



需要の不確実性下におけるリソースシェアリングを伴うマルチサプライヤ協調型物流ネットワークに関する研究（第2報，共同貨物輸送方式の比較と費用配分手法の提案）

伊東，明日美
貝原，俊也
國領，大介

(Citation)

日本機械学会論文集, 90(929):23-00221

(Issue Date)

2024-01-25

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2024 The Japan Society of Mechanical Engineers
クリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンス

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100491631>



需要の不確実性下におけるリソースシェアリングを伴う マルチサプライヤ協調型物流ネットワークに関する研究 (第2報, 共同貨物輸送方式の比較と費用配分手法の提案)

伊東 明日美^{*1}, 貝原 俊也^{*1}, 國領 大介^{*1}

A study on multi-supplier collaborative logistics network with resource sharing under demand uncertainty (Second report, a comparative analysis of shared freight transport and a proposal of cost allocation method)

Asumi ITO^{*1}, Toshiya KAIHARA^{*1} and Daisuke KOKURYO^{*1}

^{*1} Graduate School of System Informatics, Kobe University
1-1 Rokkodai, Nada, Kobe-shi 657-8501, Japan

Received: 27 July 2023; Revised: 12 October 2023; Accepted: 5 January 2024

Abstract

Due to the shortage of truck drivers, the challenge of improving transportation efficiency through collaboration has been receiving increased attention by both government and private sector. We propose a new methodology to introduce a two-stage stochastic program and cooperative game theory to design a transport network that incorporates truck sharing and Less-Than-Truckload (LTL) shipping under demand uncertainty. The method is focused on the number of suppliers' own trucks in the first stage, and the flow of parts and trucks from suppliers to manufacturers and in the second stage. We analyze the value of collaboration on three different sets of demand scenarios with two manufacturers and four collaborating suppliers. Our analysis suggests that LTL shipping can reduce the number of trucks more than FTL (Full TruckLoad) shipping when the demand is expected to increase. It is also observed that LTL shipping can be more beneficial than 3PL even for long-distance transportation and reduces the total cost about twice as much as FTL shipping does, which is more than 5% of that of the non-collaborative scenario. Further, LTL shipping cost is allocated to each supplier according to the Shapley value. The results show that LTL shipping is a more cost-effective transportation mode for suppliers with high freight volumes and trucks, and all suppliers acquire cost reduction at almost the same rate.

Keywords : Logistics network, Resource sharing, Two-stage stochastic program, Collaborative logistics

1. 緒 言

近年、デジタル技術の進化や資源・環境問題への意識の高まりにより、資産の共有化・共用化に基づく新たなビジネスモデル（シェアリングエコノミー）が様々な分野で広がりを見せている (Castillo et al., 2018). とりわけ物流分野では、トラックやドライバの不足、輸送コストの上昇といった社会的な問題を背景に、輸送を効率化するための手段の一つとしてシェアリングに期待が寄せられる。実際、国内の一部の食品メーカーや日用品メーカーで共同配送が始まり、企業間のトラックの貸し借りや共同配送を仲介するトラックシェアリングサービスも登場している。

トラックシェアリングに関する研究の多くは、車両の運用上の決定に焦点を当てている。Bergmann らは、集荷と配送を同一車両で行うためのルート最適化アルゴリズムを提案した (Bergmann et al., 2020). Wang らは、複数の配送センターの生鮮食品を一台の冷凍車でまとめて輸送するための輸送ルートと設定温度の最適化アルゴリズム

No.23-00221 [DOI:10.1299/transjsme.23-00221], J-STAGE Advance Publication date : 15 January, 2024

^{*1} 正員, 神戸大学大学院 システム情報学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail of corresponding author: asumi_ito@kind.ocn.ne.jp

を提案した (Wang et al., 2021). これらの研究は、企業がすでに保有しているトラックを活用して最小限のコストで貨物を輸送するための解決策となる可能性があるが、さらなる物流の効率化のためには、利用可能なトラックの台数や施設の場所等に関する戦略も検討の対象とすべきである (Schneider and Drexler, 2017).

そこで前報では、トラックシェアリングを組み込んだ共同輸送ネットワークにおけるトラックの台数と輸送の意思決定を最適化するための確率計画モデルを提案した (伊東他, 2023). 第 1 段階では輸送需要の不確実性を考慮してトラックの台数が決定され、第 2 段階では輸送モード毎の貨物の輸送量が決定される. リソースの利用度を高めて需要と供給の不均衡を解消するというシェアリングのコンセプトを検証すべく、実環境を想定して需要の変動幅や上振れ・下振れのリスク、相関の有無が輸送コストやトラックの稼働率にどのような影響を与えるか分析した. ただし、参考としたトラックシェアリングは車両 1 台につき 1 社の貨物のみを積載する方式 (FTL: Full TruckLoad) であり、複数の荷主の貨物をまとめて輸送する方式 (LTL: Less Than Truckload) は考慮されておらず、現実の状況に比べその対象が限定的であった. LTL は輸送の集約により効率化を図ることを狙いとしているが、荷量によってその効果は変わり得る. また、集荷エリアの広さは所要時間ひいてはコストの増加に繋がるため、得られるメリットの大きさは荷主により異なる可能性がある.

したがって本報では、自車輸送、物流代行サービス (3PL) および LTL 型のシェアリングサービスが利用可能な輸送ネットワークを 2 段階確率計画法で定式化し、LTL がどのように輸送の効率化に寄与するか複数の需要環境で検証する. そして、最適なトラックの台数や輸送方法、コストを FTL 型のシェアリングサービスを利用する場合と比較することで、LTL の優位性と適した条件を明らかにする. また、LTL 特有の検討点として複数の荷主によるコストの負担方法がある. LTL を多人数協力ゲームの一例と捉え、シャープレイ値を用いて各荷主の負担額を算出する方法を提案し、輸送量や輸送距離がシェアリングサービスを利用するメリットにどの程度影響を与えるか定量評価を行う.

2. 問題設定

2.1 サプライチェーン

サプライヤーはアセンブリメーカー (以下、メーカー) 各社から部品を受注している. 部品の受注数はメーカーが販売する製品の需要に応じて変動する. サプライヤーは輸送コストを抑えつつ機会損失を減らすように、所有するトラックと物流プロバイダ (以下、プロバイダ) が提供する 3PL およびトラックシェアリングサービスを利用して納品を行う. 問題の簡単化のため、製品および部品の在庫は考慮しない. 部品はその製造者であるサプライヤーの拠点にあり、集荷は各拠点で行われる. また 1 台のトラックが 2 回以上、サプライヤーとメーカーを往復することはない. 複数のメーカーを巡回して納品することもない.

2.2 輸送モード

部品の輸送にあたり、自車輸送、3PL およびトラックシェアリングの 3 種類のオプションを想定する. 自車輸送と 3PL については前報の定義によるものとし (伊東他, 2023), 本節では 2 つのトラックシェアリングの方式について述べる. 輸送モードとコスト項目の関係は表 1 に示すとおりであり、トラックシェアリングのコスト構造は方式によらず共通である.

第一のトラックシェアリングの方式は「FTL 型のシェアリング」と称し、他のサプライヤーまたはプロバイダが所有するトラックを 1 社で貸し切り、部品を輸送する方式である. FTL 型のシェアは輸送コストの低減やトラックの稼働率の向上に寄与するが、1 社の貨物のみでトラックを満載にするのは難しく、必ずしも輸送効率が良いとは限らない. そこで、トラックのキャパシティ (荷台) を複数の荷主で共有し、輸送効率を高めることを目指しているのが第二の方式「LTL 型のシェアリング」である. 本報の眼目はこの 2 方式を比較し、キャパシティの共有の価値を評価することにある.

シェアリングを利用した場合、トラックは所有者のもとを出発後、集荷のため 1 つ以上のサプライヤーを経由して倉庫へ向かい、納品後は所有者のもとに帰着する. LTL 型では、複数拠点で集荷をすると走行距離が長くなり、荷役作業の回数も多くなる. シェアリングのコストは走行距離と利用時間に比例するため、LTL ではトラックの貸し手と借り手、積載量だけでなく、経由するサプライヤーの順もコストを踏まえて決定する必要がある. ただし、

荷量やコストに起因して FTL 型と同様に 1 社の部品しか積載しない状況も起こり得る. FTL 型のシェアリングサービスを利用した荷主はレンタル料, サービス手数料およびマイレージをトラックの所有者とプロバイダに支払う必要があるが, LTL 型の場合にはトラックを共同利用したすべての荷主でこれらを負担する.

Table 1 Costs of transportation modes.

Item		Self-transportation	3PL	Truck sharing
Fixed cost	Depreciation	x		
	3PL base fee		x	
Variable cost	Rental rate			x
	Service fee			x
	Labor cost	x		x
	Fuel cost	x		x
	Freight charge		x	
	Mileage			x

3. 定式化

キャパシティの共有によるコスト低減効果を検証するため, 3 種類の物流ネットワーク (表 2) を比較する. 前報では, 自転車輸送と 3PL を利用可能なネットワークと, これらに加えて FTL 型のシェアリングサービスを利用可能なネットワークについて定式化を行った (伊東他, 2023). 本報では前者を非協調型ネットワーク, 後者を準協調型ネットワークと称し, LTL 型のシェアリングサービスを利用可能なネットワークを協調型ネットワークとして新たに定式化を行う. なお, LTL 型は 1 社または複数社の部品を 1 台のトラックで輸送する点で FTL 型を兼ねるため, 表 2 において協調型ネットワークは FTL も利用可能としている.

Table 2 Logistics networks and transportation modes.

Transportation mode		Network type		
		Non-collaborative	Semi-collaborative	Collaborative
Self-transportation		x	x	x
3PL		x	x	x
Truck sharing	FTL		x	x
	LTL			x

モデル中で使用される集合, パラメータおよび決定変数を表 3 から 5 に示す. 本報では LTL に関する決定変数を新たに定義し, その他の決定変数とパラメータは前報 (伊東他, 2023) と同じものを使用する. 目的関数をサプライヤグループ全体のコスト, すなわちトラックの減価償却費, 部品の輸送コストおよび機会損失の期待値の和として 2 段階確率計画法に基づき定式化する. 第 1 段階ではサプライヤが所有するトラックの台数 N_i^0 を決定し, 第 2 段階では N_i^0 と需要 β_{mw} の条件の下で部品およびトラックのフローを決定する. FTL 型のシェアリングでは利用者は 1 社に限られるため, トラックの所有者および借り手ならびに納品先に紐づく部品の輸送量と利用台数を第 2 段階変数とすることで, 部品とトラックの移動を把握できる. 一方 LTL 型のシェアリングでは利用者は複数の場合があり, トラックのルートは一意に決まらない. 移動経路も併せて最適化するため車両を識別した上で, 積載している部品のサプライヤと数量, 区間毎の移動の有無を表す第 2 段階変数を用いる.

Table 3 Sets.

Sets	Description
$i \in I / j \in J$	Suppliers
$m \in M$	Manufacturers
$w \in W$	Scenarios
$v \in V^S$	Trucks of suppliers' own
$v \in V^3$	Trucks of 3PL' own

Table 4 Parameters.

Parameters	Description
τ_{ij}^{SS}	Distance between supplier i and supplier j
τ_{im}^{SM}	Distance between supplier i and manufacturer m
τ_i^{3S}	Distance between 3PL provider and supplier i
τ_m^{3M}	Distance between 3PL provider and manufacturer m
β_{mw}	Manufacturer m 's product demand in scenario w
π_w	Probability of scenario w
ρ_i	Parts sales price
σ	Maximum capacity of trucks
φ_i	Number of supplier i 's parts required per a product
κ^{3F}	3PL base fee
κ^{3V}	Freight charge per distance
κ^{SF}	Rental rate per hour
κ^{SV}	Mileage
κ^O	Depreciation
θ	Service fee rate
ε^L	Labor cost per hour
ε^F	Fuel cost per distance
λ	Loading time
γ	Truck speed

Table 5 Decision variables.

Variables	Description
N_i^O	Number of trucks owned by supplier i
Self-transportation	
N_{imw}^S	Number of supplier i 's trucks that move to manufacturer m in scenario w .
X_{imw}^S	Number of supplier i 's parts transported to manufacturer m in scenario w
3PL	
N_{imw}^3	Number of provider's trucks that move from supplier i to manufacturer m in scenario w .
X_{imw}^3	Number of supplier i 's parts transported to manufacturer m in scenario w
FTL	
U_{ijmw}	Number of supplier j 's trucks that move from supplier i to manufacturer m in scenario w
V_{imw}	Number of provider's trucks that move from supplier i to manufacturer m in scenario w

Y_{ijmw}^S	Number of supplier i 's parts transported to manufacturer m by supplier j 's truck in scenario w
Y_{imw}^3	Number of supplier i 's parts transported to manufacturer m by provider's truck in scenario w
LTL	
Z_{imvw}^S	Number of supplier i 's parts transported to manufacturer m by supplier's truck v in scenario w
Z_{imvw}^3	Number of supplier i 's parts transported to manufacturer m by provider's truck v in scenario w
R_{ijvw}^S	Binary variable to indicate if supplier's truck v moves from supplier i to supplier j in scenario w .
R_{ijvw}^3	Binary variable to indicate if provider's truck v moves from supplier i to supplier j in scenario w .
R_{imvw}^{SM}	Binary variable to indicate if supplier's truck v moves from supplier i to manufacturer m in scenario w .
R_{imvw}^{3M}	Binary variable to indicate if provider's truck v moves from supplier i to manufacturer m in scenario w .
A_{imvw}^S	Binary variable to indicate if supplier's truck v moves from manufacturer m to supplier i in scenario w .
A_{ivw}^3	Binary variable to indicate if provider's truck v moves from provider to supplier i in scenario w .

(1) 協調型ネットワーク

協調型では自車輸送, 3PL および LTL 型のシェアリングを利用可能である. 目的関数の第 1 項は所有するトラックの減価償却費であり第 1 段階費用に該当する. 以降の項はリソース費用であり, 順に自車輸送のコスト, 3PL のコスト, サプライヤのトラックを利用したシェアリングのコスト, プロバイダのトラックを利用したシェアリングのコスト, 機会損失である. ここで w はシナリオを表し, 各シナリオの実現確率は π_w である.

$$\text{Min } \sum_i \kappa^0 N_i^0 + \sum_w \pi_w \{C^{\text{Self}} + C^{3\text{PL}} + C^{\text{Share1}} + C^{\text{Share2}} + C^{\text{Loss}}\} \quad (1)$$

$$C^{\text{Self}} = \sum_i \sum_m N_{imw}^S \{2\tau_{im}^{SM} \varepsilon^F + (\frac{2\tau_{im}^{SM}}{\gamma} + \lambda) \varepsilon^L\} \quad (2)$$

$$C^{3\text{PL}} = \sum_i \sum_m N_{imw}^3 (\kappa^{3F} + \tau_{im}^{SM} \kappa^{3V}) \quad (3)$$

シェアリングの利用者 (借り手) は手数料をプロバイダに, レンタル料から手数料を差引いた残額とマイレージを所有者 (貸し手) に支払う必要がある. サプライヤのトラックを借りた場合, 借り手も貸し手もサプライヤであるため, 式 (4) においてサプライヤグループ全体のコストとして計上するのは燃料費と手数料, 人件費のみとなっている. プロバイダのトラックを借りた場合, 式 (5) で表されるようにシェアリングに係るすべてのコストが含まれる.

$$C^{\text{Share1}} = D_w^S \varepsilon^F + \{\frac{D_w^S}{\gamma} + \lambda \sum_{v \in V^S} (\sum_i \sum_j R_{ijvw}^S + \sum_i \sum_m R_{imvw}^{SM})\} (\theta \kappa^{SF} + \varepsilon^L) \quad (4)$$

$$C^{\text{Share2}} = D_w^3 (\varepsilon^F + \kappa^{SV}) + \{\frac{D_w^3}{\gamma} + \lambda \sum_{v \in V^3} (\sum_i \sum_j R_{ijvw}^3 + \sum_i (\sum_m R_{imvw}^{3M} + A_{imvw}^3))\} (\kappa^{SF} + \varepsilon^L) \quad (5)$$

ここで D_w^S と D_w^3 は, シェアリングに利用されたサプライヤとプロバイダのトラックの総走行距離であり, 式 (6) および (7) で表される. 走行距離と利用時間は, 区間毎のトラックの移動の有無を表す二値変数によって求められる.

$$D_w^S = \sum_i \sum_{v \in V^S} \{\sum_j R_{ijvw}^S \tau_{ij}^{SS} + \sum_m (R_{imvw}^{SM} + A_{imvw}^S) \tau_{im}^{SM}\} \quad (6)$$

$$D_w^3 = \sum_i \sum_{v \in V^3} \left\{ \sum_j R_{ijvw}^3 \tau_{ij}^{SS} + \sum_m (R_{imvw}^{3M} \tau_{im}^{SM} + R_{imvw}^{3M} \tau_m^{3M}) + A_{ivw}^3 \tau_i^{3S} \right\} \quad (7)$$

機会損失はメーカーの必要数に対する納品数の不足分から求められる。

$$C^{Loss} = \sum_i \sum_m \rho_i (\beta_{mw} \varphi_i - X_{imw}^S - X_{imw}^3 - \sum_{v \in V^S} Z_{imvw}^S - \sum_{v \in V^3} Z_{imvw}^3) \quad (8)$$

制約条件を以下に示す。式(9)は自転車輸送およびシェアリングで利用したサプライヤ所有のトラックの台数が、所有台数を超えてはならないことを表す。式(10)は納品数がメーカーの必要数を超えてはならないことを表す。式(11)は自転車および3PLで輸送された部品数が、使用したトラックの最大積載量を超えてはならないことを表す。式(12)から(21)はシェアリングの走行ルートに関する制約である。サプライヤまたはプロバイダを出発したトラックは、1社以上のサプライヤと1社のメーカーに立ち寄って出発地に戻る。同じ場所に複数回立ち寄ることはない。シェアリングに利用された各トラックについて、式(22)は積載量が最大積載量を超えないことを、式(23)は立ち寄ったサプライヤの部品しか積載できないことを表す。

$$\sum_m (N_{imw}^S + \sum_{v \in V^S} A_{imvw}^S) \leq N_i^O \quad (9)$$

$$X_{imw}^S + X_{imw}^3 + \sum_{v \in V^S} Z_{imvw}^S + \sum_{v \in V^3} Z_{imvw}^3 \leq \beta_{mw} \varphi_i \quad (10)$$

$$1 + \sigma(N_{imw}^\delta - 1) \leq X_{imw}^\delta \leq \sigma N_{imw}^\delta \quad \delta = S, 3 \quad (11)$$

$$\sum_m A_{imvw}^S = \sum_j R_{ijvw}^S + \sum_m R_{imvw}^{SM} - \sum_j R_{jivw}^S \quad (12)$$

$$A_{ivw}^3 = \sum_j R_{ijvw}^3 + \sum_m R_{imvw}^{3M} - \sum_j R_{jivw}^3 \quad (13)$$

$$\sum_j R_{ijvw}^\delta + \sum_m R_{imvw}^{\delta M} \leq 1 \quad \delta = S, 3 \quad (14)$$

$$\sum_j R_{jivw}^\delta \leq 1 \quad \delta = S, 3 \quad (15)$$

$$\sum_i A_{imvw}^S = \sum_i R_{imvw}^{SM} \quad (16)$$

$$\sum_i A_{ivw}^3 = \sum_i \sum_m R_{imvw}^{3M} \quad (17)$$

$$\sum_i \sum_m A_{imvw}^S = \sum_i \sum_m R_{imvw}^{SM} \leq 1 \quad (18)$$

$$\sum_i A_{ivw}^3 = \sum_i \sum_m R_{imvw}^{3M} \leq 1 \quad (19)$$

$$\sum_j R_{jivw}^S - \sum_m R_{imvw}^{SM} \geq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{j \in G} (R_{ijvw}^\delta + R_{jivw}^\delta) \leq |G| - 1 \quad G \in I, \delta = S, 3 \quad (21)$$

$$\sum_i Z_{imvw}^{\delta M} \leq \sigma \sum_j R_{jmvw}^{\delta M} \quad \delta = S, 3 \quad (22)$$

$$\sum_m Z_{imvw}^{\delta M} \leq \sigma \left(\sum_j R_{ijvw}^\delta + \sum_m R_{imvw}^{\delta M} \right) \quad \delta = S, 3 \quad (23)$$

(2) 準協調型ネットワーク

準協調型ネットワークは式(24)から(31)によって定式化できる(伊東他, 2023)。準協調型ネットワークは、シェアリングサービスの利用にあたりトラック1台につき利用者が1社に限定される点で協調型ネットワークと

異なる。目的関数を構成するコストの内、トラックの減価償却費（第1項）、自転車輸送のコスト（第2項）および3PLのコスト（第3項）は協調型と共通である。シェアリングに係るコストは式（25）および（26）に示すように台数のみで表される。制約式（28）と（29）は協調型の式（9）と（10）にそれぞれ対応している。走行ルートはトラックの貸し手と借り手によって一意に決まるため、シェアリングに関する制約は式（30）および（31）に示すように輸送量と台数の関係についてのみ課される。

$$\text{Min } \sum_i \kappa^O N_i^O + \sum_w \pi_w \{C^{\text{Self}} + C^{\text{3PL}} + C^{\text{Share1}'} + C^{\text{Share2}'} + C^{\text{Loss}}\} \quad (24)$$

$$C^{\text{Share1}'} = \sum_i \sum_m \sum_j U_{jimw} \{(\tau_{ji}^{SS} + \tau_{im}^{SM} + \tau_{jm}^{SM})\varepsilon^F + (\frac{\tau_{ji}^{SS} + \tau_{im}^{SM} + \tau_{jm}^{SM}}{\gamma} + 2\lambda)(\theta\kappa^{SF} + \varepsilon^L)\} \quad (25)$$

$$C^{\text{Share2}'} = \sum_i \sum_m V_{imw} \{(\tau_i^{3S} + \tau_{im}^{SM} + \tau_m^{3M})(\kappa^{SV} + \varepsilon^F) + (\frac{\tau_i^{3S} + \tau_{im}^{SM} + \tau_m^{3M}}{\gamma} + 2\lambda)(\kappa^{SF} + \varepsilon^L)\} \quad (26)$$

$$C^{\text{Loss}} = \sum_i \sum_m \rho_i (\beta_{mw}\varphi_i - X_{imw}^S - X_{imw}^3 - \sum_j Y_{ijmw}^S - Y_{imw}^3) \quad (27)$$

s.t. (11)

$$\sum_m (N_{imw}^S + \sum_j U_{ijmw}) \leq N_i^O \quad (28)$$

$$X_{imw}^S + X_{imw}^3 + \sum_j Y_{ijmw}^S + Y_{imw}^3 \leq \beta_{mw}\varphi_i \quad (29)$$

$$1 + \sigma(U_{ijmw} - 1) \leq Y_{ijmw}^S \leq \sigma U_{ijmw} \quad (30)$$

$$1 + \sigma(V_{imw} - 1) \leq Y_{imw}^3 \leq \sigma V_{imw} \quad (31)$$

(3) 非協調型ネットワーク

非協調型ネットワークは式（32）から（34）によって定式化できる（伊東他, 2023）。目的関数を構成するコストの内、トラックの減価償却費（第1項）、自転車輸送のコスト（第2項）および3PLのコスト（第3項）は協調型と共通である。制約式（33）と（34）は協調型の式（9）と（10）にそれぞれ対応している。

$$\text{Min } \sum_i \kappa^O N_i^O + \sum_w \pi_w \{C^{\text{Self}} + C^{\text{3PL}} + \sum_i \sum_m \rho_i (\beta_{mw}\varphi_i - X_{imw}^S - X_{imw}^3)\} \quad (32)$$

s.t. (11)

$$\sum_m N_{imw}^S \leq N_i^O \quad (33)$$

$$X_{imw}^S + X_{imw}^3 \leq \beta_{mw}\varphi_i \quad (34)$$

4. 数値実験

LTL型のシェアリングを利用することで所有台数や輸送方法、ひいては物流コストがどのように変化するのかが検証するため、実在する自動車部品のサプライチェーンのデータを用いて数値実験を行う。さらに、シャープレイ値を用いてサプライヤ毎の負担額を求め、輸送量との関係について考察する。また、これらをFTL型のシェアリングを利用する場合と比較し、トラックのキャパシティを共有するメリットを定量的に評価する。モデルはGurobi Optimizer V.9.5で実装し、Intel XeonW-1290 CPU（メモリ 32.0GB）を用いて実行した。

4・1 実験条件

広島県内に位置するサプライヤ4社から同県および隣県の完成車工場に部品を出荷している。各企業間の距離は表6のとおりであり、トラックは中距離輸送に使用されることの多い4トンと仮定する。トラック1台の最大積載数 σ は64個とし、部品の販売価格と製品1個あたりの必要数は主要な自動車部品を参考に設定した（表7）。

車速 (γ) は実勢速度のデータから 60 km/h とする (国土交通省, 2015). コストパラメータ (表 8) と需要シナリオは, 前報の実験結果(伊東他, 2023)と比較することを可能とするため敢えて同じ値を用いる. 具体的にはメーカ 1 とメーカ 2 の製品の需要は平均 100 個/日と 400 個/日とし, 偏差を平均の 30%, 歪度を-0.8, 0, 0.8 に設定した. 歪度が-0.8 の時は需要が上振れしやすく, 0.8 の時は下振れしやすい (図 1). 初めに平均, 偏差および歪度によって特徴付けられる分布に従い, 累積確率が等しい 20 個の区間 ($0 \sim \frac{1}{20}, \frac{1}{20} \sim \frac{2}{20}, \dots, \frac{19}{20} \sim 1$) の中から各 1 個の値をランダムに選ぶ. 選択した 20 個の値は需要の実現値の集合であり, 実現確率はいずれの値も $\frac{1}{20}$ と見なす. そして 2 製品の実現値のすべての組合せ (β_{1w}, β_{2w}) をシナリオの集合 W とし, これを 1 つのインスタンスとする. 各シナリオ $w \in W$ の実現確率 π_w は $\frac{1}{400}$ である.

Table 6 Distance between manufacturers, suppliers and a provider.

	Supplier1	Supplier2	Supplier3	Supplier4	Provider	Manufacturer1	Manufacturer2
Supplier1	-	8.2	2.5	8.2	14.4	27	145
Supplier2	-	-	6.2	13.2	16.1	31	149
Supplier3	-	-	-	9.5	13	28	146
Supplier4	-	-	-	-	9.8	25	143
Provider	-	-	-	-	-	11.5	132

Table 7 Parts sales price and required number per product.

	Supplier1	Supplier2	Supplier3	Supplier4
Sales price (JPY)	10000	10000	12000	12000
Required number per a product (pcs)	1	1	2	2

Table 8 Cost parameters.

Parameter	Value
3PL base fee (κ^{3F})	¥14591 per truck
Freight charge per distance (κ^{3V})	¥196 per km
Rental rate per hour (κ^{SF})	¥4000 per hour
Mileage (κ^{SV})	¥9 per km
Depreciation (κ^O)	¥11030 per day
Service fee rate (θ)	20% of rental rate
Labor cost per hour (ε^L)	¥2000 per hour
Fuel cost per distance (ε^F)	¥21 per km

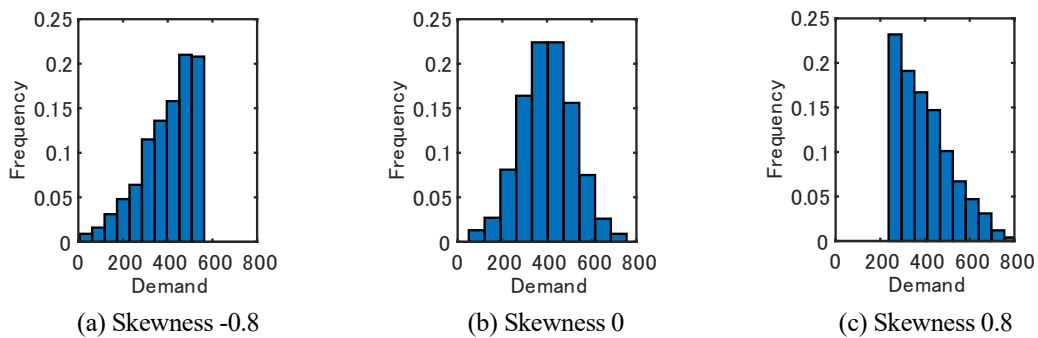


Fig. 1 Frequency of daily demand with average of 400 and deviation of 120.

4・2 シェアリングの効果の比較

歪度の異なる3条件の需要シナリオをモデルに与え、LTLのコスト低減効果を検証する。シナリオにはばらつきが有るため、各条件につき40個のインスタンスを用いて最適解と最適値を算出し、その平均値に基づいて評価を行う。なお、計算時間は1インスタンスにつき約1時間を要した。

最適な所有台数 N_i^0 を表9に示す。3種類のネットワークに共通する傾向として、歪度が小さいほど4社の合計台数が多いことが挙げられる。これは、需要の上振れが見込まれるため、より多くのトラックを所有すべきであることを意味している。協調型の合計台数は、非協調型に対して歪度が-0.8の時3台少なく、歪度が0.8の時は1台少なくなった。また準協調型に対しては歪度が-0.8の時は1台少ないが、歪度が0または0.8の時はほぼ等しく、トラックの台数低減の効果としてはLTLもFTLも同等である。

Table 9 Optimal number of supplier's own trucks. The total number of trucks of the collaborative model is one to three fewer than that of the non-collaborative model, while it is one less or almost equal to that of the semi-collaborative model. The effect of reducing the number of trucks is almost the same for FTL and LTL.

Skewness	Network	Supplier1	Supplier2	Supplier3	Supplier4	Total
-0.8	Non-collaborative	8.9	9.0	16.7	16.4	51.0
	Semi-collaborative	8.0	9.0	16.0	16.0	49.0
	Collaborative	8.0	8.0	16.0	15.9	47.9
0	Non-collaborative	8.1	8.1	16.0	16.0	48.1
	Semi-collaborative	8.0	8.0	15.1	15.0	46.1
	Collaborative	8.0	8.0	15.0	15.0	46.0
0.8	Non-collaborative	8.0	8.0	15.5	15.4	46.9
	Semi-collaborative	8.0	8.0	15.0	15.0	46.0
	Collaborative	8.0	8.0	15.0	14.9	45.9

最適解として得られた輸送モード毎の輸送量が需要に占める割合を計算し、400シナリオで平均した結果を表10に示す。メーカー1へは非協調型で60%以上を自車により、残りを3PLにより輸送している。短距離ならばFTLは3PLよりも安価なため、準協調型では自車輸送の割合は55~60%に減少し、残りをFTLで輸送している。協調型と準協調型の所有台数の差は僅か1台であるにもかかわらず、協調型では自車輸送の割合は50~56%まで減少する。これは、コスト効率の良さゆえにより多くの所有車がシェアリング(LTL)に利用されるためである。一方、メーカー2へは準協調型でも自車と3PLのみで輸送しており、シェアリング(FTL)は全く利用されない。走行距離や走行時間に比例して料金が高額になるため、長距離の輸送においては3PLよりもコスト的に不利なためである。しかし協調型ではシェアリングが3%以上を占めており、トラックのキャパシティを共有すれば輸送距離が長くてもシェアリングサービスを利用するメリットがあることを意味している。また、シェアリングに利用されたトラックについて積載率の平均値を求めると、表11に示すとおりFTLよりもLTLの方が約14%高くなった。

表12に目的関数の値と非協調型を基準とした減少率を示す。FTL型のシェアリングによるコスト低減効果が2.5%程度であるのに対し、LTL型のシェアリングによる効果はその2倍以上となっている。特に歪度が-0.8の時、輸送量ベースで3PLの利用が少なく、LTLの利用が多くなり、コストの低減率は最も高くなる。

歪度が-0.8のケースについて、目的関数の値の内訳を表13に示す。協調型の減価償却費は準協調型よりも1台分少なく、金額にして11千円の差がある。表10より、協調型の所有車による輸送量は準協調型の87%（メーカー1）と96%（メーカー2）となっており、これに起因してその他の自車輸送費が42千円減少する。協調型の3PLによる輸送量は準協調型の約6割であり、3PLのコストも概ね比例して13千円減少する。シェアリングによる輸送量は協調型の方が多く、また遠方に位置するメーカー2への輸送にも利用しているため、コストは準協調型の約1.4倍に増加する。機会損失については僅かな差であるが、協調型の方が少なくなった。全体としてはトラックのキャパシティの共有によって、43千円のコスト低減が図れた。

Table 10 Percentage of transport volume in each mode. The transport volume of self-transportation is lower in the collaborative model than in the semi-collaborative model. It is suggested that more owned trucks are used for LTL than for FTL due to its cost-effectiveness. LTL is also used for transportation to Manufacturer 2, and there are advantages to using the service even if the transportation distance is long.

Skewness	Network	Manufacturer1			Manufacturer2		
		Self-transport	3PL	Truck sharing	Self-transport	3PL	Truck sharing
-0.8	Non-collaborative	64.9%	35.1%	0.0%	99.6%	0.4%	0.0%
	Semi-collaborative	58.0%	0.0%	41.9%	99.1%	0.9%	0.0%
	Collaborative	50.3%	0.0%	49.7%	95.7%	0.6%	3.7%
0	Non-collaborative	60.6%	39.4%	0.0%	97.9%	2.1%	0.0%
	Semi-collaborative	55.4%	0.0%	44.6%	97.4%	2.6%	0.0%
	Collaborative	52.4%	0.0%	47.6%	94.4%	2.0%	3.6%
0.8	Non-collaborative	60.8%	39.2%	0.0%	96.6%	3.4%	0.0%
	Semi-collaborative	60.0%	0.0%	40.0%	96.7%	3.3%	0.0%
	Collaborative	56.2%	0.0%	43.8%	93.7%	2.8%	3.5%

Table 11 Average load factors. The average load factor of trucks used for LTL improves by about 14% from that for FTL by combining several suppliers' loads.

Skewness	FTL in semi-collaborative model	LTL in collaborative model
-0.8	80.5%	94.8%
0	81.5%	95.1%
0.8	80.6%	94.7%

Table 12 Objective value and reduction rate. Using LTL reduces the total cost more than twice as much as using FTL, which is equivalent to more than 5% of the total cost when the sharing service is not used.

Skewness	Non-collaborative	Semi-collaborative	Collaborative
-0.8	1345.3 (-)	1309.5 (-2.7%)	1266.6 (-5.9%)
0	1342.9 (-)	1306.7 (-2.7%)	1267.6 (-5.6%)
0.8	1351.0 (-)	1316.6 (-2.5%)	1278.8 (-5.3%)

(kJPY)

Table 13 Cost breakdown comparison at skewness of -0.8. The depreciation of the collaborative model is one truck less than that of the semi-collaborative model. Self-transportation and 3PL costs decrease in proportion to the transportation volume. The sharing cost of the collaborative model is about 1.4 times as much as that of semi-collaborative model, the total cost is 43kJPY lower in the collaborative model.

Item	Semi-collaborative	Collaborative
Self-transportation cost	1214.6	1161.2
Depreciation	539.9	528.9
Other	674.7	632.3
3PL cost	28.9	15.8
Sharing cost	64.2	89.3
Lost sales	1.8	0.2
Total (Objective value)	1309.5	1266.6

(kJPY)

4・3 シャープレイ値による費用負担

前節では LTL 型のシェアリングを利用することでサプライチェーン全体のコストを低減できることが示された。これは協力ゲームと捉えることができるため、シャープレイ値を用いて各サプライヤのコストの負担額を求める。シャープレイ値は提携に対するプレイヤーの貢献度に応じて便益を分配する方法であり、式 (35) で定義される (Shapley, 1953)。本問題に当てはめると、 N はすべてのサプライヤ、 S はその部分集合で LTL に参加 (提携) するサプライヤ、特性関数 $v(S)$ は提携によって参加企業 S が節約できる金額に相当する。式中の $v(S \cup \{i\}) - v(S)$ はサプライヤ i の S に対する貢献度である (Nakayama, 2012)。

$$\phi_i(v) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{s!(n-s-1)!}{n!} (v(S \cup \{i\}) - v(S)) \quad (35)$$

サプライヤは 4 社なので 15 通りの提携のパターンがある。前節のシナリオの下で各提携に対する特性関数を求めた結果を図 2 に示す。例えば $v\{1,2\}$ は、サプライヤ 1 とサプライヤ 2 のみがトラックシェアリングに参加した場合に、2 社が節約できるコストの和を意味する。特性関数は優加法性を満たし、4 社すべてが参加する場合に最も多くの便益を獲得できることがわかる。これを式 (35) に代入し各社の負担額を計算した。

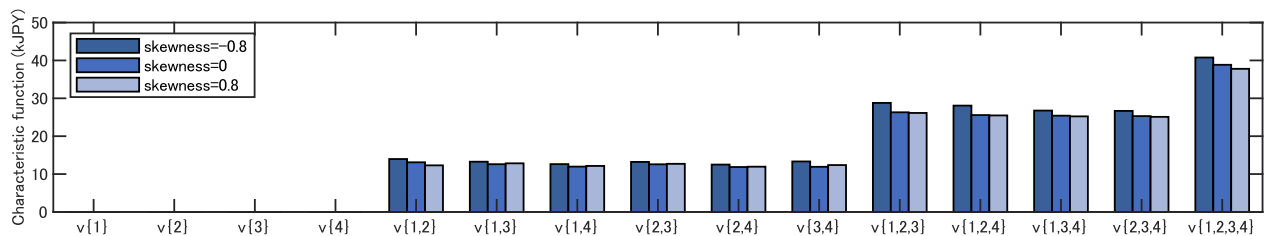


Fig. 2 Characteristic function. The more the suppliers participate in sharing, the more costs are saved.

歪度が-0.8 の時、協調型ネットワークで各社がシェアリングを利用して輸送した部品数とシェアリングのコストを表 14 に示す。部品 1 個当たりの輸送費を比較すると、LTL は輸送量も所有台数も多いサプライヤ 3 と 4 にとってコスト効率がより良い輸送モードと言える。また、サプライヤ 2 よりもサプライヤ 1 の方が、サプライヤ 3 よりもサプライヤ 4 の方が少ない輸送費で多くの部品を輸送していることから、サプライヤが LTL のメリットをどの程度享受できるかはプロバイダや納品先までの距離にも依存することがわかる。

Table 14 LTL shipments and shipping cost. How much a supplier can benefit from LTL depends on the distance from the supplier to the provider or manufacturer, the number of own trucks, and the freight volume. LTL is a cost-effective service, especially for suppliers with many trucks and high freight volumes.

	Supplier1	Supplier2	Supplier3	Supplier4
Number of parts shipped by using LTL	71	62	110	116
Shipping cost (kJPY)	19.4	19.7	26.5	23.8
Shipping cost per part (JPY)	273	318	241	205
Distance (km)				
Provider	14.4	16.1	13	9.8
Manufacturer1	27	31	28	25
Manufacturer2	145	149	146	143

3 種類のネットワークについて各サプライヤの総コストを比較した結果を図 3 に示す。なお、4 社の合計金額は目的関数の値に一致する。サプライヤ 1 と 2、サプライヤ 3 と 4 では輸送量が 2 倍異なるため、それぞれが負担するコストもおおよそ 2 倍となっている。非協調型のコストを基準とすると、FTL 型のシェアリングによる低減

額はサプライヤ 1 と 2 が 5~7 千円, サプライヤ 3 と 4 が 11~12 千円であり, 率にして約 3% 減少する. LTL 型のシェアリングによる低減額はサプライヤ 1 と 2 が 16~18 千円, サプライヤ 3 と 4 が 21~22 千円であり, FTL の約 2 倍のコスト低減効果を得られることがわかる.

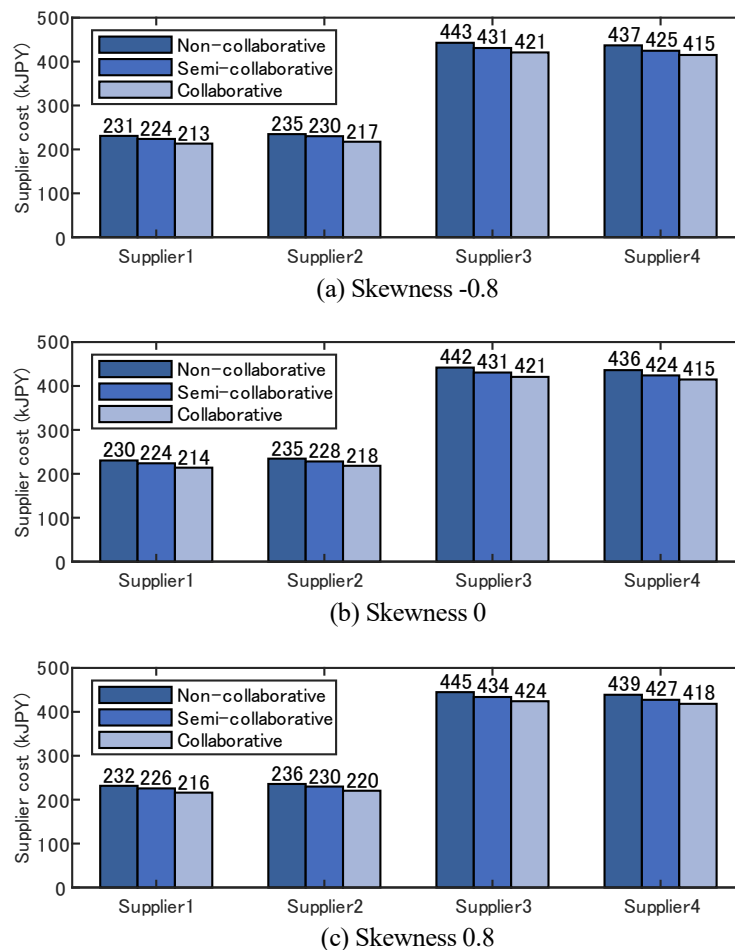


Fig. 3 Comparison of supplier costs in three types of transportation networks. FTL reduces each supplier's cost by about 3%, while LTL reduces by 5~6%.

5. 結 言

本報では, 不確実な需要の下でトラックシェアリングを通じて協調的な輸送ネットワークを設計するための手法を提案した. ここでのシェアには, サービスを介して他社が所有するトラックを借用することと, トラックのキャパシティを他社と共有することの 2 つの意味が含まれる. 2 段階確率計画法に基づき, 第 1 段階で各サプライヤが所有するトラックの台数を決定し, 第 2 段階で輸送モード毎の貨物量と利用台数, トラックの貸し手と借り手, 走行ルートをシナリオ毎に決定する.

3 種類の需要シナリオを用いて LTL 型のシェアリングサービスを利用することによるトラック台数と輸送コストの低減効果について分析した. FTL 型のシェアリングサービスを利用する場合と比較して, 需要の上振れが予想される場合にはトラックの台数削減が期待されるが, 正規分布を想定した需要や下振れが予想される場合には同等の台数が必要である. しかし, FTL は遠方への輸送において 3PL よりもコスト的に不利であるのに対し, LTL は需要の状況によっては有利なため変動費の抑制につながる. 減価償却費と足し合わせたコスト全体では, LTL の低減効果は FTL の 2 倍以上 (5%以上) となった.

さらにシャープレイ値を用いて LTL の利用に係るサプライヤの負担額を算出した. 部品 1 個あたりの LTL 輸送費を見比べると, 輸送量とトラックの所有台数が多いサプライヤにとって LTL 型のシェアリングはよりコスト

効率の良い輸送方法と言える。LTL を利用することによるコスト低減率はサプライヤ間で大差なく、FTL を利用する場合の約 2 倍である。今後の課題としてはプロバイダやトラックの種類数を増やし、よりフレキシブルな輸送ネットワークに拡張することが考えられる。

文 献

- Bergmann, F. M., Wagner, S. M. and Winkenbach, M., Integrating first-mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e-commerce distribution, *Transportation Research Part B*, 131 (2020), pp.26-62.
- Castillo, V. E., Bell, J. E., Rose, W. J. and Rodrigues, A. M., Crowdsourcing Last Mile Delivery: Strategic Implications and Future Research Directions, *Journal of Business Logistics*, Vol.39 (2018), pp.7-25.
- 伊東明日美, 貝原俊也, 國領大介, 藤井信忠, 需要の不確実性下におけるリソースシェアリングを伴うマルチサプライヤ協調型物流ネットワークに関する研究, *日本機械学会論文集*, Vol.89, No.923 (2023).
- 国土交通省, 平成 27 年度 全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査集計表, available from <<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/index.html>>, (参照日 2022 年 12 月 1 日)
- 中山幹夫, 協力ゲームの基礎と応用, 勁草書房 (2012).
- Schneider, M. and Drexler, M., A survey of the standard location-routing problem, *Annals of Operations Research*, Vol.259 (2017), pp.389–414.
- Shapley, L. S., A value for n-person games, *Contributions to the Theory of Games II* (1953), Princeton University Press, pp.307–317.
- Wang, Y., Zhang, J., Guan, X., Xu, M., Wang, Z. and Wang, H., Collaborative multiple centers fresh logistics distribution network optimization with resource sharing and temperature control constraints, *Expert Systems with Applications*, Vol.165 (2021), Article 113838.

References

- Bergmann, F. M., Wagner, S. M. and Winkenbach, M., Integrating first-mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e-commerce distribution, *Transportation Research Part B*, 131 (2020), pp.26-62.
- Castillo, V. E., Bell, J. E., Rose, W. J. and Rodrigues, A. M., Crowdsourcing Last Mile Delivery: Strategic Implications and Future Research Directions, *Journal of Business Logistics*, Vol.39 (2018), pp.7-25.
- Ito, A., Kaihara, T., Kokuryo, D., Fujii, N., A study of multi-supplier collaborative logistics network with resource sharing under demand uncertainty, *Transactions of the JSME*, Vol.89, No.923 (2023) (in Japanese).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Road and Street Traffic Situation Survey 2015, available from <<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/index.html>>, (accessed on 1 December, 2022) (in Japanese).
- Nakayama, M., Cooperative Game (2012), Keiso shobo (in Japanese).
- Schneider, M. and Drexler, M., A survey of the standard location-routing problem, *Annals of Operations Research*, Vol.259 (2017), pp.389–414.
- Shapley, L. S., A value for n-person games, *Contributions to the Theory of Games II* (1953), Princeton University Press, pp.307–317.
- Wang, Y., Zhang, J., Guan, X., Xu, M., Wang, Z. and Wang, H., Collaborative multiple centers fresh logistics distribution network optimization with resource sharing and temperature control constraints, *Expert Systems with Applications*, Vol.165 (2021), Article 113838.