

# ベイズ推定によるサプライチェーンのリスク分析

芦中拓志 生天目章 久保正男

昨今の生産体制の多様化により、多数の企業が複雑なネットワークを構成している。その様な複雑ネットワークの中では企業の倒産といった、リスクに対しての影響力、対策の効果が不鮮明であり、定量化、識別が困難である。本稿では実際のサプライチェーンネットワーク（以下 SCN）において、エージェントベースモデルのベイジアンネットワークによる、そのリスクに対する脆弱性及び影響力、対策によるリスクへの影響力を求めた。

## Risk Analysis of the Supply Chain with the Bayesian Estimate

TAKUSHI ASHINAKA AKIRA NAMATAME  
MASAO KUBO

By the diversification of the production system of these days, a large number of companies constitute a complicated network. Because the influence for the risk, such as the bankruptcy of the company and center measures are indistinct in such a complicated network, quantification and identification are difficult. Therefore, we quantified weakness influence and the influence to the risk by counter measures with the Bayesian network of the Agent Based Model in a real Supply Chain Network (SCN).

### 1. はじめに

サプライチェーンネットワーク（SCN）はグローバル化に際し、多様性のある供給関係、消費者の要求から、複雑なネットワークを構成している。そのため、供給源の断絶や企業の倒産等の SCN における潜在的なリスクは一概に把握できず、予想がつかない。また、近年東日本大震災やタイの大洪水等があり、災害に対してのリスク管理も一層重要となっている。そのため、リスク評価のみならず、これに企業が講ずるリスク対策の評価も、より効果的なものが求められる。

これをふまえ、本研究はベイジアンネットワークによって SCN に対するリスクを定量化し、そのリスクが発生した際の影響の評価と、講じた対処の効率を定量化することを目標とした。

次章ではリスク分析に関する研究について、既存研究を概観する。3章では本研究で提案されるモデルについて示す。4章ではサプライチェーンの代表的なパターンとして知られている SCN を使い分析を実施し、5章では議論をまとめる。

### 2. 既存研究

リスク分析に関する研究としては統計学やデータ分析に基づく解析法が盛んであった[1][2]。しかし、分析後のリスク発生確率に基づく悪影響については議論がなされるが、そのリスクに講ずる処置後の改善具合については把握することができなかった[6]。したがって好影響に対しても考慮した分析が必要と考えられる。

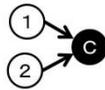
### 3. モデル

#### 3.1 ベイジアンネットワークとアルゴリズムの概要

ベイジアンネットワーク（BN）は、非循環有向グラフを条件付き確率によって因果関係を記述するグラフィカルモデルの一つである。BN は SCN を有向グラフとして表すことができ、SCN の分析に適している[3]。リスクを表す方法として、ここでは企業をノードとして表し、SCN における断絶・崩壊を表す状態として、1 と 0 の二値を取ることとする。崩壊とは企業の倒産等のリスクが発生した状態を指す。また、ノードにリスクパラメータとして、自壊率  $\alpha$ 、影響率  $\beta$  を付与する。これによって SCN の繋がりをネットワークで構築し、各リスクをベイズ推定により確率として定量化する。全てのノードのリスク発生確率が求められ次第、感度分析を行い、ノード崩壊時の影響（悪影響指標） $D_i$  と対策を講じた場合の影響（好影響指標） $F_i$  を算出し、対策を講ずるべき重要ノードの評価を行う。

### 3.2 リスク評価

本手法では、リスク推定のために  $\alpha$ 、 $\beta$  を使ってノードの崩壊確率を求める。 $\alpha_i$  は、親ノードから影響を受けずして、ノード  $i$  が単独で崩壊する確率である。 $\beta_{ij}$  は、親ノード  $j$  が崩壊した際に、子ノード  $i$  が連鎖して崩壊する確率である。 $Z_i$  は、ノード  $i$  が崩壊する総崩壊確率を表す。例として、3つのノードで構成された SCN について、全てのノードの  $\alpha = 0.05$ 、 $\beta = 0.5$  とした際、指向する目標ノード C に焦点を置いた結果を図 1 に示す。



状態 $u$	$Pr(C u)$	$Pr(u)$
$u_1 = \{1, 2\}$	$\alpha_C = 0.05$	$(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \approx 0.90$
$u_2 = \{1, 2\}$	$1 - (1 - \alpha_C)\beta_{C 2} \approx 0.53$	$(1 - \alpha_1)\alpha_2 \approx 0.05$
$u_3 = \{1, 2\}$	$1 - (1 - \alpha_C)\beta_{C 1} \approx 0.53$	$\alpha_1(1 - \alpha_2) \approx 0.05$
$u_4 = \{1, 2\}$	$1 - (1 - \alpha_C)\beta_{C 1}\beta_{C 2} \approx 0.76$	$\alpha_1\alpha_2 \approx 0.00$

$$Z_C = \sum_u Pr(C|u)Pr(u) \approx 0.097$$

図 1 BN によるリスク推定

Figure 1 Risk estimation with BN.

### 3.3 悪影響指標と好影響指標

各ノードの  $Z_C$  が求められたならば、悪影響指標 ( $D_I$ ) と好影響指標 ( $F_I$ ) を感度分析によって算出する。 $D_I$  は次のように目標ノード  $n$  の  $\alpha$  を 1 とした場合の  $Z$  を求め、 $\alpha$  を変更しなかった場合の  $Z$  との差異とする。

$$D_I(n) = \{Z_C(n) - Z_C; Z_C(n) \text{ is the total risk with } \alpha_n = 1\} \quad (1)$$

$F_I$  は、目標ノード  $n$  の  $\alpha$  と  $\beta$  を 1 とした場合の  $Z$  の差異とする。

$$F_I(n) = \left\{ Z_C - Z_C(\bar{n}); Z_C(\bar{n}) \text{ is the total risk with } \alpha_n = \beta_{n|j} \right. \\ \left. = 0 \forall i \text{ parent of } n \right\} \quad (2)$$

以上の 2 つの指標を基に、各ノードを比較、重要ノードを検出する。また、図 2 に両指標から得られるリスクに対する評価[4]を示す。

高 $D_I$	全体的なリスク改善に対しては役に立たないが、崩壊時の影響が大きい。	影響率が高く、全体の崩壊を防ぐためにも重要なノードであり、リスク対策を採るべきである。
低 $D_I$	重要なノードではない。	全体的なリスク改善のためには重要であるが、崩壊による影響は少ないノード。
	低 $F_I$	高 $F_I$

図 2  $D_I$ 、 $F_I$  によるリスク評価。

Figure 2 Risk evaluation by and  $D_I$   $F_I$ .

## 4. 実装

本モデルを実装させる SCN は穀物生産 (SBF) (図 2 の左)、コンピュータ周辺機器生産 (CPE) (図 3 の右) の 2 つである[6]。それぞれの SCN に対して、提案するリスク分析を実施した。

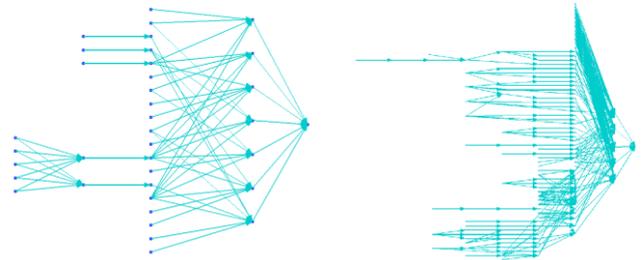
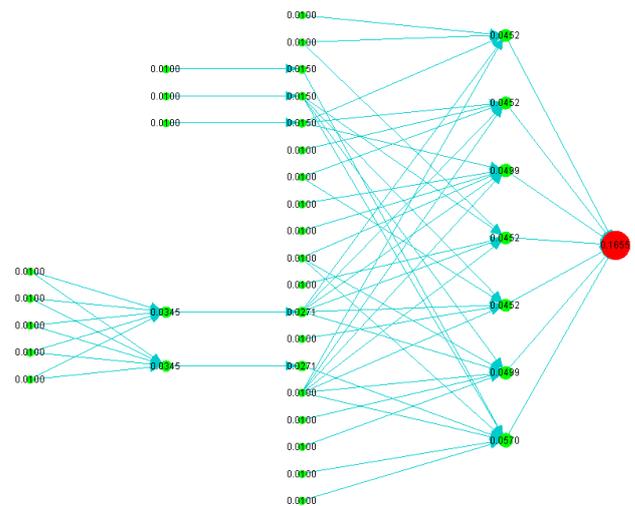


図 3 実装 SCN

Figure 3 SCN for implementation.

### 4.1 SBFSCN

ノード数 37、リンク数 56 の SCN。1 次ノード群に対して複雑なネットワークを構成している。図 3 に、各ノードの  $Z$  (図 4 (a))、 $D_I$  (図 4 (b))、 $F_I$  (図 4 (c)) を示す。



(a)

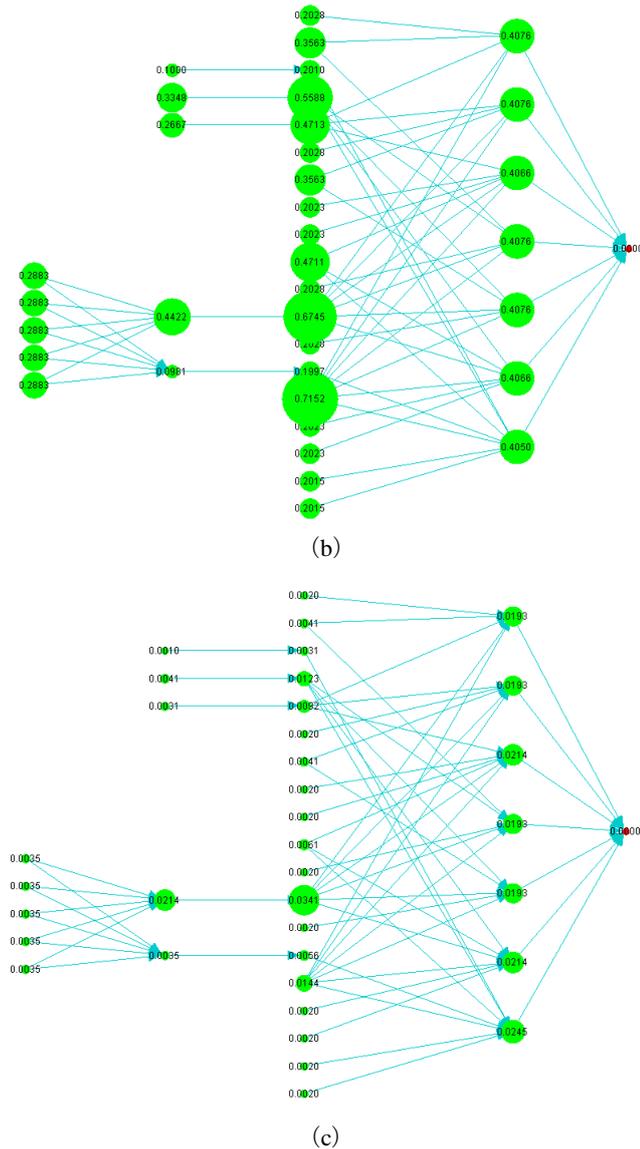


図4 SBFSCN に対し、全ノード  $\alpha = 0.01$  と  $\beta = 0.5$  のパラメータを与えた場合の崩壊総確率 (a)、悪影響指標 (b)、好影響指標 (c) を赤ノードに対して算出した結果。

Figure 4 As a result of, for SBFSCN, having calculated disruption total probability (a), disruption impact (b), fortification impact (c) when I gave a parameter of all node  $\alpha = 0.01$  and  $\beta = 0.5$  for red node.

#### 4.2 高速化アルゴリズム

CPESCEN に本モデルを実装するにあたり、計算量の増加によって処理速度の低下が見られた。よって計算量の減少を目標として高速化アルゴリズムの実装をした。BN による  $Z_C$  の一般式は

$$Z_C = \alpha_C + (1 - \alpha_C) \prod \beta_i \prod Z_j \quad (3)$$

となるが、高速化アルゴリズムによる本モデルでは  $\alpha$  が微

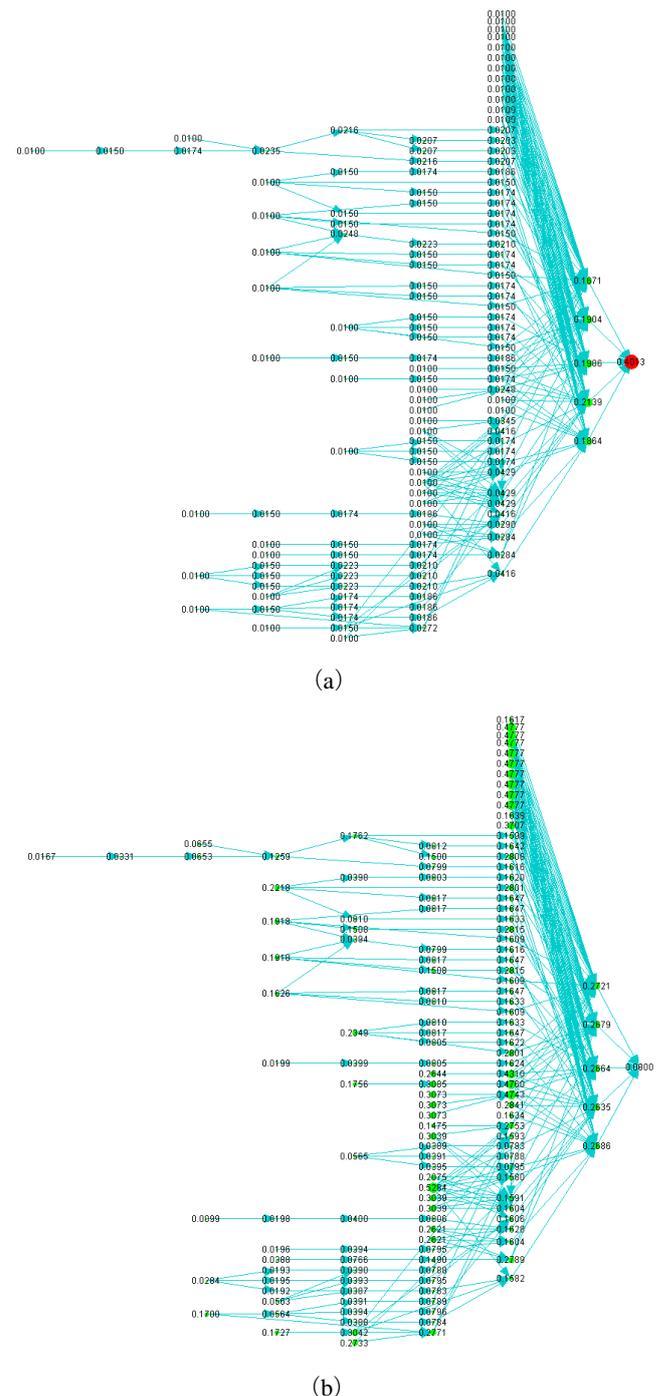
小であるという前提のもと、複数のノードによる同時崩壊を考慮から外すこととする。これにより  $Z_i$  の一般式は

$$Z_C = \alpha_C + (1 - \alpha_C) \sum \beta_i Z_i \quad (4)$$

となり、計算量の減少を可能とした。

#### 4.3 CPESCEN

ノード数 142、リンク数 253 の SCN。2 次ノード群に対してより複雑な九段構造のネットワークを構成している。図 5 に、各ノードの  $Z$  (図 5 (a))、 $D_i$  (図 5 (b))、 $F_i$  (図 5 (c)) を示す。



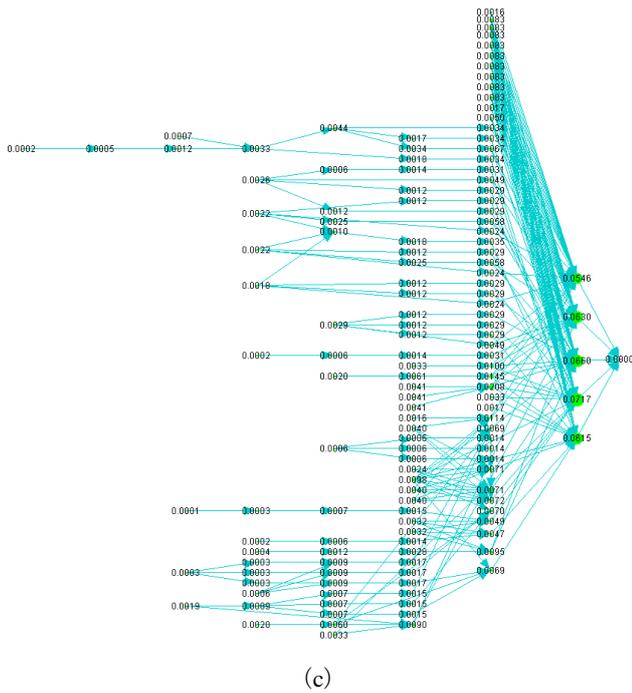


図 5 CPESCN に対し、全ノード  $\alpha = 0.01$  と  $\beta = 0.5$  のパラメータを与えた場合の崩壊総確率 (a)、悪影響指標 (b)、好影響指標 (c) を赤ノードに対して算出した結果。

Figure 5 As a result of, for CPESCN, having calculated disruption total probability (a), disruption impact (b), fortification impact (c) when I gave a parameter of all node  $\alpha = 0.01$  and  $\beta = 0.5$  for red node.

#### 4.4 分析

感度分析を実施し、観察した結果、悪影響指標と好影響指標が必ずしも一致しないことを明らかにした (図 6)。また、悪影響指標に注目すると、指向するノード数が多ければ多いほど、もしくはそのようなノードに対して指向するほど全体へ与える影響が大きいことが分かる。一方、好影響指標については指向ノードの多さも重要ではあるが、より指標へ影響を及ぼす要因として、リスク発生確率の高いノードによって指向されるかどうか挙げられる。防護すべきノードへの経路を、リスクの高いノードから遮断すればするほど数値が高くなることが分かる。また高速化アルゴリズムの採用によって、ノード数、リンク数の増大による負荷が軽減されており、複雑な SCN に対しても、より精練されたリスク評価を可能とした。

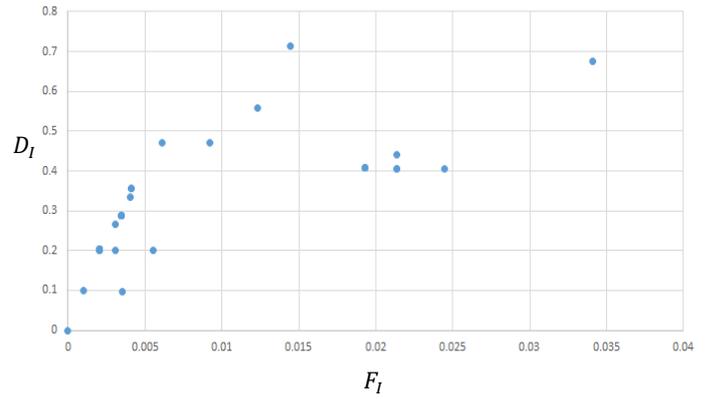


図 6 SBFSCN の各ノードの  $D_I$ 、 $F_I$  の散布図。

Figure 6 Scatter diagram of  $D_I$  and  $F_I$  of each node by SBFSCN.

#### 5. おわりに

本研究では、SCN に対するリスクを確率で定量化し、そのリスクが発生した際の悪影響、対処した際の好影響について議論した。リスクパラメータを自壊率と影響率の 2 つに絞り、簡略化を図ったため、様々なリスクへの対応が可能である。今後の課題として、より現実的な SCN とするためにリスクパラメータに対しても分析と評価が必要となる。

#### 参考文献

- 1) 森 治憲.: ベイズ法における事前分布の持つ情報の評価法, 日本統計学会誌, Vol.40, pp.1-22(2010)
- 2) Adam Borison and Gregory Hamm.: How to Manage Risk(After Risk Management Has Failed)(2010)
- 3) A. Darwiche.: Bayesian Networks(2008)
- 4) Anssi Kaki, Ahti Salo and Srinivas Talluri.: Disruptions in supply networks: a Probabilistic Risk Assessment approach(2013)
- 5) M. Ivy. Elizabeth and Donaldson Soberanis.: An extended Bayesian network approach for analyzing supply chain disruptions(2010)
- 6) S. P. Willems.: Data Set Real-World Multiechelon Supply Chains Used for Inventory Optimization, Manufacturing and Service Operations Management, Vol.10, No.1, pp.19-23(2008)