

時間制約を考慮した長距離貨物輸送および経路選択に関する研究*

Study on the estimate method of the expressway distribution of freight transportation with consideration of the time restriction*

原英孝**・大枝良直***・角知憲****

By Hidetaka HARA**・Yoshinao OEDA***・Tomonori SUMI****

1. はじめに

近年、自動車輸送への過度の依存に伴い、物流を取り巻く様々な問題が深刻化してきている。自動車輸送は国内物流の大部分を占めるようになり、さらにはジャストインタイム輸送といった多様化する荷主ニーズにより時間制約が強く意識される情勢にある。そのため、この種の荷主ニーズに充分応えるサービスの提供が必要となっている。

本研究では、マクロな視点からの輸送網計画に時間制約を考慮できるモデルを作成し、時刻の関数であると定義した非効用関数を用いて、貨物輸送における出発時刻決定が24時間サイクルの制約下で行われることを表すとともに、高速道路利用選択行動を推定することを目的としている。

2. 出発時刻決定モデル

(1) モデルの概念

貨物輸送においては、通常、出荷側の荷主、着荷側の荷主、そして実際に輸送をおこなうキャリアーという3者が存在しており、それぞれの荷主とキャリアーの立場には優劣の関係がある。荷主にはキャリアーを変更する自由度があり、直接・間接にキャリアーは荷主の意向を反映する行動を取ることになる。そこで、キャリアーは自らの24時間サイクルの下で要求される制約と荷主から科される制約の両方を考慮して、その行動を決定するものとする。

(2) 非効用関数の決定

(a) 出荷時における荷主の意向を反映した非効用

$$D_1(t) = -A_1(t - t_1) \dots \dots \dots (1)$$

A_1 : 正のパラメータ, t_1 : D_1 の弁別閾に対応する時刻

(b) 着荷時における荷主の意向を反映した非効用

$$D_2(t) = A_2(t - t_2) \dots \dots \dots (2)$$

A_2 : 正のパラメータ, t_2 : D_2 の弁別閾に対応する時刻

(c) キャリアーの24時間サイクルに関する非効用

$$D_3(t) = -A_3(t - t_3) \dots \dots \dots (3)$$

A_3 : 正のパラメータ, t_3 : D_3 の弁別閾に対応する時刻

$$D_4(t) = A_4(t - t_4) \dots \dots \dots (4)$$

A_4 : 正のパラメータ, t_4 : D_4 の弁別閾に対応する時刻

(d) 日をまたぐことによる非効用

$$D_5 = \begin{cases} D_{5.1} & (24 \leq t < 48) \\ D_{5.1} + D_{5.2} & (48 \leq t < 72) \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

図-1は全非効用の時間変化を表したものであり、横軸に時刻、縦軸に非効用をとる。

荷主の意向を反映しながら、キャリアーが出発時刻を決定する行動を次のように表す。キャリアーは、荷主の意向を反映した非効用 D_1 、 D_2 と自らの活動から決まる非効用 D_3 、 D_4 を比較し、もし前者が大きければ荷主の意向に従い、もし小さければ自らの都合を優先するものとし、閾値の大小による場合分けを行った結果、両者を考慮した出荷時の非効用 D_{13} 、着荷時の非効用 D_{24} は、式(6)、式(7)のように表すことができる。

$$D_{13}(t) = \max(D_1(t), D_3(t)) \dots \dots \dots (6)$$

$$D_{24}(t) = \max(D_2(t), D_4(t)) \dots \dots \dots (7)$$

いま、出荷時刻を t_d に選んだとすると、その場合の総非効用は非効用の加算性を仮定して式(8)のように表される。キャリアーは輸送時間 t_n により決定される出発、到着時刻の組み合わせの中で非効用の総和が最小となる出発時刻を選択するものとし、非効

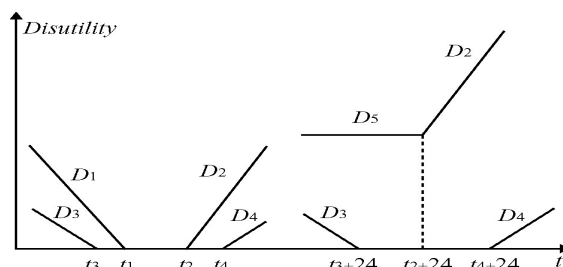


図-1. 全非効用の時間変化

*キーワード：総合交通計画，物流計画
 **学生員，工修，九州大学大学院工学府
 (福岡市西区元岡744番，TEL&FAX:092-802-3403)
 ***正員，工博，九州大学大学院工学研究院
 ****正員，工博，九州大学大学院工学研究院

用の最小値を選択することのできる時刻が複数存在する場合には、その時刻間を一定の割合で選択するものとする。

$$D(t_d) = D_{13}(t_d) + D_{24}(t_d + t_n) + D_5 \dots \dots \dots (8)$$

(3) 意思決定行動のばらつき

人の行動選択では同一条件下にあっても、非効用の感じ方にばらつきがあると考えられ、貨物輸送においても同様に、荷主、キャリアーはそれぞれ非効用の感じ方が異なると考えられる。そこで、このばらつきを表現するため、前述のパラメータの閾値にばらつきを与え、正規分布で仮定する。

3. 高速道路利用選択モデル

前述で提案した出発時刻決定モデルに基づいて、荷主から科される制約と自らの行動から決まる制約による非効用以外に高速道路利用選択に影響を及ぼす要因を加えることで、貨物輸送におけるキャリアーの高速道路利用選択モデルを作成する。本研究では、高速道路利用を選択する支配要因として高速道路料金、高速道路に乗る際の乗継抵抗 ω を定数として想定し、高速道路利用者に対し以下のような非効用 β_k を追加する。なお、一般道路利用者に対しては高速料金、乗継抵抗は発生しないので、その非効用 β_i は0となる。

$$\beta_k = \delta \cdot R + \omega \dots \dots \dots (9)$$

R：高速道路料金、 δ 、 ω ：正のパラメータ

$$\beta_i = 0 \dots \dots \dots (10)$$

したがって、これらの非効用を出発時刻決定モデルで求められる時刻決定行動の非効用に加えると、それぞれ式(11)、式(12)になる。

$$\begin{aligned} D_k(t_d) &= D(t_d) + \beta_k \\ &= D_{13}(t_d) + D_{24}(t_d + t_n) + D_5 + \delta \cdot R \\ &\quad + \omega \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_i(t_d) &= D(t_d) + \beta_i \\ &= D_{13}(t_d) + D_{24}(t_d + t_n) + D_5 \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

ある貨物輸送を行う場合、キャリアーは高速道路利用選択において、高速道路利用時の非効用、一般道利用時の非効用を比較し、非効用がより小さい方を選択するものと考えられる。したがって、キャリアーは貨物輸送に関わる総非効用が最小となるように高速道路の利用を選択すると仮定し、以下の計算により高速道路の利用分担率を求めることができる。個人差を考慮した行動のばらつきをパラメータ t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 で表すこととして、その確率密度関数をそれぞれ $\phi_{t_1}(t_1)$ 、 $\phi_{t_2}(t_2)$ 、 $\phi_{t_3}(t_3)$ 、 $\phi_{t_4}(t_4)$ と表す。また、各パラメータの分布の平均と標準偏差をそれ

ぞれ μ_1 、 σ_1 、 μ_2 、 σ_2 、 μ_3 、 σ_3 、 μ_4 、 σ_4 とすると、 $D_k = D_i$ より高速道路と一般道路の選択の分岐点 δ_0 が求まる。ここで、 δ の確率密度関数を $\phi_\sigma(\delta | \mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \mu_3, \sigma_3, \mu_4, \sigma_4)$ とすると、 $\mu_1, \sigma_1 \dots \mu_4, \sigma_4$ を条件とした高速道路選択率 dP_0 が式(13)より求められる。

$$dP_0 = \int_0^{\delta_0} \phi_\sigma(\delta | \mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \mu_3, \sigma_3, \mu_4, \sigma_4) \dots \dots \dots (13)$$

式(13)から、あるODについて的高速道路を利用する確率 P_k が以下の式(14)で求めることができる。

$$\begin{aligned} P_k &= \int P_0(\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \mu_3, \sigma_3, \mu_4, \sigma_4) \\ &\quad \phi_{t_1}(t_1), \phi_{t_2}(t_2), \phi_{t_3}(t_3), \phi_{t_4}(t_4) d\mu d\sigma \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

なお、式(13)、式(14)における P_0 を \bar{P}_0 とすることで、一般道路を利用する確率 P_i を求めることが出来る。

4. モデルの適用

本モデルは、輸送時間を与えることでキャリアーの出発時刻、そして貨物輸送における高速道路の利用分担率を推定するものである。そこで、使用データとして出荷時刻、着荷時刻、高速道路の利用の有無を品目ごとに把握することのできる平成11年度および平成17年度道路交通センサスを用いる。なお、本研究では、出発時刻決定モデルは輸送時間帯別に、高速道路利用選択モデルは九州内の県間OD別に適用を行う。

貨物輸送においては、輸送品目により異なる輸送パターンが存在している。例えば生鮮品は傷みやすく、保管コストが大きく時間制約が強いのに対し、機械工業品は劣化に強く保管も容易で時間制約は弱くなり、品目により時間価値は大きく異なるといえる。すなわち交通行動選択も品目により異なると考えられる。そこで本研究では、輸送形態が異なる生鮮品と機械工業品、また比較的サンプル数の多い金属工業品、食料工業品を輸送する貨物自動車を対象としてモデルの適用を行う。サンプル数は生鮮品35094台、機械工業品19005台、金属工業品21570台、食料工業品39474台である。

5. パラメータ推定と結果

(1) 出発時刻決定モデル

パラメータ推定において、 $t_1 \sim t_4$ の分布の平均と標準偏差に関するパラメータと A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 と D_5 に初期値を与え、所要時間が0~60分、60~120

分, 120~180分, 180~240分の4つの実測値に対して理論値を計算し, それぞれの実測値と理論値の χ^2 誤差の和が最小となるようにパラメータを推定した. パラメータ推定の結果を表-1に示す. また, 推定したパラメータを用いて所要時間が240分以上の場合に対して, D_5 を考慮する場合と考慮しない場合で理論値を計算し, 両者の結果を比較した. その結果得られた生鮮品の各所要時間ごとの出発時刻分布を図-2~図-7に示す. 品目ごとの各所要時間の出発時刻分布の実測値と理論値に対しK-S検定を行った結果, 全ての分布で有意水準20%の適合度を得た.

パラメータについて, 機械工業品では出荷に関する非効用の平均閾値が12.6時となり, これは工場等の午前中の作業終了後の出荷を希望しているものと考えられる. また, 着荷に関する非効用の平均閾値は7.3時となり, 工場等の配送先の始業時刻に合わせた配送が望まれている結果であるといえる. また, 生鮮品では, 他の品目よりも着荷時に関する非効用

の重みである A_2 の値が大きく, また日をまたぐ非効用である D_5 の値が大きい. これは生鮮品の劣化が早く保管のコストが大きいという性質上, 着荷時刻による制約が強く, 輸送時間が長くなることを避けたいということが分かる. 食料工業品では, 他の品目

表-1. パラメータ推定結果

		機械	生鮮	食料	金属
t1	標準偏差	3.30	4.54	3.92	4.53
	平均値	12.60	10.76	10.70	12.04
t2	標準偏差	2.80	3.90	2.70	3.01
	平均値	7.30	7.94	7.67	9.86
t3	標準偏差	3.10	1.06	2.96	3.14
	平均値	6.30	6.93	7.32	7.69
t4	標準偏差	2.40	1.16	2.81	2.44
	平均値	22.00	19.36	20.86	19.06
A1		2.30	3.16	1.97	2.52
A2		0.99	2.03	0.23	1.22
A3		0.37	1.06	0.07	0.76
A4		0.87	0.53	0.77	0.88
D5		1.25	2.63	1.22	0.31

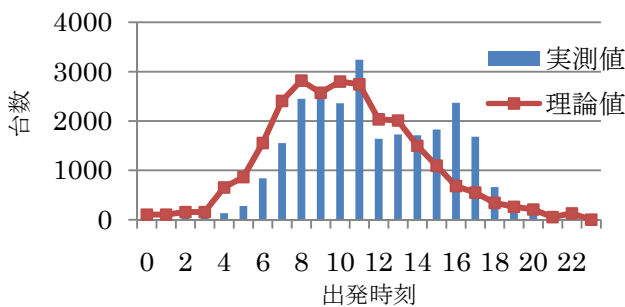


図-2. 出発時刻分布 (生鮮品) : 0~60分

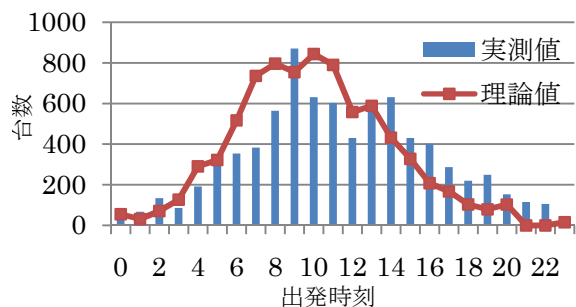


図-3. 出発時刻分布 (生鮮品) : 60~120分

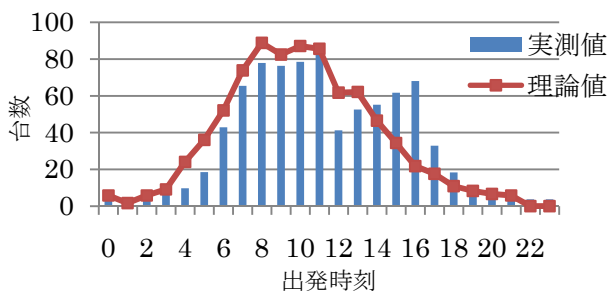


図-4. 出発時刻分布 (生鮮品) : 120~180分

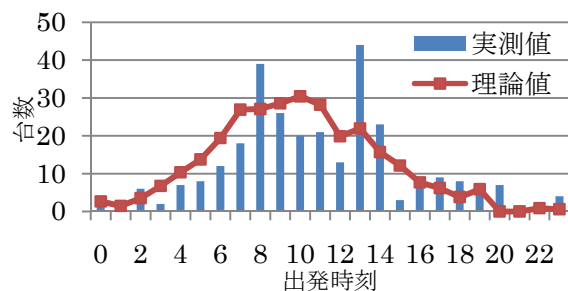


図-5. 出発時刻分布 (生鮮品) : 180~240分

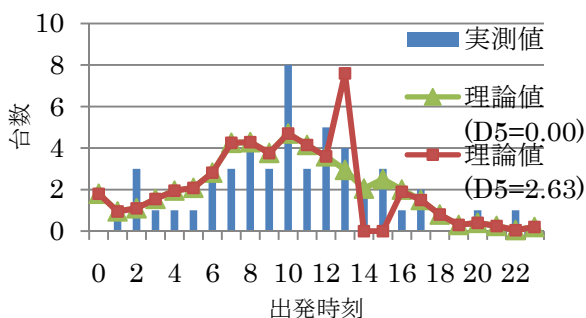


図-6. 出発時刻分布 (生鮮品) : 300~360分

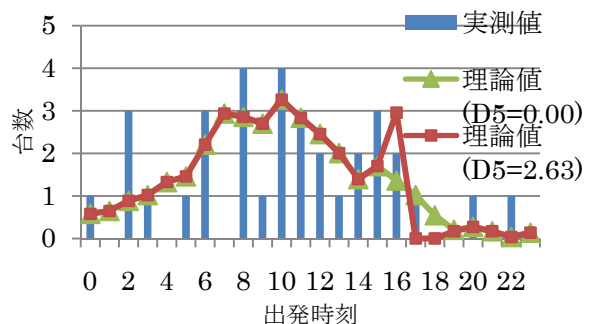


図-7. 出発時刻分布 (生鮮品) : 360~420分

に比べ A_2 の値が極端に小さく、着荷時に受ける制約が弱いことが分かる。金属工業品では、 D_5 の値が0.31と小さく一日を超す輸送について非効用をあまり感じないということが分かる。また全体的に荷主の意向を強く反映するようにパラメータが推定された。生鮮品、機械工業品、食料工業品については所要時間が長くなるにつれ、 D_5 を考慮しない方が出発時刻を妥当に表すことができた。金属工業品については D_5 を考慮してもしなくても顕著な違いは見られなかった。このように一日を超す輸送の時に D_5 を考慮しなくてもよい品目ほど、モーダルシフトの適用に適していると考えられる。

(2) 高速道路利用選択モデル

δ の分布を対数正規分布と仮定し、 δ の平均 μ および標準偏差 σ 、乗継抵抗 ω に初期値を与え、式(14)により P_0 、 \bar{P}_0 の理論値を、またあるODにおける高速道路（一般道路）利用者の出発時刻の理論値 t_d を算出し、観測値との二乗誤差が最小となるようにパラメータの推定を行った。その結果得られたパラメータ推定の結果を表-2に示し、理論値と実測値との相関図を図-8、図-9に示す。

生鮮品に比べ機械工業品の方が高速道路料金のパラメータである δ の平均値が大きく、機械工業品の方がより高速道路料金に大きな抵抗感を感じているということがわかる。これは、機械工業品は劣化に強く長距離輸送に耐え得るため、高速道路に乗る区間も長くなり、高速道路料金も高額になるためと考えられ、長距離輸送に強いという特性を反映した結果となった。逆に生鮮品は乗継に対する抵抗感を表す ω の値が大きく、これは、生鮮品は短距離輸送が多く、高速道路に乗る区間も短いため、高速道路料金よりもむしろ高速道路に乗ること自体に大きな抵抗を感じているものといえる。そのため機械工業品に対しては、高速道路料金を安価にすることで高速道路利用選択率を増加させられると考えられ、生鮮品に対しては、高速道路への乗継抵抗を軽減することで高速道路利用選択率を増加させられると考えられる。

表-2 パラメータ推定結果

		生鮮品	機械工業品
δ	平均	2.74	8.51
	標準偏差	1.51	3.34
ω		2.78	0.23

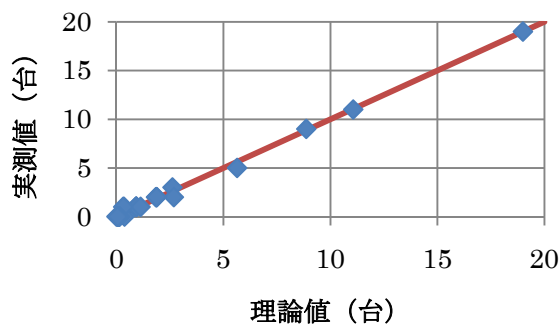


図-8. 高速道路分担率相関図一台数（生鮮品）

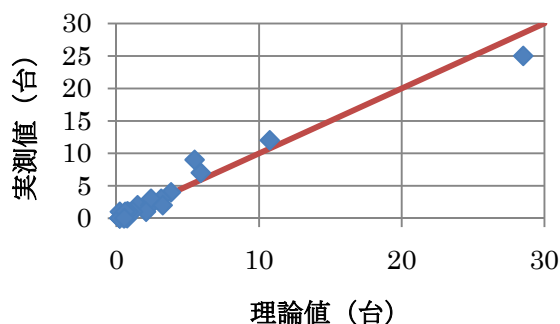


図-9. 高速道路分担率相関図一台数（機械工業品）

6. おわりに

本研究では、非効用の概念を用いて、荷主のニーズによる時間制約と出荷・着荷の時刻決定がキャリア自身の業務活動や生活の24時間サイクルに制約され、一方で24時間を超える範囲の意志決定も行われることを考慮したうえでキャリアの出発時刻決定行動、および高速道路利用選択行動を記述するモデルを作成した。またこれらの行動を決定する上で、重要となる要因を品目ごとに挙げる事ができた。

本モデルは輸送機関選択モデルへと拡張可能であり、時間制約を考慮した輸送機関分担率の推定を行うことが出来る。それによりモーダルシフトの推進、貨物輸送の合理化のための輸送時間短縮、輸送スケジュールの改善の足がかりとなると考えられる。

参考文献

- 1) 角 知憲・大枝良直・松本浩司：時間制約を考慮した貨物輸送における高速道路分担率推定方法に関する研究，九州大学大学院修士論文，2007
- 2) 角 知憲・大枝良直・梅本忠嗣：時間制約を考慮した長距離輸送に関する研究，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp611-612，2008