

サプライチェーンの視点から見た石油タンカー輸送について

流通情報工学専攻

香月 裕樹

1. はじめに

エネルギーは国民生活と経済活動の基盤的要因であり、人口の増加及び経済の発展とともに世界のエネルギー消費量は年々伸びてきている。世界の1次エネルギー（水力・原子力・天然ガス・石炭・石油）の供給に占める石油の割合は約44%と高く、その半数を占めている。

日本はエネルギー資源をほとんど持たないため、石油や石炭などのエネルギーのほとんどを海外からの輸入に頼っており、そのうち原油輸送が大半の割合を占めている。そのため、日本にとって石油輸送の重要性は高く、タンカー輸送についての検討を行うことは非常に重要である。

タンカー輸送を行っている船会社は石油企業との契約によりタンカーの運航を行っている。このタンカーの輸送需要は荷主である石油企業によって決定されている。このため、船会社が効率的な運航を行うためには、消費者の需要や製油地の処理能力などを考慮し、企業の利益が最大となるような調達から精製、販売までの流れを決定するという石油企業の行動を把握し、必要船型や隻数、船腹量などの運航形態を決定する必要がある。

過去、石油企業の行動については、効率的な原油調達という面から、日韓の製油所の連携による、アジアプレミアムの改善方法の検討に関する研究などが行なわれている。また、最近では、石油企業の行動を世界全体として捕らえ、調達競合状況を検討できるような研究も行われてきている。

しかし、これらの研究は石油企業の行動を調達 - 精製 - 販売という1つのサプライチェーンとして捕らえていない。さらに、原油・製品価格の変動は重要な要因でありながら、これを考慮した研究は行なわれていない。

石油企業は利益が最大となるように原油の調達から精製、販売までのチェーンを決定しているため、この流れをサプライチェーンとして捕らえる必要がある。また、石油市場は量的に世界規模で連動しているため、原油価格や製品価格に応じて、調達先や販売先を変更する可能性がある。そのため、世界全体として捕らえる必要がある。

一方、輸送を中心とした研究では、輸送問題として、貨

物流動に関する研究や、船舶の大型化やハブ港の配置等に関する研究があり、数理計画法などを用いた研究が行なわれている。また、経済的視点から荷主の行動を推定し、これを基に航路ごとの需要を求め、必要船腹量を求める研究も行われている。しかし、石油企業の行動はサプライチェーンの考えの中で行動を行っており、石油需要は価格などの影響を受けチェーンが変化するため、必要船腹量を求める際にもこのことを考慮しなければならない。また、港湾能力や水深、輸送途中の航路や水深など、石油輸送の現状を考慮することは重要な要因でありながらこれを考慮した研究は行われていない。

そこで本研究では、荷主である石油企業の行動における原油の調達から販売までの流れをサプライチェーンとして捕らえ、原油、製品価格の変動を考慮し、世界全体の原油調達から販売に至る石油サプライチェーンを調達と販売をそれぞれ表現する2つの二部グラフによるネットワークモデルとして表現し、石油企業の利益が最大となるような輸送量を求める原油・製品輸送モデルの構築を行う。そして、この石油企業の行動の推定を基に日本向けタンカー船隊の必要船腹量を算出できる石油サプライチェーンモデルを構築することを目的としている。

2. 石油市場とタンカー輸送の現状

2.1. 石油市場の特徴

世界の石油市場の特徴として次の5つが挙げられる。

製油地によって油種の性状により取り扱い可能な油種に制約がある。

原油は北海原油など100種類以上、製品は軽油など30種類に分類され、種類が多い。

原油から生産できる石油製品の割合（得率）が設備により製油地ごとに異なる。

石油製品の需要構造は品質、性状について消費地ごとに違いがある。

原油価格は調達地などによっても異なる。また、原油価格の変動に連動し、図1のように石油製品価格も変動する。

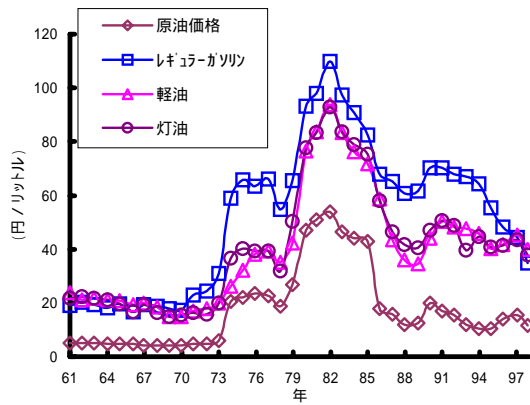


図 1：原油価格と製品価格の変動

2.2. タンカー輸送の現状

タンカーについて

近年では、船型を世界の重要な海峡を通過できる最大サイズに合わせて設計するようになっており、マラッカ船型、パナマ船型などの船が建造されてきている。

VLCC 級（15 万トン以上のタンカー）の大型船舶の喫水は 19m～20.5m 程度である。

港湾について

表 1 に中東、アフリカ、日本の入港可能喫水、入港可能積載量、荷役能力を示す。

表 1：各港の港湾概要

項目		原油積地		原油揚地
		中東	アフリカ	日本
入港可能喫水 (m)	最大	32.3	25.5	35.5
	最小	11.0	12.6	9.6
	平均	20.5	20.2	16.6
入港可能積載量 (DWT)	最大	750000	350000	500000
	最小	75000	130000	27000
	平均	343571	227933	174584
	合計	9620000	3419000	15537954
荷役能力 (t/h)	最大	18900	8673	39200
	最小	1283	940	1450
	平均	7050	4235	8317
	合計	197401	71995	698650

これを見ると各地とも VLCC 級の船舶が着岸可能である港湾があることがわかる。

航路について

中東から日本に向けて石油をタンカーで運んでくるには、マラッカ・シンガポール海峡（以下マラッカ海峡）を通過する航路と、ロンボック海峡を通過する2つの航路がある。この航路の距離差は 1200 マイルである。

マラッカ海峡は世界で最も通行量の多い海峡である上、

水深が浅いため(維持水深 23m)大型船が十分な余裕水深(常に 3.5m の UKC が必要)を持って航行することは困難である。

3. 石油サプライチェーンモデル

本研究では、石油企業の行動をサプライチェーンの観点から見て、それに対応した日本向けタンカー船隊の検討を行うために、世界全体の原油調達から精製、販売に至るサプライチェーンを対象とし、製品価格の変動を考慮した、石油サプライチェーンモデルを作成した。このモデルは原油・製品輸送モデルと船腹量算出モデルの2つから(図2)構成されている。

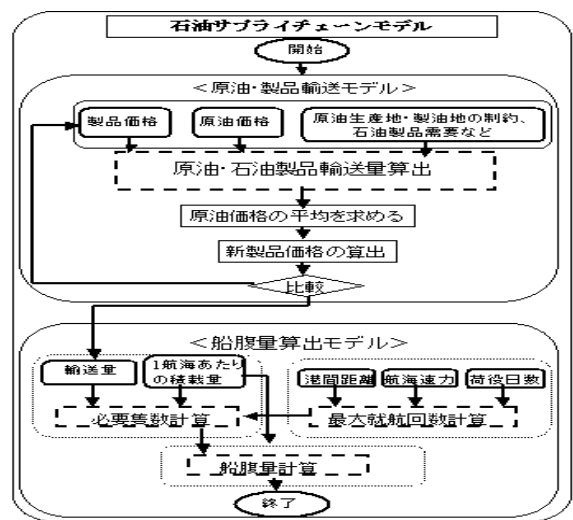


図 2：モデルの構成

3.1. 原油・製品輸送モデル

原油・製品輸送モデルは、石油企業の行動を把握するためのモデルである。本研究では、原油・製品輸送の原油生産地（5 地域 16 油種）、製油地（9 地域）、消費地（10 地域）をノード、原油調達・製品販売をリンク、原油・製品の輸送量をリンク上のフローとしたネットワークモデルとして表現し、これを数理計画問題として定式化した。

このモデルでは石油企業の総利益が最大となるような原油・製品の輸送量を求めており、目的関数は式 1 で表すことができる。

$$PT = IC - (OP + OR + OS) \quad \dots \text{式 1}$$

ここで、PT は利益、IC は収入、OP は原油調達費、OR は原油精製費、OS は製品輸送費を表す。制約条件としては 2.1 節の石油市場の特徴を考慮している。また、原油価格と製品価格が連動している特徴をモデルに取り入れるため、原

油・製品輸送モデルにおいて以下のような繰り返し計算を行うこととした。

- 1) 原油・製品価格などの初期条件を与え、世界全体の原油・製品輸送量を算出する。
- 2) この結果を基に、調達してくる原油価格の平均を求める。
- 3) この平均価格を図 1 より求めた新製品価格を算出するための回帰式に代入し新製品価格を算出する。
- 4) この新製品価格と初期価格の比較を行い、価格差がある場合は新製品価格で書き換え、再度計算を行う。
- 5) この計算を価格差がなくなるまで繰り返し、差がなくなったときの価格を最終製品価格とし、輸送量・調達地域を決定する。

なお、石油企業は利益を最大となるように行動をとり、各企業とも同一行動をとると考えられるため、本研究では 1 つの石油企業と仮定した。

3.2. 船腹量算出モデル

船腹量算出モデルは必要船腹量を算出するモデルである。原油・製品輸送モデルで算出した輸送需要を基にして、年間最大就航回転数、必要隻数を算出することにより必要船腹量を求めている。

4. 日本向けタンカー船隊の検討

本研究では、日本と最も原油取引が多く、過去に国民生活に大きな影響を与えたアジア向け中東原油価格が変化した場合とタンカー運航費用を考慮した場合について検討を行った。

4.1. 検証における各種設定

日本向けタンカー船隊の検証を行うために、以下のよう

<原油・製品輸送モデルの設定>

- 年間油種供給可能量
1998 年に対する 1999 年の生産割合を参考にして、実績値に+15%したものを使用した。
- 年間原油処理能力・年間需要量
年間原油処理能力は製油地ごと、需要量は 2.1 を考慮し消費地ごとに、1997 年の実績値を使用した。
- 原油・製品価格
原油・製品価格は製油地の調達・販売地や季節などにより変動するが、年間の傾向を見るため、初期値として 1997 年の実績平均価格を使用した。
- 製油費用

製油費用の構成は複雑であるが、本研究は輸送を主眼としているため簡略化し、各製油所で取り扱える油種にこだわらず同様であるとした。1997 年の実績値を使用。

• 製品輸送費用

石油製品の輸送費用は製品の種類、仕向地により異なる。本研究では製品輸送船の最大サイズである 4 万 DWT クラスの船舶での輸送費用を使用した。ただし、今回は域内輸送については考慮しない。

<船腹量算出モデルの設定>

• 船舶（船型、船速）

原油輸送で用いる船型サイズは 2.2 節で述べたように、港湾設備や航路で制約を受けるため、現状、マラッカ海峡を通過することができる最大船型（28 万 DWT）で輸送するものとする。平均速力は 16.1 ノットとした。

• 港湾（停泊時間、待船時間）

停泊時間は 1 航海あたり VLCC を 7.1 日、15 万トン未満は 5.1 日としている。これは、手仕舞い、荷役などの港での荷役時間にかかる時間である。

待船日数は 1 航海あたり VLCC を 6.0 日、15 万トン未満は 3.2 日としている。これは、入港時などの潮汐待ち時間や ETA などにかかる時間である。

<費用の設定>

運航にかかる総費用は運航費、船費、資本費により構成されている。

運航費はタンカー運航時にかかる費用であり、燃料費、港費により構成されている。船費はタンカーを運航可能な状態に保つための費用であり、船員費、修繕費、潤滑油費などにより構成されている。資本費はタンカーの建造から竣工までにかかる費用で、建造費や登録料などにより構成されている。

これらの費用は船社へのヒアリングにより調査した値を使用する。

4.2. 検討結果

4.2.1. 原油価格の変動による検討

図 3 は原油価格が変動した場合の原油調達地・必要船腹量の変化を表したものである。図中の点線は現状の長期契約量（約 7 割）とスポット契約量（約 3 割）を表している。船腹量の約 1500 万トンが長期契約量、残りがスポット契約量である。

この結果を見ると、原油価格が上昇するとアフリカへと調達地をシフトさせるため、必要となる船腹量が増加する

ことがわかる。そのため、中東の港だけでなく、アフリカの港に入港できる船型のタンカー需要が高まることが予想される。

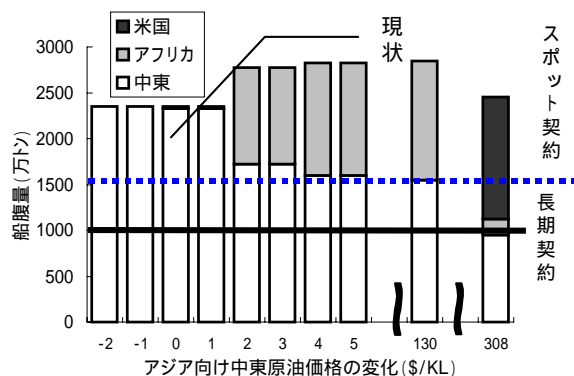


図 3：価格変動と調達地・船腹量の関係

また、実線のようにアジア向け中東原油価格が上昇しても、中東からの原油調達には最低約 1000 万トンの船腹量が必要であることがわかる。中東からの一定量の輸送需要が存在することから、このルートでは、輸送コストを削減のためにタンカーの大型化の検討は意義のあることといえる。

4.2.2. 費用を考慮した検討

図 4 はマラッカ海峡の制約がある場合とない場合について船型、必要隻数と総費用の関係を表したものである。

この図から、制約がない場合は船型が大型化するほど総費用が下がることが分かる。また、必要隻数を比較すると約 10 隻の差がある。現実には 28 万トン以上になるとマラッカ海峡を通過することができなく、遠回りの航路となるため必要隻数が多くなり、総費用が高くなる。この差は約 200 億円である。

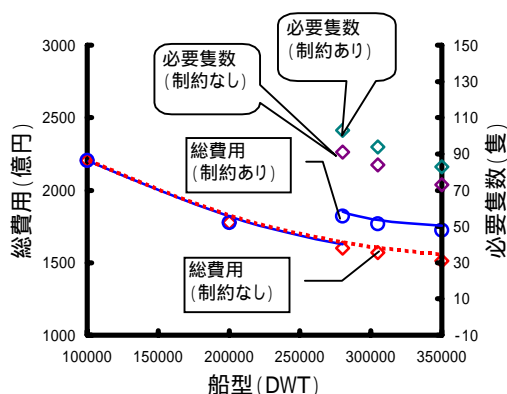


図 4：船型、必要隻数と総費用の関係

この差をなくすために現状では、28 万トンと同様の長さ、幅、深さで形を変えた 30.5 万トンタンカーが建造され始めている。今後、このように特殊な船型の開発がされる可能性がある。この 1 例として長さ、深さは現状のタンカーと

同様であるが、幅を広くすることにより積載量を増やす幅広船が考えられる。この幅広船だと、大型化するとマラッカ海峡を航行することができないという制約を解消することができ、約 200 億円以上の費用効果をもたらす可能性がある。また、コンテナ船と違い、ガントリークレーンなどの荷役機器による制約を受けないため、現実可能であると考えられるため、非常に有効な手段であると思われる。

5. まとめ

本研究では船会社がタンカー輸送に関する効率的な運航を考える際の意思決定支援を行うための石油サプライチェーンモデルを構築した。このモデルは原油・製品輸送モデルと船腹量算出モデルの 2 つのモデルにより表現した。

はじめに、荷主である石油企業の行動をサプライチェーンとして捕らえ、原油、製品価格の変動を考慮し、世界全体の原油調達から販売に至るチェーンをそれぞれ表現する 2 つの二部グラフによるネットワークモデルとして、石油企業の利益が最大となるような輸送量を算出できる原油・製品輸送モデルを構築した。

この結果を基に航路ごとの輸送需要を推定し、石油輸送の現状考慮し、輸送需要を満たすタンカーの必要船腹量の推定をすることができる船腹量算出モデルを構築した。

そして、モデルにより求めた原油製品の輸送需要と必要船腹量を現状の取引量と船腹量と比較、検証を行い、モデルの有効性を示した。このモデルにより、現状の輸送航路や輸送需要を表現することができ、これに合わせた運航形態の決定が可能となった。

したがって、本研究により船会社が石油企業の調達ルート変化の予測をし、その対処方法の検討を行うことが可能となり、輸送需要や石油サプライチェーンの変化が世界全体へどのような影響を及ぼすかといった石油企業の行動の推定が可能となった。これより、タンカー輸送に関する運航の意思決定を支援するための基礎ができたことになる。

今後の課題として、石油企業の行動をより細かく検討するためには、製油所設備内の詳細な定式化を組み込んだの検討や季節による原油価格の変動の検討、将来の石油製品の需要予測などが挙げられる。また、船会社の運航の意思決定をより充実させるには複数船型を組み合わせでの検討が必要となる。さらに、今回検討することができなかった、ETA や潮汐を考慮したタンカーの配船、スケジューリング、契約形態について考慮する必要がある。