

ゲーム理論を用いた貨物輸送の共同化における費用分担に関する考察*

Analysis of Cost Allocation in Cooperative Freight Transportation System with Game Theory*

伊藤 洋明**・楊 冬***・小谷 通泰****・谷本 圭志*****

By Hiroaki ITO**・Dong YANG ***・Michiyasu ODANI ****・Keishi TANIMOTO *****

1. はじめに

環境問題や交通渋滞などを緩和するために貨物輸送の効率化が求められており、その一つの方策として貨物輸送の共同化が挙げられる。しかしながら、こうした輸送の共同化を実現するためには、様々な課題が指摘されており¹⁾、共同化による費用の分担方法は重要な問題である。特に、こうした共同化は、必ずしも参加事業者にとってコストの削減をもたらすものではないが、上述のように、社会的にみた必要性は高く、公的なセクターからの支援措置を講じて実現させることが望ましい。

そこで、本研究では、提携形ゲーム理論を用いて、輸送の共同化を行った場合の参加事業者間における適切な費用分担問題について考察することを目的としている。具体的には、共同化の前後における各事業者の負担すべき費用の変化に着目し、 ε コアの考え方を適用することで、共同化によって事業者が得ることのできる利得、あるいは共同化を実現させるための外部から投入すべき補助金額を求めることとする。

2. 提携形ゲーム理論²⁾

(1) コア

コア(core)とは、提携形ゲーム理論で最も基本的な公正配分概念の1つであり、すべてのプレイヤーが全提携に参加するための動機を保障する利得額の集合である。

プレイヤーの集合を N 、任意のプレイヤーを $i (\in N)$ 、プレイヤー i が属する提携を $S (i \in S)$ で表し、プレイヤー i

*キーワード：貨物の共同輸送、提携形ゲーム理論、費用分担、 ε コア

**学生員、神戸大学大学院海事科学研究科

***学生員、工修、神戸大学大学院自然科学研究科

****正員、工博、神戸大学大学院海事科学研究科

(兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1,

TEL&FAX078-431-6260)

*****正員、工博、鳥取大学大学院工学研究科

(鳥取県鳥取市湖山町南 4-101, TEL&FAX0857-31-5310)

が全提携のもとで得る利得ベクトルを $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ で表わすと、次式をみたす X の集合がコアである。ここで、 v は特性関数であり、 $v(S)$ は提携 S を形成した場合に得られる利得を表す。

$$\sum_{i \in S} x_i \geq v(S) \quad (\forall S \subset N) \quad \dots(1)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad \dots(2)$$

式(1)は、コアに含まれる利得ベクトル X は任意の提携の下で得られる利得よりも大きいことを、式(2)は、全提携において得られる利得はすべてのプレイヤーに配分されることを表わしている。

コアが非空であれば、全提携に参加する動機を確保するという意味で最低限の公平性を備えた利得が存在する。つまり、コアが非空であることは全提携が成立するための条件である。したがって、コアをみたす利得は、各プレイヤー間の合意を形成するという観点から有効であるといえる。

(2) 要求

$$e(x; S) = v(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad (S \subset N, S \neq \phi, N) \quad \dots(3)$$

この $e(x; S)$ を利得ベクトル x に対する提携 S の要求という。要求について考えるときは、全体集合 N と空集合 ϕ を除く。

つまり、利得ベクトル x が提案されたとき、 x についての提携 S の要求が正である場合には、 S は x に対して不満をもち、負の場合には、 S は x に対して余剰をもつといえる。

(3) ε コア

コアが空であっても、すべての提携 S がある値 $\varepsilon (>0)$ だけその提携値 $v(S)$ より不足しても我慢するとする。例えば、提携形成にあたって、費用が ε かかるとすれば、

やむを得ないと納得すると考えられる。

したがって、すべての提携が、その要求 $e(x; S)$ が必ずしも 0 以下ではなく、ある程度の大きさ ε 以下ならば納得するとすれば、コアの条件は緩和されることになる。

つまり、次式をみたす X の集合が ε コアである。

$$v(S) - \sum_{i \in S} x_i \geq \varepsilon \quad (\forall S \subset N, S \neq N) \quad \dots(4)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad \dots(5)$$

(4) 最小コアと仁

空ではない ε コアの中で、 ε が最小のとき、その ε コアを最小コアという。つまり、最小コアは次のように定義される。

$$\min \varepsilon$$

subject to

$$v(S) - \sum_{i \in S} x_i \geq \varepsilon \quad (\forall S \subset N, S \neq N) \quad \dots(6)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad \dots(7)$$

以後、最小の ε を ε^* と表記する。

また、最小コアの極限を辞書的中心で求めた場合の唯一解が仁である。仁とは、最大要求を最小化した配分のことである。

3. ケーススタディと費用関数の設定

(1) ケーススタディ

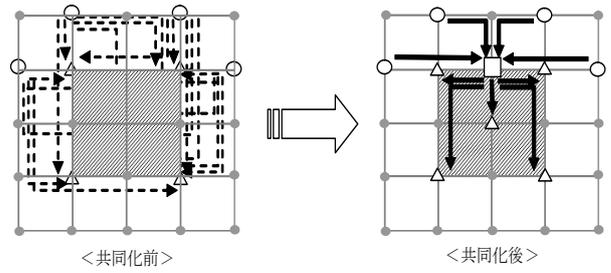
本研究では、図 1 に示すような格子 (10km×10km) 点上に各工場や配送施設そして顧客の位置を定め³⁾、各工場から顧客までの経路を図のように想定し、次の 2 つのケースについて考える。

Case 1 : 配送施設を持たない事業者 4 社が提携して共同化する場合。

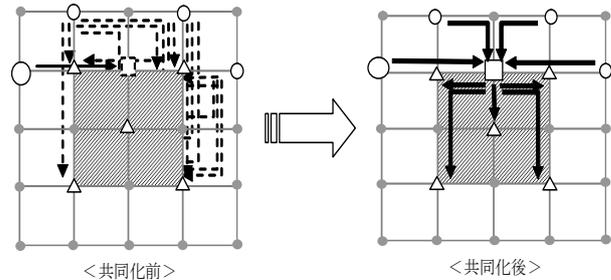
Case 2 : 配送施設を持つ事業者 1 社と配送施設を持たない事業者 3 社が提携して共同化する場合。

なお、いずれのケースも各事業者が配送する総貨物量は 200 ton とし、5 箇所の顧客に配送するものとする。

Case 1 では、どの事業者も貨物量は 50 ton ずつで、各顧客に 10 ton ずつ配送する。Case 2 では、配送施設を持つ事業者は 125 ton の貨物を各顧客に 25 ton ずつ、配送施設を持たない事業者は 25 ton の貨物を各顧客に 5 ton ずつ配送する。



a) Case 1 (規模の等しい事業者 4 社の共同化)



b) Case 2 (規模の大きい事業者 1 社と規模の小さい事業者 3 社の共同化)

○ : 工場 □ : 規模の大きい事業者の配送施設 --> : 配送施設がない場合の経路
△ : 顧客 □ : 共同配送施設 → : 配送施設がある場合の経路

図 1 各ケースにおける共同化前後の配送システム

(2) 費用関数の設定

本研究では、費用関数 C として、変動費用 TC と固定費用 FC (ただし、共同化に伴う費用、たとえば、施設の建設費などを含む) の 2 つの要素から構成される費用関数を想定し、配送施設を持たない事業者と配送施設を持つ事業者ごとに 2 種類の費用関数を考える。ただし、 TC と FC には異なる加法性を仮定し、 TC は下部加法性をみたすものとした。また、配送の仕方として、配送施設を持たない事業者は工場から顧客まで直接に域内集配トラック (2 ton トラック) で配送し、配送施設を持つ事業者は工場から配送施設までは幹線輸送トラック (4 ton トラック) で、配送施設から顧客までは 2 ton トラックで配送すると想定する。以上より、各事業者の費用関数 $C(i)$ を以下のように定義する。

・配送施設を持たない事業者の費用関数

$$C(i) = TC(i) + FC(i) = t_d \times \sum_{f,j} o_{fj} \times d_{fj} / 2l_i + C_{id} / y / 365 \quad \dots(8)$$

・配送施設を持つ事業者の費用関数

$$C(i) = TC(i) + FC(i) = t_l \times \sum_f o_{fk} \times d_{fk} / 4l_i + t_d \times \sum_j o_{kj} \times d_{kj} / 2l_i + D_i \times (C_l + C_b) / y / 365 + (C_{id} + C_{il}) / y / 365 \quad \dots(9)$$

また、事業者 i が提携 $S (i \in S)$ に属している場合の費用関数 $C(S)$ は次のように定義する。

$$C(S) = TC(S) + FC(S) \\ = t_l \times \sum_f o_{fk} \times d_{fk} / 4l_{sm} + t_d \times \sum_j o_{kj} \times d_{kj} / 2l_{sm} \\ + D_{sm} \times (C_l + C_b) / y / 365 + (C_{td} + C_{tl}) / y / 365 \quad \dots(10)$$

ここで、

i : 事業者 f : 工場 j : 顧客 k : 配送施設

t_d : 2 ton トラックの単位輸送コスト(円/ton/km)

t_l : 4 ton トラックの単位輸送コスト(円/ton/km)

d_{fj} : f から j までの距離(km) d_{fk} : f から k までの距離(km)

d_{kj} : k から j までの距離(km) o_{fj} : f から j までの貨物量(ton)

o_{fk} : f から k までの貨物量(ton) o_{kj} : k から j までの貨物量(ton)

l_i : 事業者 i の積載率(%)

l_{sm} : レベル m の提携 S の積載率(%) (m は貨物量によって決定)

C_{td} : 2 ton トラックの価格(円) C_{tl} : 4 ton トラックの価格(円)

C_l : 1m² 当たりの土地の価格(円/m²)

C_b : 1m² 当たりの施設建設費用(円/m²)

D_i : 事業者 i の配送施設の面積(m²)

D_{sm} : レベル m の提携 S の共同配送施設の面積(m²)

y : 固定費用の分割支払い年数(年)

4. 各事業者の費用負担額の算出

(1) 算出方法

本研究で対象とするゲームを費用ゲームとして考えるため、2. で述べたゲームの特性関数の代わりに費用関数を用いる。今回、費用関数が加法性(下部加法性)をみたすかどうか判断することができないため、費用関数 $C'(S)$ は以下のように定義する。

$$C'(S) = \min_{\beta_i \in T} \left\{ \sum_{B_{ip} \subseteq \beta_i} C(B_{ip}) \right\} \quad \dots(11)$$

ただし、 T は、 S に属するプレイヤーによる部分提携構造であり、

$$T = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\} \quad \beta_i = \{B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{im}\}$$

$$p \neq q \text{ ならば, } B_{ip} \cap B_{iq} = \phi$$

$$B_{i1} \cup B_{i2} \cup \dots \cup B_{im} = S$$

である。

表1 各ケースごとにみた共同化前後における各企業の費用負担額と利益(または補助金)

		Case 1		Case 2			
		C-1 のコスト	C-1 の $n \varepsilon^*$	C-2L のコスト	C-2L の $n \varepsilon^*$	C-2S のコスト	C-2S の $n \varepsilon^*$
シナリオ1 (low FC)	共同化前	285411	-----	833947	-----	142705	-----
	共同化後	273808	9722	678360	15270	139651	3054
シナリオ2 (high FC)	共同化前	285411	-----	1025728	-----	142705	-----
	共同化後	353717	-68306	952677	-64635	154064	-12927

ただし、C-1 は Case 1 における事業者を、C-2L と C-2S はそれぞれ Case 2 における規模の大きな、小さな事業者を表す。

たとえば、 $C'(12) = \min\{C(1) + C(2), C(12)\}$ である。

次に、以下のようにして最小コアを求める。ただし、費用ゲームでは、2. と異なり最小化は最大化、 ε の値の符号は逆の関係になる。

$$\max \varepsilon$$

subject to

$$C'(S) - \sum_{i \in S} x_i \geq \sum_{i \in S} n_i \varepsilon \quad (\forall S \subset N, S \neq N) \quad \dots(12)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = C'(N) \quad \dots(13)$$

なお、ここで、 ε のウェイトとして n_i を用いる。 n_i は、プレイヤー i に対するウェイトを表しており、貨物の輸送量に応じて決定することとした。これは、共同輸送での輸送量が大きい事業者ほど、排出ガスの削減量も多く、それだけ社会的貢献度が大きいと考えられるためである。たとえば、輸送量が 50(ton) ならば $n=1$ 、150(ton) ならば $n=3$ とする。また、最小コアから唯一の費用負担額を絞り込む。その際、環境に対する社会的貢献度を考慮した 1 事業者あたりの要求(平均要求)を妥協の限度としての ε とみなしているため、平均値を一般化して定式化し、費用負担額を求めていることになる。

(2) シナリオ別にみた費用分担額

TC を固定し、 FC のパラメータである $(C_l + C_b) = 1.5 \times 10^5$ (円/m²) とした場合(シナリオ 1) と $(C_l + C_b) = 5 \times 10^5$ (円/m²) とした場合(シナリオ 2) における、各事業者の費用負担額および ε^* を算出した結果は表 1 のとおりである。

ここで、 ε^* の値が正の数ならばコアが存在することを表し、利得が生じることになる。しかし、 ε^* の値が負の数ならば共同化を実現するためには補助金を与えなければならない。

表 1 に示すように、シナリオ 1 では、Case 1、Case 2 のいずれの場合もコアが存在し、共同化によって利得が生まれている。一方、シナリオ 2 では、両ケースとも、 ε^* が負の値となっており、共同化を行うためには補助金が必要となることがわかる。

ここで、シナリオ 2 の両ケースについて詳しくみてみることにする。図 2、3 は、各ケースにおける共同化前後の費用と最終的な費用の負担額を示したものである。

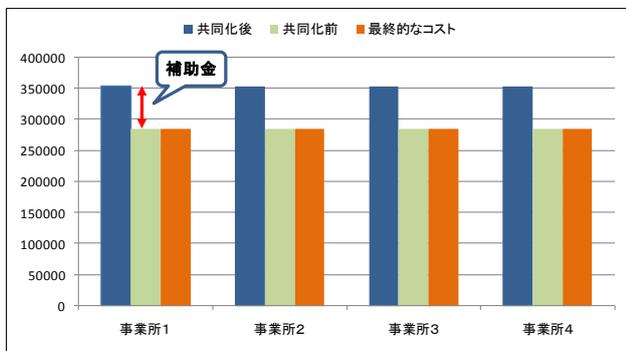


図2 シナリオ2における Case 1 の各事業者の費用

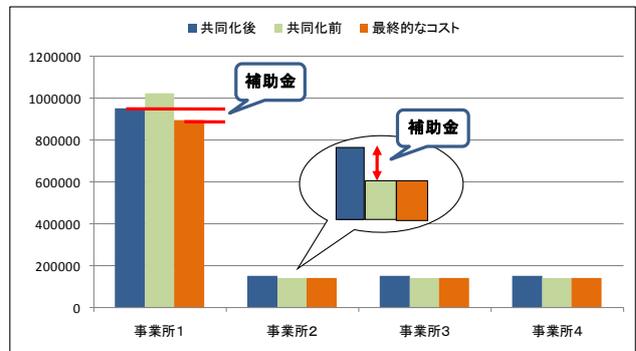


図3 シナリオ2における Case 2 の各事業者の費用

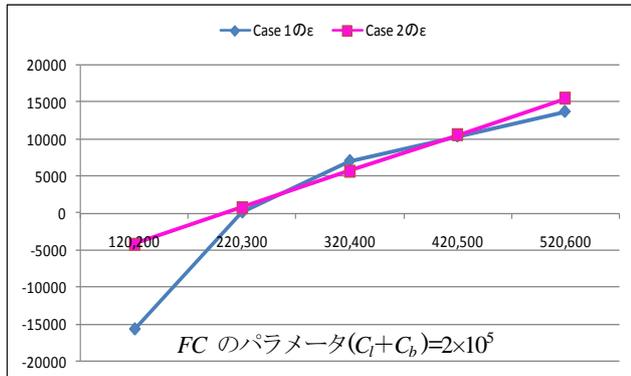


図4 各ケースでの TC の変化による ε の変化

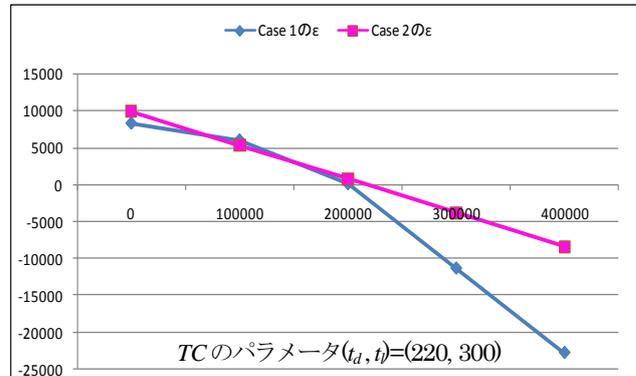


図5 各ケースでの FC の変化による ε の変化

まず、図2に示すように、同規模の事業者間の場合 (Case 1) では、共同化によってコストの削減が生じない時には、共同化によって生じる赤字分を補填させるだけの金額をどの事業者にも配分することになる。

次に、図3に示すように、1つの大規模な事業者が存在する場合 (Case 2) では、共同化によって、大規模な事業者にはコスト削減が生じているが、残る小規模な3事業者ではコスト増となっている。そして、全提携を実現するためには、この3事業者に補助金を配分する必要があるが、大規模な事業者には、コスト削減が生じているにも関わらず、補助金を与えなければならないことがわかる。これは、すべての事業者間の共同化を実現するためには、全提携を妨げるような事業者間の部分的な共同化が行われることを防ぐことが必要となるためである。

(3) TC と FC の変化による ε の変化

次に、TC と FC のパラメータの一方を固定して、それぞれの値を変化させた場合に、ε の値がどのように変化するかを調べてみる。ここでは、FC のパラメータである $(C_t + C_b) = 2 \times 10^5$ と固定して TC を変化させた場合と、TC のパラメータである $(t_a, t_b) = (220, 300)$ として FC を変化させた場合について考える。その結果を示したものが図4、5である。

まず、図4が示すように、TC のパラメータが大きくなるにつれて ε の値も大きくなっている。これは、費用関数の中で、下部加法性を仮定している変動費用の相対的な比重が高くなることによって、コアの条件を充足するようになるためである。

一方、図5では、FC のパラメータが大きくなるにつれ

て、ε の値は小さくなっており、補助金が必要となっている。これは、全体の費用の中で、下部加法性をみたさない固定費用の比重が変動費用よりも高くなり、コアが空になるためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、貨物輸送の共同化の前後における各事業者の負担すべき費用の変化に着目し、ε コアの考え方を適用することによって、共同化を行った場合の参加事業者間における適切な費用分担について考察してきた。その結果、参加事業者の規模の違いや費用関数における固定費用と変動費用の構成比率の違いがコア存在の有無や費用負担額に及ぼす影響を明らかにできた。

今後の課題としては、実例に即した費用関数を定義するとともに、事業者の環境改善に対する社会的貢献度などを考慮した費用の分担方法について考察していきたい。

【参考文献】

- 1) T. Yamada, E. Taniguchi, M. Noritake and A. horie : Attitudes of Companies towards Introducing Co-operative Freight Transport Systems, City Logistics I , 219-232, 1999
- 2) たとえば、鈴木光男：新ゲーム理論、勁草書房、1994 など
- 3) D. Yang and M. Odani : Analysis on City Freight Cooperative Transportation System Using Game Theory, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7, 2007.
- 4) T. Yamada, E. Taniguchi and Y. Itoh : Co-operative Vehicle Routing Model with Optimal Location of Logistics Terminals, City Logistics II , 139-153, 2001