

国際海上コンテナ輸送の ネットワーク分析と流動モデルの開発

間島 隆博*、小坂 浩之*、小林 和博*

Network Structure Analysis and Development of Flow Model for International Maritime Container Transportation

by

Takahiro MAJIMA, Hiroyuki KOSAKA and Kazuhiro KOBAYASHI

Abstract

The transportation system with container appeared in the 1950s. Since then, the throughput of containers of the maritime ports in the world keeps increasing and now it is over 600 million of TEU during one year.

In this report, firstly, structure of the transit route network for maritime containers is analyzed with a community detection algorithm. A number of community detection algorithms are submitted recent years. However, its application to maritime transportation is limited. The result of the analysis shows that communities of the container ports in the world are clearly separated depending on the locations of the ports, such as Asia, North America or Mediterranean area, even though the input data does not contain location data of the ports. It implies that links representing feeder routes around hub ports form densely connected network.

Secondary, a model for route selection of maritime container transportation is developed. Furthermore, a flow model for the international maritime container transportation is also developed with the route selection model and the result of the community analysis. An OD (Origin and Destination) matrix, representing transported amount between regions in the world, obtained by the developed models roughly matches with that of another report.

* 運航・物流系
原稿受付 平成27年1月30日
審査日 平成27年3月2日

目 次

- 1. まえがき.....18
- 2. 国際コンテナ定期船航路の分析.....18
 - 2.1 コミュニティー.....19
 - 2.2 コミュニティー抽出法.....19
 - 2.3 コミュニティー抽出法による解析結果.....20
- 3. 国際コンテナ流動モデルの構築.....20
 - 3.1 コンテナ流動データの分析.....20
 - 3.2 エントロピーモデルによる分析.....22
 - 3.3 港間 OD 表の推定.....23
 - 3.3.1 純流動 OD 表から
総流動 OD 表への変換.....23
 - 3.3.2 総流動 OD 表の推定.....23
- 4. 流動モデルによる解析結果.....24
- 5. まとめ.....25
- 参考文献.....26

1. まえがき

1950 年代に登場したコンテナを用いた輸送システムは、規格化された容器を用いることにより荷役効率を劇的に向上させ、陸海複合一貫輸送を実現し、その後の輸送システムに大きな変化をもたらした。図-1 には、世界の港におけるコンテナ取扱量の推移を示す。2009 年の取扱量はリーマン・ショックの影響により減少したが、その後は今日においても増加の傾向を示し、2014 年の取扱量は 674 百万 TEU にもものぼると推定されている(Drewry Shipping Consultants Limited の推定)。また取扱量の上昇に伴い、コンテナ船の大型化も進み、現時点で、最大積載量を誇るコンテナ船は 19,000TEU を超えている。

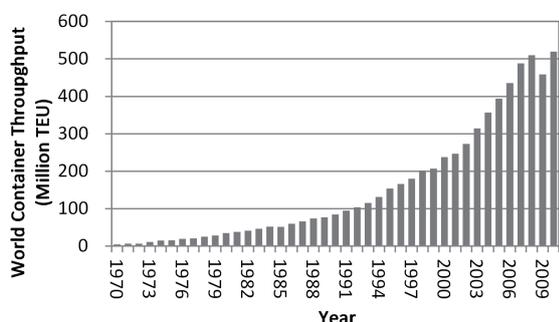


図-1 港のコンテナ取扱量の履歴(世界の総計)

本報告では、今後も成長を続けるであろう国際海上コンテナ輸送に係るネットワークの分析や

流動を模擬するモデル、そのモデルを用いた解析結果について報告する。

外航コンテナ流動に係るモデルに関する報告は少数の例にとどまっている。それらの報告では日本やアジアを中心とした流動モデルを構築しているが、世界の主要港を網羅していない。本件では、日本やアジアの詳細な流動の再現ではなく、世界規模の流動を巨視的に捉えることを主眼とする。また、近年、ソーシャルネットワークの発展に伴い、ネットワーク構造を分析するための手法に関する報告が相次いでいる。しかしながら、これらの手法の輸送問題への適用も数が限られる。ここでは、ネットワーク解析の一手法であるコミュニティ抽出法を、外航コンテナ船の航路ネットワークに応用して、その構造を分析し、上記流動モデルのパラメータとして利用する。

2. 国際コンテナ定期船航路の分析

国際コンテナ定期船航路は、図-2.1 に模式的に示した図のように、ハブ・スポーク型のネットワークとして捉えられている。支線航路には小型なコンテナ船が投入され、地域内の比較的小規模な港を巡ってコンテナを集約し、規模が大きなハブ港で積み取ったコンテナを下ろす。幹線航路には大型コンテナ船が投入され、世界中に散逸するハブ港を巡り支線航路で集約された貨物を大量・長距離輸送する。幹線航路からハブ港で降ろされた貨物は、地域内を巡る支線航路に渡り、最終目的地に到着する。ハブ・スポーク型のネットワークは大量・長距離輸送を担う幹線航路を大型船舶で輸送することによる規模の経済を期待した輸送システムであり、国際コンテナ海上輸送に限らず、あらゆる輸送システムに見られる普遍的なネットワーク構造となっている。本章では、ソーシャルネットワークに対する応用で、近年発展が著しいコミュニティ抽出法を用い、国際コンテナ航路が形成するネットワークの構造分析を試みる。

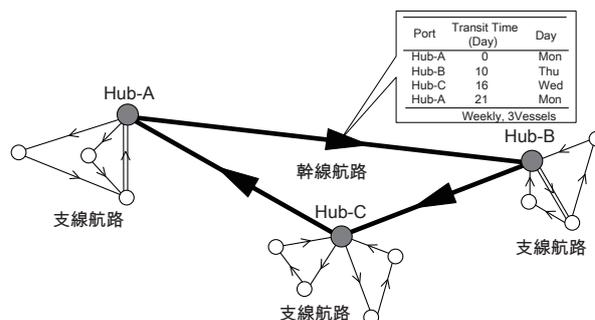


図-2.1 ハブ・スポークネットワークの模式図

2.1 コミュニティー

インターネット上のソーシャルネットワークの発展は著しい。コミュニティ抽出法は、その大規模なネットワークの構造分析に広く応用されている手法である。コミュニティには様々な定義があるが、概して言えば図-2.2に示すように、1つのコミュニティ内には多くのリンクが存在し、コミュニティをまたぐリンクは少数となるような分割により得られるノードの集合である。

ハブ・スポークネットワークの場合、図-2.1のように支線輸送は地域内のハブ港へ繋がる多くの航路を持つことが想像できる。以下に示すコミュニティ抽出法により、ハブ港の周辺に張り巡らされた支線輸送のリンクにより密に繋がるコミュニティとして港を分割できることが期待できる。

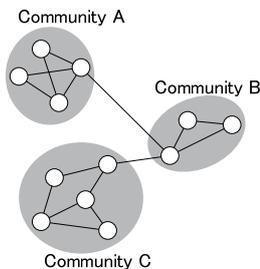


図-2.2 コミュニティーの模式図

なお、ここで利用するコンテナ船航路のデータは、Containerisation International Online (現 Lloyd's List & Containerisation International, 以降 CI Online と略す。) が公表している 2010 年のデータベースから得た。このデータベースには図-2.1 内の吹き出しに示すように、寄港順、港間の航海時間 (単位: 日)、着港曜日、投入船舶数やその主要目、運航頻度などのデータが含まれる。このデータを用いれば、図-2.1 のように港をノード、港間の船の動きをリンクとして表現したネットワークに変換することが可能となる。また、航路は巡回型 (Loop と呼ばれることもある) であり、バス路線のように往路復路で同じ港を通る往復型の航路は少数であった。

2.2 コミュニティー抽出法

Newman により開発されたコミュニティ抽出法¹⁾について概略を説明する。この手法では以下の式で定義されるモジュラリティー Q を最大化することでコミュニティを抽出するが、全ノードが1つのコミュニティに属する状態を初期状態とし、1過程で2つのコミュニティに分割す

る。この過程を繰り返すことで、複数のコミュニティが形成される。なお、この手法については、細かなコミュニティは抽出できないといった解像度の問題が報告されているが、本件ではアジア、北米といった大まかなコミュニティ分割を求めるところを目的とする。

$$Q \equiv \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \frac{1}{2} (s_i s_j + 1) \quad (2.1)$$

ここで、 $A_{i,j}$ は隣接行列 \mathbf{A} の i 行 j 列要素であり、 i, j はノード (本件では港) を表す。隣接行列はノード i, j を直接結ぶリンク (本件では輸送航路) の有無を 1、0 で表した対称行列である。 m はネットワーク内の全リンク数、 k_i はノード i に繋がるリンク数であり次数と呼ばれている。 s_i は 2 つに分割するコミュニティを -1, 1 の数値で表す変数である。もし、ノード i, j が同じコミュニティに属するとすれば、式(2.1)で $(s_i s_j + 1)/2 = 1$ となり、異なるコミュニティに属する場合は 0 となる。式(2.1)の最初の括弧内、第 1 項はノード i, j 間のリンクの有無を、第 2 項はランダムネットワーク (ノードをでたらめに選んでリンクで繋いだネットワーク) を仮定した場合のノード i, j 間のリンク数の期待値に相当する。よって、ノード i, j が同じコミュニティに属し、リンクにより直接結ばれ、ランダムネットを仮定したリンク数の期待値が低い場合、モジュラリティー Q は増加する。ノードが属するコミュニティは、 s_i, s_j で表されるため、この値を求めれば良いが、目的は Q の最大化である。式(2.1)は以下のように変形できる。

$$Q = \frac{1}{4m} \mathbf{s}^T \mathbf{B} \mathbf{s} \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{s} は s_i を要素とするベクトル、 \mathbf{B} はモジュラリティー行列と呼ばれ、以下の式で定義される。

$$B_{i,j} \equiv A_{i,j} - \frac{k_i k_j}{2m} \quad (2.3)$$

さらに、過程は省略するが Q の最大化という要求から、ラグランジュの未定乗数法 (未定乗数を β とする) を用いて以下の式が導出される。

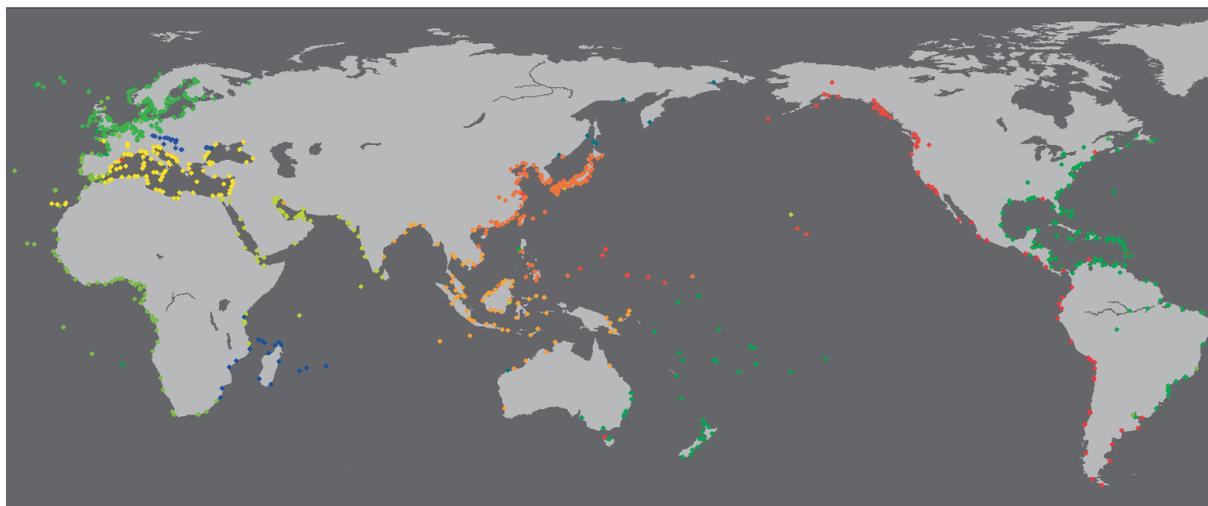


図-2.3 国際コンテナ船航路による港のコミュニティ抽出結果

$$\mathbf{B}\mathbf{s} = \beta\mathbf{s} \quad (2.4)$$

これを式(2.2)に代入すると、次式が得られる。

$$Q = \frac{n}{4m} \beta \quad (2.5)$$

ここで、 n はネットワークの全ノード数であり定数である。よって Q の最大化は β の最大化を意味するが、 β は式(2.4)から \mathbf{B} の固有値である。すなわち、最大の固有値となる固有ベクトル \mathbf{s} を導くことで最大の Q となるコミュニティ分割が得られる。

固有値を求める解法として、べき乗法を用いる²⁾が、 \mathbf{s} は実数ベクトルとして得られるため、要素の正負により、ノードを2つのコミュニティに分割する。分割されたコミュニティを1つのネットワークとしてさらに分割を続けるが、すべての固有値が0以下の値となった時、抽出は終了する。

2.3 コミュニティ抽出法による解析結果

図-2.3 に国際コンテナ定期船航路に属する港のコミュニティ抽出結果を示す。なお、コミュニティの違いは異なる色で示してある。解析した定期船航路のネットワークデータは、ノード(港)数が約1000、リンク数が約4600で、最終的に得られたコミュニティ数は30となった。所属する港数の上位10コミュニティに9割以上の港が含まれる。

図に示したコミュニティの分割に利用した情

報は隣接行列で示されるリンクの有無情報のみであり、位置情報が含まれない。それにも関わらず、コミュニティは北東アジア、北米西海岸、地中海沿岸など、地理的に分割されている。物理空間上に構成されるネットワークは近接するノード間で密に繋がることが報告されているが、コンテナ船航路も例外では無いことが分かる。さらに、図-2.1 に示した幹線航路は、地球規模の航路長となるため、1つの地域内で寄港する港の数は限られる。図-2.3 で示される結果は、コミュニティ内に多くの支線航路が密に繋がっていることを暗示しており、幹線航路は各コミュニティに属する限られたハブ港を経由するルートを取るよう構成されるはずである。

3. 国際コンテナ流動モデルの構築

国際コンテナ流動に係るモデルに関する報告³⁻⁵⁾は少数の例にとどまっているが、流動モデルの応用先は広い。例えば、新規航路の可能性の検討や既存航路のスケジュール変更が積み取り量に与える影響などを検討でき、様々な活用方法が期待できる。本件では、2010年のPIERSデータベースを用いて、その経路選択の代表的な特性を捉えてモデル化を行う。

3.1 コンテナ流動データの分析

ここでは、コンテナの経路選択は、航海時間が支配的であるとの仮説を元に分析を進める。分析に利用したデータは2010年8月におけるPIERSデータベースを用いた。このデータベースにはBL(船荷証券)ごとに、コンテナ数量(TEU換算)、

発着港(トランシップ港も含む)、出着港日、積載された船舶が記録されている。すなわち、貨物を中心に見たデータベースとなっている。ただし、北米を発着する貨物(北米港発—他地域港着または他地域港発—北米港着)に限定されており、発着日の情報も、北米港における発着日に限定される。このデータベースから船舶ごとに北米港で積載、荷降ろしされたコンテナ数量(単位:TEU、以降積み取り量とする)が分かる。しかしながら、本データベースには船舶により輸送されたルートの特徴付ける明確な数量は、航海時間も含まれて他には見当たらない。そこで、LMIU 船舶動静データを援用し、船舶をIMO ナンバーで同定して2港間の航海時間を補完した。

分析は競合パス集合で起こる経路選択を対象とした。競合パス集合とは、発着港、出港日と同じコンテナが利用した複数の航路(船舶)の中で、発着港間の経路を抜き出したパス(すなわち競合パス)である。図-3.1は競合パス集合とそれに係るデータの整理方法の模式図であり、3つの競合パスで構成される1つの競合パス集合が描かれている。

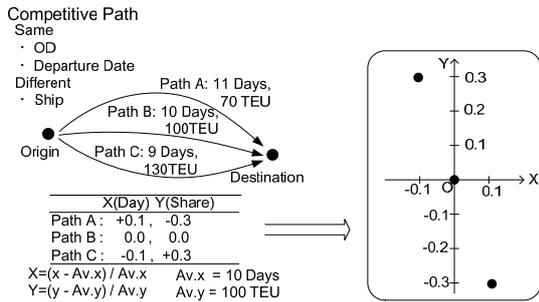


図-3.1 競合パスとデータの整理

競合パス集合に含まれる複数の航路で航海時間と積み取り量(TEU)を組み合わせたデータを多数得て、経路選択の傾向を見る。図-3.1ではある貨物の発着(Origin Port)から着港(Destination Port)を結ぶ3本の競合パス(Path A,B,C)が描かれている。それぞれ、航海時間と積み取り量の組み合わせは Path A{11日,70TEU}、Path B{10日,100TEU}、Path C{9日,130TEU}となっている。これらの競合パスの平均値は{10日,100TEU}となる。すべての競合パスについて平均値との差を平均値で除し、無次元化された航海時間をx軸、積み取り量をy軸にプロットする。この操作を多くの発着港(OD)の組み合わせについて行い、様々なODについて異なる航海時間、積み取り量となるデータを一つの図にまとめる。図-3.2はこの結果である。

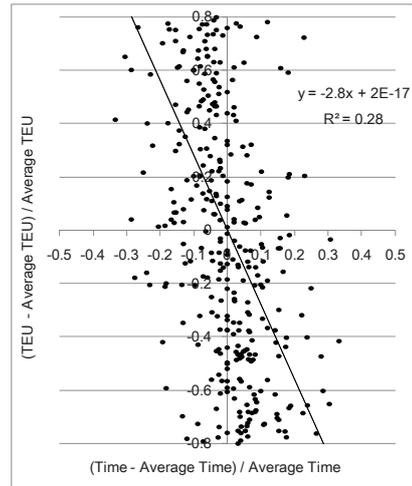


図-3.2 航海時間と積載量の関係

結果は大きくばらつくが、第2,4象限より、第1,3象限の点数が小さいことは明らかであり、負の相関が示されている。これは、短い航海時間ほど、貨物を獲得しやすいことを意味している。

図-3.3では、図-3.2のy軸を横軸にとり、点の数を頻度分布として示した。また、図-3.4は、図-3.2の航海時間の平均値付近に限定した点の数の頻度分布を示している。χ²乗検定により、これらの頻度分布は、前者は一様分布から、後者は正規分布から得られるという仮説を、有意水準1%で棄却できない結果となっている。

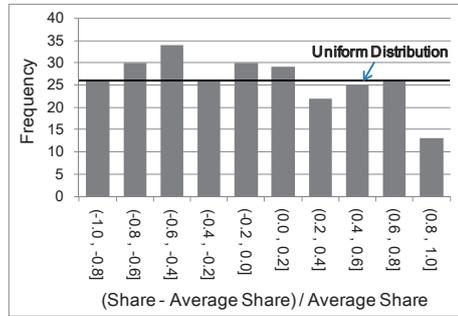


図-3.3 貨物の積み取り量に関する頻度分布

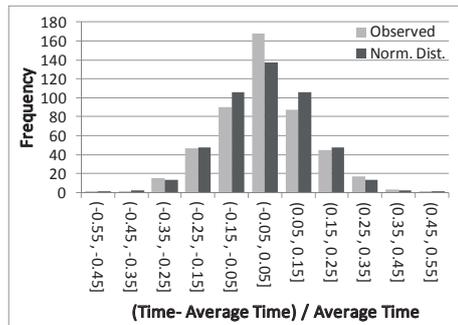


図-3.4 航海時間の頻度分布

これより、大きくばらつくデータではあるが、原点に対して回転対称の可能性が否定できず、最小二乗法で得られる直線は、その分散した点群を通ることから、経路選択の代表的な特性を表すと考えられる。なお、その直線は図-3.2 に示す通り、原点を通り傾きは-3である。これは、競合パスの中で、平均的な航海時間は平均的な積み取り量を確保でき、平均より1割速いサービスは平均より3割多い積み取り量を獲得できることを示唆している。なお、この大きな傾きがコンテナ船の船速が大きな理由として理解できる。また、航路の最適化の観点から見れば、寄港して貨物を積み取るメリットと、寄港により他港間の航海時間が長くなることのデメリットとのバランスを考慮する必要があり、複雑な判断が求められる。ここで得られた競合パス集合に関する経路選択のモデルを次式で示す。

$$d_i = d_{av} \{1 + F(1 - t_i/t_{av})\} \quad (3.1)$$

$$d_{av} = D/n_c \quad (3.2)$$

$$t_{av} = \sum_{i=1}^{n_c} t_i/n_c \quad (3.3)$$

ここで、 n_c は競合パスの数、 d_i は競合パス i の積み取り量、 t_i は競合パス i の航海時間(日)、 t_{av} は平均航海時間(日)、 d_{av} は平均積み取り量(TEU)、 D は2港間の輸送需要(TEU)である。 F は図-3.2の直線の傾きから3とする。極めて簡易な経路選択モデルであるが、大きくばらつくデータの中央を通る結果を利用しているため、貨物が平均的に航路に分配されることになる。特に、幹線航路では多くのODの貨物が積載されるため、このモデルによる過大評価と過小評価が相俟って、相殺する効果が期待できる。また、PIERSデータベースは上述の通り北米発着貨物に限定され、上記モデルもこの制限に影響を受ける可能性がある。しかしながら本報告が対象とする港間輸送量の解析に利用できるデータベースは限られるため、ここで示したモデルを世界的な解析に利用する。

3.2 エントロピーモデルによる分析

図-3.2 で示した競合パスにおける経路選択の分析は、大きくばらつく結果となった。ここでは、このばらつきが、モデルに含まれない他の要因によって起こることを仮定し、その数量を見積もる。用いる手法は、情報エントロピーモデル⁶⁾である。

情報エントロピー H は、次式で定義される。

$$H = -\sum_i p_i \ln(p_i) \quad (3.4)$$

p_i はサービス i の選択確率である。情報エントロピーは情報の曖昧さを表す尺度で、例えば、ある2つの競合パスの選択率がともに50%である場合、情報エントロピー(曖昧さ)が最大化(情報としては価値が無いことを意味する)された状態に対応付けることができる。一方、最短時間となる競合パスの選択率が100%となるような場合、情報エントロピー(曖昧さ)は最小化される。この状態は、サービス i のコストを c_i とすれば、次式で計算されるコストの期待値

$$l = \sum_i c_i p_i \quad (3.5)$$

が最小化されることを意味し、最小コストとなるサービス j に選択が集中して $p_j = 1$ となる。上述の通り、この点で情報エントロピーも最小化されるため、エントロピーモデルでは、 H/l が最大となる p_i を求める。このモデルの出力 p_i はサービスが均等に選択されるという解と最小コストのサービスに選択が集中する解の2つの極限の間の解を出力することになる。

ここでは、経路選択のコストとして1因子を航海時間とし、他にもう一つ未知の因子が存在することを仮定した2因子情報路エントロピーモデルを用いる。このモデルにより、輸送時間以外に経路選択に影響を与えている2因子目の数量を推測する。

手順は以下の通りである。エントロピーモデルに、図-3.1 に示した競合パスの既知情報である航海時間を1因子目の数量として与える。図-3.2の結果と一致する2因子目の数量を、 H/l が最大化されるという条件のもとで求める。

図-3.5 では、求められた2因子目の数量について、競合パス集合内の最小値で除した比率を横軸にとり、縦軸にはその比率以上となる競合パス数を累積確率で示した。これより、因子2の競合パス集合内での最小値と2倍以上の差が9割、10倍以上の差が6割にも達することが分かる。よって、因子2に関係した量的尺度で、図-3.2の垂直方向に関する大きな散逸を説明する場合、最小値となる競合パスと他の競合パスの間に上記した大きな乖離がなければならない。すなわち、因子2を運賃と解釈することには無理があり、いかに

正確な運賃データを持ち込んで分析を行っても、図の大きな散逸を表すことはできない。このことから、経路選択は過去の取引実績、サービス、遅延率、信頼性、ナショナリズムなど、数量化が困難な他の要素に大きく影響されていることを暗示している。

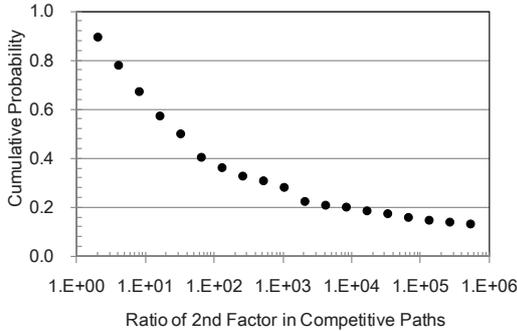


図-3.5 2因子目の数量の比率

3.3 港間 OD 表の推定

コンテナ流動を求めるためには、港間需要を表す OD 表が必要である。ここでは、3.1 節に示した経路配分モデルを使って、OD 表を作成する方法について記述する。

3.3.1 純流動 OD 表から総流動 OD 表への変換

貨物や人の流れは総流動と純流動とに分けて考えられる。図-3.6 には、本件における総流動と純流動を模式的に示している。

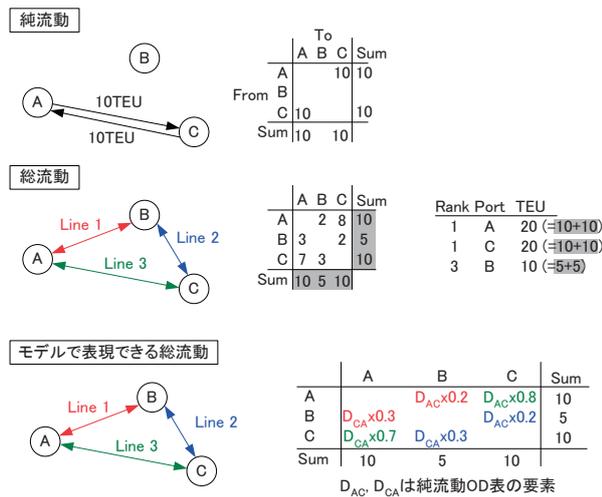


図-3.6 総流動と純流動

純流動は真の発着地間の需要を意味し、総流動はトランシップ港で区切られた貨物の流れを表している。よって、総流動ではトランシップ貨物の量もコンテナ取扱量として計上され、直接的にコンテナ船航路の影響を受ける。一般的に、純流動

は総流動を求めるよりも困難であるが、今求めたい OD 表は純流動に該当する。

ところで、式(3.1)~(3.3)に示したモデル式により、OD 間の航海時間が分かれば、需要が複数の競合パスに配分されることを表現できる。図-3.6 の下段の図はこのことを示しており、求めたい純流動 OD 表の要素を未知数 D_{AC} あるいは D_{CA} として表し、式(3.1)~(3.3)でどの程度の割合がどの競合パス (すなわち、コンテナ船航路の一部) に配分されるのかが分かる。これを複数の OD で行うことで、総流動 OD 表の要素が純流動 OD 表の要素の関数の和として埋まっていく。なお、航海時間については、2.1 節に示した CI Online が公表する国際海上コンテナ航路のデータベースから、港をノード、船の寄港スケジュールをリンクで表したネットワークを作成して求める。これより、純流動 OD 表の要素を未知数として含んだ総流動を表す式が得られるが、その式と釣り合わせるための総流動データがなければ、方程式が解けない。

3.3.2 総流動 OD 表の推定

国際海上コンテナ航路のデータベースと、CI Online が公表する港湾のコンテナ取扱量データから、港間の総流動 OD 表を求める手法について記述する。得られた総流動 OD 表は前節の方程式と等号で結ばれ、線形一次方程式が完成する。

コンテナ取扱量のデータには上位 500 港の取扱量が含まれる。港のコンテナ取扱量として計上されるコンテナの属性を分離して考えると{揚げ, 降し}×{実入, 空}×{真の発着, トランシップ}×{輸出入(国際輸送), 移出入(国内輸送)}といった項目が挙げられる。だが、多くの港でこの属性が明記されておらず、総取扱量のみの報告に留まっている。そのため、以下の条件で解析を進めた。

- ① 実入、空コンテナの区別を無視する。
- ② 各港の出荷 (揚げ), 入荷 (降し) を総取扱量/2 で与える。
- ③ すべて国際輸送の取扱量、すなわち輸出入貨物とする。(A 国国内輸送→国際輸送→B 国国内輸送の流れの場合、2 つの国内輸送を無視する。)

なお、真の発着か、トランシップかは、純流動、総流動を求める際に、解析結果の出力として得られる。この内訳は解析結果が出るまで不明であるが、取扱量のデータにはトランシップ量が含まれていることは確かであるため、図-3.6 の中段に示したように、取扱量は総流動のコントロールトータル (発着量の和) と一致する。

また、①による空、実入りコンテナの区別をしなければ、多くの港で出入数がバランスするはずであり、②の妥当性と関連する。③については、

この仮定をおいた既報⁷⁾に倣った。

総流動の推計にフレーター法⁸⁾を用いるが、その初期値に与える数値の導出には、赤倉の手法⁷⁾を参考とした。この手法の概略を、図-3.7 の例で示す。

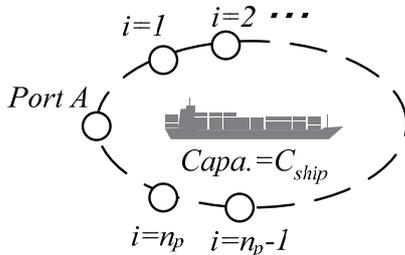


図-3.7 総流動の初期値推定方法の説明図

図-3.7 は Port A を出港する船舶が $i=1 \sim n_p$ で示される港を巡り、Port A に戻るループを示している。前述の国際海上コンテナ航路のデータベースには各航路に投入される船舶の情報も含まれている。港 i に 1 年間に寄港する全航路、全船舶のコンテナ積載可能量(Capacity)をデータベースから得て、その和を取り C_i とする。港 i の年間コンテナ取扱量を T_i とし、以下の式で取扱量比、 L_i を求める。

$$L_i \equiv T_i / 2C_i \quad (3.4)$$

ここで、分母の 2 はコンテナの積載と荷降ろしが別にカウントされることを考慮して乗じられている係数である。よって、寄港する船舶がその積載可能量の全量を積載、荷降ろしすると、取扱量比 L_i は 1 となる。この L を用いて、図-3.7 の Port A からポート j への荷動き量を以下の式で求める。

$$T_{A-jport} = 2L_{Aport} \sum_{ship} C_{ship} \frac{k_{A-j} L_{jport}}{\sum_{i=1}^n k_{A-i} L_{iport}} \quad (3.5)$$

ここで、 C_{ship} は船の積載可能量であり、 k は同地域内でのコンテナ流動を調整するための係数である。太平洋航路を例として挙げれば、アジアから北米への幹線輸送を行う荷物が支配的であり、アジア域内での輸送量は、幹線輸送量と比較すると小さな重みしか持たないと考えられる。このことを調整する機能を係数 k に持たせている。よって、 k_{A-j} は Port A と j が異なる地域に属すれば 1、同じ地域であれば 1 より小さな値が入る。(以降

に示す解析結果は、図-4.4 に示した結果の観察から 0.05 を用いた。) なお、ここで、地域の定義は地理的な位置で決定するのではなく、図-2.2 で求めたコミュニティにより定めた。また、航路データベースの船舶の積載可能量は欠落データが多い。そのため、航路長と積載可能量の関係をプロットした図-3.8 から、一次式で関係を導き、欠落データを補完した。

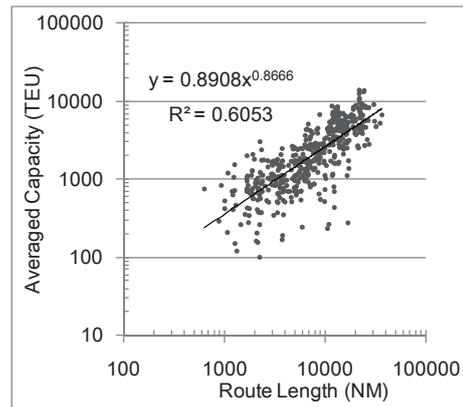


図-3.8 航路長と船舶積載可能量との関係

上記手法をすべての OD で行い、総流動 OD 表を得るが、この表を集計しても港の取扱量とは一致しない。そこで、フレーター法⁸⁾により総流動 OD 表を初期値、港の取扱量をコントロールトータルとして、齟齬のない総流動 OD 表を得る。

3.3.1 節で求めた方程式が示す内容は、本節で求められた総流動 OD 表と一致するため、等式で結んで連立一次方程式を構成する。ただし、未知数(純流動 OD 表の要素)が方程式の数より多い低ランク行列となるため、一般化逆行列を用いた非負最小二乗解を求め⁹⁾、この解を純流動 OD 表とする。

4. 流動モデルによる解析結果

本章では、前章のモデルを用い、2010 年におけるコンテナ流動の解析結果を示す。なお、対象とする港はコンテナ取扱量の上位 200 港とした。また、用いる航路は Weekly サービス(着港、出港の曜日を固定したサービス)と呼ばれる航路に限定した。

非負最小二乗解を求めるということは、得られた解は厳密に右辺ベクトルと一致せず、誤差が含まれることを意味している。まず、本解析で得られたコンテナ取扱量と CI Online で報告された取扱量を図-4.1、図-4.2 で比較する。解析結果は

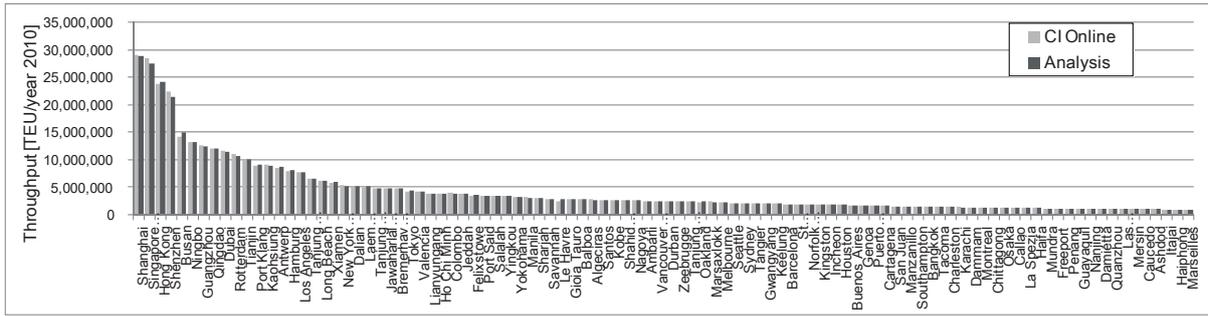


図-4.1 コンテナ取扱量の比較(上位100港)

全般的に、実際のランキングや取扱量を良く再現できていることが分かる。

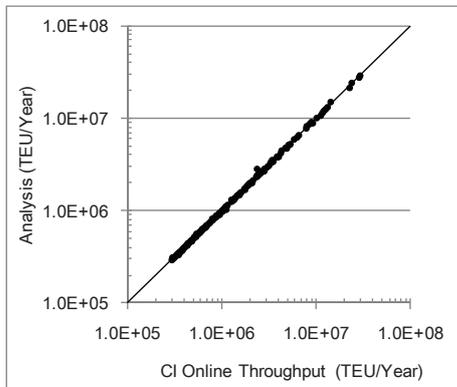


図-4.2 コンテナ取扱量の比較(横軸:実際の取扱量、縦軸:シミュレーション結果、1つの点は1つの港を表す)

次に、得られる港間純流動 OD 表を地域別に集約した結果を図-4.3 に示す。ここで、比較対象は、文献¹⁰⁾にある商船三井営業調査室(図中 MOL と示す)が推計した結果とした。なお、地域は比較対象の地域の区分けにならった。ヨーロッパの着量などで若干大きめの差が記録されているが、概ね既報の数量と傾向は一致することが確認できる。

さらに、港間の輸送量を検証する。港間の輸送量データは限られているため、モデルの構築に利用した PIERS データベースの記録と比較する。図-4.4 の左列は北米港を着、右列は北米港を発とする純流動としての月間輸送量(2010年8月)である。どの結果も概ね右肩上がりの散布図が得られ、解析結果とデータベース上の荷動き量との一致を表す斜め 45° の線を中心にはらついている。特に月間輸送量が 1000TEU を下回ると、シミュレーションによる計算結果と実データの差が大きくなるようである。

ここで、示した手法は、Weekly サービスに限

定した分析を行っている。特に支線航路では、Weekly よりも頻度の多い輸送サービスを提供している航路も多い。また、上記した手法の中にも、調整係数のような経験的な数値の入力が必要となるパラメータもある。これらの影響が結果に反映されたものと考えられる。

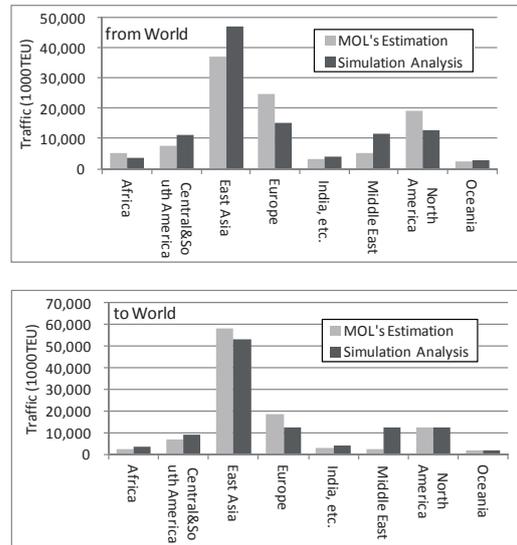


図-4.3 純流動 OD 表の比較(上図:世界→地域、下図:地域→世界)

5. まとめ

国際海上コンテナ船航路について、コミュニティー抽出法を用いた航路ネットワークの構造解析を行った。港の位置情報を用いず、ネットワークのトポロジーだけを用いた解析であるにもかかわらず、アジア、北米、地中海といった、地理的な位置に分割されたコミュニティーが得られた。これは、各地域の支線輸送網が密に接続したネットワーク構造であることを暗示しており、ハブ・スポーク型ネットワークの描像と一致する。また、幹線航路はこれら複数のコミュニティーを貫く形

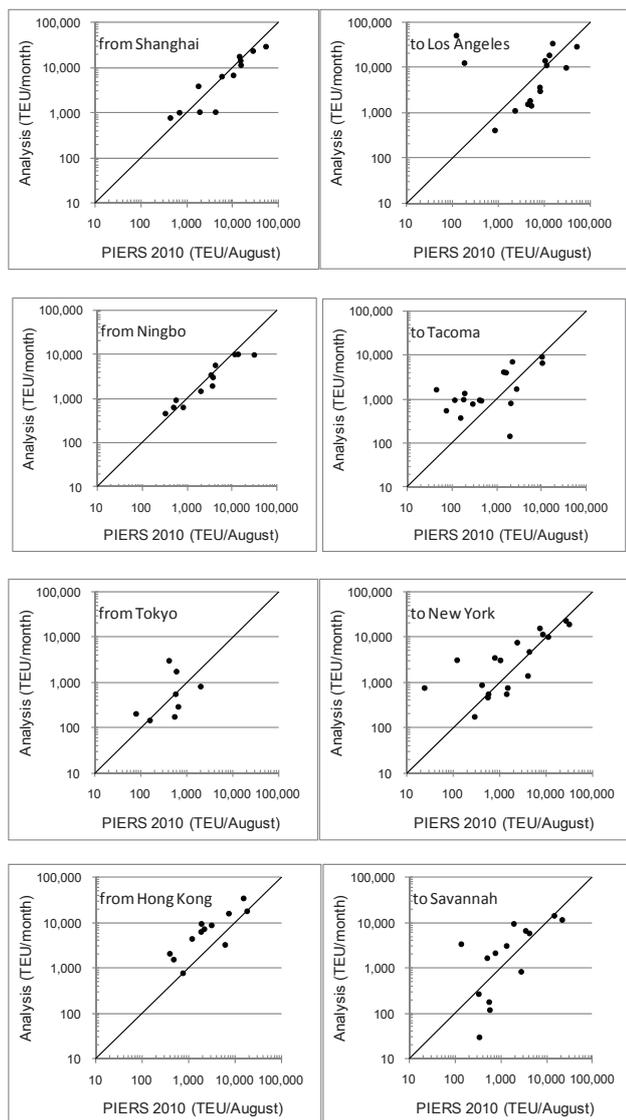


図-4.4 港間年間輸送量の比較（左列：北米港着、右列：北米港発）

で航路編成されるはずであり、航路編成に係る一つの知見が得られた。

国際海上コンテナ流動モデルを開発するにあたり、経路選択モデルを構築した。データベースを用い分析された積み取り量と航海時間の関係は、ばらつきが大きく、有用な情報は得られないように見えるが、両者には明らかに負の相関があり、航海時間の増減に対して積み取り量は大きく反応

するモデルとなった。この関係は、コンテナ船が大出力のエンジンを搭載し、大きな船速を出せることを合理的に説明できる。また、このモデルを用いて港間 OD 表を推定するとともに、国際海上コンテナ流動の解析を実施した。得られた港間 OD 表を集約し、地域間 OD 表としてまとめた結果は過去の報告と概ね一致することを確認した。ただし、港間 OD 表の結果は、Weekly サービスの航路に限定した条件や仮定などを再考する必要があることが分かった。

参考文献

- 1) M.E.J. Newman: Modularity and community structure in networks, PNAS, Vol.103, No.23, (2006), pp.8577-8582
- 2) 1)M.E.J. Newman: Networks: An Introduction, Oxford University Press, (2010)
- 3) 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)
- 4) 家田仁、柴崎隆一、内藤智樹：日本の国内輸送も組み込んだアジア圏国際コンテナ貨物流動モデル、土木計画学研究・論文集、No.16、(1999)、pp.731-741
- 5) 黒田勝彦、竹林幹雄、武藤雅浩、大久保岳史、辻俊昭：外航定期コンテナ流動予測モデルの構築とアジア基幹航路への適用、土木学会論文集、No.653/IV-48、(2000)、pp.117-131
- 6) 国沢清典：エントロピー・モデル、日科技連出版社、(1975)
- 7) 赤倉康寛、高橋宏直：船舶動静データに基づく外貿コンテナ総流動量推計法、土木学会論文集、No.681/IV-52、(2001)、pp.78-99
- 8) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第II編 利用者均衡配分モデルの展開、(2006)
- 9) C.L. Lawson, R.J. Hanso: Solving Least Squares Problems, Society for Industrial and Applied Mathematics, (1987)
- 10) 国土交通省：海事レポート平成 23 年版