

# プロセスイノベーションの製品開発における役割の定量的実証研究

## —青色発光ダイオード開発を例に—

品川 啓介、玄場 公規、阿部 惇（立命館大学大学院）

### 1. はじめに

本稿では、新規ビジネスを創出する分野に「科学依拠型産業」を想定して議論を進める。「科学依拠型産業」は、「科学技術白書（平成20年度版）」で「サイエンス型産業」という言葉でも紹介され「サイエンス（自然科学）に依拠した産業、あるいは自然科学の重要性がとりわけ高い産業」として広く知られている。この科学依拠型産業の特徴の一つは、イノベーションの達成のためには自然科学の発見にまでさかのぼるアプローチが欠かせないことである。代表的な産業群としてはエレクトロニクス産業、製薬産業などが挙げられ、国の経済発展や産業成長に及ぼす影響が強い。このため、科学依拠型産業分野に参入する起業家にとっては、製品開発研究を確かなものとする因子と起点を理解することが欠かせない。

そのような因子と起点の例のひとつとして挙げられるものに、新しいプロセス科学（＝画期的なプロセス技術を生み出す源泉となる自然科学）や、これを起点として創出されるプロセスイノベーションがある。これは、高度な技術をもとに競争力の高い製品デザインを構想しても、この技術に見合った確かな製造方法が見つからなければその実現は難しいことによる。そして、ハイテク産業を始め、

近代の多くの産業に用いられる技術の多くが科学に依拠していることを鑑みると、そのプロセスイノベーションも科学に依拠することが多いものと考えられる。しかし既存研究は、新しいプロセス技術の効用やその製造効率化に焦点を当てるものがほとんどである<sup>1</sup>。本稿では、既存研究では言及されていない、プロセスイノベーションの起点となったプロセス科学やその形成過程、そしてこれらが製品開発に与える影響について議論する。

そのために、本稿では以下の手法を試みる。まず、科学依拠型産業におけるプロセスイノベーションを、自然科学分野のコミュニティ（学術界）に属する大学や企業が製品開発を競う過程で生まれた画期的なプロセス科学や、これに追随する研究の蓄積によって確立されるものと仮定する。そして、このような科学の蓄積によって形成されたプロセスイノベーションが製品成功に貢献したと考えられる事例について、これに関わる論文累積数の推移を科学進歩の代理変数とする。つまり、製品開発に関わる科学論文および、その製品開発を可能とするプロセス科学の発展に関わる科学論文の発刊累積数推移を整理し観察することで、プロセスイノベーションが製品開発研究に及ぼす影響の把握を試みるものである。

一般に、現時点の科学理論は、それまでに学術界で蓄積された科学知識によって形成さ

れ、科学進歩の推移は時系列に見た科学研究の論文累積数から推測できるとされている。このことは、学术界が将来に向けて進む方向性も、科学研究の論文累積数の推移からある程度推し量ることができることを示唆する。このため本稿の分析結果は、単に、科学に依拠するプロセスイノベーションが製品開発研究へと与える影響を理解するのみに留まらず、新しいビジネスを創出する起業家にとって、新規事業の成功に欠かせないフレームワークを与えるものと考えられる。

尚、本稿では分析の対象として青色発光ダイオード開発の事例を選ぶ。その理由は、初めてダイオードによる青色発光をもたらした新しい半導体結晶材料であるガリウムナイトライド (GaN) 結晶の開発が、その開発のなかで新しく生まれたプロセス技術である MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) 法の確立によって成功した事例として広く認識されることによる。このため、本稿では、GaN 結晶の開発推移が、おおむね青色発光ダイオード製品開発の推移を反映するものと捉え、この結晶開発研究と MOCVD 開発研究の推移を、上述の科学文献書誌情報の分析手法にもとづき比較し、プロセスイノベーションが製品開発研究へ及ぼす影響を定量的に議論する。

## II. 先行研究と本研究の意義

### II. I 科学依拠型産業におけるプロセスイノベーション

Pisano (1997) の著書、The Development Factory: Unlocking the Potential of Process Innovation におけるプロセスイノベーション

の再評価を契機に、このイノベーション (プロセスイノベーション) が製品開発に欠かすことのできない技術的な因子の一つとして認識されるようになった。これに関わる先行研究を整理し、なぜ科学依拠型産業におけるプロセスイノベーションの研究が必要となったのかについて述べる。

これまで、産業発展に関わる様々なイノベーションを実務を進める上で有益な知見となるよう類別し、その特徴を明らかにする研究が行われてきた。その中でも、技術的なイノベーションが産業発展に影響する分野の研究では、プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションの類別による分析が多く行われてきた。Damanpour and Gopalakrishnan (2001) によるとプロダクトイノベーションは、新しい製品の出現によって形成され、プロセスイノベーションは新しい製品が創出される方法によって形成される。このうちプロセスイノベーションは、技術に関係するプロセスイノベーション (技術的プロセスイノベーション)、組織の社会的システムに関係するイノベーション (組織的プロセスイノベーション) に類別され (Edquist, Hommen and Mckelvey, 2001; Meeus and Hage, 2006)、技術的プロセスイノベーションは、技術変化を通じ新しい道具や装置の導入によって生産性の改善を可能とするイノベーション (Ettle and Reza, 1992)、組織的プロセスイノベーションは新しい組織形態の導入を通じ生産業務の効率化をもたらすイノベーション (Edquist, Hommen and Mckelvey, 2001) と定義される。そして、技術的か、組織的かという属性を問わず、プロセスイノベーションは、製造コストの低減、歩留まりの改善、

生産量など企業の生産目標を達成するイノベーションと認識され、製品開発における副次的なイノベーションと位置付けられてきた (Utterback and Abernathy, 1975; Rosenberg, 1982; Damanpour, 1991; Utterback, 1994)。ここでいうプロセスイノベーションとしては自動車生産におけるベルトコンベア方式、組織的プロセスイノベーションは同じく自動車生産におけるリーン生産方式が挙げられる (Womack, Jones and Roos, 1990)。

このような中 Pisano (1997) は、近年のハイテク製品 (半導体製品、フラットパネルディスプレイ、バイオ系医薬品など) における技術的プロセスイノベーションの重要性を見出し、「プロセスイノベーションこそが製品成功に欠かせないイノベーションである」ことを主張した。これは、高度な技術をもとに画期的な製品デザインを構想したとしても、製造を可能とする確かな方法が見つからなければ製品開発が遂行できないことによる。この事例として、バイオ系医薬品の製品開発では複数の開発ステップを踏むこと、そのステップではその都度新しいプロセス技術が欠かせないことを指摘し、「製品開発者はその開発の源泉となるプロセス科学の発展を注視すべき」とも主張した。

詳細な定量分析による実証は見られなかったものの、Pisano (1997) の「プロセスイノベーションこそが製品成功に欠かせないイノベーション」という主張は、科学依拠型産業の成長に伴い広く受け入れられた。これにより、技術に依拠したプロセスイノベーションの重要性を具体的に指摘する研究も増えていく。例えば、Cabral,& Leiblein (2001) は、周期的に生じる新世代の LSI 製品開発で

は、その都度新しいプロセス技術の導入が成功の要因になっていることを指摘した。また Reichstein and Salter (2006) は、英国の製造企業における 2885 件のイノベーション事例<sup>2</sup>をもとに、高度な技術を適用した製品ほどラジカルイノベーション<sup>3</sup>を生起する高度な製造技術・装置の導入が必要であることを指摘した。この他、Linton and Walsh (2008) は理論研究の対象としてナノテクノロジー分野の磁性流体開発過程を選び、この開発成功はプロセス技術に依拠したプロダクトイノベーションに起因することを指摘している。

その一方で Pisano (1997) の「プロセスイノベーションの源泉となるプロセス科学の発展を注視すべき」という指摘に対して、プロセスイノベーションが科学に依拠しているのか、もしそうだとしたらそのような科学がどの段階で発生し、どのような過程を経てプロセスイノベーションとなるのか、ということについて定量分析をもとにその特徴を明らかにする研究は見られない。

## II. II 科学進歩の概念

Price (1963) や Gupta (1995) によると科学進歩の推移は、時系列に見た科学論文の累積数から推測できる。この考えは、科学依拠型産業の発展と、プロセスイノベーションの関係を分析する上で欠かせない知見となる。この考えに至る先行研究を以下に記す。

Kuhn (1962) によると、科学は研究活動によって得られた科学知識の蓄積に基づき進歩する。この概念を踏まえ、Price (1963) は時系列に見た科学論文の累積数から科学進歩の様子を推し量ることができることを主張し、自然科学分野の論文累積数がロジスティック

カーブを描きながら増加することを見出した。その際、このカーブの初期に現れる急増を、研究活動の活性化を示す重要な事象と捉え「科学知識の爆発」と称した。Gupta (1995)によると、この「科学知識の爆発」は、研究者間のコミュニケーションによって生じる新知識や新概念の受容に起因する。このような受容を社会システムにおける感染と呼ぶ。つまり「科学知識の爆発」は、科学知識の蓄積過程で画期的な科学の発見が生じ、時間の経過とともに科学者がこの発見を受容する確率(感染確率)が増加し、これに倣った研究や論文が急増する概念と捉えることができる。

これらの研究は、学術界における科学進歩は時系列に見た論文累積数の推移に反映されること、そしてその方向性は、それまで蓄積された科学知識のうち、特に影響力のある因子に囚われることを示唆する。そうならば、ことにPisano (1997)の主張するようなプロセス技術が製品開発の要となる産業分野において、製品開発研究の過程で、新しいプロセス技術(=製品製造を可能にする技術)が生じると、これに追従する研究がプロセスイノベーションを確立し、この製品開発研究は急激な発展を遂げることが予想される。これにより、製品開発研究に関わる論文累積数を時系列に観察・分析する際、新しいプロセス技術に関わる論文の累積数と比較することで、プロセスイノベーションの製品開発に果たす役割を定量的に実証できる可能性がある。

## II. III 本研究の意義

Pisano (1997)は、製品開発においては「プロセスイノベーションの源泉となるプロセス科学の発展を注視すべき」と主張した。これ

に加え、近年の新製品に用いられる技術の多くが科学に依拠していることを鑑みると、科学に依拠するプロセスイノベーションが製品開発に及ぼす影響を定量的に実証する研究が望まれる。これには学術界における、製品開発研究とプロセス開発研究から得られる科学知識の蓄積過程を分析し、両者に因果関係があることを実証する必要がある。しかし、現在そのような研究は見られない。

これに対し、本研究は、プロセスイノベーションが科学に依拠すること、そしてそのような科学がどの段階で発生し、どのような過程を経てプロセスイノベーションとなるのかを定量的に実証する。つまり、プロセスイノベーションが製品開発研究に欠かせない因子であることを明らかにするだけでなく、開発研究の方向性の決定に関わる因子であることを指摘する。このため、新しいビジネスを創出する起業家に、事業の成功に欠かせないフレームワークを与えるものとなる。これらの点から本研究は新規性を有すると考える。

## III. 事例紹介とデータ収集・分析方法

### III. I 事例紹介

#### —青色発光ダイオード開発—

Whittaker et al. (2006)、山口 (2006)、Mowery et al (2004)らの青色発光ダイオード開発に関わる技術的イノベーションの研究をもとに、この製品の開発経過を整理する。

青色発光ダイオードの本格的な開発研究は、1970年頃始まった。この時すでに、赤色の発光ダイオードは製品化されていたが、青色及び緑色発光ダイオード<sup>4</sup>の製品化の目処はたっていないかった。当時、多くの研究者は、青色

及び緑色発光ダイオードが実現すれば、青、緑、赤色の光を混合することで、白色光を含む所望の発光色の設計が可能となると考えていた。電気消費量が白熱電球に比べ劇的に低い白色発光ダイオードが製品化されることは、広く用いられてきた白熱電球から白色発光ダイオードへの置き換えが進むことを意味する。この理由から多くの企業が青色及び緑色の発光ダイオードの開発研究を開始した。ダイオードによる青色や緑色発光の実現は、当時の量子物理の理論から、新しい半導体結晶材料のガリウムナイトライド（以下 GaN とする）の結晶作製（以下結晶成長とする）を実現することにより達成できることがわかっていった。つまり、結晶構造についての見通しはたっていたものの、結晶成長法の探索は一から始めなければならない状態にあった。

両結晶開発が本格化した 1980 年前半、学術界で結晶成長は既存の結晶基板上で気相化学反応を用いて行うことが常識であった。所望の結晶の成長は、しばしばおもちゃのレゴの組み立てに例えられるように、大きさの揃ったブロック同士の結合のごとく、成長させる結晶と既存の結晶基板がほぼ等しい格子間隔であることが必須の条件であった。このことから予期されるように、格子間隔の異なる結晶同士は、結合面サイズの不マッチにより成長させることができない。つまり、GaN の結晶成長を実現するには、理論から求めた GaN 結晶の格子間隔にほぼ等しい結晶構造を有する基板が欠かせない（格子整合条件）。しかし当時 GaN 結晶にはそのような結晶基板候補はまだ存在しなかった。

このような既成概念があったにも関わらず、それに囚われず GaN 結晶の実現を試みる研究

者がいた。その試みは 1980 年後半から 1990 年前半にかけて次々と成功し、1994 年には製品レベルの青色発光ダイオード製品を生産できるまでのプロセス技術を確立した。例えば、1986 年、天野らは名古屋大学において当時としてはまだ開発されて間もないプロセス技術の MOVPE（Metal organic vapor phase epitaxy）法、これは後に MOCVD（Metal organic vapor phase deposition）法とも称される<sup>5</sup>ものであるが、これを用い、サファイア基板上にアルミナイトライド結晶を成長させることが可能であることを発見した。そして、このアルミナイトライドを GaN 結晶とサファイア結晶の格子間隔差を緩衝するバッファ層とするというアイデアを考案し、その実験の結果、製品の水準には及ばない品質ではあるが GaN 結晶の成長に成功した。これに続き 1991 年、当時小企業であった日亜化学工業の研究員の中村らは、天野らの発明と自らのアイデアを統合し、two flow 法と呼ばれる新たな MOCVD 法を発明し、これまで誰も実現し得なかった高品質の GaN 結晶成長に成功した。1994 年、日亜化学工業はこの two flow 法を量産適用し、世界初の青色発光ダイオードの製品化を実現する。このように、天野ら、中村らの研究が起点となり、製品化を可能とするプロセスイノベーションが確立されたことが推測される。

### III. II データ収集方法

本稿では、学術分野の文献書誌データベース Scopus<sup>6</sup>（Elsevier BV, オランダ国）に収録されている自然科学分野の出版物（物理、科学、工学の範囲の論文誌・会議録中の論文）のうち、GaN 結晶開発研究（以後 GaN 開発

研究とする)に関わる論文を抽出し(1)~(4)に記すデータ収集を行う(2013年8月19日に収集。)。なおここで、GaN 開発研究に関わる論文は、論文タイトル、アブストラクト、キーワードに「gallium nitride」または「GaN」を含むものと定義する<sup>7</sup>。

- (1) 青色発光ダイオードの量産が始まる 1994 年以前、つまり 1970 年から 1993 年までの GaN 開発研究に関わる論文について被引用数の高い 10 件を抽出する。
- (2) 1970 年から 2012 年(本データ収集時点での最新収録年)までの GaN 開発研究に関わる論文のキーワードについて、使用頻度の高い上位 10 位までのリストを作成する。
- (3) 1970 年から 2012 年までの GaN 開発研究論文について、毎年の累積数をグラフにプロットする。
- (4) (3)で求めた GaN 開発研究論文について、その内訳に含まれる MOCVD 法に関わる論文を抽出する。ここでは、MOVPE 法も MOCVD 法と称されるプロセス技術と同義の技術であることから、両プロセス技術に関わる研究を MOCVD 開発に関わる研究として扱う。このため MOCVD 開発に関わる論文は GaN 開発研究に関わる論文のなかで、タイトル、アブストラクト、キーワードに「MOCVD」、「MOVPE」、「Metallorganic chemical vapor deposition」、「Metallorganic vapor phase epitaxiay」のいずれかを含むものとする。
- (5) (3)(4) で求めた GaN 開発研究と MOCVD 開発研究の論文累積数を同じグラフに時系列にプロットする。

### III. III データ分析方法

前節 III. II (1)~(4) で収集したデータを以下のように分析する。

- (1) 前節 III. II (1)で収集した 10 件の論文に、科学依拠型プロセスイノベーションを形成するきっかけとなった天野ら(1986)、中村ら(1991)の MOCVD 法の発明に関わる研究が含まれるかを検証する。
- (2) 前節 III. II (2) で収集したキーワードに、MOCVD という語がリストに含まれることを検証する。
- (3) 前節 III. II (3) で得た GaN 開発研究に関わる論文の時系列の累積数推移について、ロジスティック式および一次方程式に近似する。そして、どちらの近似がより妥当であるか検証する。これは GaN 開発研究に影響を与えるようなプロセスイノベーションが存在する場合、社会システムにおける感染効果が顕著となり、ロジスティック式に近似されるような推移が予測されるが、このようなプロセスイノベーションが存在しない場合には、社会システムにおける感染効果が低くなり、一次方程式に近似されるような推移が予測されるからである。この近似は、日本 IBM 社 SPSS Statistics version 19 に含まれる曲線推定機能<sup>8</sup>を用いる。
- (4) 前節 III. II (5) で得た MOCVD 法に関わる研究論文の累積数推移について、その増加の様子が GaN 開発研究の累積数推移と類似しているか(同じ時期に「科学知識の爆発」とみられる論文数の急増が生じているか)検証する。

## IV. 分析結果

### IV. I GaN 開発研究活性化の起点と なった研究論文

表 1 に 1970 年～1993 年の GaN 開発研究に関わる論文について、被引用数の高い上位 10 件を示す。被引用数の最も高いものは、天野らの MOVPE (= MOCVD) 法を用いた GaN 結晶成長の論文である。この論文は学界で初めて GaN 結晶形成に成功したことを記すものである。次に被引用数の高いものは、中村らの two flow 法と称される MOCVD 法を用いた GaN 結晶形成の論文である。この

論文は、天野らの MOCVD 研究を踏まえ、独自のアイデアを融合することで初めて製品化可能な高品質の GaN 結晶成功にしたこと記すものである。これらは、Whittaker et al. (2006)、山口 (2006)、Mowery et al (2004) から紹介した青色発光ダイオード製品開発に関わる科学史において、この製品開発にとって重要な発明としたものに相当する。この結果から、GaN 結晶形成において MOCVD の開発は欠かせない研究課題であり、MOCVD が科学に依拠したプロセス技術であったことがわかる。

表 1 GaN 開発研究において被引用数の高い研究論文 (1993 年以前)

	著者	論文タイトル	論文誌名	被引用数
1	Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y.	Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer	<i>Applied Physics Letters</i> 48 (5), 1986, pp. 353-355	1109
2	Nakamura, Shuji	GaN growth using GaN buffer layer	<i>Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters</i> 30 (10 A), 1991, pp. L1705-L1707	752
3	Nakamura, Shuji, Iwasa, Naruhito, Senoh, Masayuki, Mukai, Takashi,	Hole compensation mechanism of P-type GaN films	<i>Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers</i> 31 (5 A), 1992, pp. 1258-1266	564
4	Nakamura, Shuji, Mukai, Takashi, Senoh, Masayuki, Iwasa, Naruhito	Thermal annealing effects on P-type Mg-doped GaN films	<i>Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers</i> 31 (2 B), 1992, pp. 139-142	527
5	Yeh, C.-Y., Lu, Z. W., Froyen, S., Zunger, A.	Zinc-blendewurtzite polytypism in semiconductors	<i>Physical Review B</i> 46 (16), 1992, pp. 10086-10097	490
6	Monemar, B.	Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra	<i>Physical Review B</i> 10 (2), 1974, pp. 676-681	457

7	Akasaki, I., Amano, H., Koide, Y., Hiramatsu, K., Sawaki, N.	Effects of ain buffer layer on crystallographic structure and on electrical and optical properties of GaN and Ga1- xAlxN ( $0 < x \leq 0.4$ ) films grown on sapphire substrate by MOVPE	<i>Journal of Crystal Growth</i> 98 (1-2), 1989, pp. 209-219	456
8	Ogino, Toshio, Aoki, Masaharu	MECHANISM OF YELLOW LUMINESCENCE IN GaN.	<i>Japanese journal of applied physics</i> 19 (12) 1980, pp. 2395- 2405 392	392
9	Nakamura, Shuji, Mukai, Takashi, Senoh, Masayuki	High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes	<i>Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters</i> 30 (12 A), 1991, pp. L1998-L2001	379
10	Khan, M., Bhattarai, A., Kuznia, J.N., Olson, D.T.	High electron mobility transistor based on a GaN- AlxGa 1-xN heterojunction Asif	<i>Applied Physics Letters</i> 63 (9), 1993, pp. 1214-1215	373

注) 著者が 2013 年 8 月に調査した結果

#### IV. II GaN 開発研究活性化の起点と なったプロセス技術

表 2 に 1970 年から 2012 年（本データ収集時点での最新収録年）までの GaN 開発研究に頻繁に用いられた上位 10 位のキーワードのリストを示す。GaN 開発研究の 8 位に見られる Metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD) は、前節 IV. I で述べた天野ら、

そして中村らが発明したプロセス技術に相当する語である。これ以外のキーワードは製品コンセプトやデザインに関わるものである。この結果から、GaN 開発研究の過程では MOCVD という科学に依拠したプロセス技術が生じ、高い頻度で研究の対象となっていたことがうかがえる。

表 2 GaN 開発研究論文に頻繁に用いられる上位 10 位までのキーワード

	キーワード	論文数
1	Gallium nitride	26,592
2	Gallium alloys	6,520
3	Semiconducting gallium compounds	5,436
4	Light emitting diodes	5,167
5	GaN	4,796
6	Photoluminescence	4,318
7	Semiconductor quantum wells	4,206
8	Metalloganic chemical vapor deposition	4,126
9	Molecular beam epitaxy	3,829
10	Substrates	3,828

注) 著者が 2013 年 8 月に調査した結果

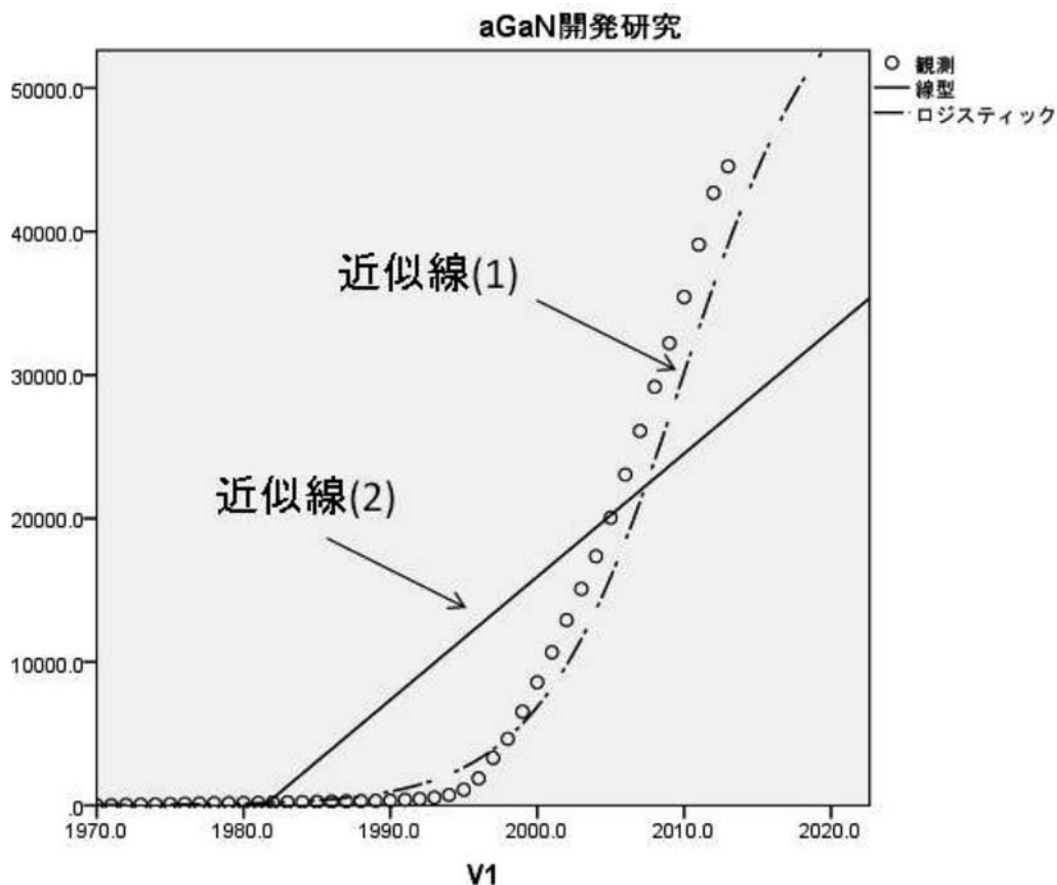


#### IV. III GaN 結晶開発の発展経路

図1に1970年から2012年（本データ収集時点での最新収録年）までのGaN開発研究に関わる論文の累積数の推移を示す。この図において、GaN開発研究に関わる論文は、1970年から1990年代初期まで緩やかに増加し、その後急増しており、ロジスティック曲線に近似されるような推移が見られる。これらの推移の特徴を定量的に検証するために、GaN開発研究に関わる論文の累積数推移について、ロジスティック式および一次方程式への近似を行う。

この近似によって得られたロジスティック式、および一次方程式とそれぞれ最小二乗法で得た決定係数 ( $R^2$ ) を以下に記す。GaN開発研究の論文累積数のロジスティック式への近似の結果は、 $E(Yt) = (1/792.842 + (5.551E+147) \times 0.814.101^t)^{-1}$  であり決定係数 ( $R^2$ ) は0.950であった（図1の近似線(1)に相当する。）。ここで、 $E(Yt)$  は累積論文数を、 $t$  は時間（西暦年）を示す。そして一次方程式への近の結果は、 $E(Yt) = -1700263.186 + 858.101t$  であり決定係数 ( $R^2$ ) は0.672であった（図1の近似線(2)に相当

図1 GaN開発研究論文の累積数（SPSS Statistics version 19から得られた結果）



（縦軸は GaN 開発研究に関わる論文累積数、横軸は西暦年）

注）著者が 2013 年 8 月に調査した結果

する。)。これらの結果と図の示す推移を鑑みると、GaN 開発研究の論文累積数推移はロジスティック式への近似が適していると考えられる。

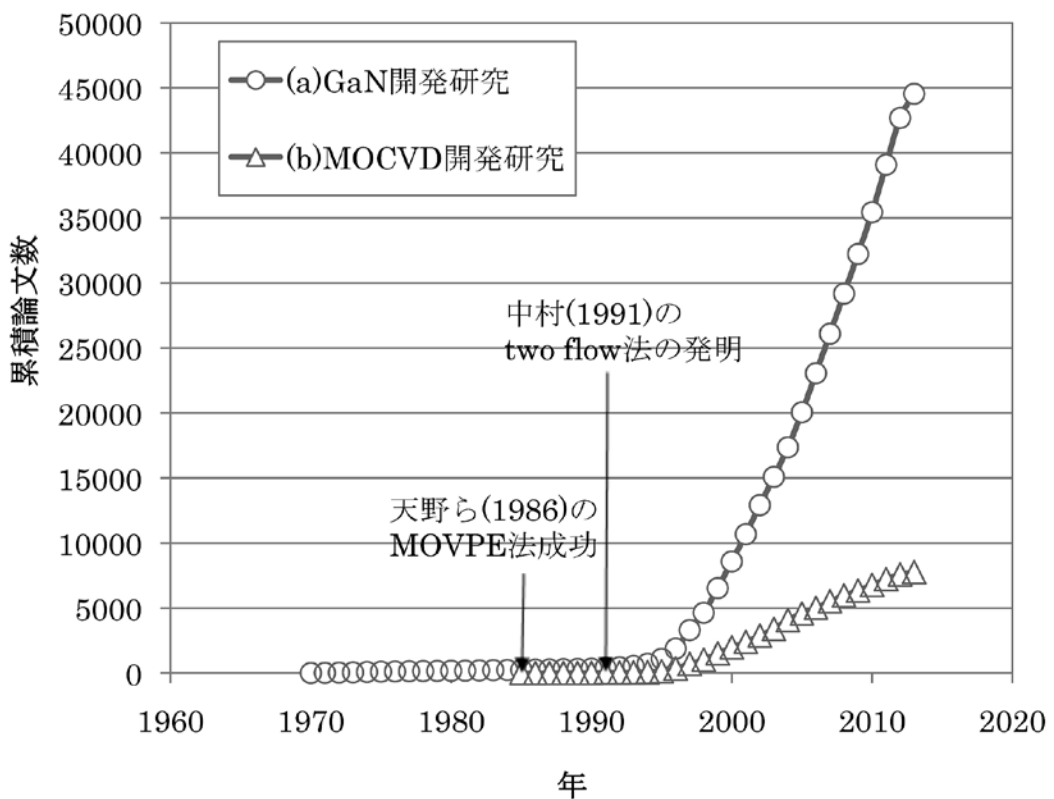
先行研究において述べた Kuhn (1962)、Price (1963)、Gupta (1995) らの主張を踏まえると、これらの結果は、GaN 開発研究の研究者集団 (=研究者を中心とする社会システム) の間に感染を引き起こす源となる画期的な科学の発見が存在したことが推察される。前節IV. I、IV. IIの結果を踏まえると、その因子として MOCVD 法の開発研究が挙げられる。

#### IV. IV MOCVD 開発研究の発展経路

次に、GaN 開発研究の論文の累積数とその内訳に含まれる MOCVD 開発に関わる論文の累積数の内訳を図 2 に記す。この図に、表 1 で抽出した 1986 年の天野ら、1991 年の中村らの MOCVD 開発研究を記す。

この図において MOCVD 開発及び GaN 開発研究に関わる論文累積数はいずれも 1994 年まで緩やかに増加し、その後急増する。この結果と III. I 節に記した事例紹介を考慮すると、中村らが天野らの研究を踏襲し、独自のアイデアを盛り込み発明した two flow 法 (MOCVD 技術の一つ) の研究が起点となり、

図 2 GaN 開発研究の累積論文数と MOCVD 開発研究に関わる論文の累積数



注) 著者が 2013 年 8 月に調査した結果

MOCVD 開発研究と GaN 開発研究の活性化を促したことが推測される。

この結果は、Pisano の「プロセスイノベーションこそがその製品成功に欠かせないイノベーションである」並びに「プロセスイノベーションの源泉となるプロセス科学の発展を注視すべき」という指摘に定量的に答えるものであると考える。

## V. 考察

本稿は、Kuhn (1962)、Price (1963) をはじめとする先人が解き明かしてきた科学進歩の特徴を踏まえ、既存研究では見られなかった定量的な分析法で検証することにより、プロセスイノベーションが本当に科学に依拠しているのか、そしてその科学がどの段階で発生し、どのような過程を経てプロセスイノベーションとなるのかという点から、Pisano (1997) の「プロセスイノベーションの源泉となるプロセス科学の発展を注視すべき」という指摘に答えるものである。一方、これまでの青色発光ダイオード開発に関わるイノベーションを分析する研究は、天野ら、中村らがそれまで製品化は困難と考えられていた GaN 開発研究を選んだ理由を議論し、その開発研究の過程を明らかにすることで新しいイノベーションの発見を試み、経営への示唆を探るものがほとんどであった。例えば山口 (2006) は、GaN 開発研究を事例に、科学者や技術者がもつ暗黙知 (知識化していない智慧) が科学のパラダイムを破壊することで創出されるイノベーションをパラダイム破壊型イノベーションと定義し、このイノベーションはその源泉である暗黙知の経営者への伝達が容易なベンチャー企業で成功する確率が高

いことを主張した。しかし、このイノベーションがプロダクトイノベーションなのか、それともプロセスイノベーションなのか類別して議論されていないため、起業家や研究者が具体的にどのような科学の発見や技術の発生に注意を払うべきか予期することが困難であった。

これに対し本稿は、Pisano 他のプロセスイノベーションの再評価を踏まえ、「科学に依拠しているプロセスイノベーションが存在する」という概念を導入することで、このイノベーションの新しい役割、つまり「製品開発研究を確立していくという役割」を実証した。すなわち、科学に依拠した画期的な新しいプロセス技術は製品開発研究における「科学知識の爆発」の起点となり、製品開発研究を確かなものにしていくという役割を担うことを指摘したするものであり、このイノベーションが製品開発に欠かせない技術的因子の一つであることを実証するものである。これにより、起業家は新しいビジネスを創出する際に、「科学知識の爆発」の生じる前から、製品開発に寄与するプロセス科学を探索し、その成否を見出す努力が必要であることがわかった。

## VI. 結論

本稿は、青色発光ダイオード製品開発における GaN 開発研究過程を例に書誌学情報の分析法を適用し、プロセスイノベーションが製品開発研究における「科学知識の爆発」の起点であり、その後の製品開発研究の確立に欠かせない因子の一つであることを定量的に実証した。

本稿の発見は青色発光ダイオード研究開発

の事例に限られるが、この分析法を、ナノテクノロジー製品、フラットパネルディスプレイ製品、バイオ系医薬品等の製品など、高度な技術に裏打ちされたプロセスイノベーションが欠かせないとされる製品開発の分析に適用することにより、プロセスイノベーションが与える影響をより一般化された形で導出できるものとする。これは、これまで製品開発における副次的なイノベーションと捉えられてきたプロセスイノベーションを新たに評価するフレームワークを与えるものとする。

(注)

- 1 例えば、Cabral and Leiblein (2001) は、半導体産業を事例に、企業における技術的プロセスイノベーションが生産性を著しく向上させることを指摘している。
- 2 この事例は、The core Eurostat Community Innovation Survey (CIS) of innovation (Stockdale, 2002; DTI, 2003) を基にしている。
- 3 企業と産業界にとって新しい技術の導入を伴うプロセスイノベーションをラジカルプロセスイノベーションとして、企業にとって新しく産業界にとっては新しくない技術の導入を伴うプロセスイノベーションをインクリメンタルプロセスイノベーションとして定義した。
- 4 緑色発光ダイオードは青色発光ダイオードの改良で実現できるとされる。
- 5 “MOVPE 法” は 1980 年前半に発明された気相による結晶製造法である。後に “MOCVD 法” とも称されるようになった。研究者は、この MOVPE (=MOCVD) 法に GaN 結晶成長専用の開発を加える必要があった。
- 6 Scopus は研究者が論文作成の際に検索を必要とする科学分野の論文誌、会議録などについて 18500 タイトルを収録しており、現在、存在すると考えられるこれらのタイトルの約 80% をカバーする。Scopus は、論文タイトル、アブストラクト、キーワード、そして書誌データを収録しており、検索者の入力する語を含む論文を抽出することができる。また、検索システムにはシノラス機能も含まれるため、類義語による検索も可能である。
- 7 Mowery et al., (2004) は、米国登録特許の中から青色発光ダイオード製品開発における GaN 開発に関わる特許を抽出する際、同様の検索キーワードを用いた。これを踏まえ、本稿でもこのキーワードの使い方に倣った。
- 8 SPSS Statistics version 19 の曲線推定では、一次方程式、

ロジスティック式はそれぞれ最少二乗法で以下の式ではめられる。一次方程式  $E(Yt) = \beta_0 + \beta_1 t$ 、ロジスティック式  $E(Yt) = (1/u + \beta_0 \beta_1)^{-1}$ 。ここで、 $E(Yt)$  は累積論文数を、 $t$  は時間 (西暦年) を示す。

【参考文献】

- Damanpour, F. [1991] Organizational Innovation: A Meta-Analysis of Effects of Determinants and Moderators, *The Academy of Management Journal*, 34(3), 555-590.
- Rosenberg, N. [1982] *Inside the Black Box: Technology and Economics*, Cambridge University Press.
- Tidd, J., Bessant, JR & Pavitt, K. [2001] *Managing innovation integrating technological, market and organization change*, John Wiley: Chichester.
- Cabral, R. & Leiblein MJ [2001] Adoption of a Process Innovation with Learning-by-Doing: Evidence from the Semiconductor industry, *Journal of Industrial Economics*, 49 (5), 269-280
- Utterback, JM & Abernathy WJ [1975] A dynamic model of process and product design, *Omega*, 13(6), 639-656.
- Pisano, GP [1997] *The Development Factory: Unlocking the Potential of Process Innovation*, Harvard Business School Press.
- Damanpour, F., & Gopalakrishnan, S. [2001] The dynamics of product and process innovations in organizations *Journal of Management Studies*, 38(1): 45-65.
- Edquist, C., Hommen, L., & McKelvey, M. [2001] *Innovation and employment: Process versus product innovation*: Cheltenham: Edward Elgar.
- Meeus, M. T. H., & Hage, J. [2006] Product and Process Innovation, *Scientific Research, Knowledge Dynamics, and Institutional Change: An Introduction*. In J. H. a. M. Meeus (Ed.), *Innovation, Science, and Institutional Change*: 1-19: Oxford University Press, A research Hanbook.
- Narin, F., Hamilton, K. and Olivastro D. [1997] The Increasing Linkage between U.S. Technology and Public Science, *Research Policy*, 26: 317-330.
- Pavitt, K. [1989] Technological Accumulation, Diversification and Organisation in UK Companies, 1945-1983, *Management Science*, 35, 81-99.
- Whittaker, DH & Cole RE, eds. [2006] *Recovering from Success Innovation and Technology Management in Japan*, Oxford University Press.
- 山口栄一 [2006] 『イノベーションの共鳴と破壊』 NTT 出版社
- Kuhn, TS [1962] *The Structure of Scientific Revolutions*,

- University of Chicago Press.
- Price, DJ de S [1963] *Little Science, Big Science*, Columbia University Press.
- Mowery, David C, Richard R. Nelson, Bhaven N. Sampat, and Arvids A. Ziedonis [2004] *Ivory Tower and Industrial Innovation: University-Industry Technology Transfer before and after the Bayh-Dole Act*, Stanford University Press.
- Cooper, AC & Schendel, D. [1976] Strategic Responses to Technological Threats, *Business Horizons*, 19(1), 61-69.
- Foster, RN [1986] *Innovation: The Attacker's Advantage*, Summit Books.
- Tushman, ML & Anderson P. [1986] Technological discontinuities and organizational environments, *Administrative Science Quarterly*, 31(3), 439-465.
- Womack, JP, Jones, DT & Roos D. [1990] *The Machine that Changed the World Based on the Massachusetts Institute of Technology 5-Million-Dollar 5-year Study on the Future of the Automobile*, Simon & Schuster: New York Rawson Associates.
- Reichstein, T. & Salter A. [2006] Investigating the Sources of Process Innovation among UK Manufacturing Firms, *Industrial & Corporate Change*, 15(4), 653-682.
- Linton, JD & Walsh, ST [2008] A theory of Innovation for Process-Based Innovations such as Nanotechnology, *Technological Forecasting and Social Change*, 75(5), 583-594.
- Gupta, B. M., Lalita Sharma, and C. R. Karisiddappa [1995] Modelling the Growth of Papers in a Scientific Specialty, *Scientometrics*, 33(2), 187-201.
- Breiland, William G., Michael E. Coltrin, J. Randall Creighton, Hong Q. Hou, Harry K. Moffat, and Jeffrey Y. Tsao [1999] Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE), *Materials Science and Engineering*, 24 (6), 241-274.
- Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. & Toyoda Y. [1986] Metal Organic Vapor Phase Epitaxial Growth of a High-Quality GaN Film Using an AlN Buffer Layer, *Applied Physics Letters*, 48 (5), 353-355.
- Nakamura, S. [1991] GaN Growth Using GaN Buffer Layer, *Japanese Journal of Applied Physics Part 2*, 30 (10A), 1705-1707.