

# 円滑な都市内物流を支えるインフラの価値

## - 買い物利便性と在庫管理の視点から

瀬木 俊輔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒 657-0013 神戸市灘区六甲台町 1)  
E-mail: segi@people.kobe-u.ac.jp

本稿は、消費者の買い物利便性と企業の在庫管理という視点から、円滑な都市内物流を支えるインフラの価値について議論する。まず、在庫管理という視点から、都市内物流を支えるインフラが、小売企業の施設配置戦略や、消費者の利便性と密接な関係を持つことを説明する。そのうえで、インフラ整備による都市内物流の円滑化は、都市近郊への物流センターの立地を促す効果や、都市内の商店数を増やし、消費者の買い物利便性を改善する効果を持つことを議論する。

*Key Words : logistics, inventory management, location of stores and distribution centers, shopping*

### 1. はじめに

買い物は、消費者の生活に不可欠の活動である。それゆえ、消費者は買物の利便性に対して高い関心を持っている。小売企業は、こうした消費者のニーズをつかむために、様々な流通チャネルを整備してきた。コンビニエンスストアなどの小規模なチェーン店を都市内に多数立地させることにより、消費者が居住地の近隣で買い物を行うことを可能にするような流通チャネルは、その一例である。近年では、ネット通販などの、消費者が外出することなく、買い物を行えるような流通チャネルも大きく成長している。

こうした様々な流通チャネルが成立するためには、円滑な都市内物流を支える交通インフラが不可欠であることは、論を俟たない。都市内物流を円滑化することにより、輸送費が減り、消費者は安く商品を購入することが可能となる。ただし、都市内物流の円滑化の効能は、輸送費の低減に限られない。都市内物流の円滑化は、都市近郊における、新たな物流センターの立地を促す可能性がある。このような物流センターの立地は、都市内に存在する商店の立地数を増やす効果や、消費者の買い物利便性を向上させる効能を有すると考えられる。本稿は、このような観点から、道路などの都市内物流を支えるインフラの価値について議論する。

本稿の議論において中心的な役割を果たすのは、消費者の買い物利便性と企業の在庫管理という視点である。消費者の買い物利便性を高めるためには、消費者の居住地の近隣に商店を配置するとともに、商品の在庫切れが生じないように在庫管理を行う必要がある。こ

れらの目標を達成するために、現代のスーパーやコンビニなどのフランチャイズ小売企業の多くは、物流センターを都市近郊に配置し、そこから都市内の商店へと商品を配送する戦略を採用している。この戦略の利点は、商品の売れ残りというリスクを伴う、在庫管理という活動を、物流センターが商店に代わり引き受けることにある。これにより、商店の在庫管理の負担が軽減されるため、小規模な商店でも運営が可能となる。同時に、物流センターは、商品の売れ残りのリスクを集約することにより平準化し、効率的な運営を行うことができる。ただし、このような戦略は、物流センターと商店間の物流が円滑であることに、決定的に依存している。なぜなら、商品の配送に時間がかかると、商品が商店に配送されるまでの間に、商品の在庫切れが生じる可能性が高くなるからである。このように、企業の在庫管理という視点を導入すると、円滑な都市内物流を支えるインフラが、小売企業の施設配置戦略や、消費者の利便性と密接な関係を持つことが見えるようになる。

以下、本稿は下記のように議論を進める。2. では、商店や物流施設の配置に関する既存の研究を整理するとともに、本稿の着眼点との差異について述べる。3. では、消費者の買い物利便性の向上のために、企業の在庫管理が重要な役割を持つことを議論する。さらに、在庫管理に関する数理モデルを取り上げ、在庫管理という活動が有する性質を議論する。4. では、在庫管理を考慮したうえで、都市内における物流センターと商店の配置に関する理論的な分析を行う数理モデルを取り上げるとともに、モデルの分析結果を整理する。5.

では、分析結果を踏まえ、円滑な都市内物流を支えるインフラの価値について、消費者の買い物利便性の観点から議論する。

## 2. 周辺の研究の整理

商店の立地パターンについては、Hotelling<sup>1)</sup>の先駆的研究以来、都市経済学の分野で理論的研究が蓄積してきた。Hotelling<sup>1)</sup>は、広い商圈を獲得するように戦略的に立地を決定する商店間の競争を分析した。Eaton and Lipsey<sup>2)</sup>とWolinsky<sup>3)</sup>は、商業施設の集積現象を分析した。Eaton and Lipseyは、消費者が一つの商店で二種類の商品を購入すれば、買い物費用を節約できる状況が想定している。このとき、二種類の商品を扱う商店と、一種類の商品のみを扱う商店の、二つのタイプが空間上に分布することが示されている。Wolinskyは、消費者が各商店で扱われている商品の特性について、事前に十分な情報を持っておらず、複数の商店を訪れて商品の特性を比較したうえで、購入する商品を決定する状況を想定している。このとき、消費者は近隣に単独で存在する商店よりも、遠方の商業集積地に最初に向かうことが示されている。その結果、商店には、商業集積地に立地する誘引が働く。これらの研究は、消費者の買い物利便性を考慮して分析を行っているが、商店が商品を仕入れる際の物流は考慮していない。

交通工学やORの分野においては、交通ネットワークや、商店の立地点などに関する諸条件を考慮して、物流センターなどの施設の配置を最適化する施設配置問題(Facility Location Problem)の研究が蓄積してきた<sup>4)</sup>。谷口ら<sup>5)</sup>は施設配置問題を応用し、道路ネットワークの混雑状況を考慮して、物流ターミナルの配置と規模を最適化するモデルを開発している。施設配置問題においては一般に、商店の立地点や商品の需要が外生的に与えられており、消費者側の買い物利便性は考慮されていないことが多い。

以上で整理したように、消費者の買い物利便性と、商品を仕入れる際の物流の双方を考慮して、商店の立地パターンを分析した研究は、少ないのが実情である。また、消費者の買い物利便性と密接な関係を持つ、在庫管理という視点を導入した研究は、ほとんど見当たらない。Teo and Shu<sup>6)</sup>とRomeijn et al.<sup>7)</sup>は、在庫管理を考慮して施設配置問題を分析している数少ない研究である。これらの研究は、物流センターが、下流の商店の在庫管理の負担を軽減する機能を表現しているため、本稿の議論と問題意識を共有している。ただし、これらの研究では、消費者の買い物利便性を考慮しておらず、また、交通インフラの整備が最適な施設配置に与える影響という視点からは、分析を行っていない。本

稿の着眼点の独自性は、消費者の買い物利便性と、企業の在庫管理という視点から、円滑な都市内物流を支えるインフラと、小売企業の施設配置戦略の関係を議論する点にある。

## 3. 買い物利便性と在庫管理

### (1) 消費者の買い物利便性

消費者の買い物利便性としては、1) 買い物交通費用が低いこと、2) 早く商品を手入手できること、の二つが考えられる。一般に、買い物利便性としては前者が考えられることが多いが、後者も重要な利便性である。ネット通販などの宅配サービスにおいては、追加料金を払うことにより、消費者への商品の配送を早めることができる。このようなサービスの存在は、早く商品を手入手することに対して、消費者が支払い意思額を持つことを示している。もちろん、買い物交通費用の低下は、消費者の利便性向上にとって最も重要な要素であると考えられる。ただし、後者は注目されることが少ないため、本節では二つ目の利便性について議論を行い、その性質について考察する。

早く商品を手入手できることを消費者が望むとき、その商品は、以下に挙げる二つの性質を有していると考えられる。第一の性質は、消費者が商品の入手や使用を望むタイミングに、不確実性が存在することである。例えば、商品の広告を見て購買意欲が刺激され、その商品の使用を望むようになった消費者がいるとしよう。このとき、この消費者は、自分がその商品の使用を望むようになることを、事前に知ることができない。冷蔵庫などの家電製品が急に壊れ、新しい家電製品の使用を望むようになった消費者についても、同様のことが言える。さらに、食品のように、日常的に購入するような商品についても、程度の差はあるものの、同様のことが言えると考えられる。消費者は、そのときの気分や状況に応じて、摂取する食事のメニューを変更することが一般的であり、数日先に自身が望むメニューを予測することは困難である。

第二の性質は、商品を手元に保管しておくことが困難なことである。例えば、現在使用している冷蔵庫が故障することに備えて、予備の新品の冷蔵庫を自宅に保管しているような消費者は、一般的ではない。また、数日後の自分が、どのような食事のメニューを望んでも対応できるように、あらゆる食品を自宅に保管しているような消費者も、一般的ではない。以上で挙げた商品は、手元に保管しておくことが困難な商品の代表例である。こうした商品が持つ特徴は、冷蔵庫のように、広い保管場所を必要とすること、もしくは、食品のように、時間の経過に伴い、その使用価値が急速に

劣化することである。

以上で取りあげた、二つの性質を有する商品については、消費者は、商品の使用を望むようになった後の時点において、商品の買い物を行わざるを得ない。商品が入手できるまでの間、消費者は、その商品を利用した活動を行えないため、不満を覚えることになる。この状態を早く解消するために、消費者は早く商品を手に入ることを望む。一方、二つの理由が成立しない商品については、早く商品を手に入りたいという要求は生じにくい。例えば、買い置きが容易な商品は、第二の性質が成立しない。このような商品については、消費者は、自宅の商品のストックが尽きないように、余裕をもって商品を購入しようとするため、早く商品が入手できなくても特に問題は生じない。

## (2) 企業の在庫管理

消費者の買い物利便性を高めるためには、消費者の居住地の近隣に商店を配置するとともに、商品の在庫切れが生じないように、在庫管理を行うことが効果的である。消費者の居住地の近隣に商店が存在すれば、消費者の買い物交通費用が節約されるのと同時に、消費者が早く商品を手に入る環境を実現できる。ただし、この際に、商品の在庫切れが生じないことは重要である。消費者の来店時に、商品が品切れとなっている場合には、消費者は、商品が入荷するのを待ってから、再度、商店に出かけ直す必要があり、余計な交通費用を負担することになる。さらに、商品を手に入る時間も遅れてしまう。すなわち、商品の在庫切れは、消費者の買い物利便性を低下させる要因になる。

なお、消費者が商品の在庫切れに直面した際に行う行動は、商品の入荷を待つことに限られない<sup>8)</sup>。その他の行動としては、欲しかった商品と代替的な別の商品を購入する、別の商店を訪ねる、商品の購入自体を諦める、などが挙げられる。ただし、いずれの場合にせよ、消費者の満足度は低下し、消費者の商店に対する信頼は損なわれる。その結果として、その商店や、(商店がチェーン店である場合には) 系列の商店を利用する消費者の数は、将来的に減少することが予想される<sup>9)</sup>。そのため、商店は在庫切れを起こさないように在庫管理を行うことが求められる。

在庫切れを起こさないように在庫管理を行うことは、容易ではない。商品による程度の差はあれ、消費者が商品の使用を望むタイミングには不確実性が存在する。これは、商品の需要がランダムに変動し、日によっては、平均よりも高い需要が生じることもあることを意味する。商店は、このような需要の高まりに備えて、在庫切れを防ぐための在庫を保有しなければいけない。このような在庫を、安全在庫 (Safety Stock) と呼ぶ。し

かし、在庫を保有するには、在庫保有費用 (Inventory Holding Cost) と呼ばれる、様々な費用が必要となる<sup>10)</sup> ため、無制限に安全在庫を保有することはできない。代表的な在庫保有費用は、在庫の保管場所や保管設備を整備・運営する費用、商品の使用価値が時間経過に伴い減少する費用、在庫投資の資本費用である。二つ目の費用が大きい商品の例は、生鮮食品、季節性の衣料品やファストファッション、型落ちしやすい電子機器、などである。三つ目の費用は、商店が商品を仕入れるための短期資金を借り入れているとき、その商品を販売して早く現金化すれば、借入資金の利払いを抑えられることを意味している。

在庫保有費用の高い商品は、前節で述べた、消費者の手元に保管しておくことが困難な商品でもある。そのため、消費者は、このような商品を保有する量を最小限に抑え、商品が必要になってから購入を行うという行動を取ることが多い。このとき、消費者は、商品の在庫管理という困難な活動を、商店に代行させているということもできる。

## (3) 在庫管理モデル

在庫保有費用の高い商品を扱う小売企業においては、その商品の在庫管理を効率的に行うことが、経営戦略上の重要な課題となる。この課題に関する意思決定を支援するために、在庫管理モデル (Inventory Management Model) と呼ばれる数理モデルが、OR の分野において発展してきた。在庫管理モデルとして最も広く知られている基本的なモデルが EOQ (Economic Order Quantity) モデルと Safety Stock モデルである<sup>10)</sup>。これらのモデルは、交通に関係した研究分野においても、物流リードタイムの品質 (早さや信頼性) の評価に応用されてきた実績がある。Baumol and Vinod<sup>11)</sup> や Blauwens et al.<sup>12)</sup> は、在庫管理モデルを利用して、荷主の費用と物流リードタイムの関係を表現し、貨物輸送サービスや輸送機関の選択問題に応用している。de Jong and Ben-Akiva<sup>13)</sup> は、貨物の輸送経路の選択に在庫管理モデルを応用している。瀬木<sup>14)</sup> は貨物の時間価値の性質の分析に在庫管理モデルを応用している。ここでは、これらの二つのモデルに関する説明を行う。

まず、商店内の商品の在庫数の推移過程を、図-1 を用いて説明する。消費者が来店し商品を購入する度に、商店内の在庫数は減少していく。在庫数がある閾値 (Re-Order Point, ROP, 発注点) を下回ると、上流の施設 (物流センターや商品のサプライヤ) に商品の発注が行われる。この際の発注量 (ロットサイズ) を変数  $Q$  で表す。発注された商品がチェーン店に届くと、在庫数は  $Q$  だけ回復する。以上の過程が繰り返される。

チェーン店が商品の発注を行ってから、チェーン店に

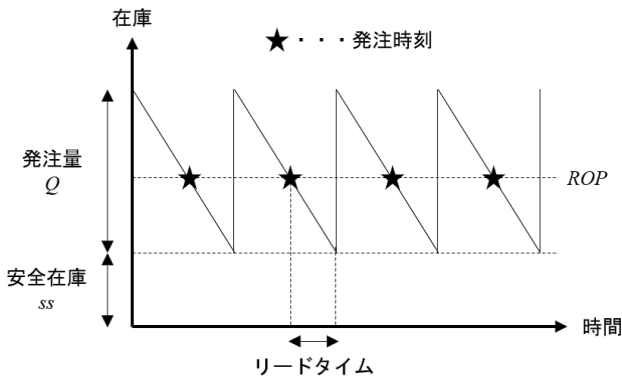


図-1 商店内の在庫推移（需要が一定の場合）

商品が届くまでの間にはタイムラグが存在する。このタイムラグをリードタイムと呼ぶ。このリードタイムの間に在庫切れが生じないように、チェーン店は余裕を持って商品の発注を行う必要がある。その結果、商品が届いた時点では、商店内には商品の在庫が残るケースが多い。商品が届いた時点において、商店内に残っている在庫数の期待値を、安全在庫と呼び、変数  $ss$  で表す。EOQ モデルは、ロットサイズ  $Q$  を最適化するモデルであり、Safety Stock モデルは安全在庫  $ss$  を決定するモデルである。

図-1 では説明の都合上、一定の間隔を置いて商品の発注が行われているようなグラフを示しているが、これは需要が偶然に一定で推移した、特殊なケースのものである。需要が変動する一般的なケースでは、発注間隔は不定期に変動することになる。このような発注方法は、定量発注方式と呼ばれている。この他の発注方式には、発注間隔を固定し、ロットサイズをその都度変更する、定期発注方式などがある。EOQ モデルは定量発注方式を前提としている。ただし、定期発注方式を採用する場合の発注間隔も、以下で説明するように、EOQ モデルと同様にして最適化を行うことができる。

EOQ モデルと Safety Stock モデルは、非常に単純化されたモデルであるため、現実に採用されることは少ないと考えられる。しかし、これらのモデルは、在庫管理という活動の基本的な性質を捉えているため、在庫管理に関する理論的な分析や議論を行うことには適している。

a) EOQ モデル

EOQ モデルによるロットサイズ  $Q$  の決定について述べる。商店における単位時間当たりの商品需要の期待値を  $D$ 、一回の発注にかかる固定費用（出庫・荷積・輸送・荷卸などの物流に関わる費用）を  $S$ 、単位時間当たりの商品一単位の在庫保有費用を  $h$  とする。ロットサイズが  $Q$  のとき、発注の頻度は単位時間当たり  $D/Q$  となる。したがって、単位時間当たりの発注費用は  $DS/Q$  と表される。図-1 から確認できるように、商店が保有

する在庫数の長期平均値は  $Q/2 + ss$  となる。したがって、単位時間当たりの在庫保有費用は  $hQ/2 + h \cdot ss$  となる。単位時間当たりの発注費用と在庫保有費用の和を求めると

$$\frac{DS}{Q} + \frac{hQ}{2} + h \cdot ss \tag{1}$$

となる。式 (1) を最小化するロットサイズ  $Q^*$  (EOQ) は

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{h}} \tag{2}$$

と表される。EOQ は商品の発注費用と在庫保有費用のバランスを取る効率的なロットサイズである。EOQ は在庫保有費用  $h$  について単調に減少する。すなわち、在庫保有費用が高い商品は、ロットサイズを減らしてこまめに発注を行い、店内の在庫回転率を上げることが効率的となる。 $Q^*$  を式 (1) に代入すると、商店が負担する単位時間当たりの発注費用と在庫保有費用の和は、

$$\sqrt{2hDS} + h \cdot ss \tag{3}$$

と表される。以下では、式 (3) のように表される費用を在庫管理費用と呼ぶ。

定期発注方式の場合、最適な発注間隔  $P^*$  は、式 (2) で定義された  $Q^*$  を用いると、 $P^* = Q^*/D$  と表される。このように、EOQ モデルは定期発注方式の分析にも使うことができる。

b) Safety Stock モデル

Safety Stock モデルによる、安全在庫  $ss$  の決定について述べる。商店は、在庫数が発注点 (ROP) を下回ると商品の発注を行う。この閾値を変数  $ROP$  で表す。商店が商品を発注してから、商店に商品が届くまでの時間（以下では、リードタイムと呼ぶ）を  $L$  とする。このリードタイムの間には、平均  $LD$  の需要が発生する。したがって、在庫が補充される直前における在庫数の期待値（安全在庫）は、近似的に次式で表せる。

$$ss = ROP - LD \tag{4}$$

リードタイムの間には、平均よりも大きい需要が発生する可能性がある。安全在庫は、このような事態においても消費者が品切れに遭遇することを防ぐために、保有される在庫である（図-1 参照）。

安全在庫を保有していても在庫切れは発生し得る。リードタイム中に在庫切れが発生しない確率は、リードタイム中に発生する需要が  $ROP$  を下回る確率に等しい。商店における商品需要の単位時間当たりの分散を  $\sigma_D^2$  とすれば、リードタイムの間に発生する需要の分散は  $L\sigma_D^2$  である。ここで、リードタイム内に発生する需要は、平均  $LD$ 、分散  $L\sigma_D^2$  の正規分布に従うものとして近似しよう。この近似を用いると、リードタイム中に在庫切れが発生しない確率は、

$$\Phi\left(\frac{ROP - LD}{\sqrt{L}\sigma_D}\right) = \Phi\left(\frac{ss}{\sqrt{L}\sigma_D}\right) \tag{5}$$

と表される。Φ は標準正規分布の累積分布関数である。商店は、この確率が外生的な目標値 α (95%など) に一致するように  $ss$  を決定する。このとき  $ss$  は、

$$ss = \sqrt{L}\sigma_D\Phi^{-1}(\alpha) \quad (6)$$

と表される。Φ<sup>-1</sup> は Φ の逆関数である。式 (6) は、リードタイム  $L$  が長い環境においては、商店の保有する安全在庫が増えることを意味している。そのため、リードタイムの短縮はチェーン店の費用負担を削減することができる。なお、本稿の議論では用いないが、Safety Stock モデルは、リードタイムに存在する不確実性も考慮できることを付記しておく。

以上では、在庫切れが発生しない確率の目標値 α を外生的な水準に設定したが、この水準を最適化するような在庫管理モデルも存在する<sup>15)</sup>。ある仮定の下では、α は以下のように表せることが知られている。

$$\alpha = \frac{b}{h+b} \quad (7)$$

ここで、 $b$  は、在庫切れが生じたために商品の入荷を待っている消費者がいる場合に、商品の入荷時間が遅れることによって生じる、単位時間当たり・商品一単位当たりのペナルティ費用を表す定数である。ペナルティ費用は、商店の視点では、消費者を待たせることにより生じる信用の毀損を表すものである。消費者の視点では、商品を利用した活動が行えないために生じる、不効用を表すものである。式 (7) は、 $b$  が高く  $h$  が低い商品ほど、α を大きくすべきであることを意味している。

定期発注方式の場合、 $ss$  は  $\sqrt{L+P^*}\sigma_D\Phi^{-1}(\alpha)$  と表される。ここで、 $P^*$  は発注間隔である。定期発注方式の場合には、リードタイム中に発生する需要のみならず、次の発注時刻までに発生する需要の不確実性も考慮しなければいけないため、定量発注方式と比較して安全在庫が増えることになる。

#### (4) 在庫管理が有する性質

式 (3) と式 (6) より、在庫管理という活動が有する、二つの基本的な性質を確認できる。第一の性質は、在庫管理には、規模の経済性が存在することである。式 (3) で表される在庫管理費用を、需要  $D$  で割り、商品一単位当たりの平均費用を求めると、

$$\sqrt{\frac{2hS}{D}} + h\sqrt{L}\frac{\sigma_D}{D}\Phi^{-1}(\alpha) \quad (8)$$

が得られる。ここで、需要の発生過程がポアソン過程に従うと考えよう。このとき、単位時間当たりの需要の平均値と分散は等しく、 $D = \sigma_D^2$  が成立するため、式 (8) は、

$$\sqrt{\frac{2hS}{D}} + h\sqrt{\frac{L}{D}}\Phi^{-1}(\alpha) \quad (9)$$

と書き直せる。この式は、需要  $D$  が大きいほど、商品一単位当たりの平均在庫管理費用が逡減することを意味している。

在庫管理に規模の経済性が存在する理由は、以下のように説明できる。第一の理由は、式 (2) が示すように、需要が大きいと、発注の際のロットサイズ  $Q^*$  を大型化でき、商品一単位当たりの発注の固定費用を抑えられることである。この効果は、式 (9) の第一項に表れている。

第二の理由は、需要が大きいほど、需要変動のリスク、すなわち、商品の売れ残りのリスクを抑えられることである。個々の需要の発生が独立であれば、それらの需要を束ねることにより、需要の変動が平準化される。数式上では、需要の平均値  $D$  に対して、需要の標準偏差が  $\sigma_D = \sqrt{D}$  と表されることが、この性質を表している。式 (6) が示すように、安全在庫  $ss$  の水準は、需要の標準偏差に比例するため、需要が大きいほど、需要一単位当たりの安全在庫の保有量は減少する。

また、以上のモデルでは考慮できていないが、在庫を保管する設備（倉庫）の整備と運営に、各種の固定費用が必要となることも、在庫管理に規模の経済性が存在する要因である。

在庫管理という活動が有する二つ目の基本的な性質は、サプライチェーンの上流の施設（物流センターや商品のサプライヤなど）から商店への、商品の配送に時間がかかるほど、在庫管理費用が増大することである。商品の配送にかかる時間が長くと、リードタイム  $L$  が増加するため、商店は、式 (6) で表される安全在庫の保有量を増やさなければいけない。また、商品の輸送に使われる道路の整備が不十分であるために、商品の輸送に時間がかかる場合には、配送を担うトラックに支払う運賃が増加し、これが発注の固定費用  $S$  の増加を招く。この場合にも、在庫の保有量や、在庫管理費用が増加することになる。

#### (5) 物流センターの機能

物流センターの有効性は、在庫管理に規模の経済性が存在することから、直ちに明らかとなる。物流センターの下流に存在する商店は、上流の物流センターに在庫管理を代行させることにより、在庫の保有量を抑えることができる。これにより、小規模な商店でも運営が可能となる。この利点は、地価が高く広い土地を確保しにくい都市中心部において、特に有効である。さらに、物流センターは下流の商店の需要を集約することにより、需要の変動リスクを平準化するなどの規模の経済性を発揮し、効率的な運営が可能となる。

物流センターは、大量の在庫を保有するために広大な土地を必要とする。そのため、地価が安く、広い土

地を入手しやすい、都市の近郊に立地させることが望ましい。ただし、物流施設の立地点には、地価の他にも、もう一つ考慮すべき重要な要件が存在する。それは、下流の商店への商品の配送を、短時間で行うことが可能なことである。前節で述べた通り、商店への商品の配送に時間がかかる場合には、商店は、保有する在庫を増やさなければいけない。このとき、商店は結局、多くの在庫を自身で保管しなければならないため、物流センターの有効性が失われてしまう。

もし、下流の商店に対する商品の配送を短時間で行うことが可能な地区が、都市の近郊に存在しない場合には、その都市の近郊には物流センターを置かない方が、効率的になることがある。この場合、都市内の商店は、都市外に存在する遠方の施設から直接商品を仕入れることになる。このとき、商店は在庫管理の効率化を図るために、ある程度の需要を集める必要が生じ、規模の小さい商店は都市内に立地しにくくなる。このような環境では、都市内の商店数は少なくなり、消費者の買い物利便性は低くなる。

以上、本章では、消費者の買い物利便性と企業の在庫管理の間に密接な関係があること、在庫管理という活動の効率性が、在庫を仕入れる際のリードタイムに依存すること、そして、都市圏内の物流センターや商店の立地状況は、都市内物流の円滑性に影響を受けることを議論した。以上の議論より、都市内道路の整備による円滑な物流の実現は、新たな物流センターの立地を促し、これを通じて、物流センターの下流に存在する商店の立地数を増やす効果や、消費者の買い物利便性を向上させる効果を持つと考えられる。4. では、在庫管理モデルを応用した数理的なモデルを分析することにより、以上の議論の成立を理論的に確認する。

#### 4. 数理モデルを用いた分析

本稿の取り上げるモデルは、瀬木ら<sup>16)</sup>と同じものである。本稿では詳しい式展開は省略するため、詳細については元論文を参照されたい。

議論の見通しをよくするために、モデルの構造を単純化する仮定を置く。いま、図-2に示すような円周都市を考える。都市の中心部には物流ゲートウェイ地区(高速道路インターチェンジや港湾地区など)が存在する。物流ゲートウェイ地区と円周は、放射線状に伸びる多数の物流専用道路(図中の破線)により連結されている。円周上は住民が居住する市街地であり、消費者が均等な人口密度  $e$  で居住している。円周の総延長を  $R$  で表す。

都市内には日常的な商品を販売するチェーン店を経営する独占企業が存在する。この企業は、円周上の任

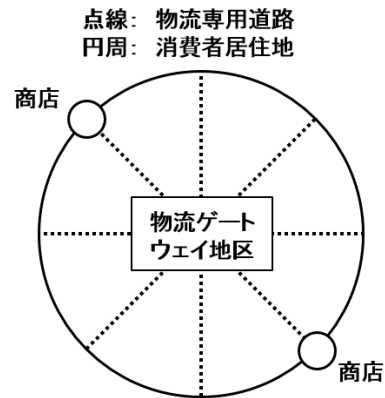


図-2 想定する都市構造

意の位置にチェーン店を立地することができる。企業は利潤を最大化するように、円周上のチェーン店数  $n$  と商品の販売価格  $p$  を決定する。円周上の人口密度は均質であるため、企業は均等な間隔  $R/n$  を置いてチェーン店を立地させることになる。図-2は  $n=2$  のときを表している。消費者は円周上を移動して最寄りのチェーン店を利用し、自宅とチェーン店間の距離に比例した買い物交通費用を負担する。一つのチェーン店が担当する商圏は、そのチェーン店の位置を中心として、 $\pm R/(2n)$  の範囲となる。

また、企業的意思決定の対象には、「物流ゲートウェイ地区に物流センターを立地させるか否か」も含まれる。物流センターを立地させるのに適した土地は、物流ゲートウェイ地区のみであると考えられる。物流センターを立地させない場合には、個々のチェーン店は、都市の外部から直接商品を仕入れる。物流センターを立地させる場合には、物流センターが都市の外部から商品を仕入れて在庫を保管し、チェーン店は物流センターから商品を仕入れる。いずれの場合にも、チェーン店が商品を仕入れる際には、都市外部の施設から、物流ゲートウェイ地区を経由したのちに、物流専用道路を介して各チェーン店に商品の輸送が行われる。

##### (1) 消費者の買い物行動と消費者余剰

###### a) 買い物需要

消費者の買い物需要の発生はランダムであり、ポアソン過程に従って商品一単位ごとの需要が独立に発生する。商品は価値の劣化が早い、もしくは保管のためのスペースを要するため、需要が発生する度に、消費者は近隣のチェーン店に商品を一単位購入に出かける。ポアソン過程の到着率  $\lambda$  は、商品の価格と買い物費用に依存すると考え、この関係を線形の需要関数で表す。

$$\lambda(l) = \bar{\lambda} - a(p + \tau l) \quad (10)$$

$\lambda(l)$  は最寄りのチェーン店までの距離が  $l$  の地点に住む消費者の、単位時間当たりのチェーン店訪問回数(以下、

到着率と呼ぶ)である。 $\bar{\lambda}$ は消費者一人の商品需要の上限を表す正の定数,  $a$ は商品需要の価格・買い物費用に対する感度を表す正の定数である。 $p$ は企業が設定する商品の販売価格である。 $\tau$ は単位距離当たりの消費者の往復買い物交通費用を表す定数である。また, 商店が離れている場合には, 商品を手入手できるタイミングがそれだけ遅れるため, この遅れによって生じる不効用も  $\tau$ に含まれていると考えることができる。 $p + \tau l$ は, 消費者が商品を一単位購入するのに必要な総費用を表す。この総費用に依存して, 消費者の商品の購入頻度は減少する。このポアソン過程によって, 商品の需要変動リスクが表現される。

## b) 消費者余剰

式(10)の需要関数を利用し, 消費者余剰を定義する。まず, 最寄のチェーン店までの距離が  $l$  の地点に住む消費者一人の消費者余剰  $cs(l)$  は

$$cs(l) = \int_{p+\tau l}^{\bar{\lambda}} (\bar{\lambda} - ax) dx \quad (11)$$

と表される。これを用いると, 都市全体の総消費者余剰  $CS$  は

$$CS = n \cdot 2 \int_0^{\frac{R}{2n}} e \cdot cs(l) dl \quad (12)$$

となる。式(12)の積分値は, 一つのチェーン店が担当する商圈の右半分内に住む消費者の, 総消費者余剰を表す。これを2倍すれば, 1つのチェーン店が担当する商圈内の総消費者余剰となる。これにチェーン店数  $n$  を掛ければ, 都市全体の総消費者余剰となる。

## c) チェーン店の在庫管理費用と道路上の旅行時間

一つのチェーン店の単位時間当たり商品需要の期待値  $D$  と分散  $\sigma_D^2$  を求める。最寄のチェーン店までの距離が  $l$  の地点に住む, 消費者一人の単位時間当たり需要の期待値と分散は, ともに  $\lambda(l)$  となる。個々の消費者の商品需要が, 独立に発生すると考える。このとき, 需要の和の期待値と分散は, 個々の需要の期待値と分散の和として表せる。したがって, 一つのチェーン店が担当する商圈内の, 単位時間当たりの需要の期待値  $D$  と分散  $\sigma_D^2$  は

$$D = \sigma_D^2 = 2 \int_0^{\frac{R}{2n}} e \lambda(l) dl \quad (13)$$

となる。在庫管理モデルより, 一つのチェーン店が負担する単位時間当たりの在庫管理費用  $C_I(S, L)$  は, 式(3), (6)を用いて,

$$C_I(S, L) = \sqrt{2hDS} + h\sqrt{L}\sigma_D\Phi^{-1}(\alpha) \quad (14)$$

と表される。チェーン店の在庫管理費用は, 発注費用  $S$  とリードタイム  $L$  に依存する。

発注費用  $S$  にはトラックの輸送費用が含まれており, リードタイム  $L$  には道路上の旅行時間が含まれている。

よって, 図-2に示される, 放射線状の物流専用道路上の旅行時間を短縮すれば,  $S$  と  $L$  は減少することが期待される。以下では, この関係をモデル化する。 $S$  と  $L$  はそれぞれ, チェーン店が上流の施設に商品を発注する際の発注費用とリードタイムであるから, これらの値は, 上流に物流センターが無い場合と有る場合で異なる。物流センターが無い場合の値を  $S_N, L_N$  で表し, 有る場合の値を  $S_W, L_W$  で表す。これらの変数を以下のように定式化する。

$$S_N = S_0 + \beta T \quad (15a)$$

$$L_N = L_0 + T \quad (15b)$$

$$S_W = \beta T \quad (15c)$$

$$L_W = T \quad (15d)$$

$S_0$  と  $L_0$  はそれぞれ, 都市外の施設から都市の物流ゲートウェイ地区までの物流費用と輸送時間を表す。 $T$  は図-2の物流専用道路の片道の旅行時間である。 $\beta$ は旅行時間を物流費用に換算する係数である。物流センターが有る場合には, リードタイムに  $L_0$  は含まれない。その代わりに, 物流センターが都市外の施設から商品を仕入れる際に, リードタイム  $L_0$  が生じることとなる。

## (2) 企業の利潤

チェーン店を運営する独占企業の意思決定の対象は, 「物流センターを物流ゲートウェイ地区に立地させるか否か」, 都市内のチェーン店数  $n$ , 商品価格  $p$  の3つである。企業は利潤を最大化するように意思決定を行う。そこで, 以下では, 「物流センターを立地させない場合」と「立地させる場合」に分けて企業の利潤を定式化する。

### a) 物流センターを立地させない場合

物流センターを立地させない場合の単位時間当たりの企業の利潤を  $\pi_N(n, p, T)$  で表し,

$$\begin{aligned} \pi_N(n, p, T) \\ = (p - c)nD - n[C_I(S_N, L_N) + F] \end{aligned} \quad (16)$$

と定式化する。ここで,  $c$ は商品を一単位販売するために必要となる各種の可変費用,  $nD$ はチェーン店の商品の総売り上げ,  $F$ は一店舗のチェーン店を立地・運営するために必要となる固定費用である。

### b) 物流センターを立地させる場合

物流センターを立地させる場合は, 物流センターにおいても在庫管理を行う必要がある。物流センターは都市外に立地する施設から商品を仕入れる。チェーン店から物流センターに発注される商品需要の単位時間当たりの期待値  $D_W$  と分散  $\sigma_{D_W}^2$  は

$$D_W = \sigma_{D_W}^2 = nD \quad (17)$$

と表される。物流センターも EOQ モデルと Safety Stock モデルに従い在庫管理を行うと考える。式 (3), (6), (17) を用いれば、物流センターの在庫管理費用は

$$C_W = \sqrt{2h \cdot D_W \cdot S_0} + h\sqrt{L_0}\Phi^{-1}(\alpha)\sigma_{DW} \quad (18)$$

と表せる。ただし、 $S_0, L_0$  はそれぞれ、物流センターが都市外の施設から商品を仕入れる際の発注費用とリードタイムである。在庫保有費用  $h$ 、および、リードタイム中に在庫切れが発生しない確率の目標値  $\alpha$  は、チェーン店と物流センターの間で共通と考える。

物流センターの在庫管理費用  $C_W$  を用いれば、物流センターを立地させる場合の単位時間当たりの企業の利潤  $\pi_W(n, p, T)$  は、次式で表せる。

$$\begin{aligned} & \pi_W(n, p, T) \\ &= (p - c)nD - n[C_I(S_W, N_W) + F] \\ & \quad - [C_W + F_W] \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、 $F_W$  は物流センターを立地・運営するために必要となる固定費用である。

### c) 企業の意思決定

企業の意思決定は次のように行われる。まず、都市内輸送時間  $T$  が外生的に与えられる。次に、企業は与えられた  $T$  の下で、 $\pi_N(n, p, T)$  と  $\pi_W(n, p, T)$  を (仮想的に)  $n, p$  について最適化し、物流センターを立地させない場合・立地させる場合の各ケースにおける、最適なチェーン店数と商品価格を決定する。 $\pi_N(n, p, T)$  の最適化問題の解を  $n_N(T), p_N(T)$  で表し、 $\pi_W(n, p, T)$  の最適化問題の解を  $n_W(T), p_W(T)$  で表す。最後に、企業は  $\pi_N(n_N(T), p_N(T), T)$  と  $\pi_W(n_W(T), p_W(T), T)$  を比較し、前者が大きい場合は物流センターを立地させず、後者が大きい場合は物流センターを立地させる。すなわち、次式が成立する。

$$\begin{cases} \text{物流センター} & \pi_N(n_N(T), p_N(T), T) \geq \\ \text{を立地しない} & \pi_W(n_W(T), p_W(T), T) \end{cases} \quad (20a)$$

$$\begin{cases} \text{物流センター} & \pi_N(n_N(T), p_N(T), T) < \\ \text{を立地する} & \pi_W(n_W(T), p_W(T), T) \end{cases} \quad (20b)$$

### (3) 都市内輸送時間の短縮効果

以上のモデルを用いて、都市内輸送時間  $T$  の短縮効果を分析し、結果を整理する。数値計算にあたり、外生的なパラメータを以下のように設定する。都市の人口は 10 万人と考え、 $e = 1000, R = 100$  と設定する。単位時間は一日に設定する。商品の一日・一人当たりの需要は最大 0.1 単位とし、需要の弾力性が高い状況を想定し、 $\bar{\lambda} = 0.1, a = 0.05, \tau = 0.1, c = 1$  と設定する。チェーン店と物流センターの一日当たりの固定費は、それぞれ  $F = 10, F_W = 100$  と設定する。都市

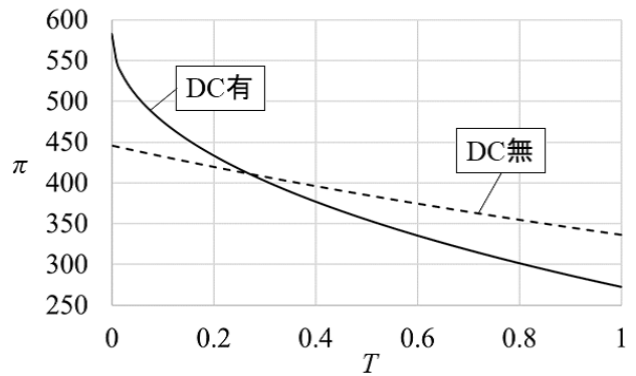


図-3 都市内輸送時間  $T$  と企業の利潤  $\pi$  の関係

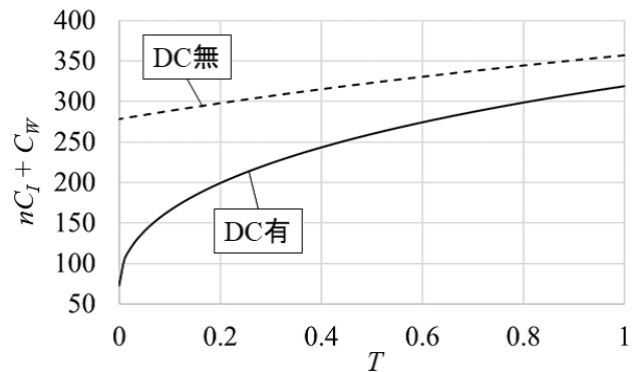


図-4 都市内輸送時間  $T$  と企業の総在庫管理費用の関係

外から都市までのリードタイムは一日と考え、 $L_0 = 1, \beta = 10, S_0 = 10$  と設定する。一日・一単位当たりの在庫保有費用は  $h = 0.1$  と設定し、リードタイム中に在庫切れが発生しない確率の目標値は  $\alpha = 0.95$  と設定する。以上の設定の下では、企業が設定する商品価格は概ね  $p = 1.45$  になるため、在庫保有費用  $h = 0.1$  の設定は、一日当たりの在庫保有費用が、商品価格の  $1/15$  であるような商品を想定することを意味する。以上の設定の下で、都市内輸送時間  $T$  を 1 (日) から 0 (日) まで変化させ、それに伴う各変数の変化について分析する。

図-3 は都市内輸送時間  $T$  と企業の利潤  $\pi$  の関係を示したものである。実線は物流センターが立地している場合 ( $\pi_W$ ) のグラフであり、破線は立地していない場合 ( $\pi_N$ ) のグラフである。その他のグラフにおいても、実線と破線は物流センターの立地の有無に対応している。このグラフより、物流センターを立地した方が利潤の高くなるような  $T$  の閾値  $\tilde{T}$  が存在しており、 $T < \tilde{T}$  のときに、企業が物流センターを立地させることを確認できる。この事例では、 $\tilde{T} = 0.26$  である。このような閾値が存在する理由は、物流センターから商店への商品の配送に時間がかかる場合には、結局、チェーン店は自身で多くの在庫を保有しなければならず、物流センターの有効性が失われてしまうからである。この



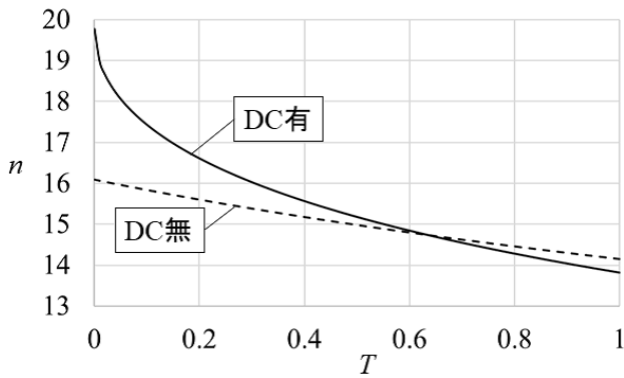


図-5 都市内輸送時間  $T$  とチェーン店数  $n$  の関係

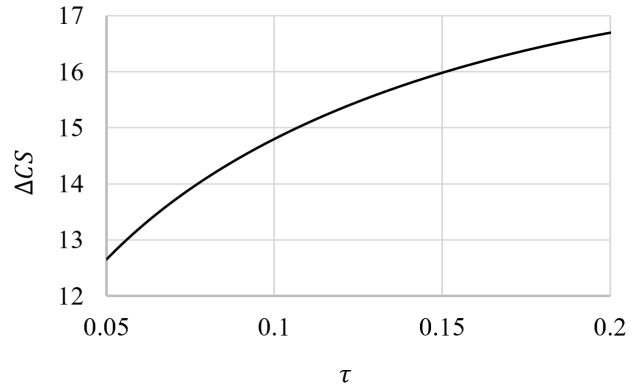


図-8  $T$  の短縮による  $CS$  の変化額と  $\tau$  の関係

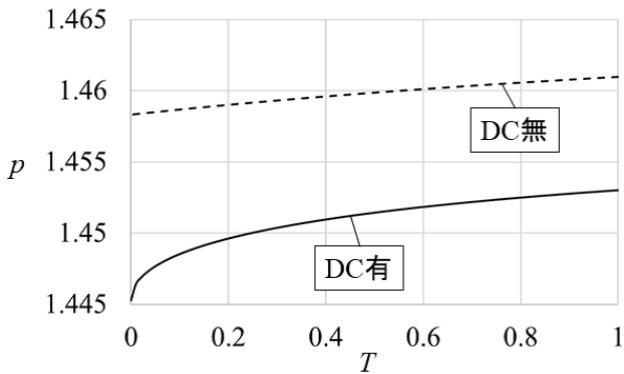


図-6 都市内輸送時間  $T$  と商品価格  $p$  の関係

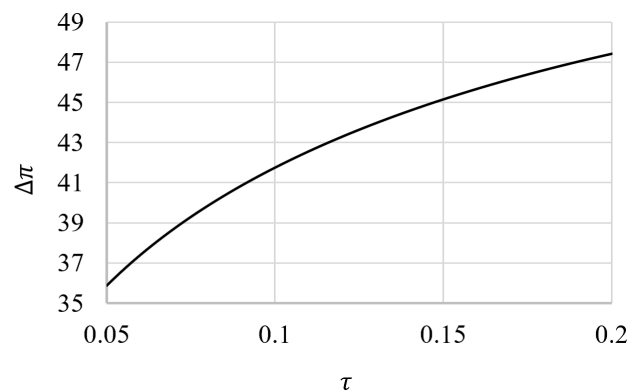


図-9  $T$  の短縮による  $\pi$  の変化額と  $\tau$  の関係

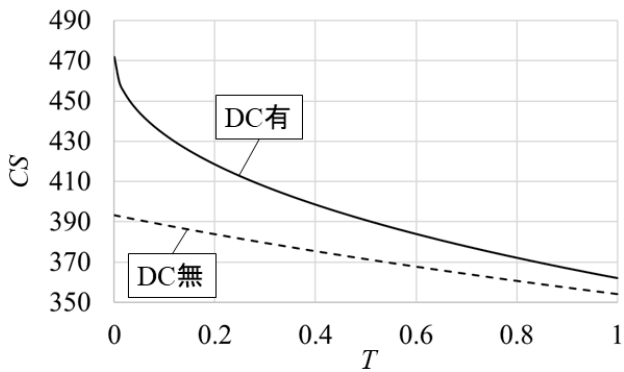


図-7 都市内輸送時間  $T$  と消費者余剰  $CS$  の関係

ことは、図-4から確認できる。このグラフは、都市内輸送時間  $T$  と企業の総在庫管理費用  $nC_I + C_W$  の関係を示したものである。物流センター立地の便益である総在庫管理費用の削減効果は、都市内輸送時間が長くなるにつれて小さくなることわかる。

都市内輸送時間  $T$  とチェーン店数  $n$ 、商品価格  $p$ 、消費者余剰  $CS$  の関係を図-5、図-6、図-7に示している。物流センターの立地の有無にかかわらず、都市内輸送時間  $T$  の短縮は、チェーン店数  $n$  の増加と商品価格  $p$  の減少をもたらす、消費者余剰  $CS$  を増加させている。チェーン店数が増加する理由は、リードタイムを短縮することにより、商店の保有する在庫が削減され、

小規模な商店でも運営が容易になることである。同時に、在庫管理費用の負担が減るために商品価格も低下する。その結果として、消費者は安く商品が買えるようになるとともに、買い物利便性が向上し、消費者余剰が増加する。この効果は、物流センターが立地している場合の方が強く働くものの、商店が都市外部の施設から直接商品を仕入れる場合にも生じる。

物流センターが立地する閾値である  $T = 0.26$  の点に着目すると、物流センターの立地に伴い、チェーン店数  $n$  の増加と商品価格  $p$  の減少が、不連続的に進行することが確認できる。これは、物流センターが都市近郊に存在する場合には、チェーン店は、物流センターに在庫管理を代行させることにより、在庫の保有量を抑えることができるからである。これにより、小規模な商店でも運営が可能となるため、都市内にチェーン店が多数立地することになる。

#### (4) 輸送時間短縮の便益と買い物交通費用の関係

以上の分析では、消費者の単位距離当たりの買い物交通費用  $\tau$  を 0.1 に固定して分析を行った。近年では、長距離の移動が困難な高齢者が増加するなど、 $\tau$  の値が大きい消費者が増えていると考えられる。そこで、 $\tau$  の値に応じて、都市内輸送時間短縮の便益がどのように

変化するのかを分析することにする。図-8は、都市内輸送時間  $T$  を 0.2 から 0.1 に短縮したときの、消費者総余剰の増加額  $\delta CS$  と、買い物交通費用  $\tau$  の関係をグラフにしたものである。また、図-9は、企業の利潤の増加額  $\Delta\pi$  と、 $\tau$  の関係をグラフにしたものである。分析に当たり、輸送時間の短縮前後の双方において、物流センターは立地していると考えている。これらのグラフより、都市内輸送時間  $T$  の短縮による消費者余剰や利潤の増加額は、消費者の買い物交通費用が高いほど増えることを確認できる。この理由は、都市内輸送時間の短縮は、チェーン店数の増加をもたらす、消費者が居住地の近隣で買い物をすることを可能にするためである。

## 5. 都市内物流を支えるインフラの価値

前章で整理した分析結果を踏まえ、円滑な都市内物流を支えるインフラの価値について議論する。第一に、都市内道路整備は、仮にそれが物流の円滑化のみに資するものであったとしても、都市内の商店数を増やすことにより消費者の買い物利便性を改善し、消費者余剰を増加させる。この効果は、都市近郊における物流センターの立地の有無によらず生じる。

第二に、都市近郊の広い土地が利用可能な地区と、都市内の各地区の間の物流を円滑化するような道路を整備すると、都市近郊の地区への物流センターの立地を促す可能性がある。このような物流センターの立地は、都市内の商店数を増やし、消費者の買い物利便性を改善する効果を持つ。サプライチェーン下流の商店が上流の物流センターに在庫管理を代行させる戦略は、現代のスーパーやコンビニ等の小売企業の多くが採用するものであるが、このような戦略の成立には、都市内道路の整備が寄与している可能性が示唆される。

また、このような都市内道路の整備効果は、ネット通販のように、消費者の自宅に商品を配送する小売企業についても成立すると考えられる。ネット通販を運営する企業は、都市の近郊に物流センターを配置することにより、消費者が商品を注文してから、消費者の下に商品を届けるまでのリードタイムを短縮し、消費者の買い物利便性を高められる。しかし、都市内道路が混雑しており、物流センターから消費者への商品の配送に時間がかかるのであれば、リードタイムの短縮効果には限界が生じることになる。これは、前章のモデルにおける商店を、消費者に置き換えて分析を行うことによっても確認できる。

第三に、インフラ整備による都市内物流の円滑化の便益は、消費者の買い物交通費用が高いほど増加する。近年の日本社会においては、長距離の移動が困難な高

齢者、買い物に時間をかけられない忙しい労働者、外出を面倒に感じる消費者など、買い物交通費用が高い（あるいは移動抵抗の大きい）消費者が増えていると考えられる。このような消費者が多い環境において、都市内物流の円滑化による商店数の増加や、ネット通販のリードタイムの短縮は、大きな社会的便益をもたらす。

## 6. おわりに

本稿は、消費者の買い物利便性と企業の在庫管理という視点から、円滑な都市内物流を支えるインフラの価値について議論した。まず、企業の在庫管理という視点から、都市内物流を支えるインフラが、小売企業の施設配置戦略や、消費者の利便性と密接な関係を持つことを説明した。そのうえで、インフラ整備による都市内物流の円滑化は、都市近郊への物流センターの立地を促す効果や、都市内の商店数を増やし、消費者の買い物利便性を改善する効果を持つことを議論した。

本稿の議論の重要な論点の一つは、都市内物流を支えるインフラは、商店などの施設配置を通じて、消費者の買い物交通行動や買い物利便性と密接な関係を持つということである。買い物交通費用が高い消費者が増えていると考えられる今日の日本社会においては、都市内物流を支えるインフラは、その重要性をより高められていると考えられる。また、本稿では、都市内に立地する商店を対象に議論を行ったが、同様の議論は、人口の少ない地域に立地する商店についても成立すると考えられる。人口の少ない地域に、地域住民の生活を支える商店が成立するかどうかは、近隣の都市の物流施設から、その地域への円滑な物流を支える環境が整っているかどうか依存すると考えられる。商品の流通チャンネルに関わる物流は、交通計画のみならず、都市計画や地域計画においても重要な視点であると言える。

**謝辞：** 本稿は、論文奨励賞の受賞論文「都市内道路とフランチャイズ小売企業の物流センター立地戦略の関係」の内容を平易に書き直すとともに、新たな考察を加筆したものです。本稿の内容を、招待講演ならびに招待論文として発表させていただくという、名誉ある機会をいただいたことに深く感謝申し上げます。受賞論文を執筆する上では、京都大学の小林潔司教授、松島格也准教授をはじめとする多くの先生方にご指導とご助言を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Hotelling, H. : Stability in competition, *The Economic Journal*, Vol. 39, No. 153, pp. 41-57, 1929.
- 2) Eaton, B. C. and Lipsey, R. G.: An economic theory of central places, *The Economic Journal*, Vol. 92, No. 365, pp. 56-72, 1982.
- 3) Wolinsky, A.: Retail trade concentration due to consumers' imperfect information, *Bell Journal of Economics*, Vol. 14, No. 1, pp. 275-282, 1983.
- 4) Melo, M. T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F.: Facility location and supply chain management - a review, *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, pp. 401-412, 2009.
- 5) 谷口栄一, 則武通彦, 山田忠史, 泉谷透: 物流タ-ミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究, 土木学会論文集, No. 583, IV-38, pp. 71-81, 1998.
- 6) Teo, C.-P. and Shu, J.: Warehouse-retailer network design problem, *Operations Research*, Vol. 52, No. 3, pp. 396-408, 2004.
- 7) Romeijn, H. E., Shu, J. and Teo, C.-P.: Designing two-echelon supply networks, *European Journal of Operational Research*, Vol. 178, pp. 449-462, 2007.
- 8) Walter, C. K. and Grabner, J. R.: Stockout cost models: Empirical tests in a retail situation, *Journal of Marketing*, Vol. 39, No. 3, pp. 56-60, 1975.
- 9) Liberopoulos, G., Tsikis, I. and Delikouras, S.: Back-order penalty cost coefficient "b" What could it be?, *International Journal of Production Economics*, Vol. 123, No. 1, pp. 166-178, 2010.
- 10) Chopra, S. and Meindl, P.: *Supply Chain Management (5th Edition)*, Prentice Hall, 2012.
- 11) Baumol, W. J. and Vinod, H. D.: An inventory theoretic model of freight transport demand, *Management Science*, Vol. 16, No. 7, pp. 413-421, 1970.
- 12) Blauwens, G., Vandaele, N., de Voorde, E. V., Vernimmen, B. and Witlox, F.: Towards a modal shift in freight transport? A business logistics analysis of some policy measures, *Transport Reviews*, Vol. 26, No. 2, pp. 239-251, 2006.
- 13) de Jong, G. and Ben-Akiva, M.: A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, pp. 950-965, 2007.
- 14) 瀬木俊輔: 在庫管理モデルを応用した貨物の時間価値に対する理論的アプローチ, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.2, pp.113-127, 2016.
- 15) Song, J.-S.: The effect of leadtime uncertainty in a simple stochastic inventory model, *Management Science*, Vol. 40, No. 5, pp. 603-613, 1994.
- 16) 瀬木俊輔, 小林潔司, 松島格也: 都市内道路とフランチャイズ小売企業の物流センター立地戦略の関係, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.4, pp.369-386, 2018.

(Received October 6, 2020)

THE VALUE OF INFRASTRUCTURES THAT SUPPORT EFFICIENT  
URBAN LOGISTICS: FROM THE PERSPECTIVE OF CONSUMERS  
CONVENIENCE AND INVENTORY MANAGEMENT

Shunsuke SEGI

This paper discusses the value of the infrastructures that support efficient urban logistics, from the perspective of the consumers convenience for shopping and the inventory management of firms. First, from the perspective of inventory management, I explain that the infrastructures that support urban logistics have a close relation with the location of stores and distribution centers of retailers as well as the consumers' convenience. Then, I discuss that the investment in infrastructures that improve the efficiency of urban logistics can prompt the investment in distribution centers in the suburbs and increase the number of stores in the city, thereby improving the consumers convenience for shopping.