

実世界サプライチェーンの構造的頑健性： 複雑ネットワーク・アプローチ

鬼頭 朋見^{1,2,a)}

受付日 2012年11月14日, 再受付日 2013年1月25日,
採録日 2013年3月27日

概要：多数の企業間の供給関係が織り成すサプライチェーンは、特に昨今の市場の複雑化・グローバル化にともない、複雑ネットワークの様相を呈している。構造と機能の相関性ゆえ、サプライチェーンの実構造を把握し理解することが重要であるが、データ入手困難性などの障壁により、その実構造解析は他分野と比較して非常に後れている。本研究では、これまで定性的に議論されてきた自動車産業における部品供給構造を対象とし、実データを収集した。本稿では特に、大局的に見たネットワーク全体の構造の頑健性に焦点を絞り、複雑ネットワーク解析による知見を示す。

キーワード：サプライネットワーク, 頑健性, 実データ, 複雑ネットワーク解析

Structural Robustness of Real-world Supply Chains: A Complex Network Approach

TOMOMI KITO^{1,2,a)}

Received: November 14, 2012, Revised: January 25, 2013,
Accepted: March 27, 2013

Abstract: Increasing market variability and globalization are drivers that generate great supply chain complexity, moving us towards a view where inter-firm relationships are embedded in complex supply networks. Despite the awareness of the importance of understanding the real structure, the complete picture of a real-life supply network has remained remarkably elusive mainly due to the difficulties in acquiring comprehensive empirical data sets. This study presents novel data that characterizes the Toyota supply network, and provide a thorough analysis of its structure, by employing concepts/metrics developed through complex network science. The analysis enabled us to grasp a hitherto unobtainable insight into the robustness of the network.

Keywords: supply network, robustness, empirical data, complex network analysis

1. はじめに

サプライチェーン研究は、売手と買手の二者関係、あるいは売手間の競合を考慮した売手2者と買手1者の三者関係に、主にその焦点が置かれ発展してきた [1]。近年、サプライチェーンが単なるそれらの連鎖ではなく、全体とし

てより複雑なネットワークの様相を呈することが指摘されている。しかしながら、情報の入手困難性から、いずれの研究も定性分析や事例紹介、シミュレーションのみによる検証であり [2], [3], 現実のサプライチェーンの構造をとらえたものはごくわずかである。また、これらの数少ない研究例 [4], [5], [6] も、数十〜二、三百社程度からなるネットワークの解析にとどまり、サプライチェーンの全体をとらえてはいない。組織ネットワークの構造とそのパフォーマンスの間に相関があることはすでに知られており、サプライチェーンの生産性もその構造に影響を受けることが指摘されている [7]。よって、実データに基づいたサプライチェーン構造の把握、およびその構造的特徴の理解は重要

¹ 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, the University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

² オックスフォード大学サイドビジネススクール
Saïd Business School, University of Oxford, Oxford OX1
1HP, United Kingdom

^{a)} kito@syst.u-tokyo.ac.jp

である。

本研究は、わが国の基幹産業である自動車産業を対象とし、その部品供給構造の実データの収集、そのデータに基づくサプライチェーン構造の把握および分析を行うものである。トヨタ自動車株式会社（以下トヨタ）に代表される日本の自動車アセンブラが形成する「系列」と呼ばれるサプライチェーン（サプライヤシステムとも呼ばれる）構造は、その世界的競争力の源泉であるといわれ、古くから経済・経営分野における主要研究対象であった（たとえば文献 [8], [12] など）。しかしその一方で、2011年3月の東日本大震災では、わずか数社のサプライヤが打撃を受けたことにより世界の自動車部品供給ネットワークが機能停止に追い込まれるという脆さも露呈した [13]。この事例は、サプライネットワークの実構造を把握し、特にその頑健性について理解を深めることの必要性を改めて世に知らしめるものとなった。

これをふまえ、本研究は代表的アセンブラとしてトヨタを分析の対象とし、そのサプライチェーンの頑健性に焦点を絞る。また、頑健性の解析に有用な手法として、複雑ネットワークのアプローチを用いる。現実世界の様々な関係性や現象を説明する新たなパラダイムとして発展した複雑ネットワーク研究において、頑健性は1つの大きな課題であり、インターネット、タンパク質の連鎖、人間関係など、分野を超えて多種多様なネットワークの「丈夫さ」が議論されてきている。これらの研究を通して提案された頑健性の指標をサプライネットワークに適用することで、その構造的な頑健性と脆弱性を議論する。

次章では、日本の自動車産業のサプライチェーン構造について、さらにサプライチェーンに関する複雑ネットワーク研究について、既存研究を概観する。3章では頑健性に関する複雑ネットワーク指標を示す。4章では実データによるトヨタサプライネットワークの再構築と基本構造の理解、5章でその頑健性の分析を行い、6章で議論をまとめる。

2. 既存研究

2.1 自動車部品供給構造の既存研究

1980年代より、日本の自動車製造業の優位性に関する様々な研究がなされてきた。そこで得られた既存知見・共通理解のうち、サプライチェーン構造に関係するものを、以下にまとめる。

日本の自動車アセンブラが形成する系列システムは、アセンブラを頂点としその下に複数の階層が末広がりにつながるピラミッド型として模式化されてきた（図 1）。アセンブラは1層目の300社ほどの1次サプライヤのみと直接取引をし、その各社が2層目の企業（アセンブラにとって2次サプライヤ）と取引をする。この階層は5層程度あるとされるが、3層目以降の企業の多くは、自動車部品メー

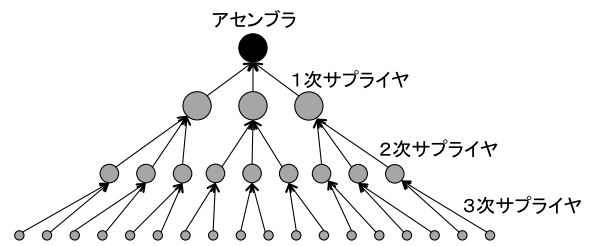


図 1 系列システムの模式図

Fig. 1 Diagram of a keiretsu system.

カではなく素材メーカなどであるといわれる [16], [33]。各社は複数の調達先と取引をしており（平均2~4社とされる [10], [11]）、下層ほど企業数が多く上層の取引先への依存度が上がる。この依存の連鎖がチェーン全体を統制することとなる。アセンブラが数千社のサプライヤと直接取引する米国型と異なり、この日本型のチェーン構造は、アセンブラ・サプライヤ間およびサプライヤどうしの間の長期取引から生まれる信頼関係に基づくとされてきた [14], [15]。また、縦のつながりに加え、情報や人材の共有、共同問題解決など、サプライヤどうしを横断的につなぐ横の関係があることも、協調的な結束力の要因として指摘されている [17], [18]。文献 [19] は、トヨタのサプライヤがこの結束力を発揮した事例として、1997年のアイシン精機株式会社（以下アイシン）の工場火災を紹介した。これは、トヨタの主要1次サプライヤであったアイシンの工場が火災で焼失し、その工場でしか製造していない部品があったためにトヨタの生産全体が停止する事態となったが、他のサプライヤどうしが速やかに協力し合うことでわずか3日後に代替生産を実現した、というものである。

ただしこれらの既存研究はいずれも、包括的な定量データの裏付けがなく、ほとんどがアンケートやインタビューに基づいた調査であった [4], [9]。また調査対象も、自動車部品工業会の協力を得たりすることで必然的に1層目の日本企業に限られてしまうため [9]、海外企業や2層目以下の中小企業を含めた全体像を把握することができなかった。さらに、模式化された図1のような図や供給関係の平均値 [10], [11] などは、サプライヤどうしの関係性がネットワーク全体を通して均質であるかのような暗黙の前提に立っており、ボトルネックの企業が存在するような構造の非均質性を考慮できていない。このことから、サプライチェーンの実像を定量データに基づき構築する必要があるといえる。

2.2 サプライチェーンの頑健性に関するネットワーク研究

上述のアイシン工場火災の事例について、複雑ネットワーク研究者はより数理的な観点から「このサプライチェーンの構造が、1社の操業停止により全体が影響を受ける脆弱性と、それでも迅速に生産能力を取り戻せる頑健性を有していたからではないか」と指摘した [20]。その後、このよ

うなサプライチェーンの頑健性（および脆弱性）が、自然界のネットワークに多く観察される「スケールフリー性」（この性質の詳細は後述する）によるものであるという主張も複数の文献でなされている（たとえば文献 [26] ではアイシン火災の事例について定性的に、文献 [25] ではマルチエージェントシミュレーションを用いてこの性質の存在が主張されている。また文献 [4] では自動車部品メーカーの取引関係構造の一部のデータを用いており、取引先を自動車関連企業に限定していないために厳密にはサプライチェーンではないものの、同様の主張がなされている）。しかしながら、いずれも包括的定量データに基づくものではなく、スケールフリー性の有無については議論の余地があると考えられる。また、他にも「スモールワールド性」[28] や「階層構造の頑健性指標」[29] といった頑健性の定量的指標が提案されており、これらについても検証する必要がある。

3. ネットワークの頑健性

自動車部品供給ネットワークを複雑ネットワークの視点からとらえたとき、各サプライヤ（およびアセンブラ）はノード、これらの間の供給関係は有向のリンクで表現できる。複雑ネットワークの構造的特徴をとらえるべく、マクロ、メソ、ミクロの各々のレベルで様々な定量指標が提案されているが、本稿ではマクロレベルの頑健性に焦点を絞る。トヨタのサプライチェーン構造について、以下の3つの指標に基づき頑健性を検証する。

3.1 スケールフリー性

複雑ネットワークの最もよく知られた概念の1つであるスケールフリー性は、ノードが持つリンクの数である次数の分布が冪乗則に従う性質である [21]。すなわち、多数の他のノードとつながっている大きなハブが存在する一方で、大多数のノードはごくわずかなノードとしかつながっていないネットワーク構造の特徴であり、様々な実世界ネットワークでこの性質が報告されている（たとえば文献 [22], [23]）。スケールフリーネットワークは、次数の低いノード（群）が機能停止あるいは消失しても、大多数のノードは連結性を保ちネットワーク全体としての機能を保持できる可能性が高いが、ハブに障害が生じた場合は全体の機能が停止する、ネットワークが分裂するという、頑健性と脆弱性をあわせ持つことが知られている [24]。2章で述べたとおり、「サプライネットワークもスケールフリー性を持つのではないか」という主張もなされており [4], [25], [26]、定量的検証が求められる。

3.2 スモールワールド性

スケールフリー性と同じく広く知られているスモールワールド性は、ネットワークを構成する任意の2つのノードが、中間にわずかな数のノードを介するだけで接続され

るという性質である。数理モデル的には、短い平均最短経路長と大きなクラスタリング係数を持つネットワークとして定義される（平均最短経路長は任意の2ノード間の最短経路のネットワーク全体の平均値、クラスタリング係数は、各ノードについてその近接ノード間に存在するリンクの、理論的に可能な総数に対する割合を計算し、ネットワーク全体の平均値をとったものとして求められる。詳細は文献 [27]）。スモールワールド性を有するネットワークは、ノード間のリンクである程度のリワイヤリング（つなぎ換え）がなされても、基本的な構造機能を保持しうる [28]。これはサプライネットワークにおいては、ある企業がサプライヤを変更する、といった関係性の再構成に対する全体構造の頑健性を示唆する。ただし注意すべきは、この性質が保証する頑健性は、既存のノード間でのリワイヤリングについてであり、ノードの追加・削除についてではない。すなわち、サプライヤの市場新規参入や退出に関して、スモールワールド性によって議論することはできない。

3.3 階層構造の頑健性指標

図1のような単純なツリー構造をした階層型ネットワークは、各ノードが直接管理するノード数が少ないゆえの効率性により組織構造の基本形としてとらえられるが、一方で上層に障害が生じると全体が機能不全に陥る脆弱性があることはよく知られている。実際の組織においては、同チームメンバの密な関係やチーム間の連携、上層と下層の直接的コミュニケーションなど、様々な「リンク」が存在することで円滑で頑健な組織経営が図られている。文献 [29] は、これらのリンクがネットワーク中にどのように作られるかによる頑健性の違いを数理的に示した。具体的には、(1) ランダムに、(2) 同じ親ノードを共有するノードどうしを、(3) 違う枝に存在する無作為に抽出されたノードどうしを、(4) 上層に存在するノードどうしのみを集中的に、(5) 上層ほど密、下層にいくほど疎になるように、という5つのルールに従ってそれぞれツリー構造にリンクを追加していき、「あるノードが機能停止しても全体が機能し続けられるか」「各ノードが流れを止めるボトルネックにならないか」の2つの指標から、これらを定量的に比較した。その結果として彼らは、(5) 上層ほど、同層のノード間をつなぐリンクが多く密な構造である「マルチスケールネットワーク」が最も高い頑健性を示すことを報告した。実データを用いて、各層のネットワーク密度 [30] を計算し、その値が上層ほど高く下層ほど低いことを示せた場合、このサプライネットワークはマルチスケールネットワークであり高い頑健性を有するといえる。

4. トヨタサプライネットワークの構造

4.1 ネットワーク・データ

本研究で用いたのは、著者が2010年に、オンラインの



図 2 サプライネットワークの全体像

Fig. 2 The whole picture of the Toyota supply network.

自動車情報プラットフォームから抽出したデータである。データ収集方法は、トヨタをクライアントとする企業のリストを抽出し、さらにそれらの企業を供給先とする企業のリストを抽出し…という手順を繰り返すことで、トヨタの1次～3次までのサプライヤを同定したものである（詳細は文献 [31] を参照）。これにより、トヨタのサプライチェーンを構成するサプライヤとして2,196社の情報を抽出した。既存研究では2次以下のサプライヤを同定できておらず、同定できた1次サプライヤも多くは日本企業に限定されており、300社程度である [32], [33], [34]。また、トヨタ以外を対象にし、実データをもとにサプライネットワークの構造を分析した研究（文献 [5], [6] など）でも、その規模は最大で300社程度である。このことから、本データは自動車部品供給ネットワークの構造を把握する実データとして最大規模であるといえる。

このネットワーク構造を可視化したものが図 2 である。図中、各点（ネットワークのノード）はトヨタおよびそのサプライヤを表し、ノード間のリンクは企業間に供給関係があることを表す。トヨタを中心に表示し、他のノードの位置は、バネの原理に基づき、つながりが強いノードどうしほど距離が近くなるアルゴリズムを用いて決定している。この図が示すように、トヨタのサプライネットワークの構造は図 1 とは大きくかけ離れ、まさに複雑ネットワークの様相を見せている。

4.2 ネットワークの基本構造

この複雑な構造を理解するため、従来の階層の定義に従いサプライヤを分類した。すなわち、トヨタに直接部品供給をする企業を1次サプライヤ、1次サプライヤに供給する企業を2次サプライヤ、2次サプライヤのサプライヤを3次サプライヤとして、その数の分布を調べた。その結果を図 3 に示す。図の重複部分は、そこに属するサプライヤが複数の役割を担っていることを示す。たとえば1次と2次の重複部の116社は、トヨタに直接部品供給し（=1次）、かつ他の1次サプライヤにも部品を供給している（=2次）。この図から、サプライネットワークが系列システムの形状

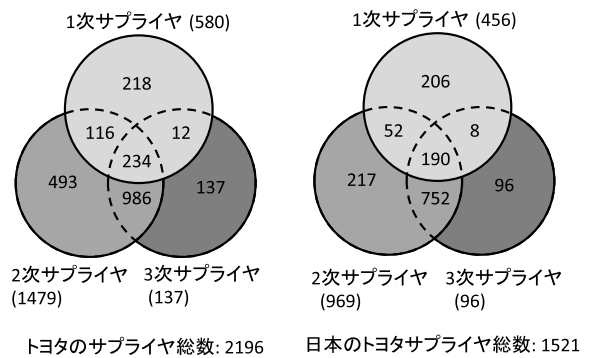


図 3 サプライヤの階層分布

Fig. 3 Suppliers' distribution across tiers.

表 1 サプライネットワーク中のリンク分布

Table 1 Link distribution in the supply network.

トヨタサプライヤ → トヨタ及び他のサプライヤへのリンク (5534)									
種類	階層間のリンク (3993)						階層内のリンク (1541)		
	1次→トヨタ	2次→1次	3次→2次	1次→2次	1次→3次	2次→3次	1次	2次	3次
リンク数	580	3095	151	137	13	17	1069	469	3

として長年描かれてきたようなピラミッド型ではなく、第2層が大きく3層目が小さい、いわば樽型をしていることが見て取れる。この一見単純な事実、実はトヨタ自体も2011年の震災以降に発見したものであり（トヨタの広報担当が、「ピラミッド型だと思っていたサプライチェーン構造が実は樽型であったようだ」と報告した [35]）、サプライヤどうしが具体的にどのようにつながっているかという複雑な全体構造については、トヨタ自体もいまだ把握していない。まずこの点で、本研究の有意性が確認できる。

また、多くの企業が複数の役割を担っており、階層間の境界が非常に曖昧であることも分かった。表 1 は、異層のサプライヤ間および同層のサプライヤ間をつなぐリンクの数を表にしたものである。この表から分かるように、実際のサプライネットワークでは階層間をつなぐリンク（2次 → 1次、3次 → 2次）だけでなく、階層内にも多くのリンクが存在する。具体的には、階層間のリンクが3,993本であるのに対し、同階層内の2ノードをつなぐリンクが1,541本であり、実にリンクの約30%が「横のつながり」であった。さらに、上から下へのリンク（1次 → 2次、2次 → 3次および1次 → 3次）もわずかながら存在しており、これらのリンクが全体の構造をより複雑化している。

さらに特筆すべき特徴は、「横のつながり」の分布の非均質性である。たとえば、上記1,541本の階層内リンクのうち、1次サプライヤどうしのリンクは1,069本であったが、図 3 から分かるとおり、1次サプライヤ580社のうち218社は横のつながりを持たず、これらすべての階層内リンクは残りの企業の間でのみ形成されている。このことは、従

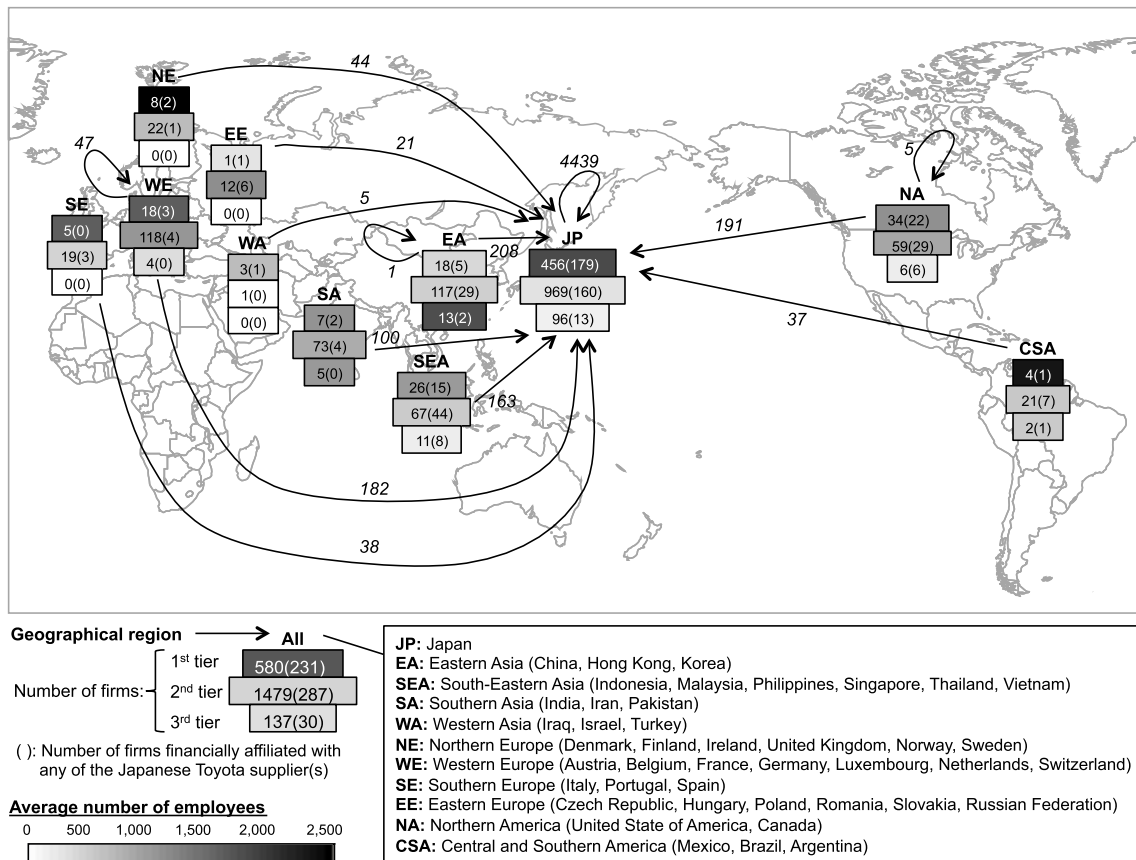


図 4 サプライヤの地理・規模・資本関係の分布

Fig. 4 Distributions of the geography, size and financial affiliation of the suppliers.

来の研究が示してきたような「供給先およびサプライヤ数の平均値」では、実際の特徴を把握できないことを示す例である。よって、後述する次数分布のような複雑ネットワーク的解析が有用である。図 3 右側には、全体と日本でのサプライヤ数の比較を示した。図から分かるように、69%の企業が日本国内に存在しており、特に1次は国内企業の割合が高い。このことから、トヨタの部品供給の主要なサプライヤは依然として大半が日本企業であり、海外企業の参入障壁の高さがうかがえる。

サプライヤの地理的分布をさらに詳細に分析したのが図 4 である。各企業は、国際連合が定義する地理区分に従って分類されている。たとえば図中 NA (北米) に示された3つのセルは、上から1次, 2次, 3次を表し、この地域には34の1次サプライヤ, 59の2次サプライヤ, 6の3次サプライヤ, 合計99社が存在することを意味する。ここから JP (日本) へのリンクは、これら99社が日本のいずれかの企業191社に供給していることを表す。() 内の数値は、左に書かれた数値のうちの何社が日本のサプライヤと資本関係にあるかを示している。さらに各セルは、企業規模(従業員数)の平均値によって色分けされている。

この図から分かるように、1次サプライヤの78%, 2次の65%, 3次の69%が日本にある企業であり、国内企業間の資本関係の数も非常に多い(資本関係のある企業のうち、1

次では79%, 2次では63%, 3次では71%が日本企業である)。これはトヨタの日本企業への依存度の高さを表している。また、日本の3層の色分けから、上層ほど規模の大きい企業が多いことが分かり、既存知見との一致が確認できた。日本以外の地域については、東アジア, 西欧, 東南アジア, 北米ではサプライヤ総数に大差はないが(100-150社程度), 3層の大きさの比率には違いがある。北米は日本と近いバランスであるのに対し、欧州では2次の割合, アジアでは3次の割合が高い。この背景には、北米では元々 GM などの大手アセンブラが形成したサプライチェーンがあり、そこに属するサプライヤが日本のアセンブラにも供給しているのに対し、たとえばアジアには、日本の大手サプライヤが安価な部品製造のために設立した現地企業が多いといった事情がある(アジア企業の、日本サプライヤとの資本関係の多さがそれを表している)。また欧州企業に関しては、資本関係のない大規模な2次サプライヤが多い。これらの企業は欧州のアセンブラに直接供給している1次サプライヤであり、すなわち欧州の1次サプライヤがトヨタの2次サプライヤとして日本市場に参入していることが分かる。

5. 頑健性の検証

次に、このネットワークの頑健性を、3章で示した概念・

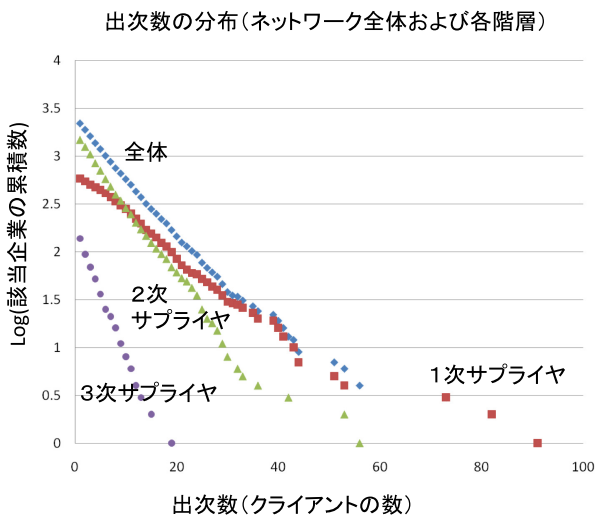


図 5 出次数 (供給先数) の分布
Fig. 5 Out-degree distribution.

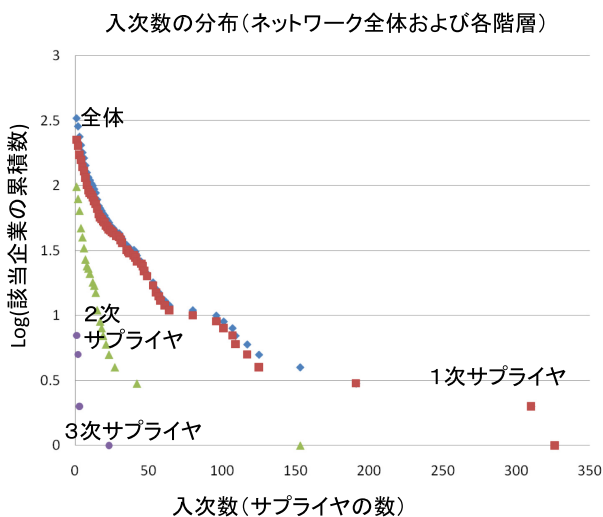


図 6 入次数 (供給先数) の分布
Fig. 6 In-degree distribution.

指標を用いて検証する。

5.1 スケールフリー性

トヨタの部品供給ネットワーク中のノードの次数分布を図 5, 図 6 に示す。図 5 は、各サプライヤがネットワーク中に持つ供給先企業の数、図 6 はサプライヤの数の分布を、各々ネットワーク全体と 1-3 次サプライヤ群の 4 つについて、片対数グラフで示している。図の見方は、たとえば図 5 で、供給先を 91 社以上持つ企業は 1 次サプライヤに 1 社あり、83 社以上持つ企業は 2 社ある。この 2 社には、91 社の供給先を持つ最大のハブも含まれる。スケールフリー性を示すネットワークの次数分布は両対数グラフ上で直線となるが、出次数分布、入次数分布ともにこの条件を満たさない。すなわち本ネットワークはスケールフリー性を有さないことが分かった。この主たる要因として、サプライヤの生産・マネジメントの能力は有限であり、大き

なハブが成長し続けるのには限界があることが考えられる。この結果は文献 [4], [25], [26] などでもなされた、定性的議論、部分的な情報のみに基づいた推測的議論への反証であり、大規模な実データを用いることの重要性を改めて強調するものである。

さらに、出次数の大きなハブと入次数の大きなハブを分析したところ、多くのクライアントを持つのは海外の大手総合メーカ (Borgwarner, Brose, Schaeffler など) であるのに対し、多くのサプライヤを持つのはトヨタと資本関係のある主要サプライヤ (デンソー, ヤマハ, アイシンなど) であることが分かった。これらの企業は、多くのサプライヤを持つがクライアントの数は少ない。このことから、海外の大手メーカは欧米諸国のアセンブラへの部品供給を行う一方で日本の市場にも参入しており、彼らにとってトヨタは多くのクライアントのうちの 1 つであるが、いわゆるトヨタ系列のサプライヤは多くのサプライヤから供給を受けたうえで、トヨタに対して忠実である (トヨタ以外への供給は、無ではないが海外企業に比べて少ない) といえる。頑健性の観点から見れば、これら海外企業は万が一トヨタへの供給が滞っても他アセンブラへの供給で業績維持が可能な戦略をとっているが、トヨタ系列企業へのダメージはトヨタのネットワーク全体に影響を及ぼすことが示唆された。アイシン火災も、大きなハブであるアイシンに障害が発生したためにネットワーク全体の連結性が断絶し全体の機能が停止してしまったという脆弱性を呈した例である。

5.2 スモールワールド性

前述したとおり、スモールワールド性があるネットワークは、短い平均最短経路長と大きいクラスタリング係数を持つとされる。ただしこれらの値の大小には、ネットワークのノード数やリンク数が大きく影響するため、規模の違うネットワークどうしの指標値を比較してスモールワールド性の程度の大小を議論することはできない。そのためノード数とリンク数を固定し、リンクをランダムに張り替えたネットワークにおいてこれらの値を計算し、その平均値 (理論値) と実際の値を比較するのが一般的に有効な手法である [36]。本ネットワークで実際に測定した平均最短経路長を L_r 、クラスタリング係数を CC_r とする。このネットワークと同じサイズでリンクをランダムに張り替えたネットワーク 1,000 個においてそれぞれ計算した平均最短経路長の平均を L_m 、クラスタリング係数の平均を CC_m とする。これらを比較したところ、 $L_r = 3.13$, $L_m = 8.04 \pm 0.04$, $CC_r = 0.21$, $CC_m = 0.03 \pm 0.1 \times 10^{-4}$ であった。すなわち本ネットワークは、理論上の値より短い平均最短経路長、大きいクラスタリング係数を持っており、スモールワールド性を有するといえる。このことから、トヨタのサプライヤどうしは密に結び付いており、供給関係の変動があってもネットワーク全体としての機能が保持

される頑健性があることが示唆される。しかしながら、新たな企業が参入した場合（ノードの追加）や既存企業が失墜した場合（ノードの消失）にはこの頑健性は保証されないため、厳密にはこのネットワークおよび自動車産業ネットワーク全体の、時系列に沿った成長・縮小のデータが必要である。

5.3 階層構造の頑健性指標

ネットワークの各層について、密度を計算した結果、1層目（1次サプライヤ間のつながりの密度）は 3.183×10^{-3} 、2層目（2次サプライヤ）は 0.217×10^3 、3層目（3次サプライヤ）は 0.161×10^{-3} であった。すなわち本ネットワークは、上層ほど密度が高いマルチスケールネットワークの構造 [29] であり、高い頑健性を有することが示された。この構造は、ネットワーク上のいずれかの場所で問題が生じたときに、その情報が速やかにネットワーク全体で共有され機能が保持される可能性を示唆し、先に述べたアイシンの火災の事例 [19] を裏付ける検証結果である。以上から、トヨタの部品供給ネットワークは、サプライヤ間およびアセンブラ-サプライヤ間の信頼関係などの他の要因があるにせよ、供給関係のみに着目した場合にも、構造的な頑健性を有するといえる。ハブとなっている企業、特に系列企業に問題が生じた際にはネットワーク全体が機能停止してしまう脆弱性をはらみつつも、情報共有に必要な企業間のリンクがすでに構築されているゆえ、迅速な回復が可能であると考えられる。

6. おわりに

本稿では、トヨタの部品供給ネットワークの構造を実データをもとに構築し、頑健性の観点からその特徴分析を行った結果を報告した。まず、過去にない規模のデータを定量分析することにより、既存の定性的知見を検証した。その結果、系列システムの現状は、長年考えられてきた階層ピラミッド型からは大きくかけ離れ、樽型かつ横のリンクが多数形成された大規模複雑ネットワークの様相を呈していることが分かった。頑健性については、3つの指標を適用し、様々な観点からその構造的頑健性（および脆弱性）を議論した。

サプライネットワークは、何百、何千、ときには何万もの企業間の複雑な関係性によって構成されるため、その全体像を把握・設計するのは非常に困難である。しかしながら一方で、全体の頑健性がいかに重要であるかを示す事例は枚挙にいとまがない。自動車産業のみに限っても、市場のオープン化、また自動車の電子化にともなう総合電機メーカーの市場参入、新興国企業の躍進など変化が激しく、事故や災害以外にもサプライチェーンの機能維持を脅かすリスクは非常に多様である。このような状況下で、より頑健なネットワークを設計することは非常に重要な課題である。

本研究は、2,000社を超える企業からなる大規模なサプライネットワークの実構造を明らかにした初めての研究であり、今後さらなる分析を行うことで、より実用的な示唆を導きうる可能性がある。

具体的な今後の発展としては、ネットワークのダイナミクスをとらえる時系列データおよび部品ごとのより詳細なデータの収集を目指す。ネットワークがこの変動環境にいかに対応し変容してきたかを、定量的に分析することの価値は高い。また、東日本大震災でのルネサスエレクトロニクス工場の操業停止が産業に大きな影響を及ぼした例は、ネットワーク構造的に見るとハブになっていないサプライヤでも、製造部品が重要で独自性がある場合には生産のボトルネックになりうることを顕著に表している。これらの可能性も含め、実世界に起こる様々なリスクのシナリオを検証できるプラットフォームを構築する土台作りを進めていく。

参考文献

- [1] Wu, Z., Choi, T.Y. and Rungtusanatham, M.J.: Supplier-Supplier Relationships in Buyer-supplier-supplier Triads: Implications for Supplier Performance, *Journal of Operations Management*, Vol.28, pp.115-123 (2010).
- [2] Pathak, S.D., Dilts, D.M. and Mahadevan, S.: Investigating Population and Topological Evolution in a Complex Adaptive Supply Network, *Journal of Supply Chain Management*, Vol.45, No.3, pp.54-67 (2009).
- [3] Surana, A., Kumara, S., Greaves, M. and Raghavan, U.N.: Supply Chain Network: A Complex Adaptive Systems Perspective, *International Journal of Production Research*, Vol.43, pp.4235-4265 (2005).
- [4] 安田 雪：自動車部品サプライヤーの取引構造にみる「ベキ法則」, *MMRC Discussion Paper*, Vol.33, 東京大学ものづくり経営研究センター (2005).
- [5] Lomi, A. and Pattison, P.: Manufacturing Relations: An Empirical Study of the Organization of Production Across Multiple Networks, *Organization Science*, Vol.17, No.3, pp.313-332 (2006).
- [6] Kim, Y., Choi, T.Y., Yan, T. and Dooley, K.: Structural Investigation of Supply Networks: A Social Network Analysis Approach, *Journal of Operations Management*, Vol.29, pp.194-211 (2011).
- [7] Corbett, C.J., Blackburn, J.D. and Van Wassenhove, L.N.: Partnerships to Improve Supply Chains, *Sloan Management Review*, Vol.40, No.4, pp.71-82.
- [8] 藤本隆宏：部品取引と企業間関係—自動車産業の事例を中心に、日本の産業組織—理論と実証のフロンティア、植草 益（編）、有斐閣(1995).
- [9] 藤本隆宏、西口敏宏、伊藤秀史編：リーディングス・サプライヤー・システム、有斐閣(1998).
- [10] 近能善範：日産リバイバルプラン以降のサプライヤーシステムの構造的変化、*経営志林*, Vol.41, No.3 (2004).
- [11] 天野倫文、金 容度、近能善範、洞口治夫、松島 茂：ものづくりクラスターの特殊性と普遍性—グローバルゼーションと知的高度化、*経営志林*, Vol.43, No.2 (2006).
- [12] Cusumano, M.A. and Takeishi, A.: Supplier Relations and Management: A Survey of Japanese, Japanese-transplant, and U.S. Auto Plants, *Strategic Management*

- Journal*, Vol.12, pp.563-588 (1991).
- [13] ロイター通信：トヨタ，東日本大震災の影響で 500 品目程度の部品調達に支障 (2011.3.29).
- [14] Cusumano, M.A.: *The Japanese Automobile Industry: Technology and Management at Nissan and Toyota*, Harvard University Press, Cambridge, M.A (1985).
- [15] Wormack, J.P., Jones, D.T. and Roos, D.: *The Machine that Changed the World*, Rawson/MacMillan, New York (1990).
- [16] Nobeoka, K.: Alternative Component Sourcing Strategies within the Manufacturer-supplier Network: Benefits of Quasi-market Strategy in the Japanese Automobile Industry, *Kobe Economic and Business Review*, Vol.41, pp.69-99 (1996).
- [17] Sako, M.: Suppliers' Associations in the Japanese Automobile Industry: Collective Action for Technology Diffusion, *Cambridge Journal of Economics*, Vol.20, pp.651-671 (1996).
- [18] Dyer, J.H. and Nobeoka, K.: Creating and Managing a High-performance Knowledge-Sharing Network: the Toyota case, *Strategic Management Journal*, Vol.21, pp.345-367 (2000).
- [19] Nishiguchi, T. and Beaudet, A.: Case study: the Toyota group and the Aisin fire, *Sloan Management Review*, Vol.40, No.1, pp.49-59 (1998).
- [20] Watts, D.J.: *Six Degrees: The Science of a Connected Age*, W W Norton & Co. Inc. (2003).
- [21] Barabási, A.-L., Albert, R. and Jeong, H.: Scale-free Characteristics of Random Networks: The Topology of the World-wide Web, *Physica A*, Vol.281, pp.69-77 (2000).
- [22] Soramäki, Kimmo, et al.: The Topology of Interbank Payment Flows, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol.379, No.1, pp.317-333 (2007).
- [23] Steyvers, M. and Tenenbaum, J.B.: The Large-Scale Structure of Semantic Networks: Statistical Analyses and a Model of Semantic Growth, *Cognitive Science*, Vol.29, No.1, pp.41-78 (2005).
- [24] Cohen, R., Erez, K., ben-Avraham, D. and Havlin, S.: Resilience of the Internet to Random Breakdowns, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.85, pp.4626-4628 (2000).
- [25] Thadakamalla, H.P., Raghavan, U.N., Kumara, S. and Albert, R.: Survivability of Multiagent-based Supply networks: A Topological Perspective, *IEEE Intelligent Systems*, Vol.19, No.5, pp.24-31 (2004).
- [26] 西口敏宏：遠距離交際と近所づきあい—成功する組織ネットワーク戦略，NTT 出版 (2007).
- [27] Watts, D.J. and Strogatz, S.H.: Collective Dynamics of 'Small-world Networks', *Nature*, Vol.393, pp.440-442 (1998).
- [28] Kogut, B. and Walker, G.: The Small World of German Corporate Networks in the Global Economy, *American Sociological Review*, Vol.66, pp.317-335 (2001).
- [29] Dodds, P.S., Watts, D.J. and Sabel, C.F.: Information Exchange and the Robustness of Organizational Networks, *Proc. National Academy of Science of the United States of America*, Vol.100, No.21, pp.12516-12521 (2003).
- [30] Wasserman, S. and Faust, K.: *Social network analysis: Methods and applications*, Cambridge University Press, Cambridge (1994).
- [31] Kito, T., Brintrup, A., New, S. and Reed-Tsochas, F.: Modelling Supply Networks: A Structural Analysis of the Toyota Supply Chain, *The 18th International Annual EurOMA Conference*, Cambridge, UK (2011).
- [32] Fruin, W.M.: *The Japanese Enterprise System*, Oxford University Press, Oxford (1992).
- [33] 藤本隆宏, 武石 彰：自動車産業 21 世紀へのシナリオ—成長型システムからバランス型システムへの転換，生産性出版 (1994).
- [34] Smitka, M.J.: *Competitive Ties: Subcontracting in the Japanese Automotive Industry*, Columbia University Press, New York (1991).
- [35] Toyota Motor Corporation Spokesman, in an Article of Japan Times (May 2011).
- [36] Uzzi, B., AN Amaral, L. and Reed-tsochas, F.: Small-world Networks and Management Science Research: A Review, *European Management Review*, Vol.4, pp.77-91 (2007).



鬼頭 朋見

1979 年生。2002 年東京大学工学部精密機械工学科卒業。2004 年同大学大学院修士課程修了。2007 年同博士課程修了。博士 (工学)。2005~2008 年日本学術振興会特別研究員 (DC2, PD)。2007~2008 年英国 Bath 大学客員研究員。2008 年東京大学人工物工学研究センター特任助教。2008~2011 年英国 Oxford 大学 Research Fellow。2012 年より東京大学大学院工学系研究科助教，2013 年より Oxford 大学 Senior Research Fellow を兼務。創発理論，マルチエージェントシステム，複雑ネットワークの研究に従事。