

グラフ理論を用いた サプライチェーン機能停止リスクの構造分析 Structural Analysis of Supply Chain Outage Risks using Graph Theory

中谷 隼* 醍醐市朗** 松八重一代***
Jun Nakatani, Ichiro Daigo, Kazuyo Matsubae,
中島謙一**** 井原智彦***** 田原聖隆*****
Kenichi Nakajima, Tomohiko Ihara, Kiyotaka Tahara

ABSTRACT

Many industrial processes and logistics networks were devastated by the Great East Japan Earthquake and the Thailand floods in 2011, and a lot of supply chains relevant to Japanese products were disrupted. In particular, it has been reported that reduced supplies of specific materials had unanticipated spillover effects on supplies of various products. Those problems became serious because of “diamond-shape” supply chain structures, and the necessity of “pyramid-shape” structures has been indicated. Their primary difference lie in “substitutability” of production processes. However, there has been no confirmed method for structural analysis of supply chains considering substitutability.

In this study, relationship between supply chain structures and their outage risks is modeled using graph theory, and a framework to assess the vulnerability of supply chain structures is developed in consideration of substitutability of production processes. First, an arbitrary supply chain

-
- * 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 助教
Jun NAKATANI Assistant Professor, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
 - ** 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 准教授
Ichiro DAIGO Associate Professor, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
 - *** 東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻 准教授
Kazuyo MATSUBAE Associate Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University
 - **** (独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 主任研究員
Kenichi NAKAJIMA Senior Researcher, Center for Material Cycles and Waste Management Research, National Institute for Environmental Studies
 - ***** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻 准教授
Tomohiko IHARA Associate Professor, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
 - ***** (独) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 グループ長
Kiyotaka TAHARA Group Leader, Research Institute of Science for Safety and Sustainability, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

structure is depicted by a directed graph, and then described as a set of “adjacency matrix” and “substitutability matrix” that is synonymous with the directed graph. By Boolean operations using those matrices, “reachability matrix” is calculated and “vulnerability matrix” and “discontinuity matrix” are defined to assess the vulnerability of supply chain structures. The developed method is applied to hypothetical supply chain structures, and numerical relationship with their outage risks is demonstrated. The vulnerability matrix and discontinuity matrix developed in this study can be utilized to specify for which parts and materials, including upstream production processes constituting the whole supply chain, substituting processes or inventories should be prepared to avoid the supply disruption of the final products and a decrease in business continuity of production processes.

要 約

本稿では、グラフ理論を用いてサプライチェーン構造と機能停止リスクの関係をモデル化し、生産プロセスの代替性を考慮してサプライチェーン構造の脆弱性を評価する枠組みを構築した。生産プロセスをノード、それらの需給関係をエッジとした有向グラフによってサプライチェーン構造を表現し、有向グラフと同義の行列を開始点としたブール演算により、脆弱性を評価する方法を提示した。提案した評価方法を仮想的なサプライチェーン構造に適用して、機能停止リスクとの関係を示した。

Keywords: supply chain risk management; supply chain disruption; vulnerability; adjacency matrix; reachability matrix

1. はじめに

1.1 背景と目的

2011年に発生した東日本大震災やタイ北部・中部における大洪水（タイ洪水）によって多くの産業プロセスや物流網が被災し、我が国に關与する多くのサプライチェーンが寸断される事例が報告された。東日本大震災の際には、被災地からの素材・部品の供給や物流網が滞り、關連する産業活動に影響を及ぼした。一方、タイ洪水の事例は、サプライチェーンのグローバル化の進展に伴い、様々な国や地域における災害の発生が我が国のサプライチェーンに影響を及ぼす状態にあることを如実に示した。特に、ある素材の供給力低下が想定されなかった形で波

及的に様々な製品やサービスの供給に影響を及ぼす事例が見られたが、サプライチェーン構造の複雑化の結果、個々の企業レベルでは關連するサプライチェーン全体の構造や脆弱性を把握することが困難になっていることも示唆される。

こうした背景から、サプライチェーンリスク管理（SCRM：supply chain risk management）の必要性が高まっている。SCRMに関する研究は2000年代後半から増加しており、SCRM關連の論文の発表件数の推移（Colicchia & Strozzi 2012）によると、1994年以降に報告が散見されたが、2001年以降は報告の件数が増加し、特に2006年以降に発表件数が一段と増加している。Colicchia & Strozzi (2012)はSCRMに関する研究の目的を大きく4つに大別しており、(a) サプライチェーン構造の複雑さと寸断

脅威の不確実性、(b) SCRM の運用（実践と手段）、(c) SCRM プロセスの組織論、(d) サプライチェーンの頑健性と回復力の向上としている。それらのアプローチには若干の相違はあるものの、全体としての方向性として、「事後の対策から事前の準備へ」「自身の生産システムだけでなく、その周辺の生産システムや影響を受ける可能性のある外部要因まで」評価対象を広げるという共通が見られる。Narasimhan & Talluri (2009) も、SCRM の分野において、リスクの発生源や程度、事業目標との関係性などと並び、サプライチェーン寸断の脅威が重要になってきたと指摘している。

今日のサプライチェーンは、以下のような理由により以前よりも脆弱になっているとも言われ (Wagner & Neshat 2010)、結果的にサプライチェーンの機能の低下をもたらしている。

- ①災害の頻度・強度の増大：洪水や地震、津波といった自然災害に限らず、事故や戦争といった人為的な災害も含め、この数十年間でサプライチェーンに影響する災害は世界的に指数関数的に増加していると言われる。
- ②サプライチェーンの複雑化：その理由には、高い水準での研究開発と生産の外部委託、供給者間の関係、供給者の能力への依存、法的な要求事項、製品ライフサイクルの短寿命化、市場や生産の国際的な拡張などがある。
- ③財政的な実績の改善の追求：収入を増大させ、経費や資産を削減するような効率性主導のサプライチェーンの管理手法は、定常的な環境では業務の無駄を減らし効率性を高める反面、寸断しやすくなる傾向にある (Hauser 2003)。
- ④計算されたリスクの想定：競争の激化に伴って、しばしば企業は競争力を高めるための“計算されたリスク”を想定するが、それは逆にサプライチェーン全体での最終消費者への供給に危険をもたらすという否定的な側面を持つ。

寸断リスクの管理については、これまでも議論されてきたが (Kleindorfer & Saad 2005)、企業にとって発生確率の低い寸断を緩和するための戦略に高い費用をかけることは正当化が困難であり、サプライチェーンの脆弱性

を定量的に評価するための手法や基準が求められている (Wagner & Neshat 2010)。特に、上記の要因のうち②のようなサプライチェーン構造に起因する潜在的なリスク要因を事前に認識するためには、サプライチェーン全体の構造分析が欠かせない。

サプライチェーンの構造分析については、これまでもグラフ理論やネットワーク理論を用いた脆弱性の定量的な評価方法 (Wagner & Neshat 2010, Mizgier et al. 2013) や、サプライチェーン構造と脆弱性の関係について定性的に分析した事例 (森原 2012) が存在する。Wagner & Neshat (2010) は、脆弱性の要因をノード、それらの相互依存性をエッジとしたグラフをもとに、「サプライチェーン脆弱性指標 (SCVI: supply chain vulnerability index)」として評価する方法を提案し、実データを用いて実証した。Mizgier et al. (2013) は、サプライチェーンネットワーク (SCN: supply chain network) において、「中心性 (centrality)」などの社会ネットワーク理論で確立された基準を用いた分析とともに、破綻することで特定の企業やネットワーク全体に対して大きな損害を引き起こす企業 (ボトルネック) を同定する方法論を提案した。

一方、森原 (2012) はサプライチェーン構造を“ダイヤモンド型”と“ピラミッド型”に大別して、特定企業に生産が集中し代替が困難な部品や素材に依存するダイヤモンド型の構造の問題点を分析している。特に、“Tier 2” “Tier 3” と呼ばれる二次下請や三次下請が特定企業に集中する傾向があると言われる (森原 2012)。実際に、東日本大震災の際には、ある特定の半導体メーカーが被災して生産が停止したが、その代替生産が不可能であったために、複数の自動車部品メーカーの生産が滞り、“Tier 1” の自動車部品の調達先を分散させていたにもかかわらず、結果的に自動車メーカーにおいて生産を続けられなくなったという事例が報告されている (湯之上 2011)。著者らが実施した企業インタビューにおいても、自社のサプライチェーンがダイヤモンド型の構造となっていることが、東日本大震災やタイ洪水に伴って部品や素材の調達に障害が発生することで初めて顕在化したという事例も明らかになっている。

ピラミッド型とダイヤモンド型の相違点を端

的に言えば、原料（部品や素材）の生産プロセスが停止した際に、その代替生産が可能な生産プロセスが存在するかどうか、すなわち“代替性”にある。しかし、サプライチェーンの脆弱性の定量的評価において、代替性を明示的に扱った事例は確認されていない。一方で、生産プロセスの代替性を考慮したサプライチェーンの構造分析は、事例に基づく定性的な議論に留まっており、より普遍的な知見を与える定量的な評価方法の確立が求められる。

本稿では、製品の生産やサービスの提供の停止（以下では、単に「生産停止」とする）を余儀なくされるリスクを「サプライチェーンの機能停止リスク」と定義して、グラフ理論を用いてサプライチェーン構造との関係をモデル化し、生産プロセスの代替性を考慮してサプライチェーン構造の脆弱性を評価する枠組みを構築する。まず、製品・部品・素材の各生産プロセスをノード、それらの需給関係をエッジとした有向グラフによって、サプライチェーン構造を表現する。次に、上記の有向グラフと同義の「隣接行列」と「代替性行列」を開始点とした行列のブール演算により、「可達行列」および本稿で定義する「脆弱性行列」「非継続行列」を算出する。このように、サプライチェーンの機能停止を離散的な事象と捉え、個々のノードの破綻によって波及的に影響を受けて生産停止を余儀なくされるノードを特定することで、サプライチェーン構造の脆弱性を数値的に評価する。

1.2 サプライチェーンの脆弱性と機能停止の定義

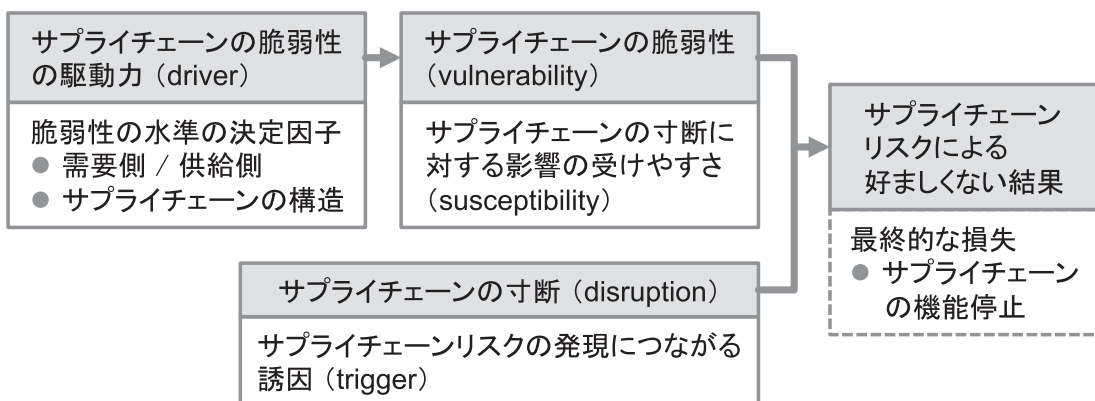
まず、サプライチェーンの「寸断（disruption）」とは、サプライチェーンリスクの発現につながる誘因（trigger）であり、単独では最終的な損失の決定因子となるものではないとされている（Wagner & Neshat 2010）。本稿では、個々のノードの破綻が該当し、災害の発生など直接的な影響によって生産停止を余儀なくされる事象を指すものとする。

一方、サプライチェーンの「機能停止（outage）」とは、あるノードの破綻に伴って以下の狭義および広義のような状況に陥り、波及的な影響を含め、各ノードが生産停止を余儀なくされる事象を指すものとする。ただし、破綻したノードの代替生産が可能なノード（代替プロセス）が存在する場合には、他の生産プロセスへの波及的な影響は回避され、サプライチェーンの機能は停止していないことになる。

●狭義の機能停止：原料を調達できなくなつて（物理的に）生産が不可能になる状況。

●広義の機能停止：供給先の生産停止によって生産の必要がなくなる状況を含む。

サプライチェーンの「脆弱性（vulnerability）」は、これまでに様々な文献によって定義されてきた（例えば、Jüttner et al. 2003）。本稿では、Wagner & Bode (2006) および Wagner & Neshat (2010) をもとに、以下のように脆弱性と寸断、機能停止との関係を定義する。これらの用語の関係を簡略に示したものが、図1である。



出典) Wagner & Neshat (2010) をもとに著者作成 (点線の四角の中は著者による追記)

図1 サプライチェーンの寸断および脆弱性と機能停止の関係

- 脆弱性とは、寸断に対するサプライチェーンの影響の受けやすさ (susceptibility) であり、それ自体が観察可能なものではない。
- 脆弱性は、観察可能なサプライチェーンの特性の関数として表される。それらの特性は、脆弱性の駆動力 (driver) と呼ばれる。本稿では、観察可能な特性として、サプライチェーンの構造に着目する。
- 所与のサプライチェーンの寸断に対する脆弱性の結果として、企業は損失を被る。本稿では、上記の定義に基づくサプライチェーンの機能停止を最終的な損失とする。

2. サプライチェーン構造の評価方法

2.1 サプライチェーン構造の記述

まず、任意のサプライチェーン構造を有向グラフによって表現した上で、それと同義の隣接行列および代替性行列によって記述する方法を提示する。

(1)有向グラフによる表現

サプライチェーン構造を表現する有向グラフを、図2に例示する。現実のサプライチェーンのように複数の最終製品を対象とすることもできるが、ここでは簡便のため、単一の最終製品 (ノード o) のサプライチェーン構造をグラフ化した。

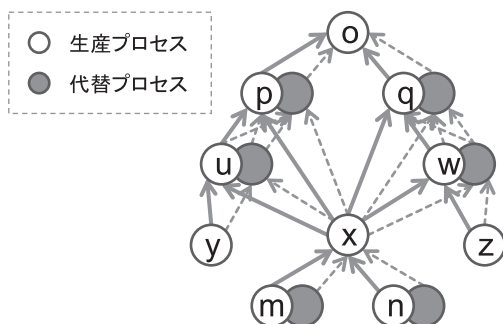


図2 サプライチェーン構造の有向グラフ (例)

まず、サプライチェーンを構成する製品・部品・素材の生産プロセスをノードとして、白抜

きの丸とノード番号で表現する。次に、生産プロセス間の需給関係は、サプライチェーンの上流側から下流側へ供給される“向き”を持っているため、ノードとノードを結ぶエッジを矢印で表現する。ノード i からノード j へ向かうエッジは、ノード i で生産される部品や素材がノード j へ供給されて、原料として用いられることを示す。特定の最終製品を対象とした有向グラフは、最終製品を「根ノード」にしたツリー構造 (の上下を逆にしたもの) になり、需給関係の上流側が「葉ノード」となる。

ここで、複数のノード (供給元) から実線の矢印が入っている状態は、いわゆる「AND 節点」であり、いずれからの供給が滞っても生産できないものとする。例えば、図2ではノード x および y からノード u に矢印が入っており、ノード x と y のいずれかでも供給が滞ると、ノード u は生産できないものとする。以上の内容は、2.1. (2) において記述される隣接行列と同義である。

生産プロセスの代替性は、各ノードの背後に代替プロセスを表す塗りつぶされた丸 (代替ノード) を配置することで表現される。ここでは、代替プロセスは、その生産プロセスを完全に代替可能 (量的・質的に十分な代替生産が可能) であると仮定する。

ノード i からの矢印と代替ノード $\tilde{i}$ からの点線の矢印が入っている状態は、いわゆる「OR 節点」であり、いずれかの供給元が破綻していなければ生産が可能であるものとする。例えば、図2ではノード p および代替ノード $\tilde{p}$ からノード o に矢印が入っているため、ノード p と $\tilde{p}$ の一方が破綻したとしても、ノード o は生産が可能であるものとする。以上の代替性に関する内容は、2.1. (3) において代替性行列によって記述される。

この有向グラフによる表現によって、1.1. で述べたピラミッド型とダイヤモンド型の構造が、代替ノードの有無によって区別することができる。図2では、ノード x に代替性がなく、4つのノードが単一のノード x に依存しているため、典型的なダイヤモンド型のサプライチェーン構造となっている。この場合のノード x は、生産拠点が一箇所しかないような特殊素材が該当する。一方で、ノード x が金属や樹脂といった汎用素材であり、複数箇所の生産拠点

が（調達先として確保して）ある場合には、サプライチェーン構造はピラミッド型であり、ノード x の背後に代替ノード $\tilde{x}$ を配置することで表現できる。

ピラミッド型とダイヤモンド型のサプライチェーン構造の差異は、従来のグラフ化（例えば、Mizgier et al. 2013）では考慮できなかった。サプライチェーンの機能停止を議論する上では、本稿で提案する AND 節点と OR 節点を区別した有向グラフが有効と考えられる。

(2)隣接行列の定義

ノード i からノード j へ向かうエッジが存在する場合に要素が $a_{ij}=1$ となる隣接行列 A （adjacency matrix）を定義して、有向グラフによって表現されたサプライチェーン構造を行列によって記述する。各行は部品や素材の供給元、各列が供給先を表す。図2に例示した有向グラフのうち生産プロセス（白抜き丸）の構造は、表1の隣接行列と同義である。

表1 サプライチェーン構造の隣接行列（例）

	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n
o										
p	1									
q	1									
u		1								
w			1							
x		1	1	1	1					
y				1						
z					1					
m						1				
n						1				

隣接行列は、化学プロセスのシステム解析（Himmelblau & Bischoff 1971）や、土木分野における問題構造の記述（竹村 1999）などにも活用されてきたものであり、「関係行列」と呼ばれることもある。ノード間の物質フローや金銭フローの量的な情報を含むものではなく、あくまで関係性の有無のみを記述するものであるが、本稿で対象とする機能停止という離散的な事象のリスクを評価するためには、必要十分な情報であるものと考えられる。

(3)代替性行列の定義

代替性行列 S （substitutability matrix）を定義して、生産プロセスの代替性を記述する。ここでは、ノード i に代替ノード $\tilde{i}$ が存在する場合に、要素（対角成分）が $s_{ii}=1$ となる。図2の有向グラフにおける代替ノードの有無は、表2の代替性行列によって記述される。

表2 サプライチェーン構造の代替性行列（例）

	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n
o										
p		1								
q			1							
u				1						
w					1					
x										
y										
z										
m									1	
n										1

本稿における代替性行列の定義では、2.1. (1)で述べた有向グラフにおける代替ノードの定義と同様に、代替プロセスが存在すれば完全な代替生産が可能であると仮定しており、量的および質的な代替可能性の情報は含まないことに注意が必要である。すなわち、ある生産プロセスが破綻した際に、その部品や素材の需要量を満たすだけの代替生産が可能であるかといった議論や、代替生産による部品や素材によって要求品質を満たせる供給先と満たせない供給先があったときに、それらの差異を考慮した議論はできない。図2の場合であれば、ノード x が破綻した際に、代替ノード $\tilde{x}$ が存在したとしても、その生産能力が供給先である4つのノードの需要を量的に十分に満たせないことや、その代替生産による部品や素材が（例えば）ノード u や w にとっては十分な品質であっても、ノード p や q の要求品質は満たせないといった状況は記述できない。

ただし、1.1.でも述べたように、本稿ではサプライチェーンの機能停止を離散的な事象と捉えており、災害発生時における生活必需品の供給可能性といった緊急時の議論には十分に貢献しうる枠組みであると言える。

2.2 サプライチェーン寸断の波及的影響の評価

次に、2.1. (2) で定義した隣接行列を開始点とした行列のブール演算により、サプライチェーン寸断による波及的影響を評価する。ここでは生産プロセスの代替性は考慮せずに、特定のノードが破綻したときに、原料の供給が滞ることで“多かれ少なかれ”波及的な影響を受けるノードや、破綻したときに特定のノードに“多かれ少なかれ”波及的な影響を与えるノードが特定される。

隣接行列 A および単位行列 I を用いて、 $(A+I)^{n+1}=(A+I)^n$ となるまでブール演算を繰り返すことで、可達行列 R (reachability matrix) が下式によって算出される

$$R=(A+I)^n \quad (1)$$

可達行列の要素が $r_{ij}=1$ であることは、 i 行の生産プロセス (ノード i) が破綻することで、 j 列の生産プロセス (ノード j) が多かれ少なかれ波及的影響を受けること意味する。各列のノードに着目すれば、その生産に波及的影響を与えるノードの行の要素は 1 となっている。

例えば、表 1 の隣接行列から算出された可達行列は、表 3 のようになる。ここから、ノード x が破綻するとノード x 自身を含め 6 つのノードが波及的影響を受けることや、どのノードが破綻してもノード o は波及的影響を受けることが分かる。

また、可達行列の i 行の要素の総和 (行和) は、ノード i が破綻したときに生産に波及的影響を受けるノードの数 (ノード i 自身を含む) を表し、 j 列の要素の総和 (列和) は、破綻したときにノード j の生産に波及的影響を与えるノードの数 (ノード j 自身を含む) を表す。すなわち、全てのノードへの影響が同等の重要性を持ち、各ノードの破綻が同等の可能性を持つ独立事象であるという前提のもとで、行和は各ノードが「破綻することでサプライチェーン全体に与える波及的影響の程度」、列和は各ノードが「いずれかの生産プロセスの破綻によって波及的影響を受ける可能性」の指標となる。

表 3 サプライチェーン構造の可達行列 (例)

	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和
o	1										1
p	1	1									2
q	1		1								2
u	1	1		1							3
w	1		1		1						3
x	1	1	1	1	1	1					6
y	1	1		1			1				4
z	1		1		1			1			4
m	1	1	1	1	1	1			1		7
n	1	1	1	1	1	1				1	7
列和	10	6	6	5	5	3	1	1	1	1	

ここで、可達行列 R はブール演算によって下式を算出したものに等しい。これが「レオンチェフ逆行列 (Leontief inverse matrix)」と同様に定式化されていることから、可達行列がサプライチェーンの波及的影響を記述したものであることが分かる。

$$R=(I-A)^{-1} \quad (2)$$

2.3 サプライチェーン構造の脆弱性の評価

さらに、2.1. (3) で定義した代替性行列と、2.2. (1) で算出した可達行列を用いた行列のブール演算により、サプライチェーン構造の脆弱性を評価する。ここでは生産プロセスの代替性を考慮した上で、特定のノードが破綻したときに、原料を調達できなくなって生産が不可能になるノードと、それらに加えて、供給先の生産停止によって生産の必要がなくなるノードが特定される。

ここで、「生産が不可能になる」という状況 (狭義の機能停止) や「生産の必要がなくなる」という状況 (広義の機能停止) は、いずれも生産プロセスにとって事業継続性 (business continuity) の低下を意味する。以下では、単に「脆弱性」と言った場合には、物理的に生産が不可能になるリスクに対する影響の受けやすさを指し、生産の必要がなくなるリスクに対する影響の受けやすさを含む場合は「非継続性 (discontinuity)」として区別する。

(1)脆弱性行列の算出

まず、1.2. で定義した“狭義の機能停止”に対するサプライチェーン構造の脆弱性を評価する。代替性行列 S と可達行列 R を用いた下式のブール演算によって算出される行列を、脆弱性行列 V (vulnerability matrix) と定義する。

$$V=(I-S) \cdot R \quad (3)$$

脆弱性行列の要素が $v_{ij}=1$ であることは、 i 行の生産プロセスが破綻することで、 j 列の生産プロセスが原料を調達できなくなって生産が不可能になることを意味する。各列のノードに着目すれば、要素が 1 となっている行のノードが破綻したときに生産が不可能になることを意味する。

例えば、表 2 の代替性行列と表 3 の可達行列から算出される脆弱性行列は、表 4 のようになる。ここから、ノード x が破綻するとノード x 自身を含め 6 つのノードが生産できなくなることや、ノード x 、 y 、 z のうちいずれかでも破綻するとノード o は生産が不可能になることが分かる。

脆弱性行列の i 行の行和は、ノード i が破綻したときに生産が不可能になるノードの数（ノード i 自身を含む）を表し、 j 列の列和は、破綻したときにノード j が生産できなくなるノードの数（ノード j 自身を含む）を表す。可達行列の場合と同様の前提(2.2.参照)のもとで、行和は各ノードが「破綻することで生産が不可能になる程度」、列和は各ノードが「いずれかの生産プロセスの破綻によって生産できなくなる可能性」の指標となる。

表 4 サプライチェーン構造の脆弱性行列 (例)

	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和
o	1										1
p											0
q											0
u											0
w											0
x	1	1	1	1	1	1					6
y	1	1		1			1				4
z	1		1		1			1			4
m											0
n											0
列和	4	2	2	2	2	1	1	1	0	0	

また、各ノードの生産停止による影響の重篤度の差異を考慮して、脆弱性行列 V に重み付けベクトルを乗じるといった応用方法もありえる。例えば、図 2 において最終製品であるノード o への影響のみを考える場合には、右から $[1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T$ を乗じる。

現実の SCRM への適用を考えたとき、脆弱性行列には以下のような活用方法（解釈）がありえる。すなわち、特に最終製品の列の要素に着目することで、その供給が停止しないようにするには、どのノードの破綻を回避するべきか（代替ノードや在庫を確保しておくべきか）が特定される。このとき、原料の直接的な調達先（Tier 1）のみではなく、直接的な需給関係のない Tier 2 や Tier 3 といったサプライチェーンの上流側の生産プロセスまで考慮できることが、こうしたグラフ理論を用いた構造分析の特長と言える。

(2)非継続行列の算出

次に、1.2. で定義した“広義の機能停止”に対するサプライチェーン構造の非継続性を評価する。可達行列 R と脆弱性行列 V を用いた下式のブール演算によって算出される行列を、非継続行列 D (discontinuity matrix) と定義する。ただし、 R^T は可達行列の転置行列であり、 I は全要素が 1 の行列を表すものとする。

$$D=I-(I-V \cdot R^T) \cdot R^T \quad (4)$$

非継続行列の要素が $d_{ij}=1$ であることは、 i 行の生産プロセスが破綻することで、 j 列の生産プロセスが原料を調達できなくなって生産が不可能になる、もしくは供給先の生産停止によって生産の必要がなくなることを意味する。各列のノードに着目すれば、要素が 1 となっている行のノードが破綻したときに、生産が不可能になる、もしくは生産の必要がなくなり、事業を継続できなくなることを意味する。定義からも明らかなように、脆弱性行列において 1 となる要素は、非継続行列において 1 となる要素に含まれる関係にある。

例えば、表 3 の可達行列と表 4 の脆弱性行列から算出される非継続行列は、表 5 のようになる。ここから、ノード o 、 x 、 y 、 z のうちいずれかでも破綻すると、最終製品であるノード o は生産が不可能になるため、他のノードも生産

の必要がなくなり、結果的に全てのノードが生産停止を余儀なくされることが分かる。この例のように、単一の最終製品を対象とした場合は、非継続性行列から得られる示唆は必ずしも多くないが、複数の最終製品を考慮した場合、生産の必要がなくなるノードと、そうではないノードの区別が明確になる（3. (3) 参照）。

表 5 サプライチェーン構造の非継続行列 (例)

	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和
o	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
p											0
q											0
u											0
w											0
x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
y	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
m											0
n											0
列和	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	

非継続行列の i 行の行和は、ノード i が破綻したときに事業を継続できなくなるノードの数（ノード i 自身を含む）を表し、 j 列の列和は、破綻したときにノード j が事業を継続できなくなるノードの数（ノード j 自身を含む）を表す。可達行列や脆弱性行列の場合と同様の前提（2.2. 参照）のもとで、行和は各ノードが「破綻することでサプライチェーン全体の事業継続性に与える影響の程度」、列和は各ノードが「いずれかの生産プロセスの破綻によって事業が継続できなくなる可能性」の指標となる。

現実の SCRM への適用を考えたとき、非継続行列には以下のような活用方法（解釈）がありえる。すなわち、生産プロセスの事業継続性を考慮して、各ノードの生産停止を回避することが目標となる場合、非継続行列の行和の大きいノードの破綻の回避（代替ノードの確保）が重視されるべきである。このとき、可達行列や脆弱性行列で表されるサプライチェーンの下流側への波及的影響のみではなく、その影響が“行って帰って”上流側の事業継続性に波及的に及ぼす影響まで考慮できることが、非継続行列の意味である。

3. 仮想的なサプライチェーン構造への適用

以上で提案した脆弱性の評価方法を、いくつかの仮想的なサプライチェーン構造に適用して、機能停止リスクとの関係が数値的に評価されることを示す。

(1) 生産プロセスの代替性の有無による比較

まず、図 3 に有向グラフを示した Case 1 の比較評価を通して、中心性の高い生産プロセス（多くのノードとエッジで結ばれているノード x ）の代替性の有無と、サプライチェーン構造の脆弱性の関係を検討する。ただし、Case 1a は図 2 に例示した有向グラフと同じ構造である。

これらの 2 つのサプライチェーン構造について、2. で述べた方法で脆弱性行列および非継続行列を算出した（表 6）。 x 行の要素に差異があり、Case 1a ではノード x が破綻すると 6 つの

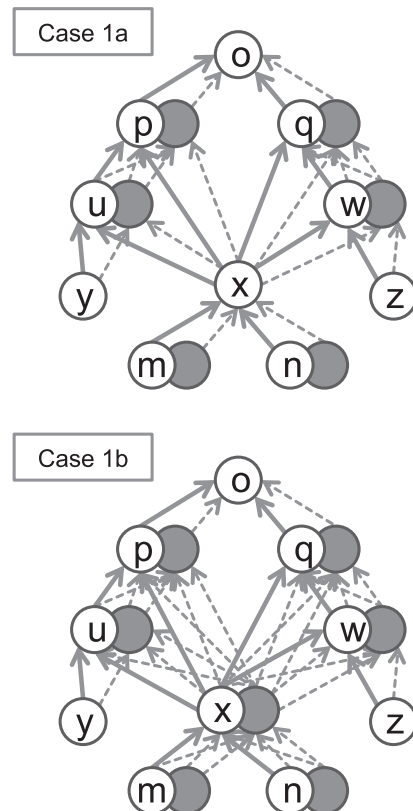


図 3 仮想的なサプライチェーン構造の有向グラフ (Case 1)

表6 仮想的なサプライチェーン構造の脆弱性行列および非継続行列 (Case 1)

	Case 1a										行和	Case 1b										行和
	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n		o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	
o	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	1 (10)	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	1 (10)
p											0 (0)											0 (0)
q											0 (0)											0 (0)
u											0 (0)											0 (0)
w											0 (0)											0 (0)
x	1	1	1	1	1	1	(1)	(1)	(1)	(1)												0 (0)
y	1	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	(1)	4 (10)	1	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	(1)	4 (10)
z	1	(1)	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	4 (10)	1	(1)	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	4 (10)
m											0 (0)											0 (0)
n											0 (0)											0 (0)
列和	4 (4)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	1 (4)	1 (4)	1 (4)	0 (4)	0 (4)		3 (3)	1 (3)	1 (3)	1 (3)	1 (3)	0 (3)	1 (3)	1 (3)	0 (3)	0 (3)	

注) 行列の要素のうち括弧内の1は、脆弱性行列では0、非継続行列では1となることを示す。

行和および列和の数値は、括弧外が脆弱性行列、括弧内が非継続行列を示す。

ノードが生産できなくなるが、代替ノード $\tilde{x}$ の存在によって、Case 1bではノード x の破綻によって生産できなくなるノードがなくなっていることが分かる。また、 o 列に着目すると、ノード o の生産停止を引き起こす可能性は、Case 1bでは(ノード o 自身を除けば)ノード y および z のみが持っていることになる。

(2)代替性の有無の組み合わせによる比較

次に、上記のCase 1と、図4に有向グラフを示したCase 2の比較評価を通して、複数の生産プロセスの代替性の有無の組み合わせと、サプライチェーン構造の脆弱性の関係を検討する。

Case 2aおよび2bのサプライチェーン構造について、2.で述べた方法で脆弱性行列および非継続行列を算出した(表7)。Case 1と同様に、 x 行の要素に差異があり、Case 2aではノード x が破綻すると6つのノードが生産できなくなるが、代替ノード $\tilde{x}$ の存在によって、Case 2bではノード x の破綻によって生産できなくなるノードがなくなっている。また、 o 列に着目すると、ノード o の生産停止を引き起こす可能性は、Case 2bでは(ノード o 自身を除けば)ノード p 、 y および z が持っていることが分かる。

ここで、Case 1aとCase 2bの脆弱性行列および非継続行列をもとに、Case 2aの状態から仮にノード p かノード x のいずれか一方に代替

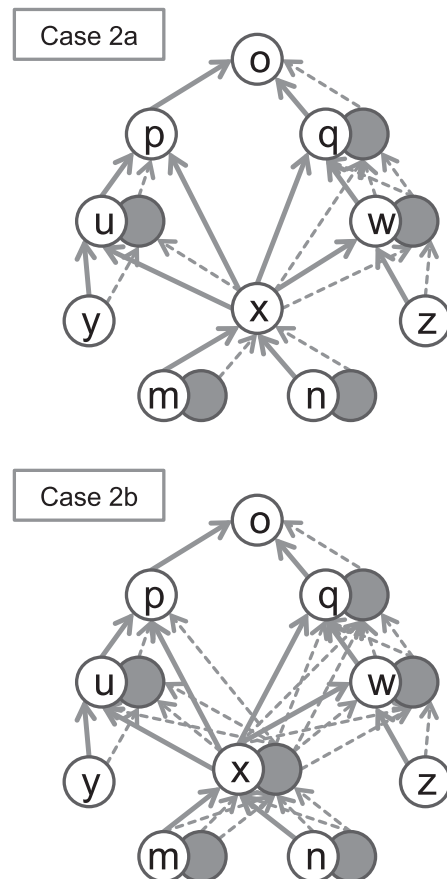


図4 仮想的なサプライチェーン構造の有向グラフ (Case 2)

表7 仮想的なサプライチェーン構造の脆弱性行列および非継続行列 (Case 2)

	Case 2a											Case 2b										
	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和
o	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	1 (10)	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	1 (10)
p	1	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	2 (10)	1	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	2 (10)
q											0 (0)											0 (0)
u											0 (0)											0 (0)
w											0 (0)											0 (0)
x	1	1	1	1	1	1	(1)	(1)	(1)	(1)	6 (10)											0 (0)
y	1	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	(1)	4 (10)	1	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	(1)	4 (10)
z	1	(1)	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	4 (10)	1	(1)	1	(1)	1	(1)	(1)	1	(1)	(1)	4 (10)
m											0 (0)											0 (0)
n											0 (0)											0 (0)
列和	5 (5)	3 (5)	2 (5)	2 (5)	2 (5)	1 (5)	1 (5)	1 (5)	0 (5)	0 (5)		4 (4)	2 (4)	1 (4)	1 (4)	1 (4)	0 (4)	1 (4)	1 (4)	0 (4)	0 (4)	

注) 行列の要素のうち括弧内の1は、脆弱性行列では0、非継続行列では1となることを示す。

行和および列和の数値は、括弧外が脆弱性行列、括弧内が非継続行列を示す。

プロセスを確保するとした場合に、どちらが優先されるべきか考察する。有向グラフからも分かるように、Case 2aに代替ノード $\tilde{p}$ を追加するとCase 1a、代替ノード $\tilde{x}$ を追加するとCase 2bと同じ構造になる。

まず、単純に脆弱性行列の行和の大小を比較すれば、Case 1aにおける p 行は0、 x 行は6であるのに対して、Case 2bにおける p 行は2、 x 行は0である。このことから、各ノードが生産できなくなることの回避が目標となる場合には、中心性の高いノード x の代替プロセスを確保するCase 2bの方が望ましいとも言える。

一方で、非継続行列の行和を見ると、Case 1aにおけるノード x もCase 2bにおけるノード p も、それらが破綻するとノード o の生産停止を通して、全ての生産プロセスで事業を継続できなくなることが分かる。また、最終製品の供給停止が問題となる場合、Case 1aにおけるノード x とCase 2bにおけるノード p は、いずれが破綻してもノード o は生産が不可能になる。こうした比較からは、Case 2aのサプライチェーンの機能停止を回避するためには、ノード p とノード x のいずれかのみでの代替プロセスの確保を優先することは、必ずしも意味を持たないといった示唆が得られる。

(3)複数の最終製品を考慮した場合の比較

最後に、図5に有向グラフを示したCase 3

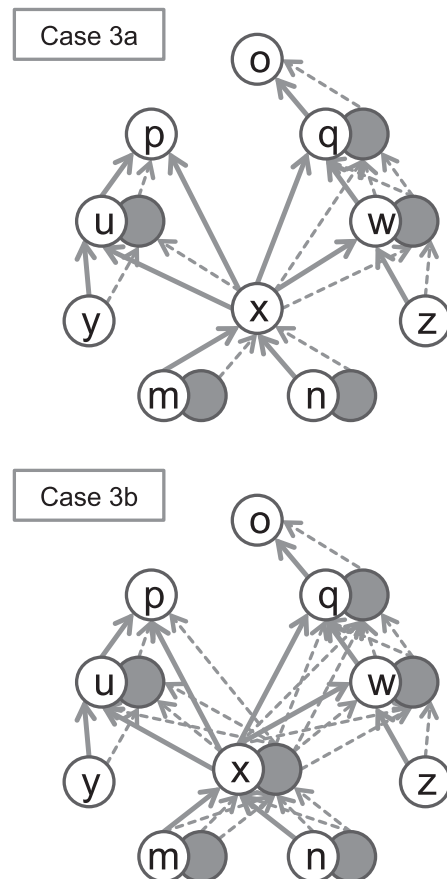


図5 仮想的なサプライチェーン構造の有向グラフ (Case 3)

表 8 仮想的なサプライチェーン構造の脆弱性行列および非継続行列 (Case 3)

	Case 3a											Case 3b										
	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和	o	p	q	u	w	x	y	z	m	n	行和
o	1		(1)		(1)			(1)			1 (4)	1		(1)		(1)		(1)				1 (4)
p		1		(1)			(1)				1 (3)		1		(1)			(1)				1 (3)
q											0 (0)											0 (0)
u											0 (0)											0 (0)
w											0 (0)											0 (0)
x	1	1	1	1	1	1	(1)	(1)	(1)	(1)	6 (10)											0 (0)
y		1		1			1				3 (3)		1		1			1				3 (3)
z	1		1		1			1			4 (4)	1		1		1			1			4 (4)
m											0 (0)											0 (0)
n											0 (0)											0 (0)
列和	3 (3)	3 (3)	2 (3)	2 (3)	2 (3)	1 (1)	1 (3)	1 (3)	0 (1)	0 (1)		2 (2)	2 (2)	1 (2)	1 (2)	1 (2)	0 (0)	1 (2)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	

注) 行列の要素のうち括弧内の 1 は、脆弱性行列では 0、非継続行列では 1 となることを示す。

行和および列和の数値は、括弧外が脆弱性行列、括弧内が非継続行列を示す。

の比較評価を通して、複数の最終製品を考慮した場合のサプライチェーン構造の脆弱性を検討する。ここでは、Case 2 におけるノード **p** からノード **o** へのエッジ（需給関係）を削除することで、ノード **o** とノード **p** において生産される 2 つの最終製品がある構造を表現した。

Case 3a および 3b のサプライチェーン構造について、2. で述べた方法で脆弱性行列および非継続行列を算出した（表 8）。**x** 行の要素に差異がある点や行和に着目した場合の解釈は、Case 1 や Case 2 と同様である。

ここで、**o** 列と **p** 列に着目すると、両方の最終製品の生産停止を引き起こす可能性は、Case 3a のノード **x** のみが持っていることが分かる。どちらの生産停止も回避しなければいけないときには、ノード **y** および **z** の破綻も回避しなければならない。一方で、例えばノード **o** とノード **p** の最終製品が互いに代替可能であり（異なるメーカーによる同種の製品など）、いずれかの供給が停止しないことを目標とする場合には、ノード **x** に代替プロセスが存在する Case 3b のサプライチェーン構造は、十分に脆弱性が小さくなっていると言えることができる。

また、**o** 行や **p** 行を見ると、いずれかの最終製品の生産が停止していなければ、生産を続けている最終製品のサプライチェーンを構成するノードは、事業を継続できることが分かる。特にノード **x** については、どの単一の生産プロセ

スが停止しても、生産の必要がなくなることはない。こうした中心性の高い生産プロセスは、代替プロセスが存在しない場合に、その破綻がサプライチェーン全体に及ぼす影響が大きい反面で、複数の最終製品のサプライチェーンを構成する生産プロセスとして、それ自身の事業継続性は高くなるといった示唆が得られる。

4. おわりに

本稿では、グラフ理論を用いてサプライチェーン構造と機能停止リスクの関係をモデル化し、生産プロセスの代替性を考慮してサプライチェーンの脆弱性を評価する枠組みを構築した。有向グラフによってサプライチェーン構造を表現し、有向グラフと同義の隣接行列と代替性行列を開始点とした行列のブール演算による脆弱性行列および非継続行列を定義して、サプライチェーン構造の脆弱性を数値的に評価する方法を提示した。提案した脆弱性の評価方法を、いくつかの仮想的なサプライチェーン構造に適用して、機能停止リスクとの関係を示した。

現実の SCRM への脆弱性行列の活用方法としては、最終製品の供給停止を回避するためには、どの部品や素材に代替プロセスや在庫を確保しておくべきかが、原料の直接的な調達先 (Tier 1) のみではなく、サプライチェーンの上流側の生産プロセスまで考慮して特定できる

ことが挙げられる。また、非継続行列を用いれば、生産プロセスの事業継続性を考慮して、多くのノードの生産停止への影響を回避することを目標としたときに、どのノードの破綻を回避するべきかを特定することができる。

以上のように、本稿ではサプライチェーンの機能停止を離散的な事象と捉え、個々のノードの破綻によって生産停止を余儀なくされるノードを特定した。ただし、ここでは完全に生産が停止しない限り、“生産できる”または“事業を継続できる”ものと考えており、生産能力の低下に伴う需給の逼迫や販売量の減少に伴う経営の悪化といった連続的な事象を捉えることはできていない。現実のサプライチェーンにおいては、平常時においても複数の供給元から同じ種類の原料を調達していることもあるが、それらが緊急時に互いに完全に代替可能かどうかは、それぞれの生産能力などの量的な要因や原料の質的な要因にも依存する。こうした離散的ではない事象も考慮しうるサプライチェーン構造の評価方法の確立は、今後の課題となる。

謝辞

本研究の実施に当たりインタビュー調査にご協力いただいた、匿名の企業・団体の方々に謝意を表する。本研究は、科学研究費補助金（基盤研究 A）「リスクに対する頑健性と柔軟性を備えた環境調和型サプライチェーン設計手法の開発」（代表：森口祐一）の一環として実施された。

〈参考文献〉

- Colicchia, C and Strozzi, F. (2012) : “Supply Chain Risk Management: A New Methodology for a Systematic Literature Review,” *Supply Chain Management: An International Journal* 17 (4) , pp. 403-418
- Hauser, L.M. (2003) : “Risk-adjusted Supply Chain Management,” *Supply Chain Management Review* 7 (6) , pp. 64-71
- Jüttner, M.P., Peck, H., and Christopher, M. (2003) : “Supply Chain Risk Management: Outlining an Agenda for Future Research,” *International Journal of Logistics: Research and Applications* 6 (4) , pp. 197-

210

- Kleindorfer, P.R. and Saad, G. (2005) : “Managing Disruption Risks in Supply Chains,” *Production and Operations Management* 14 (1) , pp. 53-68
- Mizgier, K.J., Jüttner, M.P., and Wagner, S.M. (2013) : “Bottleneck Identification in Supply Chain Networks,” *International Journal of Production Research* 51 (5) , pp. 1477-1490
- 森原康仁 (2012) : 「サプライチェーンの混乱と震災復興政策」『資本と地域』 8, pp. 1-19
- Narasimhan, R. and Talluri, S. (2009) : “Perspectives on Risk Management in Supply Chains,” *Journal of Operations Management* 27 (2) , pp. 114-118
- Wagner, S.M. and Bode, C. (2006) : “An Empirical Investigation into Supply Chain Vulnerability,” *Journal of Purchasing & Supply Management* 12 (6) , pp. 301-312
- Wagner, S.M. and Neshat, N. (2010) : “Assessing the Vulnerability of Supply Chains using Graph Theory,” *International Journal of Production Economics* 126, pp. 121-129
- Himmelblau, D.M. and Bischoff, K.B. (1971) : 「システム解析の原理」『プロセス解析計算法』、井本立也・原納淑郎・小郷良明・矢野元威・西泰英 訳、培風館、東京、pp. 223-276
- 竹村哲 (1999) : 「ISM 法による構造化」『問題解決の技法 合意形成のための支援化システム考』、海文堂、東京、pp. 45-63
- 湯之上隆 (2011) : 「トヨタの誤算とルネサスの苦悩：マイコンシェア 1 位で何故か赤字」『Electronic Journal』 2011 年 6 月号、pp. 36-39

