

エージェントモデルに基づくサプライチェーン マネジメント支援ツール

生天目 章, 岡田 知仁, 佐藤 浩

サプライチェーンマネジメント (SCM) は、生産から流通までのサプライチェーン全体の活動の最適化を目的とする [1]。在庫管理や輸送計画は、その中でも中心的なテーマである。サプライチェーンの効率性を高め、また市場の変動や輸送経路の中断などから生じる影響を最小限にして速やかに正常な活動へ復旧可能なレジリエンスの高いサプライチェーンを構築するために、SCM 支援ツールの活用が注目されている。本稿では、自動車産業の実データをもとに、東南アジアにおけるサプライチェーンを検討するためのエージェントモデルに基づく SCM 支援ツールの活用法について解説する。

キーワード：サプライチェーン, エージェント, レジリエンス

1. はじめに

サプライチェーンとは、原材料がさまざまな工程を通じて商品に加工され最終消費者に届くまでのプロセスの集合体のことである。資材の調達から最終消費者に届けるまでの、資材や部品の調達、生産、販売、物流などの活動の流れを、大きな供給のチェーン（ネットワーク）として捉える [2]。サプライチェーンには、部品供給業者、生産メーカー、流通業者、小売業者など、さまざまな企業が参加し、受注に伴う企業間での情報の共有、納入に伴う物流、企業内部では生産や在庫管理に関わる調整などの相互作用が頻繁に行われる。

モノやサービスの流れを円滑にすることは、経済社会を発展させることにつながる。経済のグローバル化が進んでいる今日、国境を越えた多くの企業の複雑な相互作用の下、さまざまな製品やサービスの供給が実現している。一方で、そのことでリスクが複雑化している。多数の企業活動が強く結びつけられるなか、サプライチェーンの一端で生じた障害による影響が多くの企業に波及していく事態が増加している。サプライチェーンがもつこのような特有の脆弱性は、ネット

ワーク全体の構造に依存しており、構造依存的な問題を克服しレジリエンスの高いサプライチェーンを構築するためには、新しい手法が求められている [3]。

サプライチェーンに参加する多くの企業（プレーヤー）は、さまざまな局面において緊密な協働が必要である。たとえば、最終消費者に販売する小売業者は、自らの在庫管理ルールに基づき、サプライチェーンの上流に位置する流通業者に製品を発注する。流通業者は、小売業者から注文を受けると供給し、自らの在庫ルールに基づき、さらに上流にあるサプライヤー（メーカー）に発注する。このことから、サプライチェーンを自律的な多数のプレーヤーで構成し、ネットワーク結合された多くのプレーヤーが生み出す複雑な挙動などを扱うためのエージェントモデルのアプローチは適している [4]。

小売業者、流通業者、メーカーなどをエージェントとしてモデル化する。これらのエージェントには、自らの情報に基づき、さまざまな局面での活動を自ら決定する機能をもたせる。たとえば、エージェントは自らのルールに基づき在庫を管理し、納入や発注などに関してほかのエージェントと相互作用する。エージェントモデルに基づく SCM 支援ツールを用いることで、サプライチェーンを構成する多くのプレーヤーの異質性、多様性、行動上の複雑性が生み出す創発的な性質に着目しながら、効率性やレジリエンスの高いサプライチェーンを検討することができる。

ASEAN 地域は、世界の中でも数少ない成長市場で、今後も継続した発展が期待されている。多国籍企業の進出および ASEAN 諸国の国内企業の発展により著しい経済発展を遂げている。一方で、開発された地域と

なまため あきら
米空軍研究所アジア事務所
〒 106-0032 東京都港区六本木 7-23-17 赤坂プレス合同庁舎
akira.namatame.jp@us.af.mil
おかだ ともひと
防衛大学校電気情報学群情報工学科
〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20
さとう ひろし
防衛大学校電気情報学群情報工学科
〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20
hsato@nda.ac.jp

多くの未開発地域が混在しており、それらの様相は絶えず大きく変化している。また、輸送手段は海上輸送が主流であったが、経済回廊整備構想の下、東南アジアにおける陸上輸送路が整備されつつある [5, 6]。自動車産業の実データをもとに、東南アジアにおける効率的でレジリエンスの高いサプライチェーンのあり方について考察する。

2. エージェントモデルの構築

2.1 はじめに

エージェントは、個々の情報や行動ルールに基づき自律的に振舞う機能をもつが、そのような自律的なエージェントの集合体として、サプライチェーンを構成する。エージェントモデルに基づく SCM 支援ツールは、artisoc [7] 上に実装する。具体的には、各エージェントは、個々のルールの下、在庫量の管理や取引先の相手を決定する。各エージェントが取引相手を固定する場合、サプライチェーンは固定的なネットワークとなるが、取引相手を柔軟に変更する場合、変動型のネットワークとなる。

エージェント間の相互作用に着目して、中央集権型と自律分散型のサプライチェーンをモデル化する。中央主権型のサプライチェーンでは、受発注がトップダウン的に決定される。すなわち、サプライチェーンを統括するエージェントが全体の需要量を把握し、全体の生産量を計画し、また在庫管理と配送計画を一元的に行う。自律分散型サプライチェーンでは、受発注はボトムアップ形式に決定され、最下流に位置するエージェントからの発注に従い、その上流にあるエージェントは自らの在庫ルールに基づき注文量を決め、さらに上流に位置するエージェントに発注をする。

レジリエンスを高めるための一つの手段は、取引する相手を固定しないで取引関係を柔軟に変更できるようにしておくことである。サプライチェーンの評価は、さまざまな角度から行う必要があるが、ここでは効率性に着目し、市場需要の変動や取引相手の柔軟な変更による在庫量などを比較する。

2.2 エージェントの構成と行動ルール

図 1 に示すように、サプライチェーンを工場（製造）、流通、市場の 3 層構造で構成する。各層は、工場エージェント (10)、流通エージェント (10)、そして市場エージェント (10) の三つのタイプのエージェント、合計 30 のエージェントで構成する。各エージェントは、定められたルールの下で、安全在庫量、発注量と発注のタイミングなどを独自に決める。エージェント

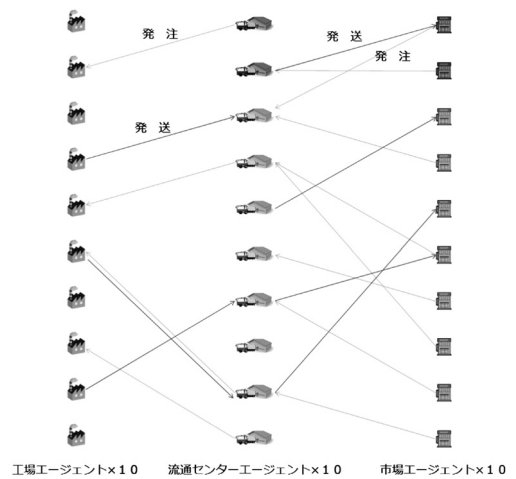


図 1 各エージェントとネットワーク構造

タイプごとの基本動作は、以下のとおりである。

- ・工場エージェント：工場エージェントは、下流にあるエージェント（流通エージェント）から発注を受けると、リードタイムを考慮して、各流通エージェントからの発注量を配送する。保有する在庫量が安全在庫量を下回るときには生産を行い、所定の在庫量を確保する。
- ・流通エージェント：流通エージェントは、下流にある市場エージェントから発注を受けると、安全在庫の条件が満たされたとき製品を市場エージェントに搬送する。在庫がない場合、上流の工場エージェントまたはほかの流通エージェントに発注する。流通エージェントは、工場エージェントや市場エージェントの在庫面でのバッファの役割を果たす。
- ・市場エージェント：市場エージェントは、消費者に製品を納入する。在庫量が安全在庫量を下回るとき、上流の配送エージェントに発注する。

中央集権化モデルでは、本社エージェントがサプライチェーン全体を一括管理する。すなわち、すべてのエージェントの在庫量、受発注の時期、受発注量を一元的に決定する。

2.3 モデルの設定

2.3.1 市場需要

SCM の良し悪しは、需要（製品の最終消費量）の変化にうまく適応できるかどうかによって決まる。市場需要が安定していることはあまりなく、在庫量を適切に確保しておくことは大変難しい。需要量が減少した場合には多くの在庫量をかかえ、逆に需要量が急に伸びた場合には、サプライチェーン全体で在庫切れが発

生し売り上げの機会損失につながる。そして、いずれのケースも企業経営に大きな影響を及ぼす。ここでは、市場需要を次の三つの関数でモデル化する ($D(t)$: 時点 t における需要数)。

1. 一定:

$$D(t) = 1 \quad (1)$$

2. 正規分布型:

$$D(t) = 1 + N(0, 1) \quad (2)$$

$N(0, 1)$: 平均が 0 標準偏差 1 の正規分布関数

3. 対数正規分布型:

$$D(t) = 1 + k \times D(t-1) \quad (3)$$

k : -0.5 から 0.5 の間の乱数

2.3.2 在庫管理

ブルウィップ効果 (Bullwhip Effect) とは、流通経路上の各部門の在庫量の変化に現れる現象のことである。需要予測は過去のデータに基づき行われるが、予測がはずれることは頻繁に起こるために、サプライチェーンの各部門は安全在庫と呼ばれる在庫量を確保し、予測から外れた分を吸収しようとする。このとき、最終顧客から原材料供給者までのサプライチェーンをさかのぼると、サプライチェーンの上流にある部門は大きな需要の変動を受けるため、より多くの在庫を確保するようになる。たとえば、需要が増加する局面では、下流にある部門が発注量を増やしていくため上流にある部門の在庫量はさらに増大していく。逆に需要が減少する局面では、下流にある部門は在庫を圧縮するため発注を止めるために上流にある部門ほど品切れ状態が拡大していく。在庫管理に現れるブルウィップ効果は、ネットワーク構成 (エージェント間の取引関係) とエージェント間の相互作用 (取引量など) によって生まれる創発的な性質である。

市場が大きく変動する中、余分な在庫量を減らし、あるいは在庫切れを発生させないために、さまざまな在庫管理方式が提案されてきた。基本的な方式として、定期発注と定量発注方式がある。エージェントの行動ルールとしては、在庫補充のためのルールを一つの発注方式で決定する。たとえば、発注点方式の下では、在庫水準が事前に決めた発注点になるとき、上流側のエージェントが発注を行う。各エージェントは、在庫量が発注点を下回るとき上流のエージェントに発注する。このときの安全在庫量、発注点、そして発注量は、以下の式で決定する [8]。

$$\begin{aligned} \text{安全在庫量} &= \text{平均消費量} \times \text{リードタイム} \\ &\quad \times \text{受注先の数} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{発注点} &= \text{安全在庫量} + \text{平均消費量} \\ &\quad \times \text{リードタイム} \times \text{受注先の数} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{発注量} &= \text{発注点} - \text{安全在庫量} + (\text{発注点} \\ &\quad - \text{現在の在庫量}) \end{aligned} \quad (6)$$

2.3.3 取引先の決定

企業間では取引上の信頼関係が重視されるため、長期的な取引関係が多い。安定した供給が行われない場合、それ以降は取引しないといった暗黙のルールなどの存在がその背後にある。一方で、市場環境の変化やさまざまな不確実な要因によってサプライチェーンが中断するリスクに対処するためには、取引相手を固定することなく、市場の状況や取引条件によって取引先を柔軟に変更することも必要になる。ここでは、取引先の決定モデルとして、固定された相手との取引、製品納入までのリードタイムが最小の相手との取引、最大の在庫量をもつ相手との取引、そしてランダムに取引先を決定する四つを考える。

2.3.4 意思決定構造

サプライチェーンの意思決定構造として、中央集権型と自律分散型の二つのタイプをモデル化する。中央集権型モデルでは、本社エージェントがサプライチェーン全体の在庫管理と配送計画を一元的に行う。すなわち、本社エージェントは各市場エージェントの需要量を把握し、全体の生産量を計画する。また、サプライチェーンを構成する各部門のエージェントが必要とする量を計算して配送計画 (配送先および配送量) を立案し、各部門のエージェントに発送する。

自律分散型モデルでは、サプライチェーンを構成する各部門のエージェントが自ら情報を収集し、自らの判断 (ルール) に基づき受発注を行う。すなわち、各エージェントは自らの在庫量から発注量を決定し、また発注相手を決める。受注したエージェントは受注量を発送し、発送した量から在庫消費量を計算して発注量を求め、上流にあるエージェントへ発注する。最上流に位置する工場エージェントは、受注した総発注量をもとに生産活動を行う。

2.4 シミュレーション結果

中央集権型と自律分散型モデル、そして取引相手を決定するための四つのモデルの下でそれぞれシミュレーションを行い、各ケースで求めた平均在庫量 (1日当たり) を表 1 と表 2 に示す。最大在庫量または最小リードタイムをもつ相手を選択する場合を除き、中央集権

表1 平均在庫量（各エージェント平均：中央集権型モデル）

取引相手の決定	市場の需要関数		
	対数正規分布	正規分布	固定
ランダム	20.6	20.9	23.9
最小リードタイム	18.1	17.0	18.2
固定	13.6	12.7	18.0
最大在庫量	19.7	19.5	20.9

表2 平均在庫量（各エージェント平均：自律分散型モデル）

取引相手の決定	市場の需要関数		
	対数正規分布	正規分布	固定
ランダム	13.5	16.8	13.5
最小リードタイム	18.8	21.0	18.8
固定	13.6	12.7	12.5
最大在庫量	32.4	35.3	31.4

型モデルのほうが自律分散型モデルより在庫量を多く抱えることになる。部門別で比較すると、中央集権型モデルでは、サプライチェーンの中間に位置する流通部門のエージェントがより多くの在庫を抱える。一方で、自律分散型モデルでは、最上流にある工場部門のエージェントが多くの在庫を抱える。

取引先を固定した場合、中央集権および自律分散型モデルのいずれも、柔軟な取引関係と比較して平均在庫量が最も少ない。したがって、安定した供給関係が維持される場合、サプライチェーンの効率性が最も高い。一方で、レジリエンスを高めるための取引相手を柔軟に変更することによる影響は、中央集権と自律分散型モデルによって異なる。中央集権モデルでは“リードタイム”または“最大在庫量”に基づき取引相手を決定する場合、平均在庫量を最も少なくできる。一方で、自律分散型モデルでは、取引相手をランダムに選ぶとき平均在庫量が最も少なくなる。これは、各エージェントがランダムに選択するため特定の取引先に発注が集中するのが少ないためである。さらには、個々のエージェントの判断に基づき適切な時期に受発注が行われることが在庫量の削減につながっている。このことから、自律分散型モデルの下では、レジリエンスを高めるために取引相手を変更しても全体の在庫量が増加することはなく、効率性の高いサプライチェーンの構築につながる。

3. 実データに基づくシミュレーション

アジアにおける自動車需要は年々増加傾向にあり、インドや中国における需要を含めると世界全体の需要40%以上を占める巨大な市場である [9]。また、急速に変化する地域の中で、生産から最終消費までに至る

サプライチェーンのすべての局面が同時に行われていることから、生産コスト、生産技術力、最終需要などの変化に適応するための方法論を常に模索しなければならない。

本節では、メコン地域の経済回廊を利用した東南アジアにおける自動車産業のサプライチェーンを想定し、効率性の高いサプライチェーンを構築するために、どのような経路選択が望ましいのか、また各エージェントが取引相手を柔軟に変更するとき、どのようなサプライチェーンネットワークが形成されるのか調べる。市場の需要関数は、式 (3) に基づく対数正規分布型、取引相手は、ランダム、リードタイム、そして在庫量を基準にした選択モデルとする。

3.1 東南アジアにおける陸路（経済回廊）と海路の併用モデル

工場エージェント (9)、流通センターエージェント (2)、港湾エージェント (15)、市場エージェント (20) の四つのタイプのエージェント、合計 46 のエージェントでサプライチェーンを構成する。

- ・工場エージェント：トヨタの概況 2013 [10] をもとに、トヨタ自動車の工場がある都市に工場エージェントを配置する。
- ・流通センターエージェント：日本貿易振興機構 (JETRO) の資料 [6] をもとに、経済回廊とその周辺の輸送路からハブとなる都市に流通センターエージェントを配置する。
- ・港湾エージェント：国際拠点港湾として認められる港湾または同等とされる港湾に港湾エージェントを配置する。
- ・市場エージェント：各国の首都と主要都市に市場エージェントを配置する。

陸上経路上での輸送時間（リードタイム）は、Google マップ [11] から輸送時間を定め、海上輸送路上でのリードタイムは marinetraffic.com [12] で得た輸送時間とする。

3.1.1 平均在庫量の比較

サプライチェーン全体の平均在庫量（1日当たり）は、表3のとおりである。

この結果から、サプライチェーン全体の在庫量を減らすには、東南アジアにおける経済回廊である陸路中心にサプライチェーンを構築することが最も効率的である。取引相手を柔軟に変更する場合、サプライチェーンの効率性は輸送手段によって異なり、海路または陸路のみの場合は、在庫量が最大の相手との取引、陸・海路混合の場合は、リードタイムが最小の相手と取引

表3 平均在庫量（1日当たり）の比較

	ランダム	最小リード タイム	最大在庫量
海路のみ	525	560	389
陸・海路混合	606	256	566
陸路のみ	479	236	178

するとき、効率的なサプライチェーンにつながる。

3.1.2 形成されたサプライチェーンネットワーク

- ・ケース 1-1 海路中心，取引先の決定：“最小リードタイム”

インド国内，ミャンマー・ラオス・タイ・カンボジア・ベトナム南部，そしてベトナム北部・中国の三つのサブネットワークが形成され，サプライチェーンネットワークはクラスター化される。

- ・ケース 1-2 海路中心，取引先の決定：“最大在庫量”

インドの工場を中心として，すべての海上輸送路を使用するサプライチェーンネットワークが形成される。

- ・ケース 1-3 陸・海路混合，取引先の決定：“最小リードタイム”

陸上輸送路に関しては，バンコクを中心とする経済回廊を活用したネットワークが形成される。

- ・ケース 1-4 陸・海路混合，取引先の決定：“最大在庫量”

バンコクとハノイを交互に利用する陸上輸送路主体のネットワークが形成される。

- ・ケース 1-5 陸路中心，取引先の決定：“リードタイム最小”

バンコクを中心とした経済回廊を利用するサプライチェーンネットワークが形成され，日本と韓国には海上輸送とするネットワークが形成される。

- ・ケース 1-6 陸路中心，取引先の決定：“最大在庫量”

ケース 1-5 と同じようなサプライチェーンネットワークが形成される。

3.2 メコン地域における経済回廊モデル

工場エージェント (1)，流通センターエージェント (8)，市場エージェント (4) の三つのタイプのエージェント，合計 13 のエージェントでサプライチェーンを構成する。工場エージェントは，バンコク，流通エージェントは，メコン地域における経済回廊の始点と終点 (バンコク・ティラワ，プノンペン，ホーチミン，ヴィエンチャン，ダナン，ハノイ，昆明)，市場エージェン

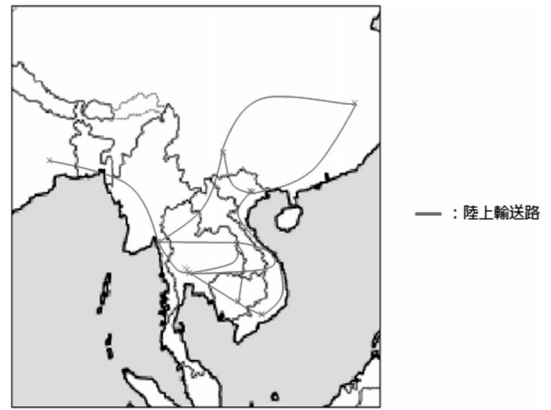


図2 メコン地域における経済回廊と輸送ネットワーク

表4 平均在庫量（1日当たり）の比較

取引相手	ランダム	最小リード タイム	最大在庫量
在庫量	1,142	1,236	1,272

トは，経済回廊に隣接する市場（ニューデリー，バンコク，ハノイ，北京）にそれぞれ配置する（図2）。

3.2.1 平均在庫量の比較

サプライチェーン全体の平均在庫量（1日当たり）は，表4のとおりである。

リードタイムの小さい（最小リードタイム）あるいは在庫量が最大（最大在庫量）と比較して，ランダムに取引相手を選択するとき，サプライチェーンの効率が最も高い。

3.2.2 サプライチェーンネットワークの形成

取引相手は，ランダムに選択するとき，経済回廊網を構成するどのノードもほぼ等しく活用されるネットワークが形成される。それ以外では，以下のようなネットワークが形成される。

- ・ケース 2-1 取引先の選択：“最小リードタイム”

各エージェントは最も近いエージェントを取引先として選択するため，市場から近いエージェントの間でクラスターが形成される。そして，“インド-ティラワ-バンコク”および“ハノイ-昆明-中国”の二つのクラスターが形成される（図3）。

- ・ケース 2-2 取引先の選択：“最大在庫量”

バンコクの工場から“インドへ延びる経路”，“昆明経由で中国へ延びる経路”，“ハノイへ延びる経路”の三つの経路が形成。メコン地域の経済回廊に関しては，“昆明経由で中国へ延びる経路（＝南北経済回廊）”と“ハノイへ延びる経路（＝東西経済回廊）”が形成される（図4）。

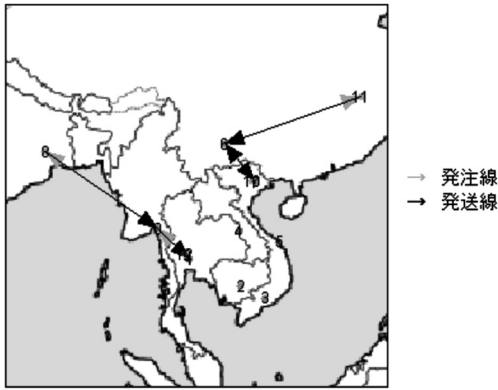


図3 サプライチェーンネットワーク
(取引先の選択 “リードタイム最小”)

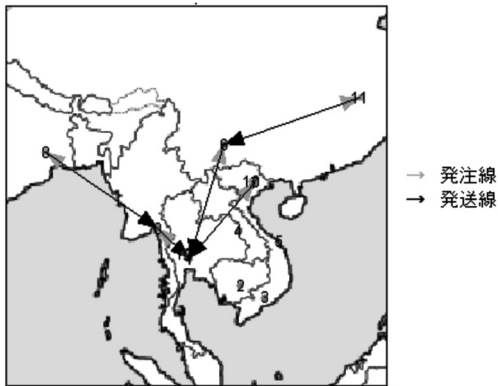


図4 サプライチェーンネットワーク
(取引先の選択 “在庫量最大”)

メコン地域における経済回廊では、南北経済回廊と東西経済回廊が頻繁に選択された。このことから、これら二つの経済回廊の整備を優先することは、東南アジアにおけるサプライチェーンの効率性の向上につながる。そして、インドからメコン地域、中国にまたがる陸上輸送網を活用することサプライチェーンの効率性を高めることにつながる。

4. おわりに

エージェントモデルに基づく SCM 支援ツールについて解説をした。東南アジアにおける自動車産業のサプライチェーンを想定し、エージェント間の柔軟な相互作用に着目して、サプライチェーンの効率性や形成されるネットワークの特徴について調べた。本稿では、サプライチェーンの効率性を在庫量の観点から評価したが、製品の原価、設備維持費、在庫保管料、輸送料、税なども扱いながら、総合的なコストからの評価も可能である。多品種、特に食品などの消費期限が短い多種の製品を扱うための拡張が必要である。また、サプライチェーンのレジリエンスを定量化して効率性を含めて総合的に評価するための機能追加などが今後の課題である。

参考文献

- [1] 船木謙一, “サプライチェーンネットワーク設計の研究動向と最適化ツール開発の現状,” 日本 OR 学会サプライチェーン戦略研究部会, 2012 年 7 月.
- [2] 日本物流学会, “物流・ロジスティクス・SCM 概念について,” <http://www.logistics-society.jp/01L-concept.pdf> (2015 年 6 月 15 日閲覧).
- [3] 生日目章, 『社会システム』, ミネルヴァ書房, 2013.
- [4] P. P. Datta, “A complex system, agent based model for studying and improving the resilience of production and distribution networks,” Ph. D. Thesis, Cranfield University, 2007.
- [5] 小澤康彦, 松永康司, 加藤賢, 武田紘輔, “ASEAN の物流に関する調査研究,” 国土交通政策研究, 第 115 号, 2014.
- [6] JETRO, “ASEAN・メコン地域の最新物流・通関事情,” 2013.
- [7] 山影進, 『人工社会構築指南—artisoc によるマルチエージェント・シミュレーション入門—』書籍工房早山 2007.
- [8] 久保幹雄, 『ロジスティクス工学』, 朝倉書房, 2001.
- [9] 小林敬幸, “ASEAN 自動車市場動向とタイ拠点の役割の変化,” 知的資産創造, 22, pp.44-57, 2014.
- [10] トヨタ自動車, “トヨタの概況,” <http://www.toyota.co.jp/jpn/company/about-toyota/gaikyo/> (2015 年 6 月 15 日閲覧).
- [11] Google マップ, <https://www.google.co.jp> (2015 年 9 月 15 日閲覧).
- [12] MarineTraffic, <http://www.marinetraffic.com> (2015 年 9 月 30 日閲覧).