

国際海運における 環境を考慮した船舶速度の推計

花岡 伸也¹・張 霽芳²

¹正会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 准教授
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1-14-12)

E-mail: hanaoka@ide.titech.ac.jp

²非会員 東京工業大学大学院 国際開発工学専攻 修士課程

本研究はコンテナ船を対象として、船社の利益を最大化する速度に対し、船舶からのCO₂排出量を内部化したときの船舶速度を推計する。ケーススタディとして3航路を対象に推計した結果、5000TEU以上の船舶では18.5~19.5ノット、それ以下の船舶では13.2~18.3ノットがCO₂排出量を内部化したときの速度となった。いずれも、現状より2%~23%の減速が必要になる。また、航路の違いやサイズの違いが結果に与える影響を分析した。

Key Words : CO₂ emission, container vessels speed, international maritime transport

1. はじめに

(1) 背景

2007年時点における国際海運部門のCO₂排出量は、世界の全CO₂排出量の2.7%であった。しかし、現状のまま削減策を取らない場合、国際貨物量の増加に比例して、2050年には2007年と比べて2.5~3.5倍に増加すると予測されている¹⁾。

京都議定書にて、国際海運部門は温室効果ガス排出削減の対象外となっており、国際連合の専門機関であるInternational Maritime Organization (IMO) (国際海事機関)が削減対策を検討している。現時点で、既存船における世界共通の温室効果ガス排出規制は存在しない。2006年10月に開催された「第55回海洋環境保護委員会」(MEPC55)において、IMOはCO₂削減を進める具体的手法を技術的手法、運航的手法、経済的手法の3つに分類した。

技術的手法とは、船舶設計および燃料の改善により運航効率を向上させるものであり、新造船が適用対象になる。バイオ燃料、全電気推進船、大型化、バラスト水低減、船体表面摩擦軽減、省エネデバイス、帆走技術などがその例である²⁾。評価指標として、EEDI (Energy Efficiency Design Index)が使われている。新造船の設計・建造段階で「一定の仕様下における貨物トンマイルあたりのCO₂排出量」を評価するもので、船舶のエネルギー効率性能を差別化するものである。

運航的手法とは、減速運航、運航管理最適化(個船の運航管理、船隊全体の運航管理)、天気を考慮した航路最適化など、船舶の運航のパターンを変更することより運航効率を向上をさせるものである。既存船を対象に、実際の運航における貨物トンマイル当たりのCO₂排出量を示すEEOI (Energy Efficiency Operational Indicator)が指標として用いられている。

経済的手法は、市場メカニズムの機能を前提として経済的なインセンティブを与えることより、関係主体の経済合理的行動に影響を及ぼし、CO₂削減を達成しようとする手法である³⁾。GHG Fund, ETS (Emission Trading Scheme), EIS (Efficiency Incentive Scheme)などが議論されている。以上の手法について、詳しくは参考文献6)にまとめられている。

(2) 目的

本研究は運航的手法の一つである減速運航に着目する。一般に、10%の減速がおよそ19%のCO₂排出削減をもたらすとされている⁴⁾。2010年には世界の約35%のコンテナ船が減速運航を実施しており、2008年に比べて船舶当たりの年間運航距離が減り、年間運航トンマイル数も減少した⁴⁾。この減速は、コンテナ船供給量調整のために実施されたものである。船社が2008年の金融危機前に発注した船舶が2010年以降に順次竣工したこと、また世界的な需要停滞により、コンテナ船が供給過多になったこ

とが原因である。減速によって各コンテナ船の運航効率は下がるものの、余っている船舶を利用でき、各船舶の燃料費削減にもなる。しかし、長期的に国際海上貨物需要は増加すると予測されており、今後、船社が速度を元に戻す可能性は十分に考えられる。

そこで本研究では、船社の利益を最大化する速度に対し、外部費用であるCO₂排出量を内部化したときの船舶運航速度を推計する。まず、運航速度と利益、排出量の関係をそれぞれ分析し、船社の利益が最大に、CO₂排出量が最小になる速度を推計する。次に、船社の利益とCO₂排出量の関係から、CO₂排出量を内部化したときの船舶運航速度を推計する。そして、航路および船舶サイズの影響を比較考察する。

(3) 研究対象航路と船種の選定

IMOによると、2007年時点で、コンテナ船による国際海運貨物輸送量は重量ベースで13%であるものの、CO₂排出量は全船種トップの28.5%を記録している¹⁾。本研究はコンテナ船を対象として、北米航路の代表として上海港→ロサンゼルス港（以下、ロサンゼルスルート）、欧州航路の代表として上海港→ロッテルダム港（以下、ロッテルダムルート）、アジア域内航路の代表として上海港→シンガポール港（以下、シンガポールルート）を、それぞれ船舶速度推計に適用するためのコンテナ航路のケーススタディに選定した。対象船種は上記3ルートで実際に運航されたコンテナ船とし、TEU容量別に、+8000TEU, 5000-7999TEU, 3000-4999TEU, 2000-2999TEU, 1000-1999TEU, ~999TEUの6クラスに分類した。

2. モデル

本研究で用いるモデルは、船社の利益 P_{ijk} を推計する式(1)と CO₂ 排出量 E を推計する式(2)から構成される。船社の利益は、船社の運航収入から運航費用（燃料費、船体の時間費用、貨物の時間費用）を引いたものである。式(1)の燃費部分および式(2)は Corbett et al (2009)²⁾を、また式(1)の船体の時間費用と貨物の時間費用は Lindstad et al (2011)³⁾を参考として、定式化した。

$$P_{ijk} = P_i M - [MF_k(v_k/v_{kd})^3 + AF_k](D_{ij}/v_k)P_f - C_{ijk}(T_{ijkb} + D_{ij}/24v_k) - M * C_M(T_{ijkb} + D_{ij}/24v_k)(C_{IR}/365) \quad (1)$$

$$E = 3.17[MF_k \times (v_k/v_{kd})^3 + AF_k](D_{ij}/24v_k) \quad (2)$$

P_i : 運賃 (\$/TEU) P_f : 燃料価格 (\$/ton)

M : 平均輸送量 (TEU Capacity * Load Factor %)

TC_{jk} : 船体減価額 (\$/day), C_M : 貨物の輸出値段 (\$/TEU)

MF_k, AF_k : エンジンの燃料消費量 (g/h)

= エンジン出力 (kw) * 燃料消費率 (g/kwh) * 負荷率 (%)

T_{ijk} : 停泊時間 (day), v_k : 運航速度 (knot), v_{kd} : 設計速度 (knot)

D_{ij} : 距離 (km), C_{IR} : 年間金利 (%)

各データの入手方法は次の通りである。

エンジン関係の MF_k, AF_k (エンジンの主機・補機の単位時間当たりの燃料消費量 g/day) を算定するには、主機、補機それぞれのエンジン出力 (kw)、燃料消費率 (g/kwh)、負荷率 (%) のデータが必要になる。補機の出力、主機および補機の燃料消費率、負荷率については、IMO¹⁾ で集計されたコンテナ船サイズ別データを用いる。エンジン主機の出力データは、Lloyd's List Intelligence から購入したデータを用いる。

3航路の2010年の全てのコンテナ船の運航実績データ、およびそれに対応した船の特性データは、Lloyd's List Intelligence から購入した。この運航実績データより、船が途中経過した港に到着した時間と再出発した時間の差を計算し、各トリップの停泊時間も計算できる。

2010年の運賃情報は、日本海事センターの情報²⁾を用いる (表-1)。

表-1 主要航路年平均運賃 (\$/TEU)

北米往航	欧州往航	アジア域内
2,548	1,718	782

3. 分析結果

(1) 最大利益速度および最小排出量速度

運航実績データから各OD間の港路を確定し、その距離およびトリップ毎の港湾停泊時間を算出する。ロサンゼルスルートの場合、距離は11632km、停泊時間は3.6日となった。同様に、ロッテルダムルートは21310km、1.73日、シンガポールルートは4141km、1.65日となった。

ここではロサンゼルスルートを例として、船社の利益およびCO₂排出量と、運航速度との関係を計算した結果を示す。+8000TEUサイズの時、利益最大時の速度は21knotであり、CO₂排出量最小時の速度は8knotであった。他のサイズにおいても、同様な傾向が見られた。その結果を図-1と図-2に示す。図-1では、明確にわからないが、各船舶サイズにおいて最大利益にはピーク値がある。

3航路の比較では、最大利益速度と最小CO₂排出速度が一部異なる結果となった。その結果を表-2にまとめる。

(2) CO₂排出量内部化時の運航速度

船社の利益を最大化しつつ、CO₂排出量をできるだけ最小化できる速度はあるだろうか。以下、ロサンゼルスルートの8000TEUサイズの船舶を例に事例を示す。

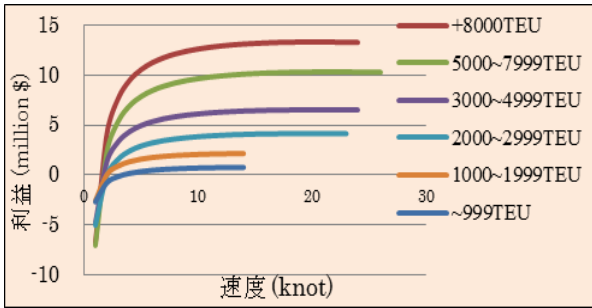


図-1 最大利益と速度の関係 (ロサンゼルスルート)

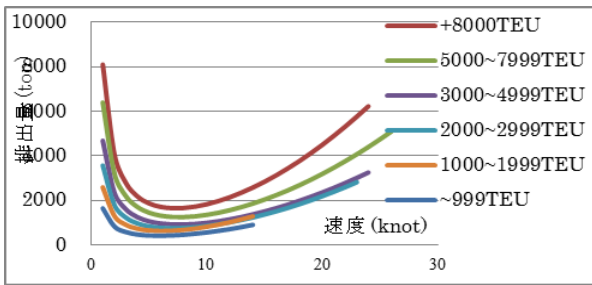


図-2 最小CO₂排出量と速度の関係 (ロサンゼルスルート)

表-2 最大利益速度と最小CO₂排出量速度(knot)

サイズ TEU	ロサンゼルス ルート		ロッテルダム ルート		シンガポール ルート	
	最大利 益速度	最小排 出速度	最大利 益速度	最小排 出速度	最大利 益速度	最小排 出速度
+8000	21.0	8.0	21.0	8.0	22.0	8.0
5~7999	21.0	8.0	21.0	7.0	21.0	8.0
3~4999	20.0	7.0			20.0	7.0
2~2999	18.0	7.0	21.0	7.0	20.0	7.0
1~1999	15.5	6.0	16.5	7.0	16.5	7.0
~999	13.5	6.0	14.5	6.0	15.0	6.0

*注 ロッテルダムルートでの3000~4999TEUクラスは運航実績なし。

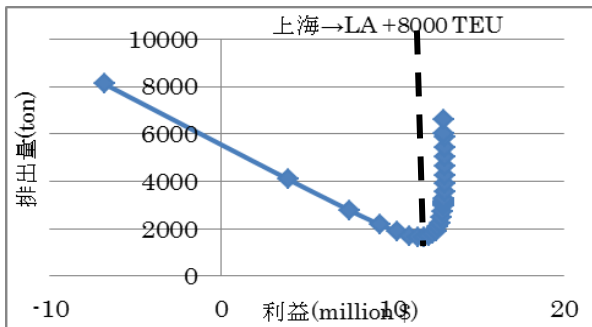


図-3 ロサンゼルスルート8000TEU超級の利益とCO₂排出量の関係

図-3は船社の利益とCO₂排出量の関係を表している。同速度のときの両者の数値をプロットして作成したものである。超低速時は利益の上昇と排出量の低下は比例するが、最小排出量となる速度を超えると利益の上昇に対して急激に排出量が増加する。このように、船社の最大利益となる速度と最小CO₂排出量となる速度は大きく異なる。これは、どのルートのものコンテナ船のサイズ

の時でも同様である

ここで、船社がCO₂排出量を環境負荷費用として負担し、外部費用を内部化することを仮定する。あるCO₂価格を設定すると、「速度低下によるCO₂排出量削減から計算される環境負荷費用」と「速度低下による利益減少」が一致する速度がある。これは、減速によって環境負荷費用を内部化したことと見なせる。

表-3 に、環境費用を内部化したときの、CO₂ 価格に対応した船舶速度を示す。例えば CO₂ 価格がトン当たり28\$である場合、望ましい速度は 18.0knot になる。つまり、ロサンゼルスルートの+8000 級サイズの船舶では、CO₂ 価格が 28\$のとき、環境負荷を考慮した適切な速度が 18.0knot になる。CO₂ 価格を 22\$として内部化した場合の、ルート別船舶サイズ別の速度を表-4にまとめる。

表-3 ロサンゼルスルート8000TEU超級におけるCO₂価格と船舶速度の関係

CO ₂ 価格(\$/ton)	速度(knot)
77.2	15
58.1	16
41.9	17
28.0	18
16.1	19
6.6	20

表-4 航路別環境費用内部化速度(knot)

TEU	ロサンゼルス ルート	ロッテルダム ルート	シンガポール ルート
+8000	18.5	19.5	19.3
5~7999	18.9	19.4	19.2
3~4999	17.5		18.3
2~2999	16.6	17.8	17.8
1~1999	14.3	14.9	14.5
~999	13.2	14.1	14.4

表-5 には、CO₂ 価格が 22\$のときの、ロサンゼルスルートにおける船舶サイズ別の利益最大速度、環境費用内部化速度、およびその減速率を示した。利益最大速度と比べ、2~12%の減速が必要となることがわかる。

表-5 ロサンゼルスルートにおける速度の比較(knot)

TEU	利益最大速度	環境費用内部化速度	減速率
+8000	21.0	18.5	-11.9%
5~7999	21.0	18.9	-10.0%
3~4999	20.0	17.5	-12.5%
2~2999	18.0	16.6	-7.7%
1~1999	14.5	14.3	-1.4%
~999	13.5	13.2	-2.2%

(3) 航路の比較

環境費用内部化による船社利益とCO₂排出量の変化を表-6に、その変化率、削減率を表-7にまとめる。

表-6 航路別利益減額とCO₂排出削減量

TEU	ロサンゼルス ルート		ロッテルダム ルート		シンガポール ルート	
	利益減 (million\$)	削減量 (tn)	利益減 (million\$)	削減量 (tn)	利益減 (million\$)	削減量 (tn)
+8000	-0.019	-895.4	-0.022	-954.2	-0.005	-327.3
5~7999	-0.015	-546.0	-0.020	-876.4	-0.003	-159.4
3~4999	-0.018	-505.4			-0.003	-124.8
2~2999	-0.007	-272.8	-0.016	-727.6	-0.003	-134.8
1~1999	-0.001	-31.3	-0.009	-445.9	-0.007	-120.0
~999	-0.015	-181.7	-0.002	-86.6	-0.001	-23.6

表-7 航路別利益変化率とCO₂排出削減率

TEU	ロサンゼルス ルート		ロッテルダム ルート		シンガポール ルート	
	利益 変化(%)	削減率 (%)	利益 変化(%)	削減率 (%)	利益 変化(%)	削減率 (%)
+8000	-0.15	-19.39	-0.28	-11.90	-0.11	-20.06
5~7999	-0.16	-15.64	-0.35	-12.79	-0.13	-12.68
3~4999	-0.29	-19.95			-0.17	-13.90
2~2999	-0.26	-13.50	-0.80	-18.09	-0.28	-17.98
1~1999	-0.04	-2.21	-1.29	-18.12	-1.11	-22.69
~999	-2.37	-18.96	-2.52	-5.43	-0.53	-6.59

どの航路においても、小さい利益変動率で大きな削減率を達成できることがわかる。3航路を比較すると、利益の変化が最も少ないのはアジア域内航路で、最も大きいのは欧州航路である。逆に、削減量が最も小さいのはアジア域内航路で、最も大きいのは欧州航路になっている。これは、輸送貨物量に比例した結果である。ただし、CO₂排出量の削減率はアジア域内航路も大きい。

(4) 船舶サイズの比較

環境費用を内部化した速度を実施するときの、船舶サイズ別の利益損失額および削減量の関係をまとめる。

図-4は船舶サイズとTEU当たりの利益損失額を示している。船舶サイズが小さくなるほど、TEU当たりの利益損失額が大きくなる傾向がある。図-5は船舶サイズとTEU当たりのCO₂削減量の関係を示している。サイズが小さいほどTEU当たりの削減量が大きくなっている。つまり、小さい船舶サイズほど、減速によるTEU当たりの利益損失は大きい、TEU当たりの削減ポテンシャルも大きい。大きい船舶サイズのときは逆の結果となった。

4. 結論

本研究では、環境を考慮した船舶速度として、CO₂排出による社会的費用を内部化した時のコンテナ船の速度

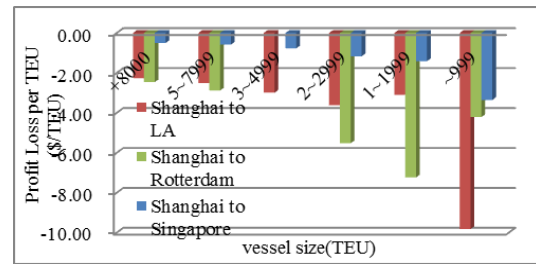


図-4 船舶サイズとTEU当たりの利益損失額

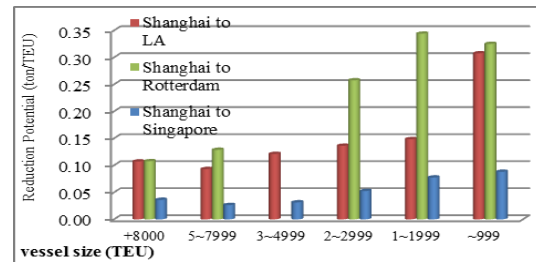


図-5 船舶サイズとTEU当たりの削減量

を、航路別サイズ別に推計した。

今回の推計結果は数多くの仮定の上で成り立っている。運賃の変動は需要の変動に依存し、一年のうちでも大きく変化している。距離に関しても、天気などの影響より、途中経過する港湾が同じであっても、必ずしもそのルートを進るとは限らない。また船舶の減価について、5000TEU以上は30000\$/day、2000~5000TEUは20000\$/day、~2000TEUは10000\$/dayと設定したものの、2000TEU以下では444TEUの船舶もあったことから、より細かく設定の方が望ましいと考えられる。

謝辞 本研究は環境省の環境研究総合推進費戦略的研究開発領域 (S-6) の支援により実施されたものである。

参考文献

- 1) International Maritime Organization (IMO): Second IMO GHG Study 2009, 2009.
- 2) Corbett, J.J., Wang, H.F. and Winebrake, J.J.: The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping, Transportation Research Part D, 14, 593-598, 2009.
- 3) Lindstad, H., Asbjørnslett, B. E. and Strømman, A. H.: Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds, Energy Policy, 39, 3456-3464, 2011.
- 4) United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD): Review of Maritime Transport 2010, 2011
- 5) 坂下広朗：国際海運からの温室効果ガス排出削減に関する国際動向，日本船舶海洋工学会誌，Vol.28，pp.2-5，2010.
- 6) 日本船舶技術研究協会：国際海運における温室効果ガス排出削減に向けた総合対策，2010.
- 7) 日本海事センター：海運市況及び海運企業動向等，www.jpmac.or.jp/relation/trend.html，2011年12月20日。