

自動車部品の知識特性に関する国際比較分析

名古屋市立大学大学院経済学研究科 山田恵里

近畿大学経済学部 河上 哲

要 旨

本稿は、世界の各地域（欧州、日本、米州、中国、ASEAN・インド）で生産・供給されている自動車部品の知識特性を、ネットワーク分析の手法を応用した複雑性指標によって定量的に明らかにし、各地域における部品の生産・調達構造を、部品の知識特性を踏まえて国際比較分析することを目的とする。また、自動車部品が部品間でどのような知識を共有して生産・供給されているのかを、製品空間（Product space）の手法により定量的に計測し、各地域に蓄積された知識と、イノベーションを創出する生産・調達構造との関連を考察する。

分析結果より、高い生産能力を有するサプライヤは、洗練された知識を要する比較優位な部品に特化して供給するのではなく、他の多くのサプライヤも供給可能な遍在性が大きい部品も含めて多様に供給する一方で、低い生産能力しか持たないサプライヤは遍在性の大きな部品しか供給することができないことが判明した。こうしたサプライヤの供給部品の種類に関する「入れ子構造」は、特に欧州、日本、米州で有意に存在していることが明らかとなった。知識の洗練性が大きく評価されたサプライヤは、生産する品目が多く、かつ自動車のエンジンやブレーキなどを電子制御するための各種 ECU (Electronic control unit) を生産するサプライヤであった。共通する知識を用いて生産される部品間をリンクで結ぶ知識ネットワークを製品空間として可視化したところ、欧州、日本、米州ではネットワーク中心部に部品間のつながりを複雑に有する部品が確認され、これら部品は他の部品にも要する知識の蓄積のもとに生産が実現しているものと考えられる。

キーワード：自動車部品サプライヤ、ネットワーク分析、複雑性指標、製品空間

1. はじめに

近年、自動車は中国や ASEAN、東欧などの新興国での生産、販売が拡大している。新興国では、これまで世界で自動車生産を先導していた西欧や米国、日本に匹敵する生産が行われている。生産台数の成長に伴い、自動車の構造も変化している。従来のガソリンを燃料とする車に加えて、次世代自動車として電力を燃料とする電気自動車 (EV)、プラグインハイブリッド自動車 (PHV)、燃料電池自動車 (FCV) などの最先端技術を用いた部品が装備されている車種が生産されることにより、これら部品を生産するサプライヤも多様になりつつある。自動車の電動化は、電気産業に分類される企業の自動車産業への参入を促し、自動車部品の開発や生産を拡大させている。

これまでの自動車のタイプとは異なる性質の自動車が生産されていることを受け、生産台数のみで各国の自動車生産における能力を測ることは、実際の生産能力との間に乖離を生んでしまうことが懸念される。つまり、自動車の台数だけではなく、どれだけ新たな知識・技術によって生み出された部品が使われている自動車であるか、あるいはどれだけ新たな知識・技術を有する自動車部品サプライヤが存在しているか、という自動車部品や自動車部品サプライヤの質を考慮する必要がある。

そこで本研究の目的は、生産物の量的側面ではなく質的側面に着目し、どれほど洗練された知識・技術を自動車部品サプライヤが有しているか、及びどれほど洗練された知識・技術が体化された自動車部品が生産・供給されているかを定量的に計測する手法を提案し、実データを用いて実証分析することである。また、どのような知識・技術を要する部品が、どのような知識・技術を有するサプライヤによって、どの地域に供給されているかを示すことにより、各地域における部品の質も考慮に入れたサプライチェーンの調達構造を明らかにする。これにより、外的ショックやリスクに直面した際の自動車産業の強靱性 (レジリエンス) について、その地域的差異を議論することが可能となる。さらに、どれだけ豊富に知識を蓄積した部品が、どの地域で生産されているかを、製品空間 (Product space) の分析手法により定量的に明らかにすることにより、多様な知識の組み合わせにもとづくイノベーションの潜在性を議論する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では、分析に用いるデータの概要と、データから読み取れる自動車部品サプライヤと部品の特性について述べる。第3章では、サプライヤが有する知識の洗練性、及び部品に体化された知識の洗練性を定量化するための考え方と計測手法について述べ、実データを用いた実証分析の結果を示す。第4章では、自動車部品が部品間でどのような知識を共有して生産・供給されているのかを定量的に計測し、部品間で共有された知識の蓄積と、イノベーションに関連する生産・調達構造との関連について議論を深める。第5章では、本稿のまとめと課題について議論する。

2. 分析データ

2. 1. 分析データの概要

本研究は、マークラインズが情報プラットフォームで公開している『部品別シェア・納入情報』のデータを利用した。対象期間は2008年から2020年4月までの間であり、部品総数は289品目である¹。データ

¹ 各年マークラインズの基準によって調査される品目が異なることに留意されたい。

の対象となる地域は5地域あり、各地域の対象となる国は表1にまとめた²。データからは、各地域に立地する車両生産地別納入情報として地域に立地している自動車メーカーへ納入している部品とその部品を供給している自動車部品サプライヤ (Tier 1とTier 2 サプライヤ, 5,681社) の情報を把握することができる³。部品分類はマークラインズが設定している31分類から、分析のために6分類 (1. エンジン部品, 2. 電気・電装部品, 3. 駆動・伝動部品, 4. 懸架・制動部品, 5. 車体部品, 6. 電動化部品⁴) に組み替えている。部品の構成は、電気・電装部品28% (80品目), 車体部品27% (79品目), エンジン部品21% (62品目), 駆動・伝動部品12% (36品目), 懸架・制動部品8% (22品目), 電動化部品3% (10品目) の順が多い。

表1 対象地域

地域	対象国
欧州	ドイツ・フランス・スペイン・イタリア・ポルトガル・英国・ベルギー・オランダ・オーストリア・スウェーデン・ノルウェー・フィンランド・ロシア・ポーランド・チェコ・スロバキア・ハンガリー・ルーマニア・スロベニア・ブルガリア・セルビア・ウクライナ・ウズベキスタン・ボスニア・ヘルツェゴビナ・トルコ
日本	日本
米州	米国・カナダ・メキシコ・ブラジル・アルゼンチン・チリ・コロンビア・ウルグアイ・ベネズエラ・エクアドル
中国	中国
ASEAN・インド	タイ・シンガポール・マレーシア・インドネシア・フィリピン・インド・韓国・台湾・イラン・南アフリカ・モロッコ

2. 2. 自動車サプライヤと部品の国際比較

まず、サプライヤの観点からデータについて述べる。表2には各地域の供給部品の多いサプライヤ上位20社が示されている。全世界でみると、289品目のうち約30%以上の品目を供給できるサプライヤはContinental AG (143品目), Denso Corporation (111品目), Valeo Group (99品目), Bosch [Robert Bosch GmbH] (86品目), ZF Active Safety And Electronics US LLC (84品目), Magna International Inc. (82品目), Aptiv PLC (79品目) の7社だけであり、全サプライヤのうち0.1%にあたる。地域別では、欧州に3社、日本と米州に1社、中国とASEAN・インドには1社も存在せず、多品目を供給するサプライヤの全体に占める割合が小さいことは地域に共通している。ただし、同じサプライヤでも供給する部品数には地域差が生じている (Continental AGは、欧州では133品目、米州84品目を供給しているが、他地域では30品目前後の供給にとどまる)。

² 日本と中国以外の地域は複数国が含まれている。対象となる自動車メーカーは438社あり、グループ会社 (例えば、フォルクスワーゲンと上海フォルクスワーゲンなど) の情報はグループ会社ごとにまとめる処理は行っていない。また、分析期間中に社名変更したサプライヤは2020年時点での社名に統一されているが、期間中に合併などを行ったサプライヤのデータについては対処していない。

³ サプライヤには自動車メーカーの内製が含まれている。

⁴ ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車、燃料電池自動車の主要部品が該当する。

表2 供給部品の多い上位20 サプライヤ

順位	全世界	個数	欧州	個数
1	Continental AG	143	Continental AG	133
2	Denso Corporation	111	Valeo Group	87
3	Valeo Group	99	Bosch [Robert Bosch GmbH]	79
4	Bosch [Robert Bosch GmbH]	86	Magna International Inc.	67
5	ZF Active Safety And Electronics US LLC (Formerly TRW Automotive)	84	Aptiv PLC (Formerly Delphi Automotive PLC)	60
6	Magna International Inc.	82	ZF Active Safety And Electronics US LLC (Formerly TRW Automotive)	60
7	Aptiv PLC (Formerly Delphi Automotive PLC)	79	Marelli Europe S.p.A. (Formerly Magneti Marelli S.p.A.)	59
8	Asin Seiki Co., Ltd.	63	Motor Super	56
9	Marelli Europe S.p.A. (Formerly Magneti Marelli S.p.A.)	62	ZF Friedrichshafen AG	52
10	Hitachi Automotive Systems, Ltd.	57	Denso Corporation	47
11	ZF Friedrichshafen AG	57	Hella GmbH & Co. KGaA	47
12	Motor Super	56	Faurecia SE	43
13	Hella GmbH & Co. KGaA	54	Mahle GmbH	40
14	Visteon Corporation	52	Visteon Corporation	35
15	Faurecia SE	49	Schaeffler AG	34
16	Mitsubishi Electric Corporation	49	Bosch [Bosch Corporation]	31
17	Mahle GmbH	45	MAHLE Behr GmbH & Co. KG	31
18	Federal-Mogul Holdings LLC	44	Federal-Mogul Holdings LLC	30
19	Bosch [Bosch Corporation]	40	Adient plc (Formerly Automotive seating business of Johnson Controls Inc.)	28
20	Toyota	40	BorgWarner Inc.	28

順位	日本	個数	米州	個数
1	Denso Corporation	97	Continental AG	84
2	Asin Seiki Co., Ltd.	60	Denso Corporation	59
3	Hitachi Automotive Systems, Ltd.	55	ZF Active Safety And Electronics US LLC (Formerly TRW Automotive)	56
4	Mitsubishi Electric Corporation	38	Magna International Inc.	54
5	Marelli Corporation (Formerly Calsonic Kansei Corporation)	35	Valeo Group	47
6	Toyota	33	Hella GmbH & Co. KGaA	36
7	Continental AG	31	Visteon Corporation	36
8	Toyoda Gosei Co., Ltd.	30	ZF Friedrichshafen AG	36
9	Keihin Corporation	28	Aptiv PLC (Formerly Delphi Automotive PLC)	34
10	Toyota Boshoku Corporation	28	Mahle GmbH	34
11	Panasonic Corporation	23	Federal-Mogul Holdings LLC	32
12	Valeo Group	23	Bosch [Robert Bosch GmbH]	31
13	Tokai Rika Co., Ltd.	22	Cooper-Standard Holdings Inc.	28
14	Honda	20	Marelli Europe S.p.A. (Formerly Magneti Marelli S.p.A.)	28
15	Suzuki	20	BorgWarner Inc.	25
16	Bosch [Robert Bosch GmbH]	19	Faurecia SE	23
17	Daihatsu	18	Dana Incorporated (Formerly Dana Holding Corporation)	21
18	Daikyo/Nishikawa Corp.	18	Schaeffler AG	21
19	JTEKT Corporation	18	Adient plc (Formerly Automotive seating business of Johnson Controls Inc.)	20
20	Mitsuba Corporation	18	Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG	20

順位	中国	個数	ASEAN・インド	個数
1	Aptiv (China) Investment Co., Ltd.	36	Denso International India Pvt. Ltd.	26
2	Continental AG	34	Continental AG	23
3	Bosch Automotive Products (Suzhou) Co., Ltd.	27	Denso Corporation	21
4	United Automotive Electronic Systems Co., Ltd.	27	P.T. Toyota Astra Motor	21
5	ZF Active Safety And Electronics US LLC (Formerly TRW Automotive)	26	Continental Automotive Components India Pvt. Ltd.	18
6	Bosch [Robert Bosch GmbH]	24	Hyundai Mobis Co., Ltd.	18
7	Aptiv PLC (Formerly Delphi Automotive PLC)	22	Valeo Group	18
8	HUAYU Automotive Systems Company Limited	22	ZF Friedrichshafen AG	18
9	Denso Corporation	21	Bosch [Robert Bosch GmbH]	16
10	Marelli Europe S.p.A. (Formerly Magneti Marelli S.p.A.)	21	Formerly Hyundai Dymos, Inc.	16
11	BYD	18	P.T. Asin Indonesia	16
12	Fawer Automotive Parts Limited Company	18	ZF Active Safety And Electronics US LLC (Formerly TRW Automotive)	15
13	Bosch (China) Investment Co., Ltd.	17	Mando Corporation	14
14	Jiangsu Tianhe Auto Parts Co., Ltd.	17	Marelli Europe S.p.A. (Formerly Magneti Marelli S.p.A.)	14
15	Shanghai Lianming Machinery Co., Ltd.	17	Visteon Corporation	14
16	Zhejiang Asia-Pacific Mechanical & Electronic Co., Ltd.	17	Hyundai Kefico Corporation	13
17	Denso Group (China)	15	Faurecia SE	12
18	Faurecia SE	15	Hella GmbH & Co. KGaA	12
19	Great Wall - Xushui Branch	15	Hyundai WIA Corporation (Formerly WIA Corporation)	12
20	Shenyang Jinbei Yanfeng Automotive Interiors Co., Ltd.	15	MOBIS India, Ltd. (MIL)	12

全世界を対象としたサプライヤと供給部品数の分布を図1に示す。多品目を供給できるサプライヤが少数である一方で、3品目以下の部品を供給しているプライヤは4,438社あり全体の78%を占める⁵。自動車部品サプライヤには供給できる部品数に偏りがあることが明らかとなった。

⁵ サプライヤと供給部品数の分布の傾向は各地域で共通である。

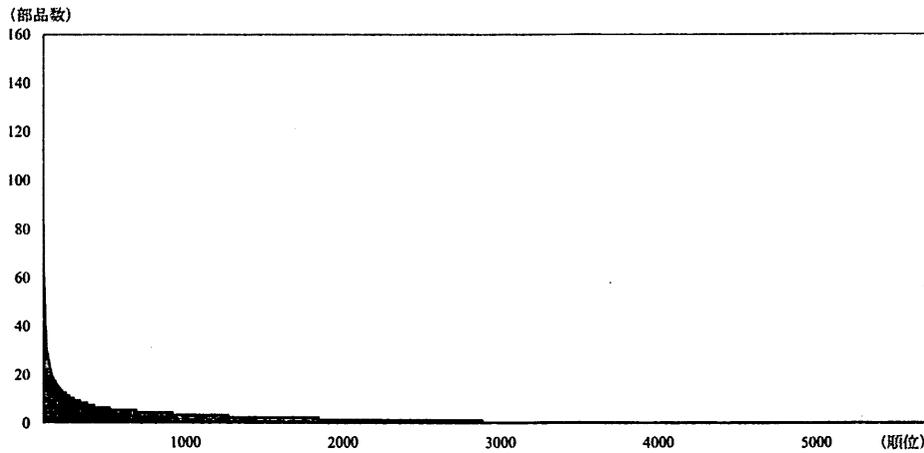


図1 サプライヤが供給している部品数の分布 (全世界)

つぎに、部品の観点からデータについて述べる。表3は、各国の自動車メーカーに供給されている部品についてサプライヤが多い上位20部品を示している。全世界でみると、上位20部品全てにおいて100社以上からの供給がある。上位20部品のうち、7品目は車体部品であり車体部品に関わるサプライヤが多いという傾向は各地域で類似している。地域別にみると、100社以上からの供給部品がある地域は中国だけであり、これはサプライヤ数が他地域に比して多いことが関係していると考えられる⁶。

図2は、289部品のそれぞれについて、サプライヤ数を横軸に、当該部品のサプライヤが供給している部品数(サプライヤの部品ポートフォリオ)の中央値を縦軸とし、部品の供給サプライヤ数とサプライヤの部品ポートフォリオの関係を示したものである。右下に位置している部品は、多くのサプライヤによって供給される部品である。100社以上によって供給される37品目のうち、10品目以上の部品ポートフォリオを持つサプライヤによって供給される部品は1部品のみである。10社以下によって供給される27品目のうち、10品目以上のポートフォリオを持つサプライヤによって供給される部品は19品目であり、電気・電装部品に分類される各種ECU(Electronic Control Unit)が該当する。つまり、車体部品は特定の車体部品の供給に特化したサプライヤに供給され、電気・電装部品は多様な部品を供給することができるサプライヤによって供給されていることがうかがえ、サプライヤの部品ポートフォリオの大きさと供給部品の多様性が関係していることが示唆される。

⁶ 調査対象のサプライヤ数の多い国は、中国17,850社、日本7,998社、インド3,965社、米国3,830社、ドイツ3,288社である。各地域のサプライヤは自地域以外の自動車メーカーにも部品を供給している(この場合、他地域では輸入となる)。

表3 供給サプライヤの多い上位20部品

順位	全世界	社数	欧州	社数	日本	社数
1	シート	334	シート	63	エンジンAssy	41
2	マフラー	251	コンソールボックス	60	ディファレンシャル	40
3	触媒コンバーター	246	防音インシュレーター	52	インストルメントパネル	37
4	HV_PHV_EVバッテリー	229	シリンダーヘッドカバー	50	シート	35
5	インストルメントパネル	227	ホイール	49	モーター_アクチュエーター	33
6	エンジンAssy	216	HV_PHV_EVバッテリー	49	ステアリングコラム_シャフト	32
7	ドアトリム	203	ショックアブソーバー	46	バンパー	32
8	シリンダーヘッドカバー	202	カーオーディオ	46	ドアトリム	32
9	コンソールボックス	200	タイヤ	44	HV_PHV_EVバッテリー	32
10	バンパー	174	インストルメントパネル	44	触媒コンバーター	31
11	エアコン_HVAC	173	モーター_アクチュエーター	43	車載カメラ	30
12	防音インシュレーター	164	ウィンドガラス	41	ステアリングナックル	29
13	ワイヤーハーネス	157	ターボ_スーパーチャージャー	40	コンソールボックス	29
14	ショックアブソーバー	146	バンパー	40	燃料タンク	28
15	駆動モーター	146	ドアトリム	40	シリンダーブロック	27
16	ホイール	131	スイッチ	36	インターマニホールド	27
17	ヘッドランプ	130	電子コントロールユニット_ECU	36	駆動モーター	26
18	モーター_アクチュエーター	129	エンジンAssy	35	電子コントロールユニット_ECU	25
19	タイヤ	124	シート表皮	35	防音インシュレーター	25
20	燃料タンク	121	エアコン_HVAC	35	クランクシャフト	24

順位	米州	社数	中国	社数	ASEAN・インド	社数
1	シート	69	触媒コンバーター	216	シート	54
2	防音インシュレーター	61	マフラー	184	インストルメントパネル	50
3	コンソールボックス	51	シート	159	ドアトリム	47
4	インストルメントパネル	50	HV_PHV_EVバッテリー	146	コンソールボックス	41
5	エアコン_HVAC	50	シリンダーヘッドカバー	141	エアコン_HVAC	40
6	モーター_アクチュエーター	49	エンジンAssy	139	ショックアブソーバー	37
7	ファスナー	46	駆動モーター	104	アクスル	34
8	ショックアブソーバー	44	インストルメントパネル	91	タイヤ	33
9	HV_PHV_EVバッテリー	44	OBD_インターフェース	82	ヘッドランプ	32
10	ホイール	43	キャニスター	77	リアランプ	31
11	ウィンドガラス	41	ワイヤーハーネス	77	シャシーフレーム	26
12	ヘッドランプ	40	HV_EVECU	72	ステアリングホイール	25
13	ドアトリム	39	ABS_ESC	70	ステアリング	24
14	燃料タンク	37	コンソールボックス	69	ディスクブレーキ_ローター	24
15	ヒンジ	36	ドアトリム	69	バンパー	24
16	バンパー	34	ターボ_スーパーチャージャー	68	クラッチ	23
17	ラジエーター	33	エンジンECU	67	燃料タンク	23
18	冷却ファン_モーター	33	エアコン_HVAC	66	シートフレーム	23
19	シートアジャスター_リクライナー	32	タイヤ	61	運転席エアバッグ	23
20	ワイヤーハーネス	32	バンパー	60	エアコンコンプレッサー	23

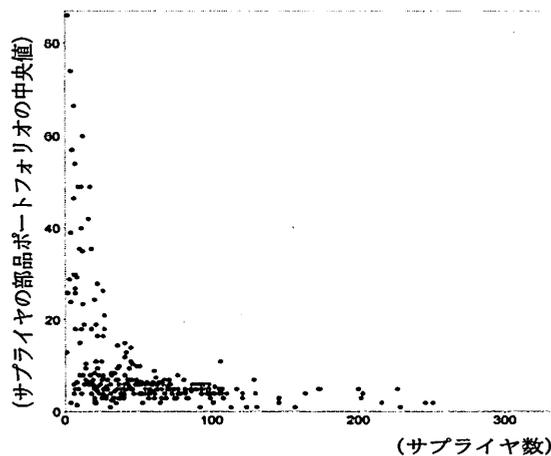


図2 部品別供給サプライヤとサプライヤのポートフォリオの関係

3: 自動車部品サプライヤ及び部品の知識特性の定量化

3. 1. サプライヤと部品間の二部ネットワーク

本研究では、各自動車部品を生産するサプライヤが、「どれだけ」生産する能力があるのかではなく、「何を」生産する能力があるのかに着目する。サプライヤの生産活動における量的側面ではなく、質的側面に接近することにより、サプライヤが潜在的に有する知識、及び部品に体化された知識の洗練性を明らかにする。

生産の質的側面を定量的に評価するには、ネットワーク分析の手法が有用である。自動車部品サプライヤ s と、各サプライヤの生産する部品 p との対応は、図3 (a) のように、サプライヤと部品をリンクで結ぶ二部ネットワークとして表すことができる⁷。例えば、サプライヤ s_1 は、部品 p_1, p_2, p_3 を、サプライヤ s_2 は部品 p_2 のみを生産している。

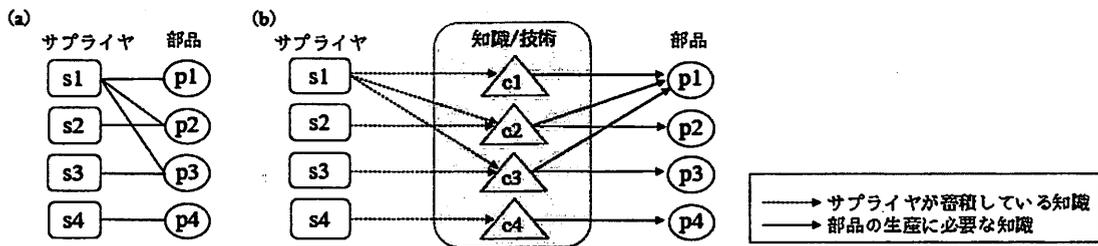


図3 (a) サプライヤと部品間の二部ネットワーク；(b) 部品生産に介在する潜在的知識

ここで図3 (b) が示すように、サプライヤと部品を結ぶリンクには、知識・技術の構成要素 (building block) が介在し、サプライヤが有する知識と、部品を生産するために必要な知識のそれぞれの要素が合致してはじめて生産が実現されるものとする (Hidalgo and Hausmann, 2009)。例えば、部品 p_1 の生産に c_1, c_2, c_3 の知識を要するものとするれば、それら知識の組み合わせを有しているサプライヤ s_1 のみが部品 p_1 を生産することができる。多様な部品を生産することができるサプライヤは、多様な知識の構成要素を複雑に組み合わせることにより生産を実現していると解釈される。よって、サプライヤ s_1 の知識洗練性は他の s_2, s_3, s_4 よりも大きいと評価される。また部品をもとに解釈すれば、多様な知識の複雑な組み合わせを要する部品ほど、洗練された知識が部品に具現化されているものと解釈される。よって、部品 p_1 の知識洗練性は他の p_2, p_3, p_4 よりも大きいと評価される。上記の考え方にもとづき、サプライヤが有する潜在的な知識と、部品の生産に要する潜在的な知識のそれぞれについて、それら知識の洗練性を定量的に計測する手法を以下で紹介する。

3. 2. 自動車産業における入れ子構造

図3 (a) の二部ネットワークで表された関係は、行列形式に整理することにより数学的処理が可能にな

⁷ 二部ネットワークとは、頂点 (ノード) が2つに分割されたいずれかの集合に含まれるとき、各集合内には辺は存在しないが、異なる集合間に辺が存在するネットワークのことをいう (Barabási, 2017)。

る。サプライヤ s を行に、部品 p を列にとった行列 M_{sp} について、 M_{sp} の各成分 M_{sp} を次のように定義する。

$$\begin{cases} M_{sp} = 1 : \text{サプライヤ} s \text{が部品} p \text{を供給する場合} \\ M_{sp} = 0 : \text{サプライヤ} s \text{が部品} p \text{を供給しない場合} \end{cases}$$

第2章で紹介したデータベースをもとに、地域ごとに二値行列 M_{sp} を作成し、1の値をもつ行列成分を黒色に塗って視覚化したヒートマップを図4に示す。ただし図4では、誌幅の都合上、転置した二値行列 M_{sp}^T を掲載しており、行について上から供給するサプライヤが多い部品順に、また列について左から供給する部品が多いサプライヤ順に、それぞれ並び替えている。

図4より、二値行列 M_{sp}^T は1の値をもつ成分が左上方に三角形の形状で集まることが視覚的に確認できる。すなわち、下方に位置する部品を供給するサプライヤは、上方に位置する部品を供給するサプライヤの部分集合に、同様に右方に位置するサプライヤが供給する部品は、左方に位置するサプライヤが供給する部品の部分集合となっている傾向が確認できる。こうした入れ子 (Nestedness) 構造は、生物と生息地の関係や、植物と動物の相利共生関係においても確認されており、一般に入れ子構造の程度が強い (弱い) ほど、生態系における生物多様性や種の保全に強靱 (脆弱) であることが示されている (Bascompte et al., 2003; Bustos et al., 2012)。同様に自動車部品の生産・調達構造においても、入れ子構造の程度が強いほど、一部のサプライヤや部品の生産・調達環境に何らかの外的なショックが生じた際に、産業全体として柔軟にショックの吸収・対応が可能な耐性に強い構造と言えよう。

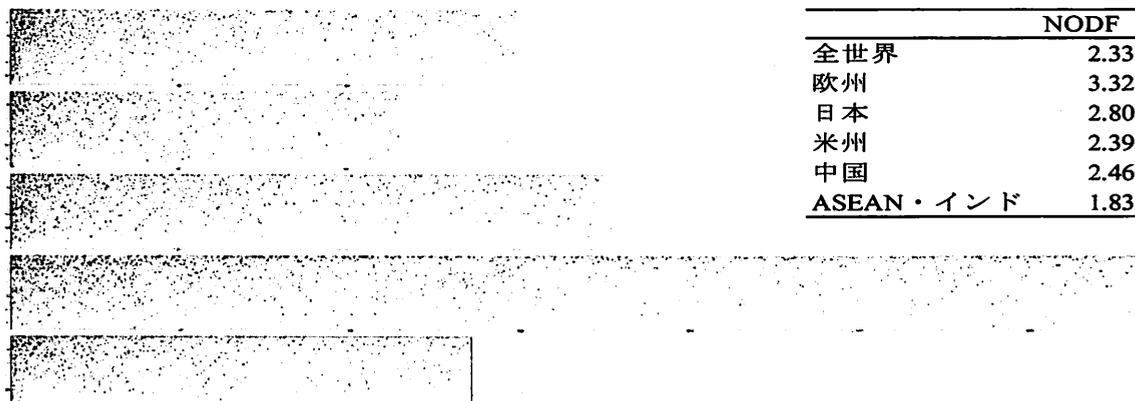


図4 部品(行)とサプライヤ(列)の入れ子構造 (上から欧州, 日本, 米州, 中国, ASEAN・インド)

各地域に供給されている部品とサプライヤについて、それら二部ネットワークの入れ子構造の強度をNODF指標によって計測したところ、相対的に欧州や日本では入れ子構造が強く、中国やASEAN・インドでは弱いことが判明した (図4内の表を参照)⁸。二値行列の入れ子構造を統計的に検定したところ、欧州、

⁸ NODF (Nestedness metric based on overlap and decreasing fill) は、行列が含む行 (列) のすべてのペアについて、どれだけ一方の行 (列) に現れる成分が、もう一方の行 (列) の成分を含んでいるかをもとに算出される指標であり、値が大きいほど入れ子構造の程度が強いと評価される。

日本、米州は有意に帰無仮説が棄却されるのに対し、中国とASEAN・インドは棄却されない⁹。このことは、地域によって部品の生産・調達構造が異なることを示しており、世界で自動車生産量の上位を占める中国やインドであっても、いまだ外的ショックに脆弱な構造であることがうかがわれる¹⁰。

3. 3. サプライヤと部品の知識洗練性

サプライヤ及び部品それぞれの知識洗練性を、①サプライヤがいかに多様な部品を生産しているか（多様性）と、②部品がいかに多くのサプライヤによって生産されているか（遍在性）の、2つの情報を相互に集約した複雑性指標により計測する（Hidalgo and Hausmann, 2009）。図3（b）で表されるように、多様な部品を生産できるサプライヤ（s1）は、一部の部品生産に特化するサプライヤ（s2, s3, s4）と比して、生産に要する知識の蓄積があり潜在的な能力が大きいと評価される。さらにサプライヤの能力は、当該サプライヤが生産する部品が、どれだけ高度に知識を要する部品であるかにも依存して評価される。高度な知識が要求される部品を生産できるサプライヤはごく一部に限られ、それら部品を生産するサプライヤの遍在性は低いと考えられる。同様の考え方にもとづき、部品に関する知識洗練性は、一部の部品生産に特化したサプライヤも含め、多くのサプライヤによって生産される部品ほど小さく評価される。

上記の考え方を逐次発展させて、サプライヤに関する複雑性指標は、当該サプライヤが知識洗練性の大きい（小さい）部品をどれだけ多様に（特化して）生産しているかによって、一方で部品に関する複雑性指標は、当該部品が知識の蓄積の小さい（大きい）サプライヤにどれだけ遍在的に（偏在的に）生産されているかによって、両者が相互依存的に同時決定されるようそれぞれ定式化される。いずれの指標とも、数値的には二値行列 M_{sp} の構造を基礎とした繰り返し計算（Method of Reflections）によって求められる。

Tacchella et al. (2012), Tacchella et al. (2013), Cristelli et al. (2013)は、Hidalgo and Hausmann (2009)によって提示された複雑性指標を、非線形にアレンジして求める手法を提示した。まず、サプライヤに関する複雑性指標の初期値をすべてのサプライヤ s について $F_s^{(0)} = 1$ とし、また部品に関する複雑性指標の初期値もすべての部品 p について $Q_p^{(0)} = 1$ とする。繰り返し計算の各過程（ $n = 1, 2, 3, \dots$ ）で得られるサプライヤ及び部品に関する複雑性指標の値（ $\bar{F}_s^{(n)}$ 及び $\bar{Q}_p^{(n)}$ ）は、次のように求められる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_s^{(n)} = \sum_p M_{sp} Q_p^{n-1} \\ \bar{Q}_p^{(n)} = \frac{1}{\sum_s M_{sp} \frac{1}{\bar{F}_s^{(n-1)}}} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_s^{(n)} = \frac{\bar{F}_s^{(n)}}{\left(\bar{F}_s^{(n)}\right)_s} \\ Q_p^{(n)} = \frac{\bar{Q}_p^{(n)}}{\left(\bar{Q}_p^{(n)}\right)_p} \end{array} \right.$$

計算過程で得られる $\bar{F}_s^{(n)}$ 及び $\bar{Q}_p^{(n)}$ は、各過程のそれぞれの平均値 $\left(\bar{F}_s^{(n)}\right)_s$ 及び $\left(\bar{Q}_p^{(n)}\right)_p$ で標準化され、次の繰

⁹ 本分析では、Almeida-Neto et al. (2008) にもとづき2種類の帰無仮説を検定している。一つ目は、行列に現れる成分が、同確率でランダムに出現するという比較的緩い条件のもとでの帰無仮説。二つ目は、行列に現れる成分が、当該成分が含まれる行と列の出現確率の積のもとに出現するという比較的厳しい条件のもとでの帰無仮説である。本文中では二つ目の厳しい条件の帰無仮説のもとでの検定について言及している。

¹⁰ International Organization of Motor Vehicle Manufacturersによれば、2019年における中国とインドの自動車生産台数は、それぞれ世界第1位（25,720,665台）と第5位（4,516,017台）である。

り返し計算のステップに用いられる。繰り返し計算によって得られる収束値をもって、それぞれ最終的な複雑性指標 F_s^* 及び Q_p^* とする。

表4の上段には、全世界のサプライヤと部品の二値行列をもとにサプライヤに関する複雑性指標 F_s^* を計測し、知識洗練性が大きいと評価された上位5社のサプライヤを示している。上位5社のうち4社が日本に、1社がドイツに本社を置くサプライヤである。またリストされた各サプライヤが生産する部品のうち、部品に関する複雑性指標 Q_p^* が大きい上位3つまでの部品を付している。網掛けしてある部品は、全体の中でも特に洗練性が大きく評価される部品である。一般的な傾向として、生産する品目が多く、ECUを生産するサプライヤの複雑性指標が大きく評価されている。

さらに表4中には、世界の生産構造をベースに知識洗練性が大きいと評価されるサプライヤが、各地域にどのような部品を供給しているかを示している。欧州や日本では、網掛けのある知識洗練性が大きい部品を供給しているのに対し、中国やASEAN・インドでは同じサプライヤでも知識洗練性が相対的に小さい部品を差別化して供給している。知識洗練性が大きい部品は、生産する能力のあるサプライヤに限られると考えられるものの、中国やASEAN・インドでは、地域に特有の生産・調達構造を有しているか、あるいはそもそも洗練性の大きい部品が供給されていない。地域内部の生産・調達構造をより詳細に検証することが今後の課題として挙げられる。

表4 全世界と各地域におけるサプライヤの洗練性 (上位5社)

		サプライヤ別供給部品		
		1	2	3
全世界	Toyota Industries Corporation	ACインバーター_家電用	DCDCコンバーター	インバーター
	Mitsubishi Electric Corporation	可変バルブタイミング制御EDU	クリアランスソナーECU	HIDヘッドランプECU
	Nissan Valve Co., Ltd.	可変バルブタイミング制御EDU	タイミングシステム	エンジンバルブ
	Continental AG	アクティブ制御エンジンマウントECU	ドアECU	ヘッドランプレベリングECU
	Keihin Corporation	アクティブ制御エンジンマウントECU	歩行者保護エアバッグ	ブリクラッシュシートベルトECU
欧州	Toyota Industries Corporation	ACインバーター_家電用	DCDCコンバーター	エアコンコンプレッサー
	Mitsubishi Electric Corporation	HIDヘッドランプECU	空気流量センサー	ロックセンサー
	Continental AG	アクティブ制御エンジンマウントECU	ヘッドランプレベリングECU	歩行者保護エアバッグ
	Keihin Corporation	フューエルインジェクション	コンデンサー	-
	Panasonic Corporation	ヘッドランプレベリングECU	AFS_水平光軸可変_ECU	電子コントロールユニット_ECU
日本	Toyota Industries Corporation	ACインバーター_家電用	DCDCコンバーター	インバーター
	Mitsubishi Electric Corporation	可変バルブタイミング制御EDU	HIDヘッドランプECU	電子制御4WD ECU
	Nissan Valve Co., Ltd.	可変バルブタイミング制御EDU	タイミングシステム	エンジンバルブ
	Continental AG	ヘッドランプレベリングECU	電動パーキングブレーキECU	障害物検知ECU
	Keihin Corporation	アクティブ制御エンジンマウントECU	歩行者保護エアバッグ	ブリクラッシュシートベルトECU
米州	Toyota Industries Corporation	ACインバーター_家電用	エアコンコンプレッサー	エンジン Assy
	Mitsubishi Electric Corporation	クリアランスソナーECU	空気流量センサー	ロックセンサー
	Nissan Valve Co., Ltd.	タイミングシステム	エンジンバルブ	-
	Continental AG	ドアECU	電動パーキングブレーキECU	パワーシートECU
	Keihin Corporation	フューエルインジェクション	スロットルボディ	電子コントロールユニット_ECU
中国	Toyota Industries Corporation	ACインバーター_家電用	DCDCコンバーター	-
	Mitsubishi Electric Corporation	車線逸脱防止支援システムECU	ドライバー前方支援ECU	圧力センサー
	Continental AG	障害物検知ECU	車線逸脱防止支援システムECU	トランスミッションECU
	Keihin Corporation	コンデンサー	EGRシステム	-
	Panasonic Corporation	ミリ波_レーザーレーダー	車載カメラ	ディスプレイ
ASEAN・インド	Toyota Industries Corporation	ターボ_スーパーチャージャー	エンジン Assy	-
	Mitsubishi Electric Corporation	パワーステアリングECU	パワーステアリングモーター	スターターモーター
	Continental AG	トランスミッションECU	エアバッグセンサー	エアバッグECU
	Keihin Corporation	フューエルインジェクション	エンジンECU	-
	Panasonic Corporation	レバーコンビネーションスイッチ	カーナビゲーション	エアコンコンプレッサー

※網掛けは、部品の複雑性指標の1位から20位までに該当する部品。

図5は、各地域に部品を供給するサプライヤの洗練性の程度に応じた分布を、地域ごとに相対度数で示している。おおよそどの地域も類似した分布の形状が確認できるものの、欧州や日本では、洗練性の大きいサプライヤの割合が比較的大きい一方、中国やASEAN・インドでは、洗練性の小さいサプライヤの割合が大きい。中国やASEAN・インドでは、洗練性の大きいサプライヤは、欧州や日本からこれら地域に部品を輸出するサプライヤか、欧州・日本のサプライヤが出資する現地法人が主である。また洗練性の小さいサプライヤは、現地資本によるサプライヤであることが多い。

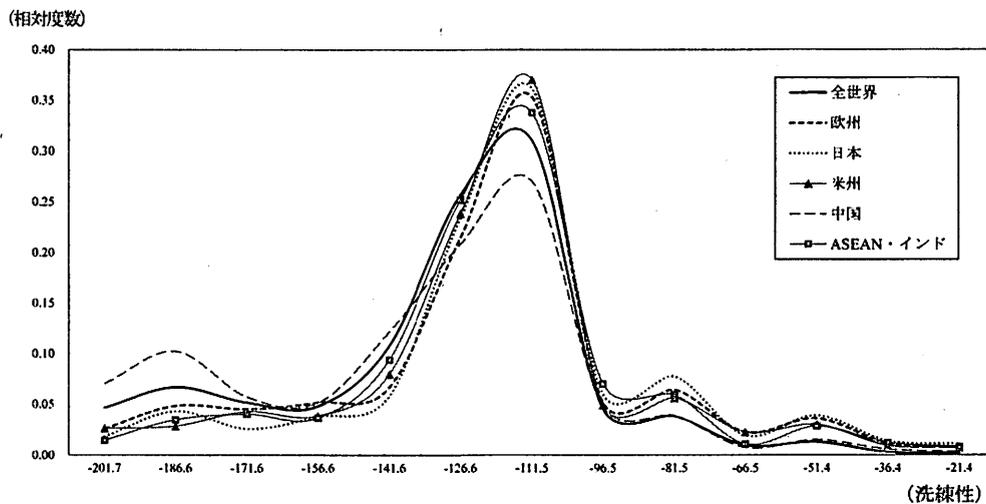


図5 各地域における洗練性に応じたサプライヤの分布

4. 自動車部品の知識ネットワーク

4. 1. 製品空間の構築

経済の発展が、累積的、経路依存的、相互作用的な変化の過程であるとするシュンペーター流の見地を踏まえれば、知識の結合としてのイノベーションは、ランダムに発生する現象ではなく、既存の関連する知識基盤から派生して実現すると考えられる (Balland, 2016)。Hidalgo et al. (2007) は、各国が生産する輸出財の構成をもとに、共通する生産基盤を持つ製品間からなるネットワークとして、製品空間 (Product space) を定量的に表現する手法を提唱した。

本手法のもとでは、製品空間を構成する任意の2種類の製品について、同一の国で生産される確率に応じて製品間の関連性 (Relatedness) が指標化される。2種類の製品が同じ国でもに生産される傾向 (共起性) が大きいほど、2製品の生産の土壌となる技術、環境、制度、慣習などが類似しており、当該製品間の関連性が大きいものと評価され、ネットワークのリンクで結ばれる。すべての製品間の組み合わせについて、製品間の関連性指標を行列形式にまとめることによって、製品間で共有する知識の複雑なつながり方や、その強度を解析することが可能となる。本研究ではHidalgo et al. (2007) の手法を応用し、自動車部品を結節点 (ノード) とし、関連する部品間を線 (リンク) で結ぶ製品空間を構築して、自動車部品

産業の知識ネットワークを分析する¹¹。

4. 2. 自動車部品の製品空間

構築された関連性行列をもとに、自動車部品の製品空間を、部品をノードとし、共通する知識のもとに生産される部品間がリンクで結ばれたネットワーク図として可視化する。ただし関連性の強度に関わらず、関連のある部品間のリンクをすべて張ると、あまりに煩雑なネットワーク図となり、ネットワーク構造の特徴を読みとることが困難である。そこで本研究では、最大全域木 (MST: Maximum spanning tree) の手法を用いて、可能な限り部品が一本木でつながるようにリンクを選択したうえで、閾値以上 (本研究では 0.1 以上を採用) の関連性をもつリンクを追加したネットワークを描く。これにより、ある程度の強度を有する部品間の知識ネットワークについて、関連するネットワークの中心と周辺部の視覚的な観察が容易になる。

表5には、全世界及び各地域の製品空間のネットワーク特性を表す指標を示している¹²。図6左上には、全世界におけるサプライヤの供給部品をもとに構築された製品空間を示している。また図6のその他のネットワーク図は、地域ごとにサプライヤの当該地域に供給する部品をもとに構築された製品空間をそれぞれ示している。

表5 部品のネットワーク指標

	ネットワーク指標					
	部品数	次数中心性の集中度	平均経路長	連結成分	次数相関	クラスター係数
全世界	289	0.28	1.32	1	-0.07	0.80
欧州	281	0.36	1.47	1	-0.05	0.75
日本	283	0.48	1.75	1	0.08	0.65
米州	277	0.47	1.67	2	-0.05	0.62
中国	274	0.34	1.96	4	0.01	0.47
ASEAN・インド	259	0.23	2.13	6	0.05	0.41

¹¹ 具体的な製品間の関連性指標の導出方法と、関連性行列の構築方法については、山田他 (2019) を参照されたい。

¹² ネットワークの特性を表す指標は、閾値を設定しないすべての関連性についてリンクを張ったネットワークにもとづいて算出されている。

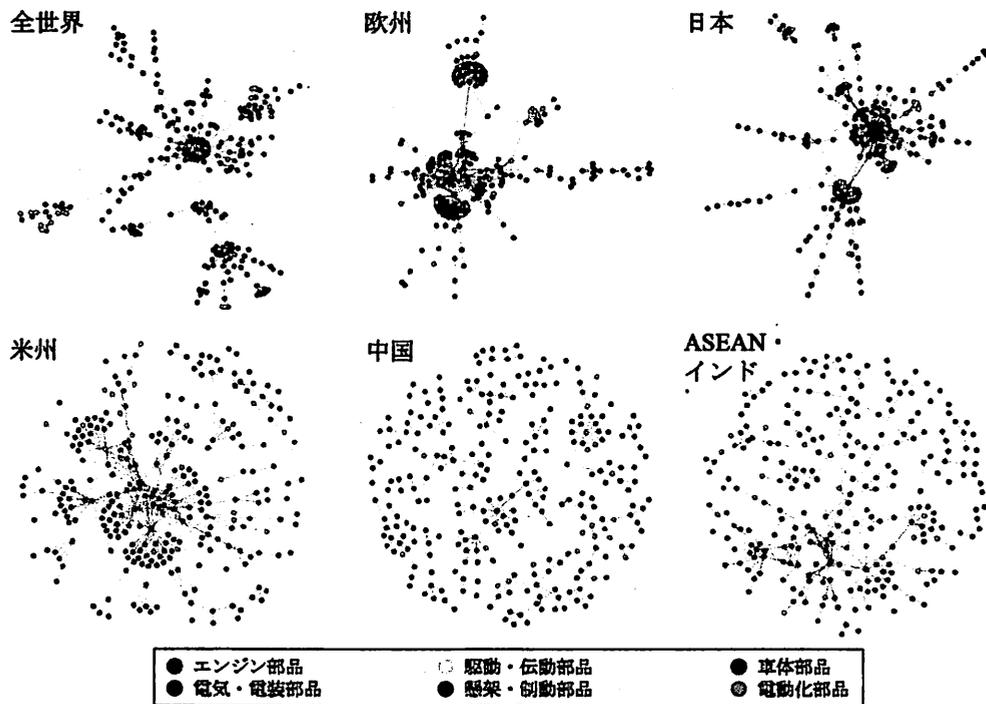


図6 部品のネットワーク構造

次数中心性の集中度は、大きい値であるほど特定の部品にリンクが集中していることを示しており、特に日本、米州において中心性の値が大きい。これは、図6で日本や米州の部品間ネットワークに見られる明確な中心部と周辺部構造に現れており、中心に位置する電気・電装部品や電動化部品は多様な部品の技術を要していることが示唆される¹⁴。平均経路長はすべてのノード間の最短距離の平均値であり、値が大きいほど部品間の関係性が薄く離れていることを示す。平均経路長は中国や ASEAN・インドで大きく、技術的に近接した知識を有する部品が少ないことが図6からもうかがえる。連結成分はネットワークが分離しているかどうかを判断するための指標であり、1より大きい値は最大ネットワークから分離した部品が存在していることを示す。米州、中国、ASEAN・インドは連結成分が1より大きく、これら地域では電動化部品がネットワークから分離していることが共通している。比較的近年に開発された電動化製品は、従来の自動車部品サプライヤではなく、新規に参入したサプライヤによって生産されていることが考えられる。次数相関はノード間のリンク数が類似しているかどうかを測る指標であり、次数相関がマイナスである欧州や米州は、リンクを多数もつ中心の部品と、中心につながる周辺部の部品との関係が明確に現れている。他の3地域ではプラスであり、同等のリンク数を持つ部品どうしのつながりが多いことがうかがえるが、日本の場合はリンクの多い部品どうしのつながりによって、中国や ASEAN・インドではリンクの少ない部品どうしのつながりが存在していることがネットワーク図から見てとれる。最後にクラスター係数はネットワーク全体の密度を測る指標であり、欧州、日本、米州が他の2地域に比して値が大きく、これら3地

¹⁴ 図6では欧州でも明確な中心・周辺構造が見られるが、リンクの閾値を小さくすると中心・周辺構造の形態はやや弱くなる。

域で生産される自動車部品に要する知識は、部品間で密に共有されていることが判明した。

上記結果をまとめると、次数中心性やクラスター係数の大きい欧州、日本、米州は、部品間の知識ネットワークにおいて中心部と周辺部の構造が明確に表れており、特に中心部に位置する部品は、他の部品の生産に要する知識を多く共有している。一方で中国や ASEAN・インドでは、平均経路長が大きく、次数相関の値からもリンクの少ない部品どうしが広く分布しており、一般に部品に体化される知識の蓄積が小さいと考えられる。先に述べたように、累積的、経路依存的、相互作用的な知識の結合によってイノベーションが創発することを考慮すれば、より知識を蓄積しているネットワーク中心部にイノベーションの可能性が期待され、必ずしもその構造は地域に関わらず普遍的ではないことが分析結果より示唆される。

5. まとめ

本研究は、世界5地域に供給されている自動車部品やサプライヤの知識・技術の洗練性や、部品間で共有される知識ネットワークを定量的に計測する分析手法を提案した。2008年から2020年までの期間に、各地域の自動車メーカーにおいて、どのような自動車部品サプライヤが、どのような部品を納入しているかという質的な情報を用いて、ネットワーク分析の手法を応用して実証分析を行った。得られた分析結果を以下の3点にまとめる。

1 点目に、サプライヤの供給する部品の種類と、部品を供給するサプライヤの種類において、欧州、日本、米州では有意に入れ子構造が存在していることが明らかとなった。入れ子構造の程度が相対的に弱い中国や ASEAN・インドでは、完成自動車の生産量では世界的に上位を占めるものの、生産環境に生じる外的ショックやリスクに脆弱な構造であることが示唆される。

2 点目に、サプライヤ及び部品それぞれの知識洗練性を、サプライヤが供給する部品の多様性と、部品が供給されるサプライヤの遍在性の、2つの情報を相互に集約した複雑性指標により計測した。知識洗練性が大きく評価されたサプライヤは、日本やドイツに本社を置くサプライヤであり、これらサプライヤは、生産する品目が多く、各種 ECU を主に生産するサプライヤである。一方で中国や ASEAN・インドでは、知識洗練性の小さい現地資本によるサプライヤが相対的に大きな割合で部品を納入しており、地域によって自動車メーカーによる部品の調達構造が異なることが明らかになった。

最後に、共通する知識を用いて生産・供給される部品をリンクで結ぶ知識ネットワーク構造は、地域ごとに特徴が異なることが明らかになった。欧州、日本、米州ではリンクの多い部品がネットワーク中心部に多く、部品間のつながりが複雑である一方で、中国、ASEAN・インドではこれら3地域に比してリンクが少なくネットワークの密度が低いことが明らかとなった。いずれの地域でも供給される部品の種類があまり変わらないにも関わらず、中国、ASEAN・インドでは部品間のつながりが疎であることは、各部品間の生産に必要な知識の共有がなされておらず、イノベーションに必要と考えられる知識を柔軟に組み合わせる環境が、他地域と比して乏しいことが示唆される。

今後の課題として、以下の2点を挙げる。第1に、本稿ではグループ会社を同一企業として捉えるなどの対処は行っていない。そのため、分析中では同一資本に含まれるグループ会社内の別法人はすべて独立したサプライヤとして分析している。グループ会社で知識が共有できる可能性を考慮する場合には、サブ

ライヤを集計するなどの対応が必要であると考え。同一地域内に見られる同一グループサプライヤを集計することにより、集計する前に過少に評価されていたサプライヤのポートフォリオを適切に扱うことが可能になるであろう。

第2に、世界的に知識洗練性の大きいと評価されるサプライヤについては、地域に応じて洗練性の異なる部品を差別化して供給・輸出していることが判明したものの、各地域（特に中国や ASEAN・インド）でどのようなサプライヤが、洗練性の大きい主要な部品を供給しているかは分析されていない。各地域に特異な生産・調達構造を詳細に検証することで、地域における自動車部品サプライヤを取り巻く生産環境（成熟度、強靱性、イノベーションの可能性など）について、より深い示唆が得られるものと考えられる。

参考文献

- Almeida-Neto, M., Guimaraes, P., Guimaraes, P.R., Loyola, R.D. and Ulrich, W. (2008) A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement, *Oikos*, 117, 1227–1239.
- Balland, P.A. (2016) Relatedness and the Geography of Innovation, in R. Shearmur, Carrincazeaux, C. and Doloreux, D. (eds) *Handbook on the Geographies of Innovation*, Edward Elgar, Northampton, MA, 127–141.
- Barabási, A.-L. (2017) *Network Science*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J., Olesen, J.M. (2013) The nested assembly of plant-animal mutualistic networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 9383–9387.
- Bustos, S., Gomez, C., Hausmann, R. and Hidalgo, C.A. (2012) The Dynamics of Nestedness Predicts the Evolution of Industrial Ecosystems, *PLOS ONE*, 7(11).
- Cristelli, M., Gabrielli, A., Caldarelli, G. and Pietronero, L. (2013) Measuring the intangibles: a metrics for the economic complexity of countries and products, *PLOS ONE*, 8(8).
- Hidalgo, C.A., Klinger, B., Barabási A.-L. and Hausmann, R. (2007) The product space conditions the development of nations, *Science*, 317, 482–487.
- Hidalgo C.A. and Hausmann, R. (2009) The building blocks of economic complexity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 10570–10575.
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, OICA, (<https://www.oica.net/category/production-statistics/2019-statistics/>, 参照日：2020年12月25日)。
- Tacchella, A., Cristelli, M., Caldarelli, G., Gabrielli A. and Pietronero L. (2012) A new metrics for countries' fitness and products' complexity, *Scientific Reports*, 2(723).
- Tacchella, A., Cristelli, M., Caldarelli, G., Gabrielli, A. and Pietronero L. (2013) Economic complexity: conceptual grounding of a new metrics for global competitiveness, *Journal of Economics Dynamics and Control*, 37(8), 1683–1691.
- マークライNZ『情報プラットフォーム』(<https://www.marklines.com/ja/>, 参照日：2020年4月15日)。
- 山田恵里・河上哲・根本二郎・蔣湧 (2019) 「産業クラスターと知識ネットワークの地域構造分析」『越境地域政策研究論集』, 479–499。