

多時点データ分析による全世界海上コンテナ 輸送ネットワークの発達過程 ～特に 1970 年代とその前後に着目して～

齊藤 友啓¹・柴崎 隆一²

¹ 学生非会員 東京大学 工学部システム創成学科知能社会システムコース

E-mail:saito-tomohiro555@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

² 正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科システム創成学専攻

E-mail:shibasaki@sys.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、国際海上コンテナ物流について、グラフ理論に基づくネットワーク分析手法を用いて、1970年代のコンテナ黎明期を主な対象とした実証分析を行った。現在までの長期的な分析からは、コンテナ黎明期における米国を中心とするネットワーク構造から、多極構造、さらにハブ&スポーク構造の形成という傾向を確認した。また、1970年代を通じた中期的な分析においては、初期は主に既存の基幹航路の置換、後期はフィーダー輸送網の拡充によって多極構造へ変化したことを確認した。さらに、1975年のスエズ運河再開が与えた影響について、1976年における欧州＝東アジア間輸送の平均寄港地数の上昇などの影響を確認し、その原因を検証した。

Key Words: *Container shipping, network analysis, weighted network, graph theory, 1970s, Suez Canal*

1. 序論

海上輸送は最古から存在する交通手段の 1 つであり、時代ごとに形態を変えながら今日でも最も重要な貨物輸送手段としての地位を占めている。中でも 20 世紀中ごろに登場し急速に重要性を増したのが海上コンテナ輸送である。その登場以来、海上コンテナ輸送は、リーマンショックなどの一部の不況期を除き拡大し続けており、現在のグローバル化した世界経済において欠かせない存在となっている。しかし、その発達過程では、スエズ運河の再開や石油危機などによる経済危機、新興国経済の発展による輸送需要の変化、個別の港湾の被災及び停止など、多くの障害や変化を経験してきた。

近年、この海上コンテナ輸送について、グラフ理論等のネットワーク科学の手法を適用し、その脆弱性の評価や構造上の特徴の把握を試みる研究が増えている。しかしながら、利用可能なデータの不足のため、既存の研究は 1970 年代より後を主な分析対象としている。すなわち、コンテナ黎明期におけるネットワーク構造の変化や、1975 年に生じたスエズ運河の再開については、十分な研究がなされておらず、実証的な知見が十分に蓄積されていない。

本研究の目的は、1970 年代前後のコンテナ黎明期に焦点を当てたネットワーク分析を行うものである。これにより、現在や今後の海上コンテナ輸送網を分析・展望する上で有用な実証的知見を得る。具体的には、日本郵船による資料¹⁾²⁾を新たに用いて

1970 年代を中心とした各時点の国際海上コンテナ輸送の定期航路データを作成し、次数や密度、中心性、クラスタリングなどのグラフ理論に基づくネットワーク分析手法を適用する。これにより、(1)長期的なネットワーク構造の変化分析により国際海上コンテナ発展史全体における黎明期の特徴を概観し、(2)1970 年代を中心としたコンテナ黎明期における中期的な構造変化分析によりコンテナ黎明期のネットワーク変化を詳細に分析して、さらに(3)1975 年のスエズ運河再開による影響に焦点を当ててその影響について分析するものである。

2. 既存研究と本研究の位置づけ

国際海上コンテナ輸送網に対してネットワーク分析を行った既存研究には、現在における特徴を分析したものや、ネットワークの脆弱性を評価したもの、過去の事象についての実証研究などが存在している。

現在における特徴を分析したものとしては、Hu et al³⁾による、2006 年の定期航路を分析し、ネットワーク分析に基づく指標から、接続性が良い港湾を算出したものが挙げられる。ここでは、定期航路に着目して、エッジを同一定期航路内の全ての港湾間に張ったモデルも使用されている。この研究を更に拡張したものが Ducruet et al⁴⁾であり、Lloyd's 社の提供する 1996 年及び 2006 年の 2 時点におけるコンテ

ナ船の港湾間移動データを利用し、各時点におけるネットワーク構造の分析や両時点間の比較がより精確に行われた。しかし、これは定期航路データを利用していないため、コンテナ船の移動の実態を正確にモデル化できていない。定期航路データを使用したものとしては、Pan et al⁹⁾は 2015 年における主要 7 社の港湾間移動データを用いて固有値分解を適用し、主にコミュニティ検出を行っている。また、Kawasaki et, al.⁶⁾は 2016 年のアジア域内航路データに対し、近接中心性を適用することを試みた。しかし、いずれの研究もコンテナ船の港湾間移動をそのままエッジとしており、定期航路をモデル化しているとは言えない。

ネットワークの脆弱性については、Stergiopoulos et al⁷⁾が、2015 年~2017 年のコンテナ船の自動船舶識別装置(AIS)より取得した船舶の位置座標データに対し、Critical Infrastructure dependency modeling を適用した。これは船舶移動ルートにおける港湾間の依存関係を評価するモデルであり、依存関係の観点からリスクの高いルート・港湾が判明した。Wu et al⁸⁾は、主要コンテナ船社 100 社の定期航路データを用いて、マラッカ海峡・スエズ運河・パナマ運河という障害時の迂回が最も困難な 3 地点が遮断された際の、ネットワークへの影響を評価・分析し、ネットワーク全体の輸送容量が 10%弱~約 50%減少することを予測した。これらのようなシミュレーションは、将来の起こりうる障害に対して有用である一方で、各モデルの妥当性の検証には実証的な知見の蓄積が不可欠である。

過去の事象についての実証研究としては、Ducruet et al⁹⁾が、Lloyd's 社による 1977 年~2008 年の輸送船舶の港湾間移動データを用いて、階層的クラスタリングに基づく港湾のヒエラルキー構造や、各港湾における有意な船種の算出などを実施した。これより、ネットワーク構造全体についての長期的な変遷について多くの知見が得られた。ただし、船種の区別をせず分析したため、コンテナ船について得られた知見は限定的である。一方で、Laure et al¹⁰⁾は、阪神淡路大震災及びアメリカ同時多発テロ事件、ハリケーン・カトリーナという、一定期間の港湾の停止をもたらした歴史的出来事が、ネットワーク構造へ与えた影響を分析した。これより、ばら積み船に比べるとコンテナ船は専用の設備を必要としないため、このような出来事に比較的敏感に輸出入港や積替港を変化させることや、地域の輸送網による衝撃の吸収のため、ネットワーク全体には影響が波及し難い傾向などが確認できた。しかし、データ不足のため、それ以前の歴史的出来事について、グラフ理論に基づくネットワーク分析手法を用いた実証研究は行われていない。

以上を踏まえ、本研究では、1970 年代前後を中心とする国際海上コンテナ輸送の定期航路データを用いて、既存研究では行われていないコンテナ黎明期における実証分析を行う。加えて、特に輸送ネットワークに大きな影響を与えたと考えられる 1975

年のスエズ運河再開に着目し、それが与えた影響について分析・考察する。なお本研究では、港湾間移動データ（船舶動静データ）ではなく定期航路データを用いるため、当時のコンテナ輸送の実情がより正確に分析可能である。これらの分析を通して、脆弱性分析のモデル構築や将来におけるネットワーク発展の予測において、有用な実証的知見を蓄積するのが、本研究の目的である。

3. 使用データおよび分析手法

(1) データ

今回使用したのは、日本郵船資料^{1),2)}に基づく、1969 年 2 月~1995 年までの計 28 時点と、MDS Containership Databank¹¹⁾に基づく、2003 年及び 2016 年における、国際海上コンテナ輸送の定期航路データである。各定期航路データには、運航船社・寄港頻度・寄港地及びその順序・就航コンテナ船の名称や載貨重量トン、総トン数、最大搭載可能 TEU (20 フィート換算コンテナ個数) 等の情報が含まれている。日本郵船資料は紙媒体であったため、MDS と同様の形式で電子化した。加えて、直近の年度と比較して明確に容量が少ないデータも存在したため、除外した。残存した時点のうち、可能な限り等しい時間間隔でデータを抽出し、クレンジングを実施した。図-1 はそれらの各時点のデータに含まれる全世界のコンテナ港湾数（重複をカウントしない）を示している。

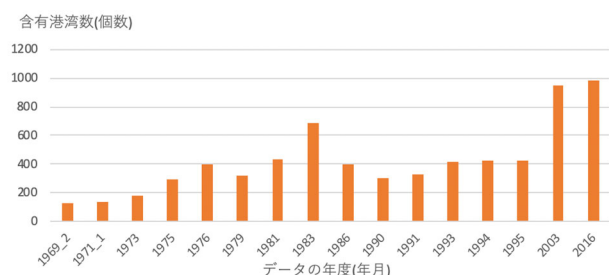


図-1 コンテナ船定期航路データに含まれる年次別全世界港湾数（重複を含まない）

このうち、1981~1995 年のデータは日本郵船資料²⁾に地域内（アジア域内、欧州域内等）航路を対象としないと明記されているため、前後のデータと比較する際には留意が必要である。特に、図-1 に示されるように、1986 年以後は不自然に港湾数が少ない。同様に、1979 年は前後の年と比べて港湾数が少ない。

以上の結果と本研究が 1970 年代を中心とする分析に焦点をあてていることを踏まえて、1969 年 2 月、1971 年、1973 年、1975 年、1976 年、1981 年、2003 年、2016 年の計 8 時点本研究における分析対象とした。

(2) モデル

ネットワークのエッジ構築法や付与する重みを

変更し様々なモデルを作成することで、多角的な分析が可能となる。本研究では表-1 に示す 6 つのモデルを用いることとする。

表-1 使用モデルとその特徴

モデル名	エッジ構築	重み
Model 1	直接接続のみ	考慮しない
Model 2	直接接続のみ	輸送頻度
Model 3	直接接続のみ	輸送容量(輸送頻度×船腹量)
Model 4	サービス内全接続	考慮しない
Model 5	サービス内全接続	輸送頻度
Model 6	サービス内全接続	輸送容量(輸送頻度×船腹量)

エッジの張り方は、移動経路接続とサービス内全接続を使用した。「移動経路接続」は、船舶の港湾間移動をそのままエッジとする。一方、「サービス内全接続」は、同一定期航路内の港湾同士がすべてエッジで結ばれる。「移動経路接続」はネットワークのコンテナ船の移動網などの分析に適しており、「サービス内全接続」ではサービス同士の接続関係に注目するため、ハブ&スポーク構造やトランシップに着目した分析に適する。

エッジの重み付けは、重みを考慮しないケースに加え、輸送頻度、輸送容量を使用した。重みを考慮しないケースでは、全てのエッジは等価として扱われ、ネットワークの幾何構造の分析に適する。輸送頻度は港湾間の船舶の年間往来回数を表し、輸送容量はその港湾間で運びうる年間最大量を表している。重み付きのモデルは、実際の輸送状況により合わせた港湾間接続の強さの違いを表現できる。

(3) 分析手法

グラフ理論を用いた複雑ネットワーク解析の分析指標として、次数や、密度、中心性がある。

次数は、ノードから伸びているエッジの数のことである。密度は、ネットワークにおけるエッジの多さを相対的に測る指標で、ネットワークにおけるノード間のエッジの存在確率を意味する。

中心性は、ネットワークにおける各ノードの重要性を測る指標である。本研究では、国際海上コンテナ輸送においてフィーダー輸送が行われることを考慮して、以下の式(1)で表される媒介中心性 $C_B(v)$ を用いる。

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \in V} \sum_{t \neq v \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (1)$$

ここで、 V : 全ノードの集合、 s, t, v : ノード、 σ_{st} : $s-t$ 間の最短経路の合計数、 $\sigma_{st}(v)$: σ_{st} のうち v を通る経路の数を表す。

クラスタリング手法は、以下の式(2)における $Q(C)$ で定義される Modularity に基づく Community 検出¹²⁾を用いる。

$$Q(C) = \frac{1}{2m} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}) \delta(c_i, c_j) \quad (2)$$

ここで、 $C: V$ を分割した各ノード集合 V_i の和集合、 A_{ij} : ネットワークの隣接行列における (i, j) 成分、 m : ノード総数、 k_i : ノード i の次数、 c_i : ノード i が属する Community、 $\delta(c_i, c_j)$: クロネッカーのデルタ ($c_i = c_j$ の時に 1 になり、それ以外では 0) である。

これにより、任意の各 Community 内密度が、ネットワーク全体の密度やその他の Community 群との Community 間密度より高くなるように、ノードの Community が決定される。ただし計算量を考慮して、本研究においては、Louvain 法を用いて概算する。

可視化には Gephi を使用し、配置アルゴリズムは Force Atlas 2 を用いた。ノードの大きさは媒介中心性を、色は所属する Community とした。2016 年のネットワークにおいて、Model 1 を可視化したものを図-2 に、Model 4 を可視化したものを図-3 に示す。

図-2 は、移動経路接続であるため、各地域における最初や最後の寄港地（ファーストポート、ラストポート）になりやすい港（シンガポール、アントワープ等）が大きく見えやすいという特徴がある。一方、図-3 に示す Model 4 ネットワークは、定期航路内の港湾を全て結んでいるため、ネットワーク密度が全般的に高く、可視化によるネットワーク形状の分析には適さないことがわかる。以上より、移動経路接続はネットワークのコンテナ船の移動網などの分析に、サービス内全接続は特に定期航路やトランシップに着目する際に使用する。

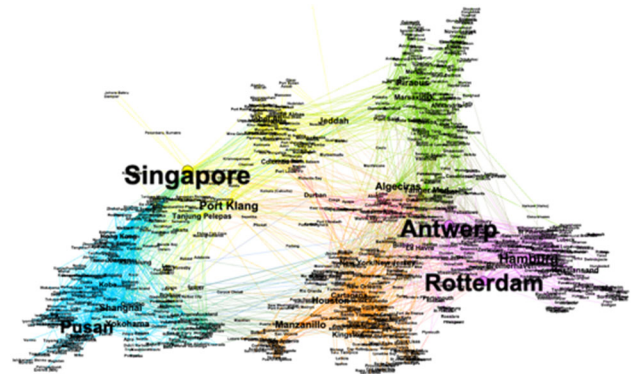


図-2 2016 年における Model 1 ネットワーク

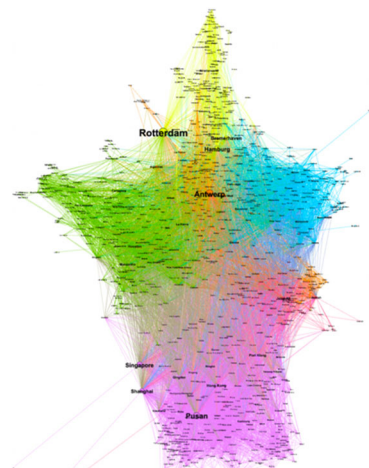


図-3 2016 年における Model 4 ネットワーク

表-2 各時点の Model 1 における媒介中心性上位 20 港(1969–2016)

年度	1969_2	1971_1	1973	1975	1976	1981	2003	2016
1位	New York	New York	New York	New York	New York	Hamburg	Singapore	Singapore
2位	Losangeles	Kobe	Rotterdam	Neworleans	Rotterdam	Rotterdam	Antwerp	Antwerp
3位	Callao	Rotterdam	Kobe	Baltimore	Lehavre	Newyork	Rotterdam	Rotterdam
4位	Yokohama	Losangeles	Losangeles	Hongkong	Neworleans	Leghorn	Pusan	Pusan
5位	Liverpool	Hamptonroads	Lehavre	Hamburg	Hamburg	Antwerp	Hamburg	Hamburg
6位	Rotterdam	Baltimore	Hongkong	Lehavre	Singapore	Losangeles	Yokohama	Port Klang
7位	Kobe	Balboa	Hamptonroads	London	Liverpool	Houston	Port Klang	Algeciras
8位	Hamburg	Riodejaneiro	Riodejaneiro	Charleston	Kobe	Lehavre	Piraeus	Manzanillo
9位	London	Portland	Savannah	Philadelphia	Yokohama	Sydney	Gioia Tauro	Shanghai
10位	Guayaquil	Bremerhaven	Genoa	Antwerp	Savannah	Singapore	Le Havre	Houston
11位	Vancouver	Hamburg	Vancouver	Rotterdam	Losangeles	Jeddah	Hong Kong	Piraeus
12位	Baltimore	Liverpool	Liverpool	Losangeles	Antwerp	Yokohama	Manzanillo	Jeddah
13位	Bremerhaven	Sydney	Guayaquil	Savannah	Gothenburg	Neworleans	Bremerhaven	Yokohama
14位	Antwerp	Salvador	Baltimore	Singapore	Vancouver	Montreal	New York/New Jersey	Tanger Med
15位	Kingston	Callao	Leghorn	Houston	Hongkong	Kobe	Felixstowe	Jebel Ali
16位	Valparaiso	Yokohama	Hamburg	Kobe	Piraeus	Hongkong	Valencia	Bremerhaven
17位	Buenaventura	Pugetsound	Houston	Bremerhaven	Baltimore	Liverpool	Genoa	Kristiansand
18位	Acajutla	Shimizu	Balboa	Norfolk	Portklang	Vancouver	Durban	Tanjung Pelepas
19位	Panama	London	Neworleans	Liverpool	London	Mumbai	Bilbao	Cartagena
20位	Bremen	Seattle	Norfolk	Boston	Houston	Bremen	Houston	Kingston

表-3 各時点の Model 4 における媒介中心性上位 20 港(1969–2016)

年度	1969_2	1971_1	1973	1975	1976	1981	2003	2016
1位	New York	New York	New York	New York	Rotterdam	Hamburg	Antwerp	Rotterdam
2位	Los Angeles	Los Angeles	Baltimore	Baltimore	Newyork	Rotterdam	Rotterdam	Antwerp
3位	Liverpool	Baltimore	Losangeles	Philadelphia	Neworleans	Antwerp	Singapore	Pusan
4位	Baltimore	Rotterdam	Houston	Neworleans	Baltimore	Leghorn	Hamburg	Hamburg
5位	Rotterdam	Portland	Philadelphia	Antwerp	Antwerp	Liverpool	Pusan	Singapore
6位	Antwerp	Philadelphia	Benghazi	Hongkong	Houston	Newyork	Hong Kong	Shanghai
7位	Portland	Seattle	Vancouver	Savannah	Lehavre	Houston	Bremerhaven	Bremerhaven
8位	Yokohama	Antwerp	Rotterdam	Charleston	Hamburg	Hongkong	Piraeus	Hong Kong
9位	Philadelphia	Vancouver	Seattle	Rotterdam	Philadelphia	Yokohama	Port Klang	Jebel Ali
10位	Hamburg	Liverpool	Norfolk	Houston	Vancouver	Lehavre	Felixstowe	Port Klang
11位	Norfolk	Kobe	Neworleans	Los Angeles	Liverpool	Singapore	Le Havre	Houston
12位	Montreal	Hamburg	Lehavre	Hamburg	Norfolk	Kobe	Seattle	Manzanillo
13位	Sanfrancisco	London	Portland	Lehavre	Kobe	Genoa	Yokohama	Qingdao
14位	Nagoya	Yokohama	Liverpool	Benghazi	Losangeles	Sydney	Barcelona	Kristiansand
15位	London	Balboa	London	Seattle	Leghorn	Baltimore	Miami	Genoa
16位	Hamptonroads	Sydney	Hongkong	Genoa	Charleston	Neworleans	Trieste	Le Havre
17位	Guayaquil	Melbourne	Kobe	Norfolk	Savannah	Oakland	Kaohsiung	Cartagena
18位	Buenaventura	Sanfrancisco	Hamburg	Singapore	Marseilles	Melbourne	Shanghai	Tanger Med
19位	Callao	Hamptonroads	Yokohama	Portland	Singapore	Sanfrancisco	Houston	Jeddah
20位	Kobe	Nagoya	Nagoya	Bremerhaven	Bremen	Vancouver	Genoa	Algeciras

4. 結果と考察

全体的な指標として、表-2 および表-3 に、各分析対象年の Model 1 および Model 4 における媒介中心性上位 20 港を示す。各色は世界の主要 3 地域を表しており、水色は北米、黄緑色は欧州、橙色は東アジアである。また図-4 に、各年の Model 1 におけるノード数やエッジ数、密度を示す。

以下では、(1)長期的なネットワーク構造の変化、(2)1970 年代を中心とした中期的な構造の変化、(3)1975 年のスエズ運河再開による影響に焦点を当てた分析を行う。

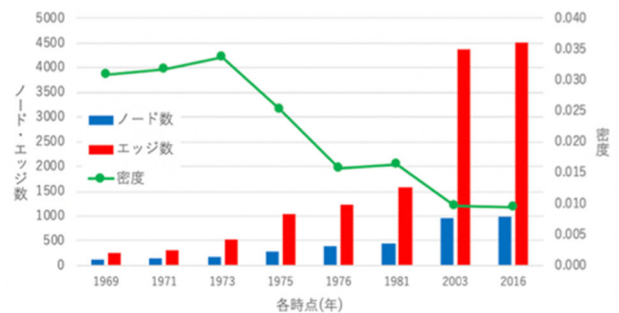


図-4 各時点の Model 1 におけるノード・エッジ数と密度 (1969–2016)

(1) 国際海上コンテナネットワークの長期的な構造変化

ここでは、1969年2月、1981年、2003年、2016年の4時点に着目し、ネットワークの長期的な変遷を分析する。図-5, 6, 7 はそれぞれ、1969年2月、1981年、2003年における Model 1 ネットワークを表す。

はじめに、Model 1 について、図-4 より、分析対象各年において、ノード数・エッジ数の単調な増加、および密度の長期的な低下を確認できた。次に図-5~7 および図-2 に示されたネットワークより、1969年における New York を代表とする北米港湾を中心とするネットワークが、1981年には複数の地域・港湾による多極構造へと変化し、さらに2003年以降は中小の港湾が地域のハブ港湾を中心にまとめ、地域間が比較的低い密度で接続されているという、いわゆるハブ&スポーク構造へと変化していることが確認できた。表-2 に示される Model 1 の媒介中心性上位 20 港をみても、1981年は1969年に比べ北米港湾だけでなく欧州港湾も中心的になり、東アジア港湾も増加するなど、多極化している。2003年になると、東アジア港湾の中心性が欧州港湾と同等になり、2016年にはその他地域の港湾の中心性の上昇が確認できる。

以上より、黎明期の米国一極集中的なネットワークが、1981年にかけて多様化し、最終的にはハブ&スポーク構造を形成していくと同時に、従来の主要地域の中心性が相対的に低下したという、長期的な構造変化が確認できた。

また表-4 に、Model 1~3 における主要 Community の数を示す。ただし、ここでは主要 Community とは、全体のうち 2%以上の港湾を占める Community として定義した。表より、Model 1, 3 に対する Model 2 の主要 Community 数が、1976年以後から徐々に大きくなり、Model 1, 3 においては2003年以後は主要 Community 数が減少する一方で、Model 2 においては変化がなく、その差が拡大している。これより、Model 2 において、輸送頻度をエッジの重みとすることで、大容量の基幹航路による結びつきと、低容量だが高頻度のフィーダー輸送を区別することで、さらに Community を詳細に分割することができたといえる。特に Model 2 において Community が増加しているのはアドリア海や北海沿岸などの欧州地域であり、欧州地域で基幹航路とフィーダー輸送網が密接に入り組んでいることが示唆される。

表-4 Model 1,2,3 における主要 Community 数の推移 (1969-2016)

	1969	1971	1973	1975	1976	1981	2003	2016
Model 1	9	9	8	9	9	10	7	8
Model 2	8	9	9	10	12	12	12	12
Model 3	7	7	8	10	11	11	8	9



図-5 1969年における Model 1 ネットワーク

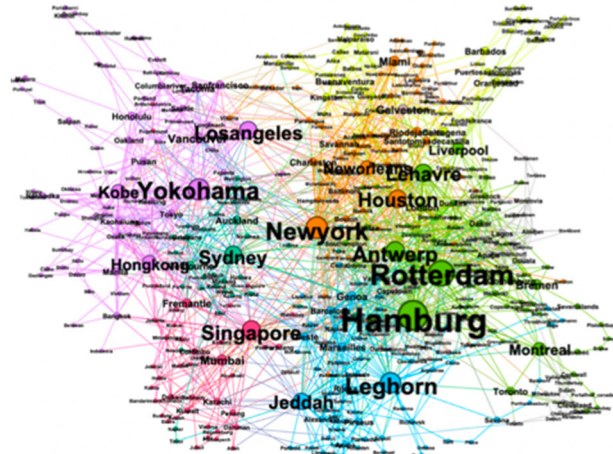


図-6 1981年における Model 1 ネットワーク

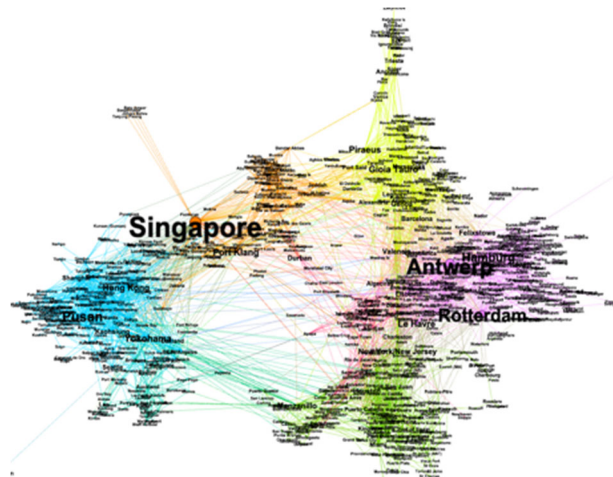


図-7 2003年における Model 1 ネットワーク

さらに、表-3 に示される Model 4 の媒介中心性上位 20 港湾をみると、表-2 に示される Model 1 と比較して、各地域における主要港の順位にはあまり変化が見られなかったものの、1970年代前半における北米など、地域単位での中心性の上昇が確認できた。これは、Model 4 において、同一の定期航路の巡回ルートに組み込まれやすい地域内の港湾が、サービス内全接続の結果、ほぼすべて等しく結ばれたことで、中心性の高い地域のいずれの港湾においても、最短経路内に存在するようになったためと考えら

れる。一方で、Singapore や Port Klang, Yokohama といった表-2 では有力な港湾が、表-3 では若干順位が下がっている事や、逆に Rotterdam など順位が上昇している港湾の存在も確認できた。これは、Model 1 は移動経路接続のみを表現するため、主要地域において地理的に必ず通る、あるいは先に通る港湾の中心性が高く設定される事が原因であると考えられる。これを踏まえると、Model 4 における順位が、Model 1 より上昇した中心性の高い港湾は、フィーダー輸送におけるいわゆるハブ港湾としての役割をより果たす港湾であると言える。以上より、Mode 4 を適用することで、フィーダー輸送網など、より国際海上コンテナ輸送に沿った概念における各港湾の重要性を確認できたと言える。

(2) 1970 年代に着目した中期的な構造分析

ここでは、1969 年 2 月～1981 年に着目し、主に 1970 年代の国際海上コンテナ輸送黎明期における、ネットワークの中期的な変遷を分析する。

以下では、Model 1 を使用し、図-8, 9, 10, 11 に、それぞれ 1971 年、1973 年、1975 年、1976 年におけるネットワークを示す。

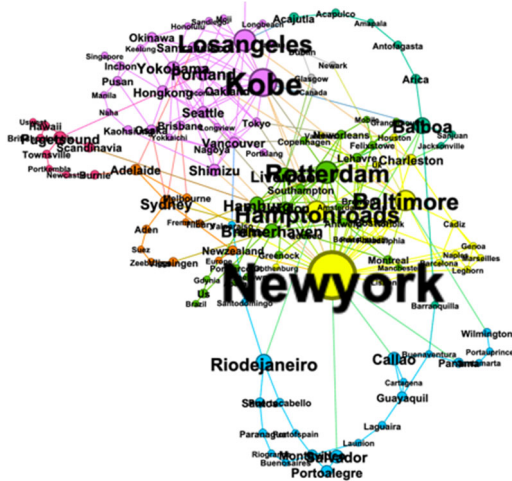


図-8 1971 年における Model 1 ネットワーク

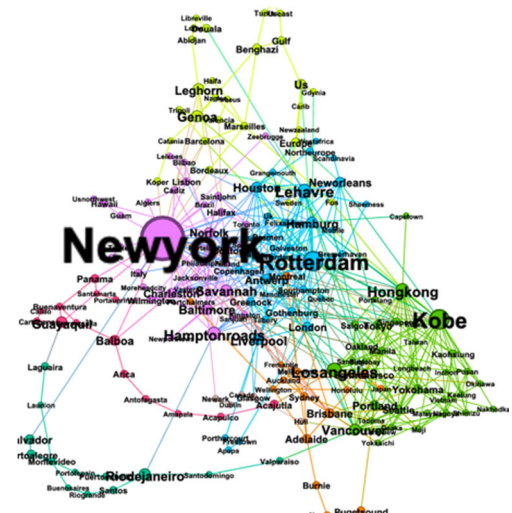


図-9 1973 年における Model 1 ネットワーク

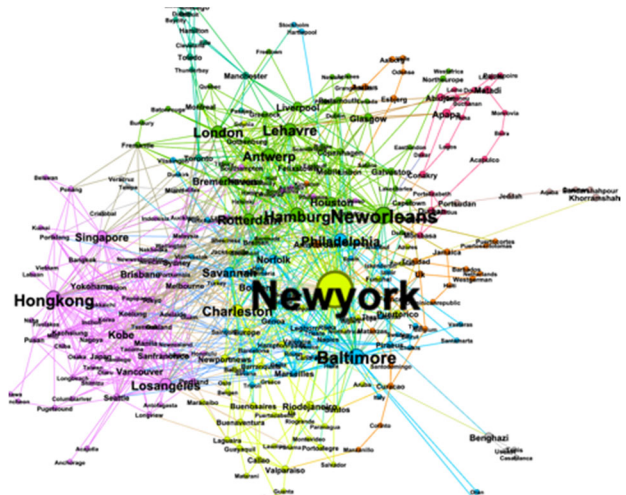


図-10 1975 年における Model 1 ネットワーク



図-11 1976 年における Model 1 ネットワーク

はじめに、図-4 より、ネットワーク密度が 1969 年から 1973 年まで微増した後、1981 年にかけて大きく低下したことが読み取れる。一方、図-5, 8~11, 6 のネットワークを見ると、1969 年～1973 年にかけて、New York を中心とした周辺地域のネットワークの拡充が確認できる。この周辺地域の拡充という傾向は 1976 年まで継続しており、北米以外の地域の港湾が増加している。そして 1981 年では、(1) で述べた通り、欧州や東アジア港湾の中心性が New York 等北米諸港と並び、多極構造になっている。

ここで、表-2 に示される媒介中心性上位 20 港をみると、1969 年～1975 年ごろまで高かった北米港湾の順位が、1976 年頃から徐々に下落し、代わりに欧州や極東港湾の順位が上昇している傾向も読み取れる。加えて、1981 年になると、欧州港湾が上位を占めるようになり、主要 3 地域の港湾が占める中心性の差が縮小する。これらは、ネットワーク図から読み取れた傾向と同様である。

この傾向は、図-12, 図-13 から読み取れる。図-12 は、1969 年から 1981 年における当時の主要な港湾の媒介中心性の値の推移を示している。

図-12 より、1969 年～1975 年において、主要港湾

の媒介中心性が低下傾向であったものが、1970 年代前半に他港と比べて媒介中心性が極めて高かった New York を除けば、1976 年において若干改善し、1981 年でもその状態が維持されたことが確認できる。なお、New York については、1973 年に若干回復したのを除くと下落を続けており、1970 年代を通じて常に最も高い中心性を持っていた一方で、相対的に中心性を落とし続けていたことがわかる。

図-13 は、1969 年から 1981 年における世界各地域に含まれるコンテナ港湾数を表している。図より、1975 年頃から、主要 3 地域 (欧州・北米・東アジア) 以外の、中東や地中海などの港湾数が、相対的に増加していることがわかる。

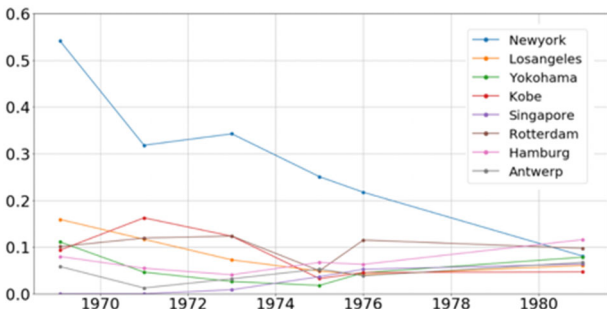


図-12 主要港湾における媒介中心性の推移(1969-1981)

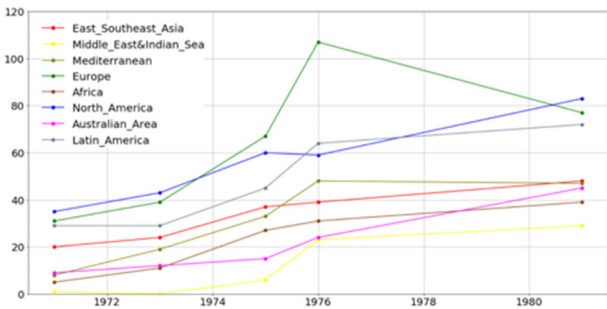


図-13 地域別のコンテナ港湾数の推移(1969-1981)

以上より、本節の Model 1 を用いた分析全体を通して、1969 年頃の北米中心的なネットワーク構造が、1981 年までに徐々に主要 3 地域による多極的な構造へと変化したことが確認できた。同時に、1975 年頃までは主要港湾の媒介中心性が一律に低下した一方で、以後は発展途上地域の港湾数増加と New York を除く主要港湾の中心性の若干の回復という傾向が確認できた。

この原因として、まず日本郵船資料¹⁾にも記述されるように、1973 年頃までに主要地域間を結ぶ基幹航路のコンテナ化 (在来船からの転換) が進み、その後 1975 年頃からフィーダー輸送網の拡大期に入ったという事象が挙げられる。すなわち、基幹航路の置き換えによる航路の多様化が 1975 年頃までの主要港湾の中心性の低下を起こした一方で、フィーダー輸送網の拡充により、発展途上地域の新規港湾が主要港湾に接続されたことで、以後の発展途上地域の港湾数増加と一部の主要港 (Rotterdam, Yokohama, Kobe) における中心性の再上昇が起きたと考えられる。さらに、その他の変化の原因として、

1975 年におけるスエズ運河再開の影響が考えられ、これについては(3)で検証することとする。

加えて、Model 4 を使用した分析も実施したところ、Model 1 を適用した分析とおおむね同様の傾向が得られた。

(3) スエズ運河再開 (1975 年) の影響

1967 年の第三次中東戦争の勃発以来、散発的な衝突や機雷の敷設のために、スエズ運河は約 8 年にわたり封鎖されていた。封鎖期間中は、欧州～中東・アジア地域間の海上輸送は、アフリカ大陸南端の喜望峰を経由するという長距離の迂回を余儀なくされていた。この状況が解消したのは、第四次中東戦争後の 1975 年中盤に、米軍の掃海作業が終了してからである。これにより、欧州と極東という当時の主要地域間の海上輸送距離が大幅に短縮された。本節では、このスエズ運河再開による国際海上コンテナ輸送ネットワークへの影響を考察する。なお、スエズ運河封鎖前の 1967 年以前は、世界的にみれば国際海上コンテナ輸送がほとんど普及していなかったため、封鎖以前と以後のネットワークの比較は困難であることに留意されたい。

はじめに、図-10, 11 に示す 1975 年と 1976 年の Model 1 ネットワークからは、大きな変化は確認できなかった。そこで、地域間および地域内の密度に注目し、図-14 に Model 1 における 1969 年から 1976 年の主要地域の地域間密度の推移を、図-15 に主要地域の地域内密度の推移を示す。

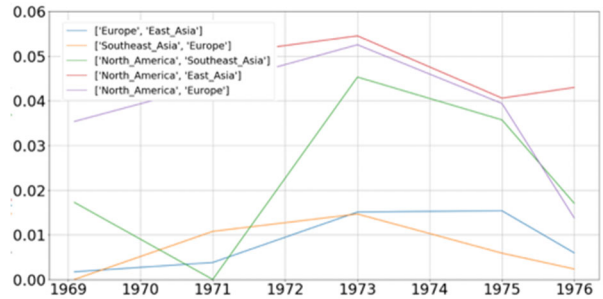


図-14 主要地域における地域間密度の推移(1969-1976)

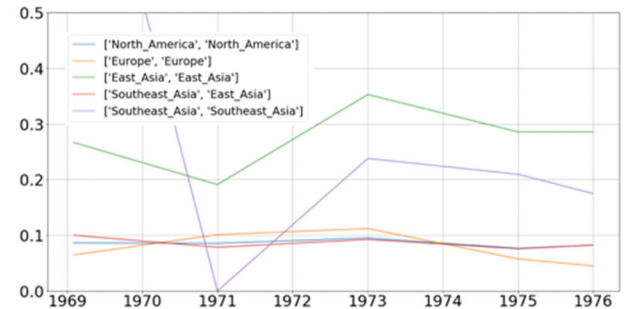


図-15 主要地域における地域内密度の推移(1969-1976)

図-14 において、北米・東アジア間を除いた地域間密度は急落しており、有意な密度変化の乖離が確認できた。一方で、図-15 に示す地域内密度は 1975 年から 1976 年であまり変化がない。すなわち、1975 年から 1976 年にかけて、地域内密度は保たれたま



図-16 スエズ運河再開の影響分析における地域区分と港湾

ま、地域間密度が疎になる変化が生じたと言える。

これらの 1975 年から 1976 年の非連続的变化は、スエズ運河再開によって生じた定期航路における変化が影響している可能性が推測される。ここで、Model 1~3 を適用し各地域の港湾を分析した場合、近隣港湾等との接続のみが対象となることから、定期航路全体に起きた変化や定期航路における各港湾の重要性は判断できない。よって、定期航路の分析に適した Model 4~6 を適用して、スエズ運河との位置関係および港湾の規模に応じて関連しうる港湾を 6 つのグループに分類し、グループごとに定期航路における影響をみた。図-16 に、港湾グループの区分を示す。

以下では、代表例として、図-16 のグループ 4 の紅海・インド洋港湾に含まれる Jeddah 港の分析結果を示す。図-17, 18, 19 は Model 4, 5, 6 における Jeddah 港の接続港湾数または重み付き接続港湾数とその地域比率を表している。

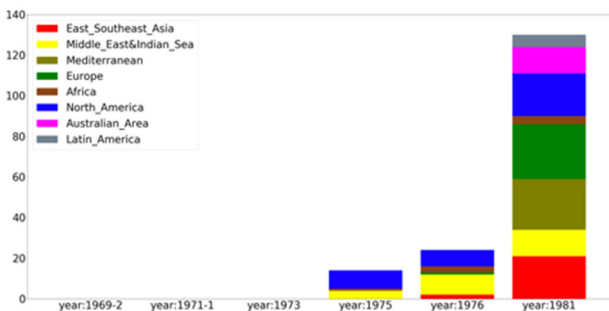


図-17 Model 4 における Jeddah 港の接続港湾数と地域比率(1969-1981)

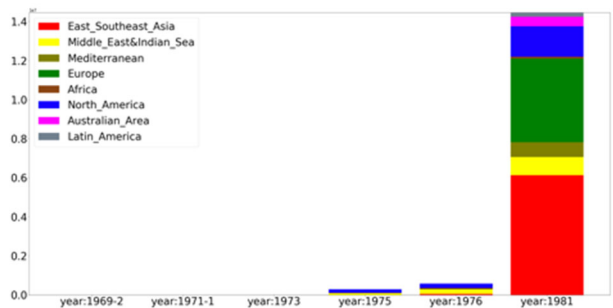


図-18 Model 5 における Jeddah 港の重み付き接続港湾数と地域比率(1969-1981)

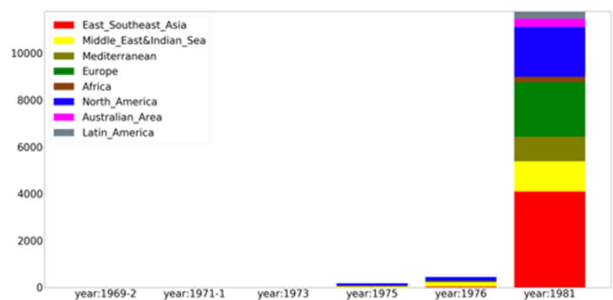


図-19 Model 6 における Jeddah 港の重み付き接続港湾数と地域比率(1969-1981)

図-17 に示す Model 4 においては、スエズ運河再開直後である 1976 年には大きな変化が見られない一方、1981 年にはサービス内接続港湾数が大きく増加しており、欧州や東アジアの港湾との接続も大きく増加している。また、図-18, 19 においても、1975, 1976 年の接続港湾数が少ないことから、それらの時点における輸送サービスが低容量低頻度であったと推測できる。

他の地域についても同様の分析を行ったところ、

グループ 1 の地中海小規模スエズ運河直近港を除けば、上記の Jeddah 港と同様に、スエズ運河再開直後である 1976 年において、接続港湾数の大きな変化が生じた港湾は確認できなかった。また、地中海小規模スエズ運河直近港においても、欧州方面港湾への接続の増加にとどまり、スエズ以東への新たな接続がみられなかったことから、一概にスエズ運河再開の影響とは言えない。また、グループ 6 の喜望峰周辺港湾においては、1976 年に東アジア方面との接続が消え、輸送容量及び頻度が大きく減少した。

一方で、1981 年においては、上述の Jeffah 港のような中東港湾における接続の非常な増加に加え、欧州＝東アジア間を接続する基幹航路における船舶の大型化も確認できた。

以上の分析では、Model 1 において特に図-14 で確認された、地域間接続の密度における 1975～1976 年間の非連続的な変化を説明できない。そこで、スエズ運河再開の影響を大きく受けていると考えられる、欧州＝東アジア間基幹航路に着目する。図-20 は、1969 年 2 月～1976 年における、定期航路全体、欧州＝東アジア間を接続する基幹航路、欧州アジア内部の定期航路のそれぞれの一航路あたり平均寄港地数の推移を表している。

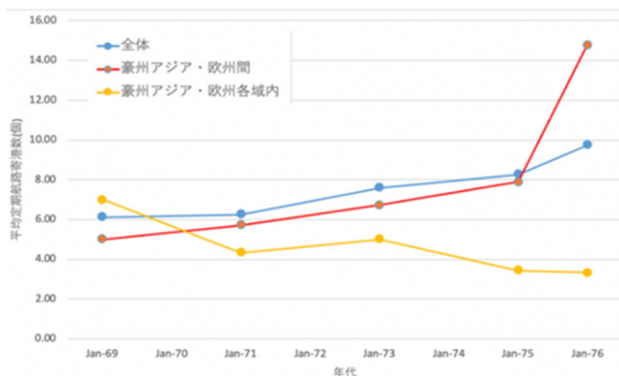


図-20 一航路あたり平均寄港地数の推移(1969-1976)

図-20 より、欧州＝東アジア間基幹航路の一航路あたり平均寄港地数が、1976 年に急激に上昇していることがわかる。この急増は、基幹航路の途中にある中東・南インドのコンテナ港湾がこの時点で未発達であったことを踏まえ、東アジアおよび東南アジア、欧州域内での寄港が増加したことを意味している。これにより、各地域における寄港地数が増加し、各地域におけるファーストポートとラストポートが地理的に限定されたことで、地域間密度が地域内密度に対して下落したと考えられる。

ここで、日本郵船資料¹⁾1976 年版において、1975 年の国際海上コンテナ輸送について、「74 年に続く不況の長期化によって、75 年のコンテナ貨物輸送量は、(中略)少なくとも約 20%前後の減少となっている。」(p.2)との記述や、当時の Maersk 社による定期航路の寄港地数が増加したこと、加えて、スエズ運河再開による移動時間の短縮によってコンテナ船の余剰が予想されることの記述が確認できた。以

上より、1976 年における平均寄港地数の増加は、第一次オイルショックに伴う世界的な不景気とスエズ運河の再開によって、貨物需要の減少や船舶の余剰傾向を原因とする消席率減少の解消を目的として、定期航路の再編が生じた結果であると推定された。

5. 結論

本研究は、1970 年代を中心に現在までの国際海上コンテナ輸送網を対象に、グラフ理論に基づくネットワーク分析手法を適用した。それにより、コンテナ黎明期における米国一極集中的なネットワークが、1980 年頃には多極化した構造となり、最終的に現在に至るハブ&スポーク構造へと変化した長期的な知見を得られた。また、コンテナ輸送の定期航路による運航体制や頻度、輸送容量に着目したモデルを使用することで、ハブ&スポーク輸送網における各港湾の重要性の確認や、基幹航路とフィーダー輸送網のネットワーク上での識別などを行った。

さらに、1970 年代に着目することで、前半は基幹航路の置き換えが行われ、後半はフィーダー輸送網が発達するといった輸送網の変化の経緯や、フィーダー輸送網の発達などによる中心地域に対する周辺地域のコンテナネットワークの発達などの現象を、日本郵船資料の記述によって得られた当時の状況も踏まえ、詳細に検討した。加えて、1975 年のスエズ運河再開に着目し、再開前後のデータについて詳細に検討した結果、1975 年から 1976 年において、地域間密度において非連続的な変化が生じており、それとスエズ運河再開に一定の因果関係を求められることを、定量的・定性的な議論から推測した。

以上の結果が得られた一方で、本研究においては、データ精度の観点から、1970 年代後半においてより短い時間間隔で分析が行えず、またハブ&スポーク構造への変化が生じたとされる 1980 年代の分析も行わなかった。よって今後は、より長い時間軸の網羅性の高いデータを使用することで詳細かつ多角的な分析を実施していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本郵船株式会社調査室，最近の世界コンテナ船就航状況，1969 年 2 月～1977 年。
- 2) 日本郵船株式会社調査室，世界のコンテナ船隊および就航状況，1978 年～1995 年。
- 3) Bhattacharya, K., G. Mukherjee, J. Saramaki, K. Kaski, S. S. Manna. The international trade network: Weighted network analysis and modelling, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P02002, 2008.
- 4) Ducruet, C., T. Notteboom, The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics, *Global Networks*, 12, 395-423, 2012.
- 5) Pan, J., M. Bell, K. Cheung, S. Perera, H. Yu. Connectivity analysis of the global shipping network by eigenvalue decomposition. *Maritime Policy & Management*, online
- 6) Kawasaki, T., S. Hanaoka, J. Yiting, T. Matsuda.

- Evaluation of port position for intra-Asia maritime network, *Asian Transport Study*, 4(5), 570–583, 2019.
- 7) Wu, D., N. Wang, A. Yu, N. Wu. Vulnerability analysis of global container shipping liner network based on main channel disruption. *Maritime Policy and Management*, 46, 394–409, 2019.
 - 8) Stergiopoulos, G., E. Valvis, D. Mitrodimas, D. Lekkas, D. Gritzalis. Analyzing Congestion Interdependencies of Ports and Container Ship Routes in the Maritime Network Infrastructure, *IEEE Access*, 6, 63823–63832, 2018.
 - 9) Ducruet, C. Multilayer dynamics of complex spatial networks: The case of global maritime flows (1977–2008), *Journal of Transport Geography*, 60, 47–58, 2017.
 - 10) Rousset, L., C. Ducruet. Disruptions in Spatial Networks: a Comparative Study of Major Shocks Affecting Ports and Shipping Patterns, *Networks and Spatial Economics*, online. DOI: 10.1007/s11067-019-09482-5
 - 11) MDS Transmodal Ltd. MDS Containership Databank, August 2016
 - 12) Newman, M. E. J., M. Girvan. Finding and evaluating community structure in networks, *Physics Review E*, 69, 39–54, 2004.
- (2020. 3. 8 受付)

Evolution Process of Global Maritime Container Shipping Network: Focusing on 1970s

Tomohiro Saito, Ryuichi Shibasaki

In this paper, the authors conducted an empirical analysis on the evolution process of the global maritime container shipping networks, mainly in 1970s, by applying the graph theory. In addition to analyzing the change in overall structures of the networks for long term (from 1970s to the present), the authors examined the impact of the recommencement of the Suez Canal in 1975 on the container shipping network. As a result, the authors confirmed that the network structure, where the North American ports such as New York were originally placed on the center of the network, had changed to the multipolar structure, then finally formed the hub-and-spoke structure. In addition, the authors verified the impact of the Suez Canal resumption by confirming the effects such as the increase of the average number of ports of call in 1976 and investigating the causes.