ネットワーク構造から見た 静脈資源貿易に係る社会システムの課題

杉村 佳寿¹・青木渉一郎²・村上 進亮²

¹正会員 東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:sugimura.envsys@gmail.com

²非会員 東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:sir.92.ak@gmail.com

世界各国の経済成熟度が異なるままにグローバル化が進んだ現在、資源生産性の最大化のためには国際資源循環は重要な鍵となる。静脈資源は経済成熟度や工業発展度により各国内での供給量や需要量に変化するため、それらを調整する形で世界全体の貿易需給バランスが決定されるほか、低い運賃負担力により価格と輸送コスト次第では経済的に優位となる埋立処分が選択される可能性もある。すなわち、世界全体の需給バランスと輸出可能相手国次第では、我が国の国際資源循環は進展しなくなる可能性もある。

本研究では、1992年と2012年の静脈資源貿易ネットワークからその構造的な特徴や中心性の高い国の変化を明らかにし、得られる指標から我が国の国際資源循環の状況・特徴を相対的に評価する。さらに、得られる指標等を踏まえ、静脈資源貿易に係る社会システムの課題を明らかにする。

Key Words : *recyclable resource, ,trade network, social network analysis, social system*

1. はじめに

20 世紀の経済成長は天然資源の採取・消費の増加や環境劣化と密接に結び付いてきたが、この課題を踏まえ、国際的にもデカップリングが注目されている¹⁾。この問題の議論のために一般的に使われる指標が資源生産性であるが²⁾、各国の経済成熟度に差があるままグローバル化が進んだ現在、その最大化のためには効率的な国際資源循環の推進が重要な鍵となる。我が国の国際資源循環に対するスタンスとしては、第二次循環型社会推進基本計画で「各国内での循環利用を補完するもの」とされていたものが、第三次計画では「国際的な循環資源の移動が環境負荷の低減や資源の有効利用に資する場合には、国際的な移動の円滑化を図ることが重要」とされるなど、理念的には相対的に促進する方向へ変化している。

循環資源とは、循環型社会形成推進基本法（平成 12 年法律第 110 号）で「廃棄物等のうち有用なもの」と定義されている。しかし、埋立処分されるものまでを循環資源と呼ぶのは違和感がある。細田³⁾は「使用済み製品・部品・素材を静脈資源と呼ぶ。静脈資源に一定の処理が施され、付加価値が生じるとしそれらが再生資源となる」としているが、本研究ではこれに従い、「循環資

源」ではなく「静脈資源」という用語で統一する。

静脈資源は経済成熟度や工業発展度により各国内での供給量や需要量に変化するため、それらを調整する形で世界全体の貿易需給バランスが決定される。事実、我が国も経済成長に伴い、鉄スクラップや銅スクラップの貿易は輸入超過から輸出超過へと変化している。さらに、静脈資源は運賃負担力が低いため⁴⁾、価格と輸送コスト次第では経済的に優位となる埋立処分が選択される可能性もある。このように、世界全体の需給バランスと輸出可能相手国次第では、我が国の国際資源循環は進展しなくなる可能性もある。

静脈資源の貿易に関しては、絶対量が増加傾向であることを前置した上で、その潜在汚染性に着目した環境面での課題を論じた研究が多く蓄積されている（寺園⁵⁾など）。静脈資源の貿易構造に着目した先行研究としては、橋⁶⁾が鉄スクラップの貿易構造について、所得水準と工業化路線から世界各国を 4 つのカテゴリーに分類し、それぞれが輸入と輸出のいずれに特化しているかを明らかにしている。国際的な流動のネットワーク構造をマクロに評価する先行研究としては、国際航空ネットワーク構造から得られる連結性やネットワーク性指標からネットワークの中心や連結体系を評価したもの⁷⁾や、

効率性と代替性の間のバランスとしての頑健性指標により動脈資源 6 品目の貿易ネットワーク全体を評価したものの⁸⁾などがある。しかし、静脈資源の貿易ネットワーク構造を全体として評価するもの、あるいはそこから我が国の国際資源循環の状況を相対的に評価した先行研究は存在しない。

本研究の目的は、ネットワークの構造的特徴をマクロな視点から分析する手法である社会ネットワーク分析⁹⁾¹⁰⁾により、静脈資源貿易ネットワークの構造的な特徴や中心性の高い国の経年変化を明らかにし、得られる指標等から我が国の国際資源循環の状況・特徴を相対的に評価することにある。さらに、それを踏まえて関連する社会のシステムの課題を明らかにする。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章では分析方法と結果を示し、第 3 章で社会システムの課題を述べる。第 4 章は本研究のまとめである。

2. 社会ネットワーク分析による静脈資源貿易ネットワークの評価

(1) 使用データ

まず、我が国の静脈資源の貿易状況を港湾統計から概観すると、輸出が殆どとなっている。輸出の経年変化を図-1 に示すが、再使用資源が最も多く、次に金属くずであり、この 2 品目で大宗を占める。

出所：港湾統計

図-1 我が国の静脈資源の輸出状況

社会ネットワーク分析により貿易ネットワークを評価する場合、使用データが問題となる。例えば、海上輸送の詳細なデータを提供するLloyd'sデータ¹¹⁾の場合、船種毎船型毎の寄港実績から港湾間流動が把握できるため、輸送ルートを含む詳細なネットワーク構造が表現できる。しかし品目毎の輸送量や積み卸し量は把握できないため、港湾をノードとした品目毎の重み付きグラフの作成には至らない。さらに、静脈資源の輸送モードは船舶だけに限らず、網羅性に問題がある。一方で、貿易統計では輸送モードは限定されないため品目毎の貿易量を網羅的に把握できるが、純流動であるため経由地が把握できず

¹²⁾、輸送ルートを考慮しない国と国との繋がりに重点を置いたネットワークとして表現される。

ここで、Lloyd'sデータを用いて、コンテナ船、バルク船、タンカーの寄港実績から港湾をノードとした社会ネットワーク分析を実施しているKaluza et al.¹³⁾を参考にすると、海上輸送ネットワークは航空ネットワークと比較して低い平均最短経路距離、高い次数である密なネットワークであり、特にバルク船でその特徴が強いことが示されている。このことから、静脈資源の海上輸送に用いられることの多いバルク船¹⁴⁾のネットワークは、最終目的地への直行リンクが多く、輸送ルートを加味した港湾間流動データでも事実上国間流動データとネットワーク構造に近いことが示唆されている。

このように海上輸送を中心に行われる静脈資源貿易では直行リンクが多く輸送ルートがネットワーク構造に大きな影響を及ぼさないと考えられることから、本研究では使用データとして、品目毎の分析が可能で大半の国連加盟国の貿易統計データが収録されたUnited Nations Commodity Trade Statics Databaseを用いることとした。分析の対象としては、我が国の代表的な静脈資源である鉄スクラップ (HSコード7204)、銅スクラップ (HSコード7404)、廃プラスチック (HSコード3915) とした。また、外的要因がネットワーク構造に与えた影響ではなく、ネットワーク構造の経年による変化を見ることを目的とするため、各国統計を網羅的に入手出来る最新年である2012年と、これまでの世界経済の情勢変化等から見て静脈資源貿易構造が現在とは異なっていたと考えられる1992年の2断面の分析とする。なお、本来であれば輸出データと輸入データのいずれを用いても作成される隣接行列は同一になるべきであるが、輸出国と輸入国で別のHSコードを用いる場合があるなど実際には一致しない¹²⁾。我が国の静脈資源貿易が輸出超過であることを踏まえて、本研究では輸出データを用いて分析を行う。

(2) 分析方法

本研究では、静脈資源貿易ネットワークの構造的特徴と中心性指標について計測する。静脈資源貿易ネットワークを、国をノードとする有向グラフとして捉え、構造的な特徴としてノード数、リンク数、グラフ密度、平均クラスター係数を測定し、モジュラリティ指標を用いてクラスタリングも行う。また、ネットワーク構造上の中心性指標として次数中心性の他にPageRankを測定する。各指標の目的と特徴を表-1に示す。

グラフ密度 d 、平均クラスター係数 X は以下のとおり表され、クラスタリングは以下の式で表されるモジュラリティ Q が最大となるように行われる。また、PageRankは以下の式で表される行列 M の第一固有ベクトルとして計算される。

表-1 各指標の目的と特徴

指標	目的	特徴
ノード数	貿易ネットワークを構成している国の数であり、ネットワークの規模の大きさを示す指標。	直接繋がっているノードを隣接ノードと呼び、貿易相手国を表す。貿易量の大小は考慮されない。
リンク数	ネットワークを構成する国同士が貿易を行っている数を示す指標。国の数との比較の中でネットワークの疎密を示すことにもなる指標。	有向グラフの場合リンクの向きがノード間の関係を表し、本研究ではリンクの向きに輸出されることとしている。
グラフ密度	ネットワーク内の国同士がどれだけ貿易しているかを表し、ネットワーク全体の疎密や貿易相手の代替性の高さ、すなわち頑健性を示す指標。	すべてのノード間に辺のある完全グラフで最大値1、辺が全く存在しない空グラフで最小値0となる。
平均クラスター係数	ネットワーク全体の凝集性を表すため、ある国の貿易相手国同士が貿易を行っている割合を示すと同時に潜在的な貿易相手国とも言える構造的空隙の割合も示す指標。	0から1の間の値をとり、大きい程あるノードに隣接しているノード間にも密なリンクが存在するネットワークとなる。0.3~0.7ならクラスター性が高いと言われる。
モジュラリティ指標	ネットワーク内部のより密度の高い部分構造であるコミュニティに分割する方法であるクラスタリングにおいて、ネットワーク全体の分割の質を表す指標。	数値が大きいほど高い質で分割されていることを表し、0.3より大きければ、そのネットワークはコミュニティ構造を持つと見なせる。
次数中心性	ある国がネットワーク内で貿易を行っている相手国の多寡によりその国のネットワークにおける重要性を評価する指標。	最も基本的な中心性指標で、あるノードの次数(張られているリンクの数)であり、大きい程中心性が高いことになる。ただし、リンクの重みは考慮されない。
PageRank	ある国の重要性の高い国との繋がりを重視する中心性指標であり、その国のネットワークで中心的役割を果たしている国々との繋がりが具合から重要性を評価する指標。	値が大きい程中心性が高く、出次数よりも入次数と高い相関を持つと言われている。このことは本研究の場合、輸入国が高く評価されることを意味する。

$$d = \frac{m}{n(n-1)} \quad (1)$$

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

$$Q = \sum_p (e_{pp} - a_p^2) \quad (3)$$

$$M' = cM + (1-c) \left[\frac{1}{n} \right]_{n \times n} \quad (4)$$

ただし、 n : 全ノード数、 m : 全リンク数、 k_i : ノード i に近接するノード数、 m_i : 近接するノード間のリンク数、 e_{pp} : コミュニティ p に属するノード間のリンク数の全リンク数に占める割合、 a_p : コミュニティ p に属するノードに繋がるリンク数の全リンク数に占める割合の期待値、 M : 推移確率行列、 c : グラフを強連結にするためのパラメータ (通常0.85)、 $[1/n]_{n \times n}$: 要素が $1/n$ の $n \times n$ の正方行列である。

さらに、量的な要素も加えた静脈資源貿易ネットワークにおける中心性を見るため、二国間の貿易量による重み付き無向グラフとして捉え、Lee⁷⁾の方法により局所中心性、ネットワーク性を測定し、ネットワーク距離から重要リンクの特定を行う。 i 国の局所中心性 L_i 、 i 国と j 国の連結性 C_{ij} 、ネットワーク性 N_i 、ネットワーク距離 d_{ij} は以下のように表される。

$$L_i = \frac{l_i}{n-1} \times \sqrt{\frac{F_i}{T_n}} \quad (5)$$

$$C_{ij} = \frac{f_{ij}}{t} \times L_i \times L_j \quad (6)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad (7)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{\sqrt{C_{ij}/C_{\max}}} \quad (8)$$

ただし、 l_i : ノード i に繋がるリンク数、 T_n : 全てのノードの平均貿易量、 F_i : ノード i の貿易量、 t : 全てのリンクの平均貿易量、 f_{ij} : ノード i とノード j の間の貿易量、 $C_{\max}$: C_{ij} の最大値である。

このように、局所中心性はその国の次数中心性と相対的な貿易量の大きさの積であり、連結性は二つの国の局所中心性とその間の貿易量で表され、ネットワーク性は全貿易相手国との連結性の合計となる。また、ネットワーク距離が短いほど、二国間の関係は強いことを示す。

(3) 分析結果

まず視覚的に理解するために、1992年と2012年の鉄スクラップについて、貿易量をノードの大きさで表したネットワークを図-2、図-3に示す。これらの図では、クラスタリングにより分割されたコミュニティ毎にノードの色を変えている。

ネットワーク全体の構造的な特徴の変化を評価するための指標を表-2に示す。いずれの品目についてもノード数、リンク数が増加していることから、ネットワークの規模が増大し、より複雑化していることになるが、これには使用データにおける捕捉率上昇の影響も含まれている。グラフ密度は上昇しており、より密で代替性の高いネットワークとなっている。平均クラスター係数が高くなっていることから、それぞれの貿易相手国同士の関係性が高まっており、構造的な空隙は小さくなっている。2012年の鉄スクラップや1992年の銅スクラップでは大きなモジュラリティとなっており、効果的に貿易コミュニティに分割されている。それ以外でもモジュラリティ指標から見るとある程度有意に分割されている。

表-2 ネットワーク構造の各指標

	鉄スクラップ		銅スクラップ		廃プラスチック	
	1992	2012	1992	2012	1992	2012
貿易量(千t)	22,987	102,126	1,215	5,745	684	14,665
ノード数	112	175	85	141	104	178
リンク数	498	2,094	440	1,361	443	1,942
グラフ密度	0.040	0.069	0.062	0.069	0.041	0.062
平均クラスター係数	0.314	0.430	0.324	0.421	0.367	0.478
モジュラリティ	0.380	0.503	0.568	0.271	0.329	0.366

図-2 鉄スクラップの貿易ネットワーク (1992年)

図-3 鉄スクラップの貿易ネットワーク (2012年)

次に、ネットワークにおいて重要な役割を果たしている国と我が国の相対的地位を中心性指標から評価する。社会ネットワーク分析に依らない場合は貿易量で評価することが一般的である。社会ネットワーク分析において、最も基本的な指標は次数中心性であるが、評価におけるこの指標の有効性を確認するために、各国の貿易量と次数中心性の関係が冪乗関数で表されるとして回帰分析を行った結果を表-3に示す。

表-3 貿易量と次数中心性の関係

	1992		2012	
	相関係数	指数	相関係数	指数
鉄スクラップ	0.883	3.018	0.916	2.714
銅スクラップ	0.880	2.370	0.910	2.132
廃プラスチック	0.861	2.018	0.922	2.231

表-3 より両者には強い相関があり、貿易量が多い国ほど次数中心性が高いことが分かる。すなわち、次数中心性による評価は貿易量による評価と類似する傾向にあることを意味している。したがって、ネットワーク構造に起因する特徴を含めた全体的な評価を行うには不十分であるとも言えるが、一方でこのような傾向から外れることは当該国の構造上の特徴としても捉えることができる。なお、PageRank と貿易量の間にはこれ程強い相関関係は存在しない。

表-4 に各品目の貿易量と次数中心性に加えて PageRank、局所中心性、ネットワーク性上位国の変化を、表-5 にはネットワーク距離の小さい貿易リンクの変化

を示す。なお、両国間で輸出・輸入ともに行っている場合、表-5 では輸出が多い方の国を左側に示している。また、表-6 には、モジュラリティの比較的高い 2012 年の鉄スクラップと 1992 年の銅スクラップのクラスタリング結果例を示す。

表-5 ネットワーク距離上位リンクの変化

順位	1992			2012		
	輸出	輸入	距離	輸出	輸入	距離
鉄スクラップ	1 Germany	Netherlands	1.00	USA	Turkey	1.00
	2 USA	Canada	1.47	USA	Korea	1.76
	3 Germany	Italy	1.93	Germany	Netherlands	1.98
	4 USA	Korea	2.17	USA	China	2.01
	5 USA	India	2.33	Canada	USA	2.11
	6 USA	Turkey	2.45	USA	India	2.39
	7 Netherlands	Turkey	3.78	UK	Turkey	2.44
	8 Germany	Spain	3.90	Netherlands	Turkey	2.61
	9 Netherlands	Spain	4.87	Japan	Korea	2.75
	10 Netherlands	India	5.54	Germany	Italy	3.07
銅スクラップ	1 Germany	Netherlands	1.00	USA	China	1.00
	2 Canada	USA	1.10	Germany	China	1.88
	3 USA	China	1.17	Japan	China	2.55
	4 Germany	Italy	1.69	UK	China	2.64
	5 USA	Japan	1.81	Netherlands	China	2.93
	6 USA	Korea	2.22	Germany	Netherlands	2.97
	7 USA	Hong Kong	3.30	Korea	China	4.01
	8 Netherlands	China	3.44	Belgium	China	4.42
	9 Netherlands	Hong Kong	3.75	Italy	China	4.93
	10 USA	India	4.25	Germany	Belgium	5.32
廃プラスチック	1 USA	Hong Kong	1.00	Hong Kong	China	1.00
	2 Germany	Netherlands	1.48	USA	China	2.18
	3 Canada	USA	1.54	Germany	China	3.00
	4 Netherlands	USA	1.93	Japan	China	4.03
	5 Mexico	USA	2.35	USA	Hong Kong	4.33
	6 Netherlands	Hong Kong	2.59	UK	China	5.82
	7 Netherlands	Indonesia	3.88	UK	Hong Kong	7.36
	8 Japan	Hong Kong	3.89	Germany	Hong Kong	7.62
	9 Germany	Italy	4.97	Japan	Hong Kong	7.72
	10 USA	Indonesia	5.06	Belgium	China	8.04

表-4 各中心性指標の変化

順位	1992					2012				
	貿易量	次数中心性	PageRank	局所中心性	ネットワーク性	貿易量	次数中心性	PageRank	局所中心性	ネットワーク性
鉄スクラップ	1 USA	USA	USA	USA	Germany	USA	USA	India	USA	USA
	2 Germany	Netherlands	Japan	Germany	USA	Turkey	Germany	Netherlands	Germany	Turkey
	3 Netherlands	Germany	Germany	Netherlands	Netherlands	Germany	India	UAE	Turkey	Germany
	4 Turkey	Switzerland	UK	Canada	Canada	Korea	Netherlands	China	India	Netherlands
	5 Italy	Japan	USA	Japan	Italy	France	UK	Germany	Netherlands	Korea
	6 Korea	Spain	Spain	Spain	Turkey	Japan	Spain	UK	China	China
	7 Canada	Singapore	Hong Kong	India	India	Netherlands	Italy	Korea	UK	UK
	8 India	Canada	India	Italy	Korea	UK	China	USA	Korea	India
	9 Japan	Sweden	China	Switzerland	Spain	Belgium	Belgium	Thailand	Belgium	Belgium
	10 Spain	China	Korea	Korea	Japan	China	France	Hong Kong	France	France
銅スクラップ	1 USA	USA	USA	USA	USA	China	Germany	Germany	China	China
	2 Germany	Netherlands	China	Germany	Germany	USA	Netherlands	India	Germany	USA
	3 Netherlands	Germany	Hong Kong	Netherlands	Netherlands	Germany	UK	Korea	USA	Germany
	4 China	Japan	Japan	China	China	Netherlands	Italy	Hong Kong	Netherlands	Netherlands
	5 Canada	Singapore	Korea	Japan	Canada	Belgium	USA	India	UK	UK
	6 Italy	Sweden	UK	Italy	Italy	Japan	Belgium	Japan	Belgium	Japan
	7 Japan	China	India	Canada	Japan	UK	India	USA	Korea	Belgium
	8 Cyprus	Spain	Netherlands	Korea	Korea	France	China	Belgium	Italy	Korea
	9 UAE	Korea	Italy	Hong Kong	Hong Kong	Korea	Korea	Netherlands	Japan	France
	10 Hong Kong	Denmark	France	UAE	India	Italy	Spain	UK	France	Italy
廃プラスチック	1 USA	USA	Hong Kong	USA	USA	China	China	China	China	China
	2 Hong Kong	Netherlands	USA	Netherlands	Hong Kong	Hong Kong	USA	Hong Kong	Hong Kong	Hong Kong
	3 Netherlands	Germany	Italy	Germany	Netherlands	USA	Germany	USA	USA	USA
	4 Germany	Sweden	Singapore	Hong Kong	Germany	Germany	Belgium	Thailand	Germany	Germany
	5 Canada	Singapore	UK	Canada	Canada	Japan	Hong Kong	UAE	Belgium	Japan
	6 Japan	Japan	Malaysia	Japan	Mexico	UK	Italy	Malaysia	UK	UK
	7 Indonesia	Canada	Ireland	Singapore	Indonesia	Netherlands	India	UK	France	Belgium
	8 Mexico	Denmark	Netherlands	Italy	Italy	Belgium	UK	Germany	Netherlands	Netherlands
	9 Italy	India	Germany	Sweden	Japan	France	Spain	India	Italy	France
	10 Singapore	Spain	Indonesia	Indonesia	Singapore	Mexico	Malaysia	Viet Nam	Japan	Mexico

表-6 クラスタリングの例

2012年鉄スクラップ	
コミュニティを構成する国(貿易量100万トン以上を抽出)	備考
China, Papua New Guinea, Indonesia, Singapore, Viet Nam, Malaysia, Australia, South Africa, Thailand	アジア中心
USA, UK, Canada, Egypt, Mexico, Pakistan	北米中心
Germany, France, India, Italy, Spain, Luxembourg, Czech, Poland, Austria, Denmark, Portugal, Finland, Hungary, Switzerland	欧州中心
Korea, Japan	日本・韓国
Turkey, Netherlands, Belgium, Russia, Romania, Sweden, Latvia	欧州中心
1992年銅スクラップ	
コミュニティを構成する国(貿易量1万トン以上を抽出)	備考
USA, Canada, India, Mexico	北米中心
Netherlands, China, Japan, Hong Kong, Korea, Singapore, Sweden, Malaysia, Australia, Finland	アジア・欧州中心
Germany, Italy, Spain, France, Croatia, Austria, Denmark, Switzerland, Hungary, Portugal	欧州中心
Cyprus, Greece, UK	欧州中心
UAE, Oman	アジア中心

最初に貿易量の上位国を概観すると、鉄スクラップでは1992年でも2012年でもアメリカが最上位であり、その他ドイツやトルコなどの欧米諸国が両断面で上位にいるが、アジア諸国では日本、韓国、中国が2012年に順位を上げ、インドは下げている。銅スクラップについては1992年ではアメリカ、ドイツ、オランダが上位3カ国であったものが、2012年には中国が最上位でこれらの国が後に続く形となり、日本や韓国も順位を上げている。廃プラスチックについては1992年は最上位のアメリカ等欧米諸国が上位を占める中、香港が第2位であったものが、2012年には中国が最上位、香港が第2位となっている。こういったことを踏まえつつ、中心性指標から見た各ネットワークの特徴は以下のとおりとなる。

表-4、表-5より、鉄スクラップについては1992年では貿易量・次数中心性で最上位のアメリカ、ネットワーク性で最上位のドイツ、PageRankで最上位のオランダからの輸出を中心としたネットワークであったものが、2012年にはアメリカからの輸出がより卓越したネットワークとなっている。ただし、2012年のPageRankでは輸入超過国であるインドが最上位となっている。ネットワーク距離は、2012年ではアメリカトルコ間が2位以下を引き離して短い、2位以下では1992年と比較して相対的に拮抗しており、世界中に関係性の強いリンクが登場していることも分かる。なお、いずれの年でも、先進国間での貿易が目立っている。

銅スクラップについては、表-5より1992年では先進国間の貿易と、各指標で最上位となるアメリカの他、ドイツ、オランダから中国、香港、日本といったアジアへの輸出が目立ち、表-4で示すとおりPageRankでは輸入超過国である中国、香港、日本がアメリカに次いで大きくなっている。表-5より2012年には中国への輸入を中

心としたネットワークへと変化しているが、表-4より次数中心性やPageRankではドイツが最上位となっている。ネットワーク性上位国については最上位の中国以外は全て輸出超過国である。ネットワーク距離は、2012年ではアメリカ中国間が2位以下を大きく引き離して短く、2位以下でも中国関係のリンクがほとんどで、1992年とは異なり中国を中心として関係性の強いリンクが張られている。

廃プラスチックについては、表-5より1992年ではアメリカ、オランダから香港やインドネシアへの輸出を中心とするネットワークだが、アメリカはカナダ、メキシコ、オランダからの輸出の受け入れ先にもなっており、表-4のとおり各中心性指標でほぼ最上位となっている。表-4より2012年では概ね全世界から中国、香港へ輸出するというネットワークに変化しているが、一方で香港から中国への輸出がネットワーク距離が最も小さい。このことは、他で報告されているとおり¹⁶⁾、香港が中国への貿易の中継地となっていることを示唆している。すなわち、表-4の各指標で最上位となる中国への輸入を中心としたネットワークと言っても過言ではない。ネットワーク距離の2位以下でも中国関係のリンクがほとんどで、銅スクラップと同様に中国を中心として関係性の強いリンクが張られている。

以上のように、次数中心性、PageRankといったネットワーク構造上の中心性指標、あるいはそれにリンクの重みも加味した局所中心性・ネットワーク性といった中心性指標でネットワークにおける各国の中心性を評価すると、貿易量による上位国とは異なる結果となることも多い。事実、貿易量で最上位の国が各中心性指標で最上位となっているのは、1992年銅スクラップのアメリカ、2012年廃プラスチックの中国のみである。特に、輸出あるいは輸入に特化している国は構造上の中心性指標が低く評価される傾向にある。

また表-6に示すとおり、クラスタリングの結果からは、備考欄にあるとおり地理的に近い国々でネットワーク構造上のコミュニティが形成されていることが分かる。ただし、欧州中心のコミュニティでも2012年鉄スクラップではトルコへの輸出を中心としたコミュニティが、1992年銅スクラップではキプロスからの輸出を中心としたコミュニティが形成されるなど、同一地域内でもリンクの張られ方により複数のコミュニティが形成される場合もある。また、各コミュニティで中心性の高い国は、別のコミュニティの中心性の高い国と繋がっており、表-5のリンクのうち概ね半分は表-6の別コミュニティに属する国間のリンクとなっている。すなわち、量的な側面も加味すれば、コミュニティ内で閉じたネットワークであるとは言い難い。なお、モジュラリティの低い品目・年でも以上と概ね同様の傾向にある。

(4) 我が国の特徴

我が国の静脈資源貿易は、絶対量では増加し、かつ表-4で示すとおり世界における順位も上昇あるいは横ばいであり、国際資源循環は量的には世界全体でも相対的に高いレベルで進んでいることを示している。一方で中心性指標を見ると、1992年と比較して2012年では各品目で次数中心性の順位を下げっており、貿易量の順位より低い順位となっている。貿易量の大きさと緩和されるとは、言え、次数中心性の順位の低さに伴い、局所中心性も貿易量と比較して低い順位となっている。これは、我が国が静脈資源貿易ネットワークにおいて構造的な中心性が低下していることを示している。PageRankについても次数中心性ほどではないが、2012年で貿易量の順位と比較して相対的に低い順位となっている。ただし、次数中心性よりPageRankの順位が高い傾向にあることは、相対的に少ない繋がりの中で、中心性の高い国とは一定程度繋がっていることを示している。

以上のような特徴は、我が国が静脈資源貿易が輸出特化であり、相対的に少ない輸出先となっていること、かつ一部の中心性の高い貿易相手国との貿易量が大宗を占めていることに起因すると解釈できる。そこで、こういったことを評価するために、本研究では一国依存度 R_i を以下のように定義する。

$$R_i = \frac{N_i - N'_i}{N_i} \quad (9)$$

ただし、 N'_i : i 国の最大貿易相手国のノードとリンクを除いた場合のネットワーク性である。

一国依存度は、値が1に近いほど最大輸出相手国への依存度が高く、逆に負の値を取る場合は最大輸出相手国への依存度が低く、当該相手国を除いたネットワークにおいて中心性が相対的に高まることを示す。ネットワーク性上位国について一国依存度を計算した結果を表-7に示す。

表-7 一国依存度

順位	2012年鉄スクラップ			2012年銅スクラップ		
	国	相手国	一国依存度	国	相手国	一国依存度
1	USA	Turkey	0.000	China	USA	0.000
2	Turkey	USA	0.064	USA	China	0.607
3	Germany	Netherlands	0.392	Germany	China	-2.621
4	Netherlands	Germany	0.544	Netherlands	China	-3.329
5	Korea	USA	0.148	UK	China	-0.348
6	China	USA	0.110	Japan	China	0.706
7	UK	Turkey	-0.031	Belgium	China	-3.643
8	India	USA	-0.359	Korea	China	-0.057
9	Belgium	France	0.366	France	China	-4.464
10	France	Germany	0.376	Italy	China	-2.093
—	Japan(12)	Korea	0.649	—	—	—

表-7より我が国はネットワーク性上位国の中で最大の一国依存度を示しており、この指標からも我が国の静脈資源貿易の特定の国への依存の強さが分かる。

3. 静脈資源貿易に係る社会システムの課題

世界の静脈資源貿易ネットワークにおける我が国の特徴として、最近では貿易量での順位よりもネットワーク構造上の中心性指標の順位が低くなっていることが前章で明らかとなった。これは経済の成熟に伴い輸出に特化し、かつ中国・韓国といった特定の国に輸出先を特化していることに起因する。前章のクラスタリング結果から、世界的に近接地域内で貿易コミュニティが形成される傾向があると同時に、太いリンクは別コミュニティ間でも繋がっていることが示されたが、こういった点も踏まえても、我が国の場合は近隣に輸入特化国が位置していることで、現在のような輸出先を特化したネットワーク構造となっていると考えられる。本章では、このような静脈資源貿易ネットワークにおける我が国の現状を踏まえ、社会システム上の課題について述べる。

まず、ネットワーク全体で密度を高めている中、我が国が相対的に構造上の中心性を低下させていることは、我が国を中心とする貿易ネットワークの代替性が低いことを示している。特に表-6で示すように輸出先を特定の国に特化することは、最大輸出相手国に何らかの状況変化が生じて貿易が止まった場合、大きな影響を受けることになる。静脈資源の場合、経済成熟度次第では相手国内発生資源で輸入代替が進むことや、相手国の環境規制の厳格化により輸入が瞬時に激減する可能性もあり、埋立処分以外にも国内保管や国内産業での受入増等による対応もありうるとは言え、国際資源循環の観点からは特定の国に依存した貿易には一定のリスクが存在する。

我が国の静脈資源貿易はネットワーク構造上から見て代替性が低く、量的な要素も加味すると特定の国への依存度は世界最高と言っても過言ではない。動脈資源の輸入に関しては、フローに対して緩衝的な役割を果たす国家備蓄等の対策が社会システム上確立しているが¹⁷⁾、静脈資源貿易に関してはそのような対策が社会システム上存在しない。このことは、我が国社会システム上のひとつの課題と言える。最終手段として埋立処分が可能となる輸出側で国内保管等の対策を講じることが難しいことを踏まえれば、頑健な構造であることの意味は輸入超過国よりも重要となる可能性がある。近年、災害のリスクに備えるべく企業にBCP(Business Continuity Plan; 事業継続計画)の策定が求められているが¹⁸⁾、例えば静脈資源貿易についても同様に、国策として貿易継続計画TCP(Trade Continuity Plan)を策定し、貿易代替国を常時から意識することが解決策のひとつとなろう。

次に、輸出先が変化することへの対応可能性についてであるが、表-4で示すとおり、世界の静脈資源貿易ネットワークの中心はこの20年で大きく変化している。我が国に地理的に近い中国が銅スクラップや廃プラスチック

ックの貿易ネットワークの中心となり、同じく韓国は鉄スクラップの貿易ネットワークで中心性を高めている。現在の我が国の静脈資源貿易は、両国への輸出が大部分であり、近距離の輸出が大宗を占めていることが特徴と言える。

しかしこの 20 年の変化が示すとおり、今後の静脈資源貿易ネットワークの中心が他の国々に変化する可能性は大いにある。例えば中国は経済成長に伴い現在でこそ多くの資源を必要としているが、いずれその成長は鈍化し、また経済の成熟に伴い静脈資源の自国での発生が増加することで輸入代替も進む。雁行型経済発展論¹⁹⁾に基づけば、今後中心性を高めていく国としてはインド、東南アジア等が候補として挙げられ、いずれにしろ我が国にとっては、現在よりも遠距離の貿易となる。国際資源循環が量的に進展し、理想的にも相対的に促進の方向にある中で、遠距離の輸出になることは、静脈資源の性質や社会システム上の位置付けと相まって、二つの理由からこの流れを止める可能性がある。

一点目は、島国である我が国の静脈資源貿易は海上輸送が当然基本となるが、運賃負担力が低いという静脈資源の経済的性質から、輸送コスト次第で輸出が断念される可能性である。距離の延長は必然的に輸送コストの増加要因となるが、それと相殺させるためには大型船舶での輸送によって規模の経済を働かせる必要がある。根拠例として、図-4 にバルク船で各国へ輸出する場合の単位重量当たりの海上輸送費用を示す。図-4 は船型毎の平均的な輸送原単位 (円/日・隻)²⁰⁾ と各国の代表的港湾までの距離から算出しており、中国向けに 1,000DWT 船舶で輸送するよりも、インド向け 10,000DWT 船舶で輸送するほうが海上輸送費用は安価となっている。

図-4 船型と海上輸送費用の関係

現在では輸出先が近距離であるため、我が国の静脈資源貿易に用いられる船舶は 5,000DWT クラス以下が一般的である。このために必要な岸壁は 7.5m であり²¹⁾、実際、最も喫水が必要となる金属スクラップの輸出岸壁でも全国平均で 8.5m 程度である²²⁾。しかし、例えばインドへの輸出で最低必要となる 10,000DWT クラス船舶の

必要岸壁水深は 9m であり²¹⁾、現行の金属スクラップ輸出岸壁のうちこのサイズの船舶に対応できる岸壁は少なくなる²²⁾。遠距離になると航行上の安全性や海賊リスクといった技術的、社会的理由からも相対的に大型な船舶での輸出が必要となることも合わせ、輸出先の変化に伴う船舶の大型化に社会インフラを如何に対応させるかが課題となる。

二点目は、潜在汚染性を有する静脈資源が、逆有償化することにかかる社会システム上の規制により輸出が断念される可能性である。現在、本研究で対象とした静脈資源は有償物として輸出されているが、輸出先が遠距離になることや市場価格の低下により逆有償化の可能性は否定できない。通常、逆有償物の輸出には「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号）」（以下、「廃掃法」と呼ぶ。）の規制がかかり、輸出のための手続き、手続き期間中の保管、輸送時の規制等に伴い追加コストが発生し²³⁾、一層の逆有償化の原因となる。

静脈資源の資源としての価値は「リサイクル後の価格ーリサイクル費用（輸送コスト含む）」であり²⁴⁾、これが 0 より大きければ有償物として市場原理の下で取引されるが、0 以下の場合は逆有償物となる。静脈資源は動脈資源とは異なり需要に関係なく発生し、資源として経済的価値のない場合には埋立処分という選択肢が存在する。逆有償化すれば、規制に伴う追加コストが発生するため²⁵⁾、埋立処分が経済的に優位になる可能性が生じる。しかし、資源生産性向上の観点からは「リサイクル後の価格ーリサイクル費用」が仮にマイナスでも、その絶対値が埋立費用よりも小さければ輸出してでもリサイクルされる方が経済的に有利となるべきである。輸出側にとっての輸出コストを含む「リサイクル後の価格ーリサイクル費用」は CIF 価格（Cost, Insurance and Freight；輸入港で荷揚げするまでの海上輸送費用等を含むもの）であるが、静脈資源の輸出業者へのヒアリングによると FOB 価格（Free on Board；輸出港での積み込み費用までしか含まないもの）でマイナスとなった段階で、原則として先述した廃掃法の規制対象となり、追加コストの発生が輸出のハードルは高くなる。

このように、規制に伴う追加コストが国際資源循環を後退させる可能性を有しているという社会システム上の課題がある。この点に関しては、表-5 のとおり、運賃負担力の低い静脈資源でも遠距離貿易が成立していることを踏まえると、例えば FOB 価格がマイナスとなる輸出であっても、CIF 価格がプラスである限り、ひいては環境保全上の効果を含めてプラスである限り、規制の対象外とするような社会システムに変更することで、追加費用が発生せず、効果的な国際資源循環の促進に繋がる可能性はある。

4. おわりに

本研究では、1992 年と 2012 年の静脈資源貿易ネットワークについて、社会ネットワーク分析により構造上の特徴となる指標や中心性指標を計測し、その変化について検証した。具体的には、次数中心性、PageRank、局所中心性、ネットワーク性といった指標で貿易量だけでは把握できないネットワーク構造上で中心性の高い国を、ネットワーク距離により国間の繋がりを加味した重要リンクを抽出し、ネットワークの特徴とその変化について分析した。その結果、この 20 年でネットワーク構造や中心性の高い国が変化しており、銅スクラップや廃プラスチックの貿易ネットワークでは中国が台頭していること、アメリカ、ドイツ、オランダ等の先進国については世界的に見ても相対的に高いレベルで国際資源循環を続けていることが明らかとなった。

我が国については、貿易量から見れば世界において相対的に高いレベルで国際資源循環が進展している一方で、ネットワーク構造的にはこの 20 年で中心性を低下させ、かつ相対的に見ても近距離の輸入特化国に大きく依存した貿易ネットワークを有していることが明らかとなった。これを踏まえて、国際資源循環の観点から、ネットワーク上の代替性の低さと輸出相手国の変化への対応可能性について社会システム上の課題を挙げた。

国際資源循環の進展度合いについては、各国の経済成長や工業化路線の程度から見た今後の需要見込み、経済成熟度から見た当該国内からの静脈資源の供給増、リサイクル技術の進展などが複雑に絡み合う上、静脈資源故に埋立処分という選択肢もあるため、今後の動向の予測は動脈資源以上に困難だと思われる。したがって、いかなる状況にも対応できるようなオプションを用意することが重要となる。

さらに、現時点では我が国も環境面や資源面に配慮しながら国際資源循環を促進するスタンスを取っているが、将来的にどのような社会シナリオを目指すかによって我が国の国際資源循環の動向も大きく変動する可能性もある。確固たる将来の社会シナリオと、それに対応する、インフラを含めた社会システムの構築が求められている。

付録

注) 法律上の廃棄物であれば規制の対象になるが、廃棄物か否かは総合判断説によることとされており、かつ価格が0となる場合については統一した解釈はないため、ここでは便宜的にこのような表現としている。

参考文献

1) United Nations Environment Programme: Decoupling2: technologies,

- opportunities and policy options, 2014.
- 2) 環境省：平成 26 年版環境・循環型社会・生物多様性白書, 2014.
 - 3) 細田衛士：資源循環型社会－制度設計と政策展望－, 慶應義塾大学出版会, 2008.
 - 4) 尹鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究, 土木学会論文集 G, 63(4), pp.332-344, 2007.
 - 5) 寺園淳：循環資源の越境移動の実態と中古家電・金属スクラップの事例にみる適正管理方策, 新世代法政策学研究, 9, pp.77-104, 2010.
 - 6) 橋徹：循環資源貿易構造と各国の循環型社会形成－鉄スクラップ貿易構造から見た循環資源貿易の課題－, ソシオサイエンス, 18, pp.65-80, 2012.
 - 7) Lee H: The structure of the international air network through the social network analysis, Journal of Geography, 117(6), pp.985-996, 2008.
 - 8) Khamazi A, Rovenskaya E, Fath B D, Yarime M, Kraines S: Quantifying the sustainability of economic resource network: An ecological information-based approach, Ecological Economics, 90, pp.177-186, 2013.
 - 9) 安田雪：社会ネットワーク分析：その理論的背景と尺度, 行動計量学, 21(2), pp.32-39, 1994.
 - 10) 金光淳：社会ネットワーク分析の基礎－社会的関係資本論にむけて－, 勁草書房, 2003.
 - 11) 小坂浩之, 布施正暁, 鹿島茂：貿易統計の不整合問題－既往研究の整理と数量データを用いた調整－, 運輸政策研究, 15(2), pp.20-31, 2012.
 - 12) Lloyd's List Intelligence website:
<http://www.lloydslistintelligence.com/llint/index.htm>.
 - 13) Kaluza P, Kölzsch A, Gastner MT, Blasius B: The complex network of global cargo ship movements, Journal of the Royal Society Interface 7, pp.1093-1103, 2010.
 - 14) 日本内航海運組合総連合会基本政策推進小委員会：循環資源の海上輸送実績報告（平成 25 年度実績）, 2014.
 - 15) Page L, Sergey B, Rajeev M, Terry A: The PageRank citation ranking: Bringing order to the Web, Technical Report, Stanford InfoLab, 1999.
 - 16) 小島道一・吉田綾：再生資源・中古品貿易の中継地としての香港, 「アジアにおける循環資源貿易」第 4 章, 2005.
 - 17) 経済産業省資源エネルギー庁：平成 25 年度エネルギーに関する年次報告, 2014.
 - 18) 内閣府：事業継続ガイドライン－あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応－（平成 25 年 8 月改訂）, 2013.
 - 19) 小島清：雁行型経済発展論・再検討, 駿河台経済論集, 9(2), pp.75-136, 2000.
 - 20) 港湾事業評価手法に関する研究委員会編：港湾投資の評価に関する解説書, 2004.
 - 21) 高橋宏直・後藤文子・安部智久：統計解析による船舶諸元に関する研究－船舶の主要諸元の計画基準（案）－, 国土技術政策総合研究所報告, 2006.
 - 22) 日刊市況通信社：鉄スクラップ関連資料集（2006 年版）
 - 23) 小島道一：アジアにおける資源循環貿易－現状と課題, 「アジアにおける資源循環貿易」第 1 章, アジア経済研究所, 2005.
 - 24) 細田衛士：グッズとバズズの経済学, 東洋経済新報, 1999 (2015.8.4 受付)

PROBLEMS ON THE SOCIAL SYSTEM BEING LED BY THE VIEWPOINT OF NETWORK STRUCTURE OF RECYCLABLE RESOURCES TRADE

Yoshihisa SUGIMURA, Shoichiro AOKI and Shinshuke MURAKAMI

Globalization of our economies keeps progressing, but the level of economic growth varies amongst countries, which may cause the mismatches of demands and supplies for recyclable resources. International recyclable resources circulation can contribute to maximize the resource productivity by eliminating these mismatches of demand and supply. However, Japanese international recyclable resources circulation will not be stable, because of cheap prices of the resources and trade partners' economic situation.

In this study, we uncovered the change of structural characteristics of recyclable resources trade network and evaluated the Japan's situation and characteristics. Then, we discussed the problems on the social system related to international recyclable resources circulation based on the obtained indexes.