

水素エネルギー・エコシステムの形成期における研究開発動向

－自動車産業学術講演会の発表データに基づく分析－

三好 麻子 京都産業大学大学院マネジメント研究科 博士課程

1. はじめに

世界各国でカーボンニュートラル実現に向けた取り組みが加速している。なかでも水素は、長期間貯蔵が可能であり使用時に二酸化炭素を排出しないことから、カーボンニュートラルの実現手段の1つとして脚光を浴びている。特に、再生可能エネルギーを用いて水を電気分解して製造する水素は、製造時・利用時ともにCO₂を排出しないことからグリーン水素と呼ばれ、主流の製造方法になると言われている。とりわけ、自動車産業では、欧米を中心にガソリン車の新車販売を禁止する動きがあり、電気自動車（以下EV）や水素を燃料とする燃料電池車（以下FCV）などゼロエミッション車への移行が急ピッチに進んでいる。

FCVはトヨタ自動車は2014年12月に世界で初めて量産販売を開始し、2015年1月には製品普及のためにトヨタ自動車が燃料電池関連の特許実施権を無償で提供することを発表している。水素の活用推進を目指すグローバル団体であるHydrogen Councilは、航続距離300km以上の長距離ではFCVはEVに対してコスト優位であると試算（Hydrogen Council, 2017）し、長距離移動をする商用車での利用を訴求するが、2023年度の国内自動車登録台数はEVの40,327台に対しFCVは574台にとどまっている¹。

トヨタ自動車はFCV量産から10年間で燃料電池システムコストは約1/3に低減し、航続距離も約850kmまで向上するなどハイエンドのガソリン車と遜色ない水準に到達したが、普及が進まない要因の1つにインフラが整っていないことが挙げられる。FCVに水素を供給する水素ステーションは、2023年5月時点で整備中含め全国に181か所しかないうえ、営業時間も平日昼間のみの拠点多いことから、ガソリン車やEVに比べ燃料の入手性に課題がある状況である。

もはやFCVの利用拡大を自動車メーカーだけで実現することは難しく、水素ステーションなどの補完財を含むビジネス・エコシステムの形成と発展が必要である（Iansiti & Levien, 2004/2007; Adner & Kapoor, 2010）。

また、水素を製造後、貯蔵・運搬して利用するまでの一連のプロセスを水素エネルギー・エコシステムと考え、「製造」、「貯蔵・運搬」、「利用」をサブシステムとみなすと、水素インフラの未整備とFCVの性能向上の様相はサブシステム間で不均衡が生じている状況と言え換えることができる。Rosenberg (1976) は、他のサブシステムより完成度の低いサブシステムがイノベーションの焦点になることを指摘し、不均衡状態をもたらす完成度の低いシ

¹ 一般社団法人 日本自動車販売協会連合会調べ

<https://www.jada.or.jp/files/libs/5463/202504031004166053.pdf>（2025年6月7日アクセス）

システムの改善がシステム全体を進化させると述べている。

そこで、本稿では水素を利用する製品の中で量産販売から 10 年を経過した FCV に焦点をあて、研究開発動向の分析を通じて水素エネルギーのエコシステム形成期における提携の様子を明らかにしていく。

2. 既存研究

(1) ビジネス・エコシステム

経営学にエコシステムの概念を持ち込んだのは、Moore (1993) とされている。1つの企業を単一産業の構成員としてではなく、多様な産業にまたがる 1 つの企業生態系（ビジネス・エコシステム）の一部としてとらえるとし、生物学的生態系と同様に、誕生・拡大・リーダーシップ・自己再生の 4 つの段階で発展すると示している。Iansiti and Levien (2004/2007) は、エコシステムの中心的な役割を果たす焦点組織を「キーストーン」と呼び、キーストーンに連なり補完製品を提供する補完財提供者を「ニッチ」と分類し、両者の相互依存関係がビジネス・エコシステム全体の生産性や革新性を高めるとした。また、焦点組織と補完財提供者との関係に着目し、エコシステムがもたらす価値創造に関する研究は盛んに行われており (Iansiti & Levien, 2004/2007; Adner & Kapoor, 2010; Adner, 2017; Teece, 1986; Teece, 2007; Pierce, 2009)、焦点組織の戦略や調整は、エコシステム全体の更新や変化を促す (Iansiti & Levien, 2004/2007; Adner & Kapoor, 2010)。また、エコシステムの範囲は一元的ではなく、Teece (2007) は焦点組織や補完財提供者に加え、規制当局や標準化団体、司法、教育研究機関も含まれると述べている。

これまでのビジネス・エコシステムに関する研究は、IT 機器などに注目した研究が多く、地域や業界も限られていたが、本研究が対象とする水素エネルギーのように、「製造」から「貯蔵・運搬」、「利用」にいたる複数の産業領域にまたがるビジネス・エコシステムを視野に入れた研究は少ない。

(2) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーの普及は、技術革新や経済性、社会受容性に加え、政府の支援や規制など様々な要因が影響を与える (Jaffe et al., 2005; Tian et al., 2019; Brown, 2001; Brown et al., 2001)。Brown (2001) は、高い経済性と環境性能を兼ね備えたエネルギー技術であっても、初期購入価格の高さや、不十分で不正確な情報提供が普及の妨げになることを指摘し、解決策の 1 つに政府による財政支援や啓蒙活動を挙げている。政府の支援や規制について Noussan et al. (2020) は、各国の再生可能エネルギーの利用可能性やエネルギー安全保障の懸念など、各国の置かれた状況に応じた制度設計が必要と述べている。

また、前述のように再生可能エネルギーの普及には様々な要因が影響を与えることから、Rogge and Hoffmann (2010) は、欧州の排出権取引制度によって引き起こされた発電技術のイノベーションを、「技術」「ネットワーク」「制度」「需要」の 4 つの要素に分類し、要素別にイノベーションを論じている。

これらの既存研究に基づき、本研究ではエコシステムの中心的な役割を果たす焦点組織であるトヨタ自動車と補完財提供者、エコシステムの形成や再生可能エネルギーの普及に影響を与える政府の行動を通じてエコシステムの形成過程を明らかにしていく。

3. 研究方法

(1) 調査対象

研究開発動向をつかむために特許データを活用する事例は多く存在する (Artz et al., 2010)。しかしながら、特許は出願から公開までに 1 年半かかるため即時性が低く、水素のように研究開発が急加速する分野では適さないと考え、学術講演会の講演プログラムに着目した。

分析に用いた講演プログラムは、自動車分野の学術団体の中で会員数が 4 万名を超える公益社団法人自動車技術会の学術講演会である。学術講演会は、最新の研究成果を発表することを目的に春季と秋季の年 2 回開催され、会員外の発表も可能となっている。とりわけ、春季は自動車に関する展示会と同時開催であり、プレゼン資料が英語限定のことから海外からの参加動向も把握できると考え、春季大会のみを調査対象とした。調査期間は、日本政府が水素基本戦略を策定した 2017 年から 2024 年までの 8 年間である。データは自動車技術会のウェブサイトから収集し、ウェブサイトに掲載のないものは自動車技術会に問い合わせ入手した。

(2) 調査内容と方法

焦点組織であるトヨタ自動車の戦略や政府の行動が研究開発に及ぼす影響を確認するため学術講演会で発表された水素研究件数を測定した。水素研究の定義は、講演タイトルに「水素 (Hydrogen)」、「燃料電池 (Fuel Cell, FC)」、水素と窒素の化合物でカーボンニュートラルの実現手段の 1 つである「アンモニア (NH₃)」のいずれかの文字を含むものとし、講演タイトルが日本語であるものは日本、英語表記のものは海外からの発表とみなした。

次に、補完財提供者の広がり測定するため、水素研究を行った執筆者全員の所属を「自動車メーカー」、「大学研究機関」、「その他企業」に分類するとともに、水素研究の研究形態を確認するため、1 研究に関与した組織数を測定した。いずれも 8 年間の研究動向を把握するため単純統計を用いた。

4. 分析結果

(1) 研究件数の推移

まず、分析対象期間である 2017 年から 2024 年における水素関連研究の推移を見てみよう。表 1 に学術講演会の講演総数と水素研究件数、表 2 に水素研究の国内・海外発表件数を示す。水素研究件数ならびに講演会に占める水素研究比率とも 2021 年を境に増加し、その要因は海外からの発表によるものであることを確認した。

表 1 講演総数ならびに水素研究件数

発表年	講演総数	水素研究	
		件数	比率
2017	528	11	2.1%
2018	455	7	1.5%
2019	433	12	2.8%
2020	544	12	2.2%
2021	362	17	4.7%
2022	362	19	5.2%
2023	391	23	5.9%
2024	418	22	5.3%

(出所) データを元に筆者作成

表 2 水素研究件数の日本海外比較

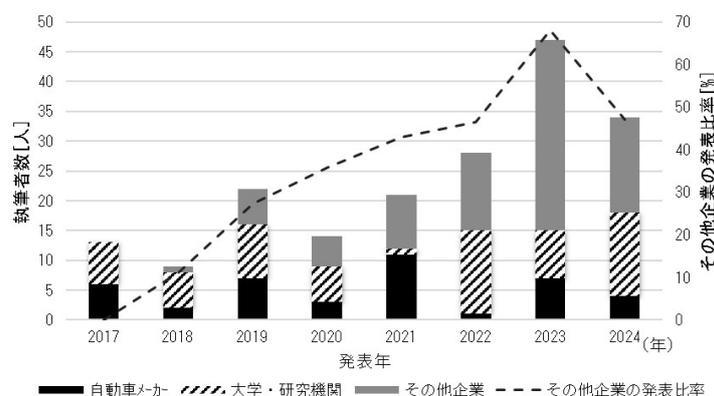
発表年	日本	海外	海外比率
2017	11	0	0.0%
2018	7	0	0.0%
2019	12	0	0.0%
2020	11	1	8.3%
2021	11	6	35.3%
2022	12	7	36.8%
2023	15	8	34.8%
2024	13	9	40.9%

(出所) データを元に筆者作成

(2) 研究形態の移り変わりと内容

水素研究を行った執筆者の所属推移を図 1 に示す。2018 年までは「自動車メーカー」と「大学・研究機関」が大半を占めていたが、2019 年以降は「その他企業」の参加が増加していることを確認した。研究に占める「その他企業」の比率は、2017 年は 0%であったが 2021 年以降は 40%を超え、水素研究が自動車メーカー以外に広がる様子を確認した。なお、2021 年の「大学・研究機関」の発表が 1 件にとどまっているのは、その前年に発生した新型コロナウイルス感染症のパンデミックにより、キャンパス閉鎖やオンライン授業の推進によって大学での研究が進まなかったためと思われる。

図 1 水素研究の執筆者所属推移



(出所) データを元に筆者作成

表 3 に水素研究の研究形態を示す。2017 年から 2024 年にかけて加重平均および共同研究比率の上昇は見られず、単独研究から共同研究への流れは確認することはできなかった。しかしながら、2018 年までは単独もしくは 2 団体による研究にとどまっていたが、2022 年以降は 4 団体を超える共同研究が見られたことから、組織間ネットワークの広がりを確認した。さらに 2023 年の 5 団体による研究は、いずれも自動車メーカーとエネルギー企業 3 社、大学との共同研究であった。水素を「製造」し「貯蔵・運搬」を担うエネルギー企業と、水素を「利用」する製品を開発する自動車メーカーとの共同研究は、「製造」、「貯蔵・運搬」、「利用」の間で発生するシステムの不均衡状態を改善する兆候ととらえることができよう。

表 3 水素研究の研究形態

発表年	単独 1団体	共同				加重 平均	共同発表 比率
		2団体	3団体	4団体	5団体		
2017	9	2	0	0	0	1.18	18.2%
2018	5	2	0	0	0	1.29	28.6%
2019	4	7	1	0	0	1.75	66.7%
2020	10	2	0	0	0	1.17	16.7%
2021	14	2	1	0	0	1.24	17.6%
2022	13	4	1	1	0	1.47	31.6%
2023	11	6	4	0	2	1.96	52.2%
2024	15	5	1	0	1	1.50	31.8%

(出所) データを元に筆者作成

5. 議論

学術講演会の分析結果から得られたことは以下の通りである。水素に関する研究は、2021 年を機に海外からの発表者が増え、研究件数および講演会に占める発表件数比率が増加した。水素研究は自動車メーカーから他業種に広がる様子を確認するとともに、2022 年以降

は4団体以上の共同研究が出現し、組織間ネットワークの広がりが見られた。いずれも2021年が転換期となっているため、Iansiti and Levien(2004/2007), Adner and Kapoor(2010)の理論に基づきエコシステムの更新や変化を促す焦点組織であるトヨタ自動車の戦略と、Brown (2001)の理論に基づき再生可能エネルギーの普及に影響を与える政府の支援と規制を調査する。調査はいずれも「日経テレコン 21」を用いた。トヨタ自動車および政府の動向を表4、表5に示す。

表4 トヨタ自動車のFCV動向

時期	内容	提携相手
2019年4月	FCV普及を狙う。北京汽車と提携	北京汽車集団
2019年7月	中国2社と提携。燃料電池車部品を供給	中国第一汽車、金龍連合汽車工業
2020年3月	トヨタ自動車と日野自動車、燃料電池トラックの開発開始	日野自動車
2020年6月	トヨタ、燃料電池で中国5社と合併	北京汽車集団、広州汽車集団など
2020年6月	トクヤマ燃料電池発電機を実証運転	トクヤマ
2020年9月	災害時電源にFCV。トヨタとホンダ実証実験	ホンダ
2020年10月	鉄道にも燃料電池、JR東・トヨタ・日立、22年に実証実験	JR東日本、日立製作所
2020年10月	トヨタ系、燃料電池トラック実験	日野自動車、アサヒグループなど
2020年10月	水素活用促進へ協議会、トヨタや三井住友FG、技術開発で連携	三井住友FG、岩谷産業など
2020年12月	トヨタ第2世代燃料電池車MIRAI発売	
2020年12月	トヨタとコンビニ3社、配送に燃料電池車実証実験	セブンイレブン、ファミリーマート、ローソン
2021年3月	FCVの基幹システム、トヨタが中国生産へ、清華大と	精華大学傘下の企業
2021年3月	トヨタなど福島で水素事業、利用時の課題検証	福島県、水素バリューチェーン推進協議会
2021年4月	トヨタ「水素エンジン」開発へ	
2021年8月	トヨタ、米で燃料電池モジュール組み立て	
2022年2月	JR東、水素車両を初公開、神奈川で試験走行へ	JR東日本、日立製作所
2022年8月	BMW、25年にもFCV量産へ トヨタと共同開発	BMW
2022年10月	リンナイとトヨタ、水素調理器を共同開発	リンナイ
2022年12月	トヨタ、タイCPグループと協業検討	CPグループ

(出所) データを元に筆者作成

トヨタ自動車は、2020年に同業他社と業務提携しFCVの開発加速と生産拡大に向けた行動を取るとともに、異業種連携によるFCV活用シーンの拡大を図っていることが分かる。これらの行動は、補完財提供者にエコシステムの発展と進化を予感させ、外部環境の不確実性が減少し、参入を促す行動を引き起こしたと考えることができる。

表5 政府の水素支援及び規制内容

時期	できごと
2017年12月	水素基本戦略を策定
2019年9月	水素・燃料電池技術開発戦略を策定
2020年10月	内閣総理大臣が所信表明演説にて、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言
2020年12月	第6回成長戦略会議において、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定
2021年1月	内閣総理大臣が施政方針演説にて、総額2兆円のグリーンイノベーション基金の設立と2035年までに新車販売で電動車100%を実現すると発表。
2021年6月	2020年12月発表の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」の更なる具体化を実施
2023年6月	水素基本戦略を改定

(出所) データを元に筆者作成

政府の支援及び規制については、2020年10月から2021年6月にかけて、カーボンニュ

ートラル宣言や総額 2 兆円のグリーンイノベーション基金の設立、2035 年までに新車販売で電動車 100%を実現するとの発表があったことを確認した。これらの政府の支援及び規制が水素の研究開発を加速させた可能性があるといえよう。

6. 研究の限界と今後の課題

本稿では自動車技術会の学術講演会プログラムを用いて、水素エネルギー・エコシステムの形成期における研究開発動向を分析した。その結果、2021 年を機に水素研究が増加するだけでなく、研究が自動車メーカーから他業種に広がるとともに、組織間のネットワークの拡大も確認することができた。これらの動向は、FCV を世界で初めて量産販売したトヨタ自動車や日本政府の行動が影響を与えた可能性を示唆するものとなった。

最後に今後の課題について述べる。第一に、トヨタ自動車の行動や政府の支援及び規制による効果を定量化できていないこと、第二に、研究対象が国内の自動車産業にとどまっていることである。今後は、海外や他の産業にも適応可能かについて検証し考察を深めていく。

References

- Adner, R. (2017). Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. *Journal of management*, 43(1), 39-58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>
- Adner, R., & Kapoor, R. (2010). Value creation in innovation ecosystems: How the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations. *Strategic management journal*, 31(3), 306-333. <https://doi.org/10.1002/smj.821>
- Artz, K. W., Norman, P. M., Hatfield, D. E., & Cardinal, L. B. (2010). A longitudinal study of the impact of R&D, patents, and product innovation on firm performance. *Journal of product innovation management*, 27(5), 725-740. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2010.00747.x>
- Brown, M. A. (2001). Market failures and barriers as a basis for clean energy policies. *Energy policy*, 29(14), 1197-1207. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00067-2)
- Brown, M. A., Levine, M. D., Short, W., & Koomey, J. G. (2001). Scenarios for a clean energy future. *Energy policy*, 29(14), 1179-1196. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00066-0)
- Hydrogen Council (2017). Hydrogen scaling up. Retrieved 2024/3/23 from https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf
- Iansiti, M. and R. Levien. (2007). *Kisuton senryaku* [The Keystone Advantage: What the New Dynamics of Business Ecosystems Mean for Strategy, Innovation and Sustainability]. (K. Sugimoto, Trans.).Shoei sha. (Original work published 2004)
- Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2005). A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological economics*, 54(2-3), 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.027>
- Moore, J. F. (1993). Predators and prey: a new ecology of competition. *Harvard business review*, 71(3), 75-86.
- Noissan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The role of green and blue hydrogen in the energy transition—A technological and geopolitical perspective. *Sustainability*, 13(1), 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- Pierce, L. (2009). Big losses in ecosystem niches: How core firm decisions drive complementary product shakeouts. *Strategic management journal*, 30(3), 323-347. <https://doi.org/10.1002/smj.736>
- Rogge, K. S., & Hoffmann, V. H. (2010). The impact of the EU ETS on the sectoral innovation system for power generation technologies—Findings for Germany. *Energy Policy*, 38(12), 7639-7652. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.047>
- Rosenberg, N. (1976). *Perspectives on Technology*, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511561313>
- Teece, D. J. (1986). Profiting from technological innovation: Implications for integration,

collaboration, licensing and public policy. *Research policy*, 15(6), 285-305.

[https://doi.org/10.1016/0048-7333\(86\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0048-7333(86)90027-2)

Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic management journal*, 28(13), 1319-1350.

<https://doi.org/10.1002/smj.640>

Tian, M. W., Yuen, H. C., Yan, S. R., & Huang, W. L. (2019). The multiple selections of fostering applications of hydrogen energy by integrating economic and industrial evaluation of different regions. *International journal of hydrogen energy*, 44(56), 29390-29398.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.089>

R&D Trends in the Early Hydrogen Energy Ecosystem: Evidence from Automotive Industry Conferences

Asako MIYOSHI
Kyoto Sangyo University
i2382034@kyoto-su.ac.jp

Abstract: This study investigates the early development of the hydrogen energy business ecosystem, with a focus on the Japanese automobile industry. We analyzed data from academic conference programs over an eight-year period. Our findings indicate a notable increase in presentations by overseas companies since 2021, accompanied by a rise in collaborative research activities. Additionally, the proportion of presenters from automobile manufacturers has been declining annually. These trends appear to be influenced by the strategic shifts within automobile companies and the supportive policies of the Japanese government.

Keywords: hydrogen energy, ecosystem, automotive industry, Research and development trends,