

ハイテク製品開発における脱成熟化の因子としてのプロセスイノベーション -青色発光ダイオード開発を例に-

立命館大学大学院テクノロジー・マネジメント研究科

品川啓介

1. はじめに

近年、青色発光ダイオード、太陽電池、LSI(Large scale integrated circuits), などハイテク分野の素材型製品の開発成功が社会生活変革に著しく貢献する事例は枚挙にいとまがない。これらの製品開発では、それまでになかった機能を実現するために、科学の知見を拠り所にして選んだ素材を創出することが必要となる。このため、先端科学や技術を駆使して新しいプロセス技術を開発しなくてはならず、そこから生じた技術的プロセスイノベーションが製品開発へ与える影響は計り知れない。

この技術的プロセスイノベーションは、従来議論されてきた改善の積み重ねによって生産効率を向上させる技術的プロセスイノベーション¹[1][2]とは、大きくその特徴が異なることが考えられ、議論の対象となる機会が増えている[3][4][5]。しかしこの特徴を定量的に分析し議論する研究はほとんどみられない。このような背景から、科学論文の書誌情報をもとに、その事例として青色発光ダイオード製品開発を選び、その発展経路を定量的に分析する。

この分析を進める上で、青色発光ダイオードの製品開発の成功の背後には、科学的知識の爆発(=研究の急増)が存在し、その様子は論文数の急増によって観察され、その因子のひとつとして技術的プロセスイノベーションが挙げられると仮定する。そして、この技術的プロセスイノベーションが科学知識の爆発の前に現れることを指摘し、研究開発の停滞に対する脱成熟化の因子となる可能性について議論し、その際の発展経路を SECI モデル[6]にあてはめ検証することで、知識創造における位置づけについても検討する。

2. 先行研究

2-1. 科学進歩の概念に基づく論文書誌情報の分析

本稿は、科学進歩の概念を踏まえ、技術的プロセスイノベーションの分析を試みる。一般に科学進歩を説明する際、Kuhn(1962)[7]の「科学は科学的探究活動のなか

¹ 従来の素材型製品における技術的プロセスイノベーションの説明では、ガラス板の製造法の変遷が典型的な事例として取り上げられる。そこでは、それまでの製造経験から確立された基本の製法に新たな創意工夫を凝らし、生産効率が改善されてきたことを紹介するものが多い[1][2]。

で生じたパラダイムに従って累積的に得られた科学知識によって進歩する」いう概念が良く引用される。これを踏まえ、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の様子を推し量ることができることを主張し、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[8]。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²。これらから、本稿では科学論文の累積掲載数の推移を科学進歩の代理変数として捉え、製品開発に関わる論文数を時系列に整理し急増の因子を分析する。

2-2. プロセスイノベーション

産業や企業の発展に影響する様々なイノベーションについて、技術変化を対象とする研究では、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議論が多く見られる[1][2]。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その後の製造コストの低減、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して認識されている[11][12]。

このような認識に対し、Pisano(1997)は、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ハイテク分野の素材型製品開発では新しい製造法の確立がその後の製品開発に影響することに注目し、「プロセスイノベーションこそが製品開発の成功に欠かせないイノベーションである」と主張した[3]。この研究では、詳細な定量分析は成されなかったもの、この分野の産業成長に伴い広く受け入れられるようになり、様々な製品開発について、高度な新技術に依拠するプロセス技術やプロセスイノベーションの重要性を指摘する研究が増えていった。しかし、定量分析を用いた検証はほとんど見られない。そこで本稿では、論文書誌情報を分析しこれを検証する。

3. 事例紹介と分析方法

3-1. 青色発光ダイオード開発[4][13]

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。発光ダイオードは電気消費量が劇的に低いため、青色発光ダイオードとその光を白色光に変える蛍光

² Gupta(1995)は、科学論文の累積数の増加の様子がこのようにロジスティックカーブに従うような増加をみせることを、新しいアイデアが人から人へとロコモで伝わるイノベーションの普及プロセス(Rogers, 1962)[9]に類する現象と捉えた[10]。つまり、論文の累積数の増加の様子は社会システムにおける感染モデルによって説明できるとしている。

体の組み合わせによって構成される白色電球が製品化されれば、当時、主流だった白熱電球からの置き換えが進むことが予想され、多くの企業が青色の発光ダイオードの開発研究に着手した。

ダイオードによる青色発光を実現するには、新結晶材料である GaN 結晶または ZnSe 結晶作製(以降、結晶成長とする)を可能にすることで達成されると考えられていた。これは当時の量子物理の理論を踏まえたもので、結晶成長法の探索は一から始めなければならぬ状態にあった。

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、気相もしくは液相化学反応を生じさせることにより所望の結晶を成長させるのが常識であった。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³)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)。しかし実際に結晶成長に用いることのできる結晶基板は ZnSe 結晶成長に適したガリウム砒素(GaAs)基板だけであり、GaN 結晶にはそのような結晶基板候補は存在しなかった。このため 1970~1990 年代後半までの期間、研究者の多くは 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⁴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。これに続き 1991 年日亜化学工業の研究員の中村らは、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。しかし、半導体には n 型と p 型のふたつがあり⁵、GaN 結晶も n 型と p 型が揃わなければ青色発光を実現できない。当時 GaN 結晶の n 型化は既に達成されていたが、それに比べて p 型化は困難とされていた。しかし中村らは two flow 法で製作した GaN 結晶にアニールという処理を施すことでその p 型化を達成し、青色発光を可能にした。そして 1994 年、日亜化学工業はこれらの技術を量産適用し、世界初の青色発光ダイオードの製品化を実現する。

³ 結晶を構成する原子の間隔のこと。

⁴ MOVPE 法は 1980 年前半に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 法とも称されるようになった[14]。GaN 結晶成長では、これに新しいアイデアを統合した開発が必要であった[4]。本稿では、これを新しいプロセス技術と捉えた。以後 MOVPE と記す必要がない限り MOCVD で統一する。本稿では、新しいプロセス技術とした。

⁵ 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[6][7]。

一方、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、1991年に米国 3M 社の青色レーザー⁶の試作成功の報告がみられる。当時、ZnSe の開発が主流であったこともあり、青色発光ダイオードの候補となる結晶材料は「ZnSe 結晶で決まり」[15][16]という声も聞かれたが、ZnSe 結晶を用いた青色レーザーは耐久性に乏しく、ZnSe 結晶を用いた青色発光ダイオード製品も誕生しなかった。

3-2. データ収集&分析方法

本稿では、学術分野の文献書誌データベース Scopus⁷(Elsevier B.V., オランダ国)を用い、データ収集を行う。

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、ZnSe 開発研究に関わる論文は“zinc selenide”または“ZnSe”を含むものとする⁸。

また、GaN 開発研究に関わる論文の中から、3-1.で記した製品化を可能としたプロセス技術のひとつである MOCVD 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”, “Metalorganic chemical vapor deposition”, “Metalorganic vapor phase epitaxiay”のいずれかを含むものとする。

この他、GaN 及び ZnSe 開発研究に関わる論文の時系列の累積数推移について、それぞれロジスティック式および一次方程式に近似する⁹。この近似には、日本 IBM 社 SPSS Statistics version 19 の曲線推定機能を用いる¹⁰。

⁶ ZnSe 青色レーザーは ZnSe を主成分とする青色発光層を備えた光学半導体である。レーザー発振のために発光層の片側が半反射する鏡面と全反射する鏡面を有するが、青色発光層の構造は青色発光ダイオードと共通しており、転用できると考えられていた。

⁷ 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。

⁸ 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[49]。これを踏まえ、本稿もこれに倣った。

⁹ 技術進歩の科学進歩への依存について議論するため、米国特許庁データベース (<http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/search-bool.html>) を用いた同様の分析を行う。

¹⁰ 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 $E(Yt) = \beta_0 + \beta_1 t$, ロジステ

ィック式 $E(Yt) = \left(\frac{1}{u} + \beta_0 + \beta_1 t\right)^{-1}$ 。ここで $E(Yt)$ は論文累積数を、 t は時間(西暦年)を示す。

4. 分析結果

4-1. GaN 開発研究において被引用数の高い論文

表 1 に 1970 年～1993 年の GaN 結晶開発研究に関わる論文について、被引用数の高い上位 3 位の論文を示す。被引用数が最も高いのは、天野らの MOVPE(=MOCVD)法を用いた GaN 結晶成長の論文である[17]。2 番目に被引用数の高いものは、中村らの発明した two flow 法と称される独自の MOCVD 法を用い初めて製品化可能な高品質 GaN 結晶成長の論文である[18]。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 結晶の p 型化の論文で、青色発光を可能としたものである[19]。これらは 3-1.で紹介した研究でありその重要性を踏まえると、GaN 結晶開発研究において共通して新しいプロセス技術である MOCVD が欠くことのできない研究課題であったことが指摘される。

表 1. GaN 結晶開発研究において被引用数の高い研究論文

(筆者の調査結果)

	<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.	1109
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	752
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.	564

4-2. GaN と ZnSe 開発研究の発展経路の比較

図 1 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。(a)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、ロジスティック曲線に近似されるような推移が見られる。一方、(b)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(R^2)を以下に記す。先ず(a)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(図1の近似線(1)に相当する)。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，(a)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る。一方，(b)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(図1の近似線(2)に相当する)。この結果から，(b)ZnSe 開発研究の論文累積数推移は一次方程式への近似が適していると考える。以上から，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が推測できる。なお，1998年まで ZnSe 開発研究の論文が多いのは，この開発に携わる研究者集団が自らの研究こそが主流という考えに囚われていたために中村(1991)の研究の重要性を理解できなかったものと解釈される。

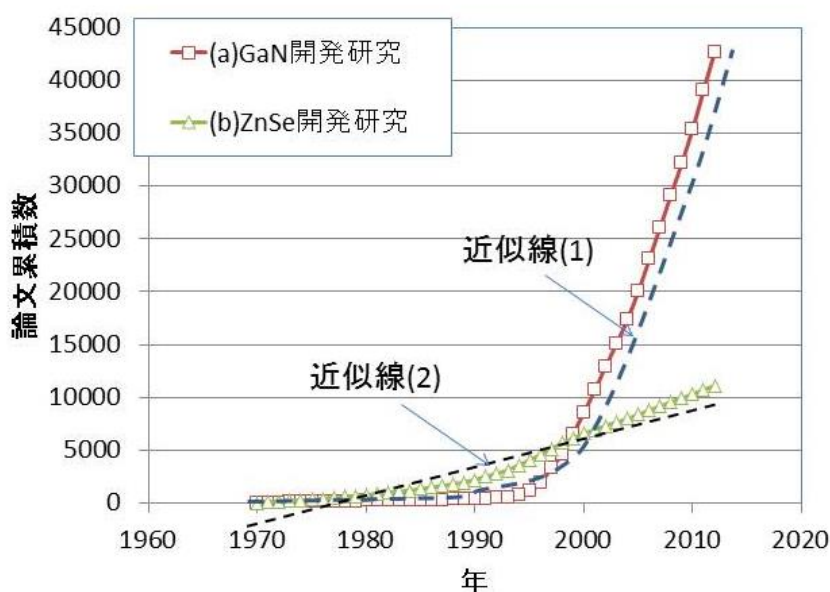


図1. GaN開発研究とZnSe開発研究に関わる論文累積数の比較

(筆者の調査結果)

4-3. GaN 開発研究の発展経路の特徴

表1の結果から、図1のGaN結晶開発研究における論文急増の因子として新しいプロセス技術であるMOCVDが考えられる。そこで、図2に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。

この図において、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。急増が見られる前(1992年以前)の両開発研究の論文群には、前述の天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)の開発したプロセス技術が含まれている。これらの研究が表1のGaN開発研究における被引用数上位3位を占めていたことを踏まえると、GaN開発研究及びMOCVD開発研究の実質的な起点であったことが推測される¹¹。

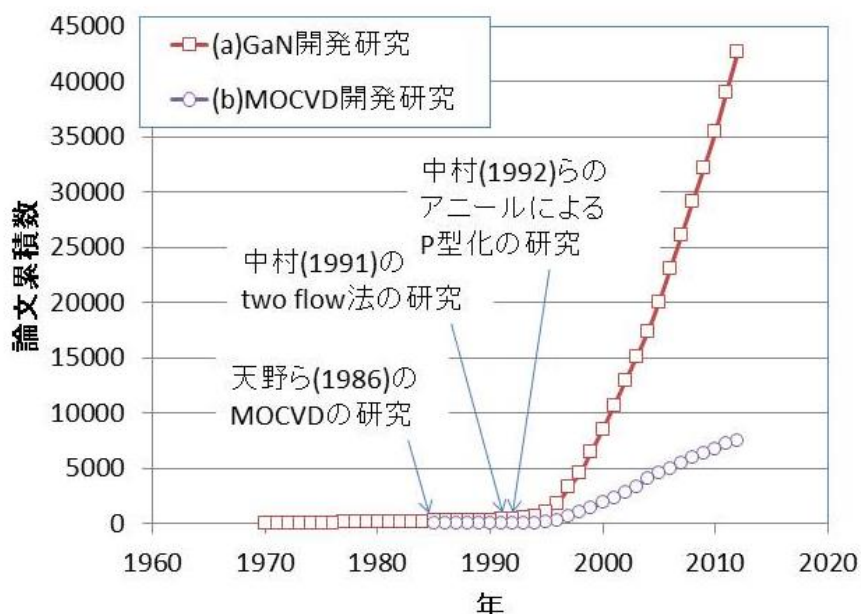


図2. GaN開発研究とMOCVD開発研究に関わる論文累積数の比較

(筆者の調査結果)

¹¹ さらに詳しくいうと、図1のGaN開発研究推移から求めたのロジスティック式の二階微分値は、1991年以降急増し、2010年以降、減少に転じている。このことから、実質的な論文累積数の急増の起点は、中村(1991)の研究であり、また2010年頃にこの分野の研究が収束し始めたことが推測される。

4-4. 科学の技術進歩への寄与

一般に書誌情報分析では、論文を知識創造の成果物、特許を知識具体化の成果物として捉える [4]。そこで、知識創造の具体化への寄与を検討するために、米国特許庁における GaN および ZnSe 開発における登録特許の累積数の推移を示す (図3参照)。特許審査は論文審査よりも時間を要するため、数年のタイムラグが生じるが、特許登録の累積数推移は、論文累積数とほぼ似た傾向を示しており、GaN 開発にはロジスティック曲線に近似されるような推移、ZnSe 開発には直線に近似されるような推移が見られる。以上から、GaN と ZnSe 開発における技術進歩は、その科学進歩に大きく依存している可能性が推測される。

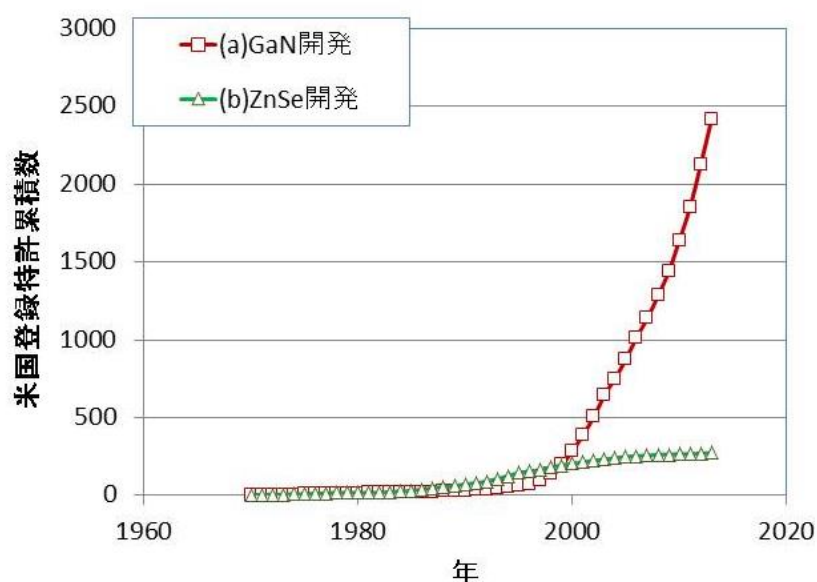


図3. GaN開発とZnSe開発に関わる米国登録特許累積数の比較

(筆者の調査結果)

5. 考察

5-1. 脱成熟化の一因子としてのプロセスイノベーション

表1では、GaN 開発研究において、同時期の論文の中で被引用数が高い順から上位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。また、図2では、これらの研究が行われていた期間(1992年以前)、GaN 開発研究及び MOCVD 開発研究の論文累積数の増加は単調かつ緩やかなものであるが、これらの研究が発表された後、両開発研究の論文累積数は急増している。さらに図2、4の比較からは、技術

進歩が科学進歩に依存していることが推測される。

以上から 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。一方、表1の ZnSe 開発研究の4位に見られる MBE というプロセス技術は、図1の ZnSe 開発研究の発展経路が単調増加していることから、MOCVD のように GaN 開発を活性化させ、さらに応用研究の段階へ導くものではなかったことが推測される。

これら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[20]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然的寄せ集めではなく、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、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。

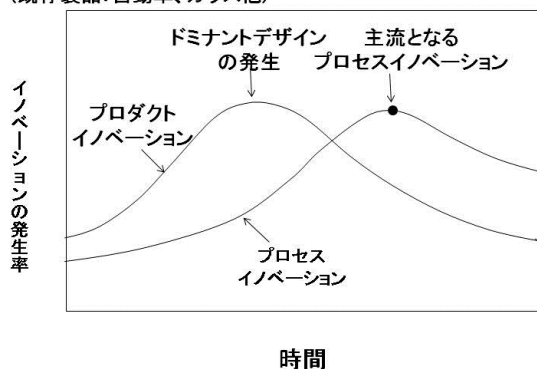
上記を参考に、青色発光ダイオード開発ではコアコンセプトがプロセス技術である可能性を想定し議論を進める。本稿の分析に見られるように GaN 開発研究においては、GaN 結晶の成長に必要な格子整合を満たす既存の結晶基板が存在しなかった。これに対し ZnSe 開発研究では格子整合を満たす GaAs 基板が存在した。だとすると、もともと格子整合を満たす結晶基板がない、つまり不確実性の高い状態であった GaN 開発では、それを実現するためには新しい構造とプロセス技術を適用するという選択しかない。そのため、新しい構造の実現に MOCVD を中心とする新しいプロセス技術開発に着手するというところに高い心理的なハードルが生じ難かったと推測される。そうだとすると、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いたがために、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。

以上を踏まえ、天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)の研究を、GaN 開発研究を活性化させるイノベーションとして捉え、Abanathy and Utterback(1978)のテクノロジーライフサイクルモデル[11]に当てはめてみる。そうすると、これらの研究は流動期(製品開発の初期)において発生したプロセスイノベーションと考えられ、それ以降の研究急増は、移行期から固定期(製品開発の中期から後期)に向けて増加するプロセス

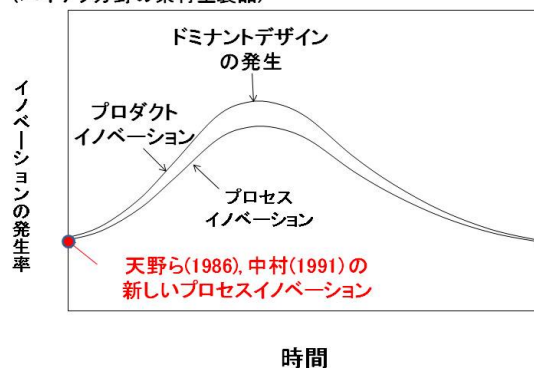
イノベーションを表しているものと解釈される。そして、このプロセスイノベーションが製品開発の脱成熟化の因子である可能性を考慮すると、図4(b)に示すようにプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションの交点に位置するものと考えられる。この点、従来の技術的イノベーションの相互関係(図4(a)参照)とは異なる。それが正しいならば、このプロセスイノベーションが発生しない場合、製品開発を成功に導くことは難しくなるものと推測する。つまり、「技術的進歩の背後には科学知識の爆発が存在し、この爆発の因子としてプロセスイノベーションがある」という推測を裏付けるような傾向が GaN 開発研究において見られ、プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションの相互作用はテクノロジーライフサイクルモデルなど一般に良く知られるイノベーションの進化の経路とは異なる特徴を持つ可能性が見出された。

Abernathy and Utterback(1978)のテクノロジーライフサイクルモデル
(既存製品:自動車、ガラス他)



(a) 従来の技術的イノベーションの相互関係性

(ハイテク分野の素材型製品)



(b) GaN開発の技術的イノベーションの相互関係性

図4. (a)従来の技術的イノベーションの相互関係性と

(b) GaN 開発の技術的イノベーションの相互関係性の比較

(筆者が[11]を参考に作成)

5-2. SECI モデルと科学進歩

学会発表や論文査読などでの科学者同士の議論による知識創出活動は、学术界という「場」での知識創造活動と捉えることができる。そして、図2, 4の結果は、知識創造が知識具体化に大きく影響することを示唆しているのではないだろうか。もしそうであるならば知識創出活動は、新規産業の発展に重要な意味を与える。そこで、GaN および ZnSe 開発研究の発展経路を、野中ら(1993)の提唱する知識創造モデル (SECI モデル) [6]に当てはめ、その背後に存在するプロセスイノベーションはどの知識変換プロセスにおいて生じたのか、その後の知識変換プロセスの循環にどのような影響を及ぼし

たのか議論する。

SECIモデルによると、新しい知識は暗黙知と形式知が相互作用しながら、1. 共同化、2. 表出化、3. 連結化、4. 内面化の知識変換プロセスを継続的に循環することによって創造される。SECIモデルとそれぞれの知識変換プロセスの定義を図5に記す。

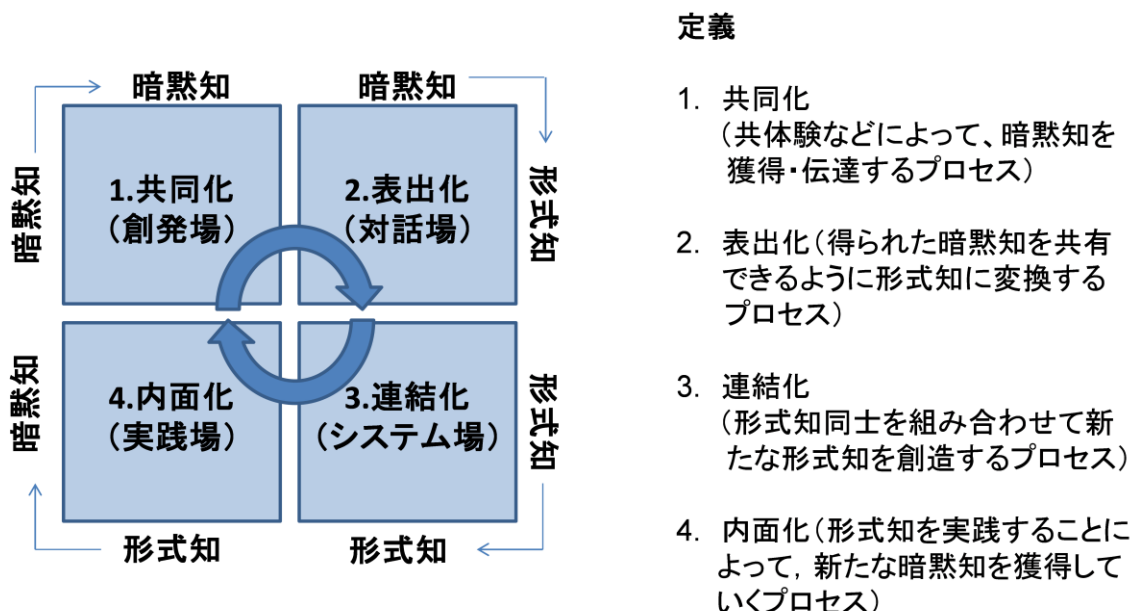


図5. SECIモデル図

(筆者が[6]を参考に作成)

ここでは特にGaN開発研究に注目し、この研究成果としての論文化が難しく、製品も実現することができなかった1993年頃までを暗黙知の創出が主体であった期間、1994年以降の論文が急増し始め製品化も実現してゆく期間を形式知の創出が主体となっていく期間と仮定し、この開発過程において生じたエポックをSECIモデルにあてはめ検証する。その様子を図6に示す。

これまでの分析から、1986年の天野ら(1986)の研究が起点となり、1990年頃までGaN開発研究とMOCVD開発研究の論文数が緩やかに増加していったことを踏まえると、この頃、GaN開発研究における暗黙知の創出活動が開始されたもの推察される。そして、中村の研究(1991)が発表されて以降、論文数は急増している。このことから、1991年の中村の研究(1991)が起点となり表出化の期間がスタートしたものと推察する。さらに、1991年より急増し始めたGaN開発研究の論文数が、1998年頃初めてZnSe開発研究の論文数を追い越したことを考慮すると、この頃から研究者集団がGaN開発研究を青色発光ダイオード開発の主流となる研究と認識したものと考えられる。このため、

1998年頃から連結化が始まったと推察する。最後に、図2で説明したように、GaN開発研究の論文数の増加率が低下し始めた2010年頃を、現在の青色発光ダイオードの開発が収束し始めた時期と捉えると(脚注10参照)、この頃から内面化が始まったものと推察される。

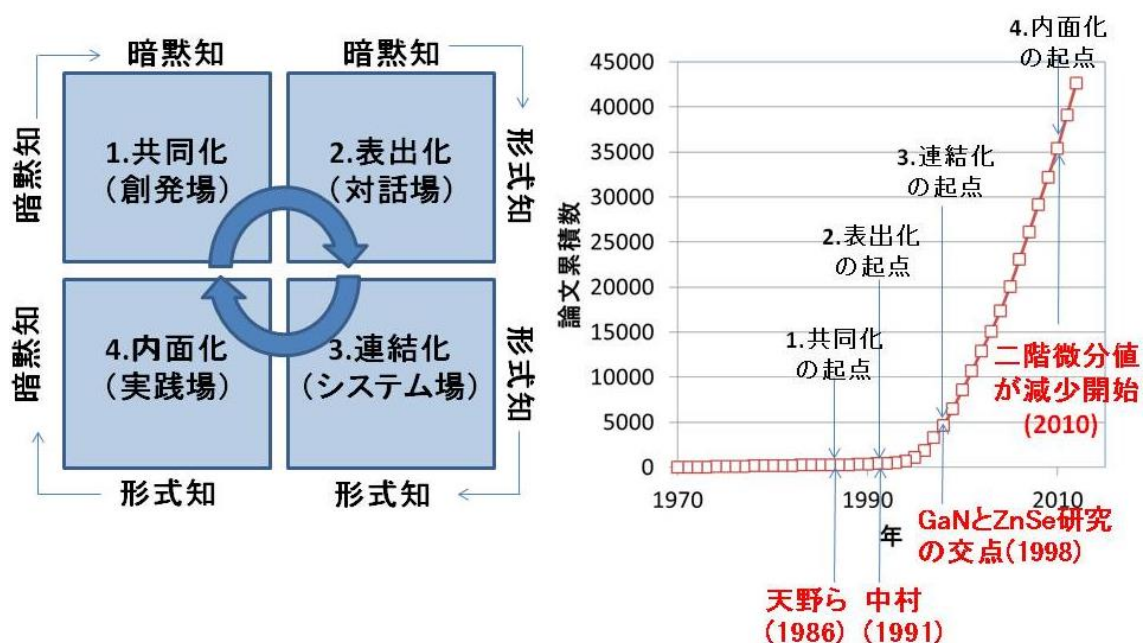


図6. GaN 開発研究推移を SECI モデルの知識創造プロセスにあてはめた図
(筆者が[6]を参考に作成)

一方、ZnSe 開発研究が、現在に至るまで緩やかに増加するのみであることを踏まえると、形式知化の難しい状態が続いたことが予想され、まだ表出化の知識変換プロセスに達していないと推察される。

以上から、GaN 開発研究におけるプロセスイノベーションは、表出化の知識変換プロセスの背後に存在したことが推測され、その後の知識変換プロセスを継続的に循環させる分岐点となった可能性があるとして解釈される¹²。

この解釈が妥当するならば、開発史でよく取り上げられる 1980 年の後半の「日

¹² 実用水準の明るい青色 LED を実現には、1993 年頃開発された InGaN を発光層に用いた、「ダブルヘテロ構造」が必須であったことが知られている。本稿の SECI 理論へのあてはめでは、これは表出化から連結化の間に成功したことになる。この成功も 1991 年の two flow 法なくしては実現しなかったことを考慮すると、two flow 法の成功の重要性が理解される。

亜化学の研究者であった中村の経営者に対する直訴（青色発光ダイオード開発の要が GaN 開発研究における新しいプロセス技術開発であり，開発に専念する環境を要求する直訴）」は，表出化へのきっかけであったと捉えることができる。なぜなら，この直訴によって，日亜化学の経営者と研究者である中村の暗黙知の共有を促され，その後の発展に影響したことが推測されるからである。

6. 結論

本稿の GaN 開発研究の論文累積数の分析においては，科学的知識の爆発(=研究の急増)が存在し，その爆発の様子は論文累積数の急激な上昇によって観察された。そして，この科学知識の爆発の因子のひとつとして新しいプロセス技術である MOCVD を中心に製品化を実現していくプロセスイノベーションが存在し，これらの基礎となる研究は，前述の科学知識の爆発の直前に出現していることがわかった。そして ZnSe 開発研究との論文累積数推移との比較から，新しいプロセス技術は，研究開発活動の停滞に対する脱成熟化の因子である可能性が指摘された。そして，GaN 開発では，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相互作用はテクノロジーライフサイクルモデルなど一般に良く知られるイノベーションの進化の経路とは異なる特徴を持つ可能性が見出された。

さらに，これらの開発研究の推移の SECI モデルへの当てはめによって，共同化から表出化における知識創造変換プロセスが，その後の知識変換プロセスの循環に影響を及ぼす可能性が指摘された。ハイテク製品分野の経営に携わる実務者は，研究初期に生じる研究開発者の抱える暗黙知を積極的に共有し，知識変換プロセスを継続的に循環させるための努力が必要と考える。

参考文献

- [1] Tushman, Michael L., and Philip Anderson. "Technological discontinuities and organizational environments," *Administrative Science Quarterly* 31, no.3 (September 1986): 439-465.
- [2] Utterback, James M. *Mastering the Dynamics of Innovation*, Boston, MA: Harvard Business School Press, 1994.(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).
- [3] Pisano, Gary P. *Development Factory: Unlocking the Potential of Process Innovation*. Boston: Harvard Business School Press, 1997.
- [4] 山口 栄一 『イノベーションの共鳴と破壊』, NTT 出版社, 2006.

- [5] 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.
- [6] 野中 郁次郎, 平田 透, 遠山 亮子 『流れを経営する —持続的イノベーション企業の動態理論』, 東洋経済新報社, 2010。
- [7] Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1962.
- [8] Price, Derek John de Solla. *Little Science, Big Science*. New York, NY: Columbia University Press, 1963.
- [9] Rogers, Everett M. *Diffusion of innovations*, NY: The Free Press of Glencoe Division of The Macmillan Co., 1962.
- [10] 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.
- [11] Abernathy William J., and James M. Utterback. "Patterns of Industrial Innovation." *Technology Review* 80, no.7(June/July 1978): 40-47.
- [12] Utterback, James M. and William. J. Abernathy. "A dynamic model of process and product design." *Omega : The International Journal of Management Science* 3, no.6(December 1975): 639-656.
- [13] Mowery, David C, Richard R. Nelson, Bhaven N. Sampat, and Arvids A. Ziedonis. *Ivory Tower and Industrial Innovation: University-Industry Technology Transfer before and after the Bayh-Dole Act*. Redwood City, CA: Stanford University Press, 2004.
- [14] 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.
- [15] Tarbox, James M. "New Blue-Green Laser From 3M Could Expand Disc Storage." *Business Metro Final*, August 28, 1991, p. 2.
- [16] Peterson, Ivars. "Pushing lasers on a chip into the blue." *Science News* 140, no.12 (September 1991): 183.
- [17] 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.

- [18] Nakamura, S. "GaN Growth Using GaN Buffer Layer." *Japanese Journal of Applied Physics Part 2 letters* 30, no.10A (October 1991): 1705-1707.
- [19] 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.
- [20] Abernathy, William J., Kim B. Clark, and Alan M. Kantrow. *Industrial renaissance : producing a competitive future for America*. New York: Basic Books, 1983. (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。)