

エージェントシミュレーションによる トラック配送業の多重下請け構造の研究

Study of multilayer structure market in trucking industry through Agent-based Simulation

川口 有彦¹
Arihiko Kawaguchi¹

¹ 筑波大学
¹ University of Tsukuba

Abstract: In this research, focusing on the hierarchical structure of the truck delivery industry, several measures to improve the industry structure as a social problem are evaluated with an agent simulation model. As a result, measures such as promotion of fare optimization and delivery sharing economy have all been effective in improving the profitability of the delivery company. Meanwhile, it is suggested that the number of players participating in the market increases, and that negative aspects such as multilayering of the trading hierarchy are increasingly promoted.

1 研究の背景

近年、EC 市場の成長を背景に日本の物流におけるトラック輸送量は年々増加傾向にある中で、一方、トラックドライバーは不足しており、輸送品質の低下や物流サービスの継続性自体が危ぶまれている。業界構造の特徴をみると、トラック運送業界は圧倒的に中小・零細事業者が多く、また、大半の事業者が実運送と利用運送の両機能を有し、元請けによる下請けへの運送委託が常態化していることがあげられる。このような状況から、国土交通省はトラック運送業における多重下請け構造を問題として捉え、荷主と運送事業者双方に働きかけることで、取引適正化を推進しているものの、根本的な解決には至っていない。また、近年の IT 技術の発展に伴い、荷主と物流事業者を高度にマッチング可能とするシェアリングエコノミー型のマッチングサービスも登場しつつあり、業界構造の変容が期待されている。しかし、物流取引市場は、多数のステークホルダーが相互に関連し、重層化した複雑なネットワーク構造を持つため、市場構造の分析が困難であり、改善効果が期待されている施策は提案されているものの、その効果や波及する影響について十分な分析が行われていない。

2 本研究の目的

本研究では多層取引構造をもつトラック配送産業の社会構造に焦点を当て、国が主導する取引適正化やシェ

アリングエコノミー型サービスの台頭といった課題解決の手段が有効であるか否か、及びこれらが市場構造に与える影響についてを明らかにする。

1. 国が主導する取引適正化（運賃の適正化）は、トラック配送事業の経営を改善することができるか？また、その影響により産業構造はどのように変化するか。
2. シェアリングエコノミー型サービスが普及することで、産業全体の物流効率は高まり、トラック配送事業の経営を改善することができるか？また、その影響により産業構造はどのように変化するか？

なお、本研究の意義は、現在の我が国の物流市場の取引構造をモデル化することにより、法規制やシェアリングエコノミーなどの、日本の物流課題に対して、現在検討されているいくつかの施策の評価、分析するための手段を提案することである。また、今後検討される、物流市場への改善施策について、共通プラットフォームにより迅速に試行錯誤することで、政策立案と効果予測の速度と効率性および透明性を高めることにある。

3 先行研究

3.1 運送業の多重下請け構造に関する研究

小野 (2008) は、トラック運送業における多層化構造を分析し、各階層での取引の割合や取引量を算出している。また、多層化の要因として、貨物量の波動への対応、営業力の機能補完といった機能を指摘している。一方で、多層化により配送品質の低下や実運送運賃のさらなる低下といったデメリットがあることを指摘している。中田 (2007) は、下請けや備車といったトラック運送業界の慣習が縦型の重層構造をもたらしている点を指摘した。また、会社は低い収入で経営を維持するために、小規模化、企業数が増加し、縦型構造がさらに進展する懸念を指摘した。

3.2 企業間取引ネットワーク構造の研究

企業間取引ネットワークの構造は、2007年に Takayasu et al.[5][6] が行った解析などにより、スケールフリー性と、スモールワールド性の2つの性質をもつ複雑ネットワークであることが示されている。

また、中野 (2007) では大田区における企業間取引ネットワークの分析に、パス長およびクラスタリング係数を利用している。また入次数の分布はスケールフリーネットワークであることを示すとともに、企業間のネットワークが完成品のメーカーと一次下請けが上位となり、そこからヒエラルキー型の「山脈型」構造を持つことを分析している。[7]

3.3 ABM による取引市場の研究

[Grimm,2005] は、エージェントシミュレーションによるボトムアップモデルの設計、検証の方法論について提案し、シミュレーションモデルが、現実世界の複数のパターンを再現している場合、そのシミュレーションモデルは「構造的に現実的」である可能性が高いと判断できると述べた。

[間島,2005] は災害時の河川舟運という物流問題に対して、エージェントシミュレーションによる解析を行い、物資輸送と被災者輸送の二つのシステムを紹介し、有益な情報や知見を導くことに成功している。しかし、物流問題に関するエージェントシミュレーション利用は、サプライチェーンマネジメントの効率化に適用される場合が多く、事業者間の取引構造全体を写像するアブストラクトモデルでの研究はまだ無い。

4 シミュレーションモデル

4.1 モデルの概要

本シミュレーションモデルは1tickにつき、4つのタスクを実行する。

1. 取引ネットワークの成長として、新しい配送事業者エージェントが荷主の取引ネットワークに加わる。新しく加わるエージェントと、新しくエージェントを受け取るエージェントについては、それぞれ確率的に選択される。
2. 形成された取引ネットワークを介し、荷主、元請け、一次請けと上位の階層に属するエージェントから順々に配送取引を実行する。
3. 取引結果で得た収入と自社トラックなどで発生するコストを差し引いて収益を算出する。その結果に応じて、トラックの再投資や債務超過による破綻などの経営概念を組み込む。
4. 取引ネットワークの剪定を行う。エージェントは委託先が増え過ぎると委託先管理コストが高まることから、確率的に委託先との取引を打ち切る行動をとる。

4.2 取引ネットワークの成長

既存のネットワークの中において、新たにリンクを受け取るエージェントを優先的選択により次式のとおり確率的に選択する。次式は、取引ネットワークの中でエージェントの信頼性が高く、かつ、下請け志向が強いエージェント程、新しいリンクを受け取りやすくなることを意味している。

$$\Pi_i = \frac{r_i g_i}{\sum_j r_j g_j}$$

r_i : 各エージェントが保有する信頼性

g_i : 各エージェントが保有する下請け遺伝子

また、新しく取引ネットワークに加わるエージェントについても、優先的選択により次式のとおり確率的に選択する。次式は、信頼性が高く、かつ、輸送能力が高いエージェント程、新しくネットワークに加わりやすいことを意味している。

$$\Pi_i = \frac{r_i t_i}{\sum_j r_j t_j}$$

r_i : 各エージェントが保有する信頼性

t_i : 各エージェントが保有するトラック台数

4.3 取引の実行

荷主エージェントが取引需要を生成し、取引ネットワークを通じて、仕事を配賦する。その際、配賦する仕事量はリンクで繋がっている下層のエージェントの信頼性に比例して按分する。仕事を受け取ったエージェントは、自社のトラックで賄える仕事のみを自社で実行し、賄えない仕事を下請けへ再委託する。仕事を実行した成果としてエージェントは収入を得ることができる。

Algorithm 1 仕事の割付ルール

```
if 受注した貨物量 > 自社トラックの保有量 then
  自社で配送する仕事量 = 自社トラックで配送可能な仕事量
  下請け業者  $i$  へ再委託する仕事量 =  $\frac{(\text{受注した貨物量} - \text{自社で運べる貨物量}) * \text{信頼性}_i}{\text{自社の持つ下請け業者の信頼性の総和}}$ 
else
  自社で配送する仕事量 = 受注した貨物量 * 0.9
  下請け業者  $i$  へ再委託する仕事量 =  $\frac{(\text{受注した貨物量} * 0.1) * \text{信頼性}_i}{\text{自社の持つ下請け業者の信頼性の総和}}$ 
end if
```

また、エージェントは仕事量に対して、収入を得ることができる。収入は自社が保有するトラックで運ぶ実運送に関する運賃と自社のトラックで賄いきれずに下請けに再委託することで配送する再委託手数料の二種類が存在する。取引段階を経るごとに10%のマージンを鞘抜きされるため、仕事量に対する配送単価は下層の企業ほど低くなる。

4.4 追加運賃の設定

国土交通省は実運送における運賃の適正化を推進している。具体的には、従来の商慣習では賃金が支払われていなかった、荷役などの付帯作業、倉庫内での待ち時間などについて、荷主に対して適正な運賃の支払いを要請するものである。この施策により、今まで下請け階層の下層に位置していた実運送事業者の収支が改善する効果が期待されている。

実運送事業者が追加で得られ賃金の量をパラメーターで定義する。追加運賃は実運送した収入に対して追加される。したがって、収入ロジックを、実運送運賃に、実際に実運送したトラック台数に応じて追加運賃が加算されるようプログラミングした。

4.5 シェアリングエコノミー

世界では配送シェアリングサービスとしてUber Rush, Amazon Flex, Lalamove といったサービスが生まれて

きている。これらはコンシューマが自身が保有する車を時間貸しすることで、不足する配送リソースを補完する役割を担っている。日本においては、コンシューマが直接荷物を運ぶサービスはまだ誕生していないものの、配送事業者が空いている配送リソースを貸すB2B型の配送シェアリングサービスが近年台頭してきている。この配送事業者が自社の車の空き稼働を、荷物を送りたい事業者と直接マッチングさせ、実運送を成立させる仕組みをシミュレーションモデルに組み込む。シェアリングエコノミー取引は、通常取引ネットワークによる取引で運びきれなかった荷物に対して実行される。

Algorithm 2 シェアリングエコノミー取引の実行

```
if 通常取引で運びきれなかった貨物量 ≥ 0 then
  while 配送が必要な荷量 > 0 do
    シェアリングエコノミーを利用する任意の配送事業者を選択
    配送が必要な荷量 = 配送が必要な荷量 - 配送事業者の余っている輸送能力
  end while
end if
```

5 実験結果

5.1 シミュレーションモデルの評価

構築したシミュレーションモデルを、1. 各取引階層に属するエージェント数の割合、2. 取引の多層化度合いを示すT/T指標値、3. エージェントの保有トラック台数の傾向、4. エージェントが得られる利益構造、5. 各エージェントが取る戦略、の観点から評価し、「構造的に現実的」であることを示した。

5.2 運賃適正化施策がトラック配送産業に及ぼす影響について

図1に各階層におけるエージェントの利益のヒストグラムと表1にその基本統計量を示す。

実験の結果、表1より、運賃増加率が0から2まで、大きくなるほど、元請けの利益の平均値が-10.145から-48.041まで減少し、一方で一次受け以降の低位の階層においては、運賃増加率が大きくなるほどいずれも利益の平均値が増加することを確認した。従って、一次受け以降では実運送に対する運賃が増加し、経営が改善していることが明らかになった。

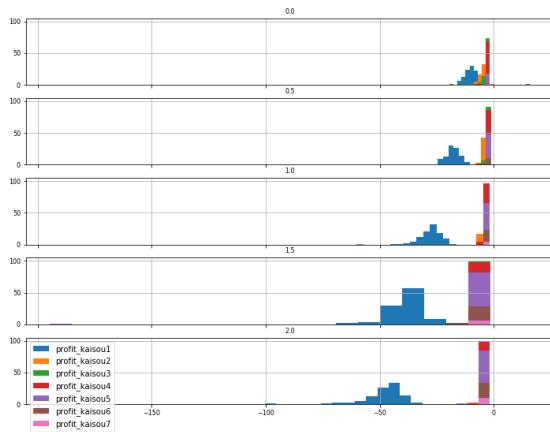


図 1: 階層別利益の分布

表 1: 運賃増加率別の階層別の利益の平均値

	元請け	一次請け	二次請け	三次請け	四次請け	五次請け	六次請け
0	-10.145	-4.272	-3.516	-2.601	-2.788	-2.39	-2.468
0.5	-17.996	-3.469	-2.592	-2.606	-2.566	-2.19	-25.333
1	-27.908	-3.893	-2.707	-2.42	-3.162	-2.222	-2.198
1.5	-37.895	-4.086	-2.562	-2.412	-4.598	-2.982	-2.175
2	-48.041	-4.202	-2.453	-2.384	-2.416	-2.212	-2.1

また、表 2 にその基本統計量を示す。実験結果より、運賃増加率を大きくするとエージェント数が増加する傾向であることを確認した。

表 2: 運賃増加率別のエージェント数

add-revenue	count	mean	std	min	25 %	50 %	75 %	max
0	100	160.05	22.068	6	154	162	170.25	215
0.5	100	224.82	15.183	191	214	226.5	235	259
1	100	268.59	18.775	203	258	266	283.25	311
1.5	100	298.88	33.631	6	292	301	312	352
2	100	331.21	17.629	278	320	333	343.25	369

以上より、運賃増加率の施策を行うことで、市場全体のエージェント数が増加するとともに、一次請け以降の実運送事業者の収益が改善することがわかった。

また、表 3 に運賃増加によるエージェントがとる戦略の変化を調べた。下請け遺伝子の平均値は運賃増加率が高まるほど小さくなり、自社配送戦略の存在感が高まることが示された。しかし、全体としては依然として下請け戦略をとるエージェントが過半数を占めており、実運送の運賃上昇がエージェントの戦略に与える影響は限定的である。

表 3: 運賃増加率別の下請け遺伝子

	add-revenue				
	0	0.5	1	1.5	2
count	15905	22382	26759	29788	33021
mean	0.539	0.527	0.522	0.52	0.52
std	0.274	0.282	0.285	0.285	0.286
min	0	0	0	0	0
25 %	0.32	0.292	0.282	0.278	0.276
50 %	0.551	0.537	0.532	0.528	0.529
75 %	0.773	0.772	0.768	0.768	0.769
max	1	1	1	1	1

5.3 シェアリングエコノミーがトラック配送産業に及ぼす影響について

シェアリングエコノミーサービスの普及の度合いを、シェアリングエコノミーへの参加率という可変のパラメータで設定し、0%から100%までの5段階でシミュレーションを実施した。

図 2 に各階層におけるエージェントの利益のヒストグラムと表 4 にその基本統計量を示す。

実験の結果、シェアリングエコノミーへの参加率を大きくするほど元請け、一次請け、二次請けの利益が減少し、三次受け以降の低位の階層においては利益が増加することを確認した。

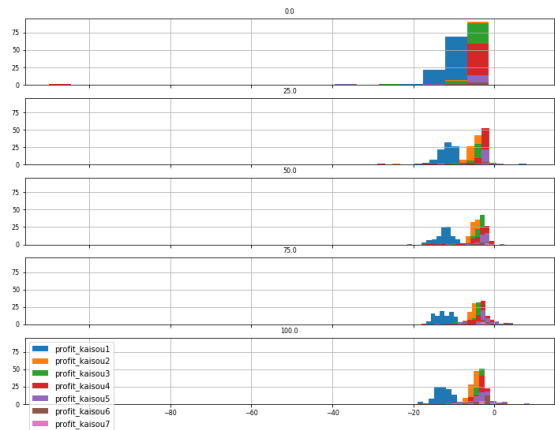


図 2: 階層別利益の分布

表 4: 階層別の利益の平均値

	元請け	一次請け	二次請け	三次請け	四次請け	五次請け	六次請け
0 %	-10.4	-4.281	-3.465	-4.252	-5.87	-4.538	NaN
25 %	-11.198	-4.791	-3.553	-3.711	-2.621	-3.988	-7.565
50 %	-11.935	-4.993	-3.753	-3.549	-3.264	-5.007	-1.805
75 %	-11.792	-4.875	-3.737	-3.13	-2.745	-3.004	-2.579
100 %	-12.589	-4.974	-3.59	-3.252	-2.889	-2.922	-3.912

表 5 にシェアリングエコノミーへの参加率の変化とエージェント数の対応を示す。その結果、シェアリングエコノミーへの参加率を大きくするとエージェント数の平均値が 150.12 から 230.02 まで増加する傾向であることがわかった。

表 5: シェアリング参加率別のエージェント数

sharing-participation	count	mean	std	min	25 %	50 %	75 %	max
0 %	100	150.12	37.753	5	150	158	168	193
25 %	100	169.73	35.859	5	166	175	183	208
50 %	100	183.72	37.616	8	181	190	201	217
75 %	100	198.24	49.241	8	196	207.5	219.5	246
100 %	100	230.02	27.501	13	220	231.5	243.25	274

次に表 6 にシェアリングエコノミーへの参加率とエージェントのとり戦略の変化を示す。

実験結果より、シェアリングエコノミーへの参加率が高まるほど下請け遺伝子の平均値は小さくなり、自社配送戦略の存在感が高まることが示された。しかし、全体としては依然として下請け戦略をとるエージェントが過半数を占めており、下請け戦略が優位であることがわかった。

表 6: シェアリング参加率別の下請け遺伝子

	sharing-participation				
	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
count	14912	16873	18272	19724	22902
mean	0.538	0.535	0.53	0.523	0.518
std	0.277	0.279	0.282	0.285	0.286
min	0	0	0	0	0
25 %	0.31	0.301	0.294	0.281	0.277
50 %	0.55	0.547	0.541	0.531	0.525
75 %	0.778	0.776	0.776	0.771	0.766
max	1	1	1	1	1

6 結論

運賃適正化、シェアリングサービスの普及の両方で、実運送を行う小規模事業者の収益を改善する効果は認められた。しかし、小規模事業者の収益改善により市

場全体のプレイヤー数が増加し、市場内のプレイヤー全体では収益の格差が拡大することで、利益の平均値は低下することがわかった。したがって、中長期的な視点で政府は、運賃適正化やシェアリングエコノミー普及のみならず、適切な産業規制により市場内のプレイヤー数を需要に応じてコントロールする仕組みも重要になると考えられる。

さらに、運賃適正化は一次請け以降のエージェントに対して全体的に効果を与えるのに対し、シェアリングエコノミーは 3 次請け以降の取引階層の末端に対して特に効果を与えるという点で、その効果の特徴に違いがあることが明らかとなった。また、シェアリングエコノミーは既存の取引ネットワークを介さずに需要と供給をマッチングさせるため経済的厚生が高まり、社会全体で効率的な配送が実現可能な手段であることが示された。

参考文献

- [1] 全日本トラック業界, “日本のトラック輸送産業の現状と課題”, 2017.
- [2] 小野秀明, “トラック運送業界の多層取引に関する考察”, 「日本物流学会誌」, Vol.16, 2008.
- [3] 国土交通省, “トラック運送事業の運賃・原価に関する調査”, 2011.
- [4] 中田信哉, “貨物自動車運送業界の構造再編”, 「東京経大会誌 (経営学)」, 第 254 号, pp. 65-82, 2007.
- [5] M. Takayasu, S. Sameshima, T. Ohnishi, Y. Ikeda, H. Takayasu and K. Watanabe, “Massive economics data analysis by econophysics methods the case of companies’ network structure,” Annual Report of the Earth Simulator Center, p. 263, 2007.
- [6] 大西立顕, 高安秀樹, 高安美佐子, “企業間ネットワークの数理構造,” 応用数理, 20(3), pp. 3749, 2010.
- [7] 中野勉, “巨大産業集積の統合メカニズムについての考察—社会ネットワーク分析からのアプローチ”, 「組織科学」, Vol.40, No.3, 2007.
- [8] Volker Grimm, “Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology”, Science, vol. 310, issue 5750, pp. 987-991, 2005.