

氏名（本籍）	うち うみ きょう ひさ 内 海 京 久（東京都）
学位の種類	博士（技術経営）
学位記番号	甲第8号
学位授与の日付	2018年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	技術ブレイクスルーの構造研究 －青色LED半導体材料開発事例に基づく新 たな仮説の提示－

論文審査委員 （主査）教授 宮永 博史
教授 平塚 三好 教授 宮永 雅好
嘱託教授 橘川 武郎 嘱託教授 荒木 勉

論文内容の要旨

第1章 問題意識

本研究の目的は、革新技術の開発において、技術ブレイクスルー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。この問いに対し、青色LED向け半導体材料の3つの技術ブレイクスルーに着目し、その経緯を詳細に調査、分析することで仮説を導出した。さらに、有機材料開発の技術ブレイクスルーである、HAB（ヘキサアリールベンゼン）の化学合成技術開発の事例を、上記仮説で説明できることを確認した。

革新技術は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、技術ブレイクスルーは、既存の技術や科学理論からは推測し得ない新たな技術により、実現不可能と思われた既存技術の限界を突破し、今までにない高い目標を達成することであり、競争優位に立つための強い差別化の源泉である。

しかしながら、現実の技術開発の多くでは、経路依存性により既存技術の枠組みに捉われ、非連続的な革新技術を新たに創造することが難しいにもかかわらず、技術開発の現場では技術ブレイクスルーをするための明確な指針は無い。同時に、イノベーション・プロセス研究の分野で、技術ブレイクスルーのプロセスとその成立要件への言及はなく、リア

ルな技術開発のプロセスの解明が見落とされているようである。

従って、本研究では、研究対象となる行為主体を技術者、技術の範囲を「機能性材料の生成技術」として、以下により技術ブレイクスルーの構造を明らかにすることを目的とした。

- ① 技術ブレイクスルーはどのようなプロセスを経て実現するか
- ② 技術ブレイクスルーを実現するために必要な要件は何か

第2章 先行研究と仮説モデル

本研究での「技術」は、Dosi (1982)、Arthur (2009)の定義により、「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、設備手段により設定できる変数の制御方法の知識」とした。

技術ブレイクスルーは、非連続的な革新技術を創造する現象 (Dosi, 1982; Foster, 1986) の1つの類型であり、「既存の技術や科学理論の限界を突破した新たな技術により、実現不可能と思われた高い目標を達成すること」と定義する。また、連続的な革新技術 (Rosenberg, 1969; Klein and Rosenberg, 1986; Abernathy and Utterback, 1978; Foster, 1986)、および新たな科学理論に基づく非連続的な革新技術 (山口, 2006) との区別をした。

技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説を、①既存技術での「行き詰まり」、②解決方法との「遭遇」、③革新技術の「再構成」とした。その中で解決方法との「遭遇」について、意図しない偶然による場合 (伊丹, 1986; 藤井, 2002; 志賀, 2015) と意図する「ひらめきの期待試行」による場合を提示した。

本研究では、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、日々の技術蓄積の末に新たなひらめきを得ることの方が、より技術開発の現場でく求められると考え、「ひらめきの期待試行」の概念を中心に事例分析を行なった。

第3章 事例研究

本章では、技術ブレイクスルーの事例研究として、青色 LED 半導体技術開発の事例を調査した。

(1) 均一 GaN 結晶

1970年代、青色 LED 半導体材料の開発が世界的な行き詰まりを見せる中、赤崎勇 (当時名古屋大学教授) は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、MOVPE 法とサファイア基板に実験手段を絞り込んだ。赤崎の研究室に入った天野浩は、当時の結晶成長の常識に則り、加熱されたサファイア基盤上への反応ガスの当て方と流量を調整する実験を約 1500 回行ったが全て失敗であった。ある日、結晶成長装置の電気炉の温度が上がらないことから、澤木宣彦 (当時名古屋大学助教授) 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、低温バッファ層を予め形成する方法をひらめいた。早速実験で確認し、均一な GaN が得られた。

(2) GaN の P 型化

赤崎と天野は GaN の P 型化に取り組んだ。既存技術に則り、約 2 年かけて亜鉛を GaN 結晶に様々なガス流量や比率、温度の条件で混ぜたが失敗が続いた。NTT のインターンで GaN 結晶に電子線を照射すると発光強度が増していくという現象や、専門書を読んでいる時に、亜鉛よりマグネシウムの方が P 型化しやすいことに気づき実験したが P 型化しなかった。その後ある日、マグネシウムを混ぜた GaN に電子線を照射することをひらめき、実験をしてみた結果、P 型化を確認した。

(3) InGaN 混晶

1987 年、松岡 (NTT 茨城研究所) は窒化インジウムガリウム (以下 InGaN) の混晶成長に着手した。ガスの流量や基板温度の様々な条件で実験したが、約 1 年間なかなか結晶化できなかった。しかし、結晶成長温度と平衡蒸気圧がトレードオフになる問題に対して、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。実験して確認した結果、InGaN 混晶の成長に成功した。

第 4 章 仮説モデルの検証

青色 LED 半導体材料開発の 3 つの技術ブレイクスルーの事例研究により、「既存技術での行き詰まり」「新たな解決方法との遭遇」「革新技術の再構成」の 3 つのプロセスを経ていることと、解決方法との「遭遇」は「ひらめきの期待試行」によることを確認できた。また、「ひらめきの期待試行」、すなわち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ことが、技術ブレイクスルーの重要な概念であることがわかった。

第 5 章 「ひらめきの期待試行」の成立要件

「ひらめきの期待試行」の成立要件を詳細に考察した。技術の「ひらめき」の定義を「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」として、以下の「ひらめき」の発生プロセスモデルを提示した。

- 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「空白のある地図」の確定。
- 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「技術変数間の精密な関係性」と「キー技術変数」の組み合わせ。

技術の「ひらめき」のために必要な技術蓄積は、本質的な課題の仮説である突破点を絞

り込んで、既存技術変数間の精密な関係性を構築することであり、その役割は、「新たなキー技術変数を外に求めること」「外から得られた技術変数が求めていたものかどうか分かること」である。それらの精密化を駆動する要因は、「実観察」「現象の仮説メカニズム構築」「1人3役」である。

キー技術変数は、既存技術の蓄積の結果「存在仮説」が立ち、「常識の例外」の連想とそこからの類推によって得られる。既存技術の蓄積で得られた「技術変数間の精密な関係性」との組み合わせによって技術の「ひらめき」が発生する。

技術の「期待試行」とは、ひらめいた技術的な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、試行によって問題が解決できることを実証することに意味がある。また、「期待試行」の成功への強い確信は、「自前の理」と「実行可能性」によって裏打ちされている。一方で、それら2つの要件ゆえの試行への障害もある。

第6章 他事例への適用可能性の確認

技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説を用いて、有機材料である HAB の化学合成技術開発の事例を説明できるかを確認した。

名古屋大学の伊丹は、独自のプログラム合成法を用いて、HAB の化学合成を試みていたが、ベンゼンの対称性により思ったように合成できないでいた。そこへ小山が、テトラアリールチオフェンにジアリールアセチレンを合成すると、HAB を合成できることを提案した。ところが、同合成ルートでは、HAB を合成することはできるが、直接目的の化合物を得られず位置異性体ができることが問題であった。この問題解決に鈴木は難航した。ある日、パズルの常識の例外事例から、通常は用いられない「再結晶法」による位置性体分離方法をひらめき、HAB の選択的合成が可能となった。このように、技術ブレイクスルーの仮説モデルが、青色 LED 半導体技術開発に固有のものではなく、他分野にも適用可能性がある仮説であることがわかった。

第7章 技術開発マネジメントへの示唆

前章までの行為主体である技術者から視点を変えて、技術開発マネジメントへの示唆について考察した。その結果、以下の5つの示唆を得ることができた。

- ① 行き詰まりでの「原点返り」
- ② 既存技術を「徹底的に掘り下げる」
- ③ 「外の空気」を吸わせる
- ④ 「ひらめきの試行」を許容する
- ⑤ 「新参者」に任せる

いずれも、前章までの技術者が技術ブレイクスルーをするための「ひらめきの期待試行」による解決方法と「遭遇」するためのプロセスモデルに則った上で、その技術開発の管理者であるマネジメントが行うべき示唆を得ることができた。

第8章 総括

本研究の貢献は以下の4つである。

- ① 非連続的な技術革新の現象として、「技術ブレイクスルー」に着目してその位置づけを明らかにした上で、その構造すなわちプロセスと要件、その論理の仮説を提示したこと。
- ② 技術ブレイクスルーのプロセスとして、「解決方法との遭遇」の概念を導入し、その類型として「偶然による実験代行」と「ひらめきの期待試行」を定義した上で、「ひらめきの期待試行」のプロセスと要件、その論理の仮説を導出したこと。
- ③ 技術ブレイクスルーの構造の仮説をベースとして、技術者の視点だけでなく、技術開発マネジメントへの示唆について仮説を提示したこと。
- ④ 青色LED半導体材料開発の事例において、高い価値を持つ代表的なイノベーション事例に対して、新たな視点での分析を加えられたこと。

本研究で得られた新たな仮説により、今後複数の事例研究による検証と論理の精緻化、周辺領域の研究の1つのきっかけとなると考える。また、技術開発の現場においても、本研究は有効な示唆になると考えられ、実践での効果の確認が望まれる。

以上。

論文審査の結果の要旨

本審査委員会では、技術ブレイクスルーの構造研究を中心に、提出された学位論文の審査を行った。

【1】論文審査の着眼点

本審査においては、「技術ブレイクスルーの構造研究」という論文テーマの性格を考慮し、博士論文の論文審査基準に加えて、さらに以下の視点に着目して、論文審査を実施した。

1. 対象事例選定の適確さ
2. 対象事例分析の深さ
3. 言葉の定義と概念の明確さ

【2】 審査委員会の審査経緯

本研究の目的は「革新技術の開発において技術ブレイクスルー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。この目的を達成するためには、事例選定の的確さが重要となってくる。

技術ブレイクスルーを起こした事例は分野を限定しなければ数多くあるが、本研究では、その研究対象分野を「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」に限定している。

また、技術ブレイクスルーが起こるプロセスモデルとして、次の仮説をとっている。

1. 最初に、既存技術で行き詰まるプロセス
2. 次に、解決方法と遭遇するプロセス
3. 最後に、革新技術として再構成するプロセス

この3つのプロセスの中で、本研究では、2番目の「解決方法と遭遇するプロセス」に焦点をあてている。「遭遇プロセス」に関する先行研究としては「意図しない偶然」いわゆるセレンディピティと呼ばれるプロセスに関する研究がすでに幾つかある。本研究では、それに対向する仮説として、意図的に遭遇を生み出す「ひらめきの期待試行」という視点から事例分析を行っている。

セレンディピティという解決方法との遭遇モデルについては、多くの事例が報告されている。実際に、技術ブレイクスルーを起こした当人の口からも「セレンディピティ」という言葉がよく発せられている。

それに対して「ひらめきの期待試行」の事例は、(本研究で限定した分野に関しては)数に限りがあるとしている。したがって、事例の数としては、青色LED半導体材料開発事例を深く分析するという研究アプローチをとっている。

事例の数は少ないものの、申請者が材料科学分野の技術者でもあることから、その分析は極めて深い。公開文献はもとより、実際に開発に携わった研究者とも、技術を理解する技術者同士として、事例としてはよく知られているものの、その分析の深さではこれまでにない詳細な成果を残している。博士論文として十分な深さの分析がなされていると結論づけることができる。

言葉の定義と概念についても、的確に定義されており、博士論文としての十分な知識と見識に基づいているとの結論を得た。

以下、詳細な審議内容について、記載する。

本審査に先立つ予備審査において、審査委員から下記の点が具体的に指摘された。

1. 2次データとなっている引用文献が散見されるので、重要性を鑑みつつ、できる限り1次データに修正すること
2. 仮説の検証が不十分なので、強化すること
3. 材料技術分野以外への適用性かどうか検討すること

4. 本論文のコアである第7章の説得力を高めるよう詳細化が必要であること。

予備審査を終え、本審査用として提出された学位論文では、上記指摘事項に対する修正がなされており、学位論文としての基準をおおむね満たしているとの結論を得た（第1回審査委員会）。

材料技術分野以外への適用性については、研究範囲を「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」と明確に限定することとし、さらに HAB 化学合成の技術ブレイクスルーの事例への適用性を試みている。

第2回の審査委員会では、申請者に対して非公開（審査委員だけに向けた）プレゼンテーションを要請し、質疑応答を行った。主な意見としては、下記のものから指摘された。

1. 導入部において、「技術ブレイクスルーの定義」に関して、事例の数がもう少し多くあると定義の理解が進むと思われる。また、なぜ「青色 LED 半導体材料開発事例」を取り上げたかた、その理由についても言及されるとよいのではないか。
2. 学位論文としての基準を達成していると思われるが、欲を言えば、他の事例への適用可能性について、さらにもう一つの事例分析があると理想的であった。
3. 本研究の価値を伝えるためにも、第8章「総括」の内容をより充実させることが臨ましい。

第3回の審査委員会では、公開の場で、45分間にわたる発表を学位申請者が行い、続いて審査委員会委員以外の教員からコメントを得た。その後、審査委員のみにより、学位論文審査の総括を行った。

【3】審査委員会の結論

本論文は、技術ブレイクスルーというよく知られてはいるものの、経営学的にこれまで十分に分析されていなかった概念を詳細な事例分析に基づいてモデル化し、さらに他の事例に適用してモデルの妥当性を検証しており、独自性のある研究論文であると認められる。

以上の審査結果から、本論文は、博士（技術経営）の学位論文として十分に価値あるものとして認められるものと、5人の全委員が一致して結論づけた。