

生産・輸送途絶の影響評価のための自動車産業グローバルサプライチェーンモデルの構築

Developing global supply chain model of automobile industry for evaluating negative impact caused by production/supply chain disruption

小野憲司（港湾空港技術研究所/京都大学）、
赤倉康寛（国土技術政策総合研究所）

Kenji Ono (Port and Airport Research Institute/Kyoto University),
Yasuhiro Akakura (National Institute for Land and Infrastructure Management),

要旨

2011年3月の東日本大震災や2020年初頭以降断続的に続くCOVID-19パンデミック、2021年3月のスエズ運河大型コンテナ船座礁事故、ロシアのウクライナ侵攻に端を発する黒海沿岸港湾・航路封鎖等の世界の生産拠点相互及び市場をつなぐグローバルサプライチェーン（GSC）の途絶現象は、1国や地域の経済社会に留まらず、世界経済にも大きな影響を与えている。本稿では、離散型イベントシミュレーション（DES）の手法を用いた自動車産業のGSCのモデル化の方法論とその意義について報告する。

1. はじめに

東北及び北関東地域において2011年3月11日に発生した東日本大震災は、この地域で生産される素材、半製品等の供給停止を引きおこし、それは日本国内に留まらず世界規模での生産活動に波及した。中でも、我が国の基幹産業である自動車産業は、被災地域において生産されるマイクロプロセッサ等の部品類の供給停止によって、北米をはじめとする海外拠点での生産停止を余儀なくされ、世界規模での生産・消費活動を支える高度なグローバルサプライチェーン（GSC）の災害脆弱性を示すものとして注目を集めた。

また、2019年12月に中国武漢市で感染が確認された新型コロナウイルス（COVID-19）感染症は、瞬間に世界中に拡大し、①中国の生産拠点の閉鎖と部品等の供給停止による海外の製造業の生産活動の低下、②流通・販売網のマヒと需要の低下、③感染者発生等による世界各国での生産拠点の閉鎖、等のパンデミックによる自動車産業GSCの機能低下が欧州、北米、わが国にも波及した。

2022年2月に勃発したロシアのウクライナ侵攻は、ロシアにある外資系各社の自動車工場の閉鎖・停止や車両の輸入停止に留まらず、ウクライナでの自動車部品の生産停止による欧州等における自動車部品の調達にも影響を及ぼした。またロシアが輸出するニッケルやパラジウムなどの品薄は、今後、世界各国の自動車部品生産にも影響が及ぶ可能性が懸念される。

このように自然災害及び人為災害は、生産活動に必要な資源の喪失や市場の縮小を招き、国境を越えた財の移動の制限と生産活動の低下を招く。

本稿においては、自動車産業のGSCに焦点を当てて、上記のようなグローバル規模のモノの生産・移動・消費の挙動シミュレーションを行うための離散型イベントモデルの構築を行うとともに、東日本大震災後に北米で生じた日本の自動車産業の生産活動への負の影響の再現を試みる。

2. 先行研究

災害事象による自動車GSCへの影響分析の事例については、東日本大震災及びタイ国チョップラヤ川洪水による自動車産業への負の連鎖のメカニズムや自動車生産停止が地域経済に及ぼした影響分析を行った神田他⁽¹⁾や、東京証券取引所開示情報等の企業公表資料に基づき、東日本大震災後のトヨタ自動車の海外工場の生産低下について報告した小野他⁽²⁾の先行研究が挙げられる。

COVID-19感染症の拡大による自動車生産・販売拠点の閉鎖や自動車部品のサプライチェーンの停滞、世界貿易や海運・港湾輸送への影響については、2020年に岡村他⁽³⁾が発表を行っている。

また小野他⁽⁴⁾は、経済産業省生産動態統計機械統計編（機械統計）に基づき、4輪自動車生産台数と主要な自動車部品の生産額の間に強い直線相関があることを示し、自動車産業における四輪自動車と部品類の生産・物流チェーンの数値モデ

ル化を提案した。小野他は更に、上記モデルを用いて自動車産業サプライチェーンの災害レジリエンス強化方策の効果の評価を行っている。⁽⁵⁾

上記の先行研究から、自動車産業等の GSC に支えられた生産活動は、その一部が自然・人的災害によって遮断されると世界規模での影響を受けるリスクを有することが明らかになったが、上記の小野他のモデルは専ら日本国内でのサプライチェーンのモデル化にとどまっており、国境を超え、長大な輸送リードタイムを有する GSC のモデル化には至っていない。

3. 自動車産業サプライチェーンの構造化

3-1 構造化の考え方

本研究では、小野他のモデル⁽⁴⁾の拡張を行うこととし、離散型イベントシミュレーション(DES)モデルを用いた GSC の構造化を行う。

一般的に DES モデルは、新たなイベントの発生とシステムの状態遷移が生じる時刻の与え方によって、一定の時間間隔で状態が変化する時間駆動型(Fixed-increment time progression)と事象の発生をトリガーとして状態が変化する事象駆動型(Next event time progression)に大別される。また

DES モデルの形態としては、システムの状態変数と事象を集散的に記述する事象指向モデルとマルチエージェントシミュレーションモデルのようにシステムの行動主体をオブジェクトに対応させるオブジェクト指向モデル等がある。

本研究では GSC の構造化にあたって、小野他のモデル⁽⁴⁾と同様の、時間駆動型の事象指向モデルを構築することとする。

3-2 自動車産業サプライチェーンの構造化

日本の自動車産業の海外における 4 輪車組立工場及びその域内の自動車部品供給事業者並びに日本の国内(域外)に残った部品供給事業者が形成する GSC を図 1 のようにモデル化する。

図 1 の上段は、域内外の部品供給事業者の部品生産及び工場在庫、域外港湾の出航待ち、域内港湾の到着部品量(通関手続き、ドレー輸送待ち)、中間部品倉庫の在庫量、自動車組立工場内での内生部品製造と域内/域外製造部品の工場在庫、完成車生産台数、出荷待ち完成車、販売店の店頭在庫の各事象と事象間の遷移を模式的に表したものである。このような DES モデルの主要な状態遷移関数は以下のようなものとなる。

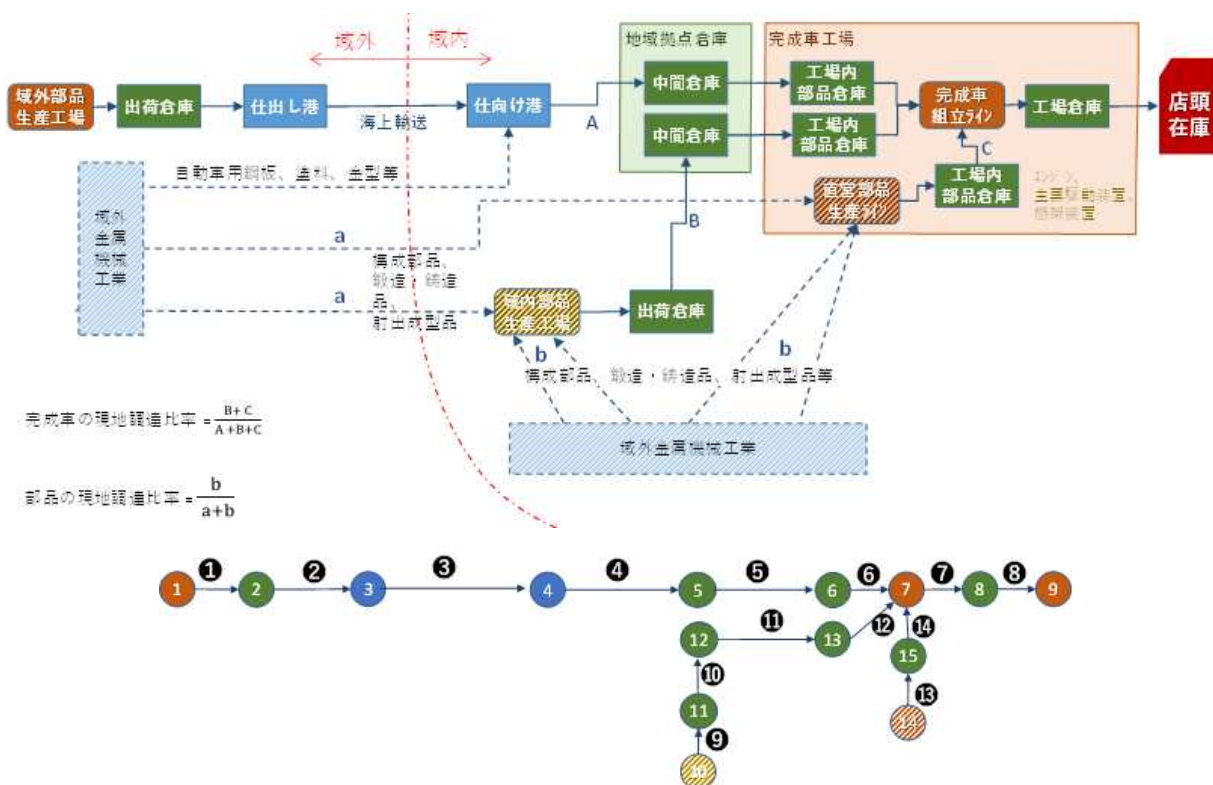


図 1 自動車産業の GSC のモデルイメージ (上段) とノード・リンク (下段)

① 自動車（４輪車）の生産：

自動車の生産台数は、計画自動車組立台数と供給可能な部品量によって決まることから、

$$CP^t = \min(PCP^t, \alpha_i \times PS_i^t) + \varepsilon \quad (1)$$

ここで PCP^t 、 CP^t 、 PS^t は時刻 t の計画自動車組立台数、自動車生産台数、完成車組立工場在庫を、 α_i は生産部品 i （域外生産、域内生産及び自動車組立工場内製）の完成車 1 台当たりの投入高の逆数を、 ε は日生産台数の揺らぎを表す。

② 部品の生産：

部品供給事業者は自動車の計画組立台数と工場在庫余裕高により生産量を決定するため、

a. $PW_i^* > PW_i^{t-1}$ の時

$$PP_i^t = \min(\max(PW_i^{**} - PW_i^{t-1} + \frac{CP^{t+\tau_i^0+1}}{\alpha_i}, 0),$$

$$\beta_i \frac{CP^{t+\tau_i^0+1}}{\alpha_i}) \quad (2)$$

b. $PW_i^* \leq PW_i^{t-1}$ の時

$$PP_i^t = 0 \quad (3)$$

ここで、 PP_i^t 、 PW_i^t は時刻 t における部品 i の生産高及び工場在庫を、 PW_i^* 、 PW_i^{**} 、 β_i 、 τ_i^0 は工場在庫容量、工場計画在庫、部品生産増強限界、平均的な部品供給リードタイムを表す。

③ 部品の工場出荷：

部品 i の工場出荷量 (SH_i^k) は、自動車生産計画に基づき輸送リードタイム分を前倒して決定するが同時に、部品工場及び中間部品倉庫の在庫量を勘案することとし、

$$SH_i^k = \min(PCP^{t+\tau_i}/\alpha_i, PW_i^{t-1}, \gamma \frac{PH_i^{**} - PH_i^{t-1}}{PH_i^*}) \quad (4)$$

ここで、 PH_i^t は時刻 t における部品 i の中間在庫を、 PH_i^* 、 PH_i^{**} は中間在庫容量、中間計画在庫、 γ は在庫調整係数 (0.75) である。

④ 部品の港湾積出し：

域外の部品を海上輸送する際の仕出し港からの部品の積出量 (OF_d^t) は、

$$OF_d^t = \min(\sum_t^{t-\delta-pc} SH_1^k, Fs) \quad (5)$$

ここで δ 、 pc 、 Fs は、港湾手続き時間、コンテナ船寄港頻度、最大輸送容量である。

なお、日本からの部品供給の途絶が北米での自動車生産ラインの停止を誘発したことを鑑み、日本製自動車部品の短期的な非代替性を仮定した。

3-3 東日本大震災時の発生事象への適用

上記モデルを用いて、2011 年の東日本大震災時に発生した北米における日本の自動車産業の生

産台数減少の再現を試みた。

2009 年～2011 年の北米（カナダ、米国、メキシコ）における日本の自動車メーカーの自動車生産台数は図 2 の通りである。この実績を踏まえて、日本の自動車産業及び部品供給者は 2010 年の生産台数に基づいて生産計画を立てると仮定した。また、東日本大震災によるショックとしては、小野他⁽²⁾が推定した 2011 年のトヨタ自動車の国内部品工場等の操業水準を基に図 3 の通り設定した。

モデルパラメーター（表 1）は、経産省機械統計の国内 4 輪車生産台数及び自動車部品生産高の相関関係（図 4 参照）を用いた他、小野他のモデル作成時の企業ヒアリング情報等を参考にした。

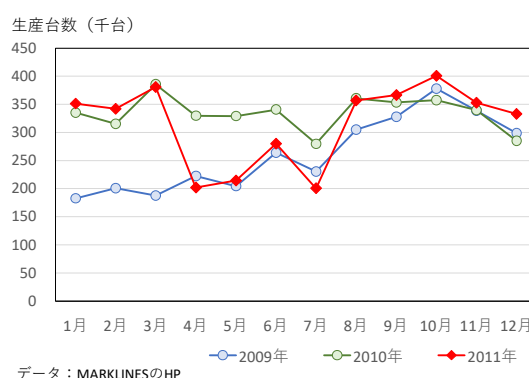


図 2 日本の自動車メーカーの北米工場生産実績

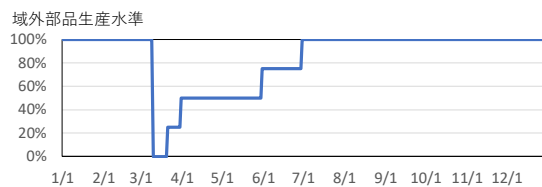
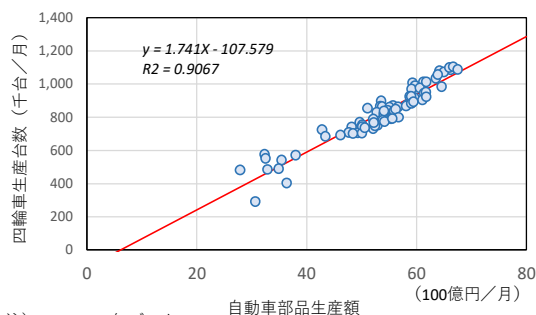


図 3 日本国内部品供給水準（設定値）

表 1 主なモデルパラメーター

パラメータ項目	設定値
部品工場／中間倉庫の在庫容量	10日分
組立工場手持在庫	3日分
自動車部品の域外生産比率	30%
自動車部品の直営工場生産比率	15%
自動車部品投入率（全体）	585千円/台
陸上輸送時間（中間倉庫まで）	2日
同（域内部品工場～域内拠点倉庫）	1日
港湾滞在時間（仕出し港湾）	3日（仕出し港）
	2日（仕向け港）
海上輸送時間	10日（日本～北米西岸）
寄港頻度	1便/日
コンテナ船腹容量	20千TEU/日
海上輸送容量増強限界	1.5倍
陸上輸送容量	30千台/日
部品生産増強限界	1.5倍
在庫調整係数	0.75



注) 2007-2020年データ

図4 4輪車生産台数及び自動車部品生産高

なお本DESモデルは、エクセルシート上にシミュレーション時間と事象から成るテーブルを作成し、遷移関数で相互を連結して作動させた。その際、生産台数の揺らぎ(ε)を1%と仮定した。

主な計算結果を図5及び図6に示す。

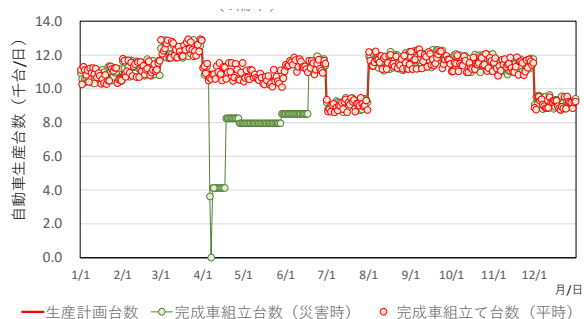


図5 自動車生産台数のシミュレーション結果

図5は当初計画及び災害の有無の下での自動車生産台数を示す。東日本大震災により日本からの部品供給に支障が生じた4月～7月までの間の生産台数低下が表現されている。図6に、自動車生産計画の基とした2010年及び災害が発生した2011年の実績値並びにモデルによる再現値を比較して示す。2011年実績に比べモデル値は4月期に14.1%、通年で0.1%過大となっているが、7月期の大幅な生産の落ち込みは表現されていないが、実績値に対する推計値の決定係数(R²)は0.9836であり、全般的には良く再現できていた。

4. まとめ

本稿では、小野他⁽⁴⁾が提案した日本国内における自動車サプライチェーンのDESモデルを拡張して、日本の自動車産業のGSCのDESモデルを開発した。またモデルを用いて、東日本大震災直後の北米における自動車生産低下事象の記述を試み、おおむね良好な再現性を得た。

本モデルを用いると、域外(日本)における部

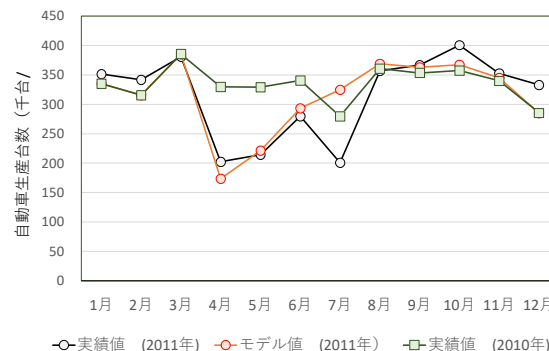


図6 自動車生産のモデル値と実績値の比較

品生産の停止に留まらず、域外から域内への海上輸送路の遮断や港湾混雑、陸上のコンテナドレーの不足など、北米西岸港湾ロックアウトや新型コロナウイルスパンデミック、昨年3月のスエズ運河座礁事故に代表される海上輸送網の狭隘部の遮断等のGSCの機能継続リスクにつながる様々な災害事象の影響評価が可能となると考えている。更なるモデルの改良と深化に努めたい。

なお本研究は、科研費基盤研究(C)(22K04647)の一環として実施した。

参考資料

- (1) 神田正美, 小野憲司, 岡村京子: 2011年の東日本大震災及びチャオプラヤ川洪水が日本企業の国際生産・物流チェーンに及ぼした影響について, 第45回土木計画学研究発表会 論文概要集, Vol.46, 2012年
- (2) Ono. K., Kanda M.: Impact of the 2011 east Japan great earthquake and tsunami on the local logistics, Proceedings for the 4th International conference on transport and logistics, 2012
- (3) 岡村京子, 宮島正悟, 小笹基人, 小野憲司: COVID-19 パンデミックのわが国自動車産業と海運・港湾輸送に対する影響, 第37回日本物流学会全国大会研究報告集, 2020年
- (4) 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, 2014年
- (5) 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に対する東日本大震災のインパクト分析, 日本物流学会誌第23巻, pp.127-134, 2015年

(2022年8月17日提出)