

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

Explosion of Scientific Knowledge Caused

by Process Innovation

2014年9月

立命館大学大学院テクノロジー・マネジメント研究科  
テクノロジー・マネジメント専攻博士課程後期課程

品川 啓介

立命館大学審査博士論文

プロセスイノベーションによる科学知識の爆発

**Explosion of Scientific Knowledge Caused  
by Process Innovation**

2014年9月

September, 2014

立命館大学大学院テクノロジー・マネジメント研究科  
テクノロジー・マネジメント専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Technology Management

Graduate School of Technology Management

Ritsumeikan University

品川 啓介

Keisuke Shinagawa

研究指導教員： 玄場 公規 教授

Supervisor : Professor Kiminori Gemba



## 要旨

本稿では科学論文書誌情報をもとに、ハイテク分野の素材型製品開発の過程において生じた科学知識の爆発を分析することで、その背後にある技術的プロセスイノベーションの特徴を探る。ハイテク分野の素材型製品の具体例としては、青色発光ダイオードなどを取り上げる。

青色発光ダイオード製品開発では、青色発光を可能にする新しい半導体結晶材料の候補として、同時期にふたつの結晶材料が存在していたことが知られている。それはガリウムナイトライド(以降、GaN とする)結晶とセレン化亜鉛(以降、ZnSe とする)結晶であるが、結果的に GaN 結晶の開発が成功し、製品化を実現した。

科学論文の書誌情報をもとに、1970 年から 2012 年(データ収集時におけるデータベースの最新収録年)までの両結晶の開発推移を分析した結果、それぞれ以下のような特徴が認められた。GaN 結晶開発研究に関わる論文累積数の推移に見られたのはロジスティック曲線を描くような増加の様子であり、対して ZnSe 結晶開発研究に関わる論文に見られたのは緩やかに単調増加する様子である。さらに GaN 結晶開発研究について述べると、その曲線の前半に、科学知識の爆発と見られる論文の急増が生じている。そしてそこには GaN 結晶の製品化を可能としたプロセス技術として知られる metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD)が研究課題として含まれていた。

以上の発見から、GaN 開発研究成功の背景には「科学的知識の爆発」が存在すること、その爆発の様子は製品開発に関わる論文累積数の急激な上昇によって観察されること、さらにその爆発の因子のひとつとして科学を起点として形成される技術的プロセスイノベーションが挙げられることを指摘する。そして、このプロセスイノベーションの形成に必要なプロセス技術が、学术界における論文発表を伴うような高いレベルのものであったことを考慮し、これまで議論されてきたような企業内で生じるプロセスイノベーションの様相とは異なり、企業が戦略策定を行う際の事業環境分析において、外部環境に属する技術変化に相当する特性を有する可能性についても議論する。

本稿ではさらに、GaN 開発研究および ZnSe 開発研究に見られる傾向が、他の製品開発でも見られるかを確認するために、前者についてはアモルファスシリコン太陽電池、後者については EUV(極端紫外線)露光装置の開発の事例についても分析する。

## **Abstract**

Despite the attention technological process innovation of high tech product development draws in the natural sciences, the process innovation literature does not address the way underlying scientific theory makes possible new process innovations that lead to the development of successful new products. This paper focuses on process innovation that is derived from the latest scientific theory.

Using bibliometric data on two new compound semi conductive materials, gallium nitride(GaN), and zinc selenide(ZnSe) used in the development of blue light-emitting diodes, our study indicates that there exists the explosion of scientific knowledge behind the success of GaN development research where the explosion is observed by a rapid increase of cumulative numbers of published papers during the early region of a logistic curve. One of the factors for the explosion is attributed to technological process innovation shaped by latest scientific theory. In contrast, there is not the explosion of scientific knowledge behind ZnSe development research where cumulative numbers of published papers increases lineally and gradually. In addition, the process innovation shaped by latest scientific theory is not observed. Our findings show that the process innovation possibly determines innovation

process of product development. Then the properties of process innovation are discussed.

In order to confirm whether similar trend appears in specialties different from blue light-emitting diodes, development of amorphous silicon solar cell and extreme-ultraviolet lithography are also investigated.

## 目次

1. はじめに.....	8
2. 先行研究と本研究の意義.....	12
2-1. 科学進歩の概念に基づく論文書誌情報の分析.....	12
2-2. プロセスイノベーション.....	18
2-3. 本研究の意義.....	26
3. 事例紹介.....	28
3-1. 青色発光ダイオード開発.....	28
3-1-1. データ収集方法.....	31
3-1-2. データ分析方法.....	34
3-1-3. 分析結果.....	36
3-1-3(a). GaN 開発研究において被引用数の高い論文.....	36
3-1-3(b). GaN 開発研究において被引用数の高い論文を引用した 論文の累積数.....	40
3-1-3(c). GaN 開発研究において重要性の高いプロセス技術.....	42
3-1-3(d). GaN と ZnSe 開発研究の発展経路の比較.....	44
3-1-3(e). GaN 開発研究の発展経路の特徴.....	47
3-1-4. 考察.....	54
3-1-4(a). 脱成熟化の一因子としてのプロセスイノベーション.....	54
3-1-4(b). 論文書誌情報による分析法の社会的意義.....	61
3-1-5. 結論.....	64





謝辭 .....	107
参考文献 .....	109
付屬資料 .....	120
研究業績 .....	135

## 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),  
そしてこれらの製造装置など、ハイテク分野の素材型製品やこれに類する製品<sup>1</sup>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、  
それまでにない機能や性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<sup>2</sup>を  
製品の構成要素として用いる傾向がある。そして、選ばれた素材を製品として現実のも  
のとするためには、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、そこで生み出され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  
より生産効率を向上させることを目的とした技術的プロセスイノベーション<sup>3</sup>[1][2]とは、  
大きくその特徴が異なることが予想されることから、近年、議論の対象となる機会が増  
えている[3][4][5][6][7][8]。しかしその特徴を、製品開発の発展経路から定量的に分析し

---

<sup>1</sup> 従来に無い機能を実現するために、先端の科学や技術を拠り所に設計した素材またはこの類のものが主要構成に含まれた製品。本稿ではそれに相当するものとして、青色発光ダイオード、アモルファスシリコン(以降、a-Siとする)太陽電池などを取り上げる。

<sup>2</sup> 本稿では、青色発光ダイオードを実現させた青色を発光する GaN、太陽光によって起電する a-Si、さらに現在 EUV(極端紫外線)露光装置の製品化を目指して開発の途にある、EUV を発光する錫プラズマを素材に相当するものとして捉える。

<sup>3</sup> 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]。

考察する研究はほとんどみられない。このような背景から、本稿では科学論文の書誌情報をもとに、ハイテク分野の素材型製品開発における技術的プロセスイノベーションの特徴を、製品開発の発展経路から定量的に分析する。

その事例のひとつとして、まずは青色発光ダイオードの製品開発を取り上げる。青色発光ダイオードは、光源としての高性能化と電気消費の低減を実現したことで、現在、各種照明器具、液晶テレビのバックライト、信号機をはじめとする様々な分野で広く普及している。

青色発光ダイオードの開発では、ダイオードによる青色発光を適えるための新しい半導体結晶材料候補として、当時の量子物理理論に基づき GaN 結晶と ZnSe 結晶が挙げられていたが、結果的には GaN 結晶開発研究における新しいプロセス技術の登場によって青色発光ダイオードの製品化が成し遂げられたこと、その一方、ZnSe 結晶開発研究においては、芳しい結果が得られず製品化がなされていないことが知られている。このため、両結晶開発研究とその背後にあるプロセス技術の開発推移を分析することで、技術的プロセスイノベーションの特徴を議論できるものと推測する。

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<sup>4</sup>,

---

<sup>4</sup> 一般に自然科学領域の研究者が、専門とする分野における研究活動の活性化を定量的

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、主流となる技術的プロセスイノベーションは科学知識の爆発の前に現れることを指摘し、これを認識することの重要性についても議論する。このため製品の開発経緯を分析するにあたっては、基礎研究から量産段階の実用的な技術開発までをその対象とすることになる。

上述のような範囲で分析を進めることを前提に、先ず本稿の捉える科学と技術の関係について整理する。従来、科学は自然に属する諸所の事象を数式や法則で記述する知識の体系とされ[16]、技術は、各産業分野で目的を達成するための技能、手順、道具及び知識の体系であるとされている。この技術は、プロセス技術、製造設備、そしてそれらに関連する知識を含むとされる[17]。このように科学と技術は明確に異なる定義を持つ存在であるが、その関係性について、近年、産業技術の科学への依存度を分析する研究が見られるようになった。これは近年の製品開発において、科学における発見の関与なくしては成功が困難であったと考えられる技術の事例が増えてきたことを受けたものである。例えば、企業で行われる技術開発(技術機会)の実態やサイエンスリンケー

---

に確認する際、毎年掲載される論文数の増減から分析するアプローチが多く見られる[9][10][11][12]。ところが、増減の幅の大きさによっては、定量的な判定が難しいというケースも見られる。これを解消するため、本稿では後述する社会学で培われてきた科学進歩の概念を導入し、論文累積数の推移を科学進歩の代理変数として捉え、その分析を試みる。この手法を用いた例としてナノテクノロジー研究、メタノール燃料電池研究、水素燃料電池研究の進展の分析などがある[13][14][15]。

ジ(1件の特許に引用された科学論文の数)を分析することで、科学への依存度を検証しようとする研究などが挙げられる[18][19]。

製品開発における科学と技術のこのような強い結びつきを鑑み、本稿でも、これまで技術の体系に属するとされてきたものであっても、科学論文のタイトルや基本となる構成要素(例えば論文のキーワード)に用いられるような高いレベルの技術、つまり、科学研究の基礎的な構成要素とみなすことができる技術については科学に属するものと捉えることとする。このことにより、科学としての範囲は包括的となるが、基礎研究から応用研究に至る製品開発の推移の分析が可能となる。

さらに、そうして得た青色発光ダイオード開発の技術的プロセスイノベーションの特徴が、それ以外のハイテク分野の素材型製品もしくはそれに類する製品にも見られるのか、太陽電池、EUV露光装置の製品開発についても検証を試みる。

## 2. 先行研究と本研究の意義

### 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。そのためには科学知識の爆発や科学進歩の理解が必要となるため、先ず、本節ではこれらの概念を整理する。

一般に科学進歩を説明する際、Popper(1959)[20]や Kuhn(1962)[21]の概念がよく引用される。Popper(1959)[20]と Kuhn(1962)[21]は、科学的探求活動の行われ方を明らかにすることを課題とした点で共通しているものの、Popper が科学的探究活動の役割とそれを果たすための規範に注目したのに対し、Kuhn は実際の研究者の活動そのものに注目した点で異なっている[22]。

Popper(1959)[20]は、理論が反証を受け入れ、その解決を加えて新理論とすること、つまり新理論が常に旧理論を包含していくことで、より広い範囲の事象についての統一的な説明を可能とすることが科学的探究活動であり、その役割を果たすために守られるべき規範であるとした[22]。

これに対し、Kuhn(1962)[21]は、科学者たちが実際に行っている活動そのものを分析した。その結果、科学者たち<sup>5</sup>がある特定の共通の基準やルールに従って理論を構

---

<sup>5</sup> Fleck は、科学理論が個人ではなく、ある枠の中にある集団によって作られるもので

築し、それを解釈しているということを指摘し、その共通の基準やルールを示すものをパラダイムと呼んだ[22]。

パラダイムとは、「一般に認められた科学的業績で、一時期の間、専門家に対して問い方や答え方のモデルを与えるもの[21]」とされる。このため、ここでの科学的探求活動とは、パラダイムの示すルールに従って、科学者たちが対象とする科学がどのようなものであるかを解明する活動のことを指す。Kuhn(1962)はこれを通常科学と呼んだ[21]。

通常科学において、成立当初のパラダイムは未解決の問題をかかえており、科学者たちはパズルを解くようにこの未解決の問題を解いていく[21]。しかし、未解決の問題の中にはパラダイムにそった解決がうまくいかないものや、まったく予想外の結果になるものも出現する[21]。そのような細かな修正では解決できない変則事例の蓄積によって、科学者たちはパラダイムそのものに対して信頼を失い始める。これが「危機」状態である[21]。

このような「危機」状態を打破しようと、科学者たちが全く新たなパラダイムを模索し、それへと転換していくことを、Kuhn(1962)は革命と捉えた[21]。従って、科学革命によって生じた新たな通常科学はそれまでの通常科学とは不連続であるが、それ

---

あることを指摘した。そして彼が編み出した **Denkstil**(ある集団で共有される考え方)の概念は、後に Kuhn がパラダイムの着想を得ることになる先駆的概念となった[23]。



それぞれの通常科学は科学的探究活動のなかで生じたパラダイムの示すルールに従って連続的かつ累積的に得られた科学知識によって進歩すると捉えられる。この概念は対象となる分野の論文累積数の推移を、その分野の科学進歩の代理変数と捉える概念の基礎となっている。

例えば、Kuhn(1962)の概念を踏まえ、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と主張し、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[24]。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。

さらに 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口コミで伝わるイノベーションの普及プロセス(Rogers, 1962)[25]に類する現象と捉えた[26]。そして、このような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述べた。

社会システムにおける感染モデルについては、Casetti(1969)が、ロジスティック式で表される理由を以下のように説明している[27]。

まず、 $N$ は潜在的な技術的イノベーションの全ユーザー数、 $Y(t)$ は時間  $t$  におけ

る受容者の数, そして  $y(t)$  は時間  $t$  における技術的イノベーションの潜在的なユーザーの割合とする。そうするとこれらの関係は式(1)のように表される。

$$y(t) = \frac{Y(t)}{N} \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(1)}$$

(ここで  $N \geq Y(t) \geq 0$  であり,  $1 \geq y \geq 0$  である)

次に時間  $t$  における受容者からのメッセージの流量を  $M(t)$  で表すものとする。

この際, メッセージの流量は時間  $t$  における受容者の数に比例するものと仮定する。そうするとこれらの関係は式(2)のように表される。

$$M(t) = wY(t) \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(2)}$$

(ここで  $w$  は比例係数である)

次に, 技術的イノベーションの潜在的ユーザーの時間  $t$  における増加率について考える。ここでメッセージの効果を示す数値を  $v(y)$  で記す。そうすると式(3)のように表される。

$$\frac{dy}{dt} = v(y)M(t) \cdot \cdot \cdot \cdot \text{数式(3)}$$

ここで  $v(y)$  は受容者の割合が増加するに従い減少する(これは, 残る非受容者の, 技術的イノベーションの受容に対する抵抗が強くなることを意味している)ものと仮定する。この式(3)における  $v$  は常に正の数であるとともに, 微分可能であり, そして  $y$  が 1 に近づくにつれて  $v$  は 0 に向かうものとする。これを式(4)(5)(6)に示す。

$$\infty \geq v \geq 0 \dots \dots \dots \text{式(4)}$$

$$\frac{dv}{dy} < 0 \dots \dots \dots \text{式(5)}$$

$$\lim_{y \rightarrow 1} v(y) = 0 \dots \dots \dots \text{式(6)}$$

ここで、式(2)を式(3)に代入する。そうすると潜在的ユーザーの時間に対する増加率は式

(7)のように表すことができる。

$$\frac{dy}{dt} = wNy(t)v(y) \dots \dots \dots \text{式(7)}$$

なお、式(7)において、 $\frac{dy}{dt}$ は $y, v$ がどのような値を取ろうとも正の値をとるとともに、以

下のようなふたつの漸近線を持つ関数となる。これを式(8)(9)に示す。

$$\lim_{y \rightarrow 0} \frac{dy}{dt} = 0 \dots \dots \dots \text{式(8)}$$

$$\lim_{y \rightarrow 1} \frac{dy}{dt} = 0 \dots \dots \dots \text{式(9)}$$

つまり式(8)の特徴を式(7)に取り入れると式(10)のように表される。

$$\lim_{y \rightarrow 0} \frac{dy}{dt} = wN \left( \lim_{y \rightarrow 0} y \right) \left( \lim_{y \rightarrow 0} v \right) \dots \dots \dots \text{式(10)}$$

(ここで、 $\lim_{y \rightarrow 0} y = 0$ ,  $\lim_{y \rightarrow 0} v = \infty$ となる)

また式(9)の特徴を式(7)に取り入れると式(11)のように表される。

$$\lim_{y \rightarrow 1} \frac{dy}{dt} = wN \left( \lim_{y \rightarrow 1} y \right) \left( \lim_{y \rightarrow 1} v \right) \dots \dots \dots \text{式(11)}$$

(ここで、 $\lim_{y \rightarrow 1} v = 0$ ,  $\lim_{y \rightarrow 1} y = 1$ となる)

以上から、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

スでは、S字カーブを描くことが予想される。また、 $v(y)$ が(4)(5)(6)を満足する式は下記の式(12)で表される。

$$v(y) = a(1 - y) \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(12)}$$

ここで  $a$  は比例定数である。そして、式(12)を式(7)に代入し変数分離・部分分数への分解などを用い  $y$  について解くと得られる結果はロジスティック式になるとされる。

以上を踏まえ、Gupta(1995)は、論文累積数の急増は研究者間のコミュニケーションによって進む新知識や新概念の受容(いわゆる社会システムにおける感染)の程度に影響を受けることを指摘した[26]。つまり科学知識の爆発とは、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その発見に対する科学者の受容が増加し、その発見を踏襲する研究や論文が急増する現象であると主張した[26]のである。他方、そのような発見が生じず研究者間のコミュニケーションが低調な場合、増加率は低くリニアなものにとどまるであろうと推測している[26]。

以上のことから、論文累積数の推移は、製品開発に関する科学知識の蓄積の過程を示すものであり、そのため、製品開発の発展経路を映し出すものと考えられる。この概念をもとに、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観察する。そして、製品開発が活発化する背後には、科学的知識の爆発(=研究の急増)が存在し、その爆発の様子は製品開発に

関わる論文累積数の急激な上昇によって観察され、この科学知識の爆発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存在するという仮定のもと、分析を試みる。

## 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、経営における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これまでに数多く行われてきた。その中で、技術変化を対象とした研究としては、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]。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やサービス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を創出する方法やサービスによって形成される[28]。さらにプロセスイノベーションは、技術的プロセスイノベーションと組織的プロセスイノベーションに分類される(Edquist et al., 2001)[29]。

前者(技術的プロセスイノベーション)は技術変化を通じて創出された実質資本(有形財)、つまり製造に関わる道具や装置の導入によって生産性の改善を可能とするプロセスイノベーションであり(Ettle and Reza, 1992; Edquist et al., 2001; Meeus and Hage, 2006)[29][30][31]、企業内のプロセス技術の改善に貢献するものと認識される(Damanpour and Evan, 1984)[32]。代表的な技術的プロセスイノベーションとして、組

み立て製品においては、自動車組み立てにおける Ford 社のベルトコンベアー方式の導入[33]や、初期の白熱電球製造における製造設備の改善[34]、近年の照明製造ラインにおける自動生産装置の導入[35]や、素材型製品においては、板ガラスの製造におけるフロート工程の導入[1][2]、石油化学製品生産におけるバートン熱分解法の導入[36]、パルプ生産の際の木材洗浄における漂白剤の導入[37]などによる生産効率の改善の事例が挙げられる。

一方、後者(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により生産業務の効率化を可能とするプロセスイノベーション(Edquist et al., 2001)であり[29]、実務における経営慣行や経営方針、経営体制を包括的に含むものと認識されている(Armbruster et al., 2008)[38]。そして、この組織的イノベーションもまた企業内の社会的システムの改善を推進するものである(Edquist et al., 2001, Damanpour and Evan, 1984)[29][32]。代表的な組織的プロセスイノベーションとしては、トヨタ生産方式に見られるリーン生産方式(Armbruster et al., 2008; Damanpour and Aravind, 2012; Reichstein and Salter, 2006)[38][39][35]やジャストインタイムシステム(Mazzanti et al., 2006)[40]など生産効率改善の事例が挙げられる。

本稿では、これらの中でも、ハイテク分野の素材型製品やこれに類する製品の開発における技術的なプロセスイノベーションの特徴の分析に焦点を絞って議論を進め

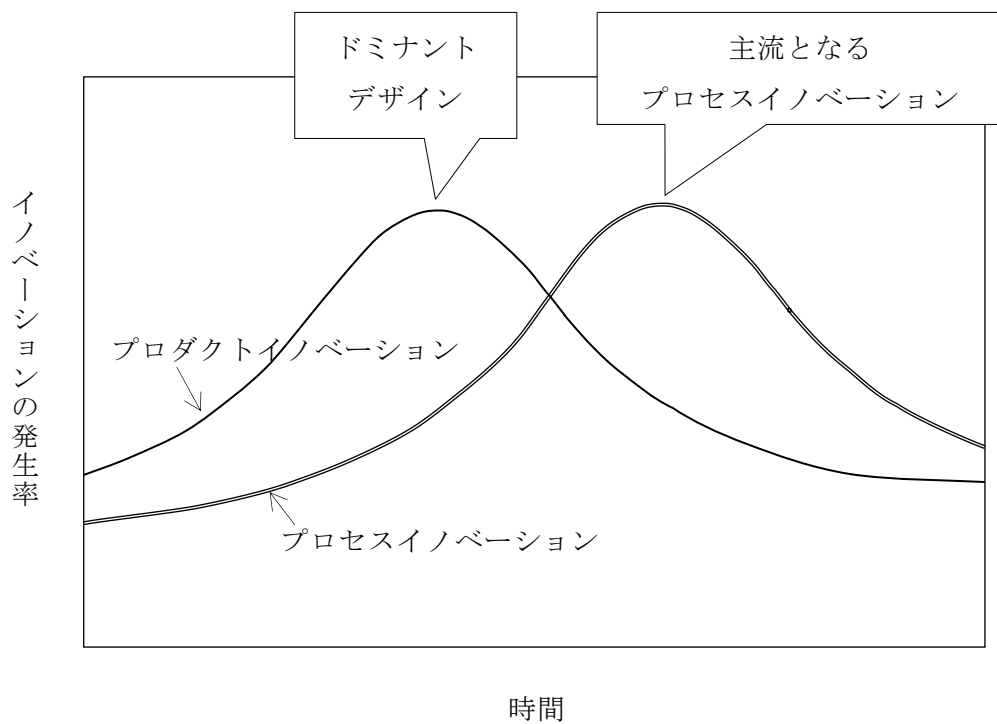
る。そのため、以後は技術的プロセスイノベーションをプロセスイノベーションと記す。

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関係性は、Abernathy and Utterback(1978)による、製品開発過程における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発生率を論じたテクノロジーライフサイクルモデル<sup>6</sup>[41]によって説明される(図 1 参照)。このモデルによれば、流動期(製品開発の初期)において、新しい製品のデザインを創出するプロダクトイノベーションの発生率が増加し、その中から製品にとってのドミナントデザイン(主流となるデザイン)が出現する。これにより製品デザインの不確実性が低下し、次第にプロダクトイノベーションの発生率は低下する。これに呼応するように、続く移行期(製品開発の中期)から固定期(製品開発の後期)にかけて製造コストの低減や歩留まりの改善を目的とするプロセスイノベーションが増加する。そして再びその過程で主流となる生産方式を確立するプロセスイノベーションが出現すると、このイノベーションの発生率もまた減少していく。以上のように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、生産量の向上など生産

---

<sup>6</sup> なお後述の Pisano(1997)[3]や本稿が扱う製品対象はハイテク分野の素材系の製品であり、Abernathy and Utterback(1978)のテクノロジーライフサイクルモデルの構築の論拠となった組み立て製品とは異なる範疇のものではあるが[41]、Utterback(1994)によれば、素材系の製品であっても主流となるプロダクトイノベーション/プロセスイノベーションはそれぞれのイノベーションの発生率のピーク期に現れるという見解は変わっていない[2]。このため、このテクノロジーライフサイクルモデルを本稿の分析の参考とした。

における目標を達成するイノベーションとして認識されてきた[42][43][44][45]。



注)著者が参考文献[41]を参考に作成

図 1. Abernathy and Utterback(1978)の提唱した  
テクノロジー・ライフサイクルモデル



このようなプロセスイノベーションの認識に対し、Pisano(1997)は、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]。ハイテク分野の素材型製品には、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が挙げられるが、その主張はPisano(1997)がこの分野の製品開発におけるプロセスイノベーションの本質を見抜き、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、製造を確立する画期的な方法が見つからなければ製品開発を遂行できないと考えていたことによる[3]ものである。そのため、それまで常識とされてきた「製品開発を成功させるには実績のあるプロセス技術を用いるべき」という考え方がハイテク製品の開発においてはあてはまらないと指摘している[3]。この証左として、複数の開発ステップを踏むバイオ系医薬品の開発では、各ステップにその都度新しいプロセス技術の導入が欠かせないことを示し、さらにこのバイオ系医薬品開発に関わる製品特許と製法特許が同時期に生じて増加し、ほぼ同時にピークを迎え減少する事象を見出して、この開発におけるプロセス技術は従来にない高度なものと位置付けている。

Pisano(1997)の主張[3]では、詳細な定量分析は成されなかったものの、この認識は新しい材料を用いるハイテク製品産業の成長にともない広く受け入れられ、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欧米、日本を問わず増えていった。

欧米においては、このような類の研究として以下のものが挙げられる。例えば、Cabral and Leiblein(2001)は、世代交代を頻繁に伴う LSI の製品開発では、その都度新しいプロセス技術の導入が欠かせないことを定量的に指摘した[4]。Reichstein and Salter(2006)は、英国の製造企業における 2885 のイノベーション事例をもとに、高度な技術を適用した製品ほど、ラディカルなイノベーション<sup>7</sup>を生起するような高度な製造技術・装置の導入が必要であることを定量的に指摘した[35]。また、Lim, et al.(2006)は、バイオ系製薬産業をエンジニアリング依拠型産業と定義し、ウィルスワクチン開発で必要とされる一連の開発ステップでは、その都度新しい技術に依拠したプロセスイノベーションが必要であることを定性的に指摘した[5]。さらに、Linton and Walsh(2008)はナノテクノロジーを駆使した磁性流体を理論研究の対象として選び、その製品成功が新しい技術に依拠したプロセスイノベーションに起因することを指摘した[8]。

また日本においては、このような類の研究として以下のものが挙げられる。例えば吉岡(1998)は、LSI 製品の中で技術革新の速いもののひとつとされる

---

<sup>7</sup> Reichstein and Salter(2006)は、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ディカルプロセスイノベーションと、企業にとっては新しいが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定義した[35]。

DRAM(Dynamic Random Access Memory; コンピューターなどに用いられる主要記憶用半導体)製品は、基本となる設計コンセプトが保たれたまま、素子の微細化とこれに伴う新素材の選択が次世代製品の性能を決定するものと仮定し、その成功は最先端のプロセス技術の導入によって初めてもたらされる可能性を指摘した[46]。そして、韓国三星電子の初期の半導体事業の成功について新しいプロセス技術の導入に関する詳細な事例分析を行い、整合性のある結果を導いている[46]。藤村(2000)は、同じく DRAM 製品では開発された先端プロセス技術の性能が製品性能を左右するものと仮定し、事例分析から先端プロセス装置の物理限界(理論上のプロセス性能の限界)、実行限界(理想の環境でプロセス装置が発揮できる性能の限界)、装置限界(実際に使用する環境でプロセス装置が発揮できる性能の限界)の組み合わせによってプロセス性能が決定される可能性を指摘している[47]。山口(2006)は、青色発光ダイオード製品開発の事例分析からこの開発には新しいプロセス技術が欠かせなかったことを指摘し、このプロセス技術が、科学者の研究を通して創出されたものであることを見出している[7]。中馬(2011)は、LSI 製品の中で技術革新の速いもののひとつとされる MPU(Micro Processor Unit; コンピューターなどに用いられる基本的な演算を行う半導体)製品について、これに用いる新素材の導入によって次世代製品の性能が決まることを指摘し、特にトランジスタ部分の高誘電体メタル絶縁膜を製造する新しいプロセス技術の重要性に着目し、聞き取り調査と研究

者間のネットワーク分析から、その開発の進捗について専門家の所見と整合性のある結果を得ている[48]。

以上の研究のなかでも、対象を青色発光ダイオード製品開発とし、この開発で生じた新しいプロセス技術が企業の事業の存続に関わるほど大きな影響を与える因子であった可能性を指摘する山口の研究[7]は、本稿の分析の指針に重要な示唆を与える。この研究の中で山口(2006)は、青色発光ダイオード開発において確立された GaN 結晶を形成する新しいプロセス技術が、科学者や技術者のもつ暗黙知(知識化していない知恵)によって創出されたものであり、且つ既存の科学のパラダイムを破壊するもの(=パラダイム破壊型イノベーション)であったことを論点としている[7]。このことから、GaN 結晶を形成する新しいプロセス技術は、製品開発を試作さえままならない段階から製品作製を可能とする段階へ移行させる重要な役割を担ったプロセスイノベーションであったことが考えられる。そうであるならば、このイノベーションはプロセスイノベーションの中でも製品開発に大きく寄与する可能性を有するとともに、主流もしくはコアとなるプロセスイノベーションであった可能性が高い。

そこで本稿では、青色発光ダイオード開発を、科学知識の爆発の因子のひとつとしてプロセスイノベーションが存在した典型的な事例と捉え、科学知識の爆発に追従して論文累積数が急増する様子を観察し、製品開発とプロセスイノベーションの発展経

路を分析することで、この製品開発におけるプロセスイノベーションの特徴を議論する。

### 2-3. 本研究の意義

先に述べたように Abernathy and Utterback(1978)のテクノロジーライフサイクルモデルにおいて、主流となるプロセスイノベーションの出現はドミナントデザインの出現以降、プロセスイノベーションの発生率がピークを迎える時となる[41]。しかし本稿の仮定である、製品開発の成功の背後には科学知識の爆発が存在し、その因子のひとつとして新しいプロセス技術によって形成されるプロセスイノベーションが挙げられるという捉え方では、主流となるプロセスイノベーションの出現が契機となって、そこからイノベーションが急増することになり、その捉え方にずれが生じることになる。これは、Abernathy and Utterback(1978)の示したテクノロジーライフサイクルモデル[41]が組み立て製品の開発を主題としたため、ドミナントデザインが生じた後にプロセスイノベーションが形成されていくモデルとなっていることに起因する。つまり、本稿の分析対象であるハイテク分野の素材型製品を対象としていないために、ドミナントデザインが生じる前に、製品開発の成否を分けるようなプロセスイノベーションが生じることを想定していない。そこで、製品開発とプロセスイノベーションの発展経路を分析することによってこのずれの理由を検証し、ハイテク分野における素材型製品が既存のテク

ノロジーライフサイクルモデルに当てはまらないことを示すことができれば、経営戦略の策定やイノベーション研究に欠かせない新しい知見をもたらすことができるものと考えられる。

### 3. 事例紹介

#### 3-1. 青色発光ダイオード開発

Mowery et al.(2004), Yamaguchi(2006), 山口(2006)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[6][7][49]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>8</sup>の製品化の目処はたっていなかった。当時、多くの研究者が青色及び緑色ダイオードの実現を目指していたのは、青、緑、赤色の光を混合することで、白色光を始めとする自由な発光色の設計が可能となるからである。発光ダイオードは白熱電球に比べ電気消費量が劇的に低いため、もし発光ダイオードを用いた白色電球が製品化されれば、広く用いられてきた白熱電球からこの新しい電球への置き換えが進むことは必定であった。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に着手した。

ダイオードによる青色や緑色発光を実現するにあたっては、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それが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、つまり、結

---

<sup>8</sup> 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[6][7]。

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<sup>9</sup>)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)。それは結合面の不一致により格子間隔の異なる結晶同士は成長させることができないからである。従って、GaN や ZnSe の結晶成長を実現するためには、理論から求めた GaN や ZnSe の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かった。当時知られていた結晶成長に適する結晶基板は ZnSe 結晶成長に用いることのできるガリウム砒素(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 1970~1980 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。

このような流れの中、少数であるがそれに囚われず GaN 結晶の実現を試みる研究者がいた。まず 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<sup>10</sup>を用い、

---

<sup>9</sup> 結晶を構成する原子の間隔のこと。

<sup>10</sup> 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。GaN 結晶成長にはこれに特化した開発が必要であった[50]。本稿では、以後特に MOVPE と記す必要がない限り MOCVD



サファイア基板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、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(=buffer layer 法)というアイデアを考案し、その実験の結果、製品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 中村らは、天野らの発見(=buffer layer 法)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、そ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。しかし、半導体には n 型と p 型のふたつがあり<sup>11</sup>、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 型化は困難で 実現の目処がたっていなかった。しかし中村らは自らが発明した 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、結果、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。このように、天野らの新しいプロセス技術の 発見が起点となり、これを踏まえた中村らのさらなる発明によって、製品化を可能とする 基礎的なプロセス技術が形成されていった。

---

で統一する。

<sup>11</sup> 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]。

GaN 結晶による青色発光ダイオードの実現への試みが 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が生産できるまでのプロセスイノベーションを確立した一方で、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<sup>12</sup>の試作成功の報告がみられる。上述の中村らによる GaN 結晶の p 型化の発表よりも一年早かったこともあり、青色発光ダイオードの候補となる結晶材料は当時「ZnSe 結晶で決まり」[51][52][53][54]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、その後 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。

### 3-1-1. 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>13</sup>(Elsevier B.V., オランダ国)を用い、データ収集を行う。データベース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と会議録中の論文)のうち、GaN 結晶開発研究及び ZnSe

---

<sup>12</sup> 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。

<sup>13</sup> 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。

結晶開発研究に関わる論文を抽出し（１）～（７）に記すデータを収集する(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とは、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<sup>14</sup>。

(1) 青色発光ダイオードの製品化に成功した GaN 開発研究について、青色発光ダイオードの量産が始まる 1993 年以前、つまり 1970 年から 1993 年までの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) (1) で求めた 1970 年～1993 年の GaN 結晶開発研究に関わる論文の中で、被引用数の高かった上位 3 位の論文について、それぞれを引用した論文の累積数をグラフにプロットする。

(3) 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、

---

<sup>14</sup> 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。

ZnSe 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。

(4) 1970 年から 2012 年までの GaN と ZnSe 開発研究に関わる論文について、それぞれの掲載累積数をグラフにプロットする。

(5) (4) で求めた 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(以後これらをまとめて MOCVD 開発研究と称する)論文を抽出し、掲載累積数をグラフにプロットする。なお抽出する論文は、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”, “Metalorganic chemical vapor deposition”, “Metalorganic vapor phase epitaxiay” のいずれかを含むものとする。

(6) (4), (5) 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。

- (7) (4) で求めた GaN 結晶開発研究の論文と、その中から著者が企業に所属する論文を抽出したものの累積数をグラフにプロットする。後者について、(1) ～ (6) の分析から基礎研究及び応用研究が行われたと推測される期間における論文の著者の所属企業名をリスト化する。

### 3-1-2. データ分析方法

前節 3-1-1. (1) ～ (7) で収集したデータを以下のように分析する。

- (1) データ収集方法(3-1-1.)の (1) で収集した 10 件の論文に、3-1.に記された天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)の MOCVD 法に関わる研究(MOCVD 開発研究)が含まれるかを検証する。
- (2) データ収集方法(3-1-1.)の (2) で得た被引用数上位 3 位の論文を引用したの累積数推移の増加の様子を観察し、増加の傾向を分析する。
- (3) データ収集方法(3-1-1.)の (3) で収集したキーワードについて、GaN 開発研究に 3-1.で記した GaN 開発の成功に寄与したひとつの技術である MOCVD という

語がリストに含まれるか、また ZnSe 開発研究には MOCVD に相当するような製品化を可能とするプロセス技術が含まれるかを検証する。上位 10 位までに、このようなプロセス技術が見られない場合は、上位 50 位までにプロセス技術を示す語がないか調査する。

(4) データ収集方法(3-1-1.)の (4) で得た 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。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<sup>15</sup>。

(5) データ収集方法(3-1-1.)の (6) に従いグラフにプロットされた GaN 開発研究論文の累積数推移と MOCVD 開発研究論文の累積数推移を比較する。つまり、MOCVD 開発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

---

<sup>15</sup> 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。

数の急増が生じているかを検証する。

(6) (4) の GaN 開発研究論文累積数の近似から得たロジスティック式を二階微分する。そして論文累積数の急増が始まる年を検証する。

(7) データ収集方法(3-1-1.)の (7) に従いプロットされた GaN 開発研究論文の累積数推移と企業に所属する著者を含む研究論文の累積数推移を比較する。両者の増加の様子が類似しているか、つまり同じ時期に「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を検証する。

(8) データ収集方法(3-1-1.)の (7) に従いリスト化された企業について、企業数、業種に見られる特徴を分析する。

### 3-1-3. 分析結果

#### 3-1-3(a). 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 10 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 buffer layer 法による GaN 結晶成長の論文で、学术界で初めて GaN 結晶形成に成功したことを記すものである [55]。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 MOCVD 法を用いた GaN 結晶成長の論文である。この論文は、天野らの MOCVD を用いた buffer layer 法の研究を踏まえ、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を記すものである [56]。そして、3 番目に被引用数の高いものは中村らによる GaN 結晶の p 型化の論文で、これは、two flow 法で作製した GaN 結晶にアニールという特殊な加熱を施すことで実用に耐える p 型化を実現し、その結果、青色発光を可能としたことを記すものである [57]。3-1.に記した一連の研究の重要性を踏まえると、GaN 結晶開発研究においてこれらのプロセス技術の開発が欠くことのできない研究課題であったことが推測される。



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

注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

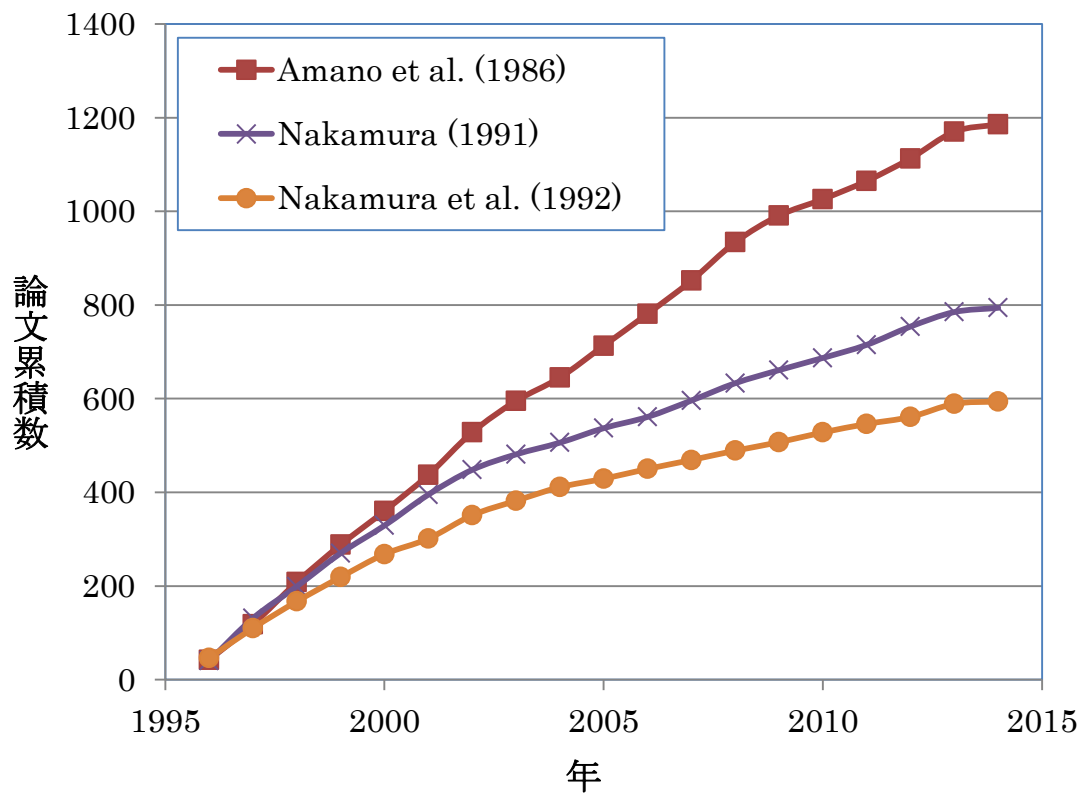
	Authors / Title / Source	No. of citation
1	Amano, H., N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda	1109
	“Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer.”	
	<i>Applied Physics Letters</i> 48 no. 5 (February 1986): 353-355	
2	Nakamura, S.	752
	“GaN Growth Using GaN Buffer Layer.”	
	<i>Japanese Journal of Applied Physics Part 2 letters</i> 30, no. 10A (October 1991): 1705-1707.	
3	Nakamura, S., N. Iwasa, M. Senoh, and T. Mukai	564
	“Hole compensation mechanism of P-type GaN films.”	
	<i>Japanese Journal of Applied Physics Part 1 Regular papers &amp; short notes</i> 31, no. 5A (May 1992): 1258-1266.	
4	Nakamura, S., T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa	527
	“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, no.2B(February 1992): 139-142.	
5	Yeh, C.-Y., Z.W. Lu, S. Froyen, and A. Zunger	490
	“Zinc-blendewurtzite polytypism in semiconductors.”	
	<i>Physical Review B</i> 46, no.10(October 1992): 10086-10097.	

6	Monemar, B.	457
	“Fundamental energy gap of gan from photoluminescence excitation spectra.”	
	<i>Physical Review B</i> 10 , no.1(1July 1974,): 676-681	
7	Akasaki, I., H.Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu, and N. Sawaki	456
	“Effects of ain buffer layer on crystallographic structure and on electrical and optical properties of GaN and Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> N (0 < x ≤ 0.4) films grown on sapphire substrate by MOVPE.”	
	<i>Journal of Crystal Growth</i> 98, no.1-2( November 1989): 209-219.	
8	Ogino,T, Masaharu A.	392
	“Mechanism of Yellow Luminescence in GaN.”	
	<i>Japanese journal of applied physics</i> 19, no.12(December 1980): 2395-2405.	
9	Nakamura, S., T. Mukai, and M. Senoh	379
	“High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes.”	
	<i>Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters and Express Letters</i> 30, no.12(December 1991): 1998-2001.	
10	Khan, M., A. Bhattarai,J.N. Kuznia, and D.T. Olson	373
	“High electron mobility transistor based on a GaN-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N heterojunction Asif.”	
	<i>Applied Physics Letters</i> 63, no.9(August 1993): 1214-1215	

### 3-1-3(b). GaN 開発研究において被引用数の高い論文を引用した論文の累積数

表 1 の 1970 年～1993 年の GaN 結晶開発研究に関わる論文の中で、被引用数が高い上位 3 件の論文、つまり、1 位の天野ら(1986)の MOCVD 法を用いた buffer layer 法による GaN 結晶成長の研究[55], 2 位の中村ら(1991)の発明した two flow 法と称される MOCVD 法を用いた GaN 結晶成長の研究[56], 3 位の中村ら(1992)による GaN 結晶の p 型化の研究[57]について、それぞれを引用した論文の累積数推移を図 2 に示す。

この図において、天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)の順に論文累積数が多く、いずれも 1996 年に発生し以降急増している。ここで、天野ら(1986)の研究の被引用数が急増するまでに比較的長い年を経た理由としては、彼らの研究が基礎研究であったためと推測される。つまり、中村(1991)、中村ら(1992)の実用に近い品質の GaN 結晶成長の成功、さらにその p 型化の成功など、より実用段階に近い研究成果の報告によって、研究者のコミュニティにおいて GaN 結晶の有用性が認識され、ここで天野ら(1986)の発見に始まる中村(1991)、中村ら(1992)による新知識の受容が急激に進んだものと考えられる。そして、いずれの論文も MOCVD に深くかかわる研究であることから、MOCVD は GaN 開発研究を活性化させる(=科学知識の爆発を引き起こす)一因子であることが推測される。



注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

図 2. GaN 開発研究において被引用数の高い論文を引用した論文の累積数

### 3-1-3(c). GaN 開発研究において重要性の高いプロセス技術

表 2 に 1970 年から 2012 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 9 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)<sup>16</sup>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, 3-1.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[50]。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 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。

---

<sup>16</sup> MBE とは高真空中において原料を蒸発させ, これを基板表面に照射し, 衝突するエネルギーで励起させ結晶を成長させる方法。

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

注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

(a) GaN 開発研究

	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	metalorganic chemical vapor deposition	4,126
9	molecular beam epitaxy	3,829
10	substrates	3,828

(b) ZnSe 開発研究

	キーワード	論文数
1	semiconducting zinc compounds	2,413
2	photoluminescence	1,308
3	zinc selenide	1,242
4	molecular beam epitaxy	946
5	zinc compounds	829
6	semiconducting gallium arsenide	745
7	semiconductor quantum wells	694
8	semiconductor quantum dots	657
9	excitons	612
10	ZnSe	573

### 3-1-3(d). GaN と ZnSe 開発研究の発展経路の比較

図 3 に 1970 年から 2012 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。この図において、(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、時間の経過に比例した単調増加を示す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、(a)GaN 開発研究に関わる論文の累積数推移については、ロジスティック式への近似を、(b)ZnSe 開発研究に関わる論文の累積数推移後者については一次方程式への近似を行う。なお、(a)GaN 開発研究に関わる論文の累積数推移については、ロジスティック式への近似が妥当であることの確認のため一次方程式への近似も行う。

この近似によって得られたロジスティック式、及び一次方程式とそれぞれの決定係数( $R^2$ )を以下に記す。(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 3 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。そして一次方程式への近似の結果は、

$$E(Yt) = -1700263.186 + 858.101t$$

であり決定係数( $R^2$ )は 0.672 であった。図の推移とこの結果から、(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られる。

一方、(b)ZnSe 論文累積数の一次方程式への近似は、

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

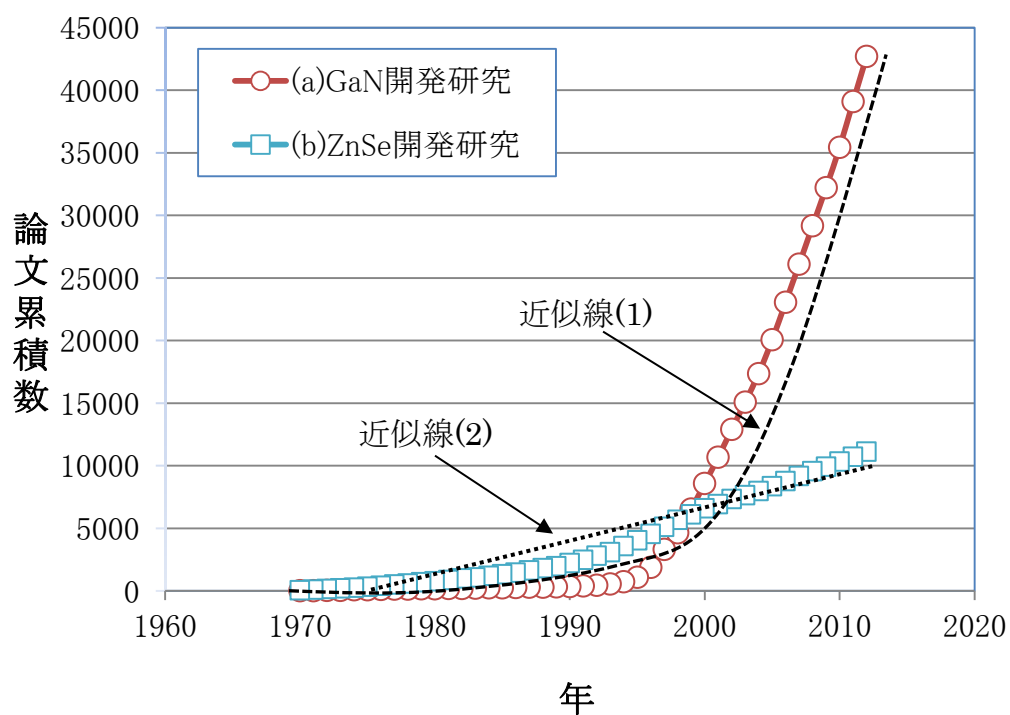
であり決定係数( $R^2$ )は 0.930 であった(図 3 の近似線(2)に相当する)。図の推移とこの結果から、(b)ZnSe 開発研究の論文累積数推移は一次方程式への近似が適していると考えられる。

ここで前述した Price(1963), Gupta(1995)らの主張[24][26]を踏まえて、図 3 に見られる発展経路の様子を観察すると、GaN 開発研究においては、研究者集団における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このような発見が存在しなかったことが推測できる。これに加え、科学理論が学术界で蓄積された科学知識によって形成されること[21]を考慮すると、図 3 に見られる発展経路の様子は社会的感染を引き起こす科学の発見が存在した場合とそうでなかった場合の学术界の発展経路を反映している可能性が高い。

GaN 開発研究におけるこの感染源を、3-1-3(a),(b),(c)の結果を踏まえて推測すると、天野ら(1986)の発明した MOCVD を用いた buffer layer 法、中村(1991)の発明



した two flow 法と呼ばれる MOCVD, そしてそれによって作られた GaN 結晶の p 型化を可能にする, 中村ら(1992)の発明したアニール法が挙げられる。このようにこれらの研究にはいずれも MOCVD が深く関わっている。



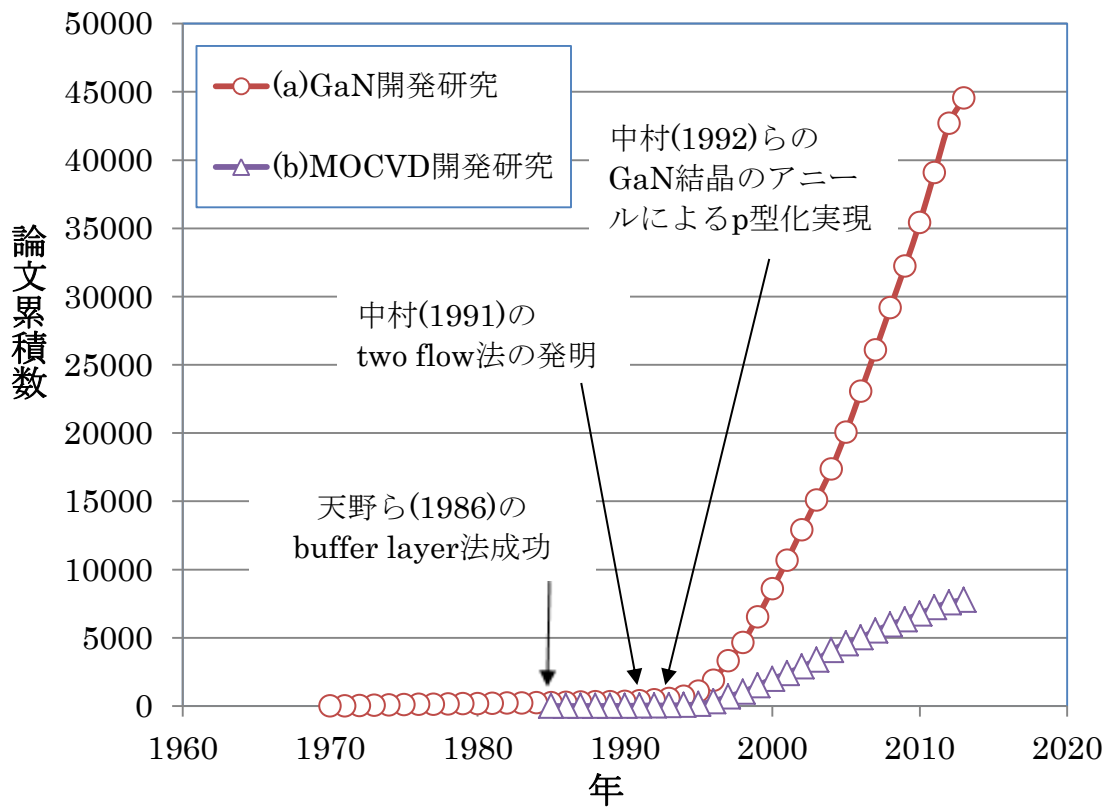
注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

図 3. (a) GaN 開発研究論文と (b) ZnSe 開発研究論文の累積数の比較

### 3-1-3(e). GaN 開発研究の発展経路の特徴

本節では図 3 の結果において、GaN 開発研究の論文累積数の急増を生じさせた因子を、天野ら(1986)による MOCVD を用いた buffer layer 法、この技術をもとに中村(1991)が開発した two flow 法、そして中村ら(1992)が two flow 法を用いて製作した GaN 結晶を p 型化するアニール法などの新しいプロセス技術と仮定する。これらの研究では共通して MOCVD が深く関わっていることから、図 4 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、急増を見せている。なお、GaN 結晶開発研究の論文累積数のうち MOCVD 開発研究の論文累積数は約 17.4%を占める。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。これらの研究は、3-1.で記したように、青色発光ダイオードの製品化を初めて可能としたものである。そして表 1 にあるように、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、これらが 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。つまり、1992 年以前に GaN 開発研究を可能とする基礎研究である MOCVD 開発研究が出現し、それ以降、多くの研究者がこれらを踏襲して応用研究を進め、急増したものと推測する。



注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

図 4. GaN 開発研究の論文累積数と MOCVD 開発研究の論文累積数

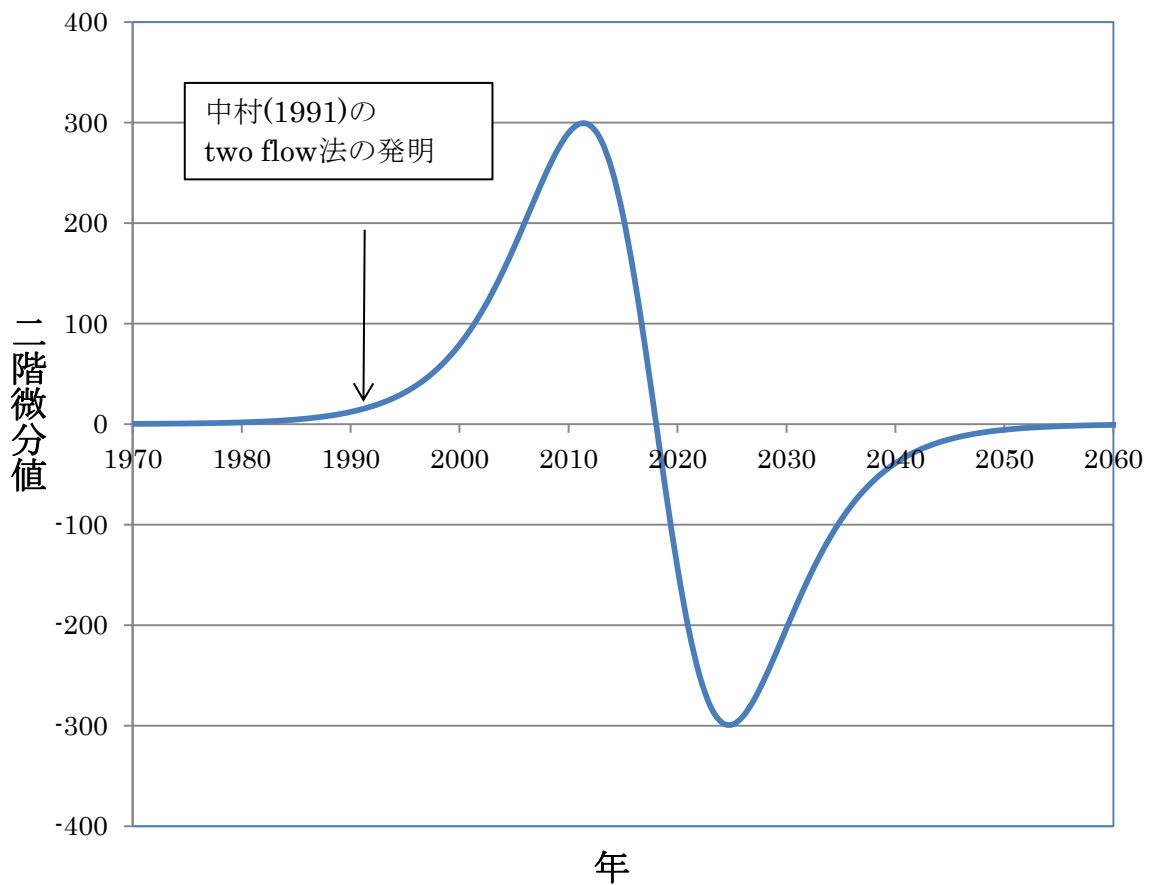
次に、1992年以前に生じた天野ら(1986)、中村(1991)、そして中村ら(1992)の研究のいずれかが、GaN 開発研究を急増させた因子であると仮定し、これらの研究うちの研究の論文発表後に GaN 開発研究の論文累積数の急増が始まったかを分析する。

図 3 の GaN 開発研究に関わる論文推移に近似したロジスティック式を二階微分<sup>17</sup>、その結果を図 5 に示す。この図において、1970 年からの推移を辿り、二階微分値が最初にほぼ 0 から立ち上がった時期(=急増し始めた時期)を、論文数が急増を始めた時期と解釈すると、1990 年頃がその時期に相当すると考えられる。天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)の研究のうちこの時期に最も近いのは、1991 年に生じた中村の新しい MOCVD 法、つまり two flow 法の研究である。このことから、この研究が GaN 開発研究を活性化した実質的な起点であると推測される。

---

<sup>17</sup> SPSS で近似される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。

$$\frac{dE^2(Yt)}{dt^2} = \frac{(-\beta_0\beta_1^t(\ln\beta_1)^2)\left(\frac{1}{u} - (\beta_0\beta_1^t)\right)}{\left(\frac{1}{u} + (\beta_0\beta_1^t)\right)^3}$$



注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

図 5. GaN 開発研究について SPSS 曲線推定で得られた  
ロジスティック式を二階微分した結果

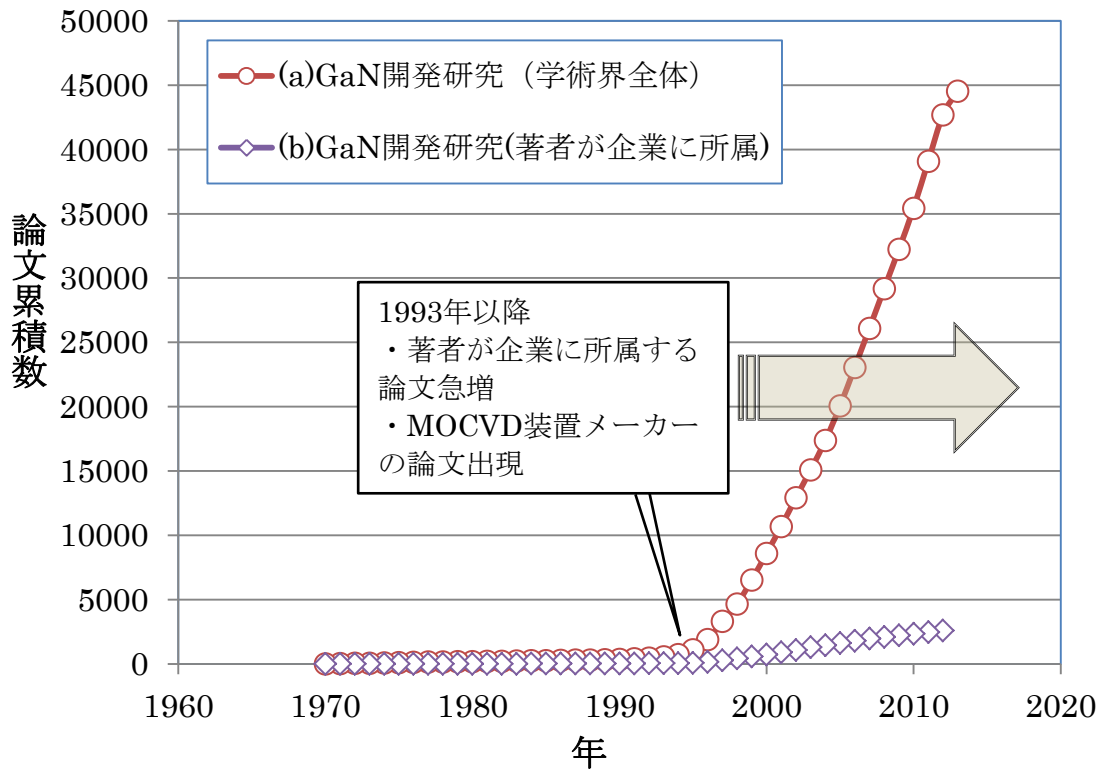
中村ら(1992)による GaN 結晶の p 型化が発表された翌年以降に応用研究が発生したものと仮定し、図 6 に 1970 年から 2012 年までの GaN 開発研究の論文の累積数と、その中から著者が企業に所属する論文の累積数を抽出した結果を示す。両論文累積数は、いずれも 1992 年まで緩やかに増加し、その後急増を見せている。その推移の中で、企業に所属する著者を含む論文の件数は 48 件から 2530 件へと増加する。GaN 開発研究論文に占める割合を調べると、1970 年～1992 年(論文の増加が緩やかな期間)の間では約 8.7%、論文数急増以降の 1993 年～2012 年(論文数が急増する期間)の間では 6.0%であり、この数値からは企業だけでなく公的研究機関の論文も急増している様子が見取れる。

次に、表 3 に 1970 年～1992 年と 1993 年～2012 年における GaN 開発研究について、論文の著者が所属する企業数と企業名を挙げ、その両期間の特徴について検証する。この表からわかるように、1970 年～1992 年に 7 社であった企業数は、1993 年～2012 年には 14 社へと増加している。そして注目すべき特徴としては、1993 年～2012 年に、GaN 結晶製造用 MOCVD 装置開発・販売において世界で約 50%のシェアを持つ AIXTRON 社<sup>18</sup>が出現していることが挙げられる。1970 年～1992 年のリストにある企業はいずれも GaN 結晶の開発・製造を目指す企業であった。つまり MOCVD 装置開発・

---

<sup>18</sup>[http://www.aixtron.com/fileadmin/documents/ir\\_presentation/2012/120726\\_H1-2012\\_IR-Master-Presentation.pdf](http://www.aixtron.com/fileadmin/documents/ir_presentation/2012/120726_H1-2012_IR-Master-Presentation.pdf) 参照。

販売企業が現れたということは、1993年以降、GaN 開発研究が量産にかかわる段階、つまり応用研究の段階に入ったことを示唆するものと考えられる。



注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

図 6. GaN 開発研究の論文累積数と著者が企業に所属する GaN 開発研究の論文累積数

表 3. 1970 年～1992 年，及び 1993 年～2012 年における，  
企業所属の著者による GaN 開発研究論文数

注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

1970年～1992年

著者の所属企業	論文数
Alcatel-Lucent Bell Labs	16
Nichia Chemical Industries, Ltd.	15
Nippon Telegraph & Telephone	11
Toyota Central Research Development Laboratory Inc.	3
Thales	2
Panasonic Mobile Communications Co., Ltd.	2
Toyoda Gosei Co., Ltd.	1

1993年～2012年

著者の所属企業	論文数
Samsung Group	332
Nippon Telegraph & Telephone	280
Nichia Chemical Industries, Ltd.	259
AIXTRON AG	230
Alcatel-Lucent Bell Labs	174
SVT Associates, Inc.	174
OSRAM Opto Semiconductors	165
Thales	154
Panasonic Mobile Communications Co., Ltd.	151
Toshiba Corporation	144
Fujitsu	129
LG	127
EMCORE Corporation - Somerset	126
Toyota Central Research Development Laboratory Inc	120



### 3-1-4. 考察

#### 3-1-4(a).脱成熟化の一因子としてのプロセスイノベーション

Pisano(1997)による「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」とする主張[3]以降、ハイテク分野の素材型製品開発におけるプロセスイノベーションの重要性が議論されるようになった[4][5][6][7][8]。本稿の冒頭に述べたように、近年指摘されてきた製品開発における科学と技術の強い結びつきを鑑み、これまで技術の体系に属するとされてきたものであっても、科学論文のタイトルや構成要素(例えば論文のキーワード)に用いられるような高いレベルの技術は科学に属するという捉え方に立脚し、Ga<sub>N</sub> 開発研究と ZnSe 開発研究の発展経路を分析した結果から得られたプロセスイノベーションの特徴について考察する。

GaN 開発研究では、表 1 に見られるように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。

天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)の研究が行われていた期間(1992 年以前)、Ga<sub>N</sub> 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、つまり 1993 年以降、両開発研究の論文累積数は急増している。そして図 6 に示すように、1993 年以降の Ga<sub>N</sub> 開発研究の論文累積

数の急増域では、企業に所属する著者による論文の増加も見られ、その中には MOCVD 装置メーカーが出現している。これは MOCVD というプロセス技術において、社会的感  
染を引き起こす源となる科学の発見があり、それを境に両開発研究が応用研究の段階に  
入ったことを示唆する。

MOCVD の進歩は、3-1.で詳しく述べたように、それまでの MOCVD に新しい  
発見を加えることを重ねて成り立っている。MOCVD が GaN 開発の要となる基本的な  
プロセス技術(p 型化や n 型化)に寄与していることから、この進歩は GaN 開発に関する  
様々なプロセス技術の発展にも波及することが推測される。図 5 が、中村(1991)の研究  
によって GaN 開発研究が活性化したことを示すものならば、つまりその中村(1991)の  
研究こそが GaN 開発研究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。従ってこの研究は、GaN 開発研究の発展経路を製品成功に導く因子のひとつであ  
ったことが考えられる。

次に、表 2. ZnSe 開発研究の 4 位に見られる MBE というプロセス技術につい  
て、その位置付けを検証する。このプロセス技術は表の上位にあり、基礎研究に欠かせ  
ない技術であると考えられる。しかし、図 3 に見られる ZnSe 開発研究の発展経路は単  
調増加していることから、GaN 開発研究における天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら  
(1992)の研究のように開発研究を活性化させ、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。よって ZnSe 開発研究において MBE というプロセス技術は、研究の発展経路を変化させるような技術ではなかったと考えられる。

本研究の核心は、科学知識の爆発を書誌情報から読み解き、さらにその爆発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ことを指摘することである。その方法として、顕著な例である GaN 開発研究をとりあげ、その書誌情報から得たデータを分析することで成功への発展経路が MOCVD などのプロセスイノベーションによって導かれたという糸口を得ようと試みてきた。

ここでさらに、その発展経路の様子を、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の傾向から導き出した脱成熟化という概念[58]を用いて考察を進める。もともと Abanathy et al.(1983)の議論は、自動車などの組立製品を対象としており、そのためコアコンセプトは製品デザインに関わるものであるが[58]、これは本研究における MOCVD などの新しいプロセス技術にあてはめることができるものと仮定する。

Abanathy et al.(1983)の脱成熟化の概念の提唱は、アメリカにおける日本製品の市場拡大によってコスト面のみで製品の優位性が判断されるようになった自動車やカラーテレビなどの工業製品産業の停滞が背景となっている[58]。Abanathy et al.(1983)はこの状態を産業の成熟と呼び、これを打破する「脱成熟化」の概念について議論し、

アメリカにおける産業再生の可能性について述べた。つまり、成熟化は避けられないとする「当然の帰結説<sup>19</sup>」や、「一時的な経済的逆境説<sup>20</sup>」に対し、「脱成熟化」の理論的フレームワークの構築を試みたのである。

その手法として、Abernathy et al.(1983)は、工業製品はテクノロジーの偶然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ることを前提にして、成熟化を説明しようとしている[58]。そして、この集合体の中にコアコンセプトが存在し、これが製品の機能に対してことさら強い影響力を持っていること、それにより製品や工程の標準化が確立されるため、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ことを指摘した。

以上のことからわかるように、確立された工業製品において、その根幹であるコアコンセプトの変更は非常に負担を伴う出来事である。よって、大きな変化を避けるような意識が働き、それが発展経路に影響を及ぼす。

このように Abernathy et al.(1983)の言う成熟とは、初期の不確実性が低減され、コアコンセプトが確立した段階に入ったことから、それを維持することに主眼が置かれるようになった状態のことであり、それゆえに発展経路に自ら制約をもたらすもので

---

<sup>19</sup> 生物学的アナロジーに触発され、工業製品のたどる一生をライフサイクルとして捉える考え方。産業や巨大企業の衰退は生物におけるそれと同様、何者にも避けられない自然の摂理であると結論づける説[58]。

<sup>20</sup> 競争の力学が生み出した過剰設備投資によって生じた停滞に対し、事態の好転を時間の経過にゆだねるという説[58]。

ある[58]。つまり、成熟化が始まると開発者はその時点で享受している利益を放棄しようとは思わず、むしろ製品技術を根本から変えないよう意識する。やがて改善程度では成功の機会は得られないということが明らかになってようやく、新たなコアコンセプトの導入を考え始めると結論付けた。そしてこの議論から、競争はあらゆる産業の発展の原動力であるというルールに新たな解釈を見出している。つまり、テクノロジーの不確実性こそが競争の原動力だということである。

ここで、Abernathy et al.(1983)が製品デザインの中にコアコンセプトが存在するものと捉えたように[58]、プロセス技術の中にコアコンセプトに相当する技術があるものと仮定し議論を進める。

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。Abernathy et al.(1983)の概念[58]が、これらの開発研究にも当てはまるものと仮定して考えてみる。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プロセス技術を適用するという選択しかない。そのため、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ことに高い心理的なハードルが生じ難かったと推測される。その結果、これを中心としたブレークスルーが次々がと生

み出され、開発を成功に導くのに適した発展経路が形成されることとなった。つまり、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推測する。

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、既に存在した実験室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推測される。

また上述の Abernathy et al.(1983)の脱成熟化の視点からの議論に限らず、技術的な側面からイノベーションを分析する研究においても、主流となるプロダクトイノベーションの登場によって起こる技術変化が、製品開発の発展経路を成功に導くことを示唆するものは見られるが[1][59]、本稿の扱うような新しいプロセスイノベーションの存在を指摘するもの見られない。この点で本稿の発見は新規性を有する。

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、Abernathy and Utterback(1978)のテクノロジーライフサイクルモデル[44]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推測される。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7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。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。以上から、GaN 開発研究の中で生まれた天野ら(1986)、中村(1991)、中村ら(1992)のプロセスイノベーションに見られる特徴は、製品開発が実現した後の生産性改善に必要とされる従来のイノベーションとは異なり、試作さえままならない段階から製品作製を可能とする段階へと移行させるプロセスイノベーションであったと考えられる。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あることが見出された。なお、本稿の分析では、図4に示すように GaN 開発研究とプロセスイノベーションの発展経路を導くことに成功したが、プロダクトイノベーションの発展経路を明示できない。これは科学論文が本来、製品研究と製法研究を明確に類別して記す性質のものではなく、このため書誌情報によって製品開発のみの研究を抽出することが難しいことによる。これを可能とするには、製品と製法が明確に分類される文献、例えば特許明細書などを分析の

対象とする必要がある。この点が今後の課題として残る。

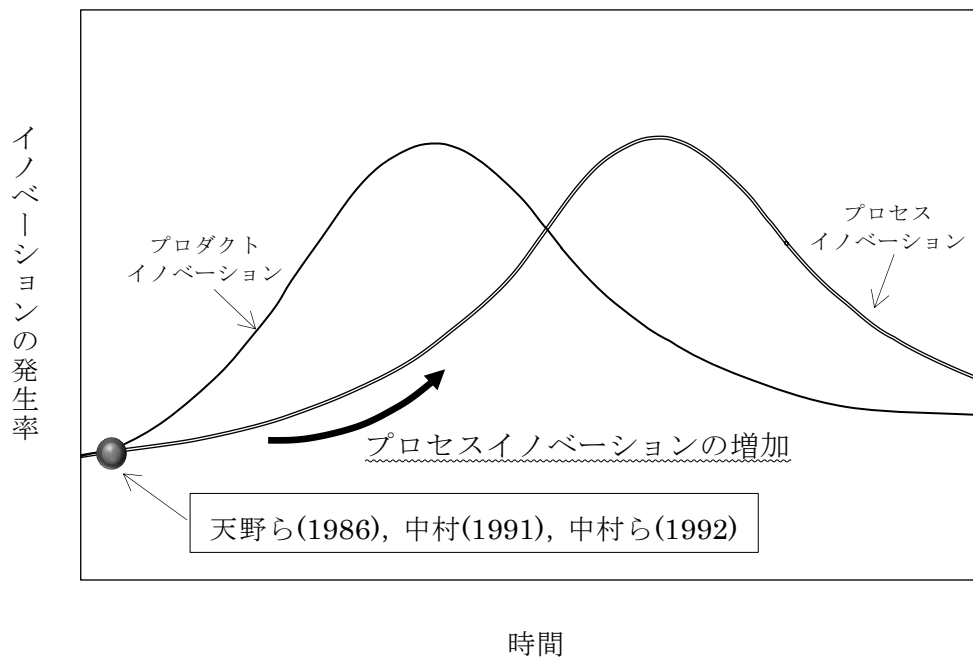


図 7. 本稿の提案するテクノロジーライフサイクルモデル

### 3-1-4(b).論文書誌情報による分析法の社会的意義

次に、本稿の分析法の社会的意義について考察する。GaN 開発研究に関わる論文数推移への近似によって求めたロジスティック式を二階微分し得た結果において、二階微分値が最初にほぼ 0 から立ち上がった時期(=急増し始めた時期)が、中村(1991)の



two flow 法の成功が発表された年に近く、この研究が実質的な GaN 開発研究を活性化  
した起点であった可能性を考慮すると、この分析法には以下のような可能性が見出され  
る。

それは、この分析方法に適した改良を行うことで、ハイテク分野における新し  
い素材型製品の事業を策定する経営陣にとって意義あるものとするのが可能ではない  
かということ、つまり、先に述べた製品開発における脱成熟化の因子の発生を見出す定  
量的なインジケータになるのではないかということである。

この分析法の有用性は、青色発光ダイオード開発を例にすると、1991 年に中村  
の two flow 法の成功が発表されたにも関わらず、図 3 の結果において ZnSe 開発研究の  
論文累積数が 2000 年頃まで GaN 開発研究のそれよりも大幅に上回っていることから  
うかがうことができる。

山口(2006)は関係者へのインタビューを通し当時の大手企業がとっていた研究  
方針やこれに関わる動向について、以下のように述べている。まず、青色発光ダイオー  
ドの開発に積極的で、GaN 開発チームと ZnSe 開発チームを擁していた NTT<sup>21</sup>は、1991  
年に 3M 社が ZnSe を用いた青色レーザーの開発に成功したことを受け、研究者に翌年  
の 3 月末までに青色レーザーを実現するよう指示した。そこで研究者は、青色発光実現

---

<sup>21</sup> 本稿の分析法によると、1970 年～2000 年までの ZnSe 開発研究に関する論文のうち、  
著者が NTT に所属するものが 52 件あり、この件数は世界で 3 位であった。

の条件の整っている ZnSe 開発を優先させ、翌年には青色レーザーの発振に成功している。当時、選択と集中という全社的な要求があったものの、関連研究部門が ZnSe による青色レーザーの発振に成功したならば、GaN も存続できる措置がとられることになっていた。しかし実際は、ZnSe を用いた青色レーザー発振の成功をもって GaN 開発から撤退し ZnSe 開発に資源を集中することとなる。関係者によれば、GaN 開発も続けるべきだという主張ができるような状況ではなかったという。

また、ソニー<sup>22</sup>は 1980 年代から ZnSe 開発に取り組み、その研究に非常に期待をかけていた。そして GaN 開発に有望性が見え始めてからも、ZnSe 開発に 300 人以上の研究者を重点投入し 1997 年に撤退を余儀なくされるまで開発を強化していったという経緯が報告されている。

このほか、ZnSe 開発に早くから関わっていたことが知られている NEC もまた、当初より多額かつ継続的な投資をしていたため、GaN 開発に投資配分することができず、1996 年によりやく GaN 開発に踏み切った時点でも、ZnSe 開発の方が人材、予算の投入が大きかったという。

以上のような当時の企業の動向からは、脱成熟化を可能にする因子となる可能性を秘めた中村(1991)の研究の発表があったにも関わらず、それまで ZnSe 開発に資源

---

<sup>22</sup> 本稿の分析法によると、1970 年～2000 年までの ZnSe 開発研究に関する論文のうち、著者が SONY に所属するものが 69 件あり、この件数は世界で 1 位であった。

を集中してきた経緯に囚われ、脱成熟化の機会を見送っていた可能性が推測される。つまり、先端の情報を網羅しつつ開発方針の策定を行っていた経営陣にとっても、脱成熟化の可能性を秘める因子となるような研究を認識することは難しかったように見受けられる。そうであるならば、本稿の分析法に実務の運用に向けた改善<sup>23</sup>を行うことによって、このような脱成熟化の因子の発生の認識を促す定量的なインジケータとすることでその対策となるのではないか。その運用の範囲は GaN 開発研究のような素材型製品の開発過程に限定されるが、この点、社会的な意義を見出すことができるものとする。

### 3-1-5. 結論

現在 GaN 結晶を用いた青色発光ダイオードは製品化されているが、ZnSe 結晶を用いた青色発光ダイオードは製品化されていない。本稿ではこの事実を踏まえて、青色発光ダイオードの開発成功の前に GaN 結晶の開発研究が活性化した可能性が高いという推測のもと、分析を行った。

この推測に呼応するように、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

---

<sup>23</sup> この分析法に対し、少なくとも以下のような改善が必要と考える。現段階では、論文急増の起点となる研究の認識は、これが出現してからある程度の時間を経なければ難しい。そのため、これを補う論文急増の数学的な解釈の精緻化、そしてこれを理解する実務者による修正が必要となると考える。

上昇によって観察された。さらに、この科学知識の爆発の因子のひとつとして MOCVD を中心に製品化を可能とする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前に出現していることがわかった。

一方、ZnSe 開発研究においては MBE というプロセス技術は存在したが、科学知識の爆発は見られなかった。このことから MBE は、開発研究の活性化の因子となるプロセス技術ではなかったことが推測される。

以上から、ハイテク分野の素材系製品開発における研究や経営戦略の策定に際しては、開発研究の活性化の因子となるプロセスイノベーションの形成過程を注意して観察する必要があると考える。

### 3-2. アモルファスシリコン太陽電池の開発

3-1.の青色発光ダイオード開発において、GaN 開発研究には研究者集団に社会的感染を引き起こすプロセスイノベーションが存在した可能性を指摘し、それがその後の学术界の発展経路に与える影響について述べた。本節では、新たな事例としてアモルファスシリコン開発(以後、a-Si とする)を挙げ、それが GaN 開発研究と共通する特徴を有するかについて検証する。

a-Si 太陽電池は 1980 年頃から、電卓を始めとする様々な機器の電力供給用途

に採用されてきた。Deng et al.(2003)[60], 寺川(2009)[61], 桑野(2011)ら[62]の記した

a-Si 太陽電池開発の歴史をもとに, この製品の開発過程を以下に整理する。

a-Si の本格的な開発は 1960 年代頃始まった。1960 年代, 単結晶シリコンを用いた半導体の研究開発が急増する中で, 非晶質である a-Si に注目する研究者が少数ながら現れ始めた。結晶系に比べ製造が容易であるため, 低コストでの半導体デバイス製造が可能になること, さらには, 非晶質であるがゆえの未知なる特性をこの半導体に期待したためである。

a-Si 開発の鍵となる最初の発見は 1969 年に遡る。この年 Chittik らは, 高周波グロー放電<sup>24</sup>で原料のシラン(SiH<sub>4</sub>)を分解して a-Si を形成し, 電気的・光学特性を報告した。この方法で作製した a-Si はそれまでの蒸着法やスパッタ法で作製したものに比較して, 光に対する感度が極めて高いという特性を有していた。さらにこの a-Si を実用可能な電子デバイスの形態に近づけるブレイクスルーが 1975 年に生じる。この年, Spear らは, シランのグロー放電において, p 型と n 型の電気特性を示す a-Si が形成できることを見出した。当時, 非晶質の物質で p 型や n 型を形成できるとは考えられていなかったため, Spear らの発見は常識を打ち破るものであった。しかも彼らによる発見は, p

---

<sup>24</sup> グロー放電法が開発されるまで, a-Si は蒸着法やスパッタ法によって形成されていたが, この形成法で作製される a-Si は多数の欠陥を持ち, p 型や n 型にするのが困難であった。それに対して, グロー放電法で形成された a-Si は欠陥が少ないため, p 型や n 型にすることが可能となった[60][62]。

型と n 型の接合をもつ電子デバイスが作成可能であることを意味しており、それは太陽電池への応用が可能であることを示していた。しかし、この時点で彼らはこのことに気付かず、さらに学術的な a-Si の物性解析へと邁進していった。

Spear らの発見を太陽電池への応用に生かすことに成功したのは、Spear らの論文が発表された翌年の 1976 年、RCA の Carlson らによってであった。Carlson らはこれまでにない特徴をもつ薄膜太陽電池として a-Si 太陽電池の完成を発表した。その後、p 型層と n 型層の間に真性 a-Si を挿入するなどして得られる電力の効率が高められ<sup>25</sup>、1980 年にはプラズマ CVD 法<sup>26</sup>で形成された a-Si 太陽電池の工業化が始まった。

### 3-2-1. データ収集方法

本章でも、学術分野の文献書誌データベース Scopus(3-1-1. データ収集法, 脚注 13 参照)を用い、データ収集を行う(2013 年 12 月 22 日に収集)。

なおここで、a-Si 開発研究に関わる論文は、論文タイトル、アブストラクト、

---

<sup>25</sup> 後の研究で判明することであるが、a-Si の p 層と n 層では不純物添加によって膜の性質が悪くなる。光が入射しても電荷(キャリア)の発生が少ない。その一方で不純物を添加しない真性 a-Si(i 層)は p 層や n 層に比べ格段に膜質が良く、入射光に対して多くの電荷(キャリア)を発生する。Carlson の発明した p-i-n 構造は i 層で多くのキャリアを発生させ、そのキャリアを p 層、n 層へ引き込む構造であるため、効率が飛躍的に上がった[60][62]。

<sup>26</sup> グロー放電の研究が、同じ放電現象を扱うプラズマ CVD に発展した。現在、この分野ではプラズマ CVD は、CVD と略されることが多い。このことから本章では、グロー放電、プラズマ CVD、CVD が同義であるものと捉える。

キーワードに“amorphous silicon”または“a-Si”を含むものとする。

- (1) a-Si 太陽電池についてはこの太陽電池開発の量産が始まる 1980 年以前, つまり 1960 年から 1979 年までの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) 1960 年から 2012 年(本データ収集時点での最新収録年)までの a-Si 開発研究に関わる論文のキーワードについて, 使用頻度上位 10 位までのリストを作成する。
- (3) 1960 年から 2012 年までの a-Si 開発研究に関わる論文について, 毎年の累積数をグラフにプロットする。
- (4) (3) で求めた a-Si 開発研究に関わる論文の中から, 3-2.に記した製品化を可能とするプロセス技術であるグロー放電法の開発研究に関わる論文を抽出し毎年の累積数を抽出する。なおこの論文を抽出する際には, a-Si 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 “plasma enhanced chemical vapor deposition”, “chemical vapor deposition”, “glow discharge”,

のいずれかを含むものとする。

(5) (3)(4)で求めた a-Si 開発研究とプロセス技術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。

(6) (3)で求めた a-Si 開発研究の論文と、その中から著者が企業に所属する論文を抽出したものの累積数をグラフにプロットする。後者について(1)～(5)の分析から基礎研究及び応用研究が行われたと推測される期間における論文の著者の所属企業名をリスト化する。

### 3-2-2. データ分析方法

3-2-1.(1)～(6)で収集したデータを以下のように分析する。

(1) データ収集方法(3-2-1.)の(1)で収集した10件の論文に、3-2.に記された Chittik et al.(1969), Spear et al.(1975), Carlson et al.(1976)のグロー放電開発に関する研究(以降、グロー放電開発研究とする)が含まれるかを検証する。

(2) データ収集方法(3-2-1.)の(2)でリスト化した a-Si 開発研究のキーワードの中



にグロー放電法を意味する語がリストに含まれるかを検証する。

(3) データ収集方法(3-2-1.)の (3) で得た a-Si 開発研究に関わる論文の時系列の累積数推移について、ロジスティック式に近似する。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(3-1-2.データ分析法, 脚注 15 参照)。

(4) データ収集方法(3-2-1.)の (5) に従いグラフにプロットされた a-Si 開発研究論文の累積数推移とグロー放電開発研究に関わる論文の累積数推移を比較する。つまり、グロー放電開発研究論文の累積数推移について、その増加の様子が a-Si 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を検証する。

(5) (3) の a-Si 開発研究の論文累積数の近似から得たロジスティック式を二階微分する。そして論文累積数の急増が始まる年を検証する。

(6) データ収集方法(3-2-1.)の (6) に従いプロットされた a-Si 開発研究論文の累積

数推移と企業に所属する著者を含む研究論文の累積数推移を比較する。両者の増加の様子が類似しているか、つまり同じ時期に「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を検証する。

- (7) データ収集方法(3-2-1.)の(6)に従いリスト化された企業について、企業数、業種に見られる特徴を分析する。

### 3-2-3. 分析結果

#### 3-2-3(a). a-Si 開発研究において被引用数の高い論文

表 4 に 1960 年～1979 年の a-Si 開発研究に関わる論文について、被引用数の高い上位 10 位の論文を示す。被引用数の最も高いものは、Carlson らがグロー放電法を用い a-Si 太陽電池の作製に学术界で初めて成功したことを記す論文である[63]。2 番目に被引用数の高いものは、Spear らのグロー放電法を用いて作製した a-Si に、同じくグロー放電法を用いて p 型化、n 型化を成功させた論文である[64]。3 番目に被引用数の高いものは非晶質の Si 系材料の光学特性を記した Philipp の論文[65]である。3-2. に記した Chittek らが学术界で初めて高周波グロー放電を用い a-Si を作成した論文は、太陽電池利用を考えていなかったためか 3 位内には見られなかったが、それでも 10 位

に見られた[66]。これらから、a-Si 作製においてグロー放電に関わる技術の開発は欠くことのできない研究課題であったことが推測される。以上の結果は、3-2.に記した Deng et al.(2003), 寺川(2009), 桑野(2011)らが紹介した a-Si 太陽電池開発に関わる歴史において、この製品開発にとって重要な発明と指摘されたものに整合するものとする。

表 4. a-Si 開発研究において被引用数の高い研究論文(1960-1979 年)

注)著者が 2013 年 12 月に調査した結果

1	Carlson, D. E., C. R.Wronski	238
	“Amorphous silicon solar cell.”	
	<i>Applied Physics Letters</i> 28 , no.11(June 1976.): 671-673.	
2	Spear, W.E., P.G.Le Comber	225
	“Substitutional doping of amorphous silicon.”	
	<i>Solid State Communications</i> 17, no.9(November 1975):1193-1196.	
3	Philipp, Herbert. R.	192
	“Optical properties of non-crystalline Si, SiO, SiOx and SiO2.”	
	<i>Journal of Physics and Chemistry of Solids</i> 32, no.8(1971): 1935-1945.	
4	Mott, N. F., A. Davis, and R. A. Street	168
	“States in the gap and recombination in amorphous semiconductors.”	
	<i>Philosophical Magazine</i> 32, no.5(November 1975): 961-996.	
5	Philipp, Herbert. R.	373
	“Optical and bonding model for non-crystalline SiOx and SiOxNy materials.”	
	<i>Journal of Non-Crystalline Solids</i> 8, no.10(June 1972): 627–632.	

6	Polk, D. E.	114
	“Structural model for amorphous silicon and germanium.”	
	<i>Journal of Non-Crystalline Solids</i> 5, no.5(May 1971): 365-376	
7	Herd, S.R., P. Chaudhari, and M. H. Brodsky	110
	“Metal contact induced crystallization in films of amorphous silicon and germanium.”	
	<i>Journal of Non-Crystalline Solids</i> 7, no.4(May 1972): 309-327.	
8	Comber, P. G. Le, and W. E. Spear	105
	“Electronic Transport in Amorphous Silicon Films.”	
	<i>Physical Review Letters</i> 25, no.8(August 1970): 509-511	
9	Brodsky, M. H., R. S. Title	89
	“Electron Spin Resonance in Amorphous Silicon, Germanium, and Silicon Carbide.”	
	<i>Physical Review Letters</i> 23, no.11(1969):581-585.	
10	Chittick, R. C., J. H. Alexander, and H. F. Sterling	78
	“The Preparation and Properties of Amorphous Silicon.”	
	<i>Journal of The Electrochemical Society</i> 116, no.1(1969): 77-81	

### 3-2-3(b). a-Si 開発研究において重要性の高いプロセス技術

表 5 に 1960 年から 2012 年までの a-Si 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。6, 7 位に見られる Chemical vapour deposition(CVD)と Plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD)は、広義では Chittick ら, Spear らそして Carlson らが a-Si の開発のために発明したグロー放電法と同じ範疇のプロセス技術を示す用語として用いられるものである。そしてこれら以外は全て製品コンセプトやデザインに関わるものであった。このことから、a-Si 開発研究において重要なプロセス技術としてグロー放電法が存在していたことが推測される。

表 5. a-Si 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

注)著者が 2013 年 8 月に調査した結果

	キーワード	論文数
1	amorphous silicon	15,062
2	silicon	4,450
3	amorphous films	3,745
4	thin films	3,494
5	hydrogenation	2,291
6	chemical vapor deposition	2,115
7	plasma enhanced chemical vapor deposition	2,054
8	thin film transistors	2,004
9	annealing	1,950
10	solar cells	1,856

### 3-2-3(c). a-Si 開発研究の発展経路

図 8 は前章の GaN 開発研究の分析法と同様の手法でプロットした a-Si 太陽電池の開発研究に関わる論文の累積数を示したものである。この図の a-Si 開発研究に関わる論文の累積数は 1967 年から 1976 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。この推移の特徴を定量的に検証するために、ロジスティック式への近似を行う。

この近似によって得たロジスティック式と決定係数( $R^2$ )を以下に記す。a-Si 開発研究の論文累積数のロジスティック式への近似を行ったところ、その結果は、

$$E(Yt) = \left( \frac{1}{30000} + (1.689E + 185) \times 0.804^t \right)^{-1}$$

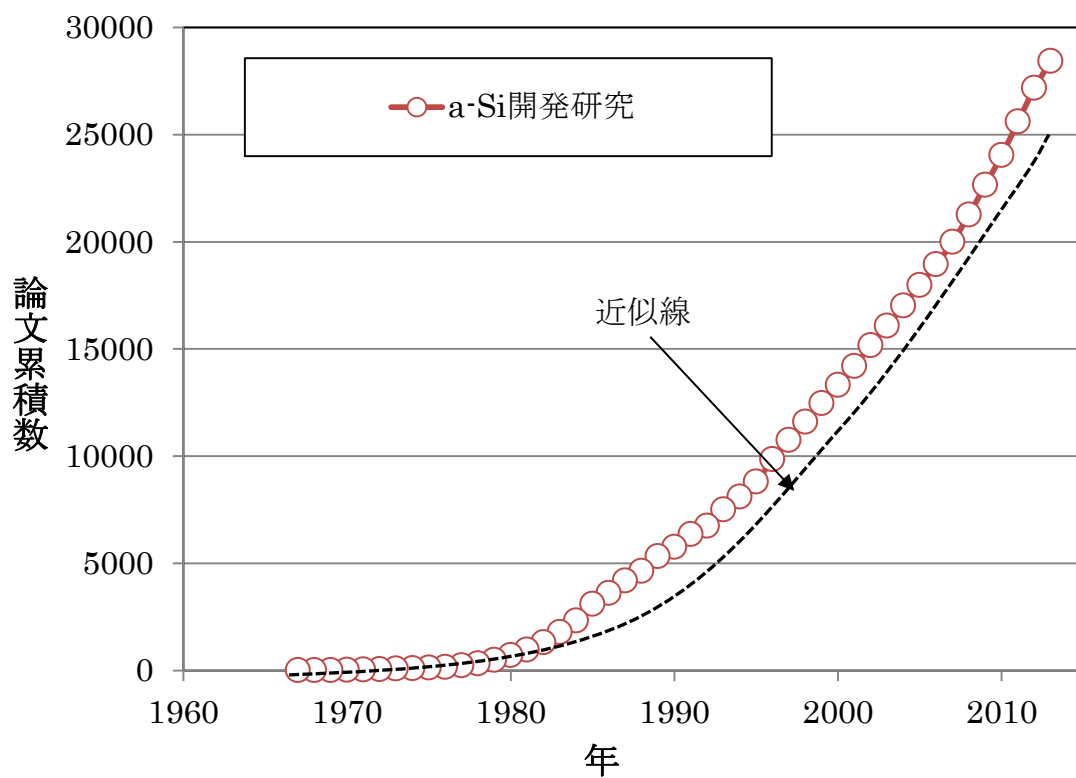
であり、決定係数( $R^2$ )は 0.921 であった(図 8 の近似線に相当する)。ここで、 $E(Yt)$ は論文累積数を、 $t$ は時間(西暦年)を示す。図の推移とこの結果から、a-Si 開発研究の論文累積数推移はロジスティック式への近似が適していると考えられる。

ここで前述した Price, Gupta らの主張[24][26]を踏まえて、図 8 に見られる発展経路の様子を観察すると、a-Si 開発研究において、研究者集団における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が推測できる。

a-Si 開発研究におけるこの感染源は、前節 3-2-3(a), (b)の結果を踏まえると、被引用数の高い Chittick et al.(1969), Spear et al.(1975), Carlson et al.(1976)の論文



に含まれているグロー放電法に関わる開発研究であることが推測できる。



注)著者が 2013 年 12 月に調査した結果

図 8. a-Si 開発研究の論文の累積数の比較

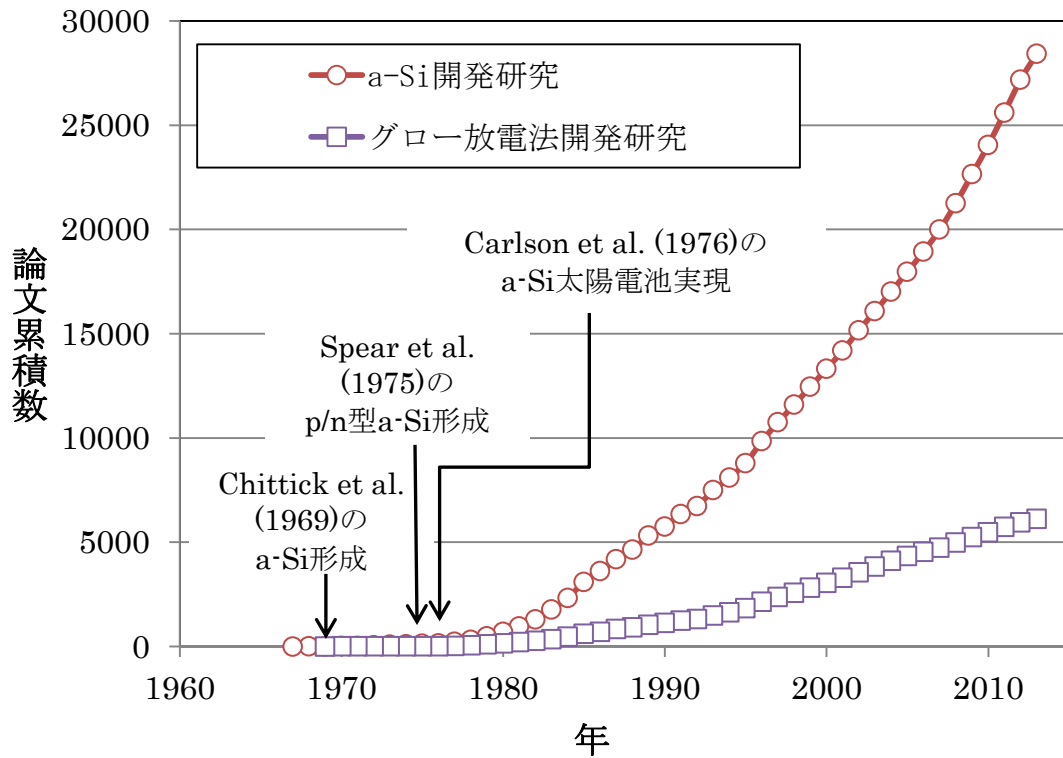
### 3-2-3(d). a-Si 開発研究の発展経路の特徴

本節では図 8 の結果に見られる a-Si 開発研究の論文累積数の急増を生じさせた因子を、Chittick et al.(1969)によるグロー放電法の用いての a-Si の形成、Spear et al.(1975)によるグロー放電法を用いての p 型と n 型の a-Si を形成、Carlson et al.(1976)によるグロー放電法を用いての a-Si 太陽電池作製の成功と仮定する。これらの研究では共通してグロー放電法が深く関わっていることから、図 9 に a-Si 開発研究の論文の累積数とそこに含まれるグロー放電法に関わる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 1976 年まで緩やかに増加し、その後、急増を見せている。なお、a-Si 開発研究の論文累積数のうちグロー放電開発研究の論文累積数は約 21.9%を占める。

急増が見られる前(1976 年以前)の両開発研究の論文群には、前述の Chittick et al.(1969)、Spear et al.(1975)、Carlson et al.(1976)の研究が含まれている。これらの研究は、3-2.で記したように、a-Si 太陽電池を初めて実現したものである。そして表 4 にあるように、a-Si 開発研究における被引用数上位を占めていたことを踏まえると、これらが a-Si 開発研究及びグロー放電開発研究の実質的な起点であったことが推測される。つまり、1976 年以前に a-Si 開発研究を可能とする基礎研究であるグロー放電法開発研究が出現し、それ以降、多くの研究者がこれらを踏襲して応用研究を進めた結果、急増

したものと考えられる。

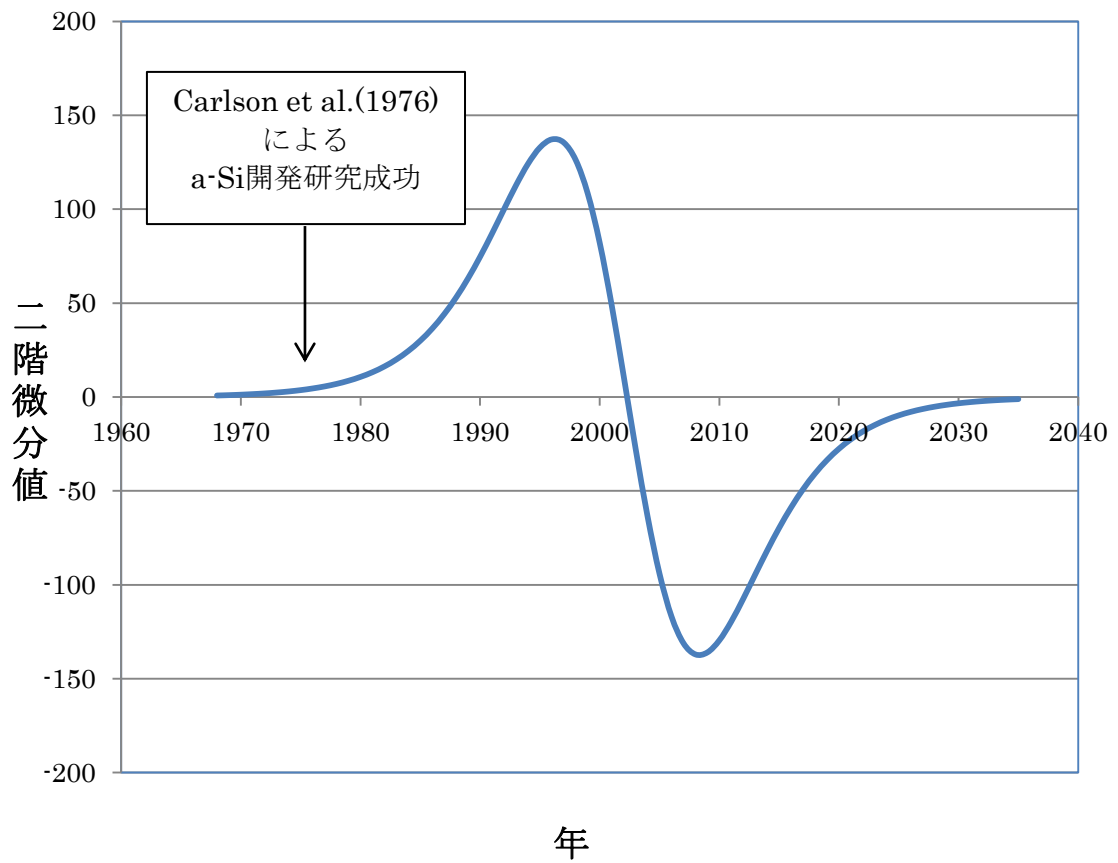


注)著者が 2013 年 12 月に調査した結果

図 9. a-Si 開発研究の論文累積数とグロー放電  
開発研究の論文累積数

次に、1976年以前に生じた Chittick et al.(1969), Spear et al.(1975), Carlson et al.(1976)の研究のいずれかが a-Si 開発研究を急増させた因子であると仮定し、これらのうちどの研究の発生以降に a-Si 開発研究の論文累積数の急増が始まったかを分析する。

図8の a-Si 開発研究に関わる論文推移に近似したロジスティック式を二階微分し、その結果を図10に示す。この図において、1967年からの推移を辿り、二階微分値が最初にほぼ0から立ち上がった時期(=急増し始めた時期)を、論文数が急増を始めた時期と解釈すると、1976年頃がその時期に相当すると考えられる。Chittick et al.(1969), Spear et al.(1975), Carlson et al.(1976)の研究のうち、この時期において最も実用に近いものは、1976年に生じた Carlson らによる、世界で初めて a-Si 太陽電池の開発成功を報告した研究である。このことから、この研究が a-Si 開発研究を活性化した実質的な起点であったことが推測される。



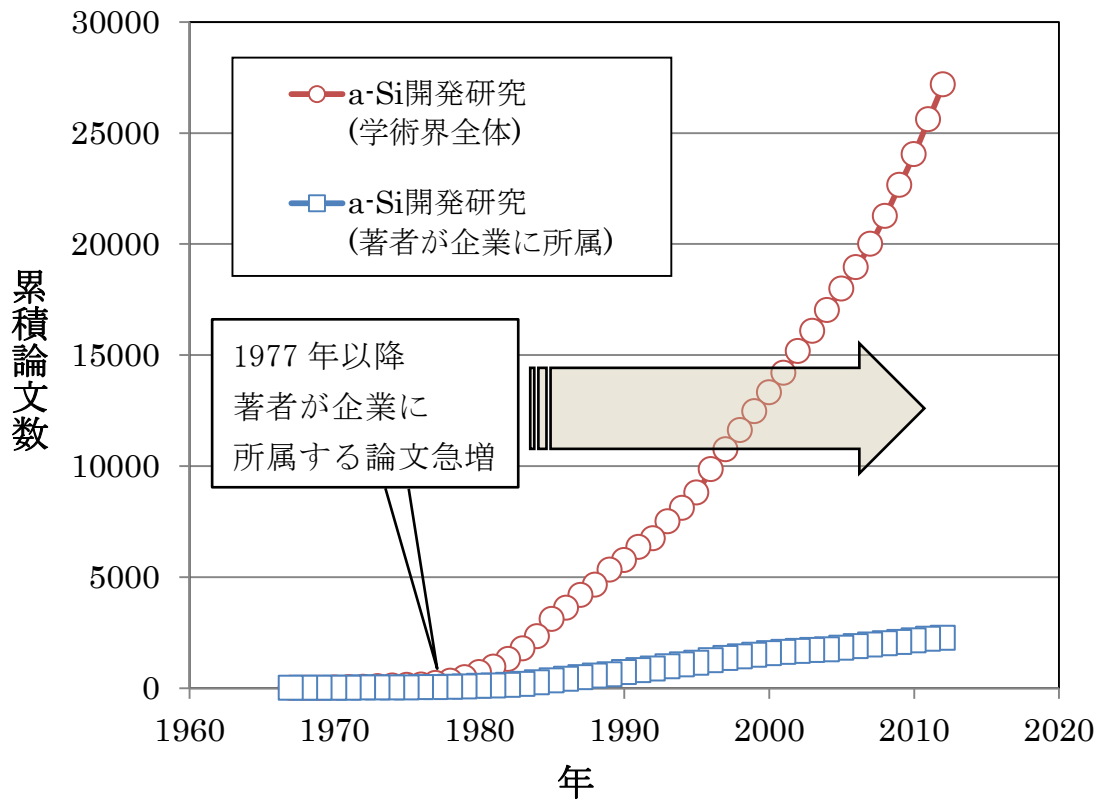
注)著者が 2013 年 12 月に調査した結果

図 10. a-Si 開発研究について SPSS 曲線推定で得られた  
ロジスティック式を二階微分した結果

次に図 9, 10 の結果を踏まえ、概ね 1977 年以降に応用研究が発生したものと仮定し、図 11 に 1967 年から 2012 年までの a-Si 開発研究の論文の累積数と、その中から著者が企業に所属する論文の累積数を抽出した結果を示す。両論文累積数は、いずれも 1976 年まで緩やかに増加し、その後急増を見せている。その推移の中で、企業に所属する著者を含む論文件数は 69 件から 2264 件へと増加する。a-Si 開発研究論文に占める割合を調べると、1967 年～1976 年(論文の増加が緩やかな期間)の間では約 14.2%、論文数急増以降の 1977 年～2012 年(論文数が急増する期間)の間では 8.5%であり、この数値からは企業だけでなく公的研究機関の論文も急増している様子が見て取れる。

次に、表 6 に 1967 年～1976 年と 1977 年～2012 年における a-Si 開発研究について、論文の著者が所属する企業数と企業名を示す。1960 年～1976 年に 10 社であった企業数は、1977 年～2012 年には 14 社へと増加している。

以上のことは、1977 年以降、a-Si 開発研究が量産にかかわる段階、つまり応用研究の段階に入ったことを示唆するものと考えられる。



注)著者が 2013 年 12 月に調査した結果

図 11. a-Si 開発研究の論文累積数と著者が企業に所属する a-Si 開発研究の論文累積数

表 6. 1960 年～1976 年, 及び 1977 年～2012 年において,  
著者が企業所属する a-Si 開発研究論文数

注)著者が 2013 年 12 月に調査した結果

1960年～1976年

著者の所属企業	論文数
IBM Thomas J. Watson Research Center	30
Alcatel-Lucent Bell Labs	29
Siemens AG	3
Fuji-Tsu Company Ltd.	1
Sarnoff Corporation	1
Toshiba Corporation	1
Thales	1
Philips Research Laboratories Redhill	1
LEP Laboratoires d'Electronique Philips	1
Sanyo Electric	1

1977年～2012年

著者の所属企業	論文数
IBM Thomas J. Watson Research Center	320
Nippon Telegraph & Telephone	269
Alcatel-Lucent Bell Labs	261
NEC Corporation	228
Toshiba Corporation	213
Sanyo Electric	213
Samsung Electronics	192
Philips Research Laboratories Redhill	132
Siemens AG	131
LG	130
Fujitsu	121
International Business Machines	29
Philips Research	15
Samsung Group	10



#### 3-2-4. 考察

a-Si 開発研究では、表 4 に見られるように被引用数が高い順から、1 位に Carlson et al.(1975)、2 位に Spear et al.(1976)、そして 10 位に Chittick et al.(1969) の a-Si 太陽電池を実現する新しいプロセス技術、つまりグロー放電法に深くかかわる研究が見られる。

Chittick et al.(1969)、Spear et al.(1975)、Carlson et al.(1976)の研究が行われていた期間(1976 年以前)、a-Si 開発研究及びグロー放電法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、つまり 1977 年以降、両開発研究の論文累積数は急増している。そして図 11 に示すように、1977 年以降の a-Si 開発研究の論文累積数の急増域では、企業に所属する著者の増加も見られる。このことはグロー放電法というプロセス技術において、社会的感染を引き起こす源となる科学の発見が 1976 年以前に存在し、それを境に類似の開発研究が急速に進む応用研究の段階に入ったことを示唆する。

またグロー放電法は a-Si 開発の要となる基本的なプロセス技術、つまり a-Si の形成や a-Si の p 型化や n 型化に寄与していることから、この進歩は a-Si を用いた太陽電池の開発に関する様々なプロセス技術の発展にも影響を及ぼすことが考えられる。

図 10 が、Carlson et al.(1976)の研究によって a-Si 開発研究が活性化したことを示すも

のならば、つまりその Carlson et al.(1976)の研究こそが a-Si 開発研究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。従ってこの研究は、a-Si 開発研究の発展経路に脱成熟化の機会を与え、製品成功に導く因子のひとつであったことが考えられる。

以上のことから, Chittick et al.(1969), Spear et al.(1975), Carlson et al.(1976)の研究が, a-Si 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[41]に当てはめてみる。そうするとこれらの研究は, GaN 開発研究における天野ら(1986), 中村(1991), 中村ら(1992)の研究と同様に, 流動期において発生したプロセスイノベーションに相当するものと考えられ, それ以降の研究急増は, 移行期から固定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推測される。よって, a-Si 開発研究の中で生まれた Chittick et al.(1969), Spear et al.(1975), Carlson et al.(1976)のプロセスイノベーションの特徴は, 従来の製品開発が実現した後の生産性改善に必要とされるイノベーションとは異なり, 製品開発研究が試作さえ難しい段階にある中で生み出された, 製品作製を可能とするプロセスイノベーションであると考えられる。つまり, 「技術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 a-Si 開発研究においても見られ, 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よ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あることが見出された。

また、図 8 の a-Si 開発研究推移への近似によって求めたロジスティック式を二階微分し得た結果(図 10 参照)において、二階微分値が最初にほぼ 0 から立ち上がった時期(=急増し始めた時期)が、Carlson et al.(1976)の世界で初めて a-Si 太陽電池の開発成功が発表された年に近いことを考慮すると、この分析法には以下のような可能性が見出される。それは、この分析方法に適した改良を行うことで、ハイテク分野における新しい素材型製品の事業を策定する経営陣にとって意義あるものとするのが可能ではないかということ、つまり、先に述べた製品開発における脱成熟化の因子の発生を見出す定量的なインジケータになるのではないかということである。

### 3-2-5. 結論

本稿の a-Si 開発研究の論文累積数の分析においては、科学知識の爆発(=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することができた。この科学知識の爆発の因子のひとつとして、グロー放電法を中心とした製品化を可能とするプロセスイノベーションが存在しており、これらの基礎となる研究が、前述の科学知識の爆発の前に出現していることがわかった。

このことから、ハイテク分野の素材型製品開発における研究や経営戦略の策定に際しては、開発研究の活性化の因子となるプロセスイノベーションの形成過程を注意して観察する必要があると考える。

### 3-3. EUV 露光装置開発

3-1.の青色発光ダイオード開発において、ZnSe 開発研究では、GaN 開発研究に見られるような研究者集団に社会的感染を引き起こすプロセスイノベーションが存在しなかった可能性を指摘し、それがその後の学术界の発展経路に与える影響について述べた。本節では、もうひとつ事例を挙げ、それが ZnSe 開発研究と共通する特徴を有するかについて検証する。

例として取り上げる対象は、ZnSe 開発研究が持つ社会的・技術的背景と類似性

があることが条件となる。前者(社会的背景)としては、製品の要となる箇所が新素材またはその類のものであること、この製品の開発成功が我々の社会に大きく寄与するものであること、そして未だ実用化に至っていないことである。後者(技術的背景)としては、その基礎構造と原理が科学の知見をもとに構築されていることである。

これらの条件を満たす検証対象として、ここでは EUV(極端紫外線)露光装置を選ぶ。社会的背景であるが、EUV 露光装置は次世代 LSI(Large scale integrated circuits)の実現の要となる製造装置のひとつであり、個々の国の研究助成や国際的な研究協力によって基礎研究は活発化したと見られるものの、生産に向けた応用研究は停滞し、生産装置として量産工場に投入された例はまだ見られない。技術的背景であるが、EUV 露光装置開発では、量子物理の理論から EUV 発光に適した素材として錫を選び、外部からエネルギーを与えることで錫のプラズマ放電を形成しようとしたものの、高出力の EUV 光を実現できずにいる。この詳細は後述するが、錫によるプラズマ放電状態を素材に類するもの、それを実現する手法をプロセス技術に相当するものとして捉えた。

まずは、木下ら(2012)[67]、湯之上(2012)[68]、湯之上(2013)[69]、東口ら(2013a)[70]、東口(2013b)[71]の EUV 露光装置の開発に関わる文献をもとに、この製品の開発経過を整理する。

半導体産業の黎明期から、LSI の高性能化と低コスト化は、微細化、高集積化

によって支えられてきた。これは、IBM の Dennard 博士が提唱した「LSI は微細化すると高性能になる」というスケーリング則[72]、もうひとつは Intel の Moore 博士が提唱した「半導体の集積密度は 18~24 か月おきに倍増する」というムーアの法則[73]に従うところが大きい。

半導体は、面積の大きなウェーハ上に複数の LSI を作成して切り出すことによって製造される。ゆえに LSI の微細化と高集積化は 1 枚のウェーハから取得できる LSI 数を増加させることを意味し、結果、低コスト化の達成と高性能な LSI の実現を可能にする策として今日も進められている。

この微細化と高集積化に大きく寄与するのが半導体製造技術であり、その要は、リソグラフィ技術、すなわちウェーハ上に回路パターンを焼き付ける露光技術である。それは、実寸よりも大きく作成したマスクパターンを、光源、レンズ、ミラーなどの光学系を利用してウェーハに縮小投影する技術で、LSI の微細化と高集積化を適える手法として、これら光学系技術の発展が推し進められてきた。そして、さらなる微細化と高集積化のため、より短い波長の照射が可能な光源が必要とされている。

具体的に述べると現在の主流は、クリプトンとフッ素、アルゴンとフッ素の気体に電圧を与えて放電させ、発生した波長の短いレーザー光を利用する露光技術であるが、次世代技術としてはさらに波長の短い EUV(極端紫外線)を用いた露光技術の実現が

求められている。EUV とは、金属を気化させ、そこにレーザーを照射して放電させることによって発生した、極端に短い紫外線領域の波長の光である。気化させる金属としては、量子物理の理論に基づき、短い波長の光とその強度の確保を期待して錫が選択された。この手法は 1980 年に初期の開発が始まり現在に至っている。

こうして進められてきた錫による放電方式を用いる EUV 光源の開発であるが、現在大きな壁に直面している。最大の課題は、EUV 光源の出力が上がらないこととされている。量産時に必要とされる 1 時間当たりウェーハ 125 枚の処理(スループット)を達成するためには、EUV 光の出力を 250W 以上に高める必要があるとされているが、現状では、100W の瞬間出力が報告されているものの、平均で 10~20W と一桁低い出力に止まっている。

この課題に対し、EUV 露光装置の開発に携わるメーカーは、今後数年で技術開発を一気に加速させ解決を図ろうとしている。それは、この技術の導入に時間がかかればかかるほど、その分 EUV に要求される解像力やスループットなどの性能が上がるという事情による。なぜなら、ナノスケールのスタンプを用い回路パターンを転写するナノインプリント技術<sup>27</sup>や電子ビームで回路を直接描画する電子ビームといった競合技術

---

<sup>27</sup> ナノインプリント・リソグラフィ技術は、ナノスケールのスタンプを使った押印技術である。1995 年にプリンストン大学の Chou 教授が、ナノインプリントで 10nm のレジストパターン(次の工程で配線パターンを作成する際にエッチングのマスクとして用いられる樹脂)を転写したことに端を発する。2003 年以降、ITRS(国際半導体ロードマッ

のさらなる開発が進み、EUV 露光技術の理論的優位性をもってしても、市場の確保に困難が予想されるのである。

このように現在 EUV 露光装置は、量産用光源としての設計コンセプト(錫を気化し放電させるというものは固まっているものの、出力を上げるための方策が追いついていない。この問題を解決するプロセス技術として開発が進められているのが、LPP(Laser produced plasma)と DPP(Discharge produced plasma)という方式である。

LPP は錫の液滴にレーザーを照射しプラズマ放電を発生させて、その放電から出てくる EUV 光を利用する方法である。LPP における課題のひとつは、錫の液滴は約 30 ミクロン程度であるのに対し、レーザーの集光径は約 100 ミクロンと大きく、錫の液滴にレーザーの一部しか当たらないため変換効率が良くないということである。この改善のため、プリパルスと呼ばれる弱いレーザーで錫の液滴を砕き、直径 100 ミクロン程度に広げてから本番のレーザーを照射する試みが行われている。

DPP は溶融錫を入れた容器に正負の電力を印加した円盤状の電極を浸し、溶融錫が付着した円盤状電極を回転させることで両円盤電極間に溶融錫を飛散させる。そこに、トリガーとしてレーザーを照射することでプラズマ放電を発生させ、発生した放電

---

プ)の中のリソグラフィロードマップで、次世代リソグラフィ技術としてナノインプリントが登場するようになり、半導体プロセスへ応用するため検討が本格化した。ナノインプリントの特徴は解像力とパターン品質の高さ、そして装置を低コスト化できる点である[74][75]。



から出てくる EUV 光を利用するという方法である。DPP の高出力化のため、トリガーを 2 度照射する試みが行われている。1 発目のレーザーで放電を開始させ、2 発目のレーザーでプラズマ放電の形状や大きさを最適化することを目指すものである。

現在、LPP、DPP 両方式ともに、レーザーの出力を段階的に高めるなどプロセス技術の改善が行われている状態である。

### 3-3-1. 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(3-1-1. データ収集法, 脚注 13 参照)を用い、データ収集を行う。

なお本節では、EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究について分析する。半導体製造装置の実用化においては、高いスループット(throughput)の確保を目的に開発が進められるため、この開発研究に関わる論文とは、論文タイトル、アブストラクト、キーワードに“EUVL”あるいは“extreme ultraviolet lithography”を含み、かつ必ず“throughput”を含むものとする。

- (1) 1980 年(初期の研究が開始された年)から 2012 年(本データ収集時点での最新収録年)までの EUV 露光装置の実用化のための開発研究に関わる論文のキーワー

ドについて、上位 10 位までのリストを作成する。

- (2) 1980 年から 2012 年までの EUV 露光装置の実用化のための開発研究に関わる論文について、掲載累積数をグラフにプロットする。

### 3-3-2. データ分析方法

前節 3-3-1. (1) ~ (2) で収集したデータを以下のように分析する。

- (1) データ収集方法(3-3-1.)の (1) で収集したキーワードについて、3-3.で記した光源に関わる研究を示す語が存在するかを検証する。
- (2) データ収集方法(3-3-1)の (2) で得た EUV 露光開発研究に関わる論文の累積数推移について、それぞれロジスティック式に従うような増加が見られるか、または一次方程式に従うような増加が見られるか検証する。前者の場合はロジスティック式に、後者の場合は一次方程式に近似する。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(3-1-2.データ分析法, 脚注 15 参照)。

### 3-3-3. 分析結果

#### 3-3-3(a). EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究における重要な課題

表 7 に 1980 年から 2012 年までの EUV 露光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。このリストの 3 位と 10 位には、現在 EUV 露光装置の実用化課題と認識されている光源開発に関わるキーワードである **ultraviolet radiation** と、**light source** という語が見られる。この結果は、3-3.に記した EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究の課題として光源開発が欠かせないことを反映した結果と考えられる。

なお、これら以外の語は、EUV 露光を包括的に示す語、および縮小投影露光に用いるマスクとそのマスクの構造に関わる語であり、EUV 露光技術に関わる論文を作成する際に欠かせない語であるが、光源のように実用化の成否を左右するような課題を示す語ではない。

表 7. EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究論文に用いられる  
上位 10 位までのキーワード

注)著者が 2014 年 5 月に調査した結果

	キーワード	論文数
1	extreme ultraviolet lithography	86
2	lithography	57
3	ultraviolet radiation	49
4	masks	41
5	photolithography	34
6	EUVL	27
7	extreme ultraviolet lithography	25
8	multilayers	24
9	EUV lithography	22
10	light sources	19

### 3-3-3(b). EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究の発展経路

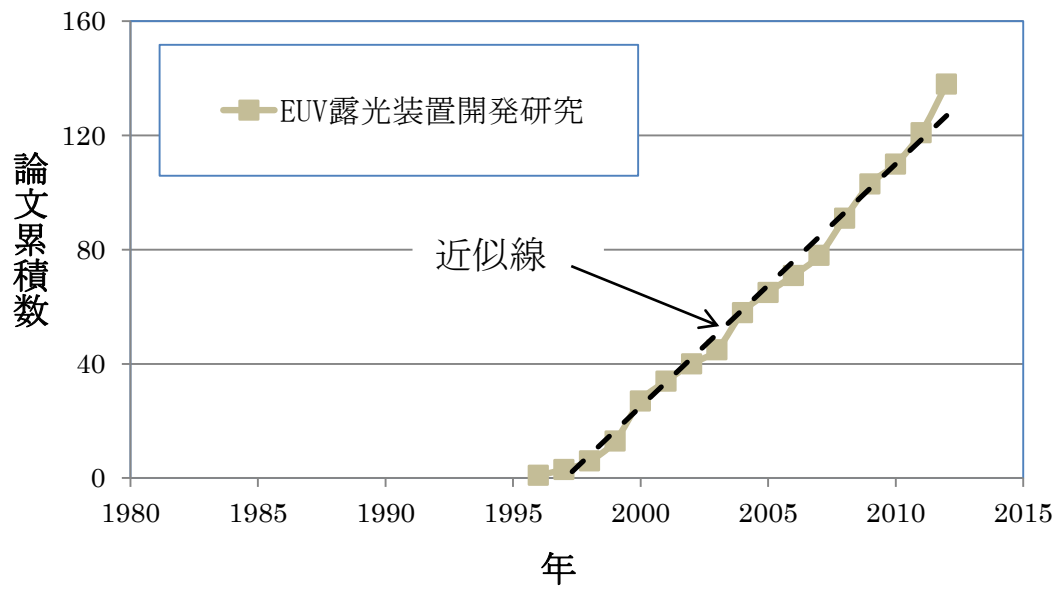
図 12 に 1980 年から 2012 年までの EUV 露光開発研究に関わる論文累積数の推移を示す。3-3. で述べたように、基礎研究は 1980 年に始まったが、この図からは量産化を意識した研究が、1996 年から始まったことがわかる。この図において、この開発研究に関わる論文は、1996 年から現在に至るまで、時間の経過に比例した単調増加を示すような推移が見られる。この推移の特徴を定量的に検証するために、累積数推移について一次方程式への近似を行う。

この近似によって得られた一次方程式と決定係数( $R^2$ )を以下に記す。EUV 露光技術の量産応用に向けた開発研究に関わる論文累積数の一次方程式への近似は、

$$E(Yt) = -16965 + 8.4951t$$

であり、決定係数( $R^2$ )は 0.99 であった(図 12 の近似線に相当する)。図に見られる推移と、この結果から一次方程式への近似が妥当と考えられる。

ここで前述した Price, Gupta らの主張[24][26]を踏まえて、図 12 に見られる発展経路を観察すると、この EUV 露光技術の量産応用に向けた開発研究では、研究者集団における社会的感染を引き起こす源となるような画期的な科学の発見はまだ発生していないことが推測される。つまり、光源の改善は重要な要素であるが、EUV 光源の出力を上げるような画期的な科学の発見はまだ登場していないことが考えられる。



注)著者が2014年5月に調査した結果

図 12. EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究論文の推移

#### 3-3-4. 考察

表 7 に, EUV 露光装置の実用化にあたっての課題と認識されている光源開発に関わるキーワードが見られることから, EUV 露光技術開発研究において, 光源開発は本質的な課題と考えられる。また図 12 から, EUV 露光技術開発研究の論文累積数が単調増加を示していることがわかる。このことから, この開発研究に活性化が生じていないこと, また, 光源開発における研究課題には未だ研究者間で満足のゆく回答が得られていないことが推測される。これは, 3-3.で述べたように量産装置に必要な光強度を引き出す画期的なプロセス技術が見出されていないことに起因するものと考えられる。つまり, GaN 開発研究における天野ら(1986)と中村(1991), 中村ら(1992)の研究のように開発研究を活性化させる, すなわち開発研究の発展経路を変化させる技術がまだ確立していないことが推測される。

ここで LSI は社会の発展に欠かせない製品であり, LSI の微細化と高密度化がこの産業の発展の原動力であることを踏まえた上で, 図 12 に示された EUV 露光装置開発の発展経路が Abernathy et al.(1983)のいう成熟化[58]を表していると仮定する。そして EUV 露光装置開発において, すでに脱成熟化の試みが進められている可能性を考慮に入れ, その存在と方策について検証する。

考え得る脱成熟化に向けた方策として挙げられるのは, EUV 露光装置開発にお

ける画期的なプロセス技術の発見，あるいは，不確実性を有しその打破を目指す段階にある他の競合技術への転向である。前者の量産装置に必要な光強度を引きだす画期的なプロセス技術の発見については，分析結果から見る限りめぼしい動きは見受けられないが，後者の競合他技術への転向については，この業界の動向からひとつの例が挙げられる。最近になって，過去に EUV 露光装置開発を断念した経緯を持つ大手露光機メーカーが，競合技術であるナノインプリント技術による量産装置化を目指す開発研究に着手するために，ナノインプリント装置メーカーを買収したことが報告されている[65]。その理由としては，EUV 露光装置開発研究の停滞を感じ取っていたことに加え，ナノインプリント技術を量産装置化するにあたっての技術的な不確実性を低減するプロセス技術が見出されつつあることが指摘されている[65]。ナノインプリント技術における不確実性とは，ウェーハにレジストパターンを圧着させてからの版型の剥がし方<sup>28</sup>であったが，レジスト材料の開発，およびレジストの注入方法の改善に目処が立ったことで，その不確実性の打破に可能性を見出したものである[4]。

EUV 露光装置開発研究，ナノインプリント装置開発研究がともに有する技術上の課題は，いずれもプロセス技術の開発の範疇にある。今のところ，どちらの装置も量産適用されておらず，競合する装置としての性能優劣については意見の分かれるところ

---

<sup>28</sup> 剥がし方が悪いとレジストパターンが壊れ，欠陥が増える[75]。



であると推測されるが、ここで取り上げた例のように競合他技術における新しいプロセス技術に道を見出そうとするような、不確実性を有する競合技術への転向は、脱成熟化への試みと解釈できるのではないだろうか。よってこの事例も、プロセスイノベーションが、脱成熟化の因子のひとつであることを示唆するものと考えられる。

### 3-3-5. 結論

現在、量産稼働を目的とした EUV 露光装置はまだ市場に投入されていない。その原因は光源に用いるプラズマ放電の方式が量子物理の理論に基づいて決定されているにも関わらず、量産に適した光強度を引き出すプロセス技術が見出されていないからである。本節ではこの事実を踏まえて、EUV 露光装置の実用化に向けた開発研究の発展経路の分析を行った。

本稿の EUV 露光装置開発研究の論文書誌情報の分析から、上位 10 位までのキーワードに光源を課題とする研究に由来するものが存在すること、また論文累積数の増加は単調であり、科学知識の爆発のような急増は見られないことがわかった。このことから、光源の改善が重要な要素でありながら、これを解決するような画期的な科学の発見がまだ登場していないことが推測される。

#### 4. 全体の考察

本稿では科学論文の書誌情報をもとに定量的に、ハイテク分野の素材系の製品、もしくはこれに類する製品の開発における技術的プロセスイノベーションの特徴の分析を試みた。この分析から、Ga<sub>N</sub> 開発研究や a-Si 開発研究に見られた科学知識の爆発の背後に存在するプロセスイノベーションの特徴は、まだ経験したことのないプロセス技術によって形成されたものであるという可能性が見出された。

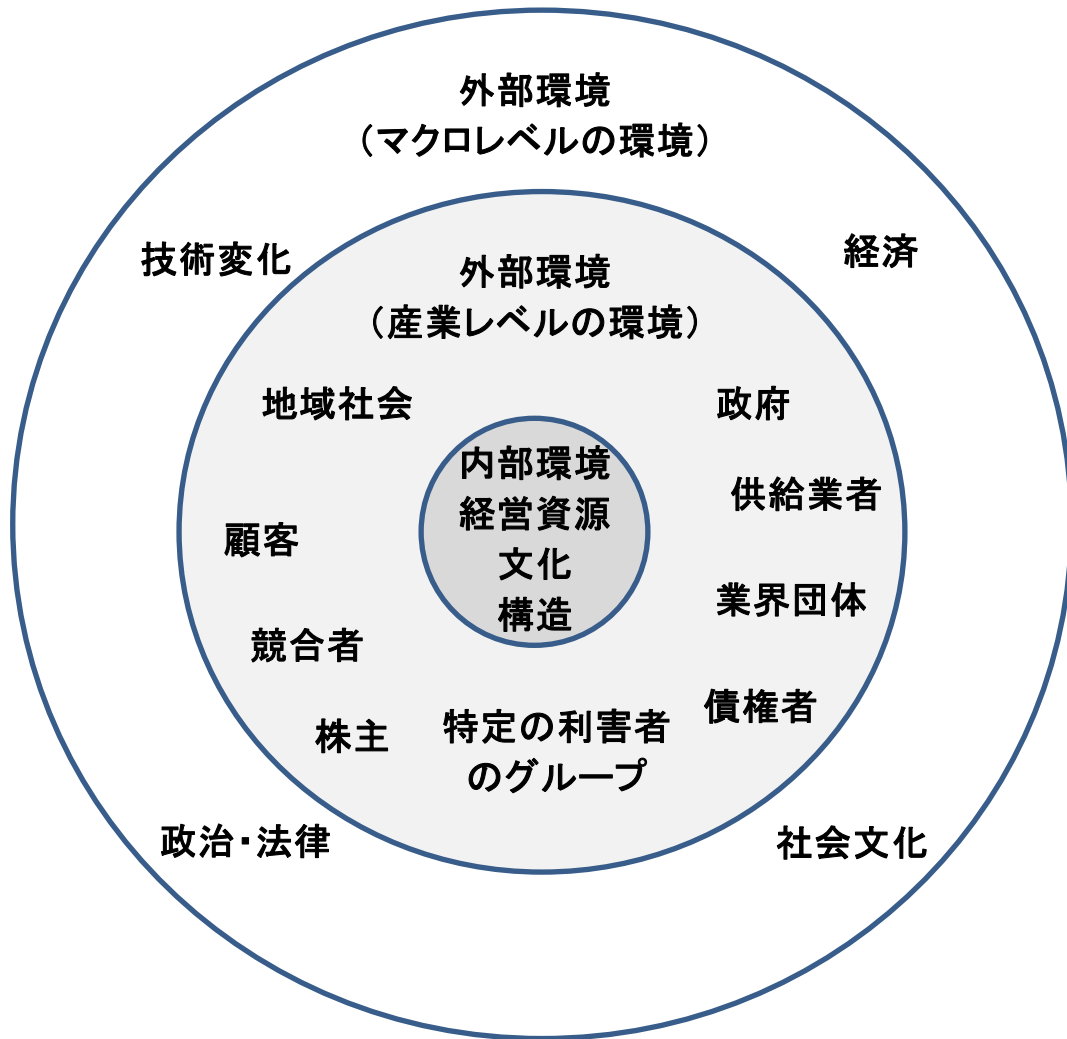
詳しくいうと、このプロセスイノベーションは、それまでの理論とは異なるアプローチによって形成されており、開発当時の研究者にとっても不確実性が高く、その着手には心理的に高いハードルが存在したものと考えられる。この不確実性が Abanathy et al.(1984)の脱成熟化の議論における不確実性[58]と同じ類のものであると仮定すると、これを有しながらもコア技術として成立する潜在能力を有する科学の発見が生じたため、Ga<sub>N</sub> 開発研究や a-Si 開発研究で脱成熟化が進み、結果、科学知識の爆発が生じたものとする。このため、ここでは Abanathy and Utterback(1978)の提唱するテクノロジーライフサイクルモデルで論じられるような、ドミナントデザインの出現によって、生産効率を高め低コスト化を適えるプロセスイノベーションが増加するという概念[41]の適用は難しく、プロセスイノベーションが生じないことには、製品開発も始まらないことを示す新しいモデルが必要になる。これに代わるモデルとして図 7 に

本稿の提案するテクノロジーライフサイクルモデルを記した。

さらに、このプロセスイノベーションの形成に必要なプロセス技術が、学界における論文発表を伴う、高いレベルのものであったことを考慮すると、これまで議論されてきた企業内で生じるプロセスイノベーションの様相とは異なり、それは企業の戦略策定の事業環境分析における外部環境(特にマクロレベルの環境)に属する技術変化に相当する特性を有するものと推測される(図 13 参照)。一般に、個々の企業において外部環境に属する因子の事業への影響は、内部環境の因子のそれに比べ、大きいことが認識されている。このため、経営者が広い視野を持ち、同じ製品開発研究に携わる研究者間の社会的感染から始まる科学知識の爆発の源にあるプロセス技術を見逃さないことが重要であると考えられる。

以上のように本稿で発見したプロセスイノベーションの特徴は、これまで議論されてきたプロセスイノベーションの特徴とは大きく異なり、今後の研究の基礎的なフレームワークを構築する際の貴重な知見となるものとする。さらに、青色発光ダイオード開発や a-Si 太陽電池の事例分析における考察でも述べたように、本稿の分析法は実務の運用に向けた改善を行うことにより、脱成熟化の因子の発生に対する認識を促す定量的なインジケータと成り得るものとする。その場合も運用の範囲は GaN 開発研究のような素材型製品の開発過程に限定されるが、その有用性を鑑みると、本稿の分析

法それ自身も，社会的な意義を有する可能性があると考える。



注) Wheelen and Hunger(2000)をもとに著者が作成

図 13. 環境の変動要因

## 5. 全体のまとめ

素材型製品もしくはこれに類する製品開発において、「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あることが見出された。このことから、ハイテク分野の素材系の製品開発において、研究や経営戦略の策定を行う際には、科学知識の爆発の前に出現する新しいプロセス技術を脱成熟化の因子として捉え、検討する必要があると考える。

## 謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり，多くのご指導とご支援を賜りました，指導教官である玄場公規教授に，心より御礼申し上げます。定量分析という学術領域にとどまらず，様々なものの捉え方に関し広くご指導いただきましたこと，また常に励ましてくださったことは今後の努力の糧となるものです。

本論文作製にあたり，技術的イノベーションの解釈や分析方法の意義に関しまして多くのご指導を賜りました，石田修一教授並びに中塚信雄教授に深く感謝いたします。三藤利夫教授にはコースワークにとどまらず，経営戦略の勉強会を通して数多くのご指導をいただきました。また崔裕眞准教授には，論文書誌情報の分析に関わる科学進歩の概念の解釈についてお教えいただきました。深く御礼申し上げます。

総合科学技術研究機構，阿部惇上席研究員には，博士課程への進学とそれに続く研究全般にわたり，多大なるご支援，ご指導を賜りました。感謝の念に堪えません。

欧州での研究発表から現在にわたり，折にふれて貴重なご指導や機会を賜りました国際大学の加瀬公夫教授に深く感謝いたします。駿河大学の高垣行男教授にお会いしましたことが，この研究分野の魅力を知るきっかけとなりました。厚く御礼申し上げます。

論文書誌情報の分析にあたり、この専門分野における豊富な経験から貴重なご意見をいただきましたことと、結果がでるまで長く見守ってくださいましたことに、エルゼビア・ジャパン株式会社の中村健史氏へ心より御礼申し上げます。また、後期博士課程進学以前から現在に至るまで、常に暖かく励ましてくださいました西村陶業株式会社の西村元延氏に心より感謝いたします。

最後に、これまで自分の思う道を進むことに対し、暖かく見守り、励まし、そして常に良き相談相手となってくれた妻、真弓に心から感謝の意を表して、謝辞といたします。

## 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] Cabral, Ricardo, and Michael J. Leiblein. “Adoption of a Process Innovation with Learning-by-Doing: Evidence from the Semiconductor industry.” *Journal of Industrial Economics* 49, no.5(September 2001): 269-280.
  
- [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] Yamaguchi, E. “Rethinking innovation” In *Recovering from Success Innovation and Technology Management in Japan*, eds. D.H. Whittaker, Robert E. Cole. Oxford: Oxford University Press, 2006.
  
- [7] 山口 栄一 『ノベーションの共鳴と破壊』, NTT 出版社, 2006。



- [8] Linton, Jonathan D., and Steven T. Walsh. "A theory of Innovation for Process-Based Innovations such as Nanotechnology." *Technological Forecasting and Social Change* 75, no.5(June 2008): 583-594.
- [9] Braun, Tibor, Andras P. Schubert, and Ronald N. Kostoff. "Growth and Trends of Fullerene Research as Reflected in Its Journal Literature." *Chemical Reviews* 100, no.1(January 2000): 23-37.
- [10] Sanz-Casado, E., C. Suarez-Balseiro, I. Iribarren-Maestro, M. Ramirez-de Santa Pau, and J. de Pedro-Cuesta. "Bibliometric mapping of scientific research on prion diseases, 1973-2002." *Information Processing and Management* 43, no.1(January 2007): 273-284.
- [11] 品川 啓介 「サイエンス型産業における新規事業策定のための論文書誌データベースの応用に関する研究」, 『ビジネスクリエーター研究』 1, (November 2009): 67-83.
- [12] Theander, Sten S., and Lennart Wetterberg. "Schizophrenia in Medline 1950–2006: A bibliometric investigation." *Schizophrenia Research* 118, no. 1-3(May 2010): 279-284.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Heilbron, J.L., ed. *The Oxford Companion to the History of Modern Science*, N. Y.: Oxford University Press, 2003.
- [17] Rosenberg, Nathan. *Technology and American Economic Growth*, NY: Harper and Row, 1972.
- [18] Pavitt, K., M. Robson, and J. Townsend. "Technological Accumulation, Diversification and Organisation in UK Companies,1945-1983." *Management Science* 35, no.1(January 1989): 81-99.
- [19] Narin, Francis., Kimberly S. Hamilton, and Dominic Olivastro. "The Increasing Linkage between U.S. Technology and Public Science." *Research Policy* 26, no.3(October 1997): 317-330.
- [20] Popper, Karl R. *The logic of scientific discovery*. 10<sup>th</sup> ed. London: Hutchinson, 1980.

- [21] Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1962.
- [22] 藤井千春「現代科学哲学における「理論転換」をめぐる論争：ポパーとクーンの科学論の比較・検討」, 『大阪府立大学紀要(人文・社会科学)』 39, (March 1991):25-37.
- [23] Fleck, Ludwik. *Genesis and Development of a Scientific Fact*. Trenn, Thaddeus J. and Robert K. Merton, eds., translated by Bradley, Fred and Thaddeus J. Trenn. Chicago: University of Chicago Press, 1979.
- [24] Price, Derek John de Solla. *Little Science, Big Science*. New York, NY: Columbia University Press, 1963.
- [25] Rogers, Everett M. *Diffusion of innovations*, NY: The Free Press of Glencoe Division of The Macmillan Co., 1962.
- [26] 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.
- [27] Casetti, Emilio. “Why Do Diffusion Processes Conform to Logistic Trends?”, *Geographical Analysis* 1, no.1(January 1969) : 101-105.
- [28] Damanpour, Fariborz, and Shanthi Gopalakrishnan. “The dynamics of product and process innovations in organizations.” *Journal of Management Studies* 38, no. 1(January 2001): 45-65.

- [29] Edquist, C., L. Hommen, and M. McKelvey. *Innovation and employment: Process versus product innovation*. Cheltenham, UK: Edward Elgar, 2001.
- [30] Ettl, J. E., and Ernesto M. Reza. "Organizational Integration and Process Innovation." *The Academy of Management Journal* 35, no.4(October 1992): 795-827.
- [31] 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.
- [32] Damanpour, Fariborz, and William E. Evan. "Organizational Innovation and Performance : the Problem of "Organizational Lag." *Administrative Science Quarterly* 29, no.3(September 1984): 392-409.
- [33] Ford, Henry, Samuel Crowther. *My life and work*. New York : Arno Press, 1973.
- [34] Bright, Arthur A., Jr. *The electric-lamp industry technological change and economic development from 1800 to 1947*. New York: Arno Pr., 1972.
- [35] Reichstein, Toke, and Ammon Salter. "Investigating the Sources of Process Innovation among UK Manufacturing Firms." *Industrial and Corporate Change* 15, no.4 (August 2006): 653-682.
- [36] Enos, John. "Invention and Innovation in the Petroleum Refining Industry." In

*The rate and direction of inventive activity : economic and social factors : a Conference of the Universities-National Bureau Committee for Economic Research and the Committee on Economic Growth of the Social Science Research Council*, Princeton: Princeton University Press, 1962.

- [37] Gullichsen, Johan E. “Innovations Through Exploration of Fibre-Water Interactions.” In *Innovations For Survival, Falun, Sweden: The Marcus Wallenberg Foundation, 1986*, Falun, Sweden: Marcus Wallenberg Foundation, 1986.
- [38] Armbruster, Heidi, Andrea Bikfalvi, Steffen Kinkel, and Gunter Lay. “Organizational innovation: The challenge of measuring non-technical innovation in large-scale surveys.” *Technovation*, 28, no.28(October 2008): 644-657.
- [39] Damanpour, Fariborz, and Deepa Aravind. “Managerial Innovation: Conceptions, Processes, and Antecedents.” *Management & Organization Review* 8, no.2(July 2012): 423-454.
- [40] Mazzanti, Massimiliano, Paolo Pini, and Ermanno Tortia. “Organizational innovations, human resources and firm performance the Emilia-Romagna food sector.” *The Journal of Socio-Economics*.35, no.1(February 2006): 123-141.
- [41] Abernathy William J., and James M. Utterback. “Patterns of Industrial Innovation.” *Technology Review* 80, no.7(June/July 1978): 40-47.

- [42] 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.
- [43] Rosenberg, Nathan. *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982.
- [44] Damanpour, Fariborz. “Organizational Innovation: A Meta-Analysis of Effects of Determinants and Moderators.” *The Academy of Management Journal* 34, no.3(September 1991): 555-590.
- [45] Tidd, Joseph, J.R. Bessant, and Keith Pavitt. *Managing innovation integrating technological, market and organization change*. Chichester: John Wiley, 2001.
- [46] 吉岡秀美「技術導入を通じて見た韓国半導体産業の発展メカニズム」, 『東亞經濟研究』 57, no.1(April 1998):113-130。
- [47] 藤村修三「半導体立国ふたたび」, 日刊工業新聞社, (2000)。
- [48] 中馬宏之「半導体産業における国際競争力低下要因を探るーネットワーク分析の視点からー」, 『經濟研究』 62, no.3(September 2011):225-240。
- [49] 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.

- [50] 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.
- [51] Pollack, Andrew. "The Little Light Light That Could." *The New York Times*, April 29, 1996, Monday, sec. D, p. 5.
- [52] 「青色の研究職人」, 『日本経済新聞』, 1997年2月27日, 夕刊 p.5。
- [53] Tarbox, James M. "New Blue-Green Laser From 3M Could Expand Disc Storage." *Business Metro Final*, August 28, 1991, p. 2.
- [54] Peterson, Ivars. "Pushing lasers on a chip into the blue." *Science News* 140, no.12 (September 1991): 183.
- [55] 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.
- [56] Nakamura, S. "GaN Growth Using GaN Buffer Layer." *Japanese Journal of Applied Physics Part 2 letters* 30, no.10A (October 1991): 1705-1707.
- [57] 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.

- [58] 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。)
- [59] Christensen, Clayton M. *The innovator's dilemma : when new technologies cause great firms to fail*. Boston, Massachusetts: Harvard Business Review Press, 2013.(玉田 俊平太 監修, 伊豆 原弓 訳 『イノベーションのジレンマ—技術革新が巨大企業を滅ぼすとき』 東京 : 翔泳社, 2001。)
- [60] Deng, Xunming and Eric A. Schiff. “Amorphous Silicon-based Solar Cells.” *In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, eds. Antonio Luque and Steven Hegedus. Chichester: Wiley, 2003.
- [61] 寺川 朗 「プラズマCVD法による薄膜シリコン太陽電池の工業化にむけて(小特集 次世代シリコン太陽電池製造のためのプラズマ技術)」, 『プラズマ・核融合学会誌』, 86, no.1(January 2010): 17-39。
- [62] 桑野 幸徳 『太陽電池はどのように発明され, 成長したのか 太陽電池開発の歴史』, 東京オーム社, (2011)。
- [63] Carlson, D. E., C. R.Wronski. “Amorphous silicon solar cell.” *Applied Physics Letters* 28 , no.11(June 1976,): 671-673.
- [64] Spear, W.E., P.G.Le Comber. “Substitutional doping of amorphous silicon.” *Solid State Communications* 17, no.9(November 1975):1193-1196.



- [65] Philipp, H.R. “Optical properties of non-crystalline Si, SiO, SiO<sub>x</sub> and SiO<sub>2</sub>.” *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 32, no.8(1971): 1935-1945.
- [66] Chittick, R. C., J. H. Alexander, and H. F. Sterling. “The Preparation and Properties of Amorphous Silicon.” *Journal of The Electrochemical Society* 116, no.1(1969): 77-81.
- [67] 木下 淳一, 木村雅秀「半導体のコストダウンは止まるのか?: 動き出す450mmウェハーと瀬戸際のEUV露光」, 『日経エレクトロニクス』, 1096, (November 2012): 59-73。
- [68] 湯之上 隆 「半導体製造装置業界 半導体製造装置市場の最新動向 ASMLが装置売上高1位に躍進 EUVは本当に実現可能なのか?」, 『Electronic journal』, 224, (2012): 50-52。
- [69] 湯之上 隆 「半導体業界 EUVL量産導入の実現に向けて 光源開発が焦点となった EUVL EUV光源開発は日本人に有利」, 『Electronic journal』, 230, (2013): 34-37。
- [70] 東口 武史 「6.おわりに(<小特集>プラズマによる短波長光源研究の進展とその物理)」, 『Journal of Plasma and Fusion Research』, 89, no.10(October 2013): 677-678。
- [71] 東口 武史, 遠藤 彰, 溝口 計「EUV光源開発の現状」, 『Journal of Plasma and Fusion Research』, 89, no.6(June 2013): 341-348。
- [72] Dennard, Robert H., Fritz Gaensslen, Hwa-Nien Yu, Leo Rideout, Ernest Bassous, and Andre R. LeBlanc. “Design of ion-implanted MOSFET's with

very small physical dimensions.” *IEEE Journal of Solid State Circuits* SC-9, no.5 (October 1974): 256-268.

[73] Moore, Gordon E. “Cramming more components onto integrated circuits.” *Electronics* 38, no.8 (April 1965): 114-117

[74] 中杉 哲郎, 河野 拓也, 米田 郁男「光ナノインプリントリソグラフィ技術」, 『東芝レビュー』 67, n o.4 (April 2012) : 41-43。

[75] 「半導体製造で逆転狙うキヤノン ナノインプリントを実用化へ」, 『日経エレクトロニクス』, 2014年3月31日号: 10-11。

[76] Wheelen, Thomas L. and J. David Hunger. *Strategic Management And Business Policy*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Prentice Hall, 2000.

付属資料

図 2 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013年8月19日

表 1 の被引用数の高い 1 位， 2 位， 3 位の論文について毎年の被引用数を整理した。

年	Amano et al.(1986)論文 被引用数		Nakamura (1991)論文 被引用数		Nakamura et al. (1992) 論文被引用数	
	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数
2012	48	1113	39	754	15	561
2011	39	1065	28	715	18	546
2010	35	1026	26	687	21	528
2009	57	991	28	661	18	507
2008	82	934	37	633	20	489
2007	71	852	35	596	19	469
2006	68	781	24	561	21	450
2005	68	713	31	537	18	429
2004	50	645	25	506	29	411
2003	67	595	33	481	31	382
2002	91	528	53	448	50	351
2001	77	437	66	395	33	301
2000	72	360	59	329	49	268
1999	80	288	71	270	52	219
1998	90	208	68	199	57	167
1997	76	118	91	131	64	110
1996	42	42	40	40	46	46

表 2 (b) ZnSe 開発研究論文に頻繁に用いられる上位 50 位までのキーワード

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013 年 8 月 19 日

ZnSe 開発研究の検索式を“zinc selenide”または“ZnSe”とし、抽出された論文のキーワード上位 50 位までをリストにした結果。

	キーワード	論文数
1	semiconducting zinc compounds	2,413
2	photoluminescence	1,308
3	zinc selenide	1,242
4	molecular beam epitaxy	946
5	zinc compounds	829
6	semiconducting gallium arsenide	745
7	semiconductor quantum wells	694
8	semiconductor quantum dots	657
9	excitons	612
10	ZnSe	573
11	semiconductor growth	546
12	zinc	535
13	heterojunctions	519
14	optical properties	500
15	substrates	484
16	semiconducting zinc compounds	475
17	article	463
18	thin films	461
19	epitaxial growth	460
20	semiconductor doping	440
21	transmission electron microscopy	433
22	zinc sulfide	382
23	semiconducting cadmium compounds	378
24	semiconducting zinc compounds	355
25	energy gap	351

26	luminescence	348
27	semiconductor lasers	336
28	nanostructured materials	326
29	x ray diffraction	317
30	single crystals	301
31	semiconductor materials	292
32	cadmium compounds	291
33	crystal growth	290
34	thermal effects	271
35	zinc selenide	268
36	selenium	263
37	interfaces	259
38	crystal structure	255
39	crystals	254
40	semiconducting selenium compounds	254
41	semiconducting films	253
42	zinc selenide	252
43	mathematical models	246
44	x ray diffraction analysis	241
45	light absorption	240
46	doping	228
47	synthesis	219
48	band structure	218
49	semiconductor superlattices	218
50	phonons	217

注)19位に Epitaxial growth 33位に Crystal growth が見られる。いずれも、下地の基板の結晶面にそって所望の結晶を成長させるプロセスの様式を示すが、具体的な結晶成長方法を示していない。このため本研究の分析の対象のプロセス技術として捉えることを避けた。なお、この様式は主に、MBE, MOCVD, そして液相エピタキシー法といった三つの結晶成長方法に細分化される。

図 3 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013年8月19日

GaN 開発研究の検索式は“gallium nitride”または“GaN”とした。

ZnSe 開発研究の検索式は“zinc selenide”または“ZnSe”とした。

年	(a)GaN開発研究		(b)ZnSe開発研究	
	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数
2012	3,597	42688	394	11107
2011	3,655	39091	400	10713
2010	3,210	35436	390	10313
2009	3,049	32226	369	9923
2008	3,080	29177	392	9554
2007	3,036	26097	391	9162
2006	3,005	23061	408	8771
2005	2,689	20056	388	8363
2004	2,279	17367	328	7975
2003	2,171	15088	323	7647
2002	2,237	12917	404	7324
2001	2,094	10680	341	6920
2000	2,052	8586	475	6579
1999	1,889	6534	429	6104
1998	1,336	4645	561	5675
1997	1,425	3309	556	5114
1996	788	1884	527	4558

1995	372	1096	455	4031
1994	171	724	485	3576
1993	106	553	294	3091
1992	50	447	318	2797
1991	54	397	270	2479
1990	20	343	251	2209
1989	17	323	144	1958
1988	17	306	194	1814
1987	12	289	158	1620
1986	24	277	132	1462
1985	10	253	133	1330
1984	12	243	124	1197
1983	21	231	93	1073
1982	22	210	110	980
1981	7	188	102	870
1980	15	181	96	768
1979	10	166	81	672
1978	17	156	89	591
1977	17	139	94	502
1976	15	122	82	408
1975	22	107	75	326
1974	29	85	60	251
1973	17	56	46	191
1972	18	39	57	145
1971	12	21	40	88
1970	9	9	48	48

図 4 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013年8月19日

GaN 開発研究の検索式は“gallium nitride”または“GaN”とした。

MOCVD 開発研究の検索式は“MOCVD”または“MOVPE”または“metalorganic chemical vapor deposition”または“metalorganic vapor phase epitaxiay”とした。

年	(a)GaN開発研究		(b)MOCVD開発研究	
	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数
2012	3,597	42688	367	7590
2011	3,655	39091	451	7223
2010	3,210	35436	430	6772
2009	3,049	32226	368	6342
2008	3,080	29177	453	5974
2007	3,036	26097	501	5521
2006	3,005	23061	442	5020
2005	2,689	20056	497	4578
2004	2,279	17367	686	4081
2003	2,171	15088	510	3395
2002	2,237	12917	483	2885
2001	2,094	10680	419	2402
2000	2,052	8586	468	1983
1999	1,889	6534	484	1515
1998	1,336	4645	331	1031
1997	1,425	3309	354	700
1996	788	1884	206	346



1995	372	1096	67	140
1994	171	724	27	73
1993	106	553	7	46
1992	50	447	5	39
1991	54	397	21	34
1990	20	343	4	13
1989	17	323	3	9
1988	17	306	2	6
1987	12	289	1	4
1986	24	277	2	3
1985	10	253	1	1
1984	12	243	0	0
1983	21	231	0	0
1982	22	210	0	0
1981	7	188	0	0
1980	15	181	0	0
1979	10	166	0	0
1978	17	156	0	0
1977	17	139	0	0
1976	15	122	0	0
1975	22	107	0	0
1974	29	85	0	0
1973	17	56	0	0
1972	18	39	0	0
1971	12	21	0	0
1970	9	9	0	0

図 6 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013年8月19日

GaN 開発研究の検索式は“gallium nitride”または“GaN”とした。

この中から著者が企業に所属する論文を抽出した。

年	(a)GaN開発研究 (学术界全体)		(b)GaN開発研究 (著者が企業に所属)	
	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数
2012	3,597	42688	123	2578
2011	3,655	39091	125	2455
2010	3,210	35436	121	2330
2009	3,049	32226	122	2209
2008	3,080	29177	125	2087
2007	3,036	26097	162	1962
2006	3,005	23061	174	1800
2005	2,689	20056	184	1626
2004	2,279	17367	159	1442
2003	2,171	15088	208	1283
2002	2,237	12917	167	1075
2001	2,094	10680	177	908
2000	2,052	8586	156	731
1999	1,889	6534	153	575
1998	1,336	4645	144	422
1997	1,425	3309	122	278
1996	788	1884	69	156

1995	372	1096	28	87
1994	171	724	11	59
1993	106	553	9	48
1992	50	447	5	39
1991	54	397	8	34
1990	20	343	1	26
1989	17	323	2	25
1988	17	306	3	23
1987	12	289	2	20
1986	24	277	3	18
1985	10	253	1	15
1984	12	243	1	14
1983	21	231	0	13
1982	22	210	0	13
1981	7	188	0	13
1980	15	181	0	13
1979	10	166	0	13
1978	17	156	0	13
1977	17	139	0	13
1976	15	122	0	13
1975	22	107	1	13
1974	29	85	0	12
1973	17	56	3	12
1972	18	39	2	9
1971	12	21	4	7
1970	9	9	3	3

図 8 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013 年 8 月 19 日

Amorphous silicon 開発研究の検索式は“amorphous silicon”または“a-Si”とした。

Amorphous silicon開発研究		
年	年間掲載数	論文累積数
2012	1,573	27178
2011	1,564	25605
2010	1,388	24041
2009	1,397	22653
2008	1,263	21256
2007	1,053	19993
2006	965	18940
2005	961	17975
2004	934	17014
2003	913	16080
2002	979	15167
2001	875	14188
2000	858	13313
1999	854	12455
1998	853	11601
1997	900	10748
1996	1,051	9848
1995	694	8797
1994	607	8103
1993	758	7496
1992	392	6738
1991	593	6346
1990	434	5753
1989	678	5319
1988	451	4641

1987	580	4190
1986	509	3610
1985	775	3101
1984	546	2326
1983	475	1780
1982	345	1305
1981	257	960
1980	218	703
1979	164	485
1978	96	321
1977	77	225
1976	22	148
1975	28	126
1974	20	98
1973	29	78
1972	21	49
1971	10	28
1970	9	18
1969	6	9
1968	2	3
1967	1	1
1966	0	0
1965	0	0
1964	0	0
1963	0	0
1962	0	0
1961	0	0
1960	0	0

図 9 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V)

測定日：2013年12月22日

Amorphous silicon 開発研究の検索式は“amorphous silicon”または“a-Si”とした。

Glow discharge に関連する開発研究の検索式は“plasma enhanced chemical vapor deposition”または，“chemical vapor deposition”または“glow discharge”とした。

年	Amorphous silicon 開発研究		Glow discharge 開発研究	
	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数
2012	1,573	27178	220	5954
2011	1,564	25605	258	5734
2010	1,388	24041	239	5476
2009	1,397	22653	255	5237
2008	1,263	21256	246	4982
2007	1,053	19993	205	4736
2006	965	18940	198	4531
2005	961	17975	228	4333
2004	934	17014	276	4105
2003	913	16080	267	3829
2002	979	15167	267	3562
2001	875	14188	249	3295
2000	858	13313	230	3046
1999	854	12455	240	2816
1998	853	11601	209	2576
1997	900	10748	229	2367
1996	1,051	9848	299	2138
1995	694	8797	198	1839
1994	607	8103	161	1641
1993	758	7496	159	1480
1992	392	6738	81	1321

1991	593	6346	103	1240
1990	434	5753	103	1137
1989	678	5319	114	1034
1988	451	4641	89	920
1987	580	4190	126	831
1986	509	3610	100	705
1985	775	3101	143	605
1984	546	2326	108	462
1983	475	1780	82	354
1982	345	1305	66	272
1981	257	960	58	206
1980	218	703	50	148
1979	164	485	46	98
1978	96	321	21	52
1977	77	225	18	31
1976	22	148	5	13
1975	28	126	3	8
1974	20	98	1	5
1973	29	78	1	4
1972	21	49	0	3
1971	10	28	1	3
1970	9	18	1	2
1969	6	9	1	1
1968	2	3	0	0
1967	1	1	0	0
1966	0	0	0	0
1965	0	0	0	0
1964	0	0	0	0
1963	0	0	0	0
1962	0	0	0	0
1961	0	0	0	0
1960	0	0	0	0

図 11 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013年12月22日

Amorphous silicon 開発研究の検索式は“amorphous silicon”または“a-Si”とした。

この中から著者が企業に所属する論文を抽出した。

年	Amorphous silicon 開発研究		Amorphous silicon 開発研究 (著者が企業に所属)	
	年間掲載数	論文累積数	年間掲載数	論文累積数
2012	1,573	27178	45	2257
2011	1,564	25605	74	2212
2010	1,388	24041	75	2138
2009	1,397	22653	60	2063
2008	1,263	21256	57	2003
2007	1,053	19993	74	1946
2006	965	18940	65	1872
2005	961	17975	69	1807
2004	934	17014	38	1738
2003	913	16080	44	1700
2002	979	15167	46	1656
2001	875	14188	55	1610
2000	858	13313	66	1555
1999	854	12455	68	1489
1998	853	11601	82	1421
1997	900	10748	100	1339
1996	1,051	9848	117	1239
1995	694	8797	69	1122
1994	607	8103	90	1053
1993	758	7496	93	963
1992	392	6738	70	870

1991	593	6346	98	800
1990	434	5753	87	702
1989	678	5319	71	615
1988	451	4641	63	544
1987	580	4190	81	481
1986	509	3610	65	400
1985	775	3101	91	335
1984	546	2326	70	244
1983	475	1780	45	174
1982	345	1305	26	129
1981	257	960	21	103
1980	218	703	20	82
1979	164	485	10	62
1978	96	321	16	52
1977	77	225	9	36
1976	22	148	5	27
1975	28	126	4	22
1974	20	98	3	18
1973	29	78	5	15
1972	21	49	4	10
1971	10	28	1	6
1970	9	18	4	5
1969	6	9	0	1
1968	2	3	0	1
1967	1	1	1	1
1966	0	0	0	0
1965	0	0	0	0
1964	0	0	0	0
1963	0	0	0	0
1962	0	0	0	0
1961	0	0	0	0
1960	0	0	0	0



図 12 の測定結果

データベース：Scopus(オランダ・エルゼビア B.V.)

測定日：2013年5月12日

EUV 露光装置の実用化に関わる開発研究について分析した。半導体製造装置の実用化には、高いスループット(throughput)の確保を目的に開発が進められるため、この開発研究に関わる論文とは、論文タイトル、アブストラクト、キーワードに“EUVL”または“extreme ultraviolet lithography” かつ必ず “throughput”を含むものとした。

EUV露光装置の実用化に関わる開発研究					
年	年間掲載数	論文累積数	年	年間掲載数	論文累積数
2012	17	138	1995	0	0
2011	11	121	1994	0	0
2010	7	110	1993	0	0
2009	12	103	1992	0	0
2008	13	91	1991	0	0
2007	7	78	1990	0	0
2006	6	71	1989	0	0
2005	7	65	1988	0	0
2004	13	58	1987	0	0
2003	5	45	1986	0	0
2002	6	40	1985	0	0
2001	7	34	1984	0	0
2000	14	27	1983	0	0
1999	7	13	1982	0	0
1998	3	6	1981	0	0
1997	2	3	1980	0	0
1996	1	1			

## 研究業績

### 論文(査読付)

①「科学知識の爆発とプロセスイノベーション：青色発光ダイオード製品開発研究の定量分析」品川啓介 玄場公規 阿部惇，研究 技術 計画(2014年5月14日受理，出版年月日等未定)

②「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，ビジネスクリエーター研究 5号 pp.43-55(2014年2月28日)

③“How Natural Scientific Knowledge Influences Growth of the Electronic Device Market.”Shinagawa, Keisuke, Kiminori Gemba, and Atsushi Abe,*Chinese Journal of Management* 26, no.10, pp.1487-1494(October 2011)

### 学会発表(査読付・口頭発表)

①“The Impact of Science-Based Process Innovation on Blue LED Success.”  
The 6th ISPIM Innovation Symposium, Melbourne Convention Centre, Melbourne, Australia.(2013年12月10日)

②“Science-Based Process Technology Impact on Product Success; the LED Case.”  
The 5th ISPIM Innovation Symposium, KCCI Seoul, Korea. (2012年12月12日)

③“The Role of a “Scientific Seed Theory” in Scientific Innovation.”  
The 13th ISPIM Conference, Ramon Llull University Barcelona, Spain. (2012年6月20日)

④「『科学知識の爆発』の要因から探る自然科学依拠型産業の成功事例と失敗事例」  
日本 MOT 学会 第3回年次研究発表会，名古屋工業大学(2012年3月17日)

⑤“The Innovation Process of Dominant Scientific Theory.”  
The 4th ISPIM Innovation Symposium, Victoria University of Wellington, New Zealand. (2011年12月2日)

その他

下記の本に、The 13th ISPIM Conference Barcelona 2012 で発表した内容が“Shinagawa research”として引用(pp.330-334)された。

Towards Organizational Knowledge: the Pioneering Work of Ikujiro Nonaka (The Nonaka Series of Knowledge and Innovation), Edited by Georg von Krogh, Hirotaka Takeuchi, Kimio Kase, and Cesar G. Canton. Hampshire : Palgrave Macmillan.(2013)