕組みの導入によって期待利益が増加する必要がある．一方，住民にとっては，日常的にある一定の消費水準を実現するための支出が減少する必要がある．いま，店は入荷量 Q を決定し，住民は店の利用頻度 λ を決定する．店と住民の間にこの災害時食料協定が成立するためには，両者の誘因が整合的である必要がある．すなわち以下の 2 つの不等式を満たす (Q^*, λ^*) が存在しなければならない．

$$EW(Q^*, \lambda^*) \geq EW_0(Q_0, \lambda_0) \quad (15a)$$

$$\Gamma(Q^*, \lambda^*) \leq \Gamma_0(Q_0, \lambda_0) \quad (15b)$$

ただし $EW_0(Q_0, \lambda_0)$ と $\Gamma_0(Q_0, \lambda_0)$ はそれぞれ協定が存在しないときの店の期待利益と住民一人の支出を表す．協定が存在しないとき，店は災害が発生してもサイクルが停止しない．すなわち事象 D は起こらない．そのときの期待利益 EW_0 は，2.(2) に示すモデルの，災害に関連する項に $\mu = 0$ を代入することによって得られる．また，個人の支出 Γ_0 は，式 (12b) に $h = H$ を代入することによって与えられる．

4. おわりに

地域住民は、より頻繁に地域の食料品店で買い物をすることによって、個人備蓄を減らすことができる。食料品店は、増加した客の需要を賄うために入荷を増やし、日常的な利益を増やすことができる。本研究はこのような直観を理論的に検証することを目的としている。

このような仕組みは、食料品店が、防災性能が高い商店街アーケードの中にあり、住民が商店街アーケードの中のオープンスペースを避難所として利用することができるときに、より魅力を増す。あたかも避難所の中に食料備蓄倉庫があり、住民はオンサイト (on-site) の食料備蓄を得られるような環境となるからである。

今後は、まずは数値計算によって、ある (Q_0, λ_0) に対して、誘因整合性条件 (15a)(15b) を満たす (Q^*, λ^*) の存在を確認し、その範囲を求める。結果は発表時に報告する。

参考文献

- 1) Murthy, D. N. P., and D. G. Nguyen: Study of a Multi-component System with Failure Interaction, European Journal of Operational Research, Vol.21, No.3, pp.330-338, 1985
- 2) Ross, S.M.:Introduction to Probability Models, Eleventh Edition, Academic Press, 2014
- 3) Satow, T., and S. Osaki : Optimal Replacement Policies for a Two-unit System with Shock Damage Interaction, Computers & Mathematics with Applications, Vo.46, No.7, pp.1129-1138, 2003
- 4) Yokomatsu, M., T. Kajihara, H. Ito, and W. Wisetjindawat: Risk-diversified Allocation for Storing of Disaster Relief Goods by Stockpile Sharing Strategy: A Case Study in Japan, the Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 9-12, Hong Kong, pp.598-605, 2015.