

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560153

研究課題名(和文) 災害時物流の脆弱性と企業行動の微視的分析に基づく新たな物流リスク評価手法の開発

研究課題名(英文) Developing risk evaluation methodology for logistics at the disaster site based on the microcosmic analysis of business behavior and vulnerability.

研究代表者

小野 憲司 (ONO, Kenji)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：10641235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：2011年の東日本大震災によるサプライチェーンの寸断から我が国のモノづくり産業が全国規模、世界規模で操業停止した経験に鑑み本研究では、震災の影響が著しかった自動車産業サプライチェーンのモデル化と、災害がサプライチェーンに及ぼす負のインパクトの測定、サプライチェーンマネジメント(SCM)改善策の効果の評価を行った。

SCM改善策の評価結果は、部品在庫の積み増しの効果は低い、部品調達は海外よりも国内への分散化が効果的、災害によって生じたサプライチェーンの隘路に対する共同復旧支援の効果は高い等の結果が得られ、我が国の製造業全般の災害時SCMのあり方に示唆を与えるものとなった。

研究成果の概要(英文)：Based on an experience of supply chain disruption and the resulting shutdown of industry productions due to the Great East Japan Earthquake in the national and global context, an supply chain model of automobile industry, has been developed for measuring a negative impact of the disaster and evaluating efficiency and effectiveness of strategies undertaken by the companies for improving supply chain management (SCM). The numerical model indicated: i) inventory increase in automotive parts is considered less efficient and effective, ii) spreading parts procurement sources within Japan is likely an effective proactive measure, and iii) mutual assistance among the automobile supply chain participants in order to remove supply chain bottlenecks such as the damaged production facilities looks like the most sound strategy. These simulation results may provide suggestions and implications for further improving logistics operation at the time of disaster.

研究分野：物流事業継続マネジメント

キーワード：災害リスク評価 サプライチェーンマネジメント 数値モデルシミュレーション 東日本大震災 ロジスティクス 自動車部品供給構造

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東日本大震災によって東北、北関東地域で生産される素材、中間製品類の供給が停止し、ICチップ等の電子工業製品や自動車部品の生産に支障をきたした結果、完成自動車や家電製品等の我が国のモノづくり産業の全国規模、世界規模での操業低下が発生した。このことはまた、日本経済の沈滞や海外における日本の製造業の業績不振の一因となった。

これらの背景には、自動車産業をはじめとする我が国のモノ造り産業の競争力が、複雑で高度なサプライチェーン(SC)に支えられており、災害に対して著しく脆弱な物流、生産構造となっていることにある。

上記に鑑み日本の主要な製造業各社は、東日本大震災を契機として、サプライチェーンの災害脆弱性の緩和策を講じ始めたが、これらの策の中には、我が国の素材、部品メーカーにいたずらに負担を強いるものも多く、ひいては、我が国の経済の足腰の弱体化と企業の海外移転を招く危険性をはらんでいると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究は、東日本大震災後に発生した日本の製造業SCの断絶と生産停止等の社会的・経済的混乱が、複雑で可視性の低いSCの構造に起因するとの認識に基づき、わが国製造業の事業継続性を戦略的、政策的に確保していくためのSC構造モデル開発の方法論を検討するものである。

一般的に製造業のSCは、数百～数千の事業所活動情報や災害に対する事業所の脆弱性情報等から成る膨大な企業活動データと大規模ネットワーク構造を内包し、一般には公開されない企業情報を多く含む。

このようなことから本研究では、代表的な製造企業グループとして自動車産業を対象としたSCの微視的構造の分析とモデル化を行い、SCの脆弱性改善や可視化を進める上でのモデルによるアプローチの有効性を明らかにするとともに、もって、日本のモノづくり産業の持続的な発展戦略検討のための大規模SCモデルの構築を、製造企業自らが参加する産・官・学連携プロジェクトとして、推進していくことの意義を探る。

### 3. 研究の方法

本研究では、企業ヒアリング等による企業SC構造の分析を行うとともに、マーケティング会社が収集した自動車完成車や部品生産データを取得し自動車産業のSCの実態解明を試みた。また、これらの分析結果を踏まえつつ、経済産業省が公表する生産動態統計機械統計編の月別データに基づき、四輪車生産ラインとこれを支える自動車部品類のSCの連鎖構造モデルを構築した。

さらにこのモデルを用いて、東日本大震災以降日本の自動車メーカーが進める、部品調

達の分散化や部品在庫の積み増し等のSC強化策についてその効果を評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 自動車産業サプライチェーンモデルの構築

日本国内を被災地とそれ以外の地域に2分し、6分類の自動車部品についてそれぞれのサプライヤーが被災地の内と外に各1ヶ所の生産拠点を有し、合計12生産拠点から四輪車生産ラインに部品を納入する構造モデルを構築した。

モデル上のSCの動きは以下のように記述できる。

- 部品サプライヤーは、前年度の四輪車生産実績に基づき部品の生産準備を行い部品工場内の倉庫に保管するが、在庫が管理基準値を超えると生産を停止。
- 部品工場内倉庫の自動車部品は、納品時期調整のための中間在庫拠点に出荷され、四輪車生産ラインからの指示に従って納品。
- 部品サプライヤーは一定の管理基準値に従って中間在庫拠点の在庫量も調整。これに従って工場の部品出荷量が増減。
- 部品生産から四輪車組み立ての間のリードタイムを考慮。

なおモデルでは、東日本大震災時に一部の代替性の低い部品の供給停止によって四輪車生産ラインが操業できなくなったことを勘案し、被災地において生産される自動車部品とその他地域において生産される同種の部品間に完全な非代替性を仮定した。

上記のモデルを数式で記述すると以下のとおりとなる。

まず、完成車の生産と部品供給の関係は式(1)～(3)で定式化される。

$$P^t = \text{Min}(P_0^t, \alpha_{ij} \times S_{ij}^t) \quad (1)$$

$$S_{ij}^t = H_{ij}^{t-1} \quad (2)$$

ここで、

$P_0^t$  : 時点 t(日)の四輪車生産計画(台/日)

$P^t$  : 時点 t(日)の四輪車生産実績(台/日)

$S_{ij}^t$  : 地区 iにおいて生産される j 分類の部品 (以下「部品 ij」と言う)の時点 t(日)における完成車生産ラインへの投入可能量(百万円/日)

$H_{ij}^t$  : 時点 t(日)の部品 ij の中間在庫の量(百万円)

$\alpha_{ij}$  : 部品 ij 1 単位によって生産される四輪車台数 (千台)。

また、中間在庫拠点及び部品工場における在庫は、式(7)及び(8)の様に表せる。

$$H_{ij}^t = H_{ij}^{t-1} - S_{ij}^t + s_{ij}^t + s_{oj}^t \quad (3)$$

$$W_{ij}^t = W_{ij}^{t-1} - d_{ij}^t + p_{ij}^t \quad (4)$$

ここで、

$W_{ij}^t$  : t(日)の部品 ij の工場在庫量(百万円)

$s_{ij}^t$  : t(日)に中間在庫拠点に納入される部品 ij (百万円)

$s_{oj}^t$  : t(日)に国内外で分散・代替調達される j 分類の部品入荷量 (百万円)

$d_{ij}^t$ : t(日)に工場倉庫から中間在庫拠点に向けて出荷される部品  $ij$  (百万円)  
 $p_{ij}^t$ : t(日)の部品  $ij$ の工場生産量(百万円)

工場と中間倉庫の間の輸送時間を考慮し、

$$s_{ij}^t = d_{ij}^{t-\tau_{ij}} \quad (5)$$

$$s_{oj}^t = d_{oj}^{t-\tau_{oj}} \quad (6)$$

ここで、

$\tau_{ij}$ : 部品  $ij$ の工場出荷から中間在庫拠点納入までのリードタイム (日)

$\tau_{oj}$ : 分散・代替調達

部品との中間在庫拠点納入までのリードタイム (日)

工場からの出荷にあたっては、将来の四輪車生産計画台数と前日の実生産台数、輸送リードタイムを考慮することから、

$$d_{ij}^t = \text{Max}(P_0^{t+\tau_{ij}}/\alpha_{ij}, P^{t-1}/\alpha_{ij}) \times \beta h \quad (7)$$

$\beta h$ : 中間在庫拠点における在庫調整パラメーター。中間在庫が基準値以下の場合  $\beta h=1$ 、在庫管理基準の上限值を超えた場合  $\beta h=0$ 。

出荷可能な部品量は工場在庫の範囲内であればいけないので、次式が満たされる。

$$d_{ij}^t \leq W_{ij}^t \quad (8)$$

さらに、部品工場における部品  $ij$ の生産高は、(8)式で表せる。

$$p_{ij}^t = (P_0^{t+\tau_{ij}}/\alpha_{ij}) \times \beta w \quad (9)$$

$\beta w$ : 工場在庫調整パラメーター。工場在庫が基準値以下の場合  $\beta w=1$ 、在庫上限値を超えた場合  $\beta w=0$ 。

上記のようなサプライチェーンモデルの四輪車生産台数と各部品分類の投入関係を決定する前出の $\alpha_{ij}$ は、平成19年~24年の72ヶ月分のデータから求めた。図1にシャーシ及び車体部品の $\alpha_{ij}$ を事例として示す。

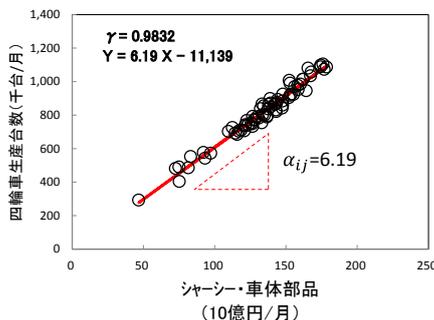


図1 シャーシ等部品の $\alpha_{ij}$

また、モデル構築に用いたその他の主な外生パラメーターは表1の通りとした。

表1 モデル構築用の外生変数

被災地域の部品製造シェア	輸送リードタイム	
	東北地方からの供給	その他地域からの供給
2.5%	3日	2日

これらの条件のもとに平成23年1月から12月の1年間を対象として、以下の3段階でモデルのパラメーターを決定した。

- 東日本大震災の影響が少ないと考えられる平成23年1月~2月及び7月~12月の四輪車生産台数について、実績値とモデル値の分散を最小とするサプライヤー在庫管理基準値を決定。
- 東日本大震災の影響下にある平成23年3月~6月の四輪車生産台数について、実績値とモデル値の分散を最小とする四輪車生産ライン緊急停止日数を決定。
- 6分類の部品類について、2011年の月産生産額の実績値とモデル値の分散を最小とする部品生産停止日数を決定。決定されたパラメーターを表2に示す。

表2 推定パラメーター一覧

4輪車生産	自動車部品	4輪車台数/部品投入額 (台/百万円)	部品生産停止期間 (日)	目標在庫水準
生産ラインの中断日数 ↓ <b>18.8日</b>	シャーシ及び車体部品	6.2	51.5	最小:244% 最大:700%
	機関部品	10.6	44.6	
	駆動伝動部品	3.7	48.0	
	操縦・懸架制動装置部品	20.4	23.6	
	内燃機関電装品	25.0	17.8	
	その他部品	20.1	51.7	

また、四輪車生産台数及び自動車部品生産のモデルの適合度は図2及び図3に示す通りとなった。

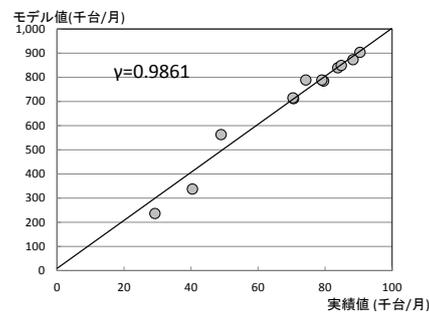


図2 四輪車生産台数のモデル適合度

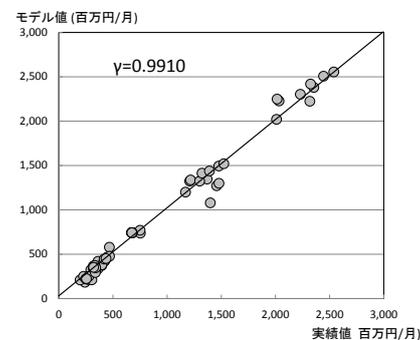


図3 自動車部品生産額のモデル適合度

東日本大震災が発生した2011年1~12月の実績とモデル値の相関係数は、四輪車生産台数について0.9861、自動車部品生産額は0.9910となり、高い適合度が得られた。

(2) 東日本大震災の影響の再現結果

図4は2011年の四輪車生産台数について、実績値とモデルによる再現値を比較したものである。東日本大震災による四輪車生産台数の落ち込みがほぼ再現されたと言える。

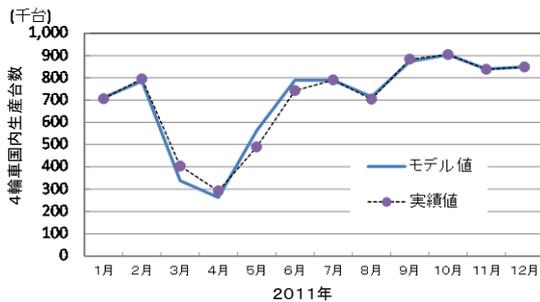


図4 2011年の四輪車生産の実績とモデル値

また自動車部品の内、シャーシ・車体部品並びに駆動・伝導及び操縦装置部品の生産額について2011年の実績とモデル値を比較したものを図5及び図6に示す。

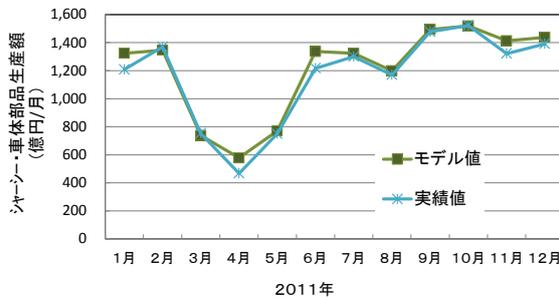


図5 シャーシ・車体部品生産額

シャーシ・車体部品やその他部品については高い再現性が得られたが、駆動・伝導及び操縦・懸架制動装置等の4部品類については、全部品類共通の在庫管理値を仮定したこと等から、モデル上の部品生産の減少が実績より大きくなる傾向が生じた。

部品生産が最も大きな減少を示した4月期についてこのかい離を評価すると、実績値に対して駆動伝動部品では22.9%、機関部品で最大26.9%、操縦・懸架制動装置部品で23.4%の過大な評価となっており、モデルを用いた政策評価上の留意点となった。

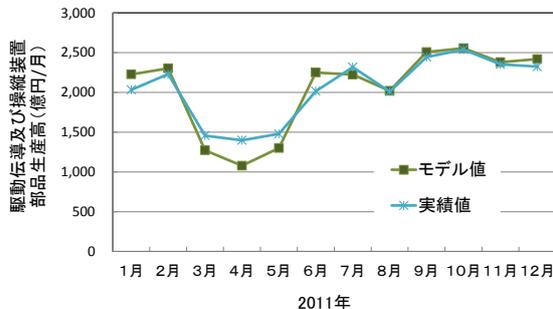


図6 駆動・伝導及び操縦装置部品生産額

(3) 自動車産業サプライチェーンの強化策の評価

東日本大震災以降、我が国の自動車産業はサプライチェーンの可視化を図る一方で、部品サプライヤーに対する在庫の積み増しの要請や自動車部品調達先の海外調達も含めた分散化等の対策を進めている。

また、サプライチェーン復旧の隘路となりそうな部品工場への生産ライン復旧のための機材の提供、人員の派遣等は、東日本大震災時においても有効な手段であることが判明したことから、その体制のなお一層の強化が図られているものと考えられる。

被災した部品サプライヤーの早期復旧に向けたグループ企業を挙げての応援活動は、1997年にトヨタ自動車系列のプロポーシング・バルブ (PV) を製造するアイシン精機が火災事故によって生産停止した際に実施されて以来、サプライチェーン復旧の有効な1手段となっている。

本研究では、これらの対策について、東日本大震災時の四輪車生産台数の減少をベンチマークとして、前章のサプライチェーンモデルを用いた評価を行った。

① 在庫積み増しの効果

図7に、部品サプライヤーが在庫の積み増しを行った場合の効果を示す。図7の縦軸は、東日本大震災の影響によって減少した四輪車生産台数の在庫積み増しによるその低減効果を百分率で示したもので、ここでは「生産水準回復率( $\gamma$ )」と呼ぶ。 $\gamma$ は次式で表される。

$$\gamma = \left\{ 1 - \frac{\sum_1^{365} (P_0^t - P_P^t)}{\sum_1^{365} (P_0^t - P_a^t)} \right\} \times 100 \quad (\%) \quad (9)$$

ここで、

- $P_0^t$  : t(日)の四輪車生産計画(台/日)
- $P_a^t$  : t(日)の四輪車生産実績(台/日)
- $P_P^t$  : 対策実施時の四輪車生産(台/日)

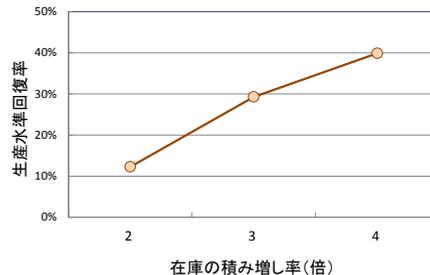


図7 在庫の積み増しの効果

部品サプライヤーが工場及び中間拠点において確保する最低の在庫量を2.5日分から5日分へと2倍まで引き上げても、東日本大震災の際の四輪車生産台数減少は12.3%しか回復しないが、最低在庫量を3倍に積み増すと四輪車生産台数の減少は29.3%改善され、4倍にすれば39.9%回復されると評価された。また、在庫積み増し後の四輪車の月産台数は図8のとおりとなった。

在庫の積み増しによって4月期の生産台数

減少は大幅に改善されるが、その効果は短期的で5月期の生産は改善されない。また、3月期の生産減は、震災直後の四輪車生産ライン操業停止が直接の原因であるため、在庫積み増しの効果は生じない。

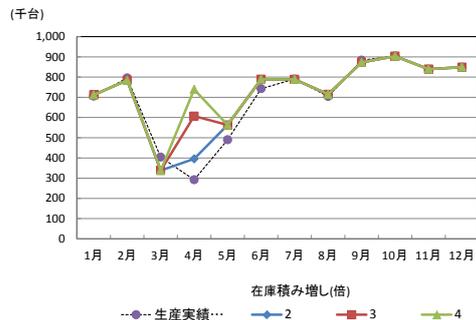


図8 在庫積み増し後の四輪車の月産台数

② 部品調達分散化の効果

部品調達の分散化によってサプライヤーの同時被災リスクは減少する。図9は国内外に部品調達を分散化した時の四輪車の生産水準回復率を示す。生産水準回復率は遠隔地の海外よりも国内の方が大きい。ここで、「部品調達分散率 ( $\alpha$ )」は、被災リスクを共有しない地域への分散調達額の全部品の調達額に占める割合である。(図10参照)

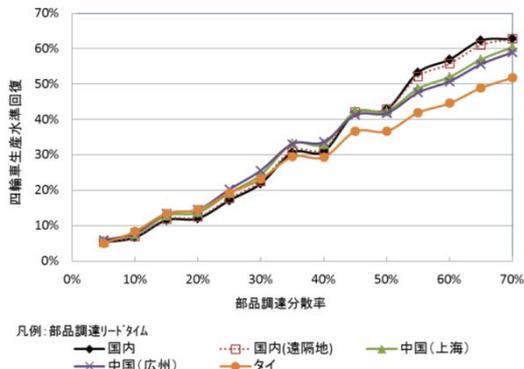


図9 部品調達の分散化の効果

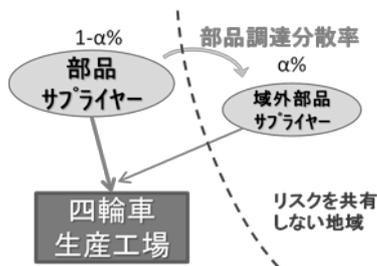


図10 部品調達分散率の概念

調達先の分散に伴う輸送リードタイムは、国内から東南アジアまでの地域を念頭において海上輸送時間等から表3の通りとした。

図11に、輸送リードタイムに3日を要する国内他所へ部品調達先を分散するケースについて、部品調達分散率33%と67%で四輪車生産台数の推移を比較したものを示す。

表3 地域別部品調達リードタイム

部品サプライヤー	部品調達リードタイム
国内	3日
国内(遠隔地)	4日
中国(上海)	7日
中国(広州)	9日
タイ	14日

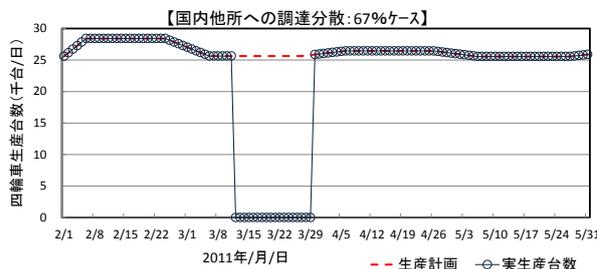
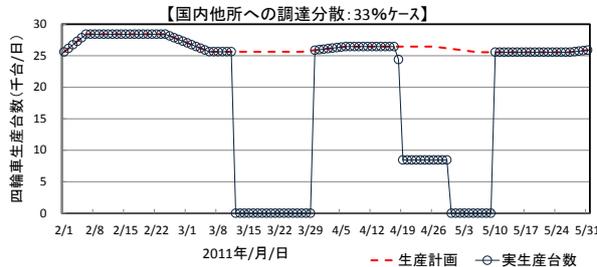


図11 国内他所への調達移転の効果

部品調達分散率は、従来1か所で生産していた部品を同時被災リスクのない他の工場に半分分担させると33%、他の2か所と合わせて3か所で1/3ずつ生産すると67%となる。

東日本大震災では発災直後に四輪車生産ラインが18.8日停止したが、部品調達分散率が33%の場合、その後もサプライチェーンの擾乱によって生産停止や減産が生じることが図11からわかった。

一方、部品調達分散率を67%に引き上げると、部品供給の停止による影響は消滅する。発災直後の組み立てライン停止による四輪車生産台数の減少は46万4千台、東日本大震災時の推定減産数(124万4千台)に占める割合は37.3%であったことから、部品供給停止による影響がすべて除去された時の生産水準回復率は62.7%となる。

中間在庫拠点の部品量が低下した緊急時に分散調達先に供給不足を補う生産機能(バックアップ機能)を持たせることにより更なる生産水準の回復効果が期待できる。

分散調達先の事業所に通常の1.5倍~3倍まで部品供給額を引き上げるバックアップ機能を持たせるようにすると、四輪車生産水準回復率は例えば図12のようにになる。

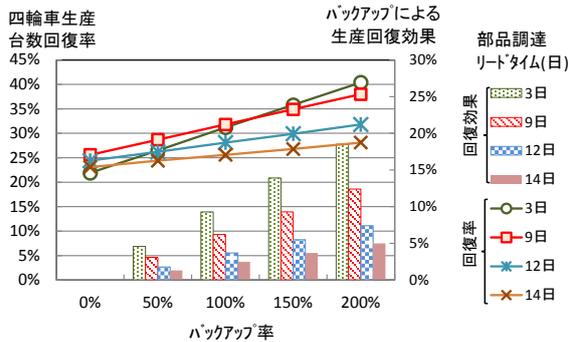


図12 バックアップの生産回復水準改善効果 (部品調達分散率30%の場合)

リードタイムが3日の国内のサプライヤーに30%の部品調達分散を行い、200%のバックアップ機能を持たせると、分散調達による生産水準回復率21.5%がバックアップによって更に18.5%引き上げられるという結果が得られた。一方、2週間のリードタイムを有するタイではバックアップによる改善効果は5%と低く、分散調達による効果と合わせても28%にとどまり、リードタイムの長い海外より国内における調達の分散とバックアップが有利なことが判明した。

### ③ 被災サプライヤー復旧支援の効果

最後に、部品サプライヤーの生産ラインを早期に復旧するためのグループ企業による緊急支援の効果を示す。(図13参照)



図13 隘路サプライヤーの復旧促進支援の効果

隘路となる部品サプライヤーの生産ライン復旧期間の短縮率に対して生産水準回復率は1.11の弾力性を示している。アイシン精機の事例のように四輪車生産ラインに直接納品する第1層の事業者については隘路サプライヤーの発見は容易であるが、第2層以下の事業者については必ずしも明確とはならない場合が多い。サプライチェーンの可視化が重要なことが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ①小野憲司, 赤倉康寛, 神田正美: 自動車産業サプライチェーンに対する東日本大震災のインパクト分析, 日本物流学会, vol.23,2015

[学会発表] (計6件)

- ① Ono, K., Akakura, Y., Kanda, M.: Analyzing and simulating supply chain disruptions on the Automobile Industry based on experiences of the East Japan Great Earthquake, 5<sup>th</sup> International Conference of Integrated Disaster Risk Management Society (5<sup>th</sup> IDRiM), Nov. 30, 2014, London Canada
- ② 小野憲司, 赤倉康寛, 神田正美: 日本の自動車産業サプライチェーンの構造と災害時インパクトの分析, 第31回日本物流学会全国大会研究報告集 pp105-108, 2014年9月13日, 柏市
- ③ Ono, K.: Impact of the 2011 East Japan Great Earthquake on the Japanese Automobile Industry, International Conference on Transportation and Logistics, November 7, 2013, Kyoto,
- ④ 小野憲司, 神田正美, 石原正豊: 東日本大震災による内外の物流と自動車産業へのインパクト, 第30回日本物流学会全国大会研究報告集 pp115-118, 平成25年9月14日, 東京
- ⑤ Ono, K., Akakura, Y., Kanda, M.: Recent structural change of supply chain and post-disaster risk management in Japan, 4th IDRiM, Sep. 6, 2013, Newcastle upon Tyne, UK
- ⑥ 神田正美, 石原正豊, 小野憲司: 東日本大震災以降の我が国サプライチェーンの構造変化と物流リスク管理, 第47回土木計画学研究発表会講演集 Vol.47 (CD-Rom), 平成25年6月1日, 広島

[図書] (計1件)

- ① 小野憲司, 神田正美, 赤倉康寛: 自動車産業サプライチェーンにおける東日本大震災のインパクト分析, 京都大学防災研究所年報第57号 (CD-Rom, sk14)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小野 憲司 (Ono Kenji)  
京都大学・防災研究所・特定教授  
研究者番号: 10641235

### (2) 研究分担者

赤倉 康寛 (Akakura Yasuhiro)  
京都大学・防災研究所・特定准教授  
研究者番号: 70462629

### (3) 研究分担者

神田 正美 (Kanda Masami)  
城西国際大学・経営情報学部・教授  
研究者番号: 40513867