複雑ネットワーク理論を用いた
海上輸送ネットワークの最適化手法に関する研究

学生会員　和田　祐次郎（広島大学）　正会員○濱田　邦裕（広島大学）
正会員　平田　法隆　（広島大学）　非会員　城塚　弓絵（広島大学）（研究時）

要旨
近年の世界経済の急速な発展による国家間の貨物輸送量増加のため、港湾航路網の輸送ネットワークが複雑化している。本研究では、複雑ネットワーク理論を用いて海上輸送ネットワークの設計を行い、ネットワークの特性と輸送コストを考慮したネットワークの最適化手法の提案を目的とする。
キーワード：物流・海運、海上輸送ネットワーク、最適化、複雑ネットワーク理論、遺伝的アルゴリズム

1. 諸言

近年、発展途上諸国の急速な経済発展により、国家間の貨物輸送量が増加し、港湾航路網の輸送ネットワークが複雑化している。そのため、輸送コストの削減を主目的とした貨物輸送の効率化のための航路編成手法やネットワーク設計手法に関する研究[1]が行われている。本研究では、これまでの研究を参考に、複雑ネットワーク理論を用いて、現実世界のネットワークが持つ特性と輸送コストを考慮した海上輸送ネットワークの最適化手法を提案する。

2. 複雑ネットワーク理論の概要

現実のネットワークは、下記に示す 3 つの特性を有する。これらの現実のネットワークの特性を考慮しつつ、ネットワーク構造やその特徴を研究する学問が複雑ネットワーク理論である[2]。本研究では、以下のネットワークの特性を考慮した海上輸送ネットワークの最適化手法を提案する。

- スケールフリー性：一部のノード(港湾)のみが多数のエッジ数(次数)を持つ一方で、大多数のノードは少数の次数しか持たない性質で、その次数はべき乗則に比例する。
- スモールワールド性：あるノードから別のノードへ辿る際、中間にわずかな数のノードを介するだけでどのようなノードにも辿ることができる性質である。式(1)に示すノード間(港湾間)の最短平均移動距離 D により評価される。
- クラスター性：ネットワーク全体がどの程度密に接続しているかを示す指標で、3 つのノードを結ぶことによりできる三角形を 1 クラスターと定義する。式(2)に示すクラスター係数 C により評価される。

$$D = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} D_{ij} \quad (i \neq j) \tag{1}$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \tag{2}$$

ここに、D：最短平均移動距離(mile)、n：港湾の総数、D_{ij}：港湾 i から j への最短移動距離(mile)、C：クラスター係数、E_i：港湾 i のクラスター数、k_i：港湾 i の次数。

3. 本研究の基本方針

3.1　最適化問題としての定式化

合理的かつ効率的に輸送が行えるネットワークであることに加えて、現行のネットワーク構造に近く実現性が高いネットワークの構築を行う。そこで、ネットワーク設計をネットワーク特性量の評価とコスト評価に基づく多目標最適化問題として定式化する。この実現のために、ネットワークの構造を決定する上位問題と、荷物の流動経路と実流動量から港湾間を就航する船舶サイズを決定する下位問題の二階層の最適化問題として定義する。本研究における最適化の概念図を図 1 に示す。

3.2　上位問題の概要

文献(3)を参考に、上位問題では多目標性と局所解の回避性を考慮して NSGA2[4]と MGG[5]を用いてネットワーク構造の最適化を行う。

目的関数は総コストの最小化とネットワーク特性量の最小化であるが、同一のネットワークであっても荷物の動きによって、これらの値は変化する。

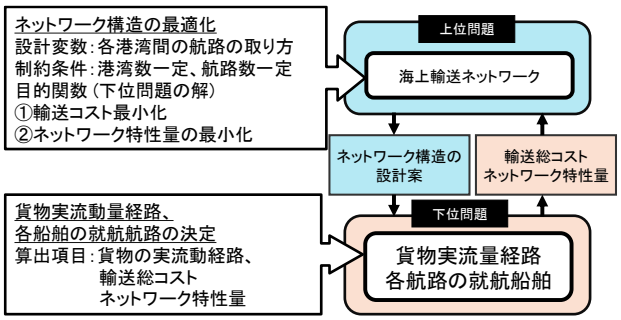

図 1 多目標最適化問題としての定式化

このため 3.3 節に示す下位問題の計算を行い、下位問題で得られた解の値を上位問題における目的関数として利用する。総コストの算出は文献(1)を参考にした。ネットワーク特性量は文献(3)を参考に、最短平均移動距離 D とクラスター係数 C を正規化した後、その和を取ることにより算出した。

3.3 下位問題の概要

下位問題では、上位問題で生成された設計案を基に、以下の流れで総コストとネットワーク特性量を算出する。

(1) ダイクストラ法[6]を用いて各港湾間の最短経路を求め、すべての港湾で荷物の積み替えを行うものとして、最短経路上の荷物の実流動量を求める。
(2) 上記(1)で求めた荷物の実流動量と表 1 を基に各港湾間の船舶を決定し、目的関数を算出する。

表 1 港湾間の年間コンテナ流動と就航船舶サイズ

港湾間の年間コンテナ流動量	就航船舶サイズ
109200TEU未満	1500TEU
109200TEU 以上 218400TEU未満	3000TEU
218400TEU 以上	6000TEU

4. ネットワーク設計への適用

構築したネットワーク最適化手法の有効性を確かめるために、応用例として東アジア圏のコンテナ輸送に適用した。比較対象は以下の 3 種類である。なお Case 1 は文献(1)を参考にした。

Case 1：黒川らの海上輸送ネットワーク設計結果
Case 2：単一目標最適化(輸送コスト最小化)
Case 3：多目標最適化（本研究の手法）

図 2 に各々の最適化結果と、そのネットワーク構造を示す。本研究の手法で生成されたネットワーク(Case 3)は、黒川らの結果(Case 1)と同程度のクラスター係数を維持し、最短平均移動距離、コストが改善されたことが分かる。

ネットワーク	Case1	Case2	**Case3**
クラスター係数(-)	0.87	0.58	**0.87**
最短平均距離(mile)	3260	2980	**3200**
コスト(兆円)	3.00	2.70	**2.70**

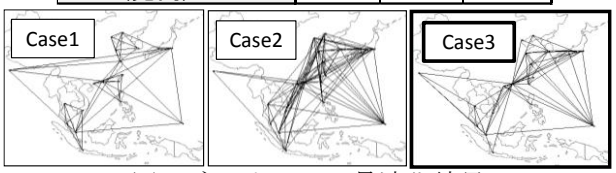

図 2 ネットワーク最適化結果

また Case 3 と従来の最適化（Case 2）を比較した場合、Case 3 はコストを同程度に維持しながら、クラスター係数が改善されたことが分かる。なお、最短平均移動距離は Case 2 の方が小さい値となる。

5. 結言

本研究では、複雑ネットワーク理論を用いた海上輸送ネットワークの最適化手法について検討し、輸送コストとネットワーク特性量による多目標最適化問題として定式化した。最適化の結果、現実のネットワークが持つ特性を考慮したネットワークの最適化が可能となり、ネットワーク設計に複雑ネットワーク理論を用いることの有効性を示した。

参考文献

(1) 黒川 他：海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究-東・東南アジアを中心として-, 日本航海学会論文集, 第 101 号, pp.259-269, 1999.
(2) Watts, D.J. : Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness. Princeton university press, 1999.
(3) 花田 他：遺伝的アルゴリズムによるネットワーク特性量に着目したネットワーク設計法,コンピュータソフトウェア, Vol.24, No. 1, pp.91-100, 2007.
(4) Deb, K. et.al : Evolutionary multi-criterion optimization, Evolutionary algorithms in engineering and computer science, pp.135-162, 1999.
(5) 佐藤 他：遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp.734-743, 1996.
(6) 伊里 他：ネットワーク理論, pp.34-37, 日科技連出版社, 1976.