

海上航路ネットワークを用いたコンテナ船の運航パターン分析

鳥海 重喜

1. はじめに

船舶は他の輸送機関と比べて低速であるが安価に大量に輸送することができる機関であり、物流において重要な役割を担っている。また、船舶は鉄道と並び、航空機や自動車に比べて輸送に対するエネルギー効率が高く、環境負荷が低い輸送機関である。Informa UK[1]によれば、世界の主要な300港湾で取り扱われた2006年のコンテナ貨物は、2005年に比べて10%以上増加しており、コンテナ船の動きが活発化している。

コンテナ船の動きやコンテナ貨物流動に関する既存研究は数多く存在している。

例えば、二田ら[9]は、本研究と同様にLMIU社の船舶動静データを用いてコンテナ船の動静およびコンテナ貨物の流動分析を行っている。各港におけるコンテナ取扱量や国・地域間の輸送量などがまとめられているものの、データの集計による統計的分析であり、船舶を個別に扱ってはいない。

また、柴崎ら[5]は、アジア圏を対象に国際海上コンテナ貨物の純流動量について、フレーター法や重力モデルなどを用いて地域間、港間レベルで推計している。その際、港間の距離として既存の距離表（例えば、日本航海士会[10]など）を利用している。既存の距離表は、あらかじめ設定された現状の航路に基づいて港間の距離を算定しており、利用できる航路に変化が生じた場合には、港間の距離を別途算出せねばならず、多大な手間が必要となる。

さらに、柴崎ら[6]は、港湾などに関する政策の実施が国際海上コンテナ貨物流動に与える影響を分析するためのシミュレーションモデルを構築している。このモデルでは、貨物需要を経路に配分するために、港

をノードとしたネットワークが用いられているが、概念的なものであり、実際の航路を表しているわけではない。そのため、港間の距離は、文献[5]と同様に既存の距離表から与えられており、前述の課題は残されたままである。

これらの既存研究に共通している、海上の航路が考慮されていない要因は、道路や鉄道などと異なり、手軽に利用できる海上航路のデジタルデータが存在していないということである。そこで本研究では、まず全世界を対象とした海上航路ネットワークを構築し、寄港実績データをもとにコンテナ船一隻一隻の動きを海上航路ネットワーク上に表現する[7]。そして、各コンテナ船の寄港パターンを分析し、地域ごとに特徴をまとめる[8]。コンテナ船は定期航路で運航され、寄港地のパターンを有していることが多い。したがって、寄港パターンはコンテナ船の特徴の一つとみなすこともできる。実際に、オーシャンコマース[4]では、船社（アライアンス）ごと、航路ごとに寄港パターンと運航している船舶が列挙されている。さらに、本研究では、ソマリア沖の海賊を回避するための迂回や北極海航路の活用などを、海上航路ネットワークを利用してシミュレーションし、その影響も推計する。

2. 船舶動静データと海上航路ネットワーク

2.1 船舶動静データ

本研究では、コンテナ船の寄港実績データとしてLMIU（Lloyd's Marine Intelligence Unit）社が提供している2007年の船舶動静データを用いる。本データでは、船舶一隻ごとに寄港地（港、運河、海域等）が時系列で列挙されており、船舶の属性データとして、船名、船籍、建造年、船種、積載可能量（船腹量）等が整備されている。ただし、一部に寄港日が明確ではないデータも含まれている。このデータをもとに、船舶ID、出港地、着港地、出港日、着港日を1レコード

とりうみ しげき
中央大学 理工学部
〒112-8551 文京区春日1-13-27
受付 09.10.7 採択 10.3.30

ドとした航海データを作成する。

対象船舶は、500 GT (Gross Tonnage; 総トン) 以上のフルコンテナ船（コンテナのみを積載する船）とし、年間の寄港回数が10回未満もしくは総航海距離が1,000 NM (Nautical Mile; 海里) 以下のコンテナ船は除外する。対象とする船舶数は4,149隻、総航海数は約34.6万（うち、寄港日が明確なものは約29.3万）である。対象船舶をコンテナ積載能力別に集計した結果を図1に示す。ここでコンテナ積載能力はTEU (Twenty-foot Equivalent Units; 20フィートコンテナ換算個数) で表されるものとする。図1より500 TEU以上1,000 TEU未満のコンテナ船が最も多く、次いで1,000 TEU以上1,500 TEU未満のコンテナ船が多いことがわかる。

2.2 海上航路ネットワーク

船舶動静データにおける地点および、日本航海士会[10]に記載されているウェイポイント（変針点）をノードとし、それらのノード間のつながりをリンクとした海上航路ネットワークを構築する。リンクは大圏航路とし、リンクが陸地と重なる場合は、地形を考慮し、適宜ウェイポイントを追加してリンクを分割する。

地形（海岸線）のデータは、米国国立海洋大気庁(NOAA)から取得したGSHHS (A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shore-

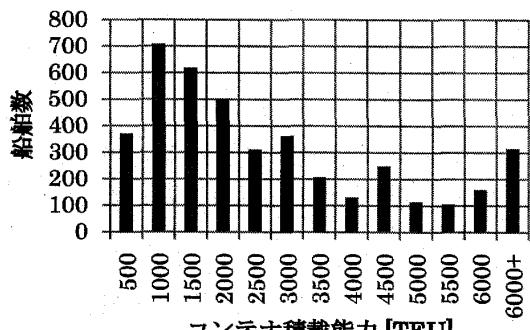


図1 対象船舶のコンテナ積載能力

line) データを用いる。GSHHSデータは、水域と陸地との境界（海と陸、陸と湖、湖とそこに浮かぶ島等）をベクトルデータで表しており、それぞれの境界線は閉じたポリゴンデータとなっている。

構築した海上航路ネットワークを図2に示す。図中の円は港等の地点、ウェイポイントを表し、線は地点間の大圏航路リンクを表している。図2は正距円筒図法で描画されているので、高緯度地域ほど歪んでいることに注意されたい。ネットワークの規模は、ノード数が約4,000（内訳は、港が約2,000、ウェイポイントが約2,000である）、リンク数が約6,100である。

3. 航路の推計

3.1 航路の選択基準

コンテナ船の各航海データに対し、それぞれの航路を推計する。航路の選択基準は、航行する各リンクの大圏距離の総和が最小（最短航路）となるものとする。実際の航海では、気象・海象や水深等も考慮するので、必ずしも最短航路を選択するわけではないが、多くの場合で航海距離が第一の基準であることから、本研究では航海距離のみを基準に航路を選択すると仮定する。ただし、大型船はパナマ運河を通航できないことを考慮し、コンテナ積載能力が5,000 TEU以上のコンテナ船については、パナマ運河を通航できないと仮定して最短航路を求める（厳密にいえば、パナマ運河を通航できるかどうかは、船舶の全長、幅、喫水で決まっている）。最短航路を求める際のアルゴリズムにはDijkstra法を用いる。推計した結果を図3に示す。図3はコンテナ船の通航量が多い地域ほど黒く示している。図3から、コンテナ船の通航量が多いのは、東アジア-マラッカ海峡-ベンガル湾-アラビア海-紅海というルートであることがわかる。

また、推計した航路と寄港日をもとに、ある時刻におけるコンテナ船が航行している位置を推計した結果

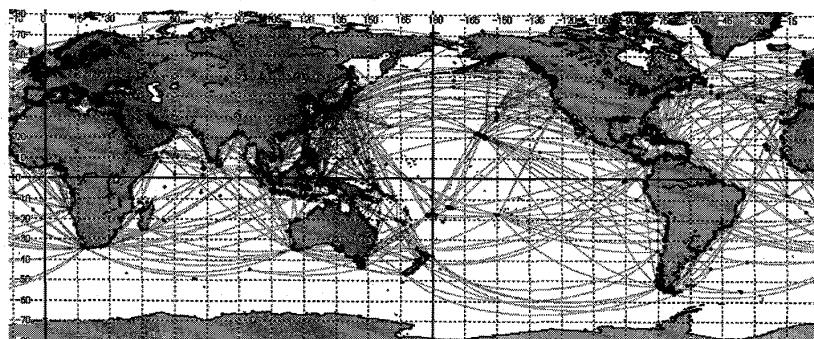


図2 海上航路ネットワーク

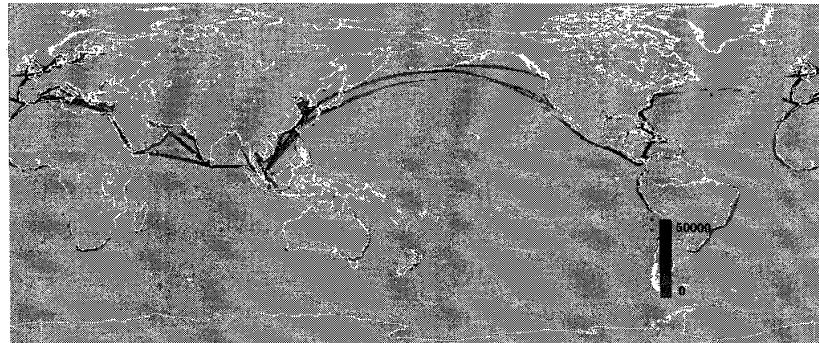


図3 コンテナ船の推計航路

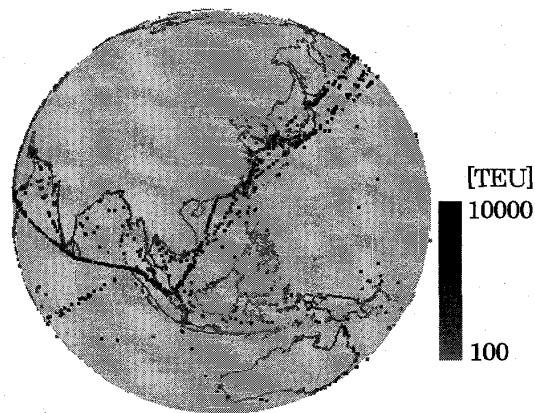


図4 コンテナ船が航行している様子

を図4に示す。図4では、コンテナ船一隻を一つの点で表している。濃淡はコンテナ船のコンテナ積載能力を表しており、濃いほどコンテナ積載能力が大きいことを示している。東アジアと欧洲を結ぶ航路には、濃い点が多く、コンテナ積載能力が大きい船が就航していることがわかる。

3.2 航海距離

コンテナ船ごとに航海距離の平均を算出し、コンテナ積載能力別にまとめる(図5)。図5から、コンテナ積載能力が小さい船ほど平均航海距離が短いことがわかる。

3.3 船速

次に、航海距離と航海日数からコンテナ船の平均船速を算出し、コンテナ積載能力別に船速分布を求める(図6)。ただし、船速の算出にあたり、出港日もしくは着港日が明確でない航海データは除外する。また、船舶動静データの出港日と着港日が日付単位であることから、航海日数が短い航海に対して船速を算出しても、その精度は低いので、航海日数が6日以下の航海データも除外する。

コンテナ積載能力の小さい船ほど航海日数が短い傾向があることから、図6では1,000 TEU未満のコンテナ船の航海数が少なくなっていることに注意された

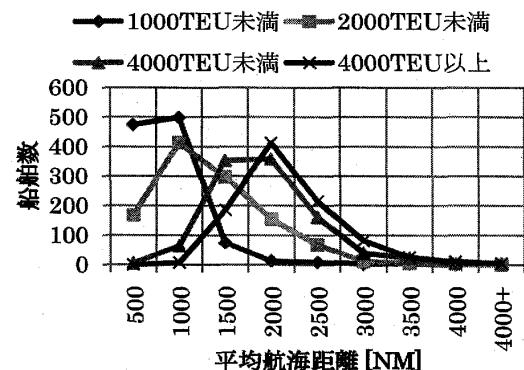


図5 コンテナ積載能力別平均航海距離分布

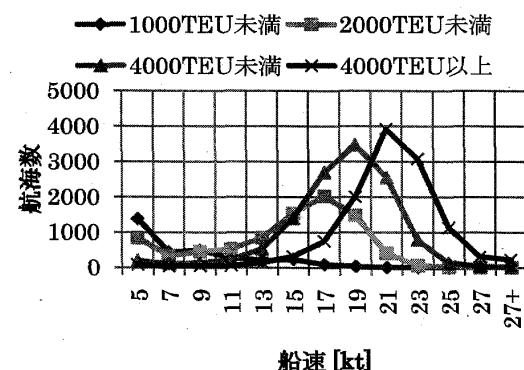


図6 コンテナ積載能力別船速分布

い。図6から、コンテナ積載能力が大きい船ほど、船速が速いことがわかる。

4. 船舶のクラスタリングと寄港パターンの抽出

4.1 地域別航海距離比率によるクラスタリング

まず、コンテナ船をいくつかのクラスターに分類する。このような場合、既存研究ではコンテナ積載能力などの属性に基づいて分類するか、あるいは特定の港に注目して、その港に寄港するか否かで分類することが多かった。本研究では、世界をいくつかの地域に分割し、その地域ごとの航海距離に基づいて分類する。

この分類基準によれば、同一航海（出発港と目的港が同じ）であってもコンテナ船によって航路が異なる（大型船はパナマ運河を通航できない）ということも考慮に入れることができる。

まず、世界を図7に示す8つの地域（北半球と南半球に分け、さらにそれらを子午線に沿って90度ごとに4分割する）に分割し、海上航路ネットワークの各リンクに対して、どの地域にどの程度の長さが含まれるのか計算する。次に、航海データを海上航路ネットワーク上の最短経路に割り当て、地域ごとの航海距離を求める。そして、コンテナ船ごとにそれらをまとめ、最後に、地域別航海距離を総航海距離で除することで、地域別航海距離の比率を算出する。

コンテナ船ごとの地域別航海距離比率を指標として、非階層クラスター分析手法の一つであるk-means法により、コンテナ船をクラスターに分類する。k-means法は、与える初期解によって得られる分類パターンが異なる可能性があるので、本研究では10回実行して最も出現頻度の高い（4回出現した）分類パターンを採用する。また、クラスター数は、世界を8つの地域に分割して指標を作成したことから、同数である8とする。

結果を表1にまとめる。各クラスターに対し、地域別航海距離の比率を参考にアジア、太平洋などのクラスター名をつける。クラスター分類の妥当性を評価するために、オーシャンコマース[4]で分類されている航路ごとのコンテナ船がどのクラスターに分類されているか比較する。サンプルとして選んだ462隻のうち、クラスター分類と一致したのは419隻（約91%）であり、本研究の分類は、概ね妥当であるという結果が得られた。ただし、北米・アジア・欧州の3地域を行き来するコンテナ船は、振り子の中心が北米の場合は「太平洋」クラスター、振り子の中心がアジアの場合は「欧州～アジア」クラスターに分類されていることが多い。

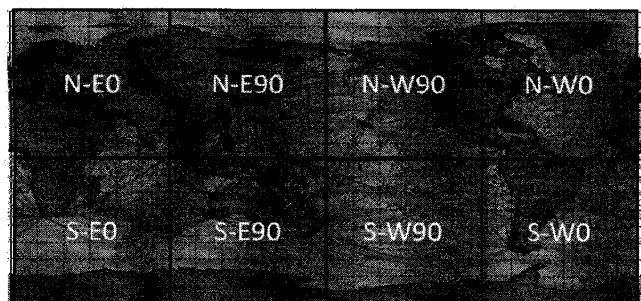


図7 地域分割

次に、各クラスターの特徴量を表2に示す。「欧州～アジア」、「太平洋」クラスターは、平均積載能力が大きく、平均寄港回数が少ない面、平均航海距離は長いことがわかる。一方、「アジア」、「欧州」クラスターは、その逆の傾向を有しており、積載能力の小さいコンテナ船が短距離航海を高頻度に繰り返していることが推測される。

ここで、「アジア」クラスターに分類されたコンテナ船の航路を図8に示す。図8では、色の濃いところほどコンテナ船の通航量が多いことを表している。日本、韓国、中国、香港、シンガポールを高頻度に行き来している様子がわかる。

4.2 寄港パターンの抽出

本研究で対象としているコンテナ船は、1年間で平均して約86回寄港している。ここでは、時間順に並べた寄港地の系列をもとに、コンテナ船ごとに主要な周回パターンを抽出する。具体的な手順は以下の通りである。

Step 0：周回パターンの寄港地数mを2、探索開始

表1 分類結果（地域別航海距離比率の平均）

クラスター 一名	N				S			
	E0	E90	W90	W0	E0	E90	W90	W0
アジア	0.02	0.95	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
欧州～ アジア	0.50	0.36	0.03	0.08	0.01	0.01	0.00	0.00
太平洋	0.05	0.38	0.39	0.12	0.01	0.02	0.01	0.02
欧州	0.87	0.01	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00
大西洋	0.14	0.01	0.02	0.76	0.02	0.01	0.01	0.03
南米	0.06	0.01	0.02	0.42	0.03	0.00	0.00	0.45
アフリカ	0.13	0.25	0.01	0.03	0.47	0.02	0.00	0.09
豪州	0.02	0.28	0.00	0.02	0.00	0.65	0.02	0.00

表2 クラスターの特徴量

クラスター名	船舶数	平均積載能 力[TEU]	平均寄港 回数	平均航海 距離[NM]
アジア	822	1,006	124	65,506
欧州～アジア	813	4,685	69	110,839
太平洋	631	4,031	64	120,302
欧州	627	1,339	99	63,560
大西洋	549	1,793	84	80,509
南米	241	2,515	81	100,911
アフリカ	237	2,278	53	91,539
豪州	229	1,685	73	77,029

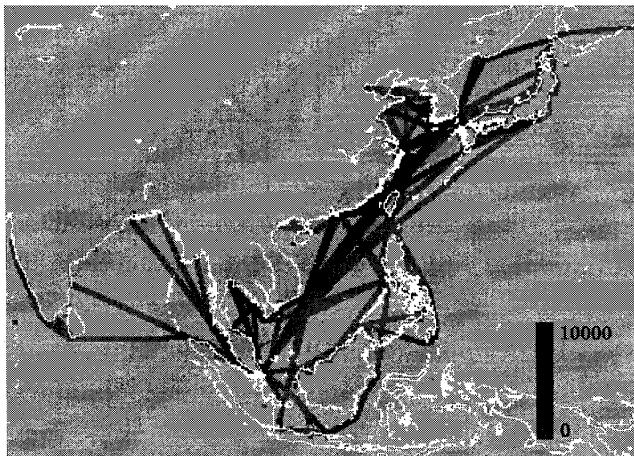


図8 「アジア」 クラスターの航路

位置 i を 1 とする。

- Step 1：寄港地系列の i 番目から $i+m-1$ 番目までの寄港地を周回パターンの候補とし、そのパターンが寄港地系列の $i+m$ 番目以降に出現するか調べる。
 Step 2： i が「寄港回数- $2m+1$ 」以下であるなら、 i に 1 を加えて Step 1 に戻る。そうでなければ Step 3 へ。
 Step 3： m が「寄港回数/2」以下であるなら、 i を 1 とし、 m に 1 を加えて Step 1 に戻る。そうでなければ終了する。

この手順では、各コンテナ船に対して全探索を行うことになるため、複数の周回パターンを抽出できる可能性があるが、本研究では周回パターン P の航海距離を D_P 、周回数を M_P 、年間総航海数を N とし、以下の式(1)で表されるパターン距離率 R_P が最も大きい周回パターンを抽出する。

$$R_P = \frac{D_P \times M_P}{N} \quad (1)$$

ただし、最低でも周回数は 2 回以上とし、周回中に同一寄港地を複数回寄港してもよいものとする。この条件を満たす周回パターンを有するコンテナ船は 3,678 隻（全体の約 89%）であった。

抽出したパターンの特徴量をクラスターごとにまとめた結果を表 3 に示す。ここで、パターンに含まれる寄港地の数を“パターン寄港地数”と呼ぶ。「アジア」、「欧州」クラスターは、短距離の寄港パターンを数多く周回しているのに対し、「欧州～アジア」、「太平洋」クラスターは、長距離の寄港パターンであることがわかる。

4.3 寄港パターンの分析

周回パターンに出現するすべての寄港地に高々 1 回しか寄港しないパターンを有するコンテナ船 (2,371

表3 クラスター別寄港パターンの特徴量

クラスター名	平均周回数	平均周回パターン距離[NM]	平均パターン寄港地数
アジア	13.0	3,849	5.9
欧州～アジア	3.5	13,469	7.4
太平洋	3.8	15,316	7.4
欧州	9.1	4,226	4.5
大西洋	6.5	6,355	5.5
南米	3.3	8,865	6.8
アフリカ	2.8	11,685	5.8
豪州	8.8	7,564	5.6

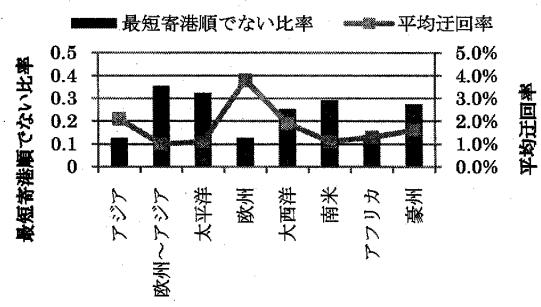


図9 最短寄港順でない比率

隻）に対し、寄港地の巡回セールスマン問題を解くことで、寄港パターンが航海距離からみて効率的であるか分析する。結果を図 9 に示す。短距離のパターンである「アジア」、「欧州」クラスターでは、他のクラスターに比べて最短寄港順でない比率が低い。

次に、現在の周回パターン P に対し、最短寄港順によるパターン距離 D_{TSP} を算出し、どの程度の距離をロスしているのかということを表す迂回率 R_D を

$$R_D = \frac{D_P - D_{TSP}}{D_{TSP}} \quad (2)$$

と定義する。このとき、各クラスターにおける迂回率の平均を求めると、「アジア」、「欧州」クラスターは、他のクラスターに比べて高いことがわかる。

まとめると、「アジア」、「欧州」クラスターに分類された多くのコンテナ船の寄港パターンは最短寄港順であるものの、最短寄港順でない寄港パターンの迂回率は高く、両極端であるといえる。その要因として、まず、他のクラスターと比べて分母の D_{TSP} が小さいため、同じ距離のロスであっても迂回率 R_D は大きくなるということが挙げられる。また、両クラスターの平均周回パターン距離は短く、近距離の航海が多いということから、距離のロスよりも時間のロスを重視したという可能性も考えられる。つまり、既存の寄港パ

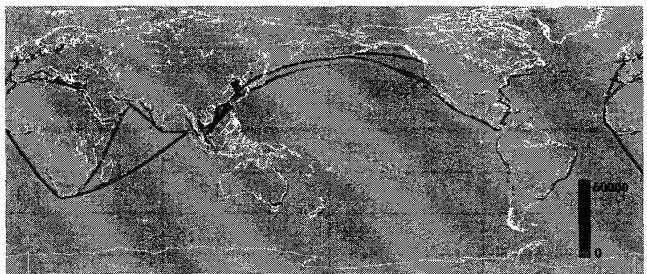


図 10迂回後の推計航路

ターンは“時間的”には最適な寄港パターンであるということである。港によっては荷役作業が可能な時間に制限がある場合があり、入港待ちをするぐらいなら、遠くの港へ先回りしたほうが時間のロスを削減できる場合がある。

5. 海賊回避のための迂回の影響

近年、ソマリア沖のアデン湾では海賊による商船への被害が多発している。この海賊に対処すべく、2009年3月に自衛隊が派遣され、海上警備行動を始めた。しかし、広大な海域を航行するすべての船舶を少数の護衛艦で警備することは難しく、船社によってはその海域を迂回することも検討している。

本節では、もともとその海域を航行していたコンテナ船がすべて迂回したらどのような影響があるのかとということを推計する。具体的には、海上航路ネットワークの一部のリンクを切断し、改めて航海データを最短航路に割り当てて、元のネットワークにおける航海距離との差を算出する。

寄港日が明確な航海データ約29.3万のうち、迂回を余儀なくされる航海は約8,200(約2.8%)である。それらの平均迂回距離は約6,500NMであり、現状と同じ船速で航行すると仮定すれば、その迂回に要する日数は約17日である。また、迂回する航海の総コンテナ積載可能量は約3,900万TEU(全体の約6.1%)である。航海の比率に比べて数値が高いのは、この海域を航行するコンテナ船は「欧洲～アジア」クラスターに分類されたものが多く、コンテナ積載能力が比較的大きいためである。迂回後の推計航路を図10に示す。図3と比べると紅海を通航する航路が喜望峰回りに迂回している様子がわかる。

6. 北極海航路の活用

近年、地球温暖化が叫ばれている。地球温暖化に関して、多くの弊害が指摘されているが、有益なことが

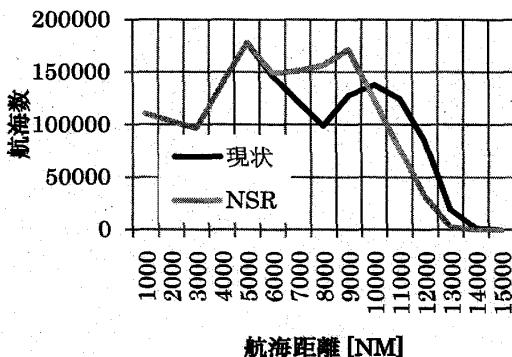


図 11 単位交通による航海距離分布

まったくないわけではない。その一つに、北極海を船舶が通航できるようになることが挙げられる。これまで、北極海は夏季においても氷で閉ざされていたが、温暖化によりその氷が解ければ、砕氷船ではない一般的な商船でも通航できるようになる。実際、2008年には、北米大陸寄りの北極海とユーラシア大陸寄りの北極海とで氷が解け、航路が出現したことが報告されている[2][3]。

本節では、ウェザーニューズ[2][3]を参考にして、北極海航路(Northern Sea Route; NSR)を表リンクを海上航路ネットワークに追加し、改めて航海データを最短航路に割り当てることで、北極海航路の影響を推計する。

6.1 単位交通による最短距離分布

まず、すべての港間で単位交通(航海)があると仮定し、距離分布を求める。これは、交通網上に交通需要を設定する際に多く用いられるモデルであり、交通網の基本的な特性を知ることができる。得られた距離分布を図11に示す。北極海航路によって、10,000NMを超えるような長距離の航海の割合が低下していることがわかる。なお、ここでは、すべての航海においてパナマ運河を通航できるものとして最短航路を定める。

次に、港ごとに最短距離分布を求め、地域による影響の度合いを調べる。以下の式により、北極海航路による航海距離の短縮効果Uを定義する。

$$U = \frac{S_A - S_B}{S_A} \quad (3)$$

ただし、

S_A ：他の港への現状の最短航海距離の総和

S_B ：他の港へのNSRを含む海上航路ネットワーク上での最短航海距離の総和

とする。結果を図12に示す。図12は、短縮効果が大

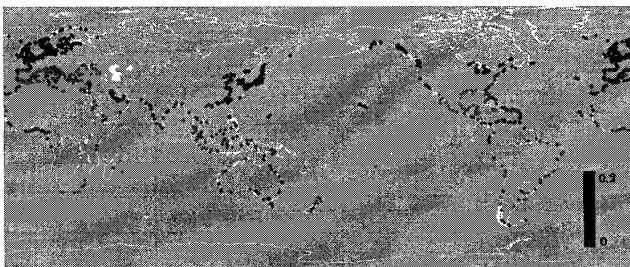


図 12 港別航海距離短縮効果



図 13 北極海航路に航海距離が短縮される航海（黒：北極海航路、灰：現状の航路）

きい港ほど黒く示している。図 12 から、北欧および日本を含む東アジアの中緯度から高緯度地域の港で短縮効果が高いことがわかる。一方、地中海やメキシコ湾の港では、短縮効果がほとんどみられない。

6.2 現実の航海による最短距離分布

船舶動静データを用いて、実際の船舶の移動を踏まえた距離分布を求める。

北極海航路を活用できるのは夏季期間に限定されるため、寄港日が明確な航海データの中から、出港日が 6 月 1 日から 8 月 31 日までのものを抽出し、北極海航路を活用する航海の候補とする。候補となった航海データは約 7.6 万である。

上記航海データを、北極海航路を追加した海上航路ネットワークに割り当てた結果、北極海航路を通航すると航海距離が短縮される航海は 237 (全航海の約 0.3%) であることがわかった。北極海航路によって、航海距離が短縮される航海の例として、韓国のプサンとイギリスのフェリックストウとを結ぶ航路を図 13 に示す。現状の航路は約 10,700 NM であるのに対し、北極海航路を活用すると約 7,400 NM となる。

短縮される距離の総和は、約 37.8 万 NM (全航海距離の約 0.5% に相当)、コンテナ積載能力の総和は

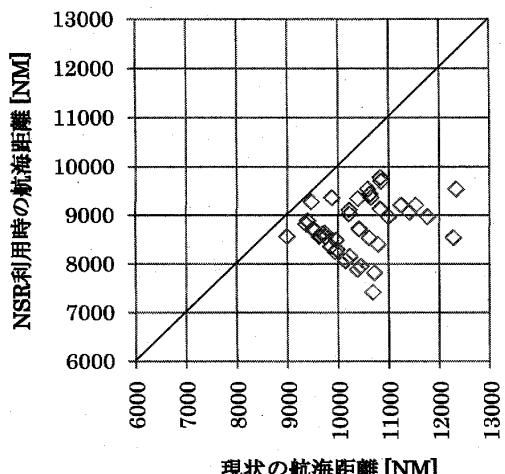


図 14 航海距離の比較

約 116 万 TEU (全体の約 0.7% に相当) である。航海数の比率よりも航海距離の比率やコンテナ積載能力の比率が高いことから、北極海航路を活用する航海は少ないものの、航海距離短縮効果は大きく、その恩恵を受けるコンテナも多いことがわかる。

ただし、ここでは実際の航海データに基づいて出発港と目的港を定めて北極海航路を活用するか否かを推計しており、欧州とアジアを航行しているコンテナ船が途中で中東などに寄港しているような場合、航海データは「欧州 ⇄ 中東」、「中東 ⇄ アジア」と分割されるため、北極海航路を利用できたとしても航海距離は短縮されない。しかし、北極海航路を利用できるようになった場合、中東のトランシップ港湾に寄港せずに欧州とアジアを行き来するようになる可能性があり、この場合には北極海航路を利用すれば航海距離を短縮することができる。前述した航海距離短縮効果には、このような影響は含まれていないので、実際に北極海航路が活用されるようになった場合には、さらなる航海距離短縮効果が見込まれる。

次に、現状の航海距離と北極海航路を通航する航海距離とを比較する。それらを散布図で表したもの図 14 に示す。図 14 から、現状の航海距離が 10,000 NM を超えるような航海について、北極海航路を通航すると航海距離が大幅に短くなることがわかる。

また、現状の航海における船速で北極海航路を通航すると、航海距離が短くなる分、航海日数も短くなる。そこで、現状の航海日数と北極海航路を通航する場合の航海日数とを比較する (図 15)。図 15 から、最大で約 7 日、平均で約 3 日半、航海日数を短くなることがわかる。

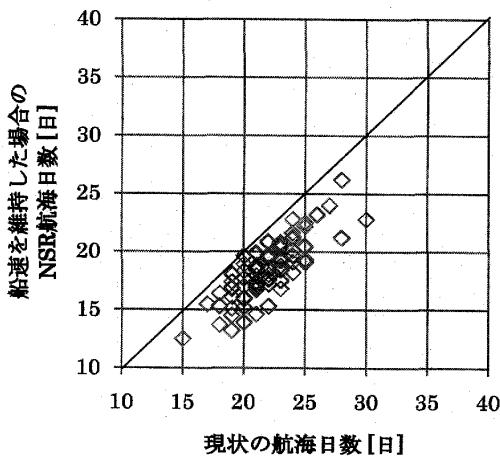


図 15 船速を維持した場合の航海日数の比較

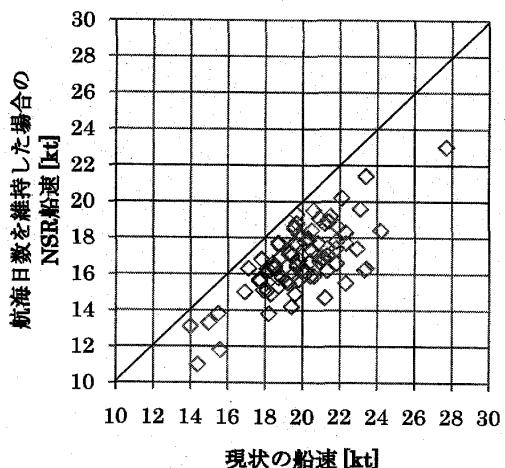


図 16 航海日数を維持した場合の船速の比較

表 4 航海別総短縮輸送量

港1		港2		総短縮輸送量 [TEU*NM]	航海数
フェリックストゥ	イギリス	プサン	韓国	314,641,222	11
ニューヨーク	アメリカ	香港	中国	301,239,262	32
ニューヨーク	アメリカ	高雄	台湾	268,374,276	29
サヴァナ	アメリカ	プサン	韓国	206,157,555	43
ニューヨーク	アメリカ	上海	中国	101,340,448	10
ニューヨーク	アメリカ	プサン	韓国	98,435,656	11
ハンブルグ	ドイツ	香港	中国	83,240,960	8
アントワープ	ベルギー	上海	中国	75,480,660	5
チャールストン	アメリカ	厦门	中国	49,235,736	10
チャールストン	アメリカ	香港	中国	48,000,543	11
その他				364,202,500	67

6.3 航海別距離短縮効果

北極海航路による航海距離短縮効果を短縮輸送量 T の総和によって航海別に評価する。ここで、短縮輸送量 T は以下の式で算出されるものとする。

$$T = C \times L \quad (4)$$

ただし、

C : コンテナ積載能力 [TEU]

L : 航海短縮距離 [NM]

とする。短縮輸送量の総和が大きい航海を表 4 に示す。総短縮輸送量が最も大きいのは、イギリスのフェリックストゥから韓国のプサンへの航海である。航海数は少ないものの、1 航海あたりの航海短縮距離が大きく、コンテナ積載能力が大きいコンテナ船が運航していることが理由である。

6.4 減速航海による燃料消費量削減効果

最後に、航海距離が短縮されたことによる消費燃料の削減効果を推計する。まず、北極海航路を通航する航海において、現状の航海日数を要すると仮定すると、

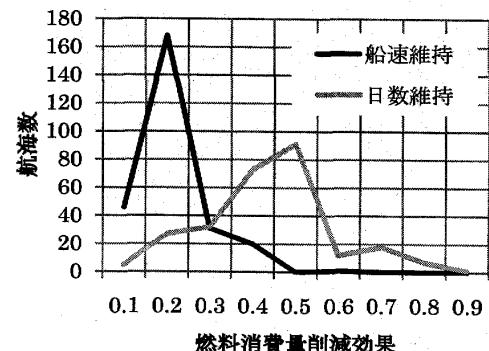


図 17 燃料消費量削減効果の比較

航海距離が短縮された分、船速を落とす（減速航海する）ことができる。現状の船速と減速航海時の船速との関係を図 16 に示す。図 16 から、その差は概ね 2~4 ノット程度であることがわかる。

船舶では、航海による単位時間あたりの燃料消費量は概ね船速の 3 乗に比例するので、船速 v で時間 t だけ航行したとすると、燃料消費量 F は

$$F = av^3 t \quad (a > 0) \quad (5)$$

と表される。今、減速航海により、船速が $v' (< v)$ になると、（航海日数は変わらないので）燃料消費量 F' は

$$F' = av'^3 t \quad (a > 0) \quad (6)$$

となり、削減できる燃料消費量 E は

$$E = F - F' = at(v^3 - v'^3) \quad (7)$$

と表すことができる。ここでは、通常航海時との比 R_F

$$R_F = \frac{E}{F} = \frac{v^3 - v'^3}{v^3} \quad (8)$$

を燃料消費量削減効果と考え、各航海について算出し、図 17 にまとめる。比較対象として、船速を維持した場合の燃料消費量削減効果も示す。船速を維持した場合、削減される燃料消費量は短縮される航海距離の単

純な比（＝短縮された航海距離/元の航海距離）によって決まる。

図17から、船速を維持した場合と比べて、航海日数を維持して減速航海した場合は、燃料消費量の削減効果が非常に大きいことがわかる。

7. おわりに

本稿では、海上航路ネットワークを構築し、LMIU社の船舶動静データをもとにコンテナ船の航路を分析した。さらに、海上航路ネットワークのリンクを削除・追加することで、社会情勢、地球環境等が変化した際のコンテナ船航路への影響を評価した。

コンテナ船の寄港パターンには地域（航路）ごとに特徴があり、「アジア」と「欧州」の寄港パターンは類似していることが明らかになった。それらのパターンでは、最短寄港順でないコンテナ船の比率が低いものの、平均迂回率は高いという結果が得られた。

既存の寄港パターンは、それぞれの船社が利潤の追求をした結果、定められたと考えることができる。つまり、迂回によって生じる運航距離のロスよりも、迂回することによるメリットのほうが大きいということである。ここでは、その可能性として、4.3節では時間を取り上げたが、ここではもう一つ、積み荷の目的地を取り上げる。

例えば、あるコンテナ船の既存の寄港パターンは「A港→B港→C港→D港→A港」であり、距離的な最適寄港パターンは「A港→C港→B港→D港→A港」であるとする。このとき、A港からB港に輸送する積み荷が多く、かつ、B港からC港に輸送する積み荷も多ければ（しかも、輸送日数に制限があればなおさら）、運航距離をロスしたとしても既存の寄港パターンを選択するのは当然である。

本研究では、積み荷のODや港の設備などを明示的に扱っていないため、これらを確認することは難しい。特に積み荷のODデータは、国によって集計単位が異なっている場合や、そもそも統計データとして存在していないこともある。コンテナ船を効率よく運航するためには、各国で統一された基準のコンテナの輸送量に関する統計データを収集することが望まれる。

北極海航路は、東アジアと北米・欧州とを航海する大型のコンテナ船にメリットがあり、現状における航海日数を維持して減速航海をすれば、燃料消費量を約40～50%削減することが可能であると推計できた。

一方、北極海航路が活用されると、寄港地が変わる、あるいは寄港順序が変わるなど、航海そのものが変化する可能性や、航行するコンテナ船が置き換わる可能性なども考慮する必要があり、これらについては今後の検討課題である。

本研究の枠組みを利用すれば、コンテナ船以外の船舶、例えば、タンカーやバルクキャリア、LNG/LPG船などに対しても、航海データを用意することで、同様に航路を分析することが可能であり、船種による違いを調べることも興味深い。

謝辞 本研究は科研費（若手研究(B)20710125）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Informa UK: *Containerisation International Yearbook 2008*, Informa UK, 2008.
- [2] ウェザーニューズ,『北極海(北西部)の海水、観測史上最も早く減少(プレスリリース)』, <http://weathernews.com/jp/c/press/2008/080818.html>
- [3] ウェザーニューズ,『観測史上初！ 北極海の両側(北東・北西)の海水が消滅(プレスリリース)』, http://weathernews.com/jp/c/press/2008/080916_2.html
- [4] オーシャンコマース,『国際輸送ハンドブック2008年版』, オーシャンコマース, 2007.
- [5] 柴崎隆一, 渡部富博, 角野隆, 神波泰夫, 「アジア圏を中心とした国際海上コンテナのOD貨物量推計に関する研究」, 『国土技術政策総合研究所研究報告』, No. 25, 2005.
- [6] 柴崎隆一, 渡部富博, 「東アジア圏を中心とした国際海上コンテナ貨物流動シミュレーションモデルの構築」, 『国土技術政策総合研究所研究報告』, No. 37, 2009.
- [7] 鳥海重喜,「船舶動静データを用いたコンテナ貨物船の航路ネットワークの分析」,『日本オペレーションズ・リサーチ学会2008年秋季研究発表会アブストラクト集』, 196-197, 2008.
- [8] 鳥海重喜,「寄港実績データによるコンテナ船の寄港パターンの地域分析」,『日本オペレーションズ・リサーチ学会2009年秋季研究発表会アブストラクト集』, 196-197, 2009.
- [9] 二田義規, 赤倉康寛, 渡部富博,「世界のコンテナ船動静及びコンテナ貨物流動分析(2008)－米国-東アジア間におけるコンテナ化の動向－」,『国土技術政策総合研究所資料』, No. 467, 2008.
- [10] 日本航海士会編,『世界港間距離図表【二訂版】』, 海文堂出版, 1990.