

# 国際海上輸送における鉄鉱石輸入を対象とした 物流コスト及びCO<sub>2</sub>排出量の削減に関する研究

鈴木 ひろか

指導教員 黒川 久幸 教授

## 1. 序論

### 1.1 研究背景

日本は、石油や鉄鉱石などの天然資源の 90%以上を海外からの輸入に依存している。近年、高コスト構造が懸念されている三大バルクを対象に、日本政府は「国際バルク戦略港湾政策」を策定した。当該政策では、一括大量輸送による物流コストの削減と安定的な調達を目指し、大型船の活用を掲げている。全国 9 港の拠点港に対する集中的な投資や、大型船を利用した複数港揚げ、港湾の連携などが政策として挙げられている。しかし、大型化を推進していく上での適切な船型の目安が明確ではない。拠点港や連携港湾を用いた運航パターンに関しても不明瞭である。

さらには、国際海運からの CO<sub>2</sub> 排出量の削減も求められているが具体的な CO<sub>2</sub> 排出量の推計や削減のための検討は行われていない。

### 1.2 研究目的

そこで本研究では、国際バルク戦略港湾政策における鉄鉱石の国際海上輸送を対象に、物流コストならびに CO<sub>2</sub> 排出量の削減を図るための運航パターンについて分析する。具体的には、感度分析から船舶の大型化や連携する港湾数や港湾間の航海距離が与える影響を明らかにし、日本全体の鉄鉱石輸入における最適化を行う。定量的な分析を踏まえ、大型化を導入する際の目標船型や着手する航路の優先順位などを提言する事を目的とする。

## 2. 物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量の削減に関する政策

### 2.1 国際バルク戦略港湾政策

海上荷動き量の増加により、規模の経済性を追求した船舶の大型化が急激に進んでいる。現在の世界の主流は、Capesize 船であり、近年では 40 万 DWT 級の Valemax 船が運航されている。

このような状況から港湾の大水深化が進められ、ブラジルや中国では大水深岸壁が多数整備されて

いる。しかし、日本においては-20m 以上の水深を有する岸壁は大分港のみであり、Capesize 船といった大型船が入港出来ない港湾が多数ある。国際バルク戦略港湾政策では、2020 年までに戦略港湾において VLOC 船に対応可能な体制の構築を目指している。選定された戦略港湾は、連携して貨物の集中輸入を行う連携港湾を選定している。例えば、鉄鉱石の戦略港湾である木更津港では、室蘭港、鹿島港、千葉港、川崎港、名古屋港、和歌山港、東播磨港、呉港、北九州港の 9 港を選定している。これらの港湾は、付近に製鉄所等がある等の立地条件から需要量が非常に多く、木更津港からのセカンドポートとして考えられている。

### 2.2 IMO による CO<sub>2</sub> 排出量削減の手法

国際海運からの CO<sub>2</sub> 排出量が年々増加している事が問題視されており、MARPOL 条約附属書の改正が行われた。IMO では、CO<sub>2</sub> 排出量を削減する手法として技術的手法と運航的手法を掲げている。技術的手法は抵抗の少ない船舶や効率の良いエンジンの開発研究、運航的手法はウェザールーティングなどである。

### 2.3 政策の課題

国際バルク戦略港湾政策では、VLOC 船の活用が挙げられているが、船型による物流コストの削減効果の傾向を踏まえた目指すべき大型化の目安や大型船を用いた航路(荷揚港への寄港方法)について検討する必要がある。そして、優先的に大型化すべき対象輸入国についての検討もすべきである。

IMO の手法においても、技術的手法と比べ、運航的手法は十分に議論されていないため、運航パターンの検討が必要である。

## 3. 物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量の算出式

### 3.1 物流コストの算出式

本研究では物流コストを運航費と船費の総計とした。運航費は貨物費、燃料費、港費の合計、船費は減価償却費、船員費、保険料の合計である。

$$\begin{aligned} \text{物流コスト}[\$/\text{年}] &= \text{運航費}[\$/\text{年}] + \text{船費}[\$/\text{年}] \text{-----} (1) \\ \text{運航費}[\$/\text{年}] &= \text{貨物費}[\$/\text{年}] + \text{燃料費}[\$/\text{年}] + \text{港費}[\$/\text{年}] \text{----} (2) \\ \text{船費}[\$/\text{年}] &= \text{減価償却費}[\$/\text{年}] + \text{船員費}[\$/\text{年}] + \text{保険料}[\$/\text{年}] (3) \\ \text{貨物費}[\$/\text{年}] &= \text{荷役費}[\$/\text{年}] + \text{保管費}[\$/\text{年}] \text{-----} (4) \\ \text{燃料費}[\$/\text{年}] &= \text{燃料単価}[\$/\text{トン}] \times \\ &\quad \text{燃料消費原単位}[\text{トン}/\text{年}] \times \text{総航海時間}[\text{年}/\text{年}] (5) \\ \text{港費}[\$/\text{年}] &= \text{入港費}[\$/\text{年}] + \text{とん税}[\$/\text{年}] + \text{水先料}[\$/\text{年}] + \text{曳船} \\ &\quad \text{使用料}[\$/\text{年}] + \text{岸壁使用料}[\$/\text{年}] \text{-----} (6) \\ \text{減価償却費}[\$/\text{年}] &= \{(\text{船価} - (\text{船価} \times 0.05)) / 20\} [\$/\text{隻} \cdot \text{年}] \times \\ &\quad \text{就航隻数}[\text{隻}] \text{-----} (7) \\ \text{船員費}[\$/\text{年}] &= \text{船員費単価}[\$/\text{隻} \cdot \text{年}] \times \text{就航隻数}[\text{隻}] \text{-----} (8) \\ \text{保険料}[\$/\text{年}] &= \text{保険料単価}[\$/\text{隻} \cdot \text{年}] \times \text{就航隻数}[\text{隻}] \text{-----} (9) \\ \text{保険料単価}[\$/\text{隻}] &= 10890075.2 + (144.6 \times \text{DWT}) \text{-----} (10) \end{aligned}$$

### 3.2 CO<sub>2</sub> 排出量の算出式

参考文献(1)を参考に、CO<sub>2</sub> 排出量を算出した。

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 排出量}[\text{t-CO}_2/\text{年}] &= \text{CO}_2 \text{ 排出原単位}[\text{t-CO}_2/\text{トン}] \times \\ &\quad \text{燃料消費原単位}[\text{トン}/\text{年}] \times \text{総航海時間}[\text{年}/\text{年}] \text{-----} (11) \end{aligned}$$

## 4. 分析対象及びデータ

### 4.1 分析対象

日本は鉄鉱石を 1 億 3,432 万トン (2010 年)<sup>(2)</sup> 輸入しており、このうち、オーストラリアから 7,790 万トン、ブラジルから 3,029 万トン輸入している。そして、国内の港では木更津港の輸入量が多く、国際バルク戦略港湾として選定されている。特に、オーストラリアの Port Walcott 港やブラジルの Sepetiba 港からの輸入量が多い<sup>(2)(3)</sup>。ブラジルの Sepetiba 港は大水深岸壁を有しており、船舶の大型化の有力な候補となる港である。そこで本研究では、木更津港と Sepetiba 港間における鉄鉱石輸入を対象に、基本となる需要量や航海距離等を下記のように設定する。

需要量：年間 300 万トン  
航海距離：1.2 万 NM  
船型：20 万 DWT  
寄港回数：20 回/年 (荷揚げ量の上限：15 万トン)

また、5.2 の感度分析で使用する隣り合う連携港湾間の航海距離を、木更津港－下津港間 (316NM) や木更津港－東播磨港間 (363NM) 等の航海距離を参考に、300NM を基準とした。

### 4.2 分析内容

鉄鉱石の積出港から国内の荷揚港までの輸入を対象に下記の項目の感度分析を行う。更に、この結果を元に比較分析を行い、望ましい運航パターンの検討と効果の検証を行う。

- (1) 船型の大型化の影響
- (2) 連携港湾数の影響
- (3) 連携港湾間の航海距離の影響
- (4) 需要量の影響
- (5) 航海距離の影響

上記の項目の内、(2)連携港湾数の影響は複数の荷揚港に寄港する場合の分析で、(3)連携港湾間の航海距離の影響は国内の隣り合う連携港湾間の航海距離を変化させた場合の分析である。そして、(5)航海距離の影響は積出港から国内の荷揚港までの航海距離を変化させた場合の分析である。

なお、(1)船型の大型化の影響等の感度分析では、港湾における荷揚げ可能な貨物量を考慮した分析も行う。具体的には、1 回あたり荷揚げ可能な貨物量の上限值を 15 万トンとして分析を行う。

### 4.3 使用データ

物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量の算出で使用する単価及び原単位は、実際のデータから算出し、満載時の船速を 13.9knot、そして空船時の船速を 14.3knot とした。

## 5. 鉄鉱石輸入を対象とした感度分析

### 5.1 船型の大型化の影響

船型と物流コストの関係を図 1 に示す。図中の点線は港湾における荷揚げ量の制約がない場合を示し、黒線は制約がある場合を示している。

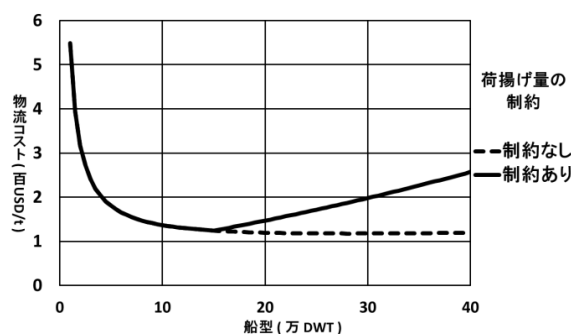


図 1 船型と物流コストの関係

まず、制約がない場合、船型が大型化するに従って、物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量が低減する。これは、大型化による寄港回数及び必要隻数の削減効果による。特に 10 万 DWT 程度までの大型化は非常に削減効果大きい。この分析結果から、10 万 DWT 程度の大型化をまず進めていくべきであると言える。一般バルク船の平均船型は約 6 万 DWT であったため、荷揚げ量の制約がない場合、物流コ

ストを大きく削減するためには、一般バルク船の大型化が有効である。本研究の条件下では 8,566 万 USD の削減効果があった。

次に、港湾における荷揚げ量の制約がある場合は、物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量が最小となる望ましい船型が存在し、この船型を超えると積載率の低下から物流コスト等が上昇している。

### 5.2 連携港湾数の影響

次に、荷揚港数と物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量の総合評価(総コスト)による削減効果を分析した。制約がない場合には荷揚港が増加すると総コストも増加する傾向にあったが、制約がある場合には望ましい船型と荷揚港数の組み合わせがある事が分かった。そこで、4 章で述べた基本設定と比較した結果を図 2 に示す。本分析の条件では、船型 30 万 DWT で 2 港揚げを行う場合が、最も大きな削減効果を得た。

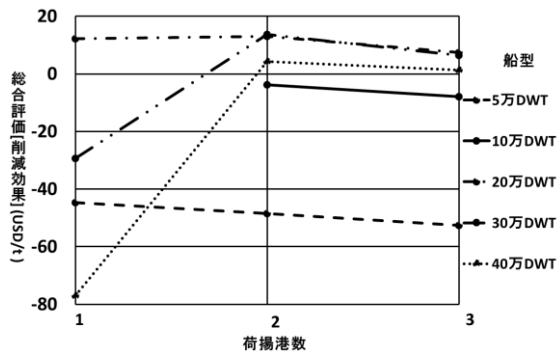


図 2 荷揚港数と総合評価削減効果(制約あり)

### 5.3 航海距離と需要量の影響

大型船の導入にあたり、どの航路から推進すべきか検討するため、航海距離や需要量を変化させた分析を行った。その結果、航海距離が長距離な程、需要量が多い港湾間ほど、大型化による削減効果は大きかった。故に、オーストラリアやブラジルからの輸入において、まずは大型化を進めていくべきであると言える。

### 5.4 鉄鉱石輸入の比較分析による効果の検証

政策で選定された戦略港湾を中心に、削減効果の検証を行う。対象とする荷揚港は、鉄鉱石の戦略港湾である木更津港と水島港・福山港、そしてこれらの連携港湾である室蘭港、鹿島港、千葉港、川崎港、名古屋港、下津港、東播磨港、呉港、大分港、北九州港の合計 13 港とし、3 パターンでの比較を行う。(a)は Sepetiba 港と 13 港の港湾間を

それぞれ個別に往復する輸送で、船型を各港湾に寄港する船舶の平均船型とした。(b)は、船型を 30 万 DWT とした場合である。(c)は船型を 30 万 DWT とし、木更津港と水島港を拠点に、それぞれ次に示す港湾との 2 港揚げとした場合の輸送である。

木更津港：室蘭港、鹿島港、千葉港、川崎港、名古屋港  
水島港：下津港、東播磨港、福山港、呉港、大分港、北九州港

比較した結果を図 3 に示す。(b)のような、大型船を用いたシャトル輸送が好ましいという結果となった。

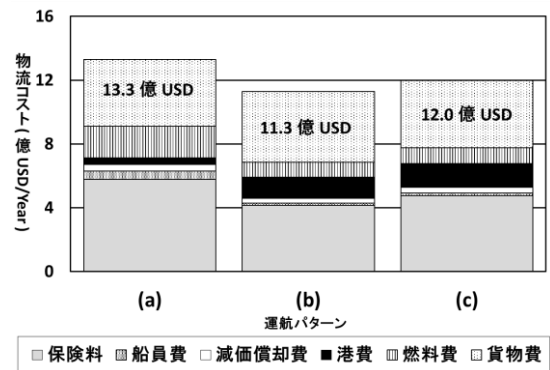


図 3 運航パターン別の物流コスト

## 6. 鉄鉱石輸入を対象とした最適化

### 6.1 定式化

物流コスト及び CO<sub>2</sub> 排出量が最小となるような船型と航路の最適化を行う。物流コストを、貨物費、燃料費、港費、船費、CO<sub>2</sub> 排出量と排出権取引価格から貨幣換算した値の総計とし、これを総コストとし、総合評価する。式は以下の通りであり、(1)から(4)に制約条件を示す。

$$\min. \quad CST =$$

$$CO1 + \sum_{(k,r) \in SR} \left( CO2_{k,r} + CO3_{k,r} + \frac{CO4_k}{CO5_{k,r}} + CO6_{k,r} \right) \cdot y_{k,r}$$

(1) 貨物流動の制約

$$\sum_{(k,r,a,j) \in SL} x_{k,r,a,j}^{a,b} = DEM_{a,b}, \forall (a,b) \in SU$$

$$\sum_{(k,r,i,a) \in SL} x_{k,r,i,a}^{a,b} = 0, \forall (a,b) \in SU$$

$$\sum_{(k,r,i,b) \in SL} x_{k,r,i,b}^{a,b} = DEM_{a,b}, \forall (a,b) \in SU$$

$$\sum_{(k,r,b,j) \in SL} x_{k,r,b,j}^{a,b} = 0, \forall (a,b) \in SU$$

$$\sum_{(k,r,i,h) \in SL} x_{k,r,i,h}^{a,b} - \sum_{(k,r,h,j) \in SL} x_{k,r,h,j}^{a,b} = 0$$

$$\forall (a,b) \in SU, \forall (k,r) \in SR, \forall h \in SP_{k,r}: a \neq h \text{ and } b \neq h$$

(2) 積載の制約

$$MAX_k \cdot y_{k,r} - \sum_{(a,b) \in SU} x_{k,r,i,j}^{a,b} \geq 0, \forall (k,r,i,j) \in SL$$

(3) 決定変数の制約

$$x_{k,r,i,j}^{a,b} \geq 0, \forall (a,b) \in SU, \forall (k,r,i,j) \in SL$$

$$y_{k,r} \geq 0, \forall (k,r) \in SR$$

(4) 荷揚げ貨物量の上限制約

$$ULT \cdot y_{k,r} - \sum_{(k,r,i,b) \in SL} x_{k,r,i,b}^{a,b} \geq 0$$

$$\forall (a,b) \in SU, \forall (k,r) \in SR$$

DEM: 輸送需要量 [トン/年]

x: 輸送貨物量 [トン/年]

y: 就航回数 [回/年]

SU: 需要の集合

SR: 船別の就航可能な航路の集合

SL: 航路別のリンクの集合

MAX: 最大積載量 [DWT]

ULT: 荷揚げ貨物量の上限值 [トン/(隻・港湾)]

## 6.2 最適化の結果

最適化では、(i) 荷揚げ可能な貨物量の上限と水深に制約を加えた場合(ii) 貨物量の上限を緩和した場合(iii) 貨物量と水深の制約を緩和した場合に分けて行った。(i)においては、貨物量の上限を5万トン、10万トン、15万トンとした。

結果は(i)の貨物量の上限が5万トンの場合は242億USD、10万トンの場合は201億USD、15万トンの場合は192億USD、(ii)は192億USD、(iii)は189億USDとなった。

表1に(i)の結果として貨物量別の荷揚港数、航路数、就航回数を示す。貨物量の上限が5万トンの場合、船型10万DWTの船舶を用いた荷揚港2港の運航パターンが最も多かった。貨物量の上限値が緩和される程、1港の割合が多くなり、用いられる船型は20万DWTの船舶が多くなった。

表1 (i) 貨物量別・荷揚港、航路数、就航回数

貨物量の上限 (トン/(回・港))	船型 (DWT)	荷揚港数	航路数	就航回数 (回/年)
5万	10万	1	6	85.620
	10万	2	77	771.978
	10万	3	50	417.663
10万	10万	1	128	1136.168
	20万	2	7	48.142
15万	10万	1	50	496.691
	20万	1	85	367.881

(i)から貨物量の上限や水深の制約条件を緩和した(ii)及び(iii)では、船型10万~20万DWTでシャトル輸送を行うパターンが最も多くなった。総コストの差額は、貨物量の上限が5万トンの場合、貨物量の上限を緩和すると約50億USD、更に水深の制約を緩和すると約52億USD削減された。故に、貨物の保管場所の整備を優先的にすべきであると言える。

## 7. 結論

本研究では、日本の鉄鉱石輸入を対象に、物流コストならびにCO<sub>2</sub>排出量の削減を図るための運航パターンについて検討した。

その結果、船型大型化を行う程、削減効果があり、特に10万DWT程度までの大型化による削減効果が大きかった。一般バルク船の平均船型が6万DWT程度であり、日本の荷揚港においても必要水深が足りているため、船型10万DWT程度までの大型化を行う事は非常に有効である。また、航海距離が長距離で需要量が多い港湾間の場合、非常に大きな効果が得られた。故に、オーストラリアやブラジルからの輸入において、まずは大型化を進めていくべきである。航路は、シャトル輸送が最も良い結果となったが、複数の荷揚港に寄港する必要がある場合には近距離の港を2港程度で連携させると良い事が分かった。

現状では、荷揚げ可能な貨物量や水深には制約がある。しかし、荷揚げ可能な貨物量の上限が緩和された場合、水深の制約よりも総コストに大きな影響を与えた。故に、港湾整備に関しては、まずは保管場所の整備を優先的に行うべきであると言える。

## 参考文献

- (1) 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団: 船舶からの温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の排出削減に関する調査研究報告書, pp10-33, 2000.03
- (2) 国土交通省: 港湾統計(平成22年度分年報), <http://www.mlit.go.jp/k-toukei/search/excelhtml/01/01201000a00000.html>
- (3) Lloyd's Marine Intelligence Unit: 船舶動静データ(2010年)