

輸送段階を考慮した地域間貨物輸送に関する分析

住友金属物流 正会員 ○国重弘道
広島大学 正会員 塚井誠人
広島大学 正会員 桑野将司

1. はじめに

わが国の貨物輸送は、交通機関別重量分担率が2000年時点でトラックが83.2%となっており、トラック輸送に依存している。これは、生産ペースに合わせた原材料供給や、消費者ニーズに対応した配送などを目的とした少量多頻度輸送化要求に対して、トラック輸送が柔軟に対応してきた結果である。

一方で近年、運輸部門からの排出ガスを原因とする地球環境への影響が指摘されているほか、2008年度上半期には世界的な供給量不足の予想から、燃料価格の高騰が見られた。これらの状況を踏まえると、今後ともトラックによる少量多頻度輸送に依存することは不可能であり、中長期的には少量多頻度輸送を前提とした貨物中継点の立地を見直す必要がある。

本研究では、輸送段階ごとに、輸送費用が輸送頻度、及び貨物中継点の立地に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、全国の地域間貨物輸送データを用いたモデル分析を行う。具体的には、1輸送あたりのロットサイズに対応するトラックサイズ決定モデルと、各地域への貨物輸送量に対応して決定される卸売・倉庫業立地モデルを推定する。

2. 使用データ

本研究では、運輸政策研究機構が実施した、全国貨物純流動3日間調査から得られる年間流動量データを、各生活圏別に集計した個票データを用いる。調査年次は1980年、1990年、2000年(第3回、第5回、第7回調査)の3時点であり、発着地域は都道府県を都市圏単位で細分化した207地域生活圏ゾーンである。ただし、本研究ではトラック物流を対象とするため、直接道路で接続されていない沖縄県や離島などの生活圏を除いた194生活圏を分析対象とする。集計項目は発産業のほか、着産業、発地域、着地域、輸送品目、輸送手段、年間換算輸送件数、および年間換算輸送重量である。このうち発産業は、出荷量の多い鉱業、製造業、卸売業、倉庫業の4産業に分類されている。対象貨物は生

産・仕入れ・販売活動等に伴って調査対象事業所に入荷される原材料、製品、商品等の物資である。

3. 国内貨物輸送の推移

輸送段階による輸送の特徴の違いを考慮するため、発着業種を生産業種、流通業種、消費業種に分類し、各業種を以下のように定義する。

- ・生産業種…輸送された貨物の品目を、別品目に加工して輸送する業種
- ・流通業種…輸送された貨物の品目を、加工せずに輸送する業種
- ・消費業種…輸送された貨物の品目を、他生活圏へ輸送せず、消費する業種

図1,2に、分類した業種間の貨物輸送について、発業種が生産または流通業種のときの配送先業種への輸送件数を、それぞれ示す。流通業種発の輸送件数は、1990年以降も増加傾向にある。これは、高速道路網整備による所要時間短縮に加えて、消費者ニーズの多様化によって、流通業種による小口輸送の需要が増加したためと考えられる。また、生産業種間、流通業種間などの同一業種間の輸送件数が増加する傾向にある。

輸送品目情報は、大分類では8品類(農水産品、林産品、鉱産品、金属機械工業品、化学工業品、軽工業品、雑工業品、特殊品)であり、小分類では50種類にのぼる。本研究では大分類に加えて、輸送品の生産段階との対応を考慮して、輸送品目を「原材料」、「中間製品」、「最終製品」の3種類に分類した。これらの分類基準は消費業種への輸送重量の割合であり、以下のように定義する。

- ・原材料 …消費業種への輸送重量が20%未満
- ・中間製品…消費業種への輸送重量が50%未満
- ・最終製品…消費業種への輸送重量が50%以上

輸送ロットサイズの指標として、トラックサイズ s を定義する。トラックサイズ s は、各トラックの最大積載重量 v^s に対応して、軽(v^1 :0.35トン未満)、小型(v^2 :0.35トン以上3トン未満)、中型(v^3 :3トン以上

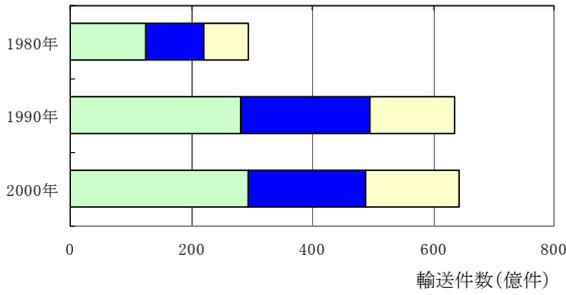


図1 業種別発生輸送件数(生産業種発)

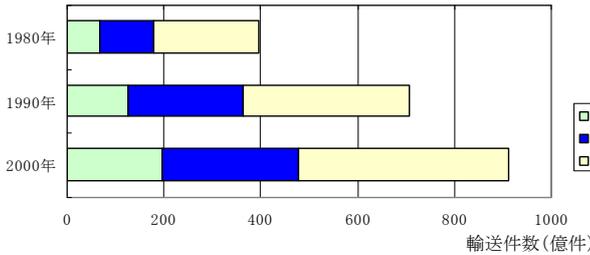


図2 業種別発生輸送件数(流通業種発)

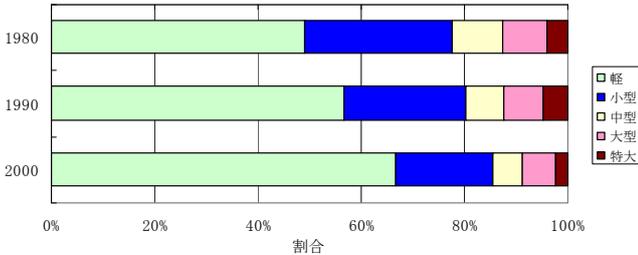


図3 トラックサイズ別輸送分担率

6.5 トン未満), 大型(v^4 : 6.5 トン以上 15 トン未満), 特大(v^5 : 15 トン以上)の5種類を定義する。観測レコード l に記録されている観測地域 ij 間の貨物輸送の年間換算重量を w_{ij}^l , 年間換算輸送件数を N_{ij}^l とすると, 1輸送あたりの輸送重量 w_{ij}^l は, 式(1)から求められる。

$$w_{ij}^l = \frac{W_{ij}^l}{N_{ij}^l} \quad (1)$$

図3に, 1980年, 1990年, および2000年における, トラックサイズ別の全トラック輸送重量に対する分担率を示す。経年的に軽の分担率が増加し, その他の分担率が減少していることがわかる。2000年には軽, 小型を合わせた分担率が80%を越えており, 輸送の少量多頻度化が進んでいることが確認された。

4. トラックサイズ決定モデル

式(1)を用いて得られる観測されたレコード l の, 利用トラックサイズを δ_{ij}^{sl} と表す。ただし δ_{ij}^{sl} は, レコード l がトラックサイズ s のときに1, そうでないとき

表1 モデル推定結果

説明変数	1980年		1990年		2000年	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
所要時間 α_1	43.78	13.69 **	-13.59	-4.75 **	-13.05	-6.83 **
走行費 α_2	-12.10	-16.52 **	-0.17	-0.34	-0.42	-1.15
農水産品(原材料)	-410.52	-17.53 **	-270.09	-15.02 **	-404.71	-20.58 **
農水産品(中間製品)	-405.03	-16.77 **	-327.75	-16.33 **	-72.73	-9.80 **
林産品(原材料)	-572.86	-13.46 **	-154.33	-9.52 **	-448.67	-7.31 **
林産品(中間製品)	-298.09	-7.61 **	3.83	4.58 **	-47.80	-4.04 **
鉱産品(原材料)	-431.61	-9.42 **	-552.67	-10.35 **	-499.70	-10.08 **
金属機械工業品(原材料)	-328.04	-23.24 **	-58.59	-13.10 **	-49.02	-10.51 **
金属機械工業品(中間製品)	-410.85	-19.75 **	-33.17	-6.07 **	0.11	0.03
化学工業品(原材料)	-463.89	-33.00 **	-46.36	-13.36 **	-44.75	-12.18 **
化学工業品(中間製品)	-509.08	-6.60 **	-51.45	-3.28 **	-89.47	-3.52 **
化学工業品(最終製品)	-506.37	-8.54 **	-385.23	-8.99 **	-158.18	-7.45 **
軽工業品(原材料)	-706.75	-25.88 **	-61.98	-11.90 **	-100.15	-13.88 **
軽工業品(中間製品)	-383.28	-17.48 **	-89.55	-10.20 **	-124.26	-14.85 **
雑工業品(中間製品)	-738.47	-15.33 **	4.43	6.42 **	-102.90	-8.92 **
特殊品(原材料)	-512.07	-12.10 **	-404.72	-11.53 **	-512.90	-11.21 **
定数項(軽)	3.64	99.91 **	4.23	88.47 **	4.56	86.36 **
定数項(小型)	1.42	42.06 **	1.92	40.58 **	2.31	43.31 **
定数項(中型)	0.63	17.48 **	1.36	28.56 **	1.95	37.02 **
定数項(大型)	0.04	1.12	0.70	13.97 **	1.23	22.37 **
サンプル数	22249		19283		22369	
初期尤度	-35808.38		-31034.79		-36001.52	
最終尤度	-21258.99		-16293.08		-19059.98	
尤度比	0.406		0.475		0.471	

** : 1%有意

に0をとるダミー変数である。トラックサイズ決定モデルは, 観測トラックサイズ δ_{ij}^{sl} が, 輸送一般化費用の最小化仮定によって決定されると仮定して, 各費用項目の一般化費用への換算パラメータを求めるモデルである。

観測レコード l の輸送重量 w_{ij}^l を一定として, w_{ij}^l の貨物をトラックサイズ s によって輸送する場合の輸送回数 N_{ij}^{sl} を式(2)から算出し, N_{ij}^{sl} 回の輸送にかかる一般化費用 x_{ij}^{sl} を式(3)より定義して, 観測されたトラックサイズを決定する5項選択モデルを推定した。

$$N_{ij}^{sl} = \frac{W_{ij}^l}{V^s} \quad (2)$$

$$x_{ij}^{sl} = N_{ij}^{sl} \left\{ \alpha_1 \{ \lambda_i t_{ij}^l + (1 - \lambda_i) t_{ij}^{ll} \} + \alpha_2 (d_{ij}^l e^s f^s + \lambda_i x_{ij}^{sl}) + \sum_k \beta_k g_k^l \right\} + c^s + \varepsilon_{ij}^{sl} \quad (3)$$

ここで, V^s はトラックサイズ s の最大積載重量, λ_i は生活圏 ij ごとの貨物車の高速道路利用率, t_{ij}^l は生活圏 ij 間の高速道路利用時の所要時間, t_{ij}^{ll} は国道利用時の所要時間, d_{ij}^l は生活圏 ij 間の距離, e^s は輸送効率, f^s は燃料費, x_{ij}^{sl} は高速道路利用料金, g_k^l は輸送品目を表すダミー変数, c^s は選択肢 s の定数項, ε_{ij}^{sl} は誤差項, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_k$ はパラメータである。業種別の推定結果のうち, 流通-生産業種間の推定結果を表1に示す。

1990年, 2000年の所要時間, 走行費のパラメータが負となり, 所要時間が短く, 走行費が安いトラックサイズが選択されやすいという, 妥当な結果が得られた。品目別のパラメータに着目すると, 鉱産品(原材料), 特殊品(原材料)などについて, 極めて小さな値が推定されており, 最大積載量の大きなトラックが選択されやすいという結果が得られた。

5. 流通施設数モデル

5.1 生活圏別在庫量の推定

流通施設の品目別在庫量 I_i^g は、通常の需要状態を想定した流通在庫 I_i^{gU} と、需要の変動に備え、品切れを防ぐためにもつ安全在庫 I_i^{gV} の和として、式(4)で与えられる。本研究では、流通在庫 I_i^{gU} は、地点 i に立地する流通業者が配送先の地点 j から要求される輸送 1 件あたりの重量 w_{ij} の総和であり、式(5)によって算出する。また、安全在庫 I_i^{gV} は、配送先の地点 j からの品目 g の需要のばらつきと品切れ確率の関数であり、確率的在庫モデルを用いて、式(6)によって求める。

$$I_i = \sum_g I_i^{gU} + \sum_g I_i^{gV} \quad (4)$$

$$I_i^{gU} = \sum_j \sum_l w_{ij}^{gl} \quad (5)$$

$$I_i^{gV} = \sum_j z \hat{\sigma}_i^g \sqrt{\hat{L}_{ij}^{gl} + 1} \quad (6)$$

ここで、 z は品切れの程度を表すパラメータであり、以下 5% ($z=1.96$) と仮定した。 $\hat{\sigma}_i^g$ は地点 i における品目 g の需要のばらつき、 \hat{L}_{ij}^{gl} は品目別リード時間 (平均輸送時間間隔) である。

需要のばらつき $\hat{\sigma}_i^g$ は、各生活圏ですべての輸送品目が観測されているわけではないので、全品目 g について全生活圏 i の値を求めることができない。そこで、 $\hat{\sigma}_i^g$ については式(7)に示す品目ごとの 1 輸送あたりの輸送重量の標準偏差 σ^g を用いて、輸送品目ごとの 1 輸送あたりの輸送重量の平均 \bar{w}^g 、および輸送品目ごと、発地域ごとの 1 輸送あたりの輸送重量 \bar{w}_i^g の平均から、式(8)のように求める。

$$\sigma^g = STD[w_{ij}^{gl}] \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_i^g = \bar{w}_i^g \times \frac{\sigma^g}{\bar{w}^g} \quad (8)$$

なお \bar{w}_i^g は、表 1 のパラメータ推定結果より、1 輸送あたりの期待輸送重量 \hat{w}_{ij}^g の期待値として算出する。

リード時間 \hat{L}_{ij}^{gl} は、以下の手順で算出する。すなわち、年間倉庫稼動時間を T 、トラックサイズ決定モデルから得られる品目 g の輸送回数を \hat{N}_{ij}^g とすると、式(9)に示す品目 g 、観測レコード l ごとのリード時間の、式(10)に示す輸送品目別の平均値によって求める。ただし、 n_{ij}^{gl} は品目 g で地域 ij 間を輸送されたレコード数である。本研究では、 T を 260 日とする。以上の手順で

生産、流通、消費の各業種の流通在庫量、安全在庫量、および総在庫量を、生活圏別に推定した。

$$\hat{L}_{ij}^l = \frac{T}{\hat{N}_{ij}^l} \quad (9)$$

$$\hat{L}_{ij}^g = \frac{1}{n_{ij}^{gl}} \sum_l \hat{L}_{ij}^{gl} \quad (10)$$

5.2 流通施設数の推定

生活圏単位での流通施設の立地量は、生活圏ごとの発輸送件数に比例すると仮定して、式(11)のパラメータを非線形回帰分析によって推定する。また、品目や着輸送業種における輸送特性の違いを考慮するために、式(11)におけるパラメータ $\kappa_p, \kappa_l, \kappa_c$ を、式(12)のように設定する。

$$E_i = \kappa_p N_i^p + \kappa_l N_i^l + \kappa_c N_i^c + \varepsilon_i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \kappa_p &= \exp(\kappa_p^U I_i^U + \kappa_p^V I_i^V + \kappa_p^c) \\ \kappa_l &= \exp(\kappa_l^U I_i^U + \kappa_l^V I_i^V + \kappa_l^c) \\ \kappa_c &= \exp(\kappa_c^U I_i^U + \kappa_c^V I_i^V + \kappa_c^c) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 E_i は生活圏 i の流通施設数、 N_i^p は生産業種への輸送件数、 N_i^l は流通業種への輸送件数、 N_i^c は消費業種への輸送件数、 ε_i は生活圏 i における誤差項、 $\kappa_p^U, \kappa_p^V, \kappa_p^c, \kappa_l^U, \kappa_l^V, \kappa_l^c, \kappa_c^U, \kappa_c^V, \kappa_c^c$ はパラメータである。

表 2 に、生活圏別流通施設数モデルの結果を示す。なお、推定結果の安定性を確保するため、1990 年次は $\kappa_c^U = 0$ 、2000 年次は $\kappa_p^V = 0, \kappa_l^U = 0$ と推定する。定数項を除くパラメータ推定値を経年的に比較すると、1980 年では流通-生産、流通-消費の流通在庫パラメータが負で有意となり、流通在庫の多い生活圏では施設数が少数に集約される傾向がみられる。一方、流通-流通の流通在庫と安全在庫は、いずれも正で有意となった。これは、流通業間では流通チャンネルが分化していて、チャンネル別に需要のばらつきや流通のばらつきに対応する物流態勢がとられていたことがわかる。

1990 年では、流通-生産、流通-流通の流通在庫パラメータが、いずれも負で有意となった。すなわち、流通在庫が多い生活圏の流通施設数は、いずれも少数に集約化される傾向がみられる。一方、安全在庫については流通-生産は負、流通-流通は正となり、需要のばらつきと施設数の関係が流通段階によって異なる結果となった。

2000 年では、有意なパラメータは流通-消費の流通

表 2 流通施設数推定結果

説明変数	1980年	1990年	2000年
定数項(流通-生産) κ_p^c	-1.03E+01 **	-9.48E+00 **	-1.15E+01 **
流通在庫(流通-生産) κ_p^u	-2.11E-04 *	-2.80E-04 **	8.48E-05
安全在庫(流通-生産) κ_p^v	9.45E-02	-3.77E+00 *	
定数項(流通-流通) κ_l^c	-1.07E+01 **	-1.22E+01 **	-1.13E+01 **
流通在庫(流通-流通) κ_l^u	1.41E-05 **	-1.84E-04	
安全在庫(流通-流通) κ_l^v	1.15E-01 **	7.08E-02 **	-7.51E-03
定数項(流通-消費) κ_c^c	-1.02E+01 **	-1.12E+01 **	7.08E-02 **
流通在庫(流通-消費) κ_c^u	-1.25E-03 **		-1.12E+01 **
安全在庫(流通-消費) κ_c^v	3.72E-02	2.67E-02	2.67E-02
重相関係数	0.896	0.946	0.955
重決定係数	0.892	0.944	0.954
サンプル数	194		

**:1%有意, *:5%有意

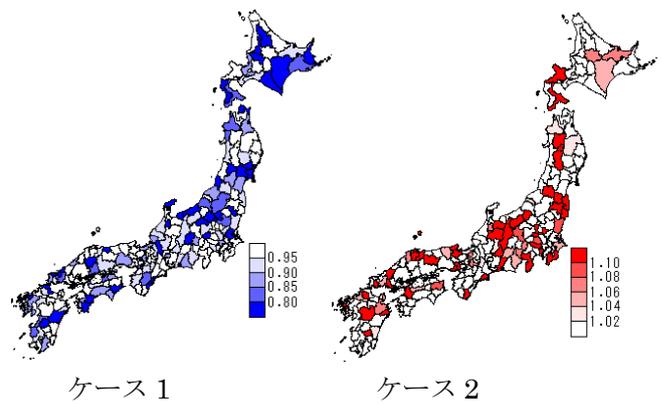
在庫のみとなった。すなわち、流通在庫に関して規模の経済性が働いて施設数が集約されるのは、流通-消費間のみという結果となった。

6. 輸送費用変化のシミュレーション分析

2008 年度上半期に起きた燃料価格に相当する高騰が起きた場合(ケース 1)と、高速道路利用料金の値下げが行われた場合(ケース 2)についてシミュレーションを行い、輸送費用の変化が輸送頻度、貨物中継施設立地量に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、トラックサイズ決定モデル、流通施設数モデルの 2000 年次のパラメータを用いて、輸送費用の変化による期待輸送回数、および流通施設数の変化を明らかにする。

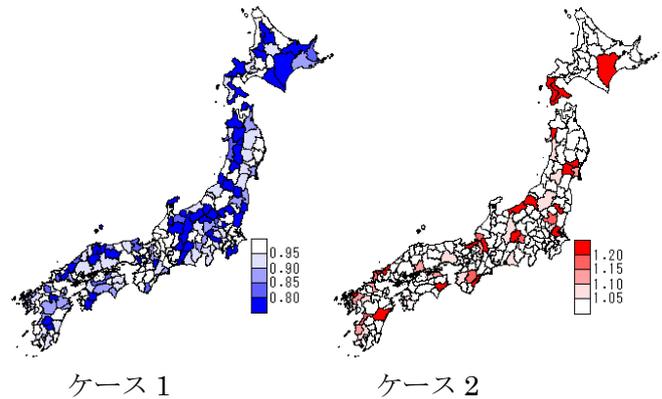
図 4 に、シミュレーションによって得られた年間総輸送回数と期待年間輸送回数の比を示す。ケース 1 では、高速道路未整備地域や、大量消費地から離れた地域において、生活圏間の輸送回数が大幅に減少する傾向が見られた。すなわち、郊外から大量消費地への輸送頻度は維持されるが、長距離輸送を行う必要がある地域からの輸送頻度は大きく減少している。また、ケース 2 では、東北自動車道の沿線にあたる生活圏や岐阜や長野といった内陸部、山陰地方などからの輸送頻度が大きく増加している。これらの地域は、消費地と離れており、高速道路料金の定率値下げが大幅な輸送費用の減少をもたらすためと考えられる。

図 5 に、流通施設数のシミュレーション結果を示す。ケース 1 では、日本海側を中心に全国的に減少している。しかし、東京や福岡、名古屋といった大都市の生活圏ではあまり減少しない。大都市近郊での輸送は輸送距離が短く、燃料価格の上昇による輸送費用の上昇



ケース 1 ケース 2

図 4 輸送回数変化のシミュレーション結果



ケース 1 ケース 2

図 5 流通施設数変化のシミュレーション結果

が少ないため、流通施設立地数に大きな変化が起こらないと考えられる。ケース 2 では、流通施設数が全国的に増加しており、特に函館、新潟の増加率が大きい。函館は北海道-本州間の輸送の中継点であるため、大幅に流通施設数が増加したと考えられる。新潟は、大量消費地までの距離が遠いため、高速道路料金の割引が大幅な輸送費用の低下につながったと考えられる。

7. まとめ

輸送回数と施設立地数に関するシミュレーション分析により、輸送費用の上昇によって、東京などの都市部への貨物輸送量は大きく減少しないが、高速道路に接続されていない地域や、都市部から離れた地域において、輸送回数、流通施設数が大幅に減少すること、および高速道路利用料金の低下は、地域間の結節点となっている地点の流通施設数を増加させることが明らかとなった。

<参考文献>

大形哲也：物流拠点の立地に着目した全国高速道路網整備効果の検証，広島大学平成 19 年度卒業論文，2007