

技術パラダイム転換のプロセス：青色LED 半導体材料開発の事例分析

内海, 京久 / Uchiumi, Kyohisa

(出版者 / Publisher)

法政大学イノベーション・マネジメント研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

イノベーション・マネジメント / イノベーション・マネジメント

(巻 / Volume)

14

(開始ページ / Start Page)

65

(終了ページ / End Page)

81

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014656>

<査読付き投稿論文>

技術パラダイム転換のプロセス —青色 LED 半導体材料開発の事例分析—

内海京久

要旨

本稿の目的は、革新技术の開発において、①技術パラダイムはどのようなプロセスを経て転換するか、②新たな技術パラダイムはどのように創造され、そのために大切な要件は何か、を明らかにすることである。近年を代表する革新技术開発の事例として、青色 LED 向け半導体材料開発での 3 つのパラダイム転換に着目し、そのプロセスを調査分析した。その結果、技術パラダイムの転換プロセスの仮説を、「既存の技術パラダイムでの行き詰まり」「解決方法との遭遇」「新たな技術パラダイムの再構成」と考え、事例分析により検証した。また、「解決方法との遭遇」のための新たな概念として「ひらめきの期待試行」を定義し、その成立要件を考察した。

キーワード：イノベーション、革新技术、技術パラダイム、技術蓄積、青色 LED

Abstract

In this paper, I focus the detailed process of technological paradigm shift in technology development of materials in order to consider how to create a new technological paradigm and what important requirements for that are. As an example of recent innovative technology development, I analyze three technological paradigm shift cases in the development of semiconductor materials for blue LEDs. Case studies show that technological paradigm shift consists of three processes: "stalemate in the existing technological paradigm," "encounter of a new resolution," and "reconstruction of a new technological paradigm". I also present the new concept of "expected trial of inspiration" and consider the requirements of it for realizing "encounter of a new resolution" in the technological paradigm shift.

Keywords: Innovation, Technological innovation, Technological paradigm, Technological accumulation, Blue LED

1. はじめに

本稿の目的は、革新技术の開発において、技術パラダイム転換がどのようなプロセスで起こるのか、そのためにはどのような要件が大切なのか、を明らかにすることである。近年の革新技术開発の事例の中でも、特に大きな経済効果を生んだこと、世界中の技術者が開発に取り組んだがなかなか成功させられなかったこと、従来の常識から大きく飛躍した革新技术であったことから、青色 LED 向け半導体材料の技術開発に着目し、その経緯を詳細に調査することで、技術パラダイム転換のプロセスを分析する。

2016年5月9日提出、2016年9月7日再提出、2016年11月22日再々提出、2016年12月16日審査受理。

革新技術は既存技術からの延長とは異なり大きな飛躍を伴うことから、イノベーションの起源として多くの先行研究において注目されてきた。この中で、Dosi (1982) の技術パラダイムの転換は、革新技術開発の重要な概念の1つである。技術開発の目標達成のため、既存の技術パラダイムに代わって、新たな技術パラダイムが創造され選択されることが技術パラダイムの転換である。現実的な技術開発の多くは、経路依存性により既存の技術パラダイムの枠組みに捉われ、新たな技術パラダイムへの転換をすることが難しい。一方で、見事に技術パラダイム転換をして、イノベーションを成功させた事例が世の中には存在する。従って、技術パラダイムの転換のプロセスを解明することは、革新技術の開発を成功させるために、大きな意義があると考えられる。

しかしながら、革新技術開発の既存研究では、技術パラダイムの転換のプロセスとその成立要件への言及はなく、見落とされているようである。これは、技術開発の実際の取り組みの様子が事細かに記録されること、公表されることが少なく分析しにくいこと、成功による情報の変質が大きく、真実のプロセスを後からうかがい知ることが難しいことが原因と考えられる。このため本稿では、詳細な事例研究により、①技術パラダイムはどのようなプロセスを経て転換するか、②新たな技術パラダイムはどのように創造され、そのために大切な要件は何か、について明らかにする。従って、本稿の意義は、技術革新の発生プロセスと成立要件を明らかにすることによる、イノベーション・プロセス研究の深耕と、技術開発の行為主体へ有意義な示唆である。

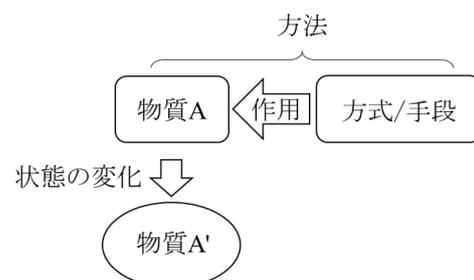
2. 先行研究

2.1 技術開発とは

本稿を進めるにあたり、まず「技術」に関する概念の整理を行う。一言で「技術」といっても、その言葉の示す範囲は広大である。従って、本稿で取り扱う技術の対象範囲は、「物理作用または化学反応により生成できる、単一あるいは複合の材料からなる機能性素材および部材の生成技術」に絞り込んで議論する。広辞苑によると、「技術」とは「科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し、人間生活に利用するわざ」である。また、Arthur (2009) は、技術の定義を、①人間の目的を達成する手段、②実践方法とコンポーネントの組み立て、③文化に役立てることができる装置と工学の集合体、としている。技術は、常に自然の理に依存しており、それを目的達成のために活用または利用できるものである。従って技術を活用するには、現象をうまく制御する必要があると Arthur は述べている。

本稿の目的と技術の対象範囲を考慮すると、本稿の考える「技術」とは、「ある目標を満たすための物質 A' を、物質 A を状態変化させて生み出すための再現性の高い実現方法の知識」と考えられる (図 1)。ここでの実現方法とは、様々な物理的、化学的方式や手段による物質 A への作用を指す。すなわち、本稿における「技術」を、「ある目標を達成するための物質の状態変化を意図的に再現させるための、実行方式、材料、

図1 物質の状態変化と方法の関係



(出所) 筆者作成。

設備手段により設定できる変数の制御方法の知識」と定義する。また、技術において用いられる変数を特に「技術変数」と定義する。

一方、本稿での「科学」は、「世界と現象の一部を対象領域とする、経験的に論証できる系統的な合理的認識」（広辞苑）に基づき、「自然現象の発生メカニズムを、物理学や化学の既存理論の演繹により理論的に説明したもの」と定義し、「技術」と区別する。

次に、「技術開発」とは、一般に顧客ニーズに応えるための課題を解決できる技術を生み出すことと言える。顧客ニーズに応えるための目標に対し、解決すべき課題は階層構造になっており、解決すべき順序がある。このため、技術開発では、それぞれの課題に対して技術的な解決方法の選択と実験検証を試行錯誤的に繰り返して、最善の解決方法を構築していく。この時、課題の階層構造は、対象商品やそのニーズによって一意に決まるものではなく、技術開発の中で新たな課題が明確になることで、次第に形成されていく。

従って、本稿における「技術開発」とは、「想定される顧客ニーズに応じた目標と解決すべき課題を設定し、それらを達成するために、実行方式や材料、設備手段により設定できる技術変数の選択と実験検証を繰り返し、最善の解決方法を構築すること」と定義する。この時の技術メカニズムとは、「方式や材料、設備手段により設定できる技術変数間の因果関係を明示したもの」である。

2.2 技術革新の先行研究

非連続なイノベーションが社会経済、企業の競合へ与えるインパクトは、非常に大きい¹（Schumpeter, 1926）。この非連続なイノベーションを起こすための必要条件が技術革新だと考えられる。技術革新とは、従来技術に無い、または達成可能な機能、性能等を桁違いに上回る、新たな技術が生まれることである。また、伊丹（2009）²はイノベーションを「技術革新の結果として新しい製品やサービスを生み出すことによって人間の社会生活を大きく改変すること」と定義し、技術革新とイノベーションの関係を明らかにしている。

他にも技術革新の重要性に言及した研究は多いが、そのプロセスについては、あまり言及されてこなかった。野中（1990）は、暗黙知と形式知の循環を知の創造の基本と考えて議論の中心としている。これらは主に技術開発の蓄積に基づく既存技術の延長的進化を対象としており、飛躍的な技術革新のプロセスについて深く議論されていない。Nelson and Winter（1982）は、技術変化を含む企業の経済成長の進化モデルを提案している。そこでは、企業の研究開発活動を、ある確率分布に従って新しい技術を思いつくことであるとした。この確率分布は、時間、企業の研究開発方針、そして企業の現行の技術等の関数としてモデル化されており、時間や投資といった入力に対して進化に必要とされる技術が出力されるといった、シンプルなモデルを提唱するに留まっている。

¹ Schumpeter（1926）は、経済発展を新結合（イノベーション）による非連続的变化と捉え、研究問題とした。

² 伊丹敬之（2009）P.2 より抜粋。

2.3 技術パラダイム論

Dosi (1982) は、技術革新を技術パラダイム転換と捉えた。技術パラダイムとは Kuhn (1962) が提唱した科学革命におけるパラダイム転換を、非連続的な技術革新へアナログ的に適用した概念である。Dosi による技術パラダイムとは、「自然科学からひきだされた“特定の”原理、ならびに“特定の”素材技術に基づいた“特定の”技術的問題解決の“モデル”および“パターン”」³である。技術開発における連続的な変化は、既存の技術パラダイムの技術軌道により説明され、飛躍的な技術革新は新たなパラダイムへの転換により説明される (図 2)。

図2 技術パラダイム転換の概念図



(出所) Dosi (1982) より筆者作成。

本稿では、技術を「ある目標を達成するための科学現象を意図的に再現するための、実行方式、材料、設備手段により設定できる変数の制御方法の知識」と定義した。このため、技術パラダイムの定義における技術的問題解決とは、科学現象を意図的に再現する有効な変数を探索することであり、そのための“モデル”および“パターン”が、技術パラダイムと言える。技術パラダイムのあり様は、課題の解決方法そのものであったり、その解決方法の根底にある技術メカニズムや科学理論であったりする場合もある。Dosi によれば、「技術パラダイムは、探究すべきあるいは無視すべき技術変化の“方向”について強力な処方箋を具現化したもの」⁴であり、世界中で常識的に知られ、専門分野内の技術開発の方向性を強力に決定付けるものである。また、技術パラダイムの選択は、経済的、制度的、社会的要因により、「研究から生産関連の技術努力に至る各レベルにおいて、さまざまな可能な“経路”に対して、実行可能性、商品化可能性、収益性等かなりあきらか度ひろい基準に基づいて行われる」と論じている⁵。

技術パラダイム論をベースとした先行研究として、山口 (2004) は「誰もできないと思っていたことをできるようにすること」をパラダイム破壊と定義し、科学の領域においてパラダイム破壊が起こり、これを基とした技術によるイノベーションをパラダイム破壊型イノベーションと定義した。また、山口のパラダイム破壊型イノベーションの議論に基づき、科学の領域に階層性を定義し、技術パラダイム転換の大きさを議論したのが末永 (2006) である。いずれの研究も、技術と科学を定義付けした上で、決定論的な視座で半導体材料開発の技術パラダイム転換について分析をしている。さらに、Castellacci (2008) は、サービス業と製造業におけるパラダイム転換を伴うイノベーションを、技術と流通の 2 軸を使うことで、同じフレームワークにおいて分類している。しかし、Von Tunzelmann et al. (2008) は、技術パラダイムの概念が生まれた背景や、その歴史について整理した上で、現在でも技術パラダイムが十分に理解されておらず、既存の科学に基づいた実行可能な技術、すなわち既存の技術パラダイムを選択しがちであることを指摘している。Leonard-Barton (1995) は、コア・ケイパビリティをマネジメントする上で、それが逆説的にコア・リジディティでもあると述べている。すなわち、既に獲得された技術パラダイムに基づいて技術開発を

³ 今井ら (1989) P.86 より抜粋。

⁴ 今井ら (1989) P.87 より抜粋。

⁵ 今井ら (1989) P.93 より抜粋。

行くと、逆にその技術パラダイムに捉われて、新たな技術パラダイムを生みにくくなることを示唆している。技術パラダイムの転換により革新技術が生まれることはわかっているが、実際に技術パラダイムを転換させることは難しく、大きな課題であることを示唆している。

以上、技術革新についての代表的な先行研究を見てきたが、本稿では、技術革新の現象に言及していると考えられる Dosi の技術パラダイム転換をベースとして、議論を進めていく。しかし、技術パラダイム転換のプロセスについて、先行研究では詳細に言及されておらず、研究の余地が大きい。従って、本稿では事例研究により、①技術パラダイムはどのようなプロセスを経て転換するか、②新たな技術パラダイムはどのように創造され、そのために大切な要件は何か、について明らかにすることを目的とする。

2.4 技術パラダイム転換のプロセス

技術パラダイム転換のプロセスの仮説を立てるため、一般的な革新技術の開発プロセスについて考えてみる。まず、既存の技術パラダイムに基づいて、機能や性能等の目標を達成するために、技術変数の選択と検証を繰り返す。しかし、既存の技術パラダイムで考え得るあらゆる選択肢での実験に関わらず、目標を達成できない場合がある。これを既存の技術パラダイムでの「行き詰まり」と考え、技術パラダイムの転換を図るモチベーションになると考える。ある時、技術開発の行為主体は、新たな解決方法と「遭遇」する。それは、既存の技術パラダイムにおいて演繹的に考察して得られたのではなく、ある日突然常識外れとも言うべき新たな解決方法を得られることに特徴がある。解決方法が見つかり、再現性や制御性といった技術変数間の因果関係を、詳細な追加実験により確認し、新たな技術メカニズムを構築する。さらに、新たな技術メカニズムに基づく最適な技術的方法や条件範囲を導出していく。これにより新たな技術パラダイムが再構成されると考えられる。従って、技術パラダイム転換プロセスの仮説として、①既存技術パラダイムでの「行き詰まり」、②解決方法との「遭遇」、③新たな技術パラダイムの「再構成」、の3つのステップが考えられる（図3）。

図3 技術パラダイム転換プロセスの仮説



(出所) 筆者作成。

2.5 解決方法との「遭遇」

新たな技術パラダイムを生み出すため、解決方法との「遭遇」はどのような役割を担っているのだろうか。Rosenberg (1982) は、「技術的知識は、科学とは無関係に、生身の経験的方法において、長く獲得され、積み上げられてきた」と述べている。また、Polanyi (1966) は、「実存は本質に先立つ」と述べている。すなわち、必ずしも技術の演繹的延長に新たな技術が生まれるわけではなく、むしろ多くの経験的方法により技術が形成されるのである。技術パラダイムの転換において、新たな技術パラダイムは、既存の技術パラダイムと

は全く別の未知の技術メカニズムに基づいているため、既存の技術パラダイムの演繹から見出すことはできない。従って、新たな技術パラダイムは、先に解決方法に遭遇し、その経験的方法から再構築されると考えられる。

では、新たな解決方法にはどのように「遭遇」すればよいのだろうか。これには、新たな解決方法が「偶然見つかる場合」と、「必然的に考えつく場合」の2つのパターンがあると考えられる。革新技术は既存技術からの飛躍であり、ごく一般的に「偶然見つかる場合」を想定しがちである。解決方法が「偶然見つかる場合」とは、意図せず成功の結果が先に示され、その変化への気づきと分析により解決策を見出す場合を示す。レーザーイオン化質量分析技術でノーベル化学賞を受賞した田中耕一は、たんぱく質の質量分析のためのイオン化手法を開発していたが、実験中に間違えてグリセロールとコバルトを混ぜてレーザーを当てたところ、タンパク質をイオン化することに成功したことが知られている⁶。志賀（2015）は、このように解決方法が偶然見つかる場合を、「偶然による実験代行」という概念を用いて、詳細に議論している。しかし、複雑な因果関係を持った多くの変数が偶然に揃うことは極めて稀であり、確率が低い。

一方、「必然的に考えつく場合」とは、自らの頭で解決方法を着想し、実際にやってみることで成功の結果を得て、解決策を見出す場合を示す。これを本稿では「ひらめきの期待試行」と呼ぶこととする。多くの技術開発の現場では、発生確率が非常に低い「偶然」に頼って技術開発を行うよりも、むしろ、技術者や研究者が自らの頭で解決方法を着想し、実験による確認を行うことが一般的だと考えられる。すなわち、日々の技術蓄積の末に、新たなひらめきを得てその成功を確認することで、新たな解決方法を得ていると考えられる。従って、本稿では「ひらめきの期待試行」の概念を中心に事例分析を行うこととする。

3. 研究方法

3.1 研究方法の選択

本稿は、技術パラダイムの転換がどのように起きているかを問うものであり、従来に無い仮説の導出を目的とする。このため、Yin (1994) の提唱する「ケース・スタディの方法」に則り、①研究問題が提示されている、②事象をほとんど制御できない、③現在の現象に焦点がある、といった3つの観点により、事例研究が望ましいと考えられる。

また、本稿の目的は、広い意味で社会現象のメカニズム解明とも言える。沼上（2000）は、環境記述の方法には変数システムと行為システムの2つがあるとし、メカニズム解明のためには主として個別事例研究を用いた行為システムとして、社会システムを記述すべきと述べている⁷。従って、事例研究により、行為者の意図や行為の詳細を解釈することでメカニズムを解明していくことが、より好ましいと考えられる。

事例研究による仮説導出の方法として、Yin による、「事例研究による仮説導出においては、まず中心論理を導くことに重点を置き、単一の事例研究の中で、複数の下位事例によ

⁶ 「科学系ノーベル賞日本人受賞者9人の偉業『2002年田中耕一ノーベル化学賞』国立科学博物館より。
<http://www.kahaku.go.jp/exhibitions/tour/nobel/>に掲載（2016年8月30日アクセス）。

⁷ 沼上（2000）では社会現象における予期せぬ結果について議論しているが、行為システムによるメカニズム解明の文脈は、一般的な社会科学研究へ広く適用可能と考えられる。

る仮説検証を行う」に従い、提唱される6つの証拠源のうち、事後的な調査に適した文書、記録文書、面談の3つとした⁸。すなわち、文書・資料記録（書籍文献、関連する学術論文、特許）での調査による客観的な情報を中心として、関係者への面談調査も実施した。

3.2 分析の枠組み

分析の枠組みとして、先行研究である「技術パラダイムの転換」をベースとした。事例研究における分析の観点、上述の先行研究分析の結果から、以下の3つとした。

- ①既存の技術パラダイム、新たな技術パラダイムとはどのようなものであったか。
- ②どのようなプロセスで新しい技術パラダイムは生まれたか。
- ③新しい技術パラダイムを創造するために、何が大切な要件か。

3.3 事例の選択

事例として、青色LED半導体材料開発を選択した。また、選択にあたり以下の3つの価値に着目した。

- ①技術革新の価値：青色LED半導体材料の技術革新は、近年を代表するイノベーション成功の根幹であり、大きな経済的効果と社会的影響を与えた⁹。
- ②研究対象としての価値：青色LEDのイノベーションで核となった革新技術は、半導体材料の生成技術である。世界中の研究者がその半導体材料の生成技術開発にトライしたが、多くが失敗して撤退した。一方で、青色LED開発を成功させたカギは、3つの革新技術開発によるブレイクスルーであった¹⁰。
- ③必然による飛躍の価値：青色LED半導体材料の技術革新は、偶然ではなく、技術者が考え抜いた上で達成できた、必然による飛躍である。ノーベル賞受賞理由となった3つの功績のうち2つに貢献した天野浩（名古屋大学教授）は、「セレンディピティなんてあるわけない」¹¹と、偶然だけに依存した技術開発ではないことを強調している。

また、事例研究において、構成概念妥当性や信頼性を担保できるよう、Yin（1994）のデータ収集の3つの原則に従った。すなわち、複数の証拠源、公式の証拠の集合、証拠の連鎖である。同じ青色LED半導体材料開発の事例の中には、3つの技術パラダイムの転換事例があり、複数かつ研究範囲から逸脱しすぎない事例間の比較が可能である。また、青色LED半導体材料開発は2014年にノーベル賞を受賞していることもあり、文献が豊富であり、行為主体も存命であることから、詳細な情報を収集しやすい。さらに、事例間の関連性が強いと、リサーチクエスション、仮説と事例間の明示的な結びつき、すなわち証拠の連鎖について検証をしやすいと考えられる。

⁸ 残りの3つ（直接観察、参与観察、物理的人工物）は事後調査に適さないと考えられるため。

⁹ スウェーデン王立科学アカデミーの2014年ノーベル物理学賞受賞理由より。

¹⁰ 平成17年度版『科学技術白書』P.27より。

¹¹ 『週刊東洋経済』2014.11.22、pp.90-91「企業と天才」より。セレンディピティには様々な定義があるが、本文において天野は、偶然によるものではなく努力が大切であることを強調している。

4. 事例研究

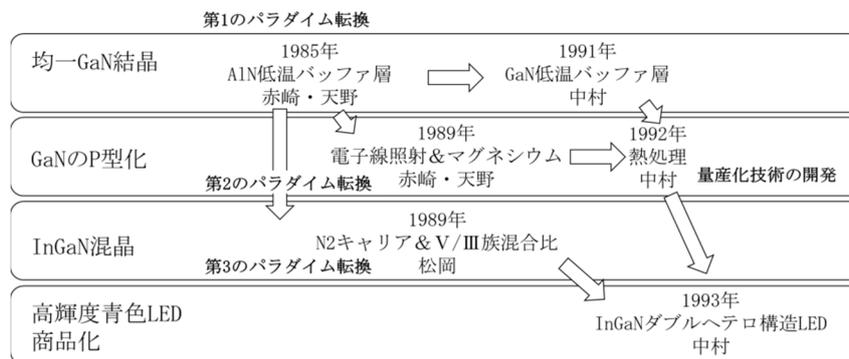
4.1 青色 LED 半導体材料の開発と 3 つの技術パラダイム転換

発光ダイオード (Light Emitting Diode、以下 LED) は、電球に代わる高効率な発光手段として、現在広く世の中に普及している。様々な色を再現するためには光の三原色である赤、緑、青があればよい。赤と緑の LED は 1960 年代までに開発されたが、青色の LED の実現は非常に困難を極め、「20 世紀中には不可能」と言われていた。2014 年 10 月、ノーベル物理学賞が、世界で初めて青色 LED の連続安定発光を実証し、高性能化を達成、世の中に普及させた功績により、赤崎勇 (名城大学終身教授)、天野浩 (名古屋大学教授)、中村修二 (米カリフォルニア大学教授)、の 3 氏に贈られた¹²。

LED は一般的に、基盤上に層状に形成された半導体材料と、電気配線、酸素や水分を防ぐための保護透明カバーによって構成されている。その中で青色 LED を実現するために最も重要な材料は、窒化ガリウム (以下 GaN) を主成分とする半導体材料である。青色 LED の開発が本格化した 1970 年代から 80 年代にかけて、米国を中心とした世界の多く研究者が、当時有望と目されていたセレン化亜鉛 (以下 ZnSe) という半導体材料を選択したのに対し、3 氏は窒化ガリウム (以下 GaN) を選択して LED を開発した。

青色 LED を実現するために、特に重要な革新技術だったのは、①高品位の均一 GaN 結晶をつくること、②GaN を P 型化すること、③窒化インジウムガリウム (以下 InGaN) 混晶をつくること、の 3 つであった。①は赤崎 (当時名古屋大学教授) と天野 (当時名古屋大学大学院博士課程) による AlN 低温バッファ層、②は赤崎と天野による電子線照射 & マグネシウム混合 GaN への電子線照射、③は松岡隆志 (当時 NTT) による、窒素キャリアガスと、原料ガスの V/III 族混合比により実現された (赤崎, 2013 ; 天野, 2015)。これらの革新技術開発は、これまでの常識を覆すものであり、技術パラダイムの転換があった (図 4)。従って、上記 3 つの革新技術 (均一 GaN 結晶、GaN の P 型化、InGaN 混晶) の開発プロセスについて事例調査を行った。

図4 青色LED半導体材料開発の3つの革新技術と関係



(出所)『科学技術白書』(2005)より筆者作成。

¹² 平成 27 年版『科学技術白書』「特集 1 2014 年ノーベル賞受賞の青色発光ダイオードの発明、LED 照明の普及とこれからの展開」より。

4.2 均一 GaN 結晶

1960年代半ば、多くの研究者が青色 LED の開発に着手した。材料はセレン化亜鉛（以下 ZnSe）が主流であり、GaN は難易度が高いことから亜流であった。1969年にマルコフが化学気相成長法（以下 HVPE 法）で GaN 単結晶成長に成功し、パンコフが金属/絶縁体/半導体（以下 MIS）型青色 LED を作製した。しかし、1970年代に、GaN での青色 LED 開発に取り組んでいた多くの研究者は、なかなか結晶の品質が向上しないことから、ZnSe への転向または撤退をした。一方、ZnSe も、結晶が脆いため輝度や発光寿命が伸びず、青色 LED 半導体材料の開発は世界的な行き詰まりを見せていた（赤崎, 2013）。

松下電器東京研究所にいた赤崎は、1974年に分子線エピタキシー法（以下 MBE 法）による GaN 単結晶成長に成功。続いて、1978年に HVPE 法による MIS 型青色 LED の商品化に成功した。しかし、明るさが暗く寿命も短かった。このため、MIS 型よりも明るい PN 接合（P 型半導体と N 型半導体を接合したもの）による青色 LED を開発することとした。そのためにまず解決すべき課題を「欠陥が非常に少ない均一 GaN 結晶の成長」とした。電気的特性を得るために、まずは均一な結晶成長をさせることが優先と考えたのである。そして、結晶成長方法は有機金属化学気相法（以下 MOVPE 法）、基板はサファイアを選択した（赤崎, 2013）。

1981年、赤崎は松下電器から名古屋大学へ移籍し、本格的に GaN 結晶成長に取り組み始めた。均一な GaN 結晶を得るために、加熱されたサファイア基盤上への反応ガスの当て方を試行錯誤した。加熱温度パターンやガスの濃度比率といった成長条件調整に加え、反応管の改良、ガス流量、基盤の位置・角度等を調整することで、均一な厚みの結晶を作ることができるようになった。しかし、結晶内の欠陥が非常に多く、電気特性が悪いことが問題であった。主な原因は、基盤のサファイアと GaN の格子定数のギャップであった。これが約 15%あることと熱膨張係数の差が大きいことにより、結晶が規則正しく成長しないため、十分な電気特性を得られなかった。この問題を解決するために、あらゆるアイデアを試したがなかなかうまくいかなかった。当時の結晶成長の主流の考え方は、「基盤と結晶の格子定数を合わせること」と、「平滑できれいな基板上に精密に原子を成長させること」であり、これが既存の技術パラダイムであった。従って、サファイア上に GaN 結晶を成長させるには、サファイアおよび GaN 結晶表面を清浄に保つ必要があり、結晶表面が汚れると規則正しい結晶は成長しないと考えられていた。当然、天野もその考えに従っていた（赤崎, 2013）。

なかなかうまくいかない状況の中、同じ研究室の澤木宣彦（当時名古屋大学助教授）が、基盤と結晶の格子定数を合わせるためのアイデアとして、バッファ層を天野に提案した。澤木のシリコン（以下 Si）上へのリン化ホウ素（以下 BP）成長の研究において、リン原子をバッファ層として用いるときれいな結晶を得られたからである。赤崎は天野にバッファ層の材料として、窒化アルミ（以下 AlN）を勧めた。GaN と格子定数が近いこと、基板であるサファイアにアルミ原子が含まれること、過去に赤崎自身が AlN の研究を行っており多くの知見があったこと、が理由であった。しかし、1500回にも及ぶ試行錯誤にも関わらず、均一な GaN 結晶は得られなかった（天野, 2015）。

その後1年以上経過したある日、天野が毎日使っている結晶成長装置の電気炉の調子が悪く、目標の 1000℃に対し、850℃程度までしか結晶成長温度が上がらなかった。天野は

電気炉を修理して、早く本来の実験を始めたかったという（天野, 2005）。この時、AlN 低温バッファ層のアイデアをひらめいた。低温で AlN をサファイア上に成長させると、均一に汚れたような結晶が形成されるということを知っていた。そこに、澤木の「汚い結晶表面でも良い場合がある」という言葉を思い出し、低温で AlN の薄いバッファ層を形成した後に GaN 結晶を成長させてみようと考えた¹³。BP 結晶成長の事例から、薄い AlN 結晶の核をサファイア上に先につけると、GaN 結晶は通常の垂直方向ではなく、平面方向に成長するため結晶欠陥を減らせると考えたのである。そこで、まず低温で AlN の薄膜をサファイア基板上に成長させ、電気炉が直った後に 1000°C で従来と同じ方法で GaN を成長させた。この結果、GaN 結晶の平坦性、電気的特性、光学的特性を飛躍的に向上させることに成功した。新たな GaN 結晶成長の解決方法を見出したため、成長条件を変化させた時の結晶の断面観察や、結晶成長中の回折現象の分析等により、AlN 低温バッファ層の結晶核による GaN 結晶成長のメカニズムの解明が進み、結晶成長条件が最適化され、新たな技術パラダイムが生まれた。これらの情報は、論文や学会を通じて公知となり、次なる技術開発のベースとなった（天野, 2015）。

4.3 GaN の P 型化¹⁴

AlN 低温バッファ層により均一な GaN 結晶を得た赤崎と天野にとって、次の技術開発目標は、「GaN の P 型化」であった。P 型化とは、半導体にプラスの電気的性質を持たせることである。「III/V 族半導体に II 族原子を混ぜれば P 型化する」という技術パラダイムに則り、多くの研究者によって試行錯誤がなされたが P 型化しなかった。GaN は結晶成膜された状態で N 型（マイナスの電気特性）であり、原理的に II 族原子を混ぜても P 型にならない¹⁵とまで言われおり、天野は途方にくれていたという（天野, 2005）。

1987 年、天野は赤崎にインターンシップとして NTT 武蔵野通信研究所へ行くことを勧められ、ガリウムヒ素（以下 GaAs）のカソードルミネッセンス（以下 CL）の実験をした。そこで、名古屋大学で作製した亜鉛を混ぜた GaN 結晶の CL 実験を行い、電子線を照射すると発光強度が増していくという現象に気づいた。この時そのメカニズムは不明であったが、電子線により GaN 結晶中の亜鉛原子が活性化すると推定した。しかし、P 型化の手段は II 族原子を混ぜることが常識であり、電子を照射してプラスになることは常識からは考えられず、実際電子線照射だけでは P 型化しなかった。その後、たまたま専門書を読んでいる時に、これまで検討していた亜鉛より、電子親和力の大きいマグネシウムの方が P 型化しやすいのではないかと考えた。そこで、1 年かけて材料を輸入し実験で効果確認をしたが、残念ながら P 型化しなかった（天野, 2005）。

そんなある日、マグネシウムを混ぜた GaN に電子線を照射すると P 型化するのではないかとひらめいた。以前、亜鉛を混ぜた GaN に電子線照射しても P 型化しなかったが、マグネシウムは亜鉛より活性化しやすいため、いけるかもしれないと考えた。すぐに鬼頭雅弘（当時名古屋大学大学院修士課程）に実験を指示した結果、電気抵抗が大幅に減少し、P

¹³ 名古屋大学における天野教授のノーベル賞受賞記者会見（2014 年 10 月 10 日朝）より。

¹⁴ 2016 年 10 月 14 日 13:00-15:00 の鬼頭へのインタビューより。

¹⁵ パンコフの主張する「自己補償効果」により、GaN に II 族原子を混ぜてプラス化（P 型化）しようとしても、電子が供給されてマイナス化（N 型化）してしまうと言われていた。

型であることを確認できた。これにより 1989 年、天野は PN 接合型の青色発光ダイオードを世界で初めて製作できた¹⁶ (天野, 2005)。

電子線照射による P 型化という新たな解決方法を見出したため、その後、マグネシウムを混ぜて GaN 結晶を成長させただけでは、マグネシウムはガリウムの中に混ざらないが、電子線照射することでマグネシウムがガリウムの中に入り、電気的特性を持つというメカニズムが判明した。これにより、「Ⅲ/V 族半導体に Ⅱ 族原子を混ぜれば P 型化する」という既存の技術パラダイムに対して、「GaN にマグネシウムを混ぜて電子線を照射する」という新たな技術パラダイムを生み出した (天野, 2015)。

4.4 InGaN 混晶¹⁷

1987 年、NTT の松岡は通信用半導体レーザー (InGaAsP/InP) を開発した後、青色半導体レーザーを作るため、厚木電気通信研究所から茨城研究所へ自ら移った。まずは、発光波長制御可能な青色 LED を作製することとし、窒化インジウムガリウム (以下 InGaN) に着目した。インジウムとガリウムの混晶による発光波長制御は、それまで取り組んできた通信用半導体レーザー開発での常識であり、これを技術開発目標に設定した。そこでまずは、すでに天野らにより公知となっていた MOVPE 法による AlN 低温バッファ層を用いて、GaN の結晶成長技術を約 1 年かけて習得した。

難易度の高い InGaN の前に、まずは窒化インジウム (以下 InN) の結晶成長に着手したが、なかなか結晶化できなかった。ある時、部下の佐々木徹が原料ガスを反応管へ流すためのキャリアガスとして、窒素を使用しているのを見てひらめきがあった。当時、キャリアガスには不純物除去が容易な水素ガスを使用するのが、松岡のいたデバイス分野での常識であった。しかし、佐々木は不純物混入の重要性を理解しておらず、安価で取り扱いやすい窒素を使用していたのである。松岡は、そこで水素キャリアガスが、InN の窒素原子の原料となるアンモニアの分解を阻害している可能性を疑い、窒素を使用してみることとした。結果、InN の結晶化に成功した。

InN の結晶化には成功したものの結晶性がまだ極めて悪かった。ある時、GaAs、GaN、InN といったⅢ/V 族半導体の気相・固相間の平衡蒸気圧のデータを見て、InN の平衡蒸気圧が従来の GaAs や GaN に比べて桁違いに高いことに気づいた。結晶成長温度を 1000°C とすると、窒素の原料であるアンモニアガスの圧力を 10 万気圧と非常に高压にする必要があり、設備的に不可能な領域であることがわかったのである。一方、結晶成長温度を下げる、圧力を下げられるが反応が進まない、といったトレードオフに直面した。

そこで松岡は、アンモニアの流量を桁違いに増加させる方法をひらめいた。平衡蒸気圧を下げるために結晶成長温度を低温にすることで反応性が低くなっても、窒素の供給量が多ければ反応量を補えると考えた。従来の結晶成長技術において、インジウムやガリウムといったⅢ族原子の原料ガスと、窒素等の V 族原子の原料ガスであるアンモニアの混合比率である「V/Ⅲ族ガス混合比」は 100 程度であった。これに対して、結晶成長温度 500°C、V/Ⅲ族ガス混合比 160 万とすることで、InN の単結晶成長に成功した。温度とガス混合比

¹⁶ Amano, H., Kito, M., Hiramoto, K., and Akasaki, I. 1989. *P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEPI)*, Jpn. J. Appl. Phys. Lett. 28, L2112.

¹⁷ 中嶋 (2003)、天野 (2015)、2016 年 2 月 8 日 10:30-13:00 の松岡へのインタビューより。

は、いずれも従来の常識から大きく外れていた。実現にあたり、流量増に対応した設備の改造と、アンモニア排ガス処理の問題が立ちはだかった。しかし、自ら真空装置メーカーを回って22台の設備調査を行い、流量制御や排ガス処理の方法を考案し、実験設備を作り上げた。InGaNの結晶成長は、InNの結晶成長方法を基に、結晶成長温度と原料ガス流量を変化させて実験した。この結果、結晶成長温度800°C、V/Ⅲ族ガス混合比1万6千という条件で、見事InGaNの結晶を得ることができた。その後、インジウムとガリウムの組成制御性等について実験を進め、「結晶成長温度800°C、V/Ⅲ族ガス混合比1万6千」という新たな技術パラダイムを生み出し、1989年の応用物理学会春季講演会で公表、1990年に論文発表した¹⁸。

5. 考察

5.1 技術パラダイム転換のプロセス

上記事例研究により、技術パラダイム転換プロセスの仮説を検証する。まず、既存の技術パラダイム、新たな技術パラダイムとはどのようなものであったか。均一GaN結晶成長の事例では、「結晶成長前にできる限り表面を清浄に保つ」という結晶成長学の常識とも言える技術パラダイムに対して、「結晶表面が汚い低温バッファ層」という新たな技術パラダイムを生み出した。GaNのP型化の事例では、「Ⅱ族原子を混ぜる」という既存の技術パラダイムに対して、「電子線照射」という、従来のP型化の理論からは想像もつかない新たな技術パラダイムを生み出した。InGaN混晶成長の事例では、「V/Ⅲ族ガス混合比は約100」という既存の技術パラダイムに対して、「V/Ⅲ族ガス混合比1万6千」という桁違いのガス混合比が新たな技術パラダイムとなった。

では、どのようなプロセスで新しい技術パラダイムは生まれたのだろうか。3つの事例では、既存の技術パラダイムに則り技術開発が行われたが、長期間の取り組みにも関わらず目標を達成できず、「行き詰まり」とも言える状態にあった。ところが、ある日新たな解決方法を突然ひらめき、実際に実験を行って成功した。それぞれの解決方法は、均一GaN結晶成長の事例では、「AlNの低温薄層の上にGaNを成長させる」、GaNのP型化の事例では、「マグネシウムを混ぜて電子線を照射する」、InGaN混晶成長の事例では、「結晶成長温度を下げてアンモニア反応ガスを大量に流す」であった。これらはいずれも既存の技術パラダイムからは演繹的に推測不可能な方法であった。さらに、行為主体が新たな解決方法を突然ひらめき、試行して成否を確認する、すなわち「ひらめきの期待試行」により新たな解決方法に「遭遇」した。いずれの事例も新たな解決方法を見出した後、新たな技術変数の制御性や再現性を確認することで、新たな技術パラダイムが再構成され、学会発表や論文を通して世の中に知られていった。すなわち、技術パラダイムの転換プロセスにおいて、既存の技術パラダイムでの行き詰まりの後、解決方法との遭遇を経て、新たな技術パラダイムが再構成されていったと言える。

新しい技術パラダイムを創造するために、何が大切な要件であったか。新しい技術パラダイムは、既存の技術パラダイムからは演繹的に類推不可能な常識外れの方法であった。

¹⁸ Matsuoka, T., Tanaka, H., Sasaki, T., and Katsui, K. 1990. *Wide-Gap Semiconductor (In,Ga)N*, in Inst. Phys. Conf. Ser., 106, pp. 141-146.

従って、まず行為主体が新たに解決方法をひらめくこと、そしてそのアイデアが成功すると期待して試行することで成否を確認すること、これら2つが大切な要件と考えられる。ただし、単なる思いつきや偶然のアイデアというわけではなく、行為主体が行き詰まりの中で多くの技術蓄積をした後で、自らの頭の中で新たな解決方法を着想し、成功を確信して実際に試行することで、解決方法であることを初めて認識できるという点が重要である。とはいえ、技術開発の場で「ひらめきの期待試行」が頻繁かつ簡単に起こるわけではない。そこで、「ひらめき」と「期待試行」の成立要件についてさらに考察を行う。

5.2 ひらめきはどのように生まれるか

まず、「ひらめき」の定義について考察する。技術の「ひらめき」について、Arthur (2009) は、「アイデアがひらめくと障害は取り除かれ、下位の原理を実用的に組み合わせて作った包括的な原理か、包括的な原理を実用化する礎となる下位の原理のような形を取る」と述べている。本稿において、技術を「変数の制御方法の知識」と定義した。従って、本稿では「ひらめき」を「隠れていた技術変数を見出すことで、解決のための現象のメカニズムの大筋を描けること」と定義する。

では、ひらめきはどのように生まれるのであろうか。Arthur (2009) は、「ひらめきはチーム全体ではなく個人に訪れ、それは常に個人の潜在意識から湧き出てくる」と述べている。さらに新しいメカニズムのアイデアは他の目的や分野でそれを使っているところから現れ、過去の経験や同僚の発言、何かの理論をヒントに導きだされたりすると述べている。また、Young (1975) は、新たなアイデアを生むことは、「既存の要素を新しく組み合わせること」「事実間の関連性を見つけること」であると述べている。従って、技術開発における新たな解決方法のひらめきは、行為主体があるきっかけにより、既存の技術パラダイムに則った実験検証の結果得られた「既存の技術変数間の関係性」と、取り組んでいる技術開発と間接的に関係する技術情報の中から新たに得た「キー技術変数」を組み合わせることで生まれると考えられる。

「キー技術変数」とは、新たな解決方法において中心的な効果をもたらす技術変数である。既存の技術パラダイムでの実験検証で得られる技術変数間の関係性は、あくまで断片的であり、新しい解決方法を構成する現象のメカニズムが明示されることはない。しかし、ある時新たな「キー技術変数」を見出すことで、断片的であった技術変数間の関係性がすべてつながりを持ち、現象のメカニズムの大筋が描ける。これが「ひらめき」と考えられる。「キー技術変数」だけでは単なる思いつきにすぎない。現象のメカニズムを描くには、そのために十分な「既存の技術変数間の関係性」を、行為主体による多くの実験検証で、事前に構成する必要がある。Polanyi (1966) は、「問題を考察するとは、隠れた何かを考察すること。まだ包括されていない個々の諸要素に一貫性が存在することを、暗に認識すること」と述べている。まさに、「行き詰まり」の中で解決方法を模索している行為主体は、既存の技術パラダイムの中で「技術変数間の関係性」を構築しながら、「キー技術変数」の出現を暗に認識していると考えられる。

また、「ひらめき」に必要な「技術変数間の関係性」を構築するには、技術開発の突破点を絞り込むことが大切だと考えられる。技術変数とその組み合わせは無限に存在するため、対象を絞り込まないと現実的に実験検証できないからである。さらに、技術開発の突

破点、すなわち解決すべき問題が不適切だと、どんなに実験を積んでも解決策は得られないからである。均一 GaN 結晶成長の事例では、赤崎が長年の研究結果より GaN とサファイアの結晶界面の欠陥を無くすことを突破点と定め、天野が 1500 回にも及ぶ実験に集中して取り組み、低温薄膜という「キー技術変数」を見出した。GaN の P 型化の事例では、天野はドーブした II 族原子の活性化を突破点とし、約 3 年にわたり実験を行い、電子線照射という「キー技術変数」を見出した。InGaN 混晶の事例では、まずは難易度の低い InN を対象に、窒素原子を結晶内で結合させることを突破点とし、約 2 年にわたり実験を行い、アンモニアの流量増大という「キー技術変数」を得ている。いずれの事例も、過去の知見から独自の突破点を絞り込み、長年の実験を経て「キー技術変数」を得ている。

新たな「キー技術変数」は、どのように見出されるのだろうか。事例研究により、ある時連想した「常識の例外」から類推することで得られると考えられる。「常識の例外」とは、「常識的にはうまくいかない」と推論できるが、例外的に効果がある事例や現象のことである。均一 GaN 結晶成長の事例では、AlN 結晶成長での低温薄膜という「キー技術変数」を、偶然起きた電気炉の故障をきっかけに、澤木の BP 結晶成長で結晶表面が汚くても良い場合があるという、結晶成長の常識から外れた、しかし例外的に効果のある事例から類推した。GaN の P 型化の事例では、P 型化の常識から外れているが、Zn ドープ GaN への電子線照射による発光強度増大という「常識の例外」から、電子線照射によるマグネシウムの活性化を類推した。InGaN 混晶の事例では、低温では窒素原子が結晶化しないという常識に対し、低温でもアンモニアガスが分解反応するという「常識の例外」により、アンモニアの流量増大を類推した。従って、技術開発における「ひらめき」は、行為主体が以下の 5 つの要件を満たすことで生まれると考えられる。

- ①技術開発における「突破点」の絞り込み。
- ②行為主体の実験による「既存の技術変数間の関係性」の構築。
- ③「常識の例外」の連想。
- ④「常識の例外」からの新たな「キー技術変数」の類推。
- ⑤「技術変数間の関係性」と「キー技術変数」の組み合わせ。

ただし、これらの概念とその関係性はあくまで仮説の域を出ないため、今後複数の事例研究による考察により、論理の精緻化が必要である。

5.3 期待試行とは何か

「期待試行」は、ひらめいた解決方法を実際に実験してみようと思えることである。ひらめきだけでは、単なるアイデアのみであり、解決方法を見出すことはできない。試行によってひらめいた方法で問題が解決できることを実証することが必要である。また、試行には実際に実験検証するための大きな労力が必要である。既存の技術パラダイムを逸脱した行為であるため、実験材料や設備の準備、所属する組織の説得等が必要となり、試行に躊躇するかもしれない。このため、ひらめいた解決方法の成功を強く期待できることが必要である。従って、期待試行するための成功への強い確信を得るには、「自前の理」と、「実行可能性」の 2 つが必要だと考えられる。

「自前の理」とは、着想した解決方法で成功できると考える自分なりの根拠である。新たなアイデアは、着想した後から、その妥当性について論理付けされる。緻密な論理付け

ができる、自分なりに成功を確信でき、「やってみよう」と思えると考えられる。

「実行可能性」とは、現実的に実験できそうであることである。いかに「自前の理」が緻密でも、実行できないと解決方法としての確認ができない。新たな解決方法は、これまでに実行したことは無い、やってみないとわからないことが多いはずである。しかし、それでもできると思えるためのポイントは、「制御可能な変数であること」「設備インフラや材料が世の中にありそうであること」「組織的な制約（リソースや意思決定）が少ないこと」の3つだと考えられる。まず、実行したことがなくても物理学や化学等で想定される、または実験設備で制御可能な変数であれば、実行可能と思えるであろう。次に、設備インフラや材料が世の中に存在していれば、投資金額や入手時間の問題はあるものの、実行可能である。さらに、技術開発方針、予算、マンパワー、実働時間といった組織的な制約も、実行の可否を決定するため、実行可能性に影響する要因だと考えられる。

均一 GaN 結晶成長の事例では、AlN 結晶の核をサファイア上に先に薄く汚くつけると、GaN 結晶は通常の垂直方向ではなく、平面方向に成長するため結晶欠陥を減らせると「自前の理」を考えた。成長温度を下げることや薄膜にすることは装置上簡単にできるため、すぐに試行することができた。GaN の P 型化の事例では、以前に亜鉛を混ぜた GaN に電子線照射しても P 型化しなかったが、発光強度が増すことから結晶内が活性化しているということと、マグネシウム原子は亜鉛より活性化しやすいことから、P 型化するかもしれないという「自前の理」を考え、すぐに試行してみようと考えた。「実行可能性」にしても、すでにマグネシウムを混ぜた GaN 結晶を成長させていたことと、電子線照射の実験もしていたため、すぐに実行可能と考えた。InGaN 結晶成長の事例では、低温でアンモニアの分解反応量が少なくても、アンモニアの供給量を桁外れに増やせば、必要な分解反応量を補えるかもしれないという「自前の理」を考えた。アンモニアガスの流量を増やすための設備インフラが対応していなかったが、設備を改造すれば実行可能と考えた。このように、3つの事例において、「ひらめき」の後に「自前の理」と「実行可能性」があつてこそ、「期待試行」が行われると考えられる。ただし、少ない事例の中での考察であるため、複数の事例研究による論理の精緻化が今後必要と考えられる。

6. まとめ

本稿の目的は、革新技术の開発において、①技術パラダイムはどのようなプロセスを経て転換するか、②新たな技術パラダイムはどのように創造され、そのために大切な要件は何か、を明らかにすることである。そこで、青色 LED 向け半導体材料の開発におけるパラダイム転換の事例に着目し、3つの技術パラダイム転換について分析し、その転換プロセスと要件について、一定の仮説を得ることができた。技術パラダイム転換のプロセスモデルは、①既存の技術パラダイムでの行き詰まり、②解決方法との遭遇、③新たな技術パラダイムの再構成、であると考えられる。また、技術開発の行為主体が自ら解決方法を着想することを「ひらめきの期待試行」と定義し、その要件を事例から考察した。「ひらめき」の要件は、①技術開発における「突破点」の絞り込み、②行為主体の実験による「既存の技術変数間の関係性」の構築、③「常識の例外」の連想、④「常識の例外」からの新たな「キー技術変数」の類推、⑤「技術変数間の関係性」と「キー技術変数」の組み合わせ、

の5つである。「期待試行」の要件は、「自前の理」と「実行可能性」の2つと考えられる。これらの要件は、技術パラダイム転換をするための、技術開発の行為主体への示唆と捉えられる。ただし、今後複数の事例研究による、論理の精緻化が必要である。

最後に、革新技術の開発において、日々技術パラダイムの転換を目指し、真剣に取り組んでいる技術者がいる。そういった行為主体、およびそれらの管理者にとって、技術パラダイム転換がどのように起こるのかを理解して技術開発に取り組むことは、革新技術開発の成功の可能性を高めるため、とても意義のあることだと考えられる。特に、技術パラダイム転換プロセスにおける、「常識の例外」からの新たな「キー技術変数」の類推という概念は、科学に依拠した演繹的な技術開発を教育されがちな技術開発の現場で有効な示唆と考えられ、今後それらの論理深耕を進めると共に、実践での効果の確認が望まれる。

参考文献

- 赤崎勇 (2013) 『青い光に魅せられて 青色 LED 開発物語』 日本経済新聞出版社。
- 天野浩 (2005) 『窒化ガリウム青色発光デバイスの開発における情熱、苦闘そして克服』 武田計測先端知財団。
- 天野浩 (2015) 『天野先生の「青色 LED の世界」』 講談社。
- 伊丹敬之 (2009) 『イノベーションを興す』 日本経済新聞出版社。
- 今井賢一編、川村尚也訳 (1989) 『プロセスとネットワーク』 NTT 出版。
- 志賀敏宏 (2015) 「セレンディピティの構造研究」 東京理科大学大学院博士学位論文。
- 末永啓一郎 (2006) 「技術パラダイムの階層性」 『城西大学経済経営紀要』 第 33 巻、pp.1-13。
- 中嶋彰 (2003) 『「青色」に挑んだ男たち』 日本経済新聞出版社。
- 沼上幹 (2000) 『行為の経営学』 白桃書房。
- 野中郁次郎 (1990) 『知識創造の経営』 日本経済新聞社。
- 山口栄一 (2004) 「イノベーションの構造—パラダイム破壊型イノベーションとは何か—」 ITEC Research Paper Series, 04-13。
- Arthur, B. W. 2009. *The nature of technology: What it is and how it evolves*. New York: Simon & Schuster/Free Press. (有賀裕二監修、日暮雅通訳 『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』 みずず書房、2011 年)
- Castellacci, F. 2008. Technological paradigms, regimes and trajectories: Manufacturing and service industries in a new taxonomy of sectoral patterns of innovation. *Research Policy*, 37: 978-994.
- Dosi, J. 1982. Technological paradigms and trajectories. *Research Policy*, 11: 147-162.
- Kuhn, T. S. 1962. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press. (中山茂訳 『科学革命の構造』 みずず書房、1971 年)
- Leonard-Barton, D. 1995. *Wellsprings of knowledge: Building and sustaining the sources of innovation*. Boston, MA: Harvard Business School Press. (阿部孝太郎・田畑暁生訳 『知識の源泉 イノベーションの構築と持続』 ダイヤモンド社、2001 年)
- Nelson, R. R., & Winter, S. 1982. *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge, MA:

- Belknap press, Harvard University. (後藤晃・角南篤・田中辰雄訳『経済変動の進化理論』慶應義塾大学出版会、2007年)
- Polanyi, M. 1966. *The tacit dimension*. Garden City, NY: Doubleday. (高橋勇夫訳『暗黙知の次元』ちくま学芸文庫、2003年)
- Rosenberg, N. 1982. *Inside the black box : Technology and economics*. Cambridge: Cambridge University press.
- Schumpeter, J. A. 1926. *Theorie der wirtschaftlichen entwicklung*. (塩野谷祐一・中山伊知郎・東畑精一訳『経済発展の理論』岩波文庫、1977年)
- Von Tunzelmann, N., Malerba, F., Nightingale, P., & Metcalfe, S. 2008. Technological paradigms: past, present and future. *Industrial & Corporate Change*, 17: 467-484.
- Yin, R. K. 1994. *Case study research*. Thousand Oaks, CA: Sage publications. (近藤公彦訳『ケース・スタディの方法』千倉書房、1996年)
- Young, J. W. 1975. *A technique for producing ideas*. Illinois: NTC Business Books. (今井茂雄訳『アイデアの作り方』阪急コミュニケーションズ、1988)

内海京久 (うちうみ・きょうひさ)

東京理科大学大学院イノベーション研究科イノベーション専攻博士後期課程