

ネットワークの経済分析

Economic Analysis of Network

館 健太郎
Kentaro TACHI*

目次

- 1 はじめに
- 2 ネットワークの定義と分類
 - 2.1 ネットワークの定義
 - 2.2 ネットワークの分類
- 3 効率的なネットワーク形態
 - 3.1 ネットワークの効率性
 - 3.2 航空輸送のネットワーク
- 4 戦略的なネットワーク形成
 - 4.1 ネットワークゲーム
 - 4.2 連結モデル
 - 4.3 不確実性下のネットワーク形態
 - 4.4 重複的な自由貿易協定

1 はじめに

本稿では、社会的、経済的なネットワークの形成とその意義に関する経済分析について、具体例をいくつか交えながら概観していく。ネットワーク (network) とは主体や拠点同士を結ぶリンクの集合体を指し、このリンクに具体的な意味を与えることによって、通信回線網や鉄道網と

* Lecturer, Faculty of Economics, Nihon Fukushi University

いったインフラストラクチャー、人々の交友関係や企業の提携関係など、さまざまな現象をネットワークとして解釈することができる。

実際、ネットワークに関する研究は、自然科学、社会科学を問わず、非常に幅広い分野で行われてきた。例えば、インターネットにおけるウェブサイトのリンク構造や、転職先を探すときのパーソナル・ネットワークの役割に関する研究がよく知られている。これらに共通するのは、いずれも物事や人々がどのように関連しているかに注目しているということである。

また、1990年代以降、経済学においてもゲーム理論や産業組織論などの手法を用いたネットワークの分析が盛んに行われるようになってきた。ネットワークの経済分析はその目的の違いから、次の二つの方向性に大別することができる。一つは、ネットワーク形態とそれによって生み出される経済的価値との関係から、効率的なネットワーク形態を特定しようとするものである。もう一つは、経済主体が自らの利益を意識しながら戦略的にリンクを結んでいくとき、最終的にどのようなネットワークが形成され、安定的に維持されるかを検証するものである。

以下、次のように議論を進めていく。第2節では、ネットワークを数学的に定義し、その性質に応じてネットワーク形態を分類する。第3節では、ネットワークの価値と効率性について述べ、航空輸送のネットワークの例を紹介する。第4節では、戦略的なネットワーク形成を分析するためにネットワークゲームを定式化し、具体例として情報通信ネットワークと二国間の自由貿易協定の問題を取り上げる。

2 ネットワークの定義と分類

ネットワークを統一的に論じるためには、まず定義を明確にしておく必要がある。そこで、その幾何的な性質に注目し、グラフ (graph) の概念を用いてネットワークを数学的に表現することにしよう。

2.1 ネットワークの定義

ネットワーク (N, g) は点とリンク (link) の集合から構成される。 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ は n 個の点からなる集合であり、それぞれの点は何らかの物理的な拠点、または消費者や企業、政府といった経済主体を表している。また、 $g \subseteq N^2$ は点の集合 N に属する2つの点の組からなるリンクの集合である。例えば、リンク $\{i, j\}$ が集合 g に属している、すなわち $\{i, j\} \in g$ ならば、点 i と j が互いに経済的な関係を持っていることを意味している。

ここで、相互の点は双方向または対称な関係であると想定し、リンク $\{i, j\}$ と $\{j, i\}$ は同一のものであると考える。なお、もし点同士が片方向または非対称な関係のときはリンクを (i, j) と記述してリンク (j, i) とは区別するが、本稿では紙幅の関係上、この場合については取り扱わないことにする。また、これ以降ネットワーク (N, g) を g 、リンク $\{i, j\}$ を ij 、さらにあるネットワーク g にリンク $ij \notin g$ を付け加えたもの $g \cup ij$ を $g + ij$ 、 g からリンク $ij \in g$ を取り除いた

もの $g \setminus ij$ を $g - ij$ と略記することにする。

ネットワーク g 上にリンク ij が存在する、すなわち $ij \in g$ であるとき、点 i と j が隣接している (adjacent) と呼ぶ。さらに、ある2点がたとえ隣接していなくても、それらが隣接する点を経由して間接的につながる可能性がある。もしネットワーク g 上で異なる点からなる点列 $\{i_0 = i, i_1, \dots, i_t = j\}$ ($i_k i_{k+1} \in g, k = 0, 1, \dots, t-1, t \geq 2$) が存在するとき、点 i と j は連結している (connected) と呼び、ネットワーク $i_0 i_1 + \dots + i_{t-1} i_t$ を長さ t のパス (path) という。さらに、点 i と j を結ぶ最短のパスの長さを距離 (distance) と呼び、 t_{ij} と書く。なお、もし点 i と j が連結していない場合は $t_{ij} = \infty$ とおく。また、パス $i_0 i_1 + \dots + i_{t-1} i_t$ にリンク $i_t i_0$ を加えた環状のネットワーク $i_0 i_1 + \dots + i_{t-1} i_t + i_t i_0$ をサイクル (cycle) という。

2.2 ネットワークの分類

$g' \subseteq g$ を満たすネットワーク g' をネットワーク g の部分グラフ (subgraph) といい、ネットワーク g の部分グラフ全体の集合を $G(g) = \{g' \mid g' \subseteq g\}$ とする。あらゆる点同士が隣接しているネットワークを g^N とすると、集合 N によって作られるすべてのネットワークの集合は $G = G(g^N)$ と表される。

あらゆる点同士が連結しているネットワークを連結ネットワークと呼び、さらにその中でもサイクルを1つも含まないネットワークをツリー (tree) という。ツリーの中で代表的なものがスター (star) あるいはハブ=スポーク (hub-and-spoke) である。これはハブと呼ばれる点 h が1つ存在し、それ以外のすべての点はハブとだけリンクしているネットワーク、すなわち $g = \sum_{i \in N, i \neq h} hi$ を指す。

一方、環状のネットワークやインターネットのような蜘蛛の巣状のネットワークはサイクルを含むネットワークとしてまとめることができる。

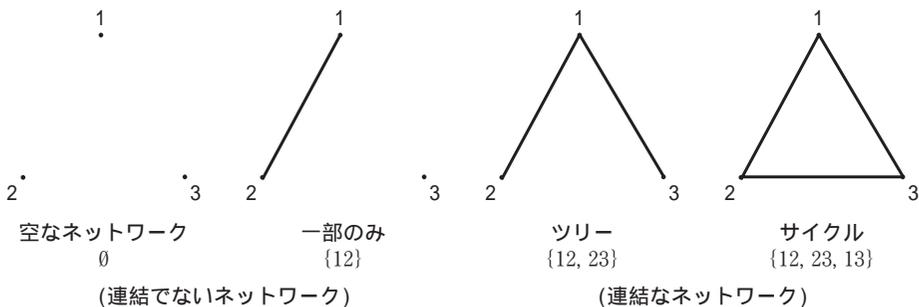


図1：ネットワークの分類 ($N = \{1,2,3\}$ の場合)

3 効率的なネットワーク形態

3.1 ネットワークの効率性

ネットワークは何らかの機能を果たすことによって、経済的な価値を生み出すと考えられる。このネットワークの経済的価値は、ネットワークの集合 G 上に定義される実数の関数 $v(g)$ として表現される。例えば、リンク 12 および 23 からなるネットワーク $g = \{12, 23\}$ の価値は $v(\{12, 23\})$ と表される。なお、多くの場合、リンクが存在しないネットワークの価値はゼロ、すなわち $v(\emptyset) = 0$ と正規化される。

ところで、このネットワークの価値は協力ゲーム理論における提携型ゲームの一つの拡張となっている。なぜなら、提携 $S \subseteq N$ の価値はプレーヤーの集合 N の部分集合の関数として定義されるため、ネットワークの価値 $v(\{12, 23\})$ と $v(\{12, 23, 13\})$ は、提携型ゲームではともに $v(\{1, 2, 3\})$ となって区別されないからである。言い換えれば、提携型ゲームはどのプレーヤーが提携に入っているかを問題にするのに対して、ネットワークの価値ではさらにプレーヤー同士がどのように結びつくかも考慮するのである。

ネットワークの効率性はこの価値の関数を用いて定義することができる。ネットワーク g が価値 v に関して効率的であるとは、任意のネットワーク $g' \in G$ に対して、

$$v(g) \geq v(g')$$

を満たすことである。つまり、効率的なネットワーク形態は価値を基準にして、それを最大にするネットワークとして表されるのである。

3.2 航空輸送のネットワーク

鉄道や電力、電話といった公益事業は多くの場合、線路や光ファイバーなど独自のネットワークを使ってサービスを供給している。鉄道や電話はネットワークそのものをサービスとして提供している一方で、電力や都市ガス、放送などはネットワークを利用して財を提供している。このように事業によって特徴に違いがあるものの、いずれの場合もネットワークを使用している点が共通することから、これらはネットワーク産業と総称されることがある。

こうした産業の中から、ネットワーク形態と効率性の関わりについて論じたものとして、交通のネットワーク、とりわけ航空産業に関する Hendricks, Piccione, and Tan (1995) の研究を取り上げることにしよう。

この分析では、旅客航空サービスの市場を1つの企業が独占している状況を想定している。この企業によって運航される路線は、各都市にある空港を点、運航路線をリンクとみなすことによって、全体として航空路線のネットワークと解釈することができる。なお、話を単純化するために、ここでは東京 (T)、福岡 (H)、および札幌 (S) という3つの都市だけを考えることにする。

路線のネットワーク形態は、企業が3つの路線のうちでどれだけの路線を運航させるかによっ

て決まる。もし企業がすべての都市間に直行便を運航させた場合には、路線のネットワークはサイクル $\{TH, TS, HS\}$ となる。これに対して、もし企業が東京・福岡便と東京・札幌便だけを運航させた場合には、ネットワークは東京をハブ空港とするハブ＝スポーク・ネットワーク $\{TH, TS\}$ となる。

そして、消費者や企業はこのようなネットワークに対して、各々の立場から価値判断を行うと考えられる。各都市の消費者にとっては、そのネットワークを使って他のどの都市にも行くことができるか、乗り換え回数が少なくて済むかなどが価値を決める要素となるだろう。一方、企業の立場から見れば、各路線の営業によってどの程度の利潤が得られるかがネットワークの価値となるだろう。ここでは、企業の利潤を基準として効率的なネットワーク形態を考察しよう。

まず、企業が東京・福岡便のように1つの路線だけを運航しているときは、路線のネットワークは連結していない。そうすると、消費者は札幌のように路線のない都市を行き来することができない。しかし、もし需要がある程度以上あるならば、企業は路線を増やしてネットワークを連結させた方が、利潤をより大きくすることができるだろう。

次に、連結ネットワークとしてはサイクル $\{TH, TS, HS\}$ とハブ＝スポーク・ネットワーク $\{TH, TS\}$ が考えられるが、どちらのネットワークの方が利潤が大きくなるだろうか。これはもちろん、需要の大きさや運航費用などさまざまな条件に依存するが、この判断において特に重要な要因となるのが、密度の経済である。

密度の経済とは、路線当たりの旅客数を増やすことによって、旅客1人当たりの費用を削減することのできる効果をいう。つまり、同じように旅客機がフライトするならば、なるべく多くの旅客を乗せて密度を高めた方が平均的な費用が下がり効率的になるというものである¹。ちなみに、密度の経済はネットワークの大きさを変えずに費用を下げる効果であるのに対して、規模の経済はネットワークを大きくすることによって費用を削減する効果なので、両者は明確に区別される。

この密度という点に着目すると、ハブ＝スポーク・ネットワークは、より効果的に路線当たりの旅客数を増やすことのできるネットワークであることが分かる。例えば、企業が東京・札幌便と東京・福岡便を運航しているとき、東京・福岡便には東京から福岡へ向かう旅客だけでなく、札幌から福岡へ向かうために東京で乗り継ぐ旅客も同時に乗り込むことになる。このように、ハブ＝スポーク・ネットワークは、出発地が異なるが目的地を同じくする旅客をいったんハブ空港に集めてから一度に輸送するため、旅客機の密度を高めることができるのである。

また、都市数がより多くなっても、ハブ＝スポーク・ネットワークでは都市数と同じ数の路線ですべての都市が連結され、しかも密度の経済がより強く作用する。したがって、所要時間やハブ空港での乗り換えの手間などその他の要因がそれほど大きく影響しないならば、企業にとってハブ＝スポーク・ネットワークが効率的なネットワーク形態となる。

1 航空輸送における密度の経済を実証した研究としては例えば Brueckner and Spiller (1994) がある。

なお, Hendricks, Piccione, and Tan (1999) ではこのモデルを寡占市場に拡張して, ハブ=スポーク・ネットワークが市場競争に対しても威力を発揮することを示している. これはいったんハブ・スポーク・ネットワークを完成させると密度の経済による効果が非常に大きくなるため, 競合企業を費用面で不利な状況に追い込むことができるからである.

4 戦略的なネットワーク形成

4.1 ネットワークゲーム

前節のようにネットワーク産業を分析する場合には, ネットワークの点は物理的な拠点とみなすことが多い. これに対して, ネットワークの点を自己の利益を追求して行動する経済主体と解釈することもできる. 本節ではこのような見方に立って, 戦略的なネットワーク形成について考察しよう².

リンクを形成する経済主体の相互依存関係を分析するために, 次のようなネットワークゲームを定式化する. ネットワークゲームは (N, v) および配分ルールから構成される. $N = \{1, 2, \dots, n\}$ はプレイヤーの集合, v はネットワークの価値を表す. また, 配分ルール $Y_i(g, v)$ はネットワーク g および価値 v におけるプレイヤー i への配分を表し, 任意の g および v に対して $\sum_{i \in N} Y_i(g, v) = v(g)$ であるとする.

そして, プレーヤーの駆け引きによって形成される安定的なネットワークを予想するために, Jackson-Wolinsky (1996) によって提唱された対安定性 (pairwise stability) を導入する.

ネットワーク g が配分ルール Y_i および価値 v に関して対安定であるとは, 任意の $ij \in g$ に対して

$$Y_i(g, v) \geq Y_i(g-ij, v) \text{ かつ } Y_j(g, v) \geq Y_j(g-ij, v)$$

および, 任意の $ij \notin g$ に対して

$$Y_i(g+ij, v) > Y_i(g, v) \text{ ならば } Y_j(g+ij, v) < Y_j(g, v)$$

が成立する場合をいう. これらの条件を満たすネットワークでは, どのプレーヤーもネットワーク上のリンクを切断しようとしなない. また, どちらか一方のプレーヤーにリンクを結ぶインセンティブがなければ, 新たなリンクが付加されることはない.

4.2 連結モデル

このゲームの興味深い例として, 人々の情報交換や情報通信ネットワークをモデル化した Jackson-Wolinsky (1996) の連結モデルがある. 連結モデルとは, ネットワーク g におけるプレーヤー i の利得が

$$Y_i(g) = \sum_{j \neq i} \delta_{ij}^{t_{ij}} - \sum_{ij \in g} c_{ij}$$

2 戦略的なネットワーク形成については Jackson (2003) のサーベイが詳しい.

によって与えられるモデルをいう。ここで $0 \leq \delta_{ij} < 1$ はプレーヤー i と j の間の情報の減価率、 t_{ij} はプレーヤー i と j の距離、 c_{ij} はプレーヤー i と j がリンクを結ぶために支払う費用を表す。特に、すべての i と j について $\delta_{ij} = \delta$ および $c_{ij} = c$ となるときは対称連結モデルと呼ばれる。

この利得の特徴は、ネットワーク g においてプレーヤー i と j が何らかのパスによって連結すれば、両者が互いに情報を得られることにある。ただし、 $\delta_{ij} < 1$ の場合にはその情報の価値は距離に応じて減っていく。一方、プレーヤー同士が直接リンクしているときには最も価値の高い情報が得られるが、そのためにはリンク費用を支払わなければならない。

連結モデルの具体的なイメージとしては、それぞれのプレーヤーが独自に価値 1 の情報を持っており、互いに相手の情報源にリンクしようとしている状況が考えられる。各プレーヤーは独立かつ非協力的にリンクしようとするプレーヤーを決め、互いが同意したときのみ実際にリンクが形成される。そして、このようにして形成されたリンクの束をネットワークとする。

それでは、3人対称連結モデルを使って具体的に説明していこう。いま、 $\delta_{ij} = 1$ かつ $c_{ij} = 0.5$ であるとする。まず、もしネットワークにリンクが存在しない場合には、各プレーヤーともリンク費用がかからない代わりに何の情報も得られずにいるため、彼らの利得はゼロ、すなわち $Y_i(\emptyset) = 0, i = 1, 2, 3$ となる。

一方、もしネットワーク $\{12\}$ 、すなわちプレーヤー 1 と 2 だけがリンクしているとき、彼らは互いに 1 の情報を入手する一方でリンク費用を支払わなければならない。よって、このときの各プレーヤーの利得は

$$Y_1(\{12\}) = Y_2(\{12\}) = 1 - 0.5 = 0.5, Y_3(\{12\}) = 0$$

となり、プレーヤー 1 と 2 は互いにリンクを結ぶことで正の利得を得ている。ここからさらにプレーヤー 2 と 3 がリンクしたとすると、各プレーヤーの利得は

$$Y_1(\{12, 23\}) = Y_3(\{12, 23\}) = 2 - 0.5 = 1.5, Y_2(\{12, 23\}) = 2 - 2 \times 0.5 = 1$$

となる。このネットワークでは連結モデルの特徴が顕著に表れている。というのも、プレーヤー 1 は追加的な費用を払っていないにもかかわらず、プレーヤー 2 と 3 がリンクすることによって間接的にプレーヤー 3 の情報を入手できるようになっている。これはプレーヤー 3 についても同様のことが言える。彼はプレーヤー 2 とリンクすることで、プレーヤー 1 の情報も同時に得られるのである。最後に、プレーヤー 1 と 3 もリンクを結んで全員が互いにリンクしたとすると、各プレーヤーの利得は $Y_i(\{12, 23, 13\}) = 2 - 2 \times 0.5 = 1, i = 1, 2, 3$ となる。

それでは、先ほどの対安定性の基準を使って、どのようなネットワークが安定的になるかを検証してみよう。例えば、ネットワーク $\{12, 23, 13\}$ が安定的であるためには、どのプレーヤーもこのネットワークからリンクを切断しようとはしないことが必要となる。しかし、あるプレーヤーが今の状況でリンクを切断しても、彼は他のプレーヤーとの連結を保ちつつリンク費用を削減することができるため、どちらか一方のリンクを切断しようとする。このことから、ネットワーク $\{12, 23, 13\}$ は安定的ではないことが分かる。

次に、ネットワーク $\{12, 23\}$ について調べよう。もしプレーヤー 2 がリンク 12 を切るとプレー

ヤー1からの情報を入手できなくなるため、プレーヤー2の利得は1から0.5に下がる。また、プレーヤー1や3がプレーヤー2とのリンクを切断すると、彼らは一度に2人分の情報を失ってしまう。よって、各プレーヤーはこのネットワークでリンクを切ろうとはしないだろう。また、プレーヤー1と3はすでにお互いの情報をすべて得ているため、彼らは新たにリンク13を作るインセンティブを持たない。以上より、ネットワーク{12, 23}は対安定性の条件を満たしており、安定的なネットワークとなっていることが分かる。

この例では $\delta_{ij} = 1$ 、すなわち他のプレーヤーが仲介することによる情報の減価がない場合を考えているため、各プレーヤーは他のプレーヤーと連結を保っていれば情報を完全に得ることができる。したがって、ネットワーク{12, 23}のようなツリーが、最小限のリンクでネットワーク全体を連結してリンク費用を節約できるという点で有利になるのである。

4.3 不確実性下のネットワーク形態

これに対して、Bara-Goyal (2000)、Tachi (1999) および館 (2000) は、連結モデルに不確実性を導入することで、このツリーの利点が同時に弱点にも成りうることを示している。

グラフ理論において、グラフがツリーであるとは次のような性質と同値であることが知られている。

1. すべての点が最小限のリンクでつながっている。
2. どんな2点もただ1つのパスしか持たない。

性質1は先ほど述べたように、ツリーが費用面で優れたネットワークとなる理由を示している。一方、性質2はネットワークにおいてプレーヤー同士をつなぐパスがつねに1つしかないことを意味しており、もしリンクが意図せず切断する危険があるときには、パスの中のリンクが1カ所でも切断されれば連結が途絶えてしまう。つまり、ツリーはこのようなリスクに対しては脆弱であり、連結の信頼性に不安を抱えているのである。

これとは対照的に、ネットワーク{12, 23, 13}のようにサイクルを含んだネットワークでは、ツリーに比べてリンクが多いために全体の費用が高くなる一方で、リンクが互いに他のリンクが不慮の事故で切断されたときの保険の役割を果たすため、システムリスクに対して頑強なネットワーク形態となっているのである。かつて、アメリカ国防総省がインターネットの発端ともなった蜘蛛の巣状のアーパネットを構築したのは、もし他国から核ミサイルによる攻撃を受けたとしても通信が途絶えないようにするためだったという。この話は連結の信頼性に関するネットワークの特徴をよく表している。

4.4 重複的な自由貿易協定

本稿の最後に、国際的な経済統合の流れをネットワークの視点からとらえた例として、自由貿易協定をめぐる政府間交渉のモデルについて簡単に触れておこう。Mukunoki-Tachi (2005) は

各国政府を点、政府間で締結される二国間の自由貿易協定をリンクとみなし、逐次的な交渉による自由貿易協定の拡大を分析している。

自由貿易協定の最も大きな特徴は、協定の参加国が他の参加国の同意を得ることなく、域外国に対する輸入関税率を変更したり、新たな自由貿易協定を結ぶことができるということにある。したがって、世界全体を貿易協定のネットワークととらえたとき、重複的な自由貿易協定によってハブ = スポークのようなネットワークが形成される可能性が出てくるのである。

このことは各国が逸脱行為として新たな自由貿易協定を結ぶことを誘発し、既存の協定内の協調を難しくすることを意味しているが、より広域的な貿易自由化という点から見れば、それがあえて有利に働き、世界規模の貿易自由化をなし崩し的に達成させる効果を持ちうるのである。

参考文献

- [1] Bala, V. and Goyal, S. (2000), "A Strategic Analysis of Network Reliability," *Review of Economic Design*, 5, 205-228.
- [2] Brueckner, J.K. and P.T. Spiller (1994), "Economies of traffic density in the deregulated airline industry," *Journal of Law and Economics*, vol.37, pp.379-415.
- [3] Hendricks, K., M. Piccione, and G. Tan (1995) "The Economics of Hubs : The Case of Monopoly," *Review of Economic Studies*, 62, pp. 83-99.
- [4] Hendricks, K., M. Piccione, and G. Tan (1999), "Equilibria in Networks," *Econometrica*, Vol.67, No. 6, pp. 1407-1434.
- [5] Jackson, M.O. (2003), "A Survey of Models of Network Formation: Stability and Efficiency," mimeo.
- [6] Jackson, M.O. and Wolinsky, A. (1996), "A Strategic Model of Social and Economic Networks," *Journal of Economic Theory*, 71, pp. 44-74.
- [7] Mukunoki, H. and Tachi, K. (2005), "Multilateralism and Hub-and-Spoke Bilateralism," *Review of International Economics*, forthcoming.
- [8] Tachi, K. (1999), "Network Structure Under Uncertainty," MA thesis, University of Tokyo.
- [9] 舘健太郎 (2000) 「システムリスクとネットワーク形態」三田学会雑誌 93 巻 3 号, 慶應義塾経済学会