

# 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

## Analyzing Impact of the East Japan Great Earthquake on the Automobile Industry Supply Chain

小野憲司・神田正美<sup>(1)</sup>・赤倉康寛

Kenji ONO, Masami KANDA<sup>(1)</sup> and Yasuhiro AKAKURA

(1) 城西国際大学経営情報学部

(1) Faculty of Management and Information Science, Josai International University, Japan

### Synopsis

The east Japan great earthquake has revealed fatal weak points of the supply chain management (SCM) employed by Japanese industries. The observed disconnections of supply chain are now recognized as one of critical operational risks, in particular, for Japanese automobile industry. The authors will discuss, by focusing on the Japanese automobile industry, i) structural features of the production and supply chains of the Japanese automobile industry by reviewing the experience of the east Japan great earthquake, and ii) possible model development for simulating the production and supply activities of the industry.

**キーワード:** 自動車産業サプライチェーン, 大規模災害, 数値シミュレーションモデル  
**Keywords:** Automotive industry, supply chain, large scale disaster, numerical simulation modeling

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、日本で生産される素材、半製品等の供給停止が世界規模で生産活動に波及した連鎖災害であった。

本稿では、自動車産業を事例として、東日本大震災による生産設備等の被災や災害発生後のサプライチェーンの寸断・混乱が、我が国及び世界の自動車産業に与えたインパクトについて、国土交通省の行った調査の成果や経済産業省の生産動態統計等のデータに基づいて分析を行う。

また、自動車産業の生産・物流チェーンに関する連鎖モデルの作成を試み、日本の自動車産業サプライチェーンにおける東日本大震災の連鎖的な負の影響についての評価を試みる。

## 2. 東日本の産業構造

東北・北関東地域の自動車組み立て工場や部品工場は、東日本大震災によって直接、人的、物的な被害を受けた。一方、被災地域以外の生産拠点についても、部品等供給のためのサプライチェーンが寸断されたことから多くの事業者が操業の停止や縮小を余儀なくされ、その影響は国内のみならず海外にまで及んだ。

2011年4月期のトヨタ自動車及びホンダ技研工業の生産水準は通常の2割、日産自動車は5割の水準まで落ち込んだ。一方、自動車組立てラインの維持に必要な部品の生産水準は25%~35%低下した。部品の供給減が完成車の生産台数の低下より少ない水準に留まったのは、一部の部品供給が失われただけで完成車の生産ライン全体が止まることを示唆する。

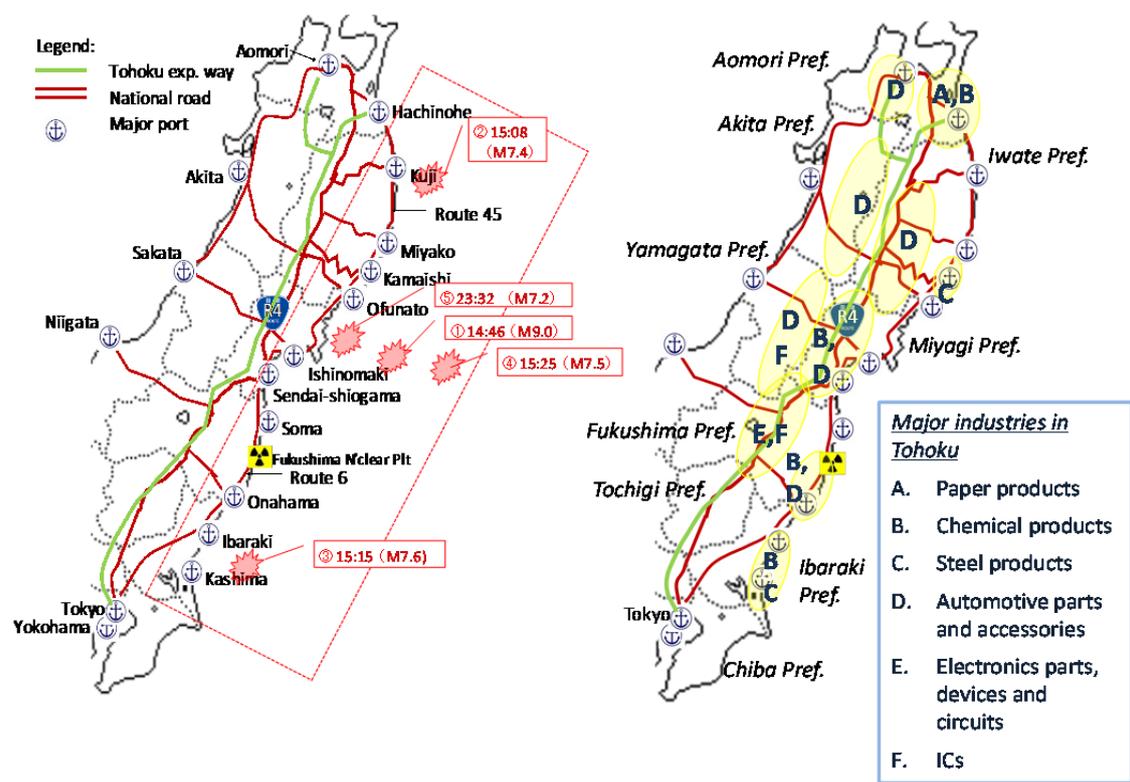


Fig.1 Geographical and industrial characteristics of the disaster area

そこでまず本章では、東日本大震災によって被災し、国内外の自動車生産に大きな影響を与えた東北地方の自動車産業の特徴について述べる。

Fig.1は、東日本大震災による被害を受けた地域の産業集積の状況を模式的に表したものである。

東北地方から北関東にかけての臨海部は、古くは明治時代からの地場資源を生かした工業開発、また戦後は新産業都市・工業特別地域としての拠点開発の対象となるなど、重化学工業の立地が進んだ地域である。日本経済が安定成長期に入って重厚長大型からの軽薄短小型へと産業構造の転換が生じた後も、東北・北関東地方は培った技術を生かし、高純度の工業材料等を供給することができた。また、これらを受けて東北自動車道路沿いの内陸部に集積した電子・電気部品、集積回路、自動車関連部品産業が域内外の自動車組立産業や産業機械、電子機器製

造業に部分品の供給を行ってきた。

中小企業庁(2011)によると、上記の地域のうち、東日本大震災によって地震の影響を受けた地域(以下「地震被災地域」という)には約74万社が、津波の影響を受けた地域(以下「津波被災地域」という)には約8万社の企業、事業所が立地していた。

ここで、「津波被災地域」は、災害救助法を適用した市町村のうち、国土地理院が2011年4月18日に公表した「津波による浸水範囲の面積(概略値)」について(第5報)において津波の浸水を受けたとされる39市町村を、また、「地震被災地域」は、災害救助法を適用した市町村のうち、「津波被災地域」を除いた市町村及び仙台市青葉区、仙台市泉区を言う。

中小企業庁(前出)が示すこれらの地域における生産活動の特色はTable 1のとおりである。

Table 1 Top five categories of shipment in the affected regions

Rank	Product category	Value of shipments (¥10 bil.)		% to all Japan
		Disaster area	All Japan	
1	Automotive parts and accessories	67	2,654	2.5%
2	Other electronic parts, devices and electronic circuits	33	405	8.1%
3	Integrated circuits	31	431	7.2%
4	Western and machine-made Japanese paper	30	208	14.4%
5	Vehicles (including motorcycles)	27	969	2.8%
	All categories	1,165	30,525	3.8%

Source: 2011 White Paper on Small and Medium Enterprises in Japan, Small and Medium Enterprise Agency and Japan Small Business Research  
Remarks: Disaster area is defined as the municipalities which, as of March 24, 2011, the Disaster Relief Act was applied.

Table 1は、平成20年工業統計表に基づき、上記の地震被災地域の企業、事業所から出荷された品目について、金額が高い上位5品目を示したものである。自動車部分品・附属品、その他の電子部品・デバイス・電子回路、集積回路の出荷額が大きく、半導体や電子部品、デジタル家電などの工場の集積地ともなってきた東北・北関東の産業の特徴をよく表している。特に1990年代初頭にトヨタ自動車国内における第三の自動車生産拠点として東北地域を位置付けて以来、自動車組立工場や部品・素材工場、半導体企業等から成る産業クラスターが形成された。

インテリジェント・コスモス研究機構（2010）が作成した東北の自動車関連企業マップに基づき筆者らが集計した結果によると、Fig. 2が示すように、青森、秋田、岩手、宮城、山形、福島の前6県に約1千を超える自動車関連企業、事業所が立地しており、機械、プレス加工や電子部品・デバイスの実装・組立、樹脂成型・ゴム製品加工、自動機・装置、金型等の分野で事業活動を展開している。Fig. 3に東北各県の自動車関連産業の立地分布と特色を示す。

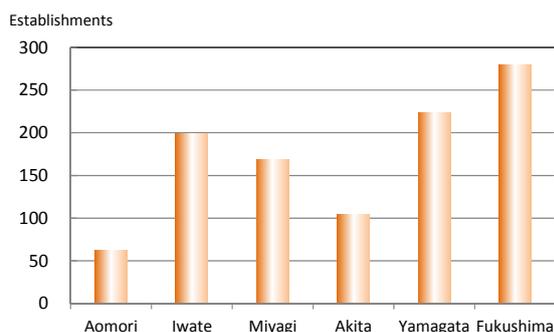


Fig. 2 Number of car parts supplier by area

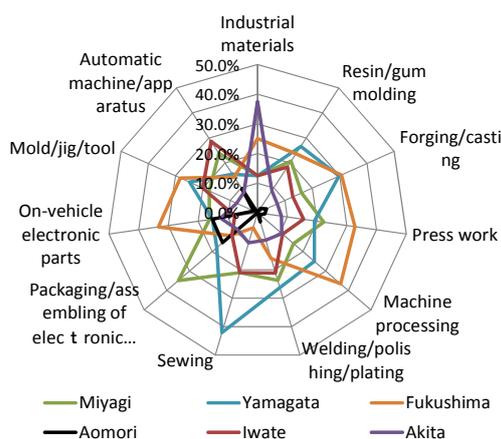


Fig. 3 Category of suppliers by area

福島県には機械、プレス加工や車載電装部品の供給事業者が多く、電子部品・デバイス類は宮城県、鋳造・鍛造や樹脂成型・ゴム製品、縫製は山形県と

いったように地域によって製造分野に特色を有する。

中小企業庁（2011）の報告では、全国の製造品出荷額において東北は電子部品関連で約13%、情報通信機器関連で約15%のシェアを占める。半導体の生産については、東北・北関東の国内シェア（金額ベース）は約2割と、九州（約4割）に次ぐ規模を誇る。

### 3. 東日本大震災による生産への影響

日本のものづくり拠点として発展してきた東北・北関東地域において生産される自動車関連素材や部品、半導体等の電子部品、光学機器向け部品等の半製品の供給が東日本大震災によって止まり、日本国内のみならず海外においても日系企業を中心として加工組立型産業の製造ラインに大きな障害を生じた。

神田他（2014）によると、大手カメラメーカー（キヤノン）のデジタルカメラ国内生産拠点である九州大分工場及び長崎工場は、東日本大震災によって東北地方からのコンデンサー等の電子部品の供給が滞ったため、3月中は操業を停止した。

Ono et al.（2012）は、日本からの部品供給量が大幅に減少したため、トヨタ自動車の北米工場等の海外生産拠点において、4月後半頃から生産ラインの維持が困難になり、5月末までの間、平常時の20%程度の水準まで操業度が低下したと推定している。（Fig. 4参照）

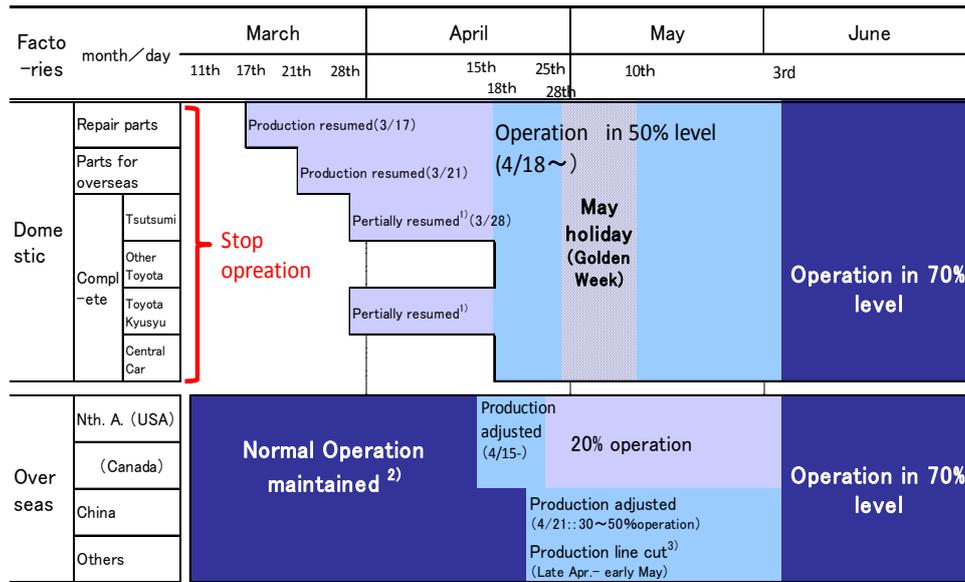
そこで本章では、東北・北関東地域の自動車・電子部品産業が受けた東日本大震災の影響に着目し、そのサプライチェーン特性について考察する。

Fig. 5及びFig. 6は、帝国データバンク（2012）が受託した経済産業省調査結果で、平成23年の地震被災地域及びそれ以外地域における電子部品・デバイスの生産高並びに輸送機械産業の生産高を鉱工業生産指数（IIP）の対前年同月比で示したものである。

地震被災地域における電子部品・デバイスの生産は3月期に対前年同月比55%まで落ち込み、4月期には63%とやや回復、その後は70~80%台で推移した。一方、地震被災地域以外の地域のIIPは、3月期は前年同月と変わらなかったが、4月期には86%まで回復し、以降90%台で推移した。

地震被災地域の輸送用機械の生産は、3月期に対前年同月比で76%、4月期には71%と落ち込んだが、地震被災地域以外の地域ではこれを上回る落ち込み（3月期：55%、4月期：51%）が見られた。

これは、自動車産業クラスターを構成する様々な階層の部品供給者が東北・北関東地域からの素材、部品の供給に依存していたため、地震被災地域の素材や電子部品等の供給が途絶え、連鎖的に大きな負のインパクトが発生したことを示唆する。



1) Production limited to Prius and Lexus. Source: Estimation by author based upon information disclosed by Toyota.  
 2) No overtime, no holiday work basis  
 3) Assembly lines in UK, France and Turkey partially, and Engine factory in UK and Poland closed. No detail are announced.

Fig. 4 General view of Toyota's global car productions after the east Japan great earthquake

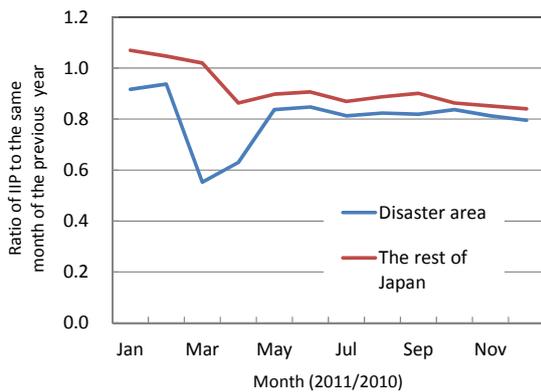


Fig.5 Impact on IIP of electronic parts/devise

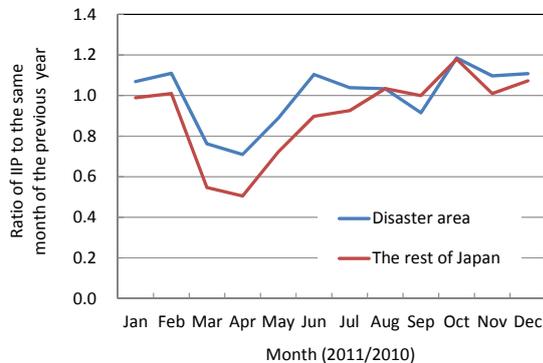


Fig. 6 Impact on IIP of transport equipment

Fig. 7に、津波被災地域における電子部品・デバイスの生産高の推移を示す。大きな津波被害にあった茨城県常陸那珂港臨海部は東北・北関東地方の電

子部品・デバイス生産の拠点であり、津波による浸水被害や内陸部からのシリコンウェハの供給が一時的に途絶えたことから、この地域を中心に4月、5月の電子部品・デバイス生産はほぼゼロとなった。

なお、ルネサスエレクトロニクス社常陸那珂工場などの集積回路の主力工場は、6月には対前年同月比30%まで、また7月以降はほぼ平常時の生産能力に回復し、その後、全国的なマイコン等の不足に対応するため、8月以降はフル操業状態に、また年末には対前年度比200%の高水準の生産高に達している。

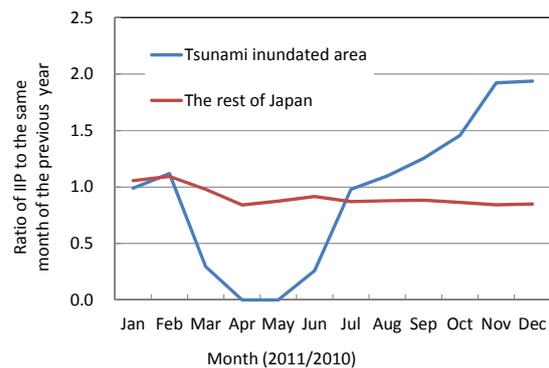
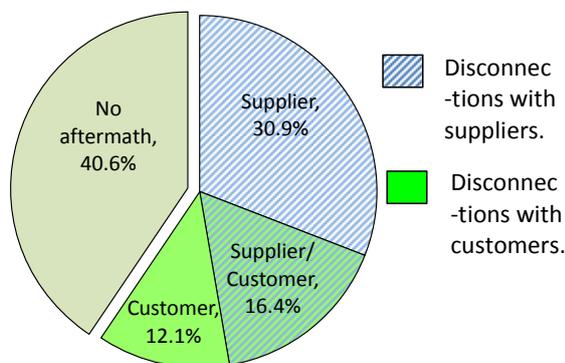


Fig. 7 Impact on IIP of electronic parts/devise (Tsunami inundation area)

これらの事業所の操業停止は、建物・設備の被害に起因する他、他のサプライヤーの被災や交通遮断等によって生産に必要な素材・部分品類の調達が困難となったことにも原因がある。赤倉・小野 (2014)

によると、東日本大震災の被害を受けた企業の内、調達元の被災によって生産の支障が出たと答えた事業所は全体の30.9%、販売先の操業停止によって生産に支障が出たと答えた事業所は、12.1%、両方影響があったと答えた事業所は16.4%あり、サプライチェーンの寸断による影響は被災企業全体の約60%に達する。(Fig. 8参照)

(Sample: 825 establishments)



Data: Questionnaire survey, Kinki District Construction Bureau, 2011

Fig. 8 Disruptions of supply chain

#### 4. 国内自動車生産への波及

##### 4.1 部品等供給停止の伝播メカニズム

ここまでで述べたように、東日本大震災による東北・北関東地域からの部分品供給の停止は、我が国全体のモノ造りに著しい影響を与えた。本章では、我が国製造業の基幹的な生産活動である自動車生産に焦点を当てて、その影響の程度と特徴を分析する。

Fig. 9に震災後の我が国の自動車生産台数の推移を示す。生産台数のデータは、日本自動車工業会が公表したもので、全メーカーの合計台数と併せてトヨタ、日産、ホンダの3社の月別生産台数の水準を平成22年の平均月間生産台数を100とする指標表記で示した。

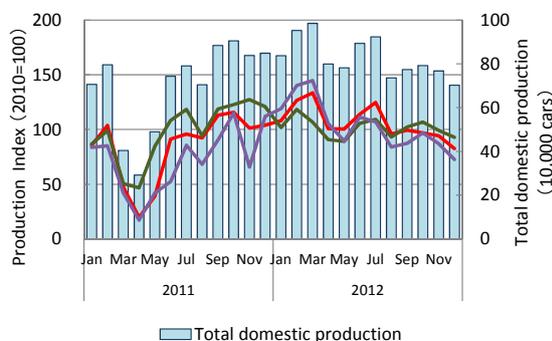


Fig. 9 Impact on the domestic car production

東日本大震災の発生によってトヨタ、ホンダ、日

産の東北・北関東にある生産設備に直接被害が生じた他、東北の素材、部品メーカーの被災によって部品等の供給が停止すると、全国の完成車組立て工場において部品不足の恐れが生じ、自動車メーカーは組み立てラインの操業停止を余儀なくされた。

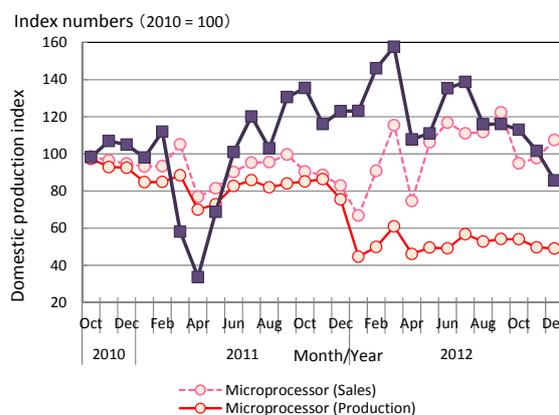
その結果、3月～6月にかけて完成自動車の生産水準に著しい低下がみられた。特に4月期には、ホンダが前年水準の17%、トヨタは20%に生産台数が激減した。発災後の4カ月間の国内自動車生産台数は前年同時期の59.4%である月平均生産高48万台(2010年の同時期の平均月産台数:81万台)まで落ち込んだ。

東北地方におけるトヨタの生産能力は国内生産能力の1割程度でしかないことを勘案すると、地震の揺れ等による直接的な設備被害よりもサプライチェーンの寸断による生産停止の影響の方がはるかに大きかったことがわかる。

東日本地域からの部品等の供給が停止することによる完成車組み立てラインの停止がこのように大規模に全国に及んだ原因について、神田他(2012)は、  
 ① ジャストインタイム生産が浸透している自動車業界の在庫の少なさ、  
 ② 製品差別化の追求による互換性のない部品等の数の増大、及び  
 ③ 調達コスト削減のための部品等供給元の集中、の3点を指摘した。

神田他(前出)はとりわけ、互換性が極めて低く代替性に乏しい部品の存在に着目し、これを「キーパーツ」と呼んだ。例えば、それぞれの自動車会社の車種の性能に特化した特別仕様の半導体集積回路(マイコン)の調達が困難になったことが、完成車組み立てラインの操業維持に大きな影響を与えたと考えた。

ここで、震災前後のマイコンの国内生産及び販売個数の推移をFig.10に示す。



Note: Engine parts, drive, transmission, Data: Machinery

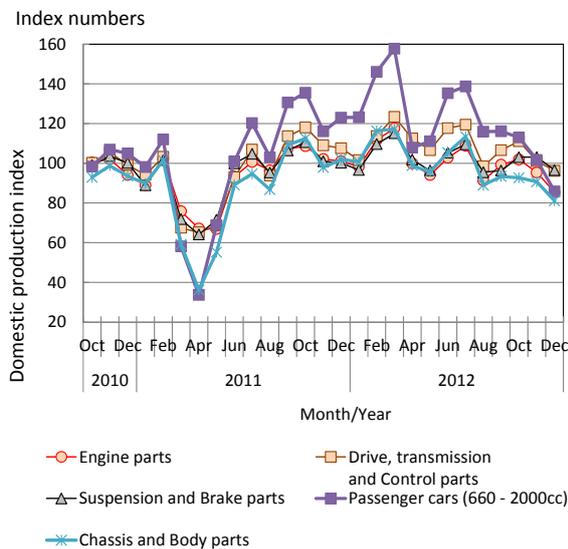
Fig. 10 Production/sales level of microprocessor and complete car (Average in 2010=100)

マイコンは自動車のエンジン制御や搭載されるカーナビゲーションのCPUとしてICメーカーから自動車用部分品事業所に提供される。Fig. 10は、経済産業省生産動態統計機械統計編（機械統計）に示されたモス型半導体集積回路の月別統計に基づき筆者らが作成したもので、平成22年の月平均生産額及び販売額を100とする指標で示す。

平成22年度の我が国のマイコン生産個数は25億7,400万個、販売量は28億4,000万個であった。2011年3月の生産量および販売量は2月と比べてそれぞれ4%及び12%上昇していたが、東日本大震災の発生によって世界の生産能力の20%を有する信越化学工業白河工場及び7.5%を有するSUMCO米沢工場が停止したため、シリコンウェハー等の原材料供給不足が生じ、マイクロプロセッサの生産水準は一転して4月から5月にかけて15%～20%の減少となった。

しかしながらこの様なマイコン供給の減少の度合いでは、前述の完成車生産台数の落ち込みの30～40%しか説明できない。先述したように、マイコンの非代替性が完成車生産台数の落ち込みを増幅したとする仮説がここから導き出される。

自動車用部品の生産には、マイコンより大きな東日本大震災の負のインパクトが観察される。ここでも、機械統計に基づき、主要な自動車部品の生産水準の推移をマイコン同様、平成22年の月平均生産額を100とする指標でFig. 11に示す。



Note: Auto motive parts: Japanese yen basis, Complete car: quantity basis. Data: Machinery statistics, METI

Fig. 11 Production level of automotive parts and complete car (Monthly average in 2010=100)

最も大きなインパクトはシャーシー及び車体部品に見られ、4月期には完成車生産水準とほぼ同率の対

前年比36%の水準まで生産が低下している。

一方、これ以外の自動車部品の4月期における生産低下は、完成車やシャーシー及び車体部品に比べると半分程度、マイコンの生産減の1.5倍（機関部品；33%、駆動伝動及び操縦装置部品；35%、懸架制動装置部品；36%）となった。

自動車の機関部（エンジン）や駆動伝動部（トランスミッション）、操縦装置、懸架制動装置（サスペンション）等にはマイコンが用いられるため、マイコンの供給停止によってこれら部品の生産には障害が発生し、その結果生産量が減少したものと考えられる。このような上流側からの素材、部品供給の減少に起因して生産水準が低下する減少をここでは、サプライチェーンにおける生産停止の「下流伝播」と呼ぶことにする。

一般に、自動車メーカーは自社製品の差別化を図るために、エンジンや操縦性能、足回り等に独自の工夫を凝らすと言われ、そのための重要な部品としてマイコンが使用される。従って、同一のマイコン製造事業者であっても供給するマイコンの仕様は納入先である自動車メーカーの注文に合わせてハード、ソフトの両面で異なることから、自動車メーカー間、完成車間におけるマイコンの代替性は極めて小さい。このことが原因となって発生する供給と需要のミスマッチによって、マイコンの供給低下を上回る自動車部品の生産低下が生じ、それがさらに大きな完成車の生産低下を引き起こしたものと考えられる。

このように、製品間の代替性が低い中間財が介在する生産過程においては一般的に、上流側の財の生産低下はさらに大きな下流側財の生産低下となって伝播していくものと考えられる。

ここで*i*月期のマイコン販売量の減少 ( $\Delta m_i$ ) が同じ月の自動車部品*j*の生産高の減少 ( $\Delta p_{ij}$ ) に及ぼす影響を $\alpha_{ij}$ 、 $\Delta p_{ij}$ が同じ月の完成自動車の生産台数の減少 ( $\Delta C_i$ ) に及ぼす影響を $\beta_{ij}$ とすると、上流側のマイコンの供給低下が自動車部品及びカーアクセサリーの生産高を経て完成車の生産台数に及ぼすインパクトは以下のように表現できる。

$$\frac{\Delta C_i}{\Delta m} = \frac{\Delta C_i}{\Delta p_{ij}} \times \frac{\Delta p_{ij}}{\Delta m} = \alpha_{ij} \times \beta_{ij} \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta p_{ij}}{\Delta m} \quad (2)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\Delta C_i}{\Delta p_{ij}} \quad (3)$$

ここで、東日本大震災発生翌月の平成23年4月期について $\alpha_{ij}$ 及び $\beta_{ij}$ をプロットするとFig.12のよ

うな図が得られる。

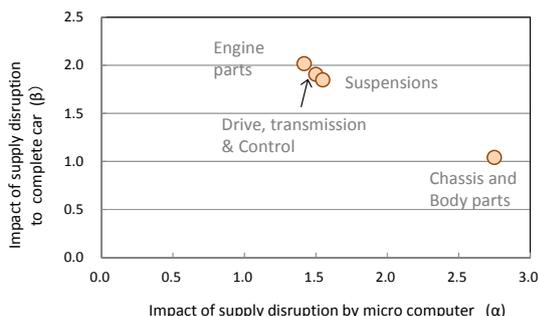


Fig. 12 Ripple effect of supply chain disruption

Fig.12の横軸は、自動車産業サプライチェーンを構成するマイコン→自動車部品というチェーンの下流伝搬時の増幅率を、縦軸は自動車部品→完成車というチェーンの下流伝搬時の増幅率を示す。東日本大震災時の機関部品や駆動伝動部品、操縦・懸架制動装置部品に対するマイコンの下流伝搬増幅率は1.5、これら部品の完成車生産に対する下流伝搬の増幅率は約2であったと評価できる。

しかしながらこれらの自動車部品の納入・生産の減少は、災害によってマイコンの供給が減少したことのみ起因するものではない。

災害による施設の被災や部品供給の停止等によって完成車生産ラインが停止すると、自動車メーカーの側には、組み立て工場の部品等の在庫を調整する必要が生じ、サプライヤーに対して部品納入を取りやめるか遅らせるように指示を行う。その場合、サプライヤーは部品類を在庫として抱えたり、生産量を削減することを強いられる。

ジャスト・イン・タイム方式の部品納入が常態化した自動車産業界においては、このような自動車メーカーからのフィードバックによって極めて短時間の間に部品生産が増減するものと考えられる。

ここではそれを「サプライチェーンにおける生産調整の上流伝播」と呼ぶことにする。(Fig.13参照)

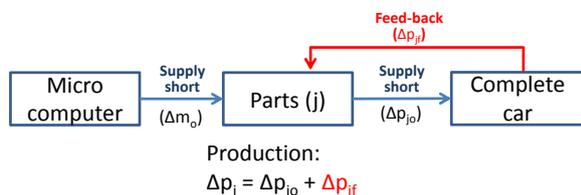


Fig. 13 Supply short and feed-back of production cut-down

ところで、本研究が依拠している機械統計からは、 $\Delta p_j$ を知ることができるが、 $\Delta p_o$ と $\Delta p_f$ を知ることができない。従って、部品jの生産減少の割合が、サプライチェーン上流側からのマイコンの供給減少に

よるものなのか、完成自動車の生産台数の減少によるものなのかは依然として不明のままである。

その典型はFig.13のシャシー及び車体部品の $\alpha_{ij}$ であろう。シャシーの $\alpha_{ij}$ は2.75とマイコン供給の低下に対して見かけ上大きな増幅効果を示す。一方 $\beta_{ij}$ は1.04であり完成車生産とほぼ完全に1:1で連動している。

ここで付録1を参照すると、シャシー及び車体部品は、その内訳をみるとマイコンへの依存度が小さく、マイコンの供給減の影響を受け難い。すなわち、平成23年4月期のシャシー及び車体部品の著しい生産減少は、マイコンの生産減によるものではありえず、完成自動車の生産台数が減少したため自動車メーカーの求めに応じて納入量を削減又は納入時期を遅らせたために生じた生産減少であると推測できる。すなわち、サプライチェーンの下流側に位置する自動車メーカーからの指示によって生じた「下流伝播」であったと考えるのが合理的である。

機械統計に基づくここまでの分析手法では、この仮説の実証は不可能であるが、以降の研究上留意すべき仮説であると考えられる。

#### 4.2 自動車生産と部品供給の相関関係

Ono (2013) は、平常時や東日本大震災時に自動車用部品の生産高が完成車生産台数とどのように連動していたのかを詳細に観察するため、両者を相関図上で比較した。

Fig. 14からFig.17は、機械統計上の主要な自動車部品区分である、シャシー及び車体部品、機関部品、駆動伝動及び操縦装置部品、懸架制動装置部品の4部品類の生産額と、排気量660cc以上2,000cc以下の小型自動車の国内生産台数を比較したものである。

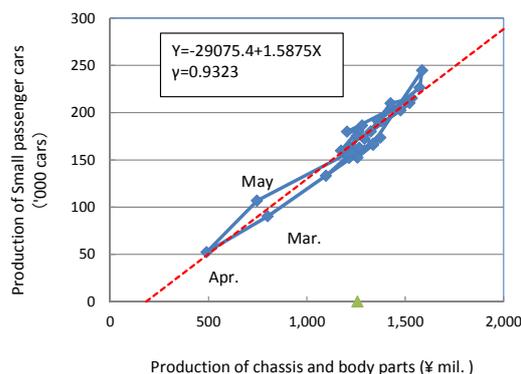


Fig. 14 Correlation of productions between complete car, and chassis and body parts

自動車用部品を説明変数として小型自動車生産台数との相関性を評価するとともに、直線回帰式を点線で記述した。東日本大震災の影響を受けて生産の

落ち込みがあった平成23年3月～5月のデータについては図上に月名を記入し、生産の低下と回復の経路が分かるようにした。ここでは、このような完成自動車と部品の毎月の生産高の変化の経路を「需給パス: Supply-demand path」と呼ぶことにする。

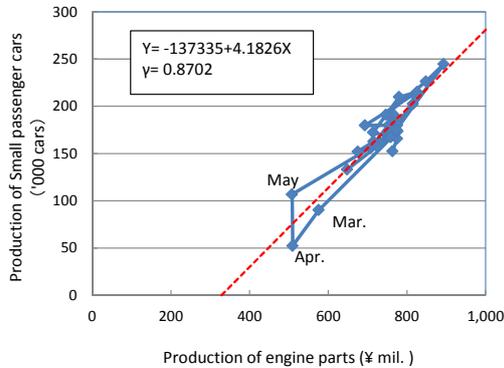


Fig. 15 Correlation of productions between complete car and engine parts

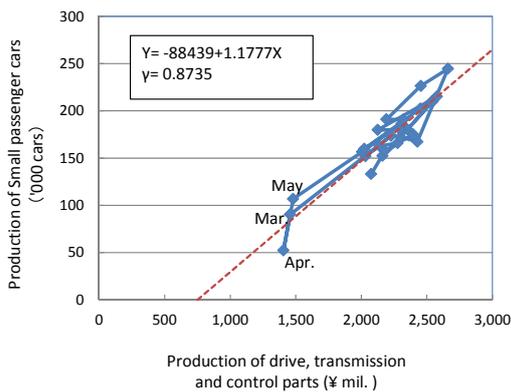


Fig. 16 Correlation of productions between complete car and drive, transmission and control parts

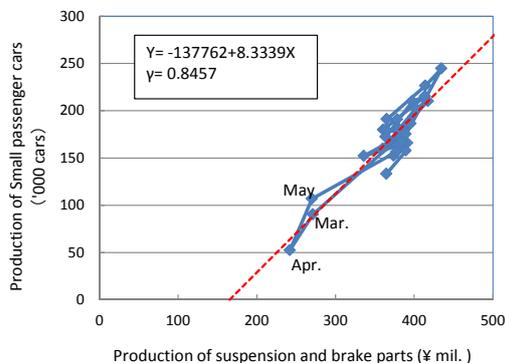


Fig. 17 Correlation of productions between complete car and suspension and brake parts

Fig.14～Fig.17をみると、需給パスは、平常時ほぼ

一直線上にあり、東日本大震災時も同じ直線の周辺で生産高が減少・回復している。減少時はほぼ直線状に動き、回復時は一様に5月を頂点としたやや上に凸状のループを描く。これらの図の観察結果から完成自動車と部品生産のサプライチェーンの構造に関して以下のような仮説を考えることができる。

- i) 製造過程に大きな変化がない短期間では、自動車部品と完成自動車の生産の比率はおおむね一定で、部品の生産高と完成自動車生産台数の需給パスは正の勾配を持つ直線（「投入産出線 (input-output line)」と呼ぶことにする）上にある。（詳細な個々の自動車部品と完成自動車相関関係については付録2を参照されたい）
- ii) 完成自動車の生産台数が減少すると、部品の生産は部品サプライヤーが生産調整を行うために必要な時間分遅れて減少する。（以下「生産調整リードタイム」と呼ぶ）生産調整リードタイムは、部品サプライヤーが自動車メーカー等サプライチェーン下流側及び素材メーカー等のサプライチェーン上流側との連絡調整に要する時間である。災害によってサプライチェーンの一部が突然途絶したり、一部の部品サプライヤーが起こした供給停止の影響で完成自動車生産が減少すると、サプライチェーン全体に供給調整が伝わるのにより多くの時間を要するため、通常より生産調整リードタイムは長くなるものと考えられる。生産調整リードタイムが存在すると、理論上、需給パスは投入産出線の下側を通る。
- iii) 完成車生産が回復する際には、生産停止していた部品サプライヤーが素材等調達の準備を行う必要があるため、生産調整リードタイムが生じ、需給パスは投入産出線の上側を通る。
- iv) 上記②、③より、災害等によって生産の増減が生じると、需給パスは投入産出線の周囲において時計回りのループ状を描く。ループは生産調整リードタイムが大きいほど投入産出線から離れた軌道を描く。（Fig. 18参照）

Fig. 18のような視点でFig.14～17を眺めると、東日本大震災時には、完成車生産が停止すると同時に、多くの部品サプライヤーが直ちに生産を停止し、大きな生産調整リードタイムが生じなかったと考える必要がある。一方、生産再開時には、部品サプライヤーの生産再開準備に時間を要し、生産調整リードタイムが生じたことから需給パスが上に凸のふくらみを持つ傾向となったものと考えられる。

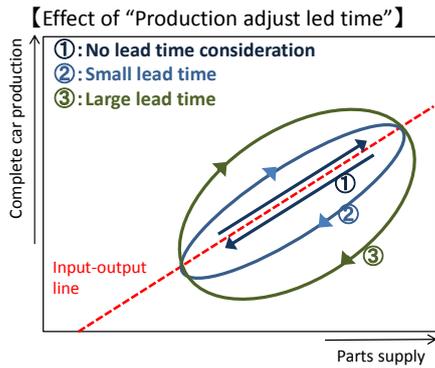


Fig. 18 Schematic view of the input-output line and supply-demand path

ここで、Fig. 14～17の部品分類よりも詳細な個別部品毎に需給パスを調べた事例をFig. 19～20に示す。Fig. 19のクラッチ装置の場合、生産減少時及び増加時の両方に生産調整リードタイムが見られるが、同じ駆動伝導装置である自動可変装置（Fig. 20）では生産調整リードタイムが全く見られないことが判明した。

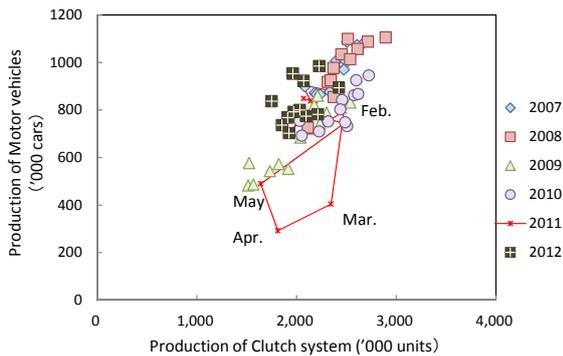


Fig. 19 supply-demand path of clutch system

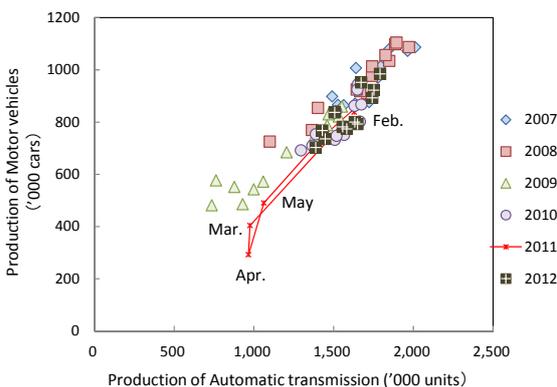


Fig. 20 Supply-demand path of automatic transmission

上記から、需給パスの分析をより精緻に行うためには、個別の部品までブレークダウンした検討を行う必要があることが判明した。東日本大震災時の完成車と個別部品の生産高の相関図については付録2

を参照されたい。

#### 4.3 まとめ

本章では、自動車産業のサプライチェーンの特徴を分析するため、機械統計に基づき東日本大震災後のマイコンや自動車部品の生産、供給の動向を時系列的に整理した。

自動車産業ではマイコンを搭載した自動車部品の納入によって完成車組み立てラインを維持しているため、災害等によってマイコンの生産が止まると一部の自動車部品の供給が停止し、それによって完成車の生産ラインが止まる。東日本大震災時には茨城県常陸那珂市のルネサスエレクトロニクスが被災するなどによって、直後の平成23年4月のマイコン供給は前年度に比べて23.2%低下したが、同月の自動車部品は、機関部品が32.9%、駆動伝動及び操縦装置部品、34.8%、懸架制動装置部品、35.9%、シャーシー及び車体部品は63.8%とはるかに大きな減少を示した。その結果、同月の排気量660cc以上2,000cc以下の小型乗用車の生産台数は66.3%落ち込むこととなった。このように、災害インパクトはサプライチェーンの上流から下流へと伝わる中で次第に増幅される傾向を持つが、その理由として、一部の部品供給が止まったことに起因する生産全般の停止や生産調整リードタイムによるモノの流れの不安定化等が考えられる。

本章では、機械統計に基づき我が国の国内自動車メーカーの完成車生産台数及びマイコン供給並びに自動車部品の相互関連性に注目して、このような非定常時のサプライチェーンの動きについて分析を試みた。

しかしながら自動車生産に対する東日本大震災の影響が3か月程度にとどまったこと、機械統計から得られる生産・供給データが1ヶ月単位であること等から統計データから得られる知見には限界があることがわかった。そこで次章では、数値モデルによるアプローチを試みることにする。

### 5 自動車産業のサプライチェーンのモデル化

#### 5.1 自動車産業における部品供給構造モデル

前章 4.2 において、完成自動車生産台数と機関部品、駆動伝動部品、操縦・懸架制動装置部品、シャーシー及び車体部品の生産額の間には強い相関関係がみられることが分かった。

そこで、本章においては四輪車生産ラインとこれを支える主要な自動車部品のサプライチェーンについて Fig.21 のようなモデルを考えることにする。

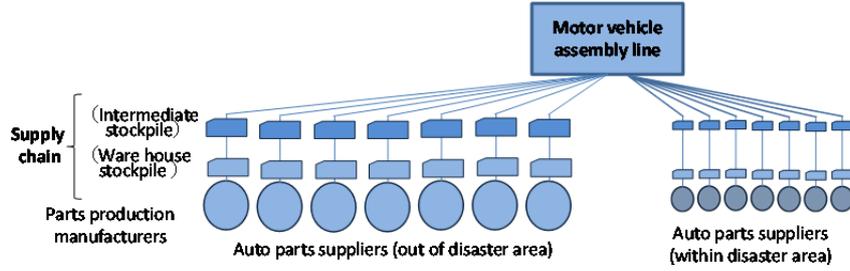


Fig. 21 Structure of automotive parts supply chain

ここで、四輪車は、乗用車（軽、小型、普通）、バス（シャーシー、大型、小型）、トラック（軽、小型、普通）、牽引車、特殊自動車、トレーラーを言う。

モデル上で自動車組立てラインに供給される自動車部品は、機械統計が扱う機関部品、駆動伝動部品、操縦・懸架制動装置部品、シャーシー及び車体部品に加えて、エンジンに取り付ける充電発電機（ダイナモ）や点火栓（プラグ）等の内燃機関電装品及びその他部品の6種類を考える。（Fig. 21 参照）

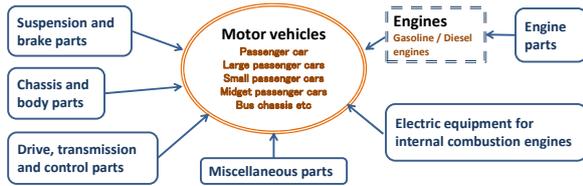


Fig. 22 Automotive parts to be supplied

モデルでは、日本国内を被災地とそれ以外の地域に2分し、自動車部品の分類毎に1サプライヤー、被災地内外で合わせて、12 サプライヤーが、1カ所の完成車工場に部品を供給することとした。

生産された自動車部品は一旦サプライヤーの倉庫に保管された後、完成車工場近辺にサプライヤーが確保したジャスト・イン・タイム（JIT）納品のための中間倉庫に移され、生産者工場からの指示で完成車生産に合わせて納品される。その際、サプライヤーは、前年度同時期の四輪車生産実績に基づきあらかじめ決定した生産計画に従って部品生産を行うが、サプライヤー倉庫や保管拠点の在庫が管理値を越えて積みあがった時は減産するか生産停止し、在庫が管理値を下回ると増産することとした。また、サプライヤーは、日々の生産台数に基づき完成車工場から出される指示に従って保管拠点から完成車工場に部品を納入する他、保管拠点の在庫水準を保てるようにサプライヤー倉庫から部品を出荷することとした。

上記の様な構造を有するモデルは、次のように数式で記述される。

まず、完成車の生産と部品供給の関係について、式(4)~(6)の定式化を行った。

$$P^t = \text{Min} (P_0^t, \alpha_{ij} \times S_{ij}^t) \quad (4)$$

$$S_{ij}^{t+1} = S_{ij}^t - P^t / \alpha_{ij} \quad (5)$$

$$S_{ij}^t \leq H_{ij}^t \quad (6)$$

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部品  $j$  (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  $ij$  の中間倉庫在庫量 (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、中間倉庫及び部品工場における在庫は、式(7)及び(8)の様に表示する。

$$H_{ij}^t = H_{ij}^{t-1} - S_{ij}^t + s_{ij}^t + s_{oj}^t \quad (7)$$

$$W_{ij}^t = W_{ij}^{t-1} - d_{ij}^t + p_{ij}^t \quad (8)$$

ここで、

$W_{ij}^t$  : 時点  $t$  (日) の部品  $ij$  の工場在庫量 (百万円)

$s_{ij}^t$  : 時点  $t$  (日) に JIT 中間倉庫に納入される部品  $ij$  (百万円)

$s_{oj}^t$  : 時点  $t$  (日) の部品  $ij$  の国外等代替地からの入荷量 (百万円)

$d_{ij}^t$  : 時点  $t$  (日) に工場倉庫から JIT 中間倉庫に向けて出荷される部品  $ij$  (百万円)

$\tau_{ij}$  : 部品  $ij$  の工場出荷から中間倉庫納入までのリードタイム (日)

$p_{ij}^t$  : 時点  $t$  (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すると、

$$s_{ij}^t = d_{ij}^{t-\tau_{ij}} \quad (9)$$

$$s_{oj}^t = d_{oj}^{t-\tau_{oj}} \quad (10)$$

ここで、

$t_{ij}$  : 部品  $ij$  の工場出荷から中間倉庫納入までのリードタイム (日)

$toj$  : 部品  $1j$  の工場出荷から中間倉庫納入までのリードタイム (日)

なお、工場からの出荷にあたっては、輸送リードタイムを考慮した将来の四輪車生産計画台数と前日の実生産台数を比較して、その多い方に合わせて次式で出荷量を決めることとした。

$$d_{ij}^t = \text{Max} (P_0^{t+\tau_{ij}}/\alpha_{ij}, P^{t-1}/\alpha_{ij}) \times \beta h \quad (11)$$

$\beta h$  : 中間倉庫在庫調整パラメーター。中間倉庫の在庫が基準値以下の場合  $\beta h=1$ , 在庫上限値を超えた場合  $\beta h=0$ 。

また出荷できる部品は工場在庫の範囲であるので、次式を満たさなければならない。

$$d_{ij}^t \leq W_{ij}^t \quad (12)$$

部品工場における部品  $ij$  の生産高は、(13)式で表せる。

$$p_{ij}^t = (P_0^{t+\tau_{ij}}/\alpha_{ij}) \times \beta w \quad (13)$$

$\beta w$  : 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  $\beta w=0$ 。

東日本大震災時に東北・北関東地域の自動車部品サプライヤーが被災したことが原因となって海外の自動車組み立て工場の操業が止まったことを勘案して、本モデルでは第一義的には被災地において生産される自動車部品の中にその他の地域において生産される部品と互換性を有しないものが含まれ、その他地域での部品サプライヤーが直ちにこれを代替することは困難であると仮定した。従って、災害が発生して被災地の部品工場が生産を停止すると、最も早く在庫が尽きた部品によって完成車生産ラインが止まることになる。

しかしながら一方で、昨今の自動車メーカーの部品汎用化・共通化の動向にも鑑みる必要がある。従って、その他の地域や海外のサプライヤーが代替供給する場合には、一定期間の生産準備リード・タイム後に代替部品供給が行われるというモデル構造とした。

上記の様な構造を有するサプライチェーンモデルについて、2011年の生産計画 ( $P_0^t$ ) は、東日本大震災の負のインパクトを強く受けた3月～6月を除く機械統計の四輪車実績に基づいて決定し、また  $\alpha_{ij}$  は、平成19年～平成24年の72か月分データから四輪車と自動車部品の直線相関をとり

その傾きから決定した。(Fig.23 参照)

なお、本文中では機械統計データから得られた  $\alpha_{ij}$  の1例のみを Fig.24 に示す。その他については、付録3を参照されたい。

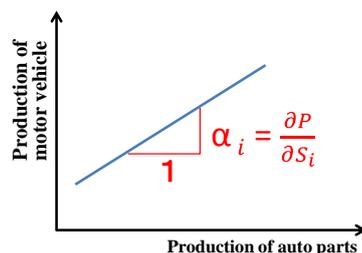


Fig. 23 Values of  $\alpha_{ij}$

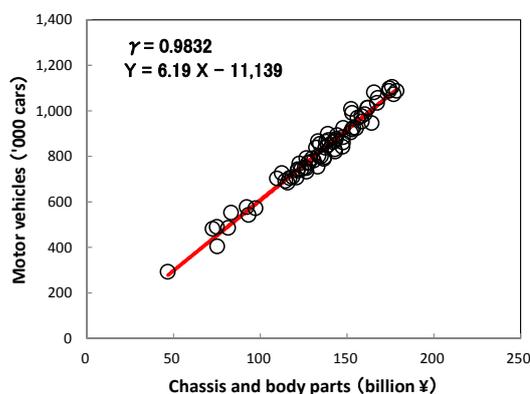


Fig. 24  $\alpha_{ij}$  of motor vehicle and chassis and body parts

また、その他の主な外生パラメーターは Table 3 の通りとした。なお、被災地域が生産する自動車部品の全国シェアは本稿第2章 Table 1 によった。

Table 3 Major exogenous variables

Share of parts production in the disaster area	Transportation lead-time			
	Within disaster area	Out of disaster area	Near-by Asia	Southeast Asia
2.5 %	3 days	2 days	5~6days	14days

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。

- ① 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。
- ② 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組み立て工場緊急停止日数を決定。
- ③ 各自動車部品について、平成23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の一覧は、Table 4 の通りとなった。

Table 4 Estimated parameter values

Motor car production	Automotive parts (i = 1 ~ 6)	$\alpha$ (cars/mil.JV)	Production shutdown (days)	Targeted inventory level
Estimated shutdown period of assembly lines. ↓ <b>18.8 days</b>	Chassis and body	6.2	51.5	Ranges from 244% to 700%
	Engine	10.6	44.6	
	Drive, transmission and control	3.7	48.0	
	Suspension and brake	20.4	23.6	
	Electric equipment for internal combustion engines	25.0	17.8	
	Miscellaneous parts	20.1	51.7	

また、四輪車生産台数及び自動車部品生産におけるモデルの適合度を Fig.25 及び Fig.26 に示す。

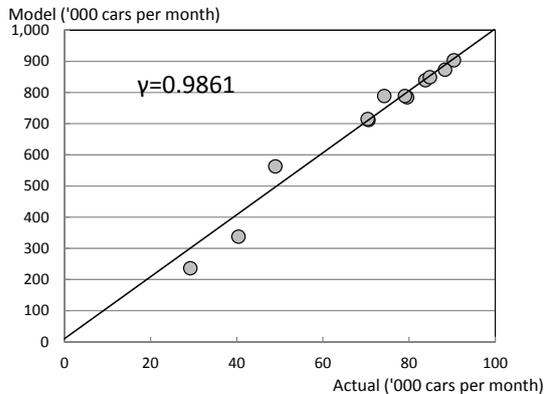


Fig. 25 Reproducibility of the model in terms of motor car production

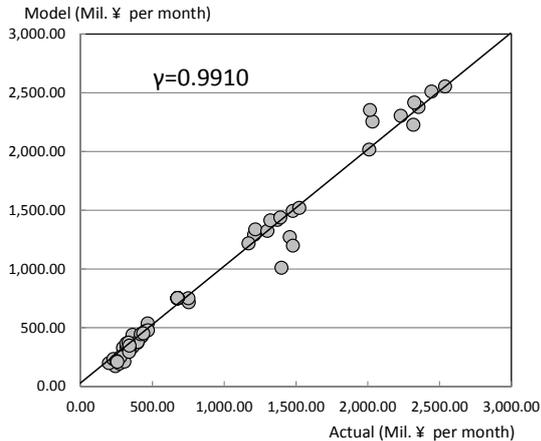


Fig. 26 Reproducibility of the model in terms of Automotive parts production

モデルの適合度を東日本大震災が発生した平成23年1月～12月の実績値とモデル値の乖離で評価すると、四輪車生産台数は0.9861、自動車部品生産高については0.9910と高い相関係数が得られた。

## 5.2 東日本大震災の自動車産業へのインパクトのモデル再現性

第5.2節で作成したモデルによって東日本大震災が与えた四輪車生産及び自動車部品生産への影響を再現したものをFig.27～Fig.33に示す。

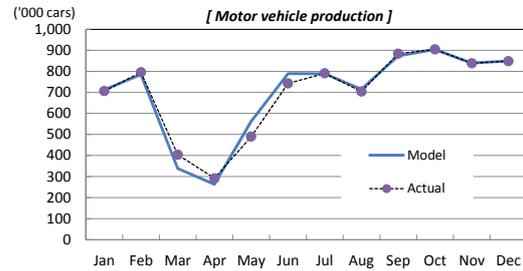


Fig. 27 Motor vehicle production in 2011

Fig. 27を見ると、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。

また自動車部品の生産高について平成23年の実績とモデル値を比較したFig.28～Fig.33から、モデルでは東日本大震災による部品生産の落ち込みを過大評価する傾向にあることがわかった。

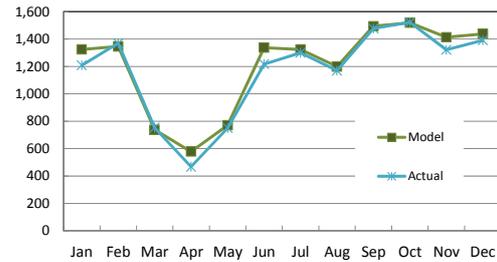


Fig. 28 Chassis and body parts production in 2011

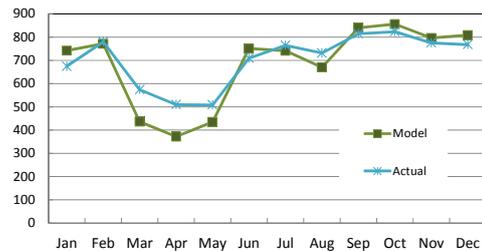


Fig. 29 Engine parts production in 2011

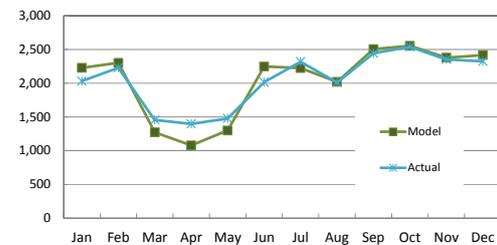


Fig. 30 Drive, transmission and control parts production in 2011

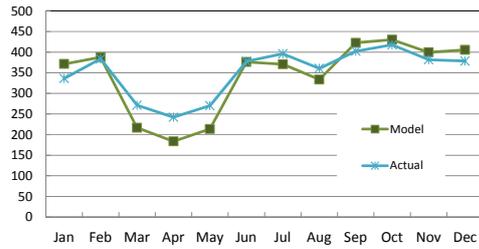


Fig. 31 Suspension and brake parts production in 2011

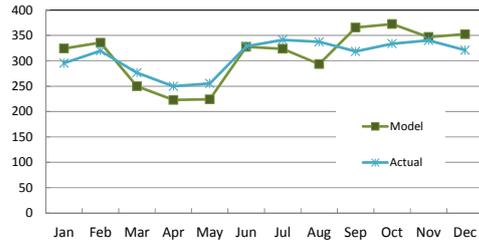


Fig. 32 Production of electric equipment for internal combustion in 2011

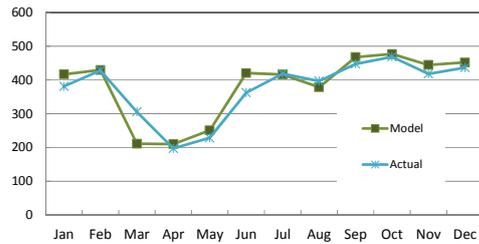


Fig. 33 Miscellaneous parts production in 2011

シャーシー及び車体部品やその他部品については比較的高い再現性が得られたが、機関部品については最大26.9%、操縦・懸架制動装置部品は23.4%、駆動伝動部品には22.9%（いずれも4月期）の乖離がみられ、更なる検証が必要と考えられる。

これらの自動車部品と四輪車の需給パスの実績とモデル再現結果を、東日本大震災が発生した平成23年の1月～12月について比較したものをFig.34～Fig.39に示す。

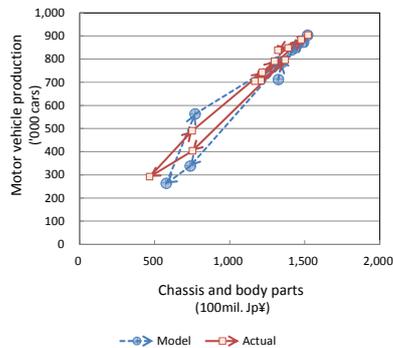


Fig. 34 Supply-demand path of chassis and body parts

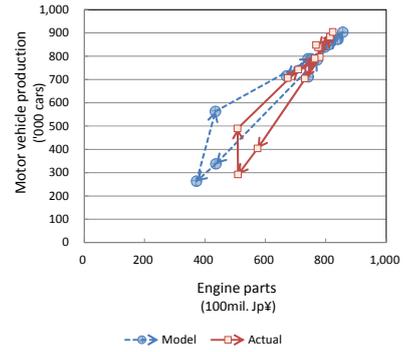


Fig. 35 Supply-demand path of engine parts

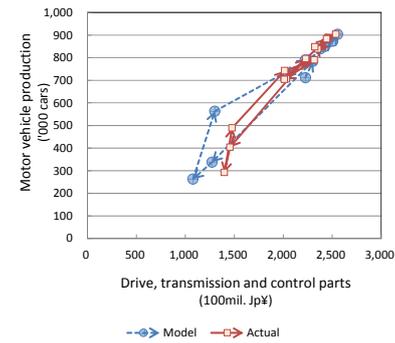


Fig. 36 Supply-demand path of transmission and control parts

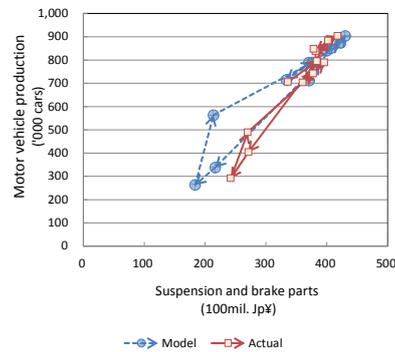


Fig. 37 Supply-demand path of suspension and brake parts

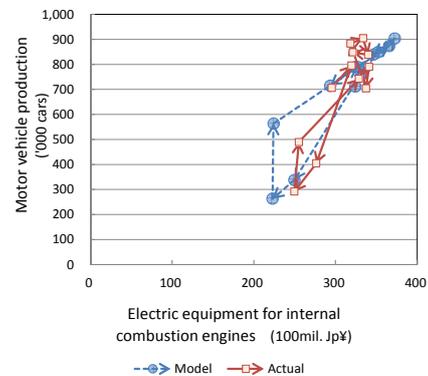


Fig. 38 Supply-demand path of electric equipment for internal combustion engines parts

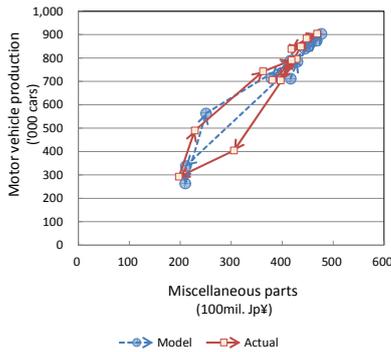


Fig. 39 Supply-demand path of miscellaneous parts

Fig. 28～Fig. 33に示した自動車部品生産高の実績とモデル値と同様に、シャーシー及び車体部品やその他部品に関するについては需給パス比較的良好な再現性が得られたが、駆動伝動部品や操縦・懸架制動装置部品については実績とモデル値でかなりの乖離がみられた。

そもそも、機械統計から得られた実績需給パスは、モデルが再現したような投入産出線まわりのループ形状があまり明確に表れてきていない。このことは、モデルで用いた自動車部品データが異なった特性を有する個々の部品についての1月単位の集計データであることに起因するものなのか、もしくは東日本大震災によってサプライチェーンの断絶が生じた際に、生産調整リードタイムがモデルで考えたほどの効果を実際は発揮していなかったことを示すものなのか、は、依然として不明である。このような観点からも、今後、個々の部品を組み込んだ更に詳細なモデルの検討が必要であると考える。

## 6. まとめ

本稿では、まず第2章において、東日本大震災によって被災し、国内外の自動車生産に大きな影響を与えた東北・北関東地方の自動車産業の特徴について述べた。特に東北地方には1千を超える機械、プレス加工や電子部品・デバイスの実装・組立、樹脂成型・ゴム製品加工、自動機・装置、金型等の自動車関連企業、事業所が立地しており、金額ベースでは2.5%ではあるものの、自動車産業にとって重要な素材、部品を供給していることが明らかになった。

また、第3章では東日本大震災によるこれら自動車部品産業が内外の自動車組み立て工場に大きな影響を与えたことを明らかにした。特に事例研究として提示されたトヨタ自動車の震災後の動向をみると、災害により社員の安否確認と施設の安全確認、部品

類の供給確保のためのサプライチェーンの再構築などの結果、トヨタは国内生産網の再建に1ヶ月以上を要したが、同時に海外生産拠点における部品供給不足が発生し、海外拠点での操業度低下が生じた。結局東日本大震災に起因する自動車部品サプライチェーン途絶の影響によって3ヵ月間に及ぶ世界的な自動車生産低下を生じたことを明らかにした。

上記を受けて、第4章では自動車産業に着目して、機械統計のデータに基づき、東日本大震災時における完成自動車と部品供給の連動減少の特徴を分析した。ここでは、災害による自動車部品の供給停止や減少が完成車生産に影響を与える「サプライチェーンの下流伝播」や完成車生産ラインが停止することによる部品納入への影響である「サプライチェーンの上流伝播」の現象について考察した。

また、完成自動車と自動車部品の生産高の時間経過に伴う増減の軌跡に着目し、その主軸となる「投入産出線」と完成自動車と自動車部品の生産高が描く軌跡「需給パス」について考察した。

第5章においては、上記の需給パスを説明することを目標として、機械統計が扱う四輪車生産台数と機関連部品並びに駆動伝動部品、操縦・懸架制動装置部品、シャーシー及び車体部品、内燃機電装品、その他部品の6分類の部品類の生産・出荷の連動を説明する数値シミュレーションモデルの構築を行った。

モデルの構築にあたっては、四輪車の生産台数と6分類自動車部品の投入産出線を構造方程式とし、自動車部品工場や中間保管倉庫における在庫調整や工場間の輸送等のリードタイムを考慮した。作成したモデルでは、東日本大震災が発生した平成23年の四輪車生産台数や自動車部品生産高について、高い再現性をえたが、需給パスについては、災害時に発生する部品生産高の減少度合いを最大で27%過大に評価するなど精度の面で課題を残した。

上記のような検討結果を踏まえて、今後、

- ① 個別の自動車部品の特性を織り込むとともに部品等供給の上流側第2層、第3層を組み込む等より詳細で適合性・安定性の高いモデルの構築、
  - ② 海外生産拠点も含むグローバルな自動車産業サプライチェーンへのモデルの拡張、
  - ③ 非代替性を有するキーパーツの実態の更なる解明、
- 等に取り組むこととしたい。

## 謝 辞

本稿のとりまとめにあたっては、国土交通省近畿地方整備局の調査結果を活用させていただいた。また、本研究はJSPS科研費(25560153)の助成を受

けたものである。ここにその旨を記し、感謝の意を表す。

### 参考文献

- 赤倉康寛, 小野憲司 (2013) : 港湾物流BCPにおける外貿コンテナ貨物の需給関係, 京都大学防災研究所研究発表講演会
- インテリジェント・コスモス研究機構 (2010) : 東北の自動車関連企業マップ
- 神田正美, 岡村京子, 小野憲司 (2012) : 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・講演集Vol.45, No.87
- 中小企業庁 (2011) : 2011年版中小企業白書, pp.27
- (株)帝国データバンク (2012) : 平成23年度経済産業統計政策調査等 (震災後の生産回復に関する調査研究) 調査報告書 (経済産業省委託事業), pp.43,
- Ono, K., Kanda, M., (2012): Impact of the 2011 east Japan great earthquake and tsunami on the local logistics, Proceedings for International conference on transport and logistics
- Ono, K., (2013): Impact of the 2011 east Japan great earthquake on the Japanese automobile industry, The 5<sup>th</sup> International Conference on Logistics and Transport

### 付 録

#### 付録1：自動車部品分類（機械統計）

経済産業省生産動態統計機械統計編（機械統計）では、以下のような分類で機械統計年報として自動車部品の月別・年別生産高を公表している。

#### シャシー及び車体部品 (Chassis and body parts)

- 燃料タンク(LPG用を除く)  
(Fuel tank excl.L.P.G. tanks)
- 排気管・消音器  
(Exhaust pipes and mufflers)
- 窓わく  
(Window frames)
- ドアヒンジ・ドアハンドル・ロック  
(Door hinges, door handles and locks)
- 窓ガラス開閉装置  
(Window regulators system)
- シート  
(Seats)
- シートベルト  
(Seat belt)
- エアバッグモジュール  
(Airbag module)

#### 懸架制動装置部品 (Suspension and brake parts)

- ショックアブソーバ  
(Shock absorbers)
- ブレーキ倍力装置  
(Power brake system)
- ブレーキシリンダ  
(Brake cylinders)
- ブレーキパイプ  
(Brake pipes)
- ブレーキシュー  
(Brake shoes)
- 電子式ブレーキ制御装置  
(Electronic brake-related devices)

#### 内燃機関電装品 (Electric equipment for internal combustion engines)

- 充電発電機(ダイナモ)  
(Ignition generators)
- 配電器(ディストリビュータ)  
(Distributors)
- 始動電動機(スタータ)  
(Starters)
- 点火線輪(イグニションコイル)  
(Ignition coils)
- 点火栓(プラグ)  
(Sparking plugs)

駆動伝導及び操縦装置部品  
(Drive, transmission and control parts)

クラッチ装置  
(Clutch system )  
自動変速装置  
(Automatic transmission system )  
ユニバーサルジョイント  
(Universal joints )  
プロペラシャフト  
(Propeller shafts )  
車輪  
(Wheels )  
かじ取りハンドル  
(Steering wheels )  
ステアリング装置・タイロッド・  
タイロッドエンド  
(Steering system, tie rod and tie  
rod end )

機関部品  
(Engine parts)

ピストン  
(Piston )  
ピストンリング  
(Piston rings )  
シリンダーライナ  
(Cylinders liners )  
吸気弁・排気弁  
(Intake valves and exhaust valves )  
軸受メタル  
(Bearing metals )  
ブッシュ  
(Bushings )  
オイルシール  
(Oil seals )  
ガスケット  
(Gaskets )  
燃料ポンプ  
(Fuel pumps )  
気化器・燃料噴射装置  
(Carburetors and Fuel injection equipment )  
空気清浄器  
(Air filters )  
油清浄器  
(Oil filters )  
油ポンプ  
(Oil pumps )  
水ポンプ  
(Water pumps )  
放熱器(ラジエータ)  
(Radiators)

その他の部品  
(Miscellaneous parts )

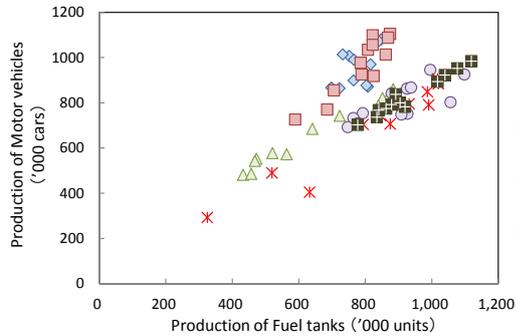
スイッチ類  
(Switches )  
計器類  
(Meters )  
ワイパー  
(Windshield wiper )  
警音器  
(Horns )  
暖房装置  
(Heaters )

付録2：完成自動車及び主要部品の相関関係

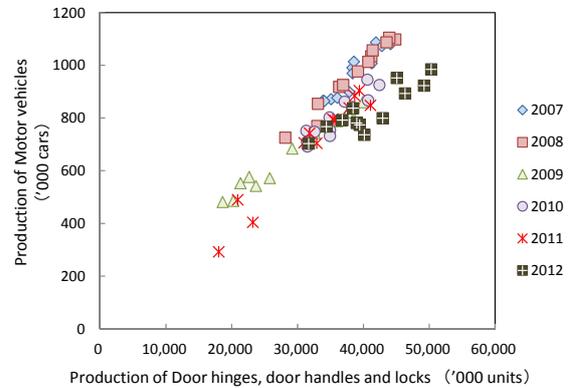
2007年から2012年の6年間に於ける四輪車(Motor vehicles)と主要な自動車部品を機械統計に基づいて整理したものを以下に示す。

(1) シャーシー及び車体部品

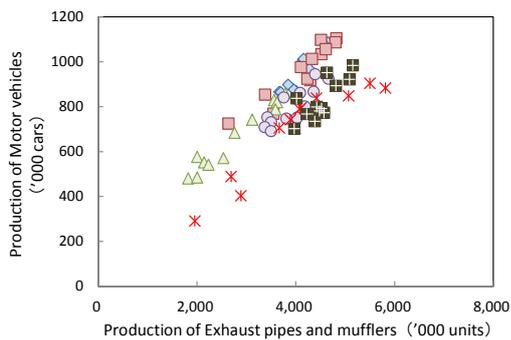
① 燃料タンク



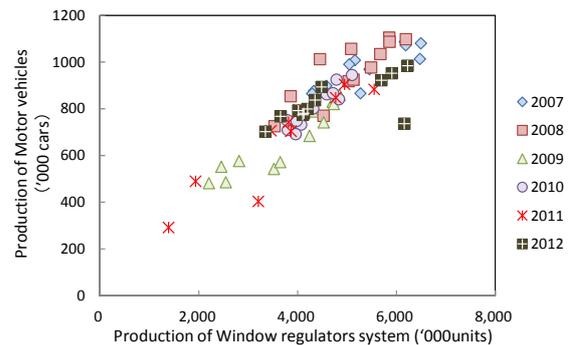
④ ドアヒンジ・ドアハンドル・ロック



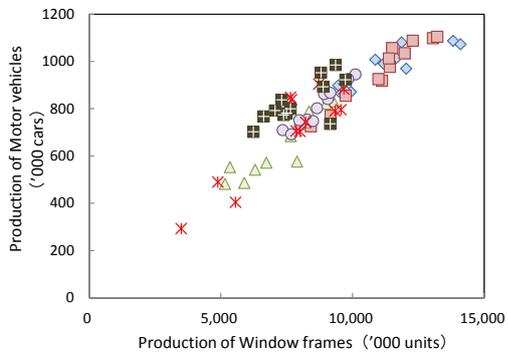
② 排気管・消音器



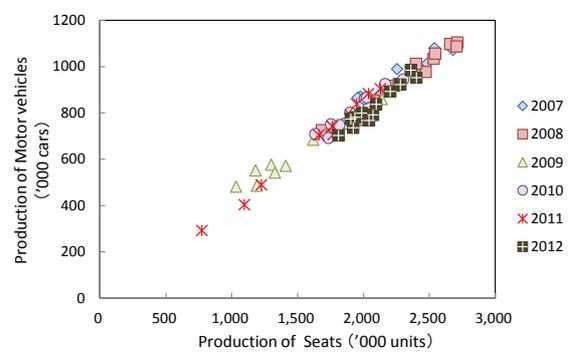
⑤ ガラス開閉装置



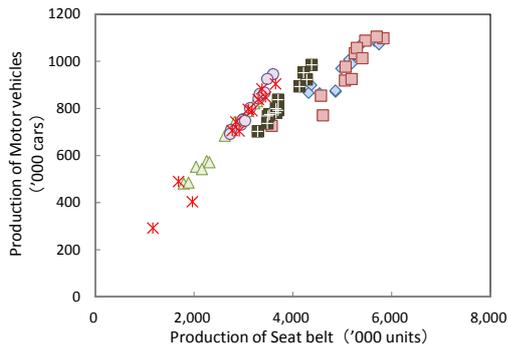
③ 窓わく



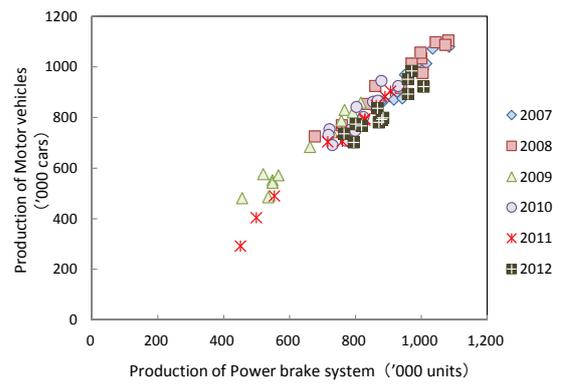
⑥ シート



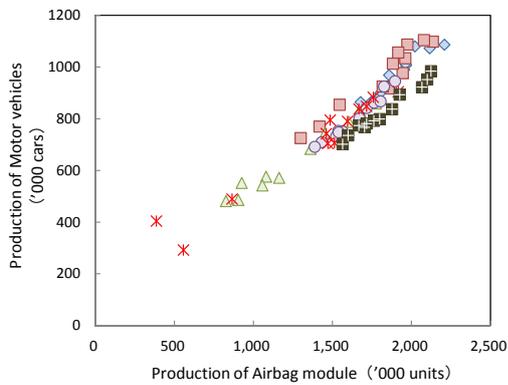
⑦ シートベルト



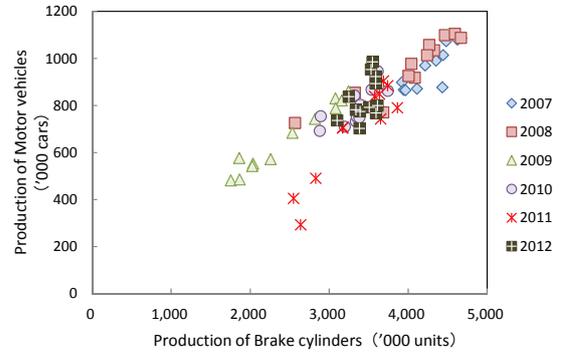
② ブレーキ倍力装置



⑧ エアバックモジュール

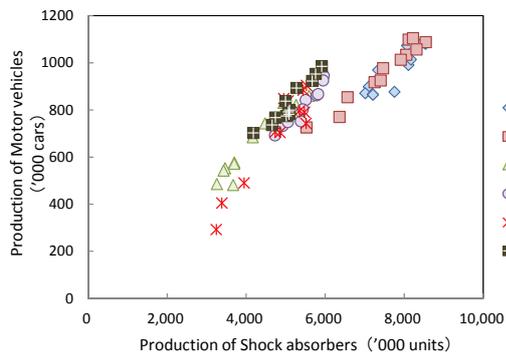


③ ブレーキシリンダ

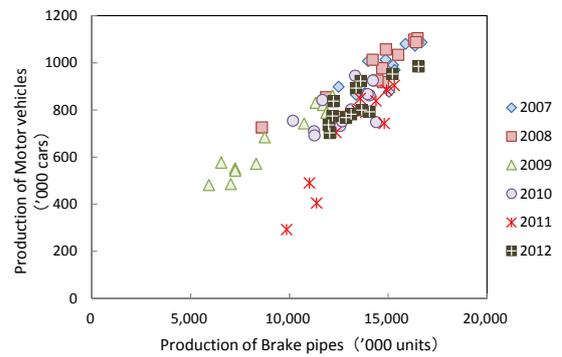


(2) 懸架制動装置部品

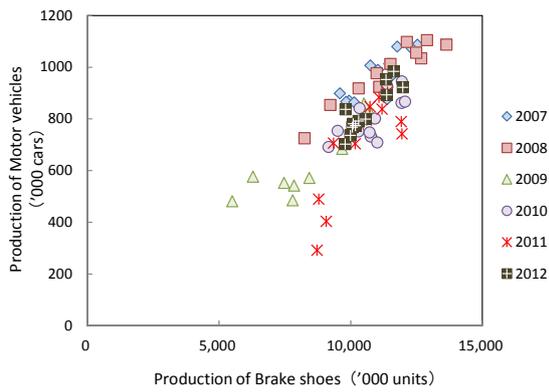
① ショックアブソーバ



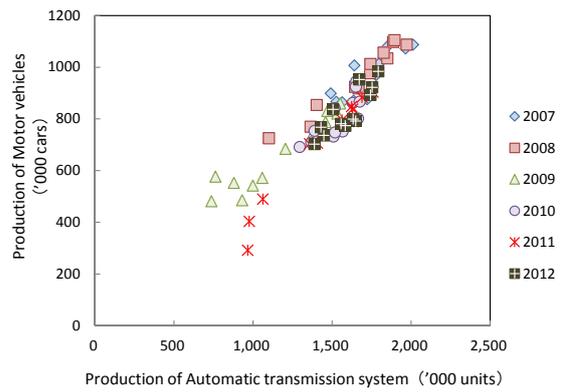
④ ブレーキパイプ



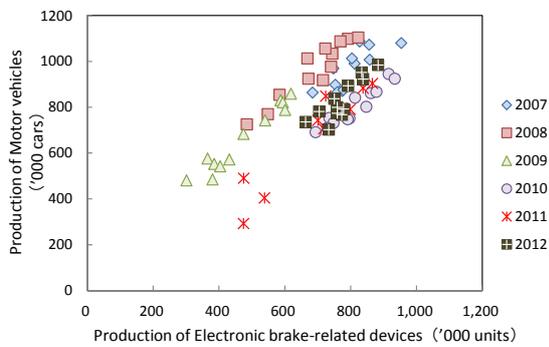
⑤ ブレーキシュー



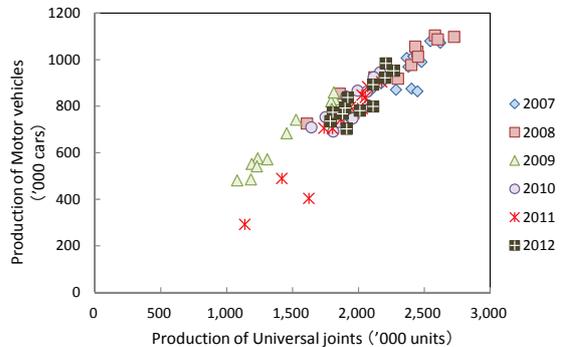
② 自動変速装置



⑥ 電子式ブレーキ制御装置

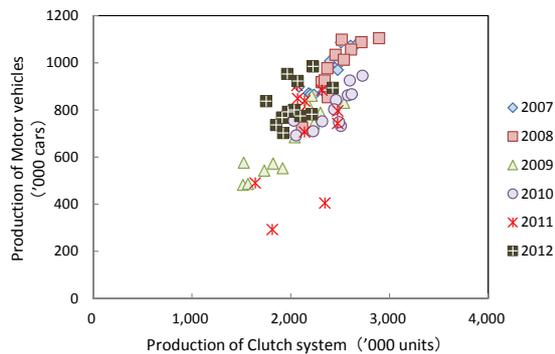


③ ユニバーサルジョイント

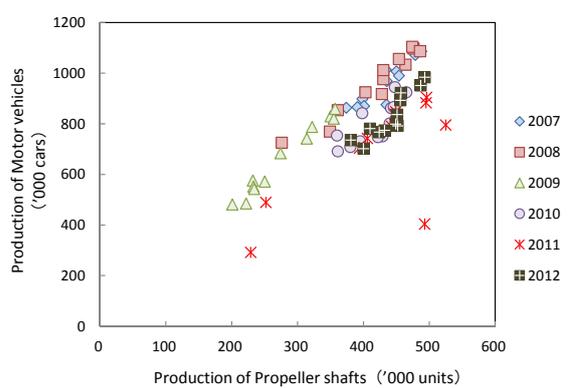


(3) 駆動伝導及び操縦装置部品

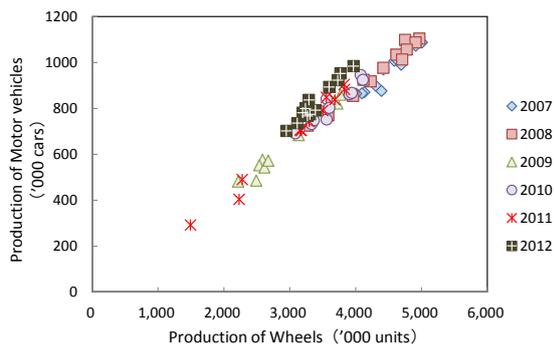
① クラッチ装置



④ プロペラシャフト

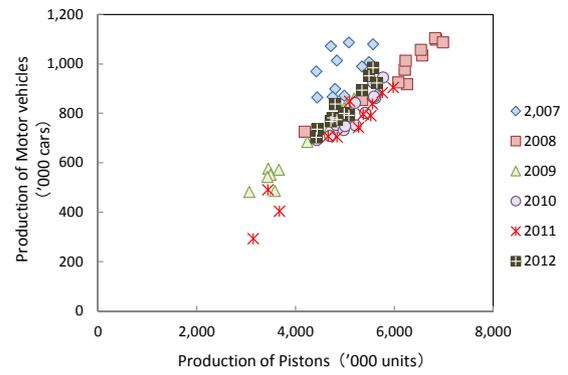


⑤ 車輪

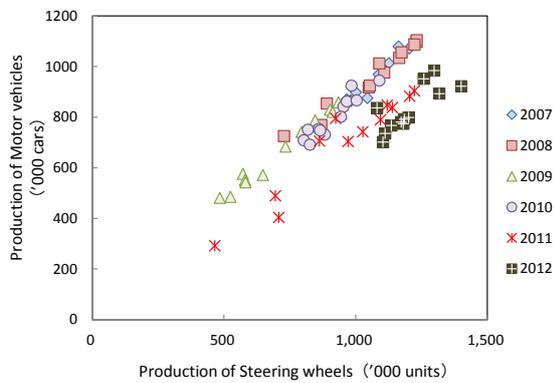


(4) 機関部品

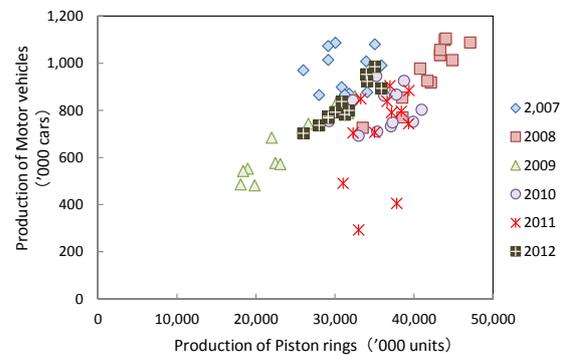
① ピストン



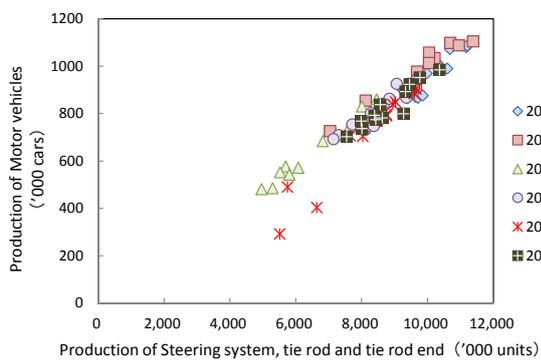
⑥ かじ取りハンドル



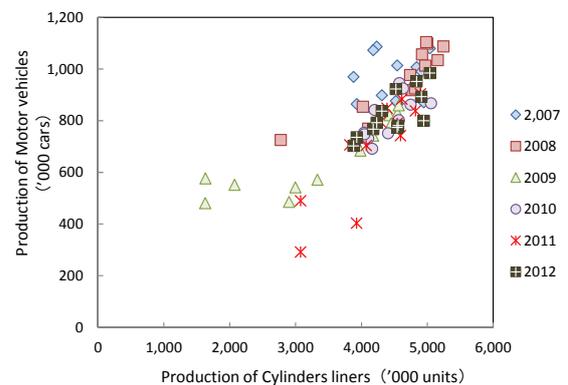
② ピストンリング



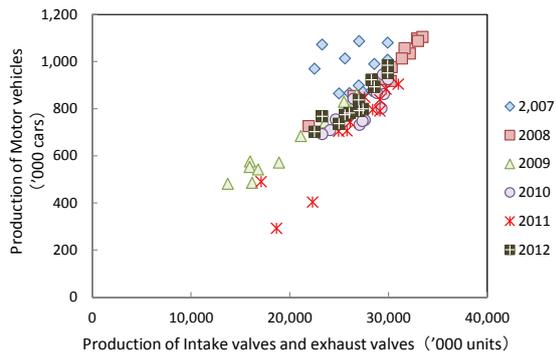
⑦ ステアリング装置・タイロッド・タイロッドエンド



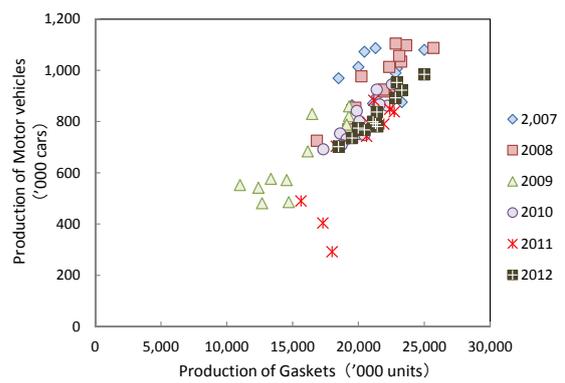
③ シリンダーライナ



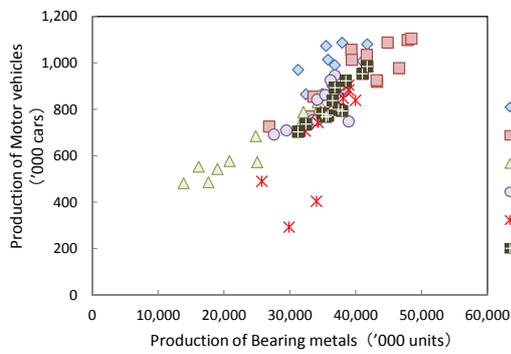
④ 吸気弁・排気弁



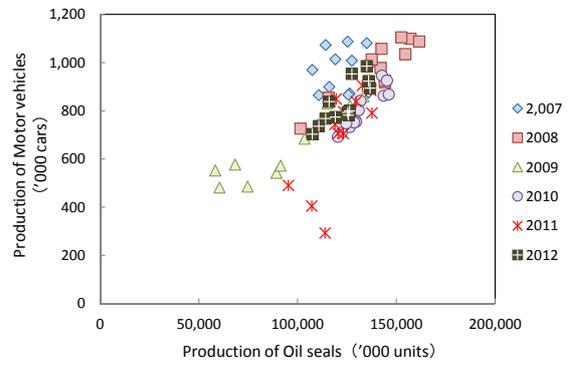
⑦ ガスケット



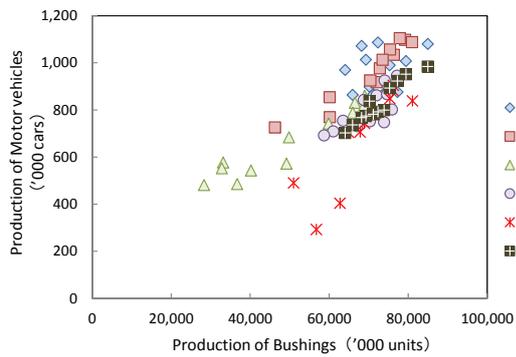
⑤ 軸受メタル



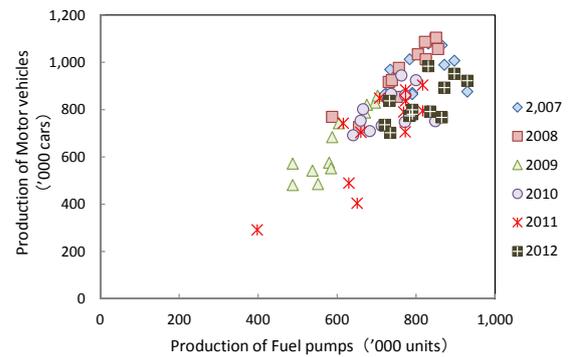
⑧ オイルシール



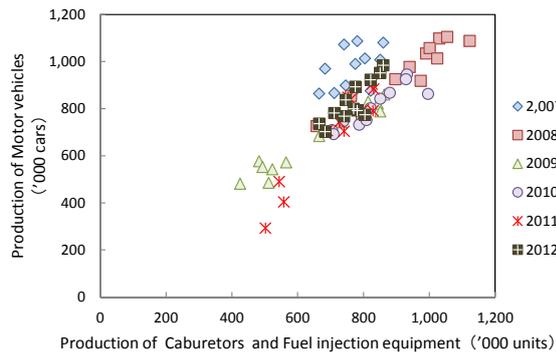
⑥ ブッシュ



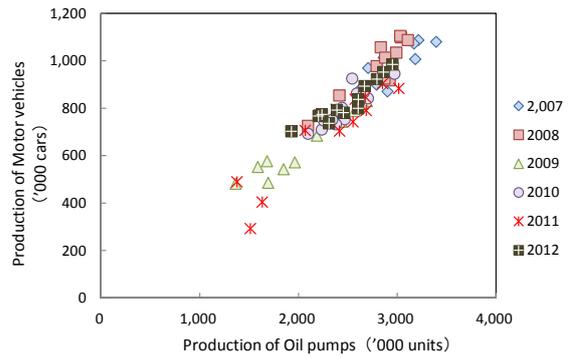
⑨ 燃料ポンプ



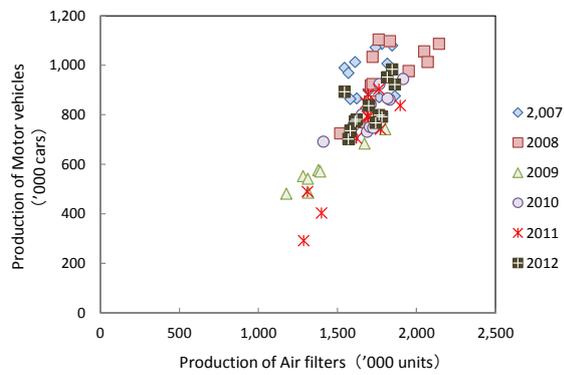
⑩ 気化器・燃料噴射装置



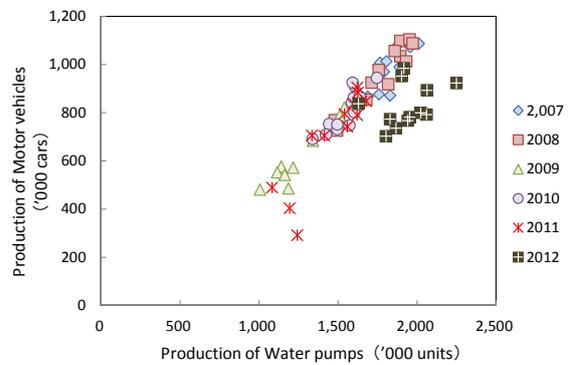
⑬ 油ポンプ



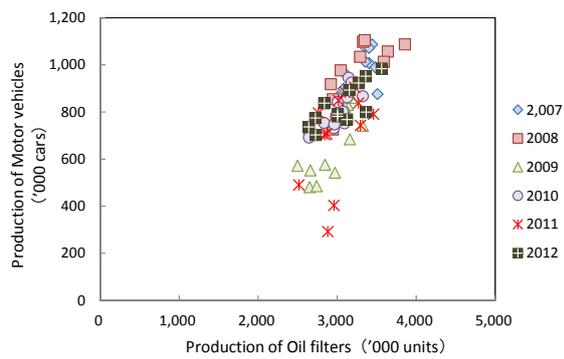
⑪ 空気清浄器



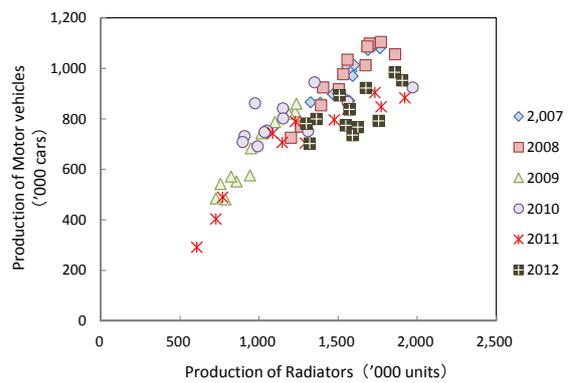
⑭ 水ポンプ



⑫ 油清浄器

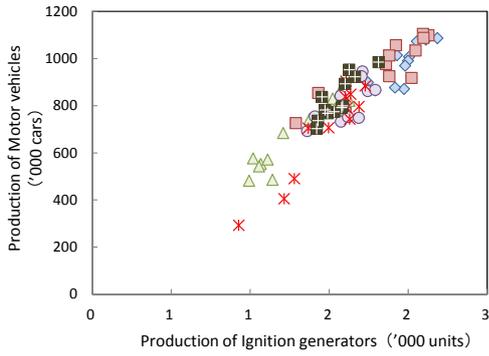


⑮ 放熱器 (ラジエータ)

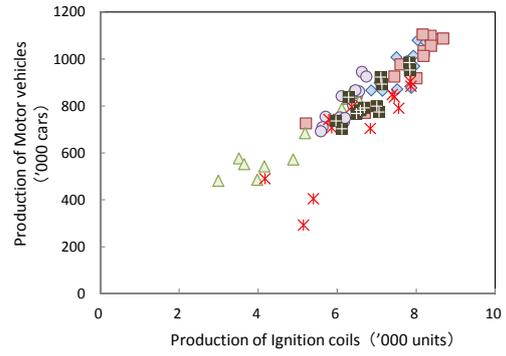


(5) 内燃機関連電装品

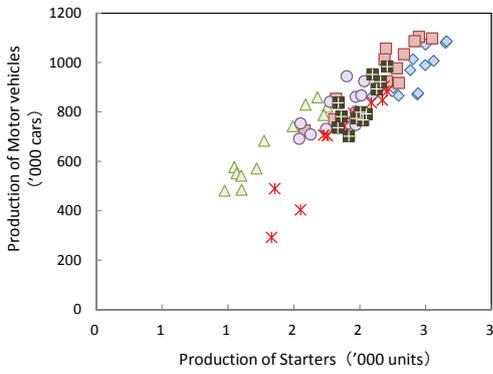
① 充電発電機 (ダイナモ)



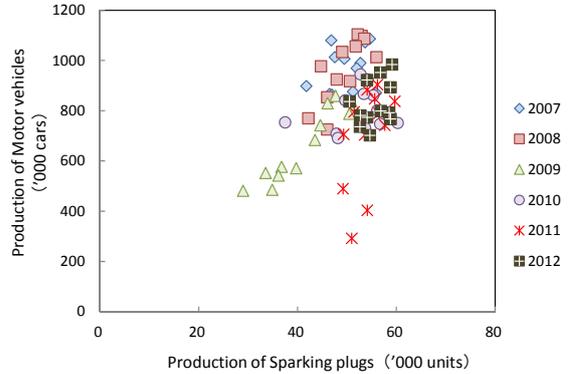
④ 点火線輪 (イグニションコイル)



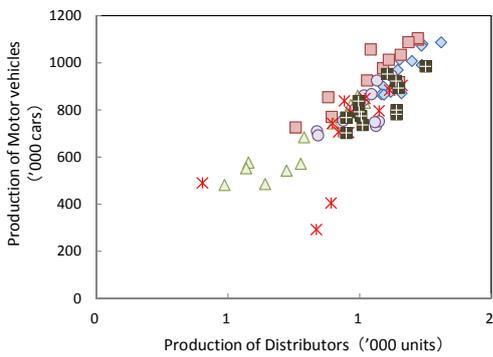
② 始動電動機 (スタータ)



⑤ 点火栓 (プラグ)

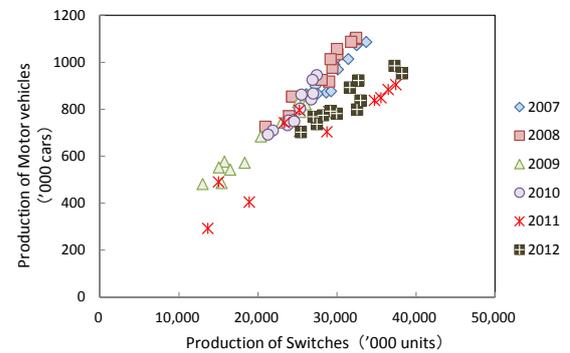


③ 配電器 (ディストリビュータ)

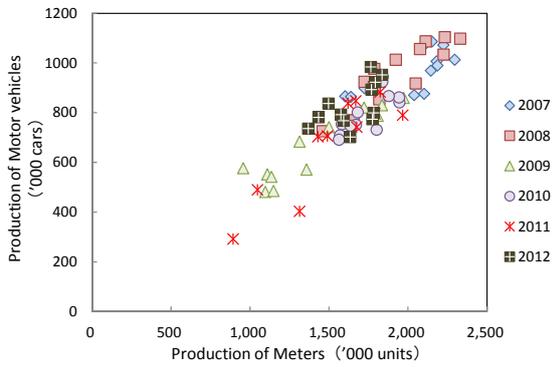


(6) その他の部品

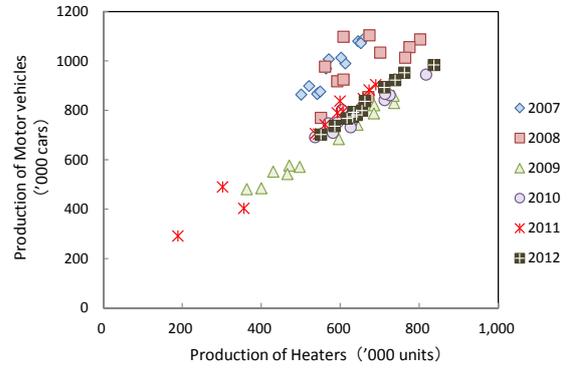
① スイッチ類



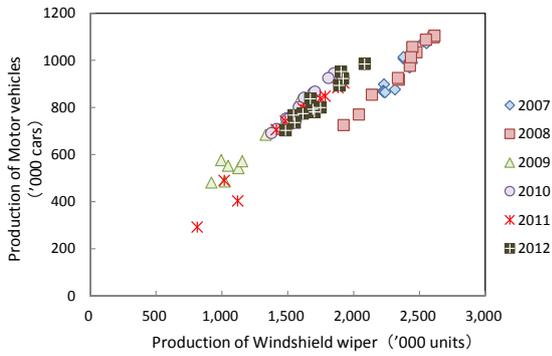
② 計器類



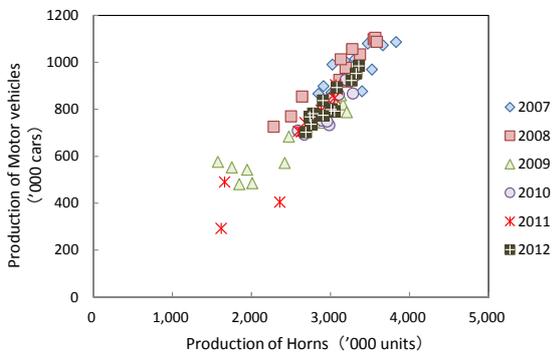
⑤ 暖房装置



③ ワイパー

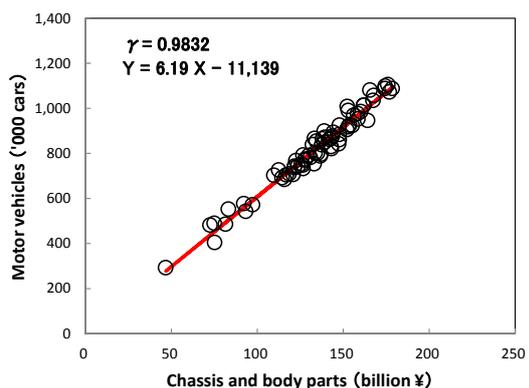


④ 警音器

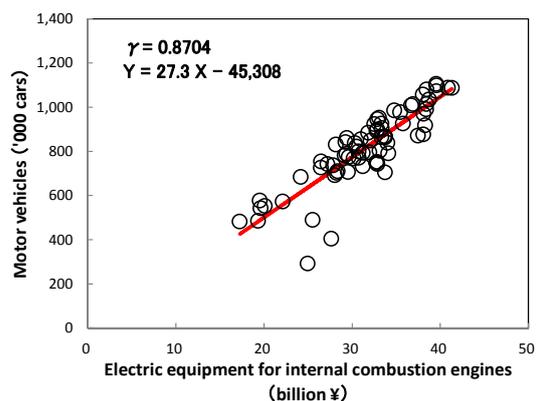


付録3 : Values of  $\alpha_{ij}$

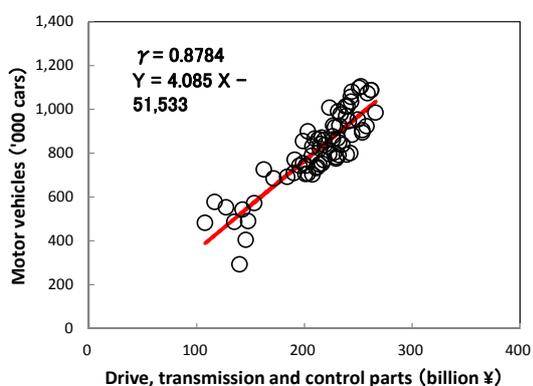
① シャーシー及び車体部品



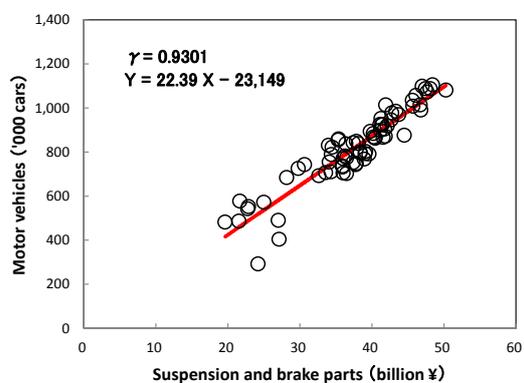
④ 内燃機関電装品



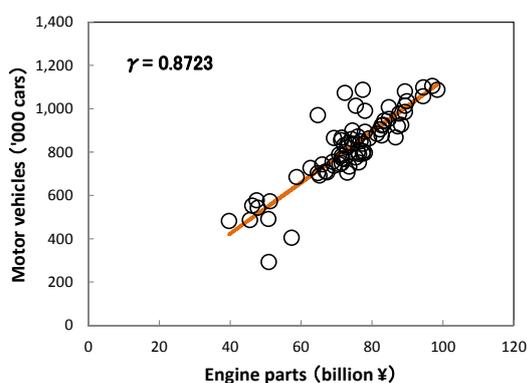
② 駆動伝導及び操縦装置部品



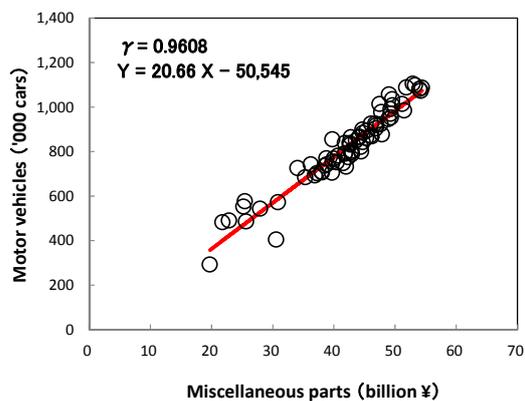
⑤ 懸架制動装置部品



③ 機関部品



⑥ その他の部品



(論文受理日 : 2014年6月11日)