

ハイテク製品開発における科学知識の爆発

—青色LED開発及び先端半導体露光装置開発の発展経路検証—

品川 啓介 (立教大学)

1. はじめに

本稿では、新規ビジネスを創出する分野としてハイテク製品分野を想定し、議論を進める。この分野の代表的な産業群としては、半導体産業、液晶産業、製薬産業、バイオ製薬産業などが挙げられ、これらの分野の製品開発の進展は科学進歩に依拠していることが認識されている (Pisano, 1997; Lim et al., 2006; 品川, 2014)。このため、ハイテク産業に参入する起業家は、対象とする分野の科学進歩を把握するために多くの時間を費やしている。しかし、そのような科学進歩とそれに大きな影響を及ぼす技術的イノベーションの関係性を体系的かつ定量的に分析する研究はほとんど見られない¹。本稿では経営学の知見をもとに論文書誌データベースを用い、これらの分析を試みる。

本稿では、Abernathy and Utterback (1978)、Utterback (1994) の紹介した従来の技術的イノベーションの類別と、Pisano (1997) の見出した新しいタイプのプロセスイノベーションの捉え方を参考に論文書誌データベースを用い上述の分析を試みる。ここで扱う技術的イノベーションは、企業の競争力の源泉における有力な因子の一つとして認識され、プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションに類別して議論さ

れることが多い (Abernathy and Utterback, 1978; Utterback, 1994)。これらのうち技術的プロセスイノベーションとは、「既に確立されている製法を改善して製品の生産性の効率化やコスト低減を実現する」行為を指すものとされている (Abernathy and Utterback, 1978; Rosenberg, 1982; Ertle and Riza, 1992; Edquist et al., 2001; Meeus and Hage, 2006)。ところが近年、ハイテク産業をリードする半導体産業を中心としたエレクトロニクス産業、そしてバイオ製薬産業においては、「新しく発見された製法によって製品開発そのものを成功に導くプロセスイノベーション」が見られ、プロセスイノベーションが製品開発成功を左右するケースが多くなってきている (Pisano, 1997; Lim et al., 2006; 品川, 2014)。なお一般に技術的イノベーションの概念とは、製品の実現を叶え、経済的効果をもたらす物や方法の結合と認識されているが、本稿で扱うタイプのプロセスイノベーションは科学に依拠したものであり製品成功への貢献が著しい。このことから、このタイプのプロセスイノベーションに「製法に関するイノベーション」と新たな定義を設けることも検討できるが、まだ事例が少ないこと、そして Pisano (1997)、Lim et al. (2006) など既存研究の枠組みにおいてはプロセスイノベーションの範疇に収められていることから、本

稿でもこれに倣い新しいタイプのプロセスイノベーションとして扱うこととする。そして、このタイプのプロセスイノベーションを含む事例として、青色 LED の製品開発を取り上げ議論する²。

分析を進めるにあたり、既存研究と同様に論文累積数の推移を科学進歩の代理変数と捉え (Price, 1963; Gupta, 1995; Daim et al., 2006; Suominen et al., 2010; Chen et al., 2011)、特にハイテク製品開発と密接に関わる科学進歩については、その分野の科学の発展経路を示すものと仮定する。分析の対象とする青色 LED 開発では、当初、量子物理の理論から青色発光を可能とするダイオードの材料として、人工の GaN 結晶と ZnSe 結晶の二つが候補として挙がっていたが、肝心の作製方法は見出せていなかったことが知られている (山口, 2006)。現在、青色 LED は GaN を用いたものが製品化されているが、これは昨年ノーベル物理学賞を受賞した天野氏、赤崎氏、中村氏らによってもたらされたイノベーション (GaN の新しい製法の発見と確立) によるものであることが認識されている。その一方で ZnSe を用いた青色 LED は実用化に至っていない。このような異なる背景を持つ GaN と ZnSe の開発について、それぞれの発展経路推移とイノベーションの関係を検証する。加えて、これらに似た発展経路を有する研究開発事例についても分析し、そこから得られる経営への示唆について議論する。

II . 先行研究

II . I . 科学進歩の分析

本稿では、Kuhn (1962) の科学進歩の概

念を踏まえ、論文書誌情報を用い、ハイテク産業に関わる分野の科学の発展経路の分析を試みる。そこで、分析法に関わる先行研究を整理する。

Kuhn (1962) は「科学は科学的探究活動を通じて蓄積された科学知識によって進歩する」という概念によって科学進歩を説明した。これを踏まえた Price (1963) は、時系列に見た科学論文の累積数推移から科学進歩を推し量ることができると主張し、そこから、該当する科学分野が順調に進歩を遂げた場合、論文累積数は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。そして、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。その後 Gupta (1995) が、ロジスティックカーブに従うような論文累積数の増加について、新しいアイデアが人から人へと口コミで伝わるイノベーションの普及プロセス (Rogers, 1962) に類する現象であると指摘し、このような論文累積数増加は社会システムにおける感染モデル (社会的感染モデルとも呼ばれる) によって説明できると主張した³。ここでいう感染モデルとは、画期的なイノベーションを感染源に見立てたもので、コミュニケーションを介して、個から多数へ、多数から大多数へと、それに対する認識が急速に広がっていく様子を表すものである。他方、進歩が停滞している場合、その推移がどのような特徴を有しているかはまだ知られていないが、これらの特徴が明らかになれば、起業家の新規事業参入の際の有益な知見となると考えられる。

本稿では、既存研究と同様に論文累積数の推移を科学進歩の代理変数として捉え (Price,

1963; Gupta, 1995; Daim et al., 2006; Suominen et al., 2010; Chen et al., 2011)、特にハイテク製品開発と密接に関わる科学進歩については、その分野の科学の発展経路を示すものと仮定し、ノーベル物理学賞を受賞するような技術的イノベーションが存在した GaN 開発研究と存在しなかった ZnSe 研究について、これらの発展経路と主要研究テーマの関連性を分析する。

II . II . プロセスイノベーション

天野、赤崎、中村らの研究がもたらしたイノベーションとは、どのような範疇のものか。技術変化を分析する研究では、技術的なイノベーションをプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションに類別して議論する。つまり、プロダクトイノベーションは製品デザインを確立するイノベーションとして、プロセスイノベーションは歩留まりの改善、生産量の向上などを達成することを目的としたイノベーションとして認識されている (Abernathy and Utterback, 1978; Rosenberg, 1982; Ettle and Riza, 1992; Edquist et al., 2001; Meeus and Hage, 2006)。青色 LED 開発において天野氏、赤崎氏、中村氏が発見・確立した技術的イノベーションは、製法を扱うという点では後者のプロセスイノベーションの範疇にあるが、「新しく発見した製法によって製品開発を成功に導いた」という点では、従来認識されてきたプロセスイノベーション (歩留まりの改善、生産量の向上などを達成するイノベーション) とは異なるものである。このため、このイノベーションは、製品開発の成功を左右する新しいタイプのプロセスイノベーションと捉えることがで

きる (Pisano, 1997; Lim et al., 2006; 品川, 2014)。このようなプロセスイノベーションが生じた場合に、開発研究の発展経路にどのような影響が現れるのかを定量的に分析した例は見られない⁴。本稿では、論文書誌データベースを用い、このような例について検証する。

III . 事例紹介と分析方法

III . I . 青色 LED の開発史

以下、山口 (2006) の研究をもとに青色 LED の開発史を整理する。青色 LED の本格的な開発研究は、1970 年頃始まった。LED は電気消費量が劇的に低く、青色 LED と蛍光体の組み合わせによって、白色電球を実現できる。そのため、多くの企業が青色の LED の開発研究に着手した。量子物理の理論上、ダイオードによる青色発光の実現には、新結晶材料である GaN 結晶または ZnSe 結晶作製が必要であったが、その開発は、結晶成長法の探索を一から始めるような状態にあった。

両結晶開発が本格化した 1980 年前半、学术界では既存の結晶基板上で化学反応を生じさせ、所望の結晶を成長させるのが通例であった。その際、成長させる結晶と下地となる基板の結晶の間隔 (格子間隔) がほぼ等しいことが必須の条件とされていた (格子整合条件) が、当時、既存の結晶基板は ZnSe 結晶成長に適したガリウム砒素 (GaAs) 基板のみであった。このため 1970 ~ 1990 年代後半までの期間、研究者の多くが ZnSe 結晶の開発を選択した。

その一方で、GaN 結晶の実現を試みる研究者もいた。1986 年、天野は名古屋大学にお

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であった MOVPE (Metalorganic vapor phase epitaxy) 法を用い、サファイア基板上に結晶化の途中にあるスポンジのようなアルミナイトライドを成長させ、その上に GaN 結晶を成長させることに成功した (MOVPE は後に MOCVD と呼ばれるようになる)⁵。これをもとに、1991 年に日亜化学工業の研究員の中村は、天野らの発見と自らのアイデアを統合し、two flow 法と呼ばれる新しい MOCVD 法 (Metalorganic chemical vapor deposition) を発明し、高品質の GaN 結晶成長に成功した。そして 1994 年、日亜化学工業はこの技術を量産適用し、世界初の青色 LED の製品化を実現する。

この間、もうひとつの結晶材料の候補である ZnSe 結晶の開発研究においては、新しい製法が開発されることはなく、ZnSe 結晶を用いた青色 LED 製品も誕生しなかった。

III . II . 分析方法

本稿では、学術分野の文献書誌データベース Scopus (Elsevier B.V., オランダ国) を用い、データ収集を行う。

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、それは現在、存在すると考えられるタイトルの約 80% にあたる。Scopus は、論文タイトル、アブストラクト、キーワード、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ソー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。

なお本稿では、GaN 開発研究に関する論文

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、ZnSe 開発研究に関する論文は “zinc selenide” または “ZnSe” を含むものとする。また、GaN 開発研究に関する論文の中で、青色 LED の製品化を可能としたプロセス技術である MOCVD (III . I . 参照) の開発研究を主題とする、もしくは構成要素とする論文を MOCVD 開発研究と定義し、GaN 開発研究に関する論文のなかで、タイトル、アブストラクト、キーワードに “MOCVD”、“MOVPE”、“Metalorganic chemical vapor deposition”、“Metalorganic chemical vapor phase epitaxiay” のいずれかを含むものとする。

以上の条件のもと、GaN 開発研究に関する論文の時系列の累積数推移については、科学の発展が順調であったケースと捉え、ロジスティック式に近似し発展経路を分析する。一方、ZnSe 開発研究については、発展が順調でないケースと捉え、一時式に近似し発展経路を分析する。後者 (ZnSe 開発研究) を一次式に近似する理由は、前述した感染モデル (II . I . 参照) に従うような論文の急増が生じておらず、変動の少ない単調な増加を見せることが推測されるからである。なお、これらの近似には、SPSS Statistics version 19 (日本 IBM 社) の曲線推定機能を用いる⁶。さらに、MOCVD 開発研究については GaN 開発研究への影響を探る。

IV . 分析結果

まず、GaN を用いた青色 LED が製品化される以前 (1970 ~ 1993 年) の論文について、被引用数の高い上位 3 位の論文を抽出す

表 1. GaN 開発研究で被引用数の多い論文 (～ 1993)

	<i>Authors</i>	<i>Title</i>	<i>Sources</i>	<i>No. of citation</i>
1	Amano, H. , Sawaki, N., Akasaki, I. , Toyoda, Y.	‘Metal organic vapor phase epitaxial growth of a high-quality GaN film using an AlN buffer layer’	Applied Physics Letters vols. 48, no. 5 (1986), pp. 353-355.	1253
2	Nakamura, S.	‘GaN growth using GaN buffer layer’	Japanese Journal of Applied Physics Part 2: Letters vol. 30, no. 10A (1991), pp. L1705-L1707	829
3	Nakamura, S. , Iwasa, N., Senoh, M., Mukai, T.	‘Hole compensation mechanism of p-type GaN films’	Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers vol. 31, no. 5A (1992), pp. 1258-1266.	614

注) 筆者が 2015 年 3 月に調査した結果

る (表 1)。被引用数が最も高いのは、天野らの MOVPE (= MOCVD) 法を用い、実験レベルの GaN 結晶成長に成功した論文である (Amano et al., 1986)。2 番目に被引用数の高いものは、中村の発明した two flow 法と称される独自の MOCVD 法を用い、初めて製品レベルの GaN 結晶成長に成功した論文である (Nakamura, 1991)。3 番目に被引用数の高いものは中村らによる two flow 法で作製した GaN 結晶をアニールと呼ばれる方法で p 型化⁷させることに成功した論文で、青色発光の決め手となったものである (Nakamura et al., 1992)。これらは共通して新しいプロセス技術である MOCVD を含んでおり、これが欠くことのできないテーマであることを示唆している。

次に、表 2 に 1970 年から 2014 年までの GaN 及び ZnSe 開発研究に用いられた上位

10 位のキーワードのリストを示す。(a) GaN 開発研究の 8 位に見られる Metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD)、そして (a) GaN 開発研究の 10 位及び (b) ZnSe 開発研究の 4 位に見られる molecular beam epitaxy (以後、MBE とする) 以外は、製品コンセプトやデザインに関わるものである。ここで MOCVD は、Ⅲ . I . で述べた天野、そして中村らが発明した GaN 結晶成長を可能したプロセス技術を示す語である。また MBE の製品開発に対する寄与については後の分析で検証するが、一般には製品製造に関わるものというよりは実験室レベルの試作に用いられる技術として認識されているものである (Breiland, 1999)。このため ZnSe 開発研究について、さらに上位 50 位までのキーワードを調べたがプロセス技術に関わるキーワードは見られなかった。なお件数でみると

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

(a) GaN 開発研究		(b) ZnSe 開発研究	
Key word	No. of papers	Key word	No. of papers
1 Gallium nitride	28659	1 Semiconducting zinc compounds	2413
2 Gallium alloys	6734	2 Photoluminescence	1308
3 Light emitting diodes	5675	3 Zinc selenide	1242
4 Semiconducting gallium compounds	5550	4 Molecular beam epitaxy	946
5 GaN	5080	5 Zinc compounds	829
6 Semiconductor quantum wells	4499	6 Semiconducting gallium arsenide	745
7 Photoluminescence	4417	7 Semiconductor quantum wells	694
8 Metallorganic chemical vapor deposition	4290	8 Semiconductor quantum dots	657
9 substrates	4024	9 Zinc	612
10 Molecular beam epitaxy	3967	10 ZnSe	573

注) 筆者が 2015 年 3 月に調査した結果

50 位において 182 件であり、この値は ZnSe 開発研究に関わる論文数の 2% 弱である。このことから、もし 50 位以降に MOCVD に相当するような ZnSe 結晶成長を可能とするプロセス技術が存在したとしても、ZnSe 開発研究の進展に及ぼす影響は少なく、実際の製造に寄与するとしてもまだ時間がかかるもの考えられる。

次に 1970 年から 2014 年までの GaN 開発研究及び、ZnSe 開発研究に関わる論文の累積数の推移を示す (図 1)。両研究の推移は、Scopus に収録された論文群 (Ⅲ . Ⅱ . 参照) から抽出されたものであり、学术界全体の推移の傾向を示しているものと捉える。図中で GaN 開発研究に関わる論文は、1970 年から 1992 年頃まで緩やかに増加し、その後急増しており、ロジスティック式に近似されるような推移が見られる。一方、ZnSe 開発研究に

関わる論文は、1970 年から現在に至るまで、単調増加を示すような推移が見られる。これらの GaN、および ZnSe 開発研究の推移をそれぞれロジスティック式、及び一次方程式に近似し決定係数とともに記す。

まず 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、

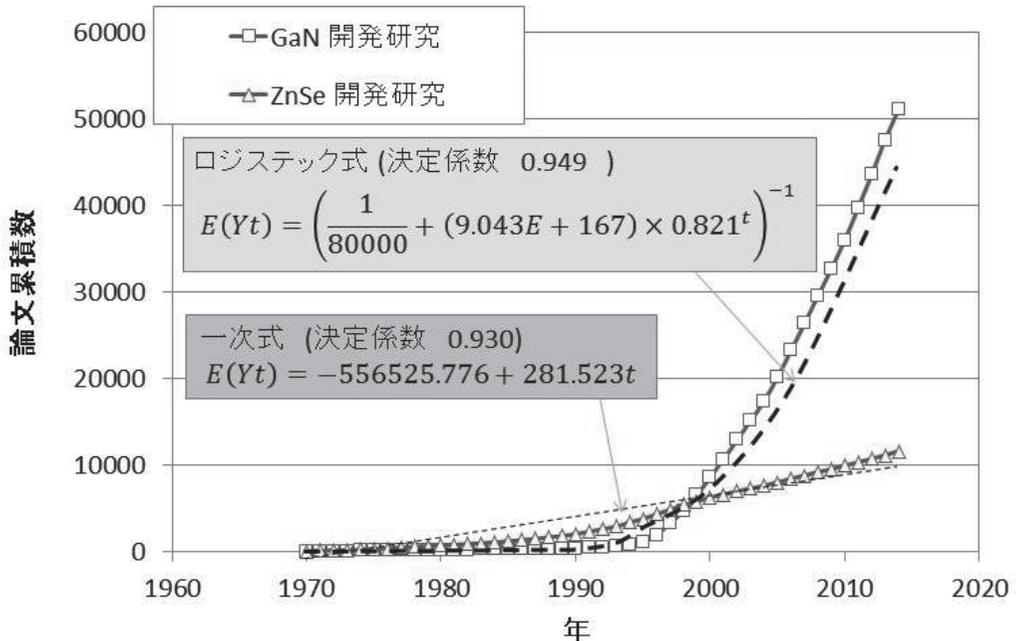
$$E(Yt) = \left(\frac{1}{80000} + (9.043E + 167) \times 0.821^t \right)^{-1}$$

であり決定係数 (R^2) は 0.949 であった。ここで、 $E(Yt)$ は論文累積数を、 t は時間 (西暦年) を示す。この結果から、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すると考える。一方、ZnSe 論文累積数の一次方程式への近似は、

$$E(Yt) = -556525.776 + 281.523t$$

であり決定係数 (R^2) は 0.930 であった。この結果から、ZnSe 開発研究の論文累積数推

図1. 論文累積数の比較 (GaN vs. ZnSe)



移は一次方程式への近似が適すると考える。

以上の結果は、GaN 開発研究においては、研究者集団において社会的感染を引き起こす源となる科学の発見が存在したこと、そして、ZnSe 開発研究においてはそのような発見が存在しなかったことを示唆する。

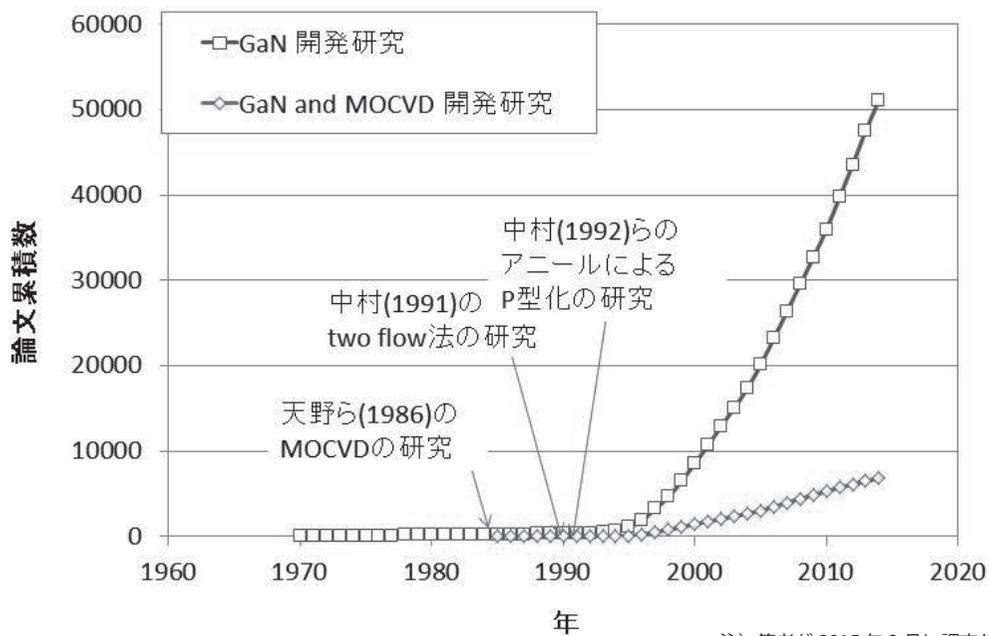
そして、現時点で GaN を用いた青色 LED は製品として普及し、ZnSe を用いた青色 LED は普及していないという事実を踏まえると、図 1 の GaN 及び ZnSe 開発研究の論文累積数推移は、それぞれの開発研究の発展経路を示唆するものと捉えることができる。

表 1 と図 1 から GaN 結晶開発研究における論文急増の因子としては GaN 結晶開発にとって新しいプロセス技術であった MOCVD が考えられる。そこで、GaN 開発研究の論文の累積数とそこに含まれる MOCVD 開発研究論文の累積数を記す (図 2)。両開発研

究の累積論文数は、ともに 1992 年まで緩やかに増加し、その後、急増している。急増が見られる以前の両開発研究の論文群に、後にノーベル賞を受賞する天野ら (1986)、中村 (1991)、中村ら (1992) の開発したプロセス技術が含まれる。これを踏まえると、これらは GaN 開発研究及び MOCVD 開発研究を活性化させるきっかけとなった研究であることが推測される。そして、天野ら (1986) の研究は、MOCVD 開発研究の始点にあることから、GaN 開発研究の指針を与えた研究と解釈される。

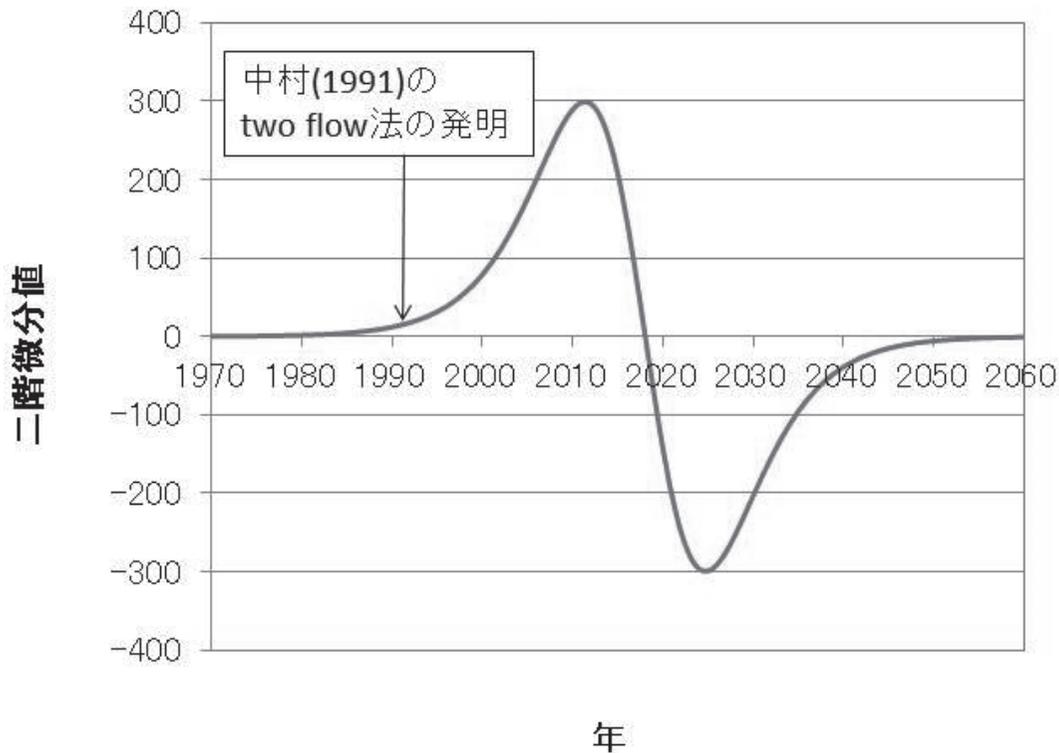
次に、これらのうちどの研究が GaN に関する研究開発論文の急増を促したかを検証する。そこで図 1 で得た GaN 開発研究のロジスティック式を二階微分し検証する (図 3)⁸。ここで二階微分値は、GaN 論文の増加率の変化を示す。表 1 に示した被引用数の高い論

図2. 論文累積数の比較 (GaN vs. MOCVD)



注) 筆者が 2015 年 3 月に調査した結果

図3. ロジスティック式の二階微分 (GaN 論文)



注) 筆者が 2015 年 3 月に調査した結果

文のうち、中村氏の two flow MOCVD の論文が発表された 1991 年ごろから、二階微分値は急激に増加している。このことは論文急増に直接影響を及ぼしたのは中村 (1991) の two flow MOCVD の研究であったことを示唆している。

次に、図 1 に示したような GaN 及び ZnSe 開発研究の論文累積数推移が、それぞれの開発研究の発展経路を示している確証を高めるために、図 1、3 と同様の分析を登録特許についても行う。ここでは、米国登録特許データベースを用いた。図 4 に示す GaN および ZnSe 開発に関する米国登録特許数の累積数の推移は、それぞれ図 1 に示した論文累積数の推移に類似した傾向がみられる。そこで GaN、および ZnSe 開発研究の推移をそれぞれロジスティック式、及び一次方程式に近似し決定係数とともに記す。

先ず GaN 開発研究の特許累積数のロジスティック式への近似の結果は、

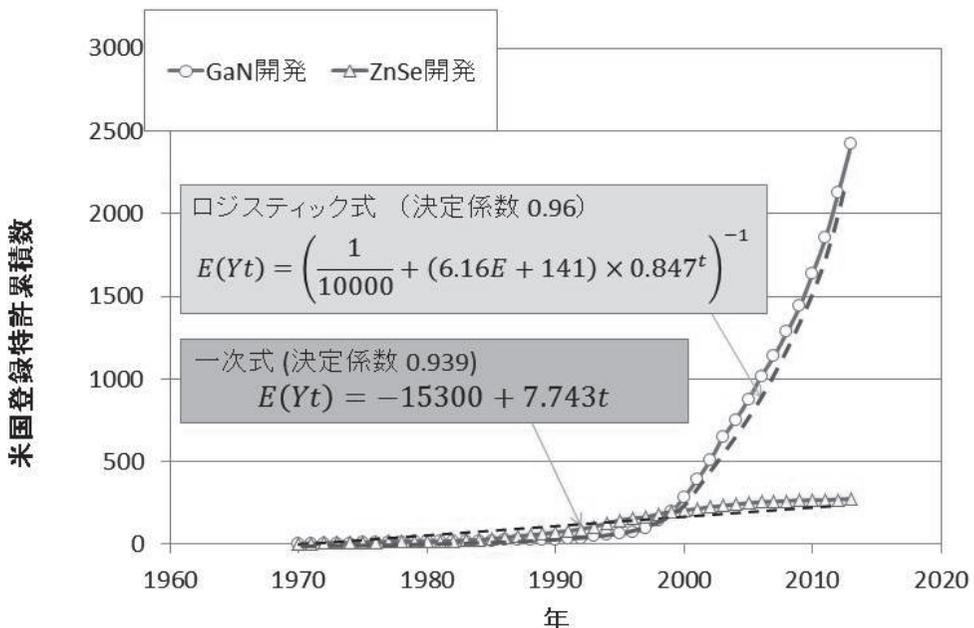
$$E(Yt) = \left(\frac{1}{10000} + (6.16E + 141) \times 0.847^t \right)^{-1}$$

であり決定係数 (R^2) は 0.96 であった。ここで、 $E(Yt)$ は特許累積数を、 t は時間 (西暦年) を示す。この結果から、GaN 開発研究の特許累積数推移はロジスティック式への近似が適すると考える。一方、ZnSe 特許累積数の一次方程式への近似は、

$$E(Yt) = -15300 + 7.743t$$

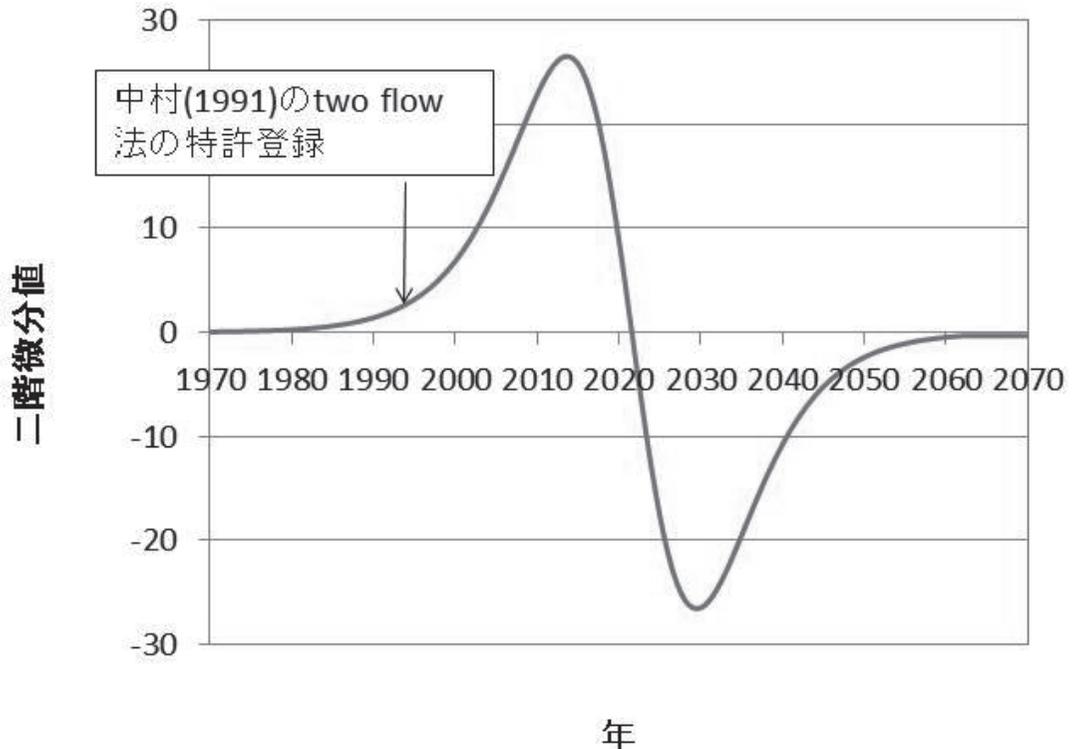
であり決定係数 (R^2) は 0.939 であった。この結果から、ZnSe 開発研究の特許累積数推移は一次方程式への近似が適すると考える。これらは、GaN、および ZnSe の特許累積数推移が論文累積数推移と類似していることを示唆する。

図 4. 特許累積数の比較 (GaN vs. ZnSe)



注) 筆者が 2015 年 3 月に調査した結果

図5. ロジスティック式の二階微分 (GaN 特許)



次に、GaN 開発研究の特許累積数に近似したロジスティック式を二階微分し、増加率が急変（急増）する点を求める（図5）。特許登録は論文査読よりも時間がかかるため数年のタイムラグが生じると考えられる。これを踏まえ二階微分の結果を見てみる。中村氏の two flow MOCVD の特許が登録されたのは論文発表の3年後の1994年であるが、それ以降、GaN 開発に関わる登録特許数が急増している。図3、5の結果において、中村氏の two flow MOCVD の研究開発の成果が示された後、論文、特許が急増したという事実は、GaN 開発の発展を牽引したのは中村（1991）の two flow MOCVD であったことを示唆する。

以上の結果を踏まえると、図1のGaN及

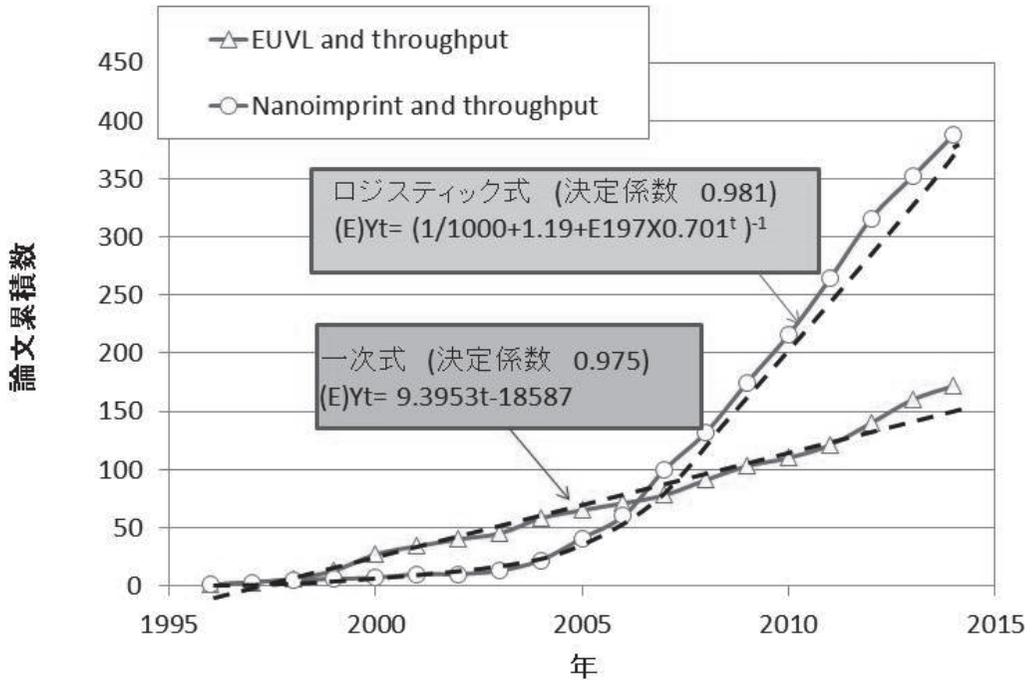
びZnSe 開発研究の論文累積数推移は、それぞれの開発研究の発展経路を示唆するものと考えられる。

以上の結果から、青色LED 開発の発展経路の分析から科学知識の爆発が生じた場合、その背後にはその後の発展に影響する技術的イノベーションが存在することが発見された。このような科学進歩の傾向が他の分野でも生じるかを確かめるため、先端LSIの露光技術（回路パタンニング技術）であるEUVL（Extreme ultraviolet lithography）とNanoimprint 開発研究の発展経路の比較を行う。

まず、両技術開発の現状について記す。EUVLは先端光学を用いた回路パタンニング技術でありキャノン、ニコン、ASML（オランダ国）の光学機器メーカー大手3社が2000

注）筆者が2015年3月に調査した結果

図6. 論文累積数の比較 (EUVL vs. Nanoimprint)



年前後より本格的に開発を始めていた。しかし光源の出力が上がらず、現在も量産に適したスループットがかなわない為、量産への適用が遅れている。一方、Nanoimprintは回路パターンの版を転写して回路パターンを形成する技術であるが、これまでLSI製造に用いられたことがなく、そのため次世代LSIへの応用はほとんど意識されてこなかった。それにも関わらず光学機器メーカーのキヤノンはEUVLの開発を断念し、2014年、米国のNanoimprint機器メーカーのM&Aに踏み切り、現在、実用化を目指していることを公表している。

図6にEUVLとNanoimprint開発研究に関わる論文の累積数推移を示す。この分析では、両技術のスループット不足を考慮して、それぞれの語に“throughput”を含む

ものとする。Nanoimprintには高い決定係数($R^2=0.981$)でロジスティック式に近似される推移が、EUVLには高い決定係数($R^2=0.975$)で一次方程式に近似される推移が見られる。Nanoimprintの論文数は、2000年代初期から急増しており、このことは2000年前後に技術的イノベーションが生じていたことを示唆している。青色LED開発と同様の分析を行ったところ、論文急増の起点と考えられるところにKomuro et al. (2000)のLSI微細加工におけるthroughputを追及したNanoimprintの研究が存在する。以上の結果から、これらの論文累積数推移が両研究の発展経路を示すものと仮定すると、キヤノンのEUVLからNanoimprintへの転向は、経験的な手法で科学進歩を見極めた上での決断であったと推測される。

V. 考察

図1の結果は、GaN 開発研究においては、研究者集団において社会的感染を引き起こす源となる科学の発見が存在したこと、そして、ZnSe 開発研究においてはそのような発見が存在しなかったことを示唆する。

そして、表1の GaN 開発研究において、被引用数が高い論文の上位3位までを、天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)による GaN 結晶製造を可能とする新しいプロセス技術、つまり MOCVD に深く関わる研究が占めていること、これらの研究が発表された1992年以降、それまで増加が単調かつ緩やかであった GaN 開発研究及び MOCVD 開発研究の論文累積数が急増していることから(図2参照)、MOCVD は GaN 開発のコアとなるプロセスイノベーションであったことが推測できる。さらに2014年、青色LED 開発成功に大きく貢献したとして、天野、赤崎、中村がノーベル物理学賞を受賞した事実からも、その貢献の大きさを推し量ることができる。そして、現時点で GaN を用いた青色LED は製品として普及し、ZnSe を用いた青色LED は普及していないという事実を踏まえると、図1の GaN 及び ZnSe 開発研究の論文累積数推移は、それぞれの開発研究の発展経路を示しているものと捉えられる。この見解が妥当であるならば、GaN 開発研究において、後にノーベル賞を受賞するような天野ら(1986)、中村(1991)の研究が1991年までに発表されていたにも関わらず、1998年まで ZnSe 開発研究の論文数の方が多く、かつリニアに増加しているという事実は、開発研究においてはその分野特有の課題解決に集

中するため、他の分野や課題に注意が向きにくい傾向にあるということを示唆するものと考えられる。

これら GaN 開発研究、ZnSe 開発研究の発展経路について、Abanathy et al. (1983) が製品デザインの要となるコアコンセプトの登場とその後に生じる開発の成熟化現象から導いた、脱成熟化の概念を用いて考察する。それによると、工業製品はテクノロジーの偶発の寄せ集めではなく、これを成立させる必然の集合体であり、この中にはコアコンセプトが存在するとされる。そして、その変更にあたっては従属的なテクノロジーの大部分の変更が余儀なくされる。つまり、確立された技術のコアコンセプトの変更は予想以上の負担を伴い、そのため大きな変化を避けるような意識が働き、開発が停滞してしまう。これを成熟化と捉え、その打開には製品デザインにおけるコアコンセプトの刷新(=脱成熟化)が欠かせないことを指摘している。

これを参考に、青色発光ダイオード開発ではコアコンセプトが新しいプロセス技術である可能性を想定し、GaN 開発研究では脱成熟化(論文累積数が急増し科学知識の爆発が生じるような発展経路)が、ZnSe 開発研究では成熟化(単調な増加を示すような発展経路)が生じたという仮定のもと、議論を進める。

III. I. で記したように、GaN 開発研究においては、GaN 結晶の成長に必要な格子整合を満たす既存の結晶基板が存在しなかった。これに対し ZnSe 開発研究では格子整合を満たす GaAs 基板が存在した。そのため、もともと格子整合を満たす結晶基板がない、つまり不確実性の高い状態であった GaN 開発では、それを実現するためには新しい構造とプ

ロセス技術を適用するという選択しかない。つまり新しい構造の実現に MOCVD を中心とする新しいプロセス技術開発に着手することに対して、心理的に高いハードルが生じ難かったと推測する。その結果、青色発光ダイオード開発研究における脱成熟化が実現したものと解釈される。

一方、ZnSe 開発では、開発当初より格子整合を満たす結晶基板が存在したことで不確実性が低減されており、既に存在した実験レベルの結晶成長法である MBE 法以外の新しいプロセス技術開発への着手が見送られた。その結果、青色発光ダイオード開発研究の脱成熟化が阻害されたものと解釈される。

この考え方を踏まえ、次世代の LSI 回路パタンニング技術である EUVL 開発研究と Nanoimprint 開発研究の論文累積数推移、および、これに関連する企業の研究動向を考察する。図 5 の結果は、Nanoimprint 開発研究では、研究者集団において社会的感染を引き起こす源となる科学の発見が存在したこと、そして、EUVL 開発研究においてはそのような発見が存在しなかったことを示唆する。2014 年、光学機器メーカーのキヤノンが EUVL の開発を断念し、米国の Nanoimprint 機器メーカーの M&A に踏み切ったが、この選択には、次世代 LSI 回路パタンニング技術における脱成熟化を狙ったものと推測される。

これまで、このように製品開発の成功を大きく左右する因子の存在とその発展経路を定量的に見出す手法がほとんど知られていなかったことを鑑みると、本稿の分析から得られた知見はハイテク分野に参入する企業の研究開発戦略の策定、例えば自社のコアコンピテンスを踏まえた上での研究参入や研究投資

拡大のタイミング策定の一助として貢献するものと考えられる。

VI. 結論

論文累積数の推移を科学進歩の代理変数として捉え、ハイテク製品開発と密接に関わる科学進歩は、その分野の科学の発展経路を示すものと仮定し分析を試みた。その結果、青色 LED 開発研究における GaN 開発研究と ZnSe 開発研究の分析では、その発展が順調な場合、ロジスティック式に近似されるような論文数の急増があること、その背後には技術的イノベーションが出現しており、論文数の急増の直前には技術的イノベーションの起点となる研究が存在することが見出された。そうではない場合、一次方程式に近似されるような論文数の増加となり、技術的イノベーションも生じていないことが見出された。現時点で GaN を用いた青色 LED は製品として普及し、ZnSe を用いた青色 LED は普及していないという事実や、同分野の登録特許の累積数推移の結果を踏まえると、論文累積数とその分野の発展経路を示すという仮定に基づく分析は、今後、さらに精緻化することによってハイテク分野に参入する企業の研究開発戦略策定に貢献する有益な手法となるものと考えられる。

(注)

- 1 博士論文「プロセスイノベーションによる科学知識の爆発」(品川, 2014)には本稿と類似する分析が見られるが、過去の開発研究の事例の分析が中心であり現在進行過程にある開発研究の詳細な事例を扱っていない。この点、本稿では現在進行中の開発研究の事例も加え分析することで、企業にとって将来に向けた研究開発戦略の策定に重要となる考え方についても考察する。

- 2 このタイプのプロセスイノベーションが含まれる製品には、青色LED、半導体製品などハイテク分野の素材型製品やバイオ製薬製品が挙げられるが、現在のところ研究の範囲は限られており、一般的な通常製品までは及んでいない。これに対し、このタイプのプロセスイノベーションが含まれないと考えられる製品としては、通常製品の事例が多く研究されており、素材型製品（例えば板ガラス）や、組立製品（例えば初期の自動車製品）が良く認識されている。
- 3 イノベーションの普及がロジスティックカーブやロジスティック式によって記述される理由については Casettie (1969) を参照されたい。
- 4 従来認識されているプロセスイノベーション、つまり製造工程を改善することにより生産性を上げるイノベーションの効果は、Utterback (1994) の紹介した初期の電球、平板ガラス、人工の氷の製造設備増加と市場普及の急増の関係から理解できる。また、これにより発展経路に与える影響も推察される。
- 5 MOVPE 法は 1980 年前半に科学の研究から発明された気相化学反応を利用した結晶作成法のひとつである。後に MOCVD 法と称されるようになった。GaN 結晶成長には、この成長に適した MOCVD 法の開発が欠かせないものであった。技術的イノベーションの基本的な概念は、製品の実現を叶え、経済的効果をもたらす物や方法の結合と捉えられるが、その結合の際の組み合わせが新しければすべてが新しい必要はないとされる。本稿では科学との結合に依拠したイノベーションに焦点を当てているが、それが製品開発の過程でまったく新しく生まれる必要はないとした上で MOCVD 法を、GaN 開発を実現するプロセスイノベーションと捉えている。以後、特に MOVPE と記す必要がない限り MOCVD で統一する。
- 6 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小二乗法で以下の式にあてはめられる。一次方程式 $E(Y_t) = \beta_0 + \beta_1 t$ 、ロジスティック式 $E(Y_t) = \left(\frac{1}{u} + \beta_0 \beta_1^t\right)^{-1}$ 。ここで、 $E(Y_t)$ は論文累積数を、 t は時間（西暦年）を示す。
- 7 GaN や ZnSe は改質により得た p 型、n 型が揃うことで初めて発光が叶う。電子が動いて電流が流れるものを n 型、電子の抜けた穴が移動して電流が流れるものを p 型半導体と呼ぶ。n 型への改質は中村らが研究を始める前に確立されていたが実用に耐える p 型は確立されていなかった。
- 8 SPSS で近似されたロジスティック式の二階微分式は以下のように表される。

【参考文献】 $\frac{dE^2(Y_t)}{dt^2} = \frac{(-\beta_0 \beta_1^t (\ln \beta_1)^2) \left(\frac{1}{u} - (\beta_0 \beta_1^t)\right)}{\left(\frac{1}{u} + \beta_0 \beta_1^t\right)^3}$
 Pisano, Gary P. *Development Factory: Unlocking the*

Potential of Process Innovation. Boston: Harvard Business School Press, 1997.

Lim, Lisa P.L., Elizabeth Garnsey, and Mike Gregory. "Product and Process Innovation in Biopharmaceuticals: a New Perspective on Development.", *R&D Management* 36, no.1(January 2006): 27-36.

Abernathy William J., and James M. Utterback. "Patterns of Industrial Innovation." *Technology Review* 80, no.7(June/July 1978): 40-47.

Utterback, James M. *Mastering the Dynamics of Innovation*, Boston, MA: Harvard Business School Press, 1994.

Rosenberg, Nathan. *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982.

Ettlie, J. E., and Ernesto M. Reza. "Organizational Integration and Process Innovation." *The Academy of Management Journal* 35, no.4(October 1992): 795-827.

Edquist, C., L. Hommen, and M. McKelvey. *Innovation and employment: Process versus product innovation*. Cheltenham, UK: Edward Elgar, 2001.

Meeus, Marius T. H., and Jerald Hage. "Product and Process Innovation, Scientific Research, Knowledge Dynamics, and Institutional Change: An Introduction." *In Innovation, Science, and Institutional Change: A Research Handbook*, edited by Hage, Jerald, and Marius Meeus. Oxford : Oxford University Press, 2006.

Price, Derek John de Solla. Little Science, Big Science. New York, NY: Columbia University Press, 1963.

Gupta, B. M., Lalita Sharma, and C. R. Karisiddappa. "Modelling the Growth of Papers in a Scientific Specialty." *Scientometrics* 33, no.2(June, 1995): 187-201.

Daim, Tugrul U., Guillermo Rueda, Hilary Martin, Pisek Gerd Sri. "Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis." *Technological Forecasting & Social Change* 73, no.8(October 2006): 981- 1012.

Suominen, Arho., and Aulis Tuominen. "Analyzing the Direct Methanol Fuel Cell technology in portable applications by a historical and bibliometric analysis." *Journal of Business Chemistry* 7, no.3(September 2010): 117-130.

Chen, Yu-Heng, Chia-Yon Chen., and Shun-Chung Lee. "Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies." *International Journal of Hydrogen Energy* 36,

- no.12(June 2011): 6957-6969.
- Rogers, Everett M. *Diffusion of innovations*, NY: The Free Press of Glencoe Division of The Macmillan Co., 1962.
- Casetti, Emilio. "Why Do Diffusion Processes Conform to Logistic Trends?," *Geographical Analysis* 1, no.1(January 1969) : 101-105.
- Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1962.
- Amano, H., N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda. "Metalorganic Vapor Phase Epitaxial Growth of a High-Quality GaN Film Using an AlN Buffer Layer." *Applied Physics Letters* 48 no. 5 (February 1986): 353-355.
- Nakamura, S. "GaN Growth Using GaN Buffer Layer." *Japanese Journal of Applied Physics Part 2 letters* 30, no.10A (October 1991): 1705-1707.
- Nakamura, S., N. Iwasa, M. Senoh, and T. Mukai. "Hole compensation mechanism of P-type GaN films." *Japanese Journal of Applied Physics Part 1 Regular papers & short notes* 31, no. 5A (May 1992): 1258-1266.
- Breiland, William G., Michael E. Coltrin, J. Randall Creighton, Hong Q. Hou, Harry K. Moffat, and Jeffrey Y. Tsao. "Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE)." *Materials Science and Engineering* 24, no.6(February 1999): 241-274.
- Abernathy, William J., Kim B. Clark, and Alan M. Kantrow. *Industrial renaissance : producing a competitive future for America*. New York: Basic Books, 1983.
- 品川啓介、玄場公規、阿部惇 『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－』 ビジネスクリエーター研究 5号 (1994) 43-55.
- 大津正和、小川進 監訳 『イノベーションダイナミクス：事例から学ぶ技術戦略』、東京：有斐閣、1998、p. 163.
- 山口 栄一 『ノベーションの共鳴と破壊』、NTT 出版社、2006.
- 望月 嘉幸 監訳 『インダストリアルルネサンス：脱成熟化時代へ』 東京：ティービーエス・ブリタニカ、1984.