

学位申請論文

「技術ブレイクスルーの構造研究」

ー青色 LED 半導体材料開発事例に基づく新たな仮説の提示ー

平成 30 年 2 月

内海 京久

はしがき

企業で機能性フィルムの生産技術の研究開発をして12年。革新技術がなかなか生まれない、そして技術が出来ても新商品が出ないという状況の中、技術開発マネジメントに疑問と興味を持ち、東京理科大学大学院イノベーション学科の技術経営（MOT）専攻の門をたたいたのが5年前である。そこで2年間、技術経営について大いに学び、社会人学生ならではのキャンパスライフを満喫し、実業へ戻るはずであった。しかし、あまりに充実した神楽坂での学びの日々との別れを惜しみ、もう少し学校に残りたいと思ったのが、不純ではあるが正直な最初の博士課程進学のも動機である。

ではなぜそのような動機不純の輩が、技術ブレイクスルーなどというテーマを研究し始めたのか。それには2つの理由があった。

1つ目は、十数年間の技術開発生活を振り返った時、最も中心的で常に頭の中にあり実際に追い求めていたことが、いかに技術ブレイクスルーをするかであったということに気づいたためである。技術開発における最大の壁は既存技術の限界である。しかしその壁を超えた技術ブレイクスルーを実現できると、機能、品質、生産性を高次元で両立させることができ、競合に対して圧倒的な優位性を得られる。このような事例をいくつか社内で見えてきた。しかし、いつでも技術ブレイクスルーできるわけではなく、どうすれば実現できるかが大きな疑問であった。従って、研究テーマについて、自分が何に一番興味があり、そして不思議な現象が何かを考えた時、すぐに技術ブレイクスルーに思い至ることができた。

2つ目に、技術ブレイクスルーは技術開発の現場にとって非常に重要であり、多くの技術者がその実現を願っているにも関わらず、その実現方法についてほとんど語られていないことである。アイデアの発想法などはちまたにあふれている。しかし、技術ブレイクスルーがどのような現象で、実現のための要件が何であるかが明らかでないにも関わらず、経験的な方法論だけを実行しても、技術ブレイクスルーは実現できないとMOT時代に考えていた。そこで、自分自身が技術ブレイクスル

一の構造を明らかにすることで、その実現のために技術者は何に気を付ければよいのか、どのようなマネジメントをすればよいのかを導こうと考えた。

博士課程の日々は、MOT時代と打って変わって厳しかった。MOT課程は講義というレールの上を走り、ゼミでは経験を中心に議論をすればそれで許された。ところが、博士課程では、レールを敷設することと、壊されることの繰り返しが続いた。しかし、技術ブレイクスルーのプロセスや論理を考えることは苦しくも楽しかった。毎日、会社までの通勤時間は論理を考える時間、帰宅してからの時間は論理を書く時間であった。また、実際の業務が技術ブレイクスルーの実現を考えることに等しいため、常に考え続けざるを得なかった。そして、考えた論理はゼミで何度も指摘を受け伐採（=洗練）されてしまうため、またひたすら考えるという鬱々とした、しかし充実した日々が続いた。

そんな、いつまで経っても暗中模索、五里霧中の筆者を導いていただき、論文の形になるまでご指導いただいた先生方には、感謝の申し上げます。

主査の橘川武郎先生には、博士課程3年という論文執筆の重要なタイミングでご指導いただくことができ、大変感謝しております。論文の書き方について全くの素人であった筆者に、本当に幾度にも渡って細かく優しく丁寧に指導していただきました。そして、鋭い本質的な問いをいただいたおかげで、思ってもいなかったような大切なポイントに気づき、深く考えることができたことが、論文の完成度を高めるために大きな助けとなりました。また、組織学会での発表、予備審査中での2本目の投稿論文執筆、海外学会発表のエントリーなど、攻めた研究生活をリードしていただきました。特に論文執筆のプロジェクト管理は先生に厳密かつオーバーエクステンションに行っていたため、ハードスケジュールにもかかわらず何とか執筆を進めることができました。どうもありがとうございました。

西野和美先生には、博士課程の2年間を主査としてご指導いただきました。戦略論の先生らしく、あるべき姿に向けてシナリオ通り、まさに育てていただいたという実感があります。しかも気づかない所での要所要所の打ち手が後から見ると非常に的を射ており見事であり、大変に感謝しております。先生のご指導は、常に2割

ストレッチであり、やさしいようで実は厳しく、しかし気づいたら力がついているというものでした。そして、毎回本質的な議論によって、次に掘るべきことを気づかせていただきました。また、全くの経営学素人の筆者に、読むべき論文や書籍をアレンジしていただき、また論文上での表現などの細部にわたってご指導をいただきました。3年目は指導教官からは外れてしまいましたが、論文執筆や学会発表について、お忙しいにも関わらず時間を取って丁寧にご指導いただき、大変にありがたかったです。仕事との両立の中で、何とかここまで研究をしていくことができたのは、先生のご指導の賜物と感謝しています。どうもありがとうございました。

副査の宮永博史先生には、博士課程の3年間にわたりご指導をいただき、大変に感謝しております。ご相談に伺うと、いつも直前にお送りした論文資料を詳細にわたり目を通して、常に本質的な問いと参考事例を示していただきました。何よりも私の研究を面白がっていただき、それが私にとってのドライビングフォースそのものになっていました。どうもありがとうございました。

伊丹敬之先生には、MOTゼミからの4年間、特に博士課程のうち2年間は裏の指導教官として大変にお世話になりました。そして最後の1年間は直接のご指導はいただけませんでしたが、論文執筆の際に架空の伊丹先生に厳しくご指導をいただきました。在学中は頭の回りきらない弟子にも関わらず、父親のように厳しく叱っていただき、論理の作り方を教けていただきました。なかなかうまく基本論理の仮説を育てられず、叱られて苦しい日々ばかりでした。そういった中でも、プロセスモデルで先輩の志賀さんの論文と対であることを示した時や、「常識の例外」「空白のある地図」の概念を示した時に、とても喜んでいただいたことが、研究を進める上で大きな力となりました。また、事例研究において、役に立つのならと伊丹健一郎先生をご紹介いただいたことも感謝しております。どうもありがとうございました。

審査委員の荒木勉教授、平塚三好教授、宮永雅好教授には、審査会の中で大変貴重な示唆を多くいただき、論文を完成させるにあたり力強くご指導をいただきましたことを、感謝しております。どうもありがとうございました。

MOT 専攻時代から通して、坂本正典教授、佐々木圭吾教授、松島茂教授、東実教授、別所信夫教授には、論文指導の他、MOT の基礎から実際の技術・商品開発、組織での実務まで多くのことを学び、考える機会をいただきましたことを改めて感謝いたします。

お忙しい中、こころよくインタビューをお引き受けいただいた、東北大学の岡隆志教授、名古屋大学の鬼頭雅弘教授、伊丹健一郎教授、鈴木真さんには、論文の幹となる論理を考える上で大変貴重な情報を長時間にわたりお話しいただき、大変感謝しております。

MOT、INS の先輩、同僚、後輩の皆様方には、いつも真摯で適切なアドバイスをいただき、そして温かい応援と激励をいただきました。本当にありがとうございました。挫けそうになりながらも頑張ってきたのは、学友の皆さんと一緒にだったからだ、と、大変にありがたく思っています。

会社の先輩、同僚、後輩、部下の皆様方には、5 年間という長期に渡る就学期間中、サンプル試作やトラブル対応などで忙しい中、大変なご迷惑をおかけしつつも温かい応援とサポートをいただきました。特に疋田統括マネージャーには、東京理科大学大学院への進学を紹介、推薦していただきました。また山崎生産技術センター長には、博士課程への進学を快諾していただき、最大限のご助力をいただきました。このような機会を与えていただいたことに感謝しております。

そして最後に、家族には本当に感謝しています。半年間の熊本駐在から帰宅したと思いきや、そこから 5 年間にわたり、平日の夜も相手をできず、休日もろくに遊びに連れていけなかったにもかかわらず、文句も言わず温かく応援して、父を誇りに思ってくれたことが、本当にありがたいことだったと思っています。

H30 年 2 月

内海 京久

目次

第 1 章 問題意識	1
1.1 本論文の目的	1
1.2 研究の動機	1
1.3 研究の意義	2
1.4 研究の対象範囲	2
1.5 リサーチクエスチョン	4
1.6 本論文の構成	4
第 2 章 先行研究と仮説モデル	7
2.1 革新技術とは何か	7
2.1.1 技術に関する定義	7
2.1.2 技術開発に関する定義	11
2.1.3 革新技術の先行研究	12
2.2 技術パラダイム論	15
2.2.1 技術パラダイム転換と技術軌道	15
2.2.2 技術パラダイム論をベースとした先行研究	16
2.2.3 技術パラダイム転換の先行研究の問題点	18
2.3 技術ブレークスルー	19
2.3.1 ブレークスルーの先行研究	19
2.3.2 先行研究の限界と問題意識	19
2.3.3 技術ブレークスルーの位置づけ	20

2.3.4 技術ブレイクスルーのプロセス	24
2.3.5 解決方法との「遭遇」	25
2.3.6 「ひらめきの期待試行」への着眼	30
2.3.7 推論のトライアングル	30
2.4 小括	33
第 3 章 事例研究	34
3.1 事例研究による仮説導出	34
3.2 分析の枠組み	35
3.3 事例の選定と調査	37
3.3.1 事例の選択理由	37
3.3.2 事例調査の方法	38
3.4 青色 LED 半導体材料の開発と 3 つの技術ブレイクスルー	39
3.5 均一 GaN 結晶	42
3.6 GaN の p 型化	55
3.7 InGaN 混晶	63
3.8 AlN コートサファイアへの GaN 結晶成長	67
3.9 小括	68
第 4 章 仮説モデルの検証	70
4.1 技術ブレイクスループロセス	70
4.1.1 均一 GaN 結晶成長の事例検証	70
4.1.2 GaN の p 型化の事例検証	71
4.1.3 InGaN 混晶成長の事例検証	72

4.2 既存技術での「行き詰まり」	72
4.3 新たな解決方法との「遭遇」	73
4.4 革新技術の「再構成」	74
4.5 事例研究から得られた含意	75
4.5.1 「ひらめき」は「期待試行」の必要条件である	76
4.5.2 技術の「ひらめき」には「行き詰まり」での技術蓄積が必要である	77
4.5.3 新たな技術変数が「ひらめき」をもたらす.....	78
4.6 小括	79
第5章 「ひらめきの期待試行」の成立要件	80
5.1 技術のひらめきとは何か.....	80
5.1.1 心理学でのひらめきの取り扱い.....	80
5.1.2 知識創造理論でのひらめき	81
5.1.3 技術のひらめきの定義	83
5.2 技術のひらめきの成立プロセスの仮説	83
5.3 事例による「技術のひらめきモデル」の検証	87
5.3.1 均一 GaN 結晶成長における技術のひらめき	87
5.3.2 GaN の p 型化における技術のひらめき	88
5.3.3 InGaN 混晶における技術のひらめき	89
5.4 「突破点」の絞り込み	90
5.4.1 絞り込みとは.....	90
5.4.2 突破点の洗練.....	92

5.4.3 突破点への集中	101
5.4.4 失敗事例の分析	101
5.5 「空白のある地図」の確定	104
5.5.1 2つの要件	104
5.5.2 技術変数間の精密な関係性	105
5.5.3 技術変数間関係性の精密化の駆動要因	106
5.5.4 未知のキー技術変数の存在仮説	113
5.5.5 「空白のある地図」の確定の役割	115
5.6 「常識の例外」の連想	115
5.6.1 常識の例外とは	116
5.6.2 連想とは	117
5.6.3 どのように「常識の例外」を知るか	120
5.7 新たな「キー技術変数」の類推	123
5.7.1 類似の「ボトルネック」による類推	123
5.7.2 「キー技術変数」を類推するための要件	125
5.7.3 なぜ「常識の例外」なのか	125
5.8 「既存の技術変数間の関係性」と「キー技術変数」の組み合わせ	127
5.8.1 「ひらめき」に必要な組み合わせ	128
5.8.2 「組み合わせ」の結果なぜ成功できると思えるのか	129
5.8.3 「ひらめき」と「思いつき」の違い	131
5.9 技術の期待試行	133
5.9.1 「ひらめき」と「期待試行」の関係	133

5.9.2 「自前の理」	134
5.9.3 「実行可能性」	136
5.10 小括	138
第 6 章 他事例への適用可能性の確認	141
6.1 事例の選定と調査	142
6.1.1 事例の選択理由	142
6.1.2 事例調査の方法	143
6.2 多置換ベンゼン問題	144
6.3 HAB 化学合成の技術ブレイクスルー	147
6.4 チオフェンからの HAB 合成	148
6.5 位置異性体の混合物分離	150
6.6 HAB 事例研究における「ひらめきの期待試行」	153
6.6.1 HAB 事例の「突破点の絞り込み」と「空白のある地図の確定」 ..	154
6.6.2 HAB 事例の「常識の例外の連想」と「キー技術変数の類推」	155
6.6.3 期待試行	156
6.7 小括	156
第 7 章 技術開発マネジメントへの示唆	158
7.1 5 つの示唆	158
7.2 行き詰まりでの「原点返り」	161
7.2.1 過去の実績を捨てる	162
7.2.2 本来の目的に立ち返る	163
7.2.3 突破点を明言する	163

7.3 既存技術を「徹底的に掘り下げる」	164
7.3.1 徹底的とは何か	164
7.3.2 徹底的に掘り下げることへの障害	165
7.3.3 自分で掘らせる	168
7.3.4 掘り下げの判断基準	170
7.4 「外の空気」を吸わせる	171
7.4.1 「空白のある地図」を持たせて「外」に出す	171
7.4.2 「外」の選定基準	172
7.5 「新参者」に任せる	174
7.5.1 「新参者」の「環境」と「特性」	174
7.5.2 ベテラン技術者にとっての障害	177
7.6 「ひらめきの試行」を許容する	178
7.6.1 技術メカニズム不問	178
7.6.2 技術者「ひらめき」に対する覚悟	180
7.6.3 「思いつき」の見抜き方	181
7.7 小括	183
第 8 章 総括	185
8.1 まとめ	185
8.1.1 第 1 章「問題意識」	185
8.1.2 第 2 章「先行研究と仮説モデル」	186
8.1.3 第 3 章「事例研究」	188
8.1.4 第 4 章「仮説モデルの検証」	189

8.1.5 第5章「ひらめきの期待試行」の成立要件	190
8.1.6 第6章「他事例への適用可能性の確認」	193
8.1.7 第7章「技術開発マネジメントへの示唆」	194
8.2 本論文の貢献.....	195
8.3 今後の研究課題	197

図表一覧

図 1-1	本論文の構成	5
図 2-1	物質の状態変化と方法の関係	9
図 2-2	技術パラダイム転換の概念図	16
図 2-3	科学の進化による革新技术	21
図 2-4	S 字カーブにおける技術ブレイクスルーの位置づけ	22
図 2-5	革新技术創造の経路の 3 つのパターン	23
図 2-6	技術ブレイクスループロセスの仮説モデル	25
図 2-7	文部科学省：「知の創造者」としての研究者（2002）より	27
図 2-8	意図せざる実験代行の関与するモデル	28
図 2-9	技術ブレイクスループロセスの詳細仮説モデル	29
図 2-10	推論のトライアングル	31
図 2-11	技術開発における 3 つの「推論」	32
図 3-1	技術ブレイクスルーの分析の枠組み	36
図 3-2	LED の基本原理と構造	40
図 3-3	青色 LED 半導体材料開発の 3 つの技術ブレイクスルー	41
図 3-4	GaN に関する論文数の推移	42
図 3-5	MIS 型 LED と pn 型 LED の構造比較	44
図 3-6	HVPE 法による GaN 結晶成長	45
図 3-7	赤崎研究室の MOVPE 装置 1 号機	47
図 3-8	MOVPE1 号機の配管模式図	48
図 3-9	GaN の典型的な成長温度条件	49
図 3-10	GaN 結晶成長のためのガス流量制御	50
図 3-11	AlN 低温バッファ層による結晶成長条件	52
図 3-12	AlN 低温バッファ層による結晶表面	53
図 3-13	AlN 低温バッファ層による GaN の均一な結晶成長のメカニズム	54

図 3-14	電子顕微鏡写真による GaN 結晶成長の「その場観察」	55
図 3-15	MOVPE 装置 2 号機の配管模式図	56
図 3-16	フィリップス著の「半導体結合論」のグラフ	58
図 3-17	マグネシウムドーパ GaN の結晶成長条件	59
図 3-18	EL 法による p 型 GaN の紫外スペクトル	61
図 3-19	電子線照射による p 型化のメカニズム	62
図 3-20	InN の平衡蒸気圧と温度の関係	64
図 3-21	InN の V/III 比と結晶表面の関係	66
図 3-22	InGaN の結晶成長条件	66
図 4-1	技術ブレイクスルーモデルへの適用 均一 GaN 結晶成長	71
図 4-2	技術ブレイクスルーモデルへの適用 P 型化	71
図 4-3	技術ブレイクスルーモデルへの適用 InGaN 混晶	72
図 5-1	暗黙知と形式知の相互作用による知の創造プロセス	82
図 5-2	技術のひらめきモデル	85
図 5-3	技術のひらめきモデルへの適用 均一 GaN 結晶成長	88
図 5-4	技術のひらめきモデルへの適用 P 型化	89
図 5-5	技術のひらめきモデルへの適用 InGaN 混晶	90
図 5-6	課題の選択、再選択の経緯（均一 GaN 結晶成長、P 型化）	94
図 5-7	技術開発の実験における情報の流れ	108
図 5-8	ひらめきと思いつきの類型	132
図 6-1	多置換有機分子のプログラム合成	145
図 6-2	テトラアリアルチオフェンとジアリアルアセチレンによる HAB 合成	146
図 6-3	HAB 化学合成の技術ブレイクスルー	147
図 6-4	Dragmacidin D の全合成ルート	149
図 6-5	位置異性体の混合物合成と分離	151
図 6-6	技術のひらめきモデルへの適用 HAB 位置異性体の混合物分離 ..	153

図 7-1	技術のひらめきモデル（図 5-2 の再掲）	159
図 7-2	技術開発マネジメントへの示唆	160
図 8-1	技術ブレイクスルーの位置づけ（図 2-4 の再掲）	186
図 8-2	技術ブレイクスループロセスの詳細仮説モデル（図 2-9 の再掲） .	188
図 8-3	技術のひらめきモデル（図 5-2 の再掲）	190
図 8-4	技術開発の実験における情報の流れ（図 5-7 の再掲）	192
図 8-5	HAB 位置異性体の混合物分離（図 6-6 の再掲）	194

第1章 問題意識

1.1 本論文の目的

本論文の目的は、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。近年の革新技術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術であったことから、青色 LED 向け半導体材料の技術開発を選択した。そして、革新技術の開発を成功させた 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、化学分野の技術ブレイクスルー事例として、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用いて、仮説の適用可能性を確認した。

1.2 研究の動機

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とは、技術開発で重要な役割をする非連続的な技術革新プロセスの概念であり、「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」である。

革新技術は人や金をつぎこめばできるものではない。特に技術ブレイクスルーは、業界として誰もが限界だと考えていることを突破できるため、競争優位に立つための強い差別化の源泉となり得る。従って、その効果の大きさから多くの人々が技術ブレイクスルーを望むが、誰もが実現できるわけではない。

現実の技術開発の多くにおいて、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は難しい。一方で、見事に技術ブレイクスルーをして、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。

しかしながら、技術開発の現場には、どのようにすれば技術ブレイクスルーを実

現できるかの明確な論理はこれまでに無く、成功者の経験や勘を基に、実務者が良かれと思う方法で技術開発をしているため、その成功の可能性は必ずしも高くないのが実態である。

1.3 研究の意義

一方で、イノベーション研究の分野で、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。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たり、公表されたりすることが少なく分析しにくい、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、などの事情が原因と考えられる。

従って、本論文では、詳細な事例研究により、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、について明らかにすることを目指す。これにより、先行研究の未踏領域である技術ブレイクスルーの発生プロセスの構造と論理を解明し、イノベーション・プロセス研究を深耕する。さらに、技術開発の行為主体へ有意義な示唆を得ることで、技術ブレイクスルーを起源としたイノベーションを興しやすくすることに貢献する。

1.4 研究の対象範囲

本論文は、イノベーションにおける革新技术の創出プロセスを対象とした研究について述べたものである。イノベーションのプロセスに言及した先行研究は多く、その範囲も多方面に及ぶ。本論文では、イノベーションを興すきっかけとなる革新技术が行為主体によってどのように創出されるかについて着目した。その中で、飛躍的な革新技术が生まれる現象として、技術ブレイクスルーに研究対象範囲を絞って議論する。

また、研究対象となる行為主体を、革新技术を開発する技術者とする。本論文において、未だ明らかになっていないイノベーションの最前線にいる技術者がどの

ように技術ブレイクスルーを起こすのかを明らかにすることが、その後の個人と組織の相互関係性、技術開発で関連する組織間の関係性といった展開をしていくにあたり、最初の前提として必須であるからである。

一方で、革新技术の議論で取り扱われる技術の分類は様々である。また、その分類の切り口も多岐に渡る¹。論理の普遍性を問うために、様々な技術分野の事例を研究するという方法もあり得る。しかし、本論文のテーマは技術ブレイクスルーの構造研究であるため、技術開発事例の詳細プロセスに迫って考察する必要がある、技術開発行為の深い理解が必須となる。そこで、本研究で取り扱う技術の範囲を、「機能性材料の生成技術」に絞ることとした。

取り扱う技術分野を「機能性材料の生成技術」にした理由の1つ目は社会的な影響の大きさである。優れた機能性材料を新たに生むことによる社会へのインパクトの大きさはあらためて議論する余地がないほど自明と言える。

2つ目の理由は、「機能性材料の生成技術」が、様々な応用技術分野を実現するための根幹の技術であることである。世の中の非常に多くの商品は、この技術によって作られた機能性材料を使用して作られている。すなわち、「機能性材料の生成技術」なしに、他の技術分野の技術ブレイクスルー、そしてイノベーションは存在し得ない、世の中の基盤とも言える技術だと言えるためである。

従って、技術範囲を絞ったとは言え、本技術範囲での考察が一般性・普遍性を著しく損なうことはないと考えられる。とは言え、あくまで1つのまとまった技術分

¹ 経済産業省の技術戦略ロードマップ (http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010/Chap.1.pdf、2017/5/7 取得)、及び NEDO (国立研究開発法人国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の技術ロードマップ (<http://www.nedo.go.jp/content/100789913.pdf>、2017/5/7 取得) に依れば、技術の領域は「電子・情報通信」「ナノテクノロジー・部材」「システム・新製造」「バイオテクノロジー・医療」「環境」「エネルギー」「ソフト」「融合戦略領域」の8つのジャンルに分類される。これらの分類では、各領域に特徴的な機能性材料とその応用技術の関係との重要性を踏まえようとしたため、共通の科学理論を基盤に持つ機能性材料が分散して取り扱われている。そこで、本研究では技術領域の特性をより明確に区別できるように、各分類の材料を「機能性材料」に統一し、「バイオ・医療」と「ソフト」を「ライフサイエンス」に統合した上で、「融合戦略領域」を「計測・解析」に限定することとした。すなわち、本論文において技術分類を「電子・情報通信」「機能性材料」「システム・新製造」「ライフサイエンス」「環境・エネルギー」「計測・解析」の6領域と定義する。

野での考察結果となるため、将来的には他の技術分野での論理の展開と検証も求められるであろう。

また、研究の進め方に関わる理由として、筆者が「機能性材料の生成技術」の事例の詳細プロセスへ迫りやすいことが挙げられる。技術分野によって、その技術開発の方法にはそれぞれ特徴がある。それらを理解して分析するには、その特徴の根源である技術の内容を理解する必要がある、そこが先行研究で詳細プロセスに言及できていなかった大きな理由と考えられる。しかしながら、筆者は長年機能性材料の生成技術の開発を経験して技術開発の内容に精通しており、事例研究の際に技術開発のプロセスの詳細を理解し迫りやすいためである。

1.5 リサーチクエスチョン

技術ブレイクスルーは技術開発において既存技術の限界を突破する現象である。多くの技術者が既存技術の限界に直面した際に技術ブレイクスルーを望むが、既存技術への経路依存性のため、技術ブレイクスルーを実現して非連続的な革新技术を新たに創造して限界を突破することは難しい。しかしながら、見事に技術ブレイクスルーを成功させた事例が世の中には存在する。

このため、本論文では技術ブレイクスルーの構造を明らかにすること、すなわち、技術ブレイクスルーを実現するためのプロセスと成立要件、それらの関係性と論理を説明することで、なぜ技術ブレイクスルーを実現することができるのかを明らかにすることを目的とする。

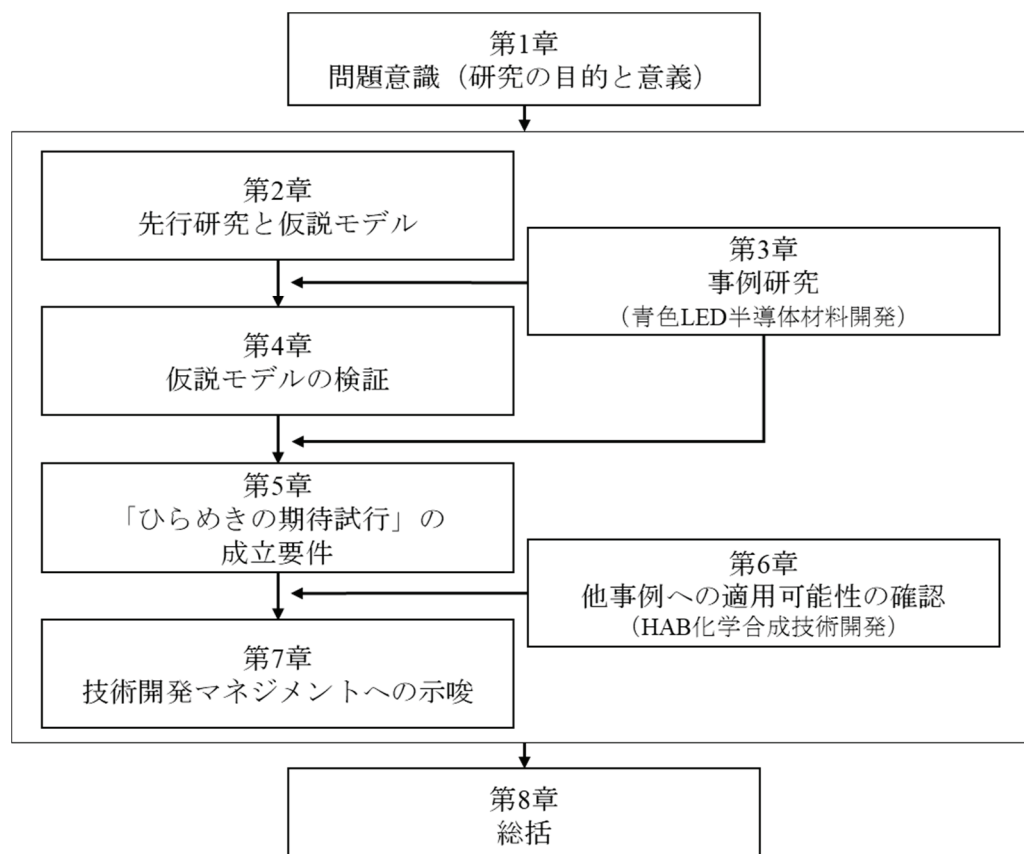
従って、本研究におけるリサーチクエスチョンは以下である。

- 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。

1.6 本論文の構成

本論文の構成は、第1章で問題意識を示した後、第2章の先行研究で得た仮説を、第3章の事例研究によって、第4章で検証する。ここで得られた含意を第5章で考

察し、第 6 章の他の事例研究によって適用可能性確認する。これらの結果から、第 7 章では視点を技術開発のマネジメントに移し、示唆を考察し、第 8 章で総括をする。これらの構成を図示したものが、図 1-1 である。



(出所) 筆者作成。

図 1-1 本論文の構成

第 1 章では、本論文の目的、動機、意義を明確にし、リサーチクエスションを示す。

第 2 章では、技術に関する定義の確認、先行研究の検討を踏まえた上で、技術ブレイクスループロセスの仮説と、事例分析の枠組みを提示する。

第 3 章では、事例研究の方法と事例選択の根拠を示した上で、青色 LED 半導体材料開発の事例について、詳細な技術開発プロセスの調査結果を示す。

第 4 章では、第 3 章の事例研究によって、第 2 章で提示した技術ブレイクスルー

プロセスの仮説モデルを検証する。

第 5 章では、第 4 章で検証した「ひらめきの期待試行」の成立要件の詳細について、考察する。

第 6 章では、他事例により仮説の適用可能性を確認する。事例選択の根拠を示した上で、HAB（ヘキサアリアルベンゼン）の事例分析を行い、技術ブレイクスループロセスと「ひらめきの期待試行」の成立要件の仮説モデルの成立を確認した上で、新たな含意を得る。

第 7 章では、第 4 章と第 5 章の考察、第 6 章の仮説検証から得られる含意を受けて、行為主体である技術者が「ひらめきの期待試行」による技術ブレイクスルーを実現するために、技術開発マネジメントがどのような意思決定、指導するべきかについての示唆を導く。

第 8 章では、締めくくりとして本研究のリサーチクエスションに関する結論をまとめ、本研究の貢献と今後の課題を述べる。

第2章 先行研究と仮説モデル

2.1 革新技术とは何か

2.1.1 技術に関する定義

技術ブレイクスルーについての議論を進めていくにあたり、最初に「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。そこで、先行研究の「技術」に関する定義を確認した上で、本論文における「技術」を定義する。広辞苑²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。この定義では技術は科学の上に成り立つことが前提となっている。しかし、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」³と述べている。すなわち、必ずしも科学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、技術が形成されることもある。すなわち、技術は科学から生まれることもあり、一方で技術から科学が生まれることがある。この点について堀川 (2010) は、「技術」と「科学」を区別した上で、「科学」から生まれる「技術」、「技術」から生まれる「科学」といった相互作用について議論している⁴。従って、本論文においても「技術」の定義は「科学」と明確に区別されたものとしたい。

本論文での「技術」を定義するにあたり、いくつかの代表的な先行研究における「技術」の定義について紐解き、「科学」との線引きを意識しながら、「技術」のポイントを整理しておく。

² 『広辞苑』第4版より。①物事を巧みに行う技。技巧。技芸。②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。の2つの解釈のうち、本論文の主旨から②を参照した。

³ Rosenberg (1982, p.143) より。

⁴ 堀川 (2010) は、科学と技術の相互作用を議論し、「新技術が生み出された結果、科学的解明が進む」「科学的進歩の結果、新たな技術が生まれる」「科学による計測・実験機器の進歩の結果、新たな技術が生まれる」という3つの経路を提示した。

Dosi (1982) は、「技術とは、直接に“実用的”（具体的な問題や装置と関連した）かつ“理論的”な（といっても、必ずしもそれ以前に応用されていなくとも、実際には応用可能であるもの）一群の知識であり、ノウハウや手法、一連の手段、成功や失敗の経験、そしてもちろん物理的な装置や器具を指す」と述べている⁵。

Dosi の定義は、技術を実用的かつ理論的な知識と考えていることに特徴があるが、方法、経験といった情報に加え、装置や器具といった資源をも含む、知識を超えた広い定義となっている。

Foster (1986) は、技術を、①特定の製品を作る特定のプロセス（技術と製品を切り離せないもの）、②製造プロセス（技術と製品とは別物）、③企業の業務活動一般やスポーツ技術、と考え⁶、ある目的を達成するためのプロセスとして捉えた定義としている。この定義の特徴は、製品を作るための方法を技術の中心としながら、製品以外のことを成り立たせる方法をも網羅しようとしている点である。しかし、技術が何かという本質に触れておらず、明確な定義付けに至っていない。

吉川ら (1997) は、技術を「それ自体が目的ではなく、他の目的に奉仕するという、“道具性”を備えている」と考え、「初期因と最終因とが定まって、その間に挟まれる人間活動が“技術”である、と述べている⁷。吉川らの定義は、ある目的を達成するための道具であり、これを作り上げるための“人間活動”を技術と定義していることに特徴がある。この定義も、原因と結果を結ぶプロセスに焦点が当たっており、技術そのものが何であるかに言及できていない。

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⁸。本定義の特徴は、技術が目的と方法を含むこと、および装置まで含

⁵ Dosi (1982, p.151-152) より。今井ら (1989)『プロセスとネットワーク』p.85 の対訳を参照した。

⁶ Foster (1986, p.32-33) より。大前 (1987)『イノベーション：限界突破の経営戦略』p.29 の対訳を参照した。

⁷ 吉川ら (1997)『技術知の本質技術知の本質』p.3、p.7 より。

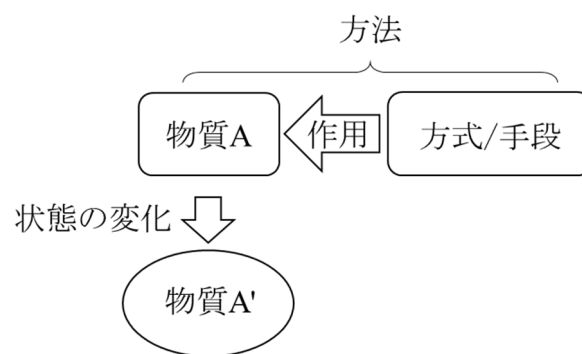
⁸ Arthur (2009, p.28) より。有賀ら (2011)『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』P.40-41 の対訳を参照した。

むことである。また Arthur は、「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」⁹と述べている。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考えられる。

以上の先行研究での「技術」の定義から大切なポイントを重ね合わせると、以下の3つになると考えられる。

- ①ある目的を達成するための知識であること¹⁰
- ②そのための道具のようなもの
- ③現象を制御して得られるもの

これらを踏まえて、本論文の目的が革新技术の開発における技術ブレークスルーのプロセスと要件を明らかにすること、および技術の対象範囲を「機能性材料の生成技術」に絞り込むことを考慮すると、本論文における「技術」というものは、図 2-1 に示すように、ある目標を満たすための機能性材料を構成する物質 A'を、その素材となる物質 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だと考えられる。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。



(出所) 筆者作成。

図 2-1 物質の状態変化と方法の関係

⁹ Arthur (2009, p.46) より。有賀ら (2011) 『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』 p.62 の対訳を参照した。

¹⁰ Dosi (1982) は知識情報と資源の両方を技術の定義としているが、筆者は知識情報と資源の性質の違いと、知識あつての資源であることから、あえて知識だけを定義として選択した。

従って、本論文における「技術」の定義を、「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、設備手段により設定できる変数の制御方法の知識」とする。また、技術において用いられる変数を特に「技術変数」と呼ぶことにする。技術変数は、物質の状態変化による機能性材料の生成において、方式や手段により制御される因子とその範囲を表している。例えば、ある技術において温度を上げると金属の硬さが向上する場合、技術変数は「温度」と「金属の硬さ」であり、それぞれがある数値範囲を持ちながら相関関係や因果関係といった関係性を持っている。そして、温度を上げるためには、輻射熱や電磁誘導などの方法と、電熱線や加熱コイルといった手段が存在するといった具合である。

続いて、本論文における「科学」の定義について言及したい。イノベーション・プロセスの先行研究において、「技術」の定義への言及はイノベーションとの関わりの深さと多様性のため多いが、「科学」の定義への言及は、その関係性の薄さからか少ないように見える。広辞苑¹¹によると、「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」である。この定義のポイントは、①現象が対象、②経験的に論証、③系統的、合理的認識、の3つである。

Arthur (2009) は、「科学」を「自然現象の理解や調査、説明の方法論」であり、「過去の観察と思考から積み上げられた理解の集積」、すなわち「知識のまとまり」と述べている¹²。つまり、Arthur (2009) の定義のポイントは、①現象が対象、②経験的に論証、③理解、調査、説明の方法の知識、の3つである。

¹¹ 『広辞苑』第4版より。

¹² Arthur (2009, p.64) より。有賀ら (2011) 『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』p.84-85 の対訳を参照した。「科学は自然現象の理解や調査、説明の方法論」と述べながら、「科学は技術から形作られている」とも述べており、その関係性を明確に議論しきれていないように見える。

従って、本論文では上記の「科学」の定義でのポイントを整理し、「自然現象で発生する物質の状態変化のメカニズムを、物理学や化学などの既存科学理論を用いて経験的に論証することにより、系統的、理論的に説明した知識」と定義する。

以上により、本論文では「技術」が「物質の状態変化を制御する知識」であるのに対し、一方の「科学」はその「メカニズムを系統的、理論的に説明した知識」とすることによって、「技術」と「科学」を区別しそれらの関係を明確に定義した上で議論を進めていくこととする。

2.1.2 技術開発に関する定義

次に、「技術開発」について考えてみたい。本論文で取り扱う技術ブレイクスルーは、「技術開発」の中で起こる現象である。技術は新たな目的を達成するために、様々な検討の上で形作られ、それらを専門的に担う人を技術者と呼ぶ。新たな目的とは、多くは将来の顧客が望む商品を生み出すために解決すべき課題である。また開発とは、広辞苑¹³によると「実用化すること」である。従って、「技術開発」によって、顕在や潜在に関わらず、想定される顧客ニーズに応えるための課題を解決できる新たな技術が生み出されると言える。

「技術開発」の中で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によって、次第に形成されてゆく。

従って、本論文では「技術開発」を、「想定されるニーズに応じた技術的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、実現方式や材料、設備手段

¹³ 『広辞苑』第4版より。①（天然資源を）生活に役立つようにすること。②実用化すること。③知識を開き導くこと。の3つの解釈のうち、本論文の主旨から②を参照した。

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行為」と定義する。

では、行為主体である技術者は現実ではどのように「技術開発」を行うのだろうか。技術開発は、ある技術的目標に対して、それを実現するための技術的解決方法の「仮説」を構築して、それを「実験」によって検証することで行われる。ここでの実験とは、「実際に目的物を試作、計測、評価することにより、仮説を検証する行為」と定義する。実験の繰り返しによって技術変数間の関係性が明確になり、その考察から技術メカニズムが構築される。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、科学的理論をベースに明示したもの」である。

また、技術開発における実験の繰り返しによって、様々な技術変数間の関係性、その制御の具体的実現方法と装置、技術メカニズムの知識が明らかになり積み重ねられる。これを本論文では技術蓄積と呼ぶ。

すなわち実験は、技術開発において中核をなす技術者による行為であり、技術開発のプロセスの中で最も重要な位置づけにあると言える。

2.1.3 革新技术の先行研究

次に、革新技术の先行研究について整理する。まず、イノベーションにおける革新技术の位置づけについて、伊丹（2009）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¹⁴。ここで、本論文では革新技术の定義を「既存の技術で達成できない機能、性能、品質、生産性を実現できる、新たな技術」とする。また、技術革新とは「革新技术を生み出す現象そのもの、技術者による行為、その生み出されるプロセス」とする。

¹⁴ 伊丹敬之（2009, P.2）より抜粋。

革新技术創出はイノベーション・マネジメント研究の中心的テーマであるため、そのプロセスに関する先行研究は多い。革新技术創出の誘引プロセスに着目した代表的な先行研究として、Rosenberg (1969)の「焦点化装置」、Klein and Rosenberg (1986)の「連鎖モデル」がある。Rosenberg (1969)は、技術の相互関係に着目し、相互の不均衡な関係が技術革新の方向性を決めることを、「焦点化装置」という概念で示した。続いて、Klein and Rosenberg (1986)は、研究開発から商品化までの革新技术創出の繋がりにおいて、科学研究との相互作用を考慮した「連鎖モデル」を提示した。

また、革新技术の構成プロセスに着目した代表的な先行研究として、Abernathy and Utterback (1978)の「ドミナント・デザイン」、Nelson and Winter (1982)の「進化モデル」、Dosi (1982)の「技術パラダイム転換」、Foster (1986)の「S字カーブ」、Anderson and Tushman (1990;1991)の「技術サイクル」がある。

このうち、Abernathy and Utterback (1978)は、製品技術が世の中に出てその理解が進むと流動的なものから固定的なものへ移行して「ドミナント・デザイン」が登場し、その後それを効率良く製造するための生産技術のイノベーションへ焦点が移ることを示した。

Foster (1986)は、技術の時間軸に対する成果は「S字カーブ」を描くとし、どんな技術も連続的な発展の後に限界を迎えることを示した。

Rosenberg (1969)、Klein and Rosenberg (1986)、Abernathy and Utterback (1978)、Foster (1986)が主に議論しているのはいずれも連続的な革新技术の創出プロセスである。連続的な革新技术とは、既存技術の延長、すなわち既存の技術やそれらの依拠する科学理論体系で議論される技術変数の組み合わせと数値の最適化の探究により構築された革新技术である。例えば、トランジスタがIC、LSIへと歴史的に集積度を向上させたが、これらはシリコン半導体による電子回路の集積技術の連続的な革新によるものと考えられる¹⁵。

¹⁵ 奥山幸祐 『半導体のはなし』 SEAJ Journal 2008. 11 No.117 p.67 より。
(<http://floodia.com/column.html> : 2017.8.14 取得)

一方で、非連続的な革新技術とは、既存の技術や科学理論からは演繹的に推論し得ない技術変数の獲得により構築された革新技術のことである。このため、非連続的な革新技術がベースとする科学理論の体系は、既存の科学理論の体系と非連続であると考えられ、従来の常識を超えた飛躍的な技術であると言える。このような非連続的な革新技術は、イノベーションを起こすための必要条件であり、社会経済、企業の競合へ与えるインパクトは、非常に大きいと Schumpeter (1926) は述べている¹⁶。

Nelson and Winter (1982) は、連続的な革新技術と非連続的な革新技術の創出プロセスを両方説明するために、進化論的アプローチに基づいた技術変化¹⁷による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による技術変化は、「探索」の結果ある確率分布に従って獲得される新たな技術が、既存技術を淘汰する場合に起こるとした。「探索」には、既存技術の改善に基づく「局所的探索」と他の技術の「模倣」があり、「局所的探索」において新たな技術は既存技術との距離が近いほど発見されやすい。すなわち、発見確率の高い既存技術からの漸進的な改善だけでなく、既存技術から距離のある飛躍的な技術¹⁸を極めて発見確率の低いものとして想定している。しかし、あくまで経済成長の進化をシミュレートするために、新たな技術は確率的に生まれるものとして取り扱っており、その実現プロセスの詳細には迫ることができていない。

Dosi (1982)の「技術パラダイム転換」は、非連続的な革新技術創出を主に扱った代表的な先行研究である。ここでは、技術開発における連続的变化を、既存の技術パラダイムの技術軌道で説明し、飛躍的な革新技術を新たな技術パラダイムへの転換で説明している。

¹⁶ 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。

¹⁷ Nelson and Winter (1982) の「進化論的アプローチに基づいた技術変化」とは、企業が外的環境の変化に対応し、従来と異なる技術を探索、発見し、既存技術を淘汰することにより得られる技術の変化である。

¹⁸ Nelson and Winter (1982) は、基本的に技術の革新を進化論的アプローチ、すなわち連続的な変化として捉えているが、非連続的な変化についても進化論における突然変異と捉え、非常に低い確率で発生し得る現象として取り扱っている。

Foster (1986) は、「S 字カーブ」によって 1 つの連続的な革新技术を示したが、その技術成果を超える新たな技術として、非連続的な「新たな S 字カーブ」を提示している。ただし、その非連続点で何が起きているのか、そのプロセスや論理までは迫っていない。

Anderson and Tushman (1990; 1991) は、技術変化は非連続、連続、非連続のサイクルであることを示した。その中で連続的な技術変化について言及し、ドミナント・デザインを境に急進的变化と漸進的变化に分かれる「技術サイクル」を示した。しかし、一方の非連続な技術変化については、その存在を提示したのみで、プロセスへは言及していない。

以上、革新技术の創出プロセスの代表的な先行研究をレビューしてきた結果、これまでの研究において、連続的な革新技术については誘引プロセスや構成プロセスの観点で比較的多くの研究がなされていることがわかった。一方で、非連続な革新技术については、その存在を認識して重要性に言及した先行研究はあるが、そのプロセスへ言及している研究は決して多くない。その中で、Dosi (1982) の技術パラダイム論は非連続的な革新技术の創出プロセスの代表的な研究であるため、次節で詳しくレビューしていきたい。

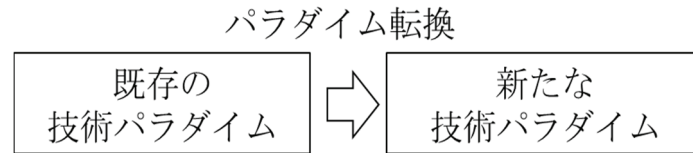
2.2 技術パラダイム論

2.2.1 技術パラダイム転換と技術軌道

Dosi (1982) は、非連続な革新技术が生まれるプロセスを技術パラダイムの転換と捉えた。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ジー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”」¹⁹である。技術開発における連続的变化は、既存の技術パラダイムの技術軌道により説明され、

¹⁹ Dosi (1982, p.152) より。今井ら (1989, P.86) の対訳を参照した。

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 2-2）。



（出所）Dosi（1982）より筆者作成。

図 2-2 技術パラダイム転換の概念図

本論文では、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、物質の状態変化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。技術パラダイムの在り様は、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がある。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」²⁰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 Dosi は、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、様々の可能な“経路”に対して、実行可能性、商品化可能性、収益性等かなり明らかで広い基準に基づいて行われる」と論じている²¹。

2.2.2 技術パラダイム論をベースとした先行研究

技術パラダイム論をベースとした革新技术開発に関する先行研究も多く存在している。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」

²⁰ Dosi（1982, p.152）より。今井ら（1989, P.87）の対訳を参照した。

²¹ Dosi（1982, p.155）より。今井ら（1989, P.93）の対訳を参照した。

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。この議論の研究史への貢献は、非連続的な革新技術の開発プロセスを科学のパラダイム転換と技術のパラダイム転換に分けたことと考えられる。すなわち、新たな科学理論による「非連続的」な技術革新を「パラダイム破壊」と定義したところに特徴がある。

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。

一方、Castellacci（2008）は、技術と流通の2軸を使うことで、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、同じフレームワークにおいて分類することを提唱している。

これらの先行研究は、いずれも革新技術を起源とするイノベーションにおける技術パラダイム転換の有効性について議論している。

しかしながら、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わけである。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する²²。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行うと、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、大きな課題であるとの見方を取っている。

²² Leonard-Barton（1995, p.30）より。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』p. 46 の対訳を参照した。

2.2.3 技術パラダイム転換の先行研究の問題点

非連続的な革新技术の開発プロセスにおいて、その成立過程で技術パラダイムの転換を伴う。すなわち、既存の技術で成し得なかった目標を実現するには、新たなパラダイムに基づいた技術が必要である。従って、既存の技術パラダイムからの転換のプロセスと要件が重要なポイントであると考えられる。しかしながら、いずれの技術パラダイム転換の先行研究も、決定論的に革新技术開発の結果とそのイノベーションへの影響のみを議論しており、技術パラダイム転換に必要な新たな技術パラダイムがどのように創出され、そのための要件は何かに迫ることができていないように見える。

その結果、技術パラダイム転換をどのように起こせばよいのかを説明することができないため、Von Tunzelmann et al. (2008) の指摘にもあるように、技術パラダイム転換の実現が困難なものになっているのではないだろうか。

この理由として、技術開発のプロセス研究の難しさが挙げられる。難しさをもたらす原因は以下の3つと考えられる。

- ① 技術開発プロセスでの実際の取り組みの様子が事細かに記録されることや公表されることが少なく分析しにくい。
- ② 技術開発は専門性が高く、外部特に文化系の研究者にとって、開発のプロセスの詳細の理解だけでも大きな労苦を伴い、分析をしにくい。
- ③ 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。

従って、技術ブレイクスルーのプロセスと要件への言及という先行研究の問題点を克服するには、技術開発の詳細な内容を十分に調査し理解した上で分析することが、重要なポイントとなる。

2.3 技術ブレイクスルー

2.3.1 ブレイクスルーの先行研究

技術のブレイクスルーを考えていく上で、非連続的な革新技术開発プロセスの先行研究とは別に、ブレイクスルーの先行研究についてもレビューしておきたい。

Stefik (2006) は、「ブレイクスルーは、科学的、技術的洞察から生まれてくる。人々が通常実現できないと思っていたことを実現する。何か新しいことを創り出したり、それまで認識されていなかったニーズを満たしたりする。」と述べている。そして、非連続的な技術革新の中で、通常実現できないと思っていたことを成し遂げるブレイクスルーの難しさや、その効果の大きさに言及している。

また、司馬 (2003) は、ブレイクスルーを「現実社会で有用な“形ある結果”を創り出す活動」と定義している。このことから、ブレイクスルーは多くの世の中の人々が実現不可能と思っていることを実現する現象と考えられる。ブレイクスルーのプロセスについて司馬 (2003) は、ブレイクスルーを3段階のステージ（創始者のブレイクスルー、開発グループのブレイクスルー、共同開発パートナーとのブレイクスルー）に分け、ステージ毎にサイクル（デディケーション、心のブレイクスルー、技術的ブレイクスルー）があると述べている。

いずれの先行研究も、あくまで決定論的にブレイクスルー現象を整理したにとどまり、技術ブレイクスルーがどのように発生するか、またその成立条件、すなわち技術ブレイクスルーの構造についての言及はない。

2.3.2 先行研究の限界と問題意識

これまで、革新技术開発のプロセスおよびブレイクスルーについての代表的な先行研究をみてきたが、技術ブレイクスルーのプロセスについて、その現象や成立要件については詳細に言及されておらず、研究の余地が大きいと言える。

連続的な革新技术の創造については、その発生プロセスや論理まである程度言及されている。これは連続的であるがゆえに、その進化は観測しやすく、またその事例も豊富であったことが主因であろう。一方で、非連続的な革新技术の創造プロセ

スは、非連続的であるが故に観測しにくく分析が難しいこと、発生頻度が少なく公開情報を取ることができる事例も限られること、技術開発の詳細プロセスの専門性が高すぎて理解しにくいこと、によって言及しにくかったと考えられる。さらに、技術ブレイクスルーという概念そのものが、現実の技術開発の現場では重要な意味を持つ一方で、その偶発性の関与が学問的なイノベーション・プロセス研究と馴染みにくいことも原因の一つのように見える。

しかし、前章でも触れた通り、技術ブレイクスルーは競争優位に立つための強い差別化の源泉であり、その効果の大きさから技術者であれば誰もが実現を望んでいることから、技術開発の現場ではどのようにすれば技術ブレイクスルーができるかの明確な論理を解明することについて、大きな社会的ニーズがある。

従って、本論文では、これまでその取扱いの難しさのため言及されにくかった技術ブレイクスルーの構造について、詳細な事例研究によって以下を明らかにすることを目的とし、これをリサーチクエスチョンとする。

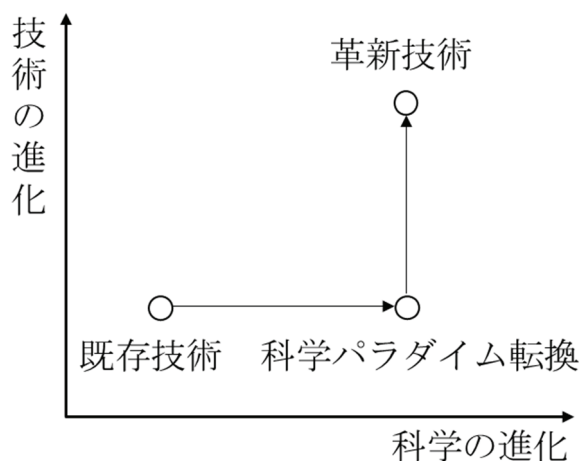
- ①技術ブレイクスルーはどのようなプロセスを経て実現するか。
- ②技術ブレイクスルーを実現するために必要な要件は何か。

2.3.3 技術ブレイクスルーの位置づけ

本研究で技術ブレイクスルーのプロセスを取り扱っていくに当たり、本項で技術ブレイクスルーの定義と革新技术開発プロセスの中での位置づけを明確にしておきたい。

非連続的な革新技术の創造は、そのプロセスによって大きく2つのパターンに分けられると考えられる。1つは、科学理論の進化によるものである。科学理論の進化による非連続的な革新技术は、先行研究で多く言及されている。その中で山口（2006）は、革新技术の創造されるプロセスを「知の創造」すなわち科学理論の進

化と「知の具現化」すなわち技術の進化の2軸で表し、科学のパラダイム転換を伴うような進化による革新技术の創造経路を示している²³（図 2-3）。



（出所）山口（2006）より筆者作成。

図 2-3 科学の進化による革新技术

例えば、非連続的な革新技术の代表例である真空管からトランジスタへの革新を考えてみる。真空管はマクスウェルの電磁気学を動作原理としているが、そこから飛躍した量子力学による半導体物理学のバンド理論等、新たな科学理論²⁴が誕生した結果、それらに基づいてトランジスタが生まれた。すなわち、科学的進化の結果、新たな革新技术が生まれたと言える。

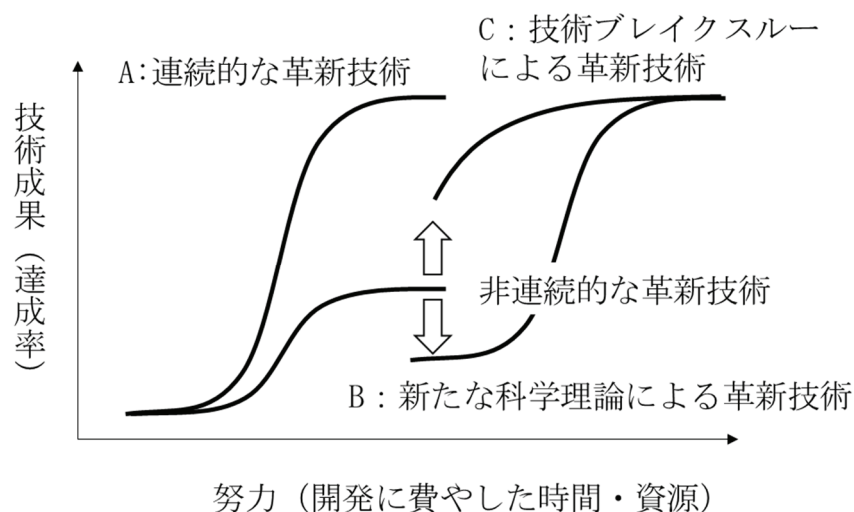
もう1つが技術ブレイクスルーによるものである。技術ブレイクスルーとは、「既存の技術や科学理論の限界を突破した新たな技術により、実現不可能と思われた高い目標を達成すること」である。すなわち、新たな科学理論からの連続的な進

²³ 山口（2006）は、誰も見たことがないことを発見することを「知の創造」と定義し、そこへ向かう知的営みを「科学」とした。また、科学的知見を集積・統合して実行可能なものとする知的営みを「知の具現化」と定義し、技術の営みに限られるとしている。

²⁴ 真空管の原理は、マクスウェルにより 1864 年までに理論化された電磁気学である（奥山幸祐 『半導体のはなし』 SEAJ Journal 2008. 7 No.115 p.41）。また、量子力学を基にした半導体物理学が発展し、量子力学が完成した 1926 年から 22 年後の 1948 年にトランジスタが生み出された（奥山幸祐 『半導体のはなし』 SEAJ Journal 2008. 11 No.117 p.67 <http://floodia.com/column.html> 2017.8.14 取得）。

化では無く、既存技術の限界を突破した飛躍的な技術を生み出すことになる。例えば、赤色 LED から青色 LED への革新において、既存技術変数の最適化では解を得られず、十数年の研究開発の末、新たな科学理論の登場を待たずに、飛躍的な解決方法を見出し実用化している。

ここまでの議論により、連続的な革新技術と 2 つのパターンの非連続的な革新技術を、Foster (1986) の「S 字カーブ」を用いた時間軸での技術成果の変化で表すと、図 2-4 のようになる。

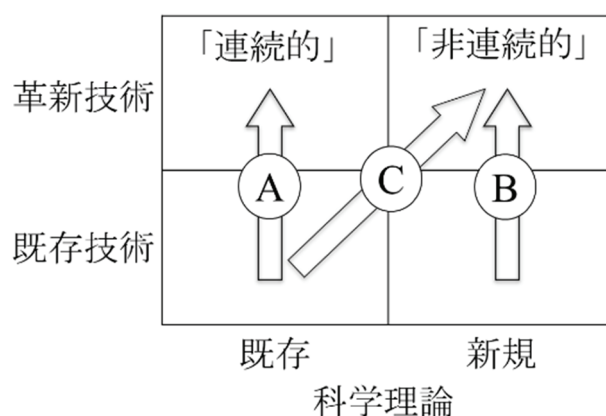


（出所）Foster (1986) に基づいて筆者作成。

図 2-4 S 字カーブにおける技術ブレイクスルーの位置づけ

すなわち、横軸を開発に費やした時間・資源、縦軸を技術成果とした時、1 つの S 字カーブで、連続的な革新技術の進化の様子を表現することができる（A: 連続的な革新技術）。一方、非連続な革新技術として、ある S 字カーブが飽和状態になった後、新たに登場した科学理論に依拠することによって、より高い技術成果をもたらす新たな S 字カーブが描かれる（B: 新たな科学理論による革新技術）。そして、ある S 字カーブが飽和状態になったにも関わらず、そこから新たに飛躍的な技術成果をもたらすのが技術ブレイクスルーであり、これが非連続な革新技術のもう一つのパターンである（C: 技術ブレイクスルーによる革新技術）。

一方で、A：連続的な革新技術、B：新たな科学理論による革新技術、C：技術ブレイクスルーによる革新技術、のそれぞれの技術革新において、そのベースとなる科学理論はどのような位置づけになるのだろうか。そこで、既存技術と革新技術を縦軸に、ベースとする科学理論を横軸で既存と新規に分類すると、3つの技術革新の経路のパターンは図 2-5 のように表せる。



(出所) 筆者作成。

図 2-5 革新技術創造の経路の3つのパターン

すなわち、A は既存の科学理論に則り革新技術を生み出す連続的な革新技術創造の経路である。B は新たな科学理論による非連続的な革新技術、C は技術ブレイクスルーによる非連続的な革新技術創造の経路を表す。C の技術ブレイクスルーの特徴は、新たな科学理論からの推論に依らず、科学理論的に非連続な領域の革新技術を生み出せるところに、大きな特徴と意義があると考えられる。

ここで、先行研究で多く取り上げられている連続的な革新技術や新たな科学理論による非連続的な革新技術ではなく、あえて技術ブレイクスルーを研究する意義について確認しておきたい。それは、現実の技術開発の現場で重要性の高さと、イノベーション・プロセス研究の未踏領域であることである。

まず、技術開発の現場では、革新性と実現性を求められる。このため、非連続的

でありながら、新たな科学理論に飛ばずに限界突破できる技術ブレイクスルーが最も強く望まれる。新たな科学理論は、Kuhn（1962）や Arthur（2009）が議論しているように、科学理論の転換、または技術的な経験の蓄積から生まれる。しかし、科学理論そのものの進化は稀であり、技術的な経験の蓄積からの新たな科学理論構築には時間と投資のコストがかかることから、実現性が極めて低い。

また、技術ブレイクスルーは上記のような重要性がありながら、イノベーション・プロセス研究における未踏領域であった。技術ブレイクスルーの発生頻度は、そのブレイクスルーの大きさにも依るが、連続的な革新技术よりは圧倒的に少ないとは言え、新たな科学理論による革新技术よりは多いと考えられる。しかしながら、先行研究で扱われる例が少ないことと、「偶然」に依拠する現象という認識が強いため深く研究されていないように見えることが問題である。

従って、革新技术開発の3つのパターンの中で、技術ブレイクスルーを研究することは、現場への示唆とイノベーション・プロセス研究への貢献の両方について、意義があると言えそうである。

2.3.4 技術ブレイクスルーのプロセス

では、技術ブレイクスルーはどのようなプロセスを経て起こるのだろうか。本項では、技術ブレイクスルーのプロセスモデルについて考察してみたい。

技術ブレイクスルーのプロセスの仮説を立てるため、一般的な革新技术の開発プロセスについて考えてみる。まず、既存技術に基づいて、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。この結果得られるのが連続的な技術革新である。

しかし、既存技術で考え得るあらゆる選択肢での実験にも関わらず、目標を達成できない場合がある。この状態を、本研究では既存技術での「行き詰まり」と定義する。これは、Foster（1986）の「S字カーブ」における限界状態であり、技術ブレイクスルーを志すモチベーションになると考える。

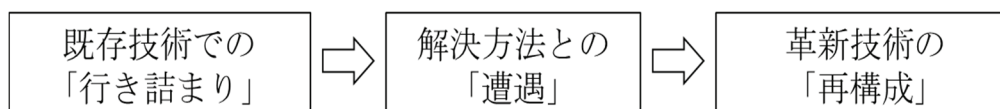
技術開発の行為主体である技術者は、新たな解決方法と「遭遇」する。それは、

既存技術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非連続的な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。これにより新たな革新技术が再構成されることが考えられる。

従って、技術ブレイクスループロセスの仮説モデルとして、以下の3つのステップを想定し得る（図 2-6）。

- ① 既存技術での「行き詰まり」(stalemate in the existing technological paradigm)。
- ② 解決方法との「遭遇」(encounter of a new resolution)。
- ③ 革新技术の「再構成」(reconstruction of a new technological paradigm)。



（出所）筆者作成。

図 2-6 技術ブレイクスループロセスの仮説モデル

ここで、技術ブレイクスルーと技術パラダイムの関係を整理しておきたい。既存技術で考え得るあらゆる取り組みは、既存の技術パラダイムでの技術軌道上の開発行為と考えられる。一方、技術ブレイクスルーによって再構成された革新技术は、新たな技術パラダイムに基づいた技術と言える。従って、技術ブレイクスルーは、技術パラダイムを転換する技術開発行為の中の1つの類型現象である。

2.3.5 解決方法との「遭遇」

技術ブレイクスルーにおいて、なぜ解決方法との「遭遇」が新たな革新技术を生み出すために必要なのだろうか。繰り返しになるが 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

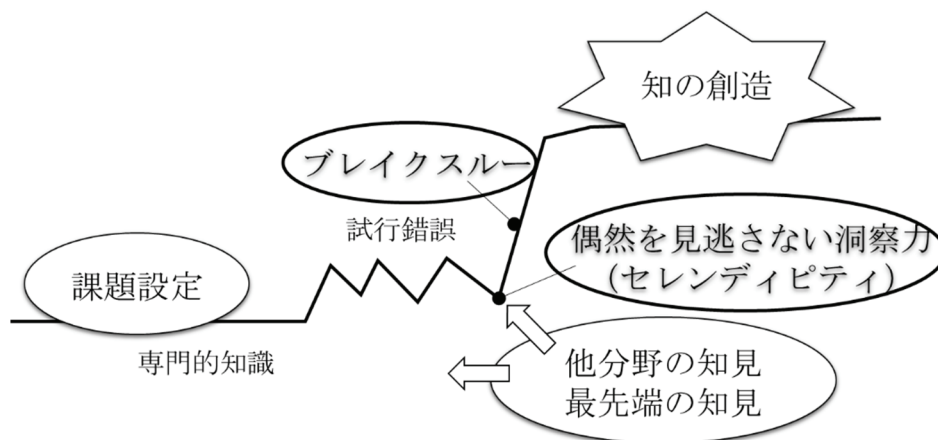
られてきた」と述べている。また、Polanyi (1966) は、「我々は語ることができるより多くのことを知ることができる」²⁵と述べている。すなわち、必ずしも技術の演繹的延長に新たな技術が生まれるわけではなく、むしろ多くの経験的方法により技術が形成されるのである。技術ブレイクスルーにおいて、新たな革新技术は、既存技術とは全く別の未知の技術メカニズムに基づいているため、既存技術の演繹的推論から見出すことはできない。従って、新たな革新技术は、先に解決方法に遭遇し、その経験的方法から再構築されると見なすことができる。

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、新たな解決方法に「意図しないで遭遇する場合」と、「意図して遭遇する場合」の2つのパターンがあると考えられる。「意図しないで遭遇する場合」とは、技術開発の実験において、解決方法が意図せず偶然に見つかる場合である。一方の「意図して遭遇する場合」とは、解決方法が、自らひらめいたことを意図して実験検証した結果見つかる場合である。

宮永 (2006) は、偶然を捉えて幸運に変える力を「セレンディピティ (serendipity)」と定義している。解決方法との「遭遇」における上記2つのパターンは、いずれも偶然の作用を捉えて技術ブレイクスルーを実現するための概念であり、「セレンディピティ」の類型と言える。文部科学省の平成14年度科学技術の振興に関する年次報告²⁶においても、技術開発のブレイクスルーは、セレンディピティ、すなわち偶然を見逃さない洞察力によって起こると述べている (図2-7)。

²⁵ Polanyi (1966, p.4) より。高橋訳 (2003) 『暗黙知の次元』 p.18 の対訳を参照した。

²⁶ http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpbb200301/hpbb200301_2_006.html より (2017/2/11 取得)。



(出所) 平成 14 年度 科学技術の振興に関する年次報告 知の創造過程の模式図より筆者作成

図 2-7 文部科学省：「知の創造者」としての研究者（2002）より

とはいえ、技術ブレイクスルーにおける革新技術は既存技術から非連続的な飛躍した技術であることから、ごく一般的に「意図しないで偶然見つかる場合」を想定しがちである。

例えば、2000 年のノーベル化学賞を受賞した白川秀樹は、1967 年にポリアセチレンの研究をしていた。そこで、導電性高分子の合成の契機となるポリアセチレン薄膜が、留学生の実験の失敗によってもたらされた。白川は、ポリアセチレンを重合したいという留学生に実験方法を指南したが、出来上がったものは通常の粉末状とは異なる、これまで誰も合成することのできなかった膜状のポリアセチレンであった。その後、解析の結果、留学生が触媒溶液の濃度を 1000 倍間違えて実験を行ったことをつきとめたことが、導電性高分子の合成につながったことが知られている²⁷。

この場合、技術の革新における偶然の作用は非常に大きく、技術的な問題が解決された状態の実現までもたらしている。さらに技術者は、その偶然の現象を見逃さず、十分な分析を行うことで、新たな解決方法を作り上げている。すなわち、解決方法が「意図しないで遭遇する場合」とは、意図せず成功の結果が先に示され、そ

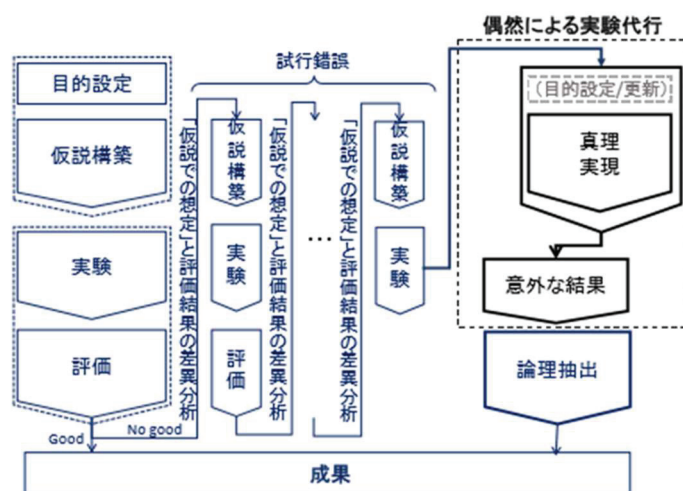
²⁷ 白川秀樹（2001）『化学に魅せられて』 岩波新書より。

の変化への気づきと分析により解決策を見出す場合と考えられる。

これら革新技术がもたらされる際の偶然の作用について、伊丹（1986）²⁸は、「偶然に発生するきっかけを必然の論理がつかまえる」と言及している。そして、「偶然の必然化」のプロセスを、①偶然が生まれる、②偶然をつかまえる、③偶然を固定化する、の3ステップとし、それぞれの効率化の論理について言及している。

藤井（2002）²⁹は、伊丹（1986）の議論をベースに、「選択された偶然性」という概念を用い、革新技术開発に必要な偶然の経験は、確率論的偶然性に依らず、正当性獲得戦略によって主体的に統制されることを示した。

続いて、志賀（2015）は、偶然に解決方法を得られるプロセスに言及し、「意図せざる実験代行」という概念を用い、詳細に議論している。「意図せざる実験代行」とは、実験において、「偶然が意図しなかった条件を実現して、我々が未だ知らない真理（因果関係）を実現して『意外な結果』が生起する」ことである。これは、本研究における「意図せず解決方法に遭遇」するプロセスに相当する（図 2-8）。



（出所）志賀（2015, p. 76）より。

図 2-8 意図せざる実験代行の関与するモデル

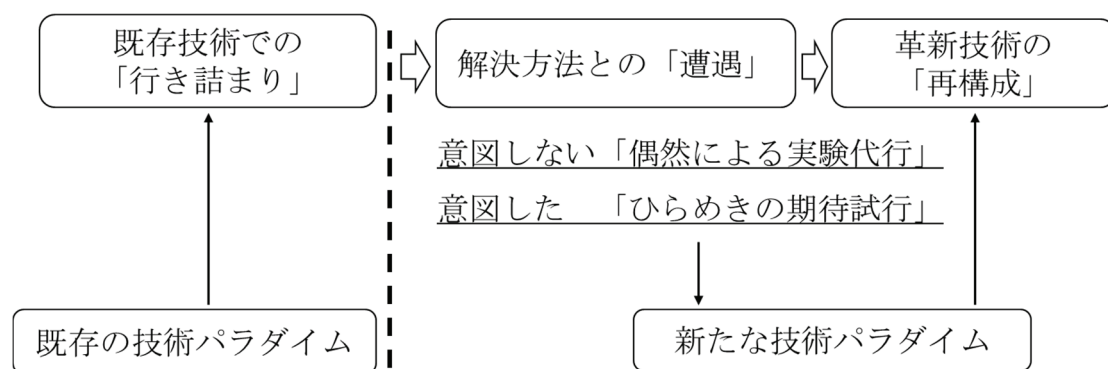
²⁸ 今井、伊丹ら（1986）『イノベーションと組織』 p.33-49 「イノベーションにおける偶然と必然」より。

²⁹ 藤井（2002）「イノベーションと偶然性」『組織科学』より。

このように、「意図しないで遭遇する場合」については、その現象とプロセスについていくつかの先行研究が存在し、一定の研究成果が得られている。

一方、解決方法との「遭遇」は、必ずしも意図しない場合ばかりではない。むしろ、「意図して遭遇する場合」が現実の技術開発では多いのではないか。解決方法を「意図して遭遇する場合」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のことである。このような、意図した解決方法との遭遇プロセスについて、先行研究では言及された例を見ない。このため、本論文では上記の現象を、「ひらめきの期待試行（expected trial by inspiration）」と呼ぶこととする。ここでの「ひらめき」とは、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である。また、「期待試行」とは、ひらめいた技術的な解決方法の成功を強く期待して、実際に実験してみようと考え、実行することである。

図 2-9 は、ここまでの議論を踏まえて、技術ブレイクスループロセスの詳細仮説モデルを示したものである。



（出所）筆者作成。

図 2-9 技術ブレイクスループロセスの詳細仮説モデル

すなわち、技術ブレイクスルーのプロセスにおいて、既存の技術パラダイムに基づいて技術開発を行うが目標を達成できない状態、つまり技術開発の「行き詰まり」

が技術ブレイクスルーの起点となる。そこで技術者は、解決方法との「遭遇」によって新たな技術パラダイムを生み、革新技術を「再構成」することで、技術ブレイクスルーを実現する。解決方法との「遭遇」は、意図の有り無しによって、「偶然による実験代行」と「ひらめきの期待試行」の2つのパターンに分けることができる。

2.3.6 「ひらめきの期待試行」への着眼

これまでの議論の結果、本論文では前項で提示した「ひらめきの期待試行」に着眼点を絞り技術ブレイクスルーの構造を明らかにするのがよいと考える。それは、イノベーション・マネジメント研究の未踏領域であることと、現実の技術開発で重要な位置づけであると考えられるためである。

前者については、前項までの先行研究レビューで明らかにしてきた通りである。また、後者については、現実の技術開発において既存技術に基づく演繹的推論による技術開発で行き詰まりとなった時、技術ブレイクスルーによる新たな解決方法を望む場面は多いであろう。その際に、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、それを技術開発の場で期待するのはあまりに発生確率が低く現実的でない。もちろん、偶然の結果に気づき、そこから新たな解決方法を見出すことが、技術開発史上非常に重要な位置づけであり、高い意義があることは言うまでもない。しかし、技術開発の現場では、発生確率が非常に低い「偶然による実験代行」に頼って技術開発を行うよりも、むしろ、技術者が日々の技術蓄積の末に自らの頭で「ひらめき」を得て、実験によりその成功を確認することで新たな解決方法を得ることも非常に重要であり、求められている技術ブレイクスルーの姿ではないだろうか。

従って、本論文では「ひらめきの期待試行」の概念を中心に事例分析を行ない、技術ブレイクスルーの構造を考察していくこととする。

2.3.7 推論のトライアングル

技術ブレイクスルーにおける「偶然による実験代行」「ひらめきの期待試行」と、

連続的な技術開発で行われる「既存科学理論による技術開発」の関係について、図 2-10 に示すように、推論のトライアングルを用いて整理しておく。「既存科学理論による技術開発」は「仮説」「事例」「結果」の順に推論が進むため、演繹的推論に当たる。「ひらめきの期待試行」は、「事例」「結果」「仮説」の順に推論が進むため、帰納的推論に相当する。「意図せざる実験代行」は、「結果」「仮説」「事例」の順に推論が進むため、アブダクションと考えられる。



(出所)「イノベーション・マネジメント入門」³⁰より筆者作成。

図 2-10 推論のトライアングル

では、技術開発のプロセスにおいて、これらの3つの推論はどのような位置づけになっているのだろうか。技術開発は仮説と実験検証によって構成されており、実験は「試作」「計測」「評価」の3つのサイクルによることを既に述べた。このため、技術開発のプロセスを、「仮説」「試作」「計測」「評価」の4つとして、3つの推論パターンを図 2-11 に整理した。

推論のトライアングルの「仮説」は実験においても「仮説」を用いるため同義である。「事例」は実験の「試作」によって生まれ、「結果」は実験の「計測」により明らかになる。また、帰納的推論とアブダクションでの「仮説」は「計測」の結果から得られる「評価」の内容に相当する。従って、推論のトライアングルの「仮説」、「事例」、「結果」は、3つの実験サイクルの「仮説」又は「評価」、「試作」、「計測」にそれぞれ対応する。

³⁰ 一橋大学イノベーションセンター編『イノベーション・マネジメント入門』p.226より。

推論のトライアングル	仮説 ⇒	事例 ⇒	結果 ⇒	仮説 ⇒
実験のサイクル	仮説 ⇒	試作 ⇒	計測 ⇒	評価・仮説 ⇒
アブダクション		(偶然による実験代行)	<u>望まない結果⇒</u>	<u>隠された真理の探究</u>
帰納的推論	(ひらめき)	<u>期待試行⇒</u>	望まれる結果	<u>明かされた真理の解明</u>
演繹的推論	<u>既存からの演繹⇒</u>	検証試行	望まれる結果	<u>既にある真理の支持</u>

(出所) 筆者作成。

図 2-11 技術開発における 3 つの「推論」

まず、「意図しないで遭遇」する場合はアブダクションによる推論の類型にあたる。仮説段階での技術の演繹的仮説にも関わらず、「偶然による実験代行」により、望まない結果が計測され、評価によって隠された真理の探究がなされることで、解決方法に「遭遇」し、新たな仮説が生まれるからである。

「ひらめきの期待試行」は帰納的推論である。既存の理論による仮説なしに技術の「ひらめき」を試作で期待試行した結果、望まれる結果が計測されることで、評価によって明かされた真理の解明がなされ、新たな仮説が生まれるからである。

既存技術に基づく技術開発は、演繹的推論そのものである。技術の演繹的仮説を試作で検証試行し、望まれる結果が計測されることで、評価によって既にある真理の支持がなされるからである。

「偶然による実験代行」による解決方法との遭遇では、偶然は結果の前の段階で作用している。成功に対する偶然の寄与は、その発生確率の低さとその効果の大きさから考えて非常に大きいと考えられる。また、成功の鍵は、偶然の結果へいかに着目するかである。一方の「ひらめきの期待試行」による解決方法との遭遇では、偶然は自ら着想する「ひらめき」のきっかけであると考えられ、試作の前の段階で作用している。また、成功の鍵は、解決方法の「ひらめき」得ることと、その方法を意図して試行した結果明かされた真理を解明することである。

以上により、技術開発における一般的な 3 つの推論パターンとその特徴を明らかにすることができ、本研究で着目する「ひらめきの期待試行」の位置づけが確認できた。また、技術開発における仮説と実験検証において、それぞれの推論パターン

が持つ特徴を明らかにすることができた。

2.4 小括

本章では先行研究によって、まず「技術」に関する概念の整理を行い、技術ブレイクスルーの構造研究の位置づけを明らかにし、プロセスモデルの仮説を提示した。その上で、本論文では、「ひらめきの期待試行」による解決方法との「遭遇」に着眼した。

本論文での「技術」の定義は、先行研究での定義の重ね合わせにより、「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术を創造する現象の1つの類型であり、連続的な革新技术、および新たな科学理論に基づく非連続的な革新技术と区別をした。また、その定義を、「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」とした。

「技術ブレイクスルー」のプロセスモデルの仮説として、①既存技術での「行き詰まり」、②解決方法との「遭遇」、③革新技术の「再構成」の3ステップを提示した。解決方法との「遭遇」について、意図しない「偶然による実験代行」と意図する「ひらめきの期待試行」の2つの類型を提示した。

「技術ブレイクスルー」による新たな解決方法を望む技術開発の現場において、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て技術開発することの方がより強く求められると考えられる。従って、本論文では「ひらめきの期待試行」の概念を中心に事例分析を行ない、技術ブレイクスルーの構造を考察していくこととした。

第3章 事例研究

本章では、最初に方法論としての事例研究による仮説導出と、前章で提示したプロセスモデルに基づく分析の枠組みを確認する。その後、事例の選定理由を明らかにした上で、事例の詳細内容について調査結果を示すこととする。

3.1 事例研究による仮説導出

本論文は、技術ブレイクスルー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。

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。また、変数システム記述は、それによる社会現象の簡略化と問題設定の促進という意味で大きな意義があるが、社会現象のメカニズムを解明するには、行為主体の意図や行為が豊富に含まれる行為システムを解釈・合成していくことが必要であると述べている³¹。従って、技術ブレイクスルーという現象の構造を明らかにし、新たな仮説を得るという本論文の目的を考慮すると、行為システムとして事例の詳細を読み解いていくことが、変数システムの統計的分析よりも好ましいと言えそうである。

また、Yin（1994）は、事例研究を選択する場合に満たすべき要件は、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、の3つであることを提示している。本論文では、技術ブレイクスルーという既存技術からどのように限界突破するかという研究問題が示されている（①）。また、事象の制御は不可能である（②）。そして、現在の現象を取り扱った研究である（③）。

従って、本論文では、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

³¹ 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、事例研究の持つ科学性に言及しており、本研究にも適用可能と考えられる。

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。

とはいえ、事例研究により得られた仮説には特に外的妥当性の限界があり、あくまで現象の背後にある行為システムの理解が主眼となる（沼上，1999）。すなわち、事例研究において内的妥当性や構成要件妥当性を確保できたとしても、その一般性を示すことに一定の限界があることを認識する必要がある。しかしながら、本論文で導出された仮説は、典型的な技術ブレイクスルーの事例に基づいて考察されたものであるから、イノベーション・プロセス研究のベンチマークの1つとしての位置づけにはなり得ると考えられる。従って、その後の複数の事例研究や大量観察による検証の橋頭堡となり得ることを目指すのが妥当と考える。

事例研究による仮説導出の具体的な方法として、Yin（1994）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る仮説検証を行う」に従うこととした。そして、後述の理由で事例を選択した。また、Yin（1994）の提示する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³²。すなわち、文書・資料記録（書籍文献、関連する学術論文、記録映像資料）の調査と、関係者への面談調査を実施した。

1次資料は、本人による書籍、インタビュー記事（雑誌、HP）、記録映像、インタビュー映像、学術論文、本人へのインタビューにより調査した。また、関連する2次資料として、本人の執筆ではない書籍、論文、雑誌特集記事などを調査し、客観的な情報源として補完的に利用した。

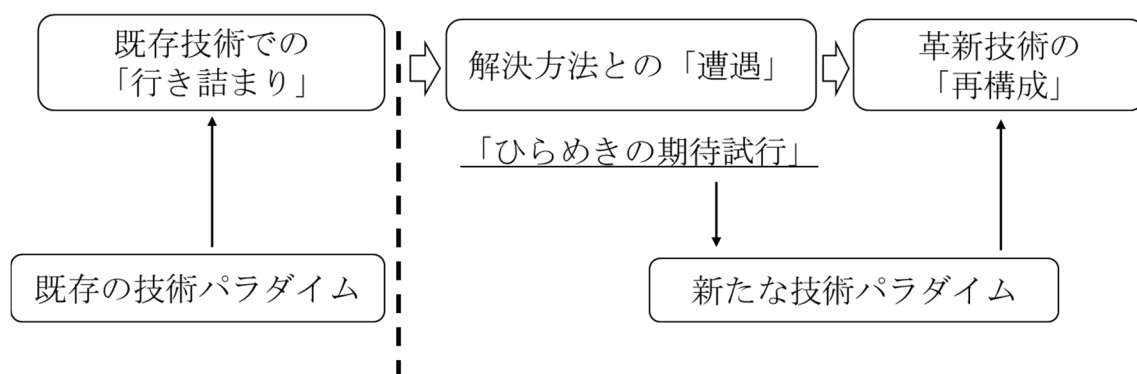
3.2 分析の枠組み

分析の枠組みは、技術パラダイム転換をベースに考察した技術ブレイクスループロセスの詳細仮説モデルとする。事例研究における分析の観点は、上述の先行研究分析の結果から、以下の3つとした。

³² 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、不採用とした。

- ①既存技術、新たな革新技术は何であったか。
- ②どのようなプロセスで解決方法と遭遇したか。
- ③解決方法との遭遇は、どのような「ひらめきの期待試行」によるものか。

そこで、前章で先行研究から考察して導いた、技術ブレイクスルーのプロセスモデルを中心に、図 3-1 のような分析の枠組みを設定した。



（出所）筆者作成。

図 3-1 技術ブレイクスルーの分析の枠組み

すなわち、技術ブレイクスルーの基本的なプロセスは、「既存の技術パラダイム」に基づく「既存技術での行き詰まり」の後、「ひらめきの期待試行」により「解決方法との遭遇」し、それによって得られた「新たな技術パラダイム」により「革新技术の再構成」が起こるものとする。

ここで事例研究において着目すべき点は、「既存技術」「革新技术」「ひらめき」が何であったかということと、「ひらめきの期待試行」がどのようにして起こったかのプロセスと要件である。

3.3 事例の選定と調査

3.3.1 事例の選択理由

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

①革新技术の価値

青色 LED 半導体材料における革新技术は、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³³。青色 LED の実現によって高い電力効率で長寿命の白色光源が実用化された結果、今や目にする光源の多くが LED となっている。従って、本革新技术の価値は極めて高いと考えられる。2014 年度のノーベル物理学賞を受賞していることから、その価値の高さは万人の認めるところである。

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术は、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産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 つの非連続的な革新技术開発によるブレイクスルーであった³⁴。

また、本論文の事例分析では技術開発の詳細プロセスに迫るにあたって、筆者が技術を理解できることも大切なポイントである。青色 LED の半導体材料開発は、筆者の大学生の時に在籍した研究室のテーマであり、技術の中身や実験の方法を自ら

³³ 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。

³⁴ 平成 17 年度版『科学技術白書』P.27 より。同白書では、3 つの技術ブレイクスルーの貢献に言及している。その後に、ノーベル賞を受賞した中村修二教授の企業化・量産化のためのブレイクスルーにも言及しているが、これはその内容からそれ以前の 3 つの技術ブレイクスルーを前提として連続的な革新技术である。従って、その功績は産業上顕著ではあるが、本論文における技術ブレイクスルーの構造研究の事例研究の対象には適切でないと考えて、取り扱っていない。以下 3 つの論文を参照した。

S. Nakamura, “GaN Growth Using GaN Buffer Layer”, Jpn. J. Appl. Phys., 30, pp. L1705-1707 (1991).

S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, “Thermal Annealing Effects on P-Type Mg-Doping GaN Films”, Jpn J. Appl. Phys., 31, pp. L139-L142 (1992).

S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mikai, “p-GaN/n-InGaP/n-GaN Double-heterostructure Blue-light-Emitting Diodes”, Jpn J. Appl. Phys., 32, pp. L338-341 (1993).

熟知しており、技術開発の詳細プロセスを分析しやすいことも選定理由である。

③必然による飛躍の価値

青色 LED 半導体材料の革新技术開発は、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、「柵からぼたもちと言いますが、柵の下にいなかったらぼたもちは取れない。努力しているからこそ見逃さずにつかみ取るわけで、努力がなかったら絶対に成功は無い」³⁵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。

3.3.2 事例調査の方法

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。

青色 LED 半導体材料開発の事例の中には、3 つの技術ブレイクスルーの事例があり、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て文献が豊富であること、行為主体が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ため、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と考えられる。

具体的な調査について、3 つの技術ブレイクスルーを実現した、赤崎勇（名城大学終身教授）、天野浩（名古屋大学教授）、松岡隆志（東北大学教授）、天野と技術開発を行った鬼頭雅弘（名古屋大学教授）の 4 名について、公開された関連情報を調査した。公表された文献として、赤崎、天野については自筆の書籍、投稿文献、HP を含む雑誌での記事を中心に、第三者の執筆した書籍も参考にした。松岡には自筆

³⁵ 週刊『東洋経済』2014.11.22, pp.90-91「企業と天才」より。本文献において天野は、「セレンディピティなんて、そんなものあるわけない」と述べている。セレンディピティには様々な定義があるが、本文献の文脈から天野は、偶然にたよるのではなく努力が大切であることを強調するために言ったと考えられる。

の書籍が無いため、投稿文献、HP を含む雑誌での記事と本人へのインタビューにより調査を行った。また、鬼頭にはインタビューを行なった。赤崎と天野へのインタビューも試みたがノーベル賞受賞後ということでスケジュールが確保できなかったため、雑誌でのインタビュー記事、ノーベル賞の記者会見でのインタビューを用いることで代用した。

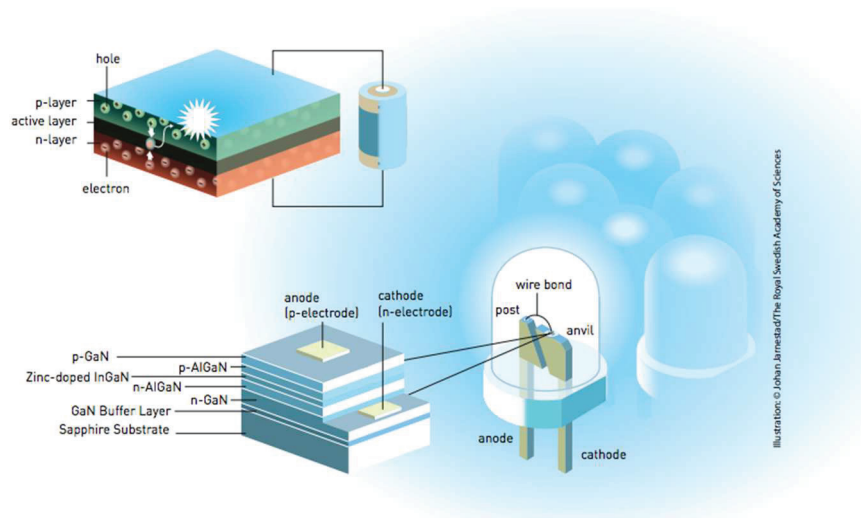
3.4 青色 LED 半導体材料の開発と 3 つの技術ブレイクスルー

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。

しかし、2014 年 10 月に、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、ノーベル物理学賞が赤崎勇 (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³⁶。

図 3-2 は LED の基本原理と構造である。LED は一般的に、基板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。LED の基本構造は、プラスの電気的特性を持つ p 型半導体とマイナスの電気的特性を持つ n 型半導体を合わせたものとなっており、そこに電圧をかけると発光する。実際には半導体の層は幾重にも積層されており、この半導体の種類によって発光波長、電気的特性や品質、発光効率や寿命が決まるため、この半導体材料の開発が LED を実用化する上で重要なポイントとなっていた。

³⁶ 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。



(出所)『Nobelprize.org』 Press Release 7 October 2014 より

図 3-2 LED の基本原理と構造³⁷

「20 世紀中には実現不可能」と言われていた青色 LED を実現するための半導体材料開発において、それまでの常識を覆す 3 つの技術ブレイクスルーが以下であった³⁸。

- ① 高品位の均一 GaN 結晶をつくること
- ② GaN を P 型化すること
- ③ 窒化インジウムガリウム（以下 InGaIn）混晶をつくること

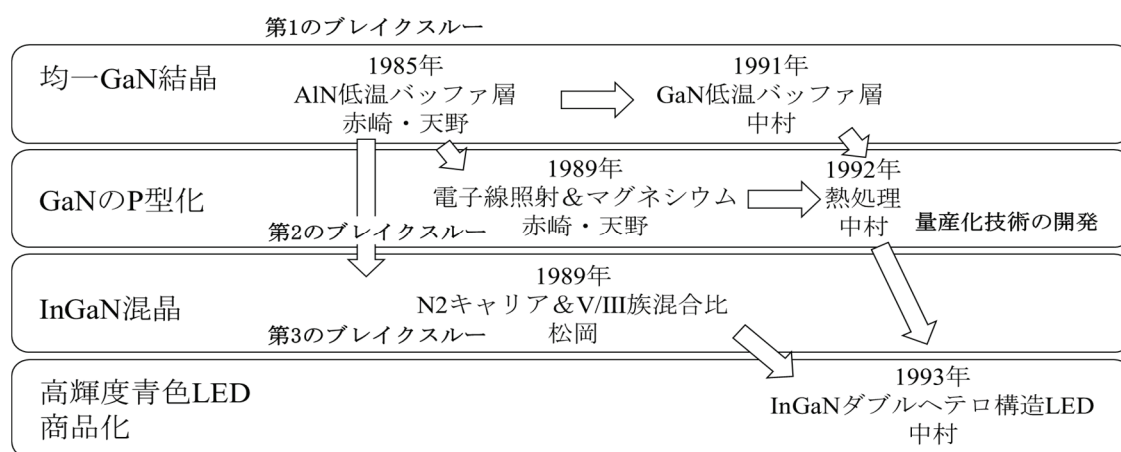
①は赤崎（当時名古屋大学教授）と天野（当時名古屋大学大学院博士課程）による窒化アルミ（以下 AlN）低温バッファ層、②は赤崎と天野によるマグネシウムドーピング³⁹GaN への電子線照射、③は松岡隆志（当時 NTT）による、窒素キャリアガスと、原料ガスの V/III 族混合比により実現された（赤崎, 2013; 天野, 2015）。

³⁷ https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/diode.pdf より（2017/2/11 取得）。

³⁸ 2005 年度版『科学技術白書』より（http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286184/www.mext.go.jp/b_menu/houdou/17/06/05060903/006.pdf 2017/5/8 取得）。

³⁹ ドープとは、半導体結晶構造中に電荷の異なる原子を一定の割合混入させて、p 型（プラス）又は n 型（マイナス）の電気的特性を与える方法である。

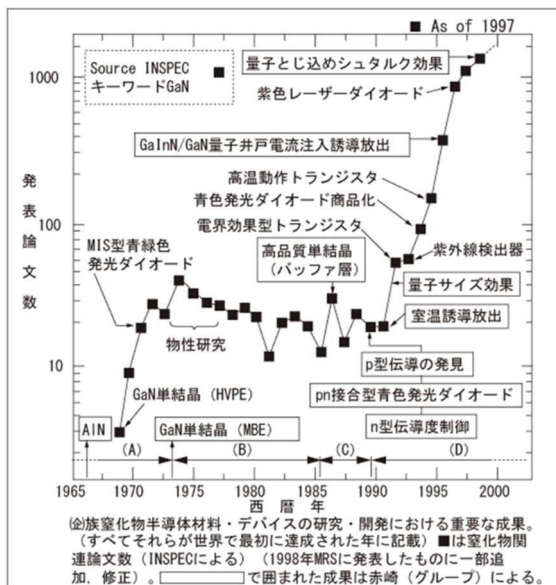
図 3-3 に青色 LED 半導体材料開発の 3 つの技術ブレイクスルーとそれらの関係を示す。まず 1985 年に赤崎、天野により均一 GaN 結晶が、AlN 低温バッファ層で実現された。これが第 1 の技術ブレイクスルーである。次に、第 1 の技術ブレイクスルーをベースにして、1989 年に GaN の p 型化が電子線照射とマグネシウムドーピングにより実現する。これが第 2 の技術ブレイクスルーである。そして、同じく 1989 年に、これも第 1 の技術ブレイクスルーをベースにして、InGaN 混晶が窒素キャリアと V/III 族混合比によって実現する。これが第 3 の技術ブレイクスルーである。



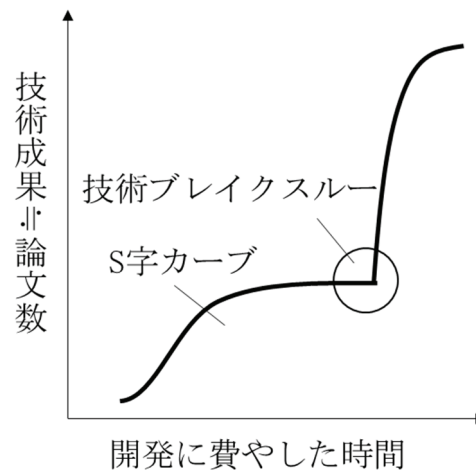
(出所)『科学技術白書』(2005) より筆者作成。

図 3-3 青色 LED 半導体材料開発の 3 つの技術ブレイクスルー

これらの革新技术は、世の中の技術開発にどのようなインパクトを与えたのだろうか。そこで、図 3-4 の左図に GaN に関する発表論文数の時間推移を示す。発表論文数は、1970 年代に急激な伸びを見せるものの、その後 1980 年代には飽和状態となっている。しかし、3 つの技術ブレイクスルーが論文発表された 1989 年を境に、新たに急激な論文数の伸びがみられる。発表論文数は、技術成果の結果を世に公開したものであるから、技術成果に同義と考えられる。すなわち、図 3-4 の右図に示すように、GaN 材料開発の技術成果は、「S 字カーブ」で表現される技術進化の限界に達した後、3 つの技術ブレイクスルーによって、新たな大きな進化を遂げたと言える。



(出所) コバルトブルーに魅せられて
-前人未到の GaN p-n 接合への挑戦-
「光と画像の技術月刊誌 OplusE」より。



(出所) 筆者作成。

図 3-4 GaN に関する論文数の推移

青色 LED 材料開発の新たな技術進化が可能になったのは、p 型化による pn 接合 LED と、InGaN 混晶による発光波長制御の 2 つが実現したからである。そして、これらの技術ブレークスルーには、均一 GaN 結晶の実現が必須であった。それぞれが既存技術では到達し得ない飛躍的な革新技術である上に、それらが連鎖かつ組み合わせることで初めて青色 LED が実現した。従って、これらの 3 つの事例を紐解くことは、技術ブレークスルーの構造研究に重要な示唆を与えうると考えられる。そこで、それぞれの技術ブレークスルーの開発プロセスについて、詳細な事例調査を行った。

3.5 均一 GaN 結晶

青色 LED の開発がスタートした 1960 年代後半から 1970 年代にかけて、GaN 以外に炭化ケイ素（以下 SiC）やセレン化亜鉛（以下 ZnSe）といった他の材料も研究されていた。SiC は、発光効率の良い LED を作るのに必須の pn 型を作ることがで

きた。pn 型とは、p 型半導体（正孔⁴⁰が電荷を運ぶ半導体）と n 型半導体（電子が電荷を運ぶ半導体）を接合して作られる LED の半導体の層構造のことである。しかし、SiC は間接遷移型⁴¹とあって、原理的に発光効率が低いことが知られていた。ZnSe は、pn 接合を作ることはできなかったが、結晶成長に必要な基板として、すでに良質な単結晶が得られていたガリウムヒ素（以下 GaAs）を使用できたことと、結晶を加工しやすいこと、直接遷移型であったことから、多くの研究者から本命視されていた。GaN は、直接遷移型であったものの、pn 型を作ることはできないと言われており、結晶成長も加工も困難な材料と考えられていた。

当時松下電器東京研究所に所属していた赤崎は、窒化アルミニウム（以下 AlN）、GaAs の結晶成長や物性の研究、ガリウムヒ素リン（以下 GaAsP）による赤色 LED、ガリウムリン（GaP）による緑色 LED といった発光デバイスの開発を行っていた。民間企業で商品作りを経験していた赤崎は、青色 LED を実現するための材料として、結晶化の難易度よりもデバイスとしての実用性、すなわち長時間安定して動作できる物理的および化学的安定性に着目して GaN を選択した。

世界で初めて GaN の単結晶膜を作ったのは、RCA 研究所の H. P. Maruska ら（1969）⁴²であった。また、この結晶を用いて同研究所の J. I. Pankove ら（1971）⁴³が初の青色 LED を pn 型ではなく MIS（Metal-Insulator-Semiconductor）型で製作した。

MIS 型は図 3-5 に示すように、i 型半導体（intrinsic semiconductor）という電気特性を与えるための不純物をドーパ（注入）していない半導体と、マイナスの電気的特性を持つセレン等を添加した n 型半導体の組み合わせで発光可能な LED である。当時、i 型や n 型の GaN は作製できたが、p 型の GaN は作製できなかったため、仕方なく MIS 型の青色 LED を作製した。しかし、プラスの電気的特性を持つ p 型半

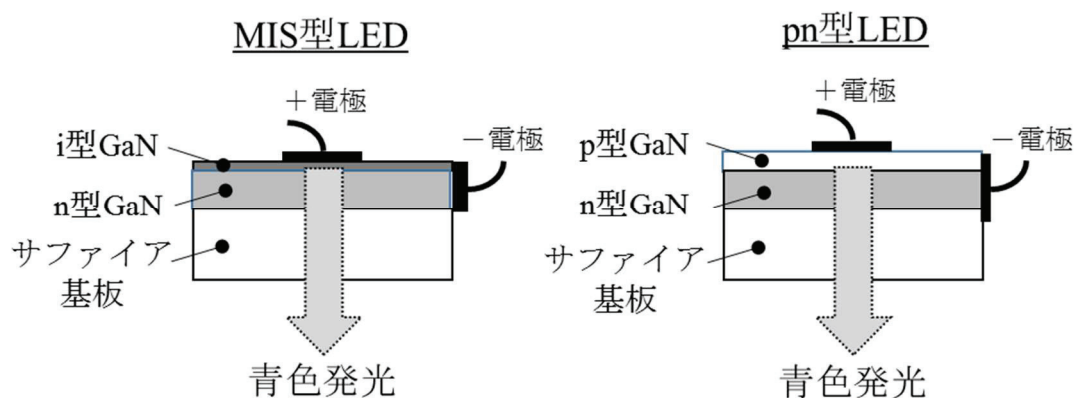
⁴⁰ 正孔とは半導体結晶で電子の抜けたプラスの電気を帯びた穴（天野, 2015）。

⁴¹ 間接遷移型とは、伝導帯と価電子帯の運動量に差があり、バンドギャップのエネルギーの一部が結晶振動に消費され発光が少ない半導体のこと（天野, 2015）。

⁴² H. P. Maruska and J. J. Tietjen, "*The Preparation and Properties of Vapor-deposited Single-crystalline GaN*", Appl. Phys. Lett., 15, pp. 327-329 (1969).

⁴³ J. I. Pankove, E. A. Miller, and J. E. Berkeyheiser, "*GaN Electroluminescence Diodes*", RCA Review, 32, pp. 383-385, (1971).

導体と n 型半導体を合わせて作る pn 型に比べて、発光効率が低く輝度が暗いことが知られていた。



(出所) Pankove (1971), Amano (1989)より筆者作成⁴⁴。

図 3-5 MIS 型 LED と pn 型 LED の構造比較

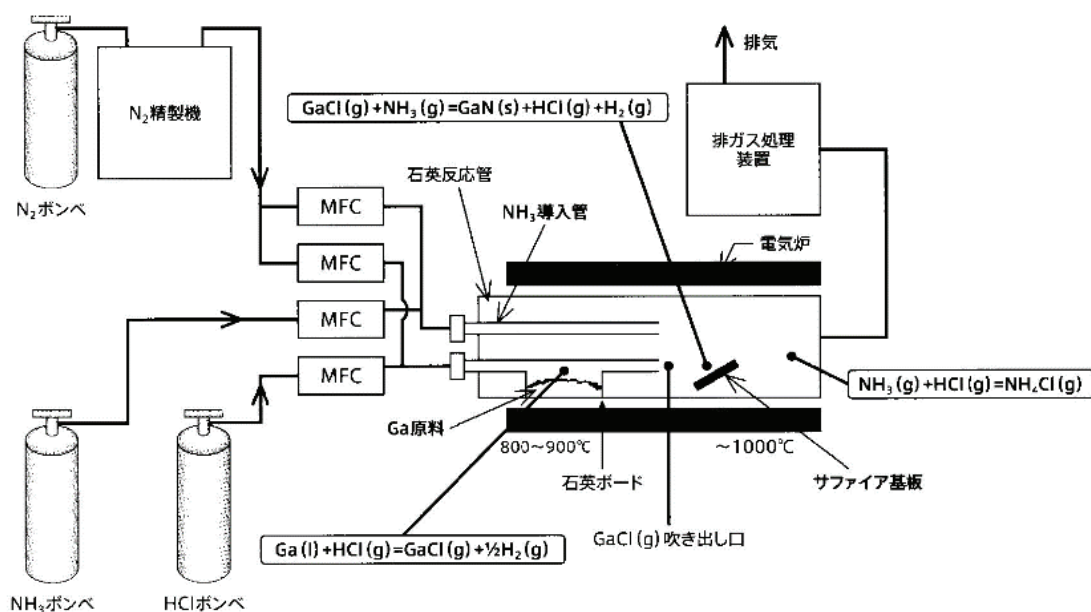
この報告を受けて一時期 GaN を開発する研究者が増えた。しかし、結晶の品質がなかなか向上せず pn 接合もできなかったため、青色 LED の開発からの撤退や、ZnSe 開発への転向が増えていった。一方の ZnSe も、結晶が脆いため輝度や発光寿命が延びず、青色 LED 半導体材料の開発は世界的な行き詰まりを見せていた。しかし、赤崎は GaAs 結晶の開発の経験から、きれいな GaN 結晶を作ることができれば、pn 接合の青色 LED を実現できるという信念を持ち、開発をあきらめなかった（赤崎,2013）。

赤崎は 1973 年から、新たな結晶成長方法として、Maruska らが用いたハイドライド気相法（Hydride Vapor Phase Epitaxy 以下 HVPE 法）とは異なる、精密な結晶成長をコントロール可能な分子線エピタキシー法（Molecular Beam Epitaxy 以下 MBE 法）を選択し、通産省中核プロジェクトに金属ガリウムとアンモニアを原料とする案を

⁴⁴ Pankove, J. I., Miller, E. A. and Berkeyheiser, J. E. 1971., *GaN Electroluminescence Diodes*, RCA Review, 32, pp. 383-385. と Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., and Akasaki, I. 1989., *P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)*, Jpn. J. Appl. Phys. Lett. 28, L2112. の半導体構造から引用。

提案し採択された。そして GaN 結晶を 1974 年に初めて作製したが、当時の MBE 装置の完成度が低く、多量の不純物を含むため材料研究やデバイス作製には不適切であった⁴⁵。

続いて、1978 年に HVPE 法で当時世界最高効率の MIS 型青色 LED を開発し、8 千個の青色 LED を試作した。HVPE 法とは、図 3-6 に示すように窒素キャリアを使い、原料のアンモニアガスと塩素と加熱したガリウムから得た塩化ガリウムを電気炉の中で加熱したサファイア基板上で化学反応させる方法である。しかし、当時試作した MIS 型の青色 LED は明るさが暗く寿命も短かった。また、1981 年にはアメリカの技術展への展示や、「化合物半導体に関する国際シンポジウム」での成果報告も行ったが、全く反響がなかった。多くの研究者は GaN に注目しておらず、赤崎の心境は「我ひとり荒野を行く」⁴⁶といったものだった。



(出所) 赤崎記念研究館 LED 展示室パンフレットより。

図 3-6 HVPE 法による GaN 結晶成長

⁴⁵ 赤崎勇 私とブレークスルー GaN のヘテロエピタキシー —Empirical philosophy— 応用物理 60 周年記念特集号 応用物理とブレークスルー 応用物理 第 61 巻 第 4 号 (1992) 382.より。

⁴⁶ 赤崎 (2013, p.130) より。

ところが、赤崎はあきらめなかった。むしろ、HVPE 法で作ったクラック（割れ目）やピット（表面の小さな窪み）だらけの GaN 結晶の中に、ごく稀に存在するきれいな微小結晶を見て、“きれいな結晶ができる”こと示しており、可能性は「ゼロではなく 1 だ」と考えた。問題は、その小さな部分をいかにしてウエハ全体に広げるかであり、“結晶成長”の問題であった。そこで、赤崎は結晶成長という学問の原点に今一度立ち返ることを決心した⁴⁷。

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。pn 接合による青色 LED に必要な電気的特性を得るために、まずは均一な GaN 結晶を成長させることが優先と考えた。なぜなら、赤崎は GaN の結晶成長に取り組む前に、不純物や結晶の欠陥の非常に少ない高品質な GaAs 単結晶の成長に取り組んでおり、そこで「結晶の品質がよくなれば、物性も変わる」⁴⁸ことを実感していたためである。

1979 年から、GaN 結晶成長の手法について検討し直した。これまでの GaN 結晶成長の実験結果から、当時の MBE 法は結晶の成長速度が遅く、また超高真空のため窒素抜けが起こりやすいことから、均一な結晶成長は難しいとの結論だった。また、HVPE 法は成長速度が速いことと逆反応を防げないことから、均一な結晶成長には適していないと判断した。

そこで、有機金属気相成長法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition 以下 MOVPE 法) に着目した。この方法は原料を全てガスで供給するため、流量制御によって結晶成長速度を任意に変更できること、p 型化のための不純物ドーピングや混晶の組織制御が容易であることが特徴であった。また、結晶成長に用いる基板は、約 1 年にわたりサファイア、シリコン、ひ化ガリウム（以下 GaAs）といった材料を比較検討した。その結果、格子定数の差は大きいですが、GaN の成長条件であるアンモニア気流中で 1000℃という過酷な環境での耐性が最も優れた、サファイアを選択した（赤

⁴⁷ 赤崎（2013, p.131）より。

⁴⁸ 赤崎（2014, p.110）より。

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。しかし当時 GaN 結晶を成長できる装置も市販されているわけもなく、最先端であった MOVPE 装置は 5 千万円から 1 億円と高価で、当時の大学の研究予算 300 万円ではとても購入できなかった。このため、MOVPE 装置を自作した。

天野は、「いくら親切なメーカーでも、300 万で提供してくれる所はありません。ですから装置は自分で作り始めました。すぐに実験には着手できませんでしたが、今思えばそれが後の研究に大いに役に立ちました」と述べている⁴⁹。

装置の材料は、研究室の古い在庫品や購入品を使い、当時博士課程の小出康夫と修士課程の天野が自ら“MOVPE 装置 1 号機”を組み上げた (図 3-7)。



(出所) 日経テクノロジーオンライン『青色 LED を最初に光らせた赤崎氏と天野氏』より。

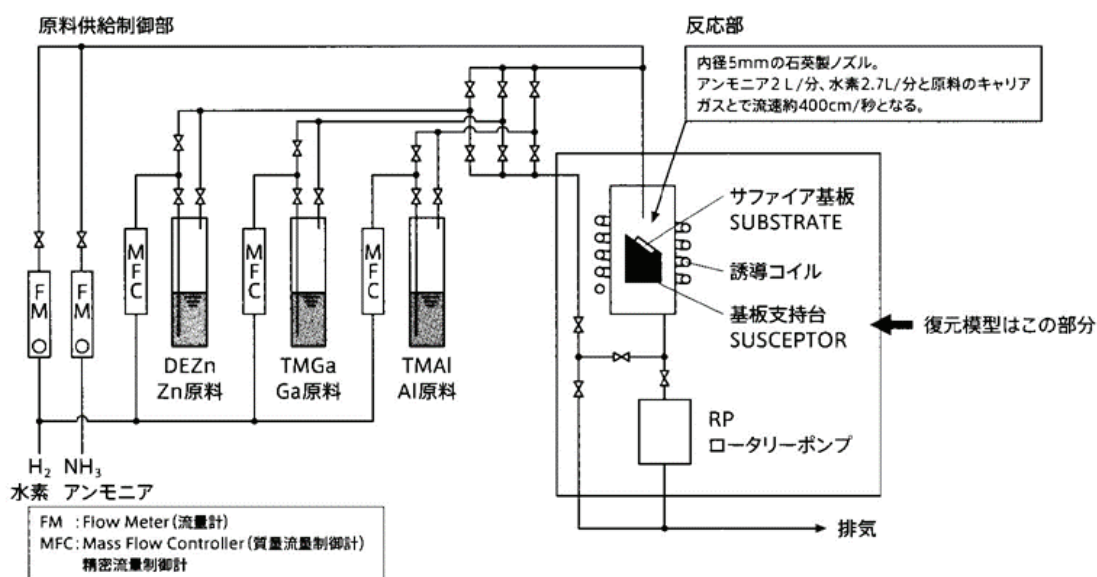
図 3-7 赤崎研究室の MOVPE 装置 1 号機⁵⁰

MOVPE 装置で GaN 結晶を成長させるには、トリメチルガリウム (以下 TMG) と

⁴⁹ ノーベル賞受賞者の天野氏が語る「LED の可能性と証明の未来」家電 Watch 2015.3.11 http://kaden.watch.impress.co.jp/docs/column/newtech/20150311_691993.html より (2015.11.24 取得)。

⁵⁰ <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20141008/381461/?ST=print> より (2017/5/8 取得)。

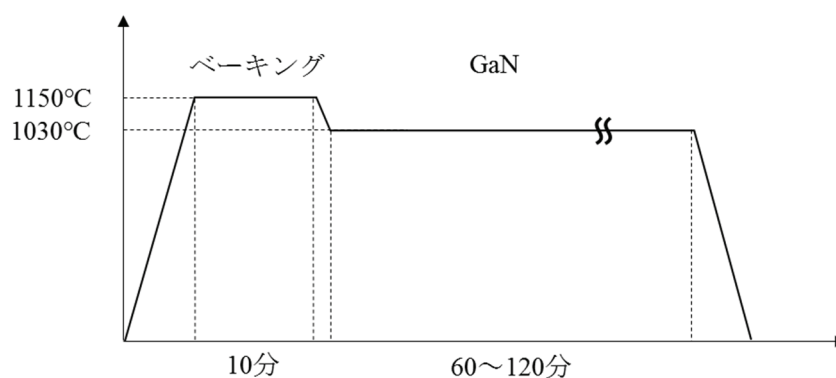
アンモニアのガスを、窒素キャリアガスと共に加熱したサファイア基板に吹き付ける。このため、MOVPE 装置は図 3-8 に示すように、中にサファイア基板が設置された誘導加熱ヒーターのついた石英管と、原料ガスとキャリアガスを供給、排出するための配管と、それらの流量や流すガスを選択するバルブで構成されている。原料ガスは、窒素の原料となるアンモニアガスとガリウム、亜鉛、アルミなどの金属の原料となる有機金属ガスである。これらはキャリアとなる水素ガスとそれぞれ混合されて、石英管の入り口で混合される。石英管を通ったガスの余りは、ロータリーポンプを通じて排気される。



（出所）赤崎記念研究館 LED 展示室パンフレットより。

図 3-8 MOVPE1 号機の配管模式図

また、図 3-9 は、GaN 結晶成長の基板温度、ガス導入タイミングと時間の設定を表した典型的なチャートグラフである。サファイア基板上の有機不純物をガス化して除去するため、最初に高温で熱するベーキングと呼ばれる処理を行う。その後、使用するガスに応じて基板温度と成長時間を設定する。このチャートグラフは、基板温度を 1150℃に熱してベーキングを行った後、基板温度を 1030℃に変更して GaN の原料ガスを 60～120 分流して、GaN 結晶を成長させる様子を示している。



(出所) 筆者作成。

図 3-9 GaN の典型的な成長温度条件

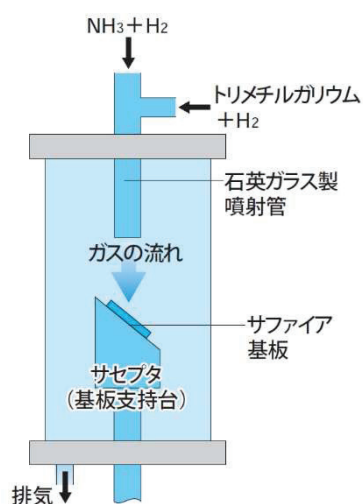
高い品質の GaN 結晶を成長させるには、サファイア基板の温度、ガスの混合比率と流量、成長時間といった効果の高い技術変数の選択と、それらの様々な組み合わせと数値から、最適な条件を探索する必要がある。

1982 年、赤崎研究室の天野（当時名古屋大学 4 年生）は、均一な結晶を成長させるため、この時の基板温度パターン、反応真空度、反応ガスの流量、成長時間などの成長条件調整を行った。しかし、条件調整だけではサファイア基板上に GaN 結晶は成長しなかった。このため、天野はガスの流れに着目し、発煙筒の原料を用いてガスの流れを観察した。すると、原料ガスがサセプタと言われる基板支持台に取り付けたサファイア基板を避けて流れることに気づいた。基板を高温に熱したことで基板上に対流が発生し、ガスが基板を避けて流れると考えた。そこで、図 3-10 のように、斜めに傾けたサファイア基板に対して、原料ガスの流速を従来の 5cm/s から 500cm/cm と 100 倍に高めて当てるようにした。サファイア基板に垂直にガスを当てると、基板からの対流の流れと原料ガスの流れが正面衝突するが、斜めにすることで、原料ガスが基板表面を流れるようにできる。また、原料ガス流速を思い切って高くすることで、対流に負けずに原料ガスを基板に流すことができる。アンモニ

アガスとガリウムの原料ガスは混ぜると反応しやすいことから当初は別々に供給していたが、流速をかせぐため直前で混合して一緒に供給することとした。

これだけの大掛かりな実験方法の変更には実験装置の改造が必要である。そこで、原料ガス供給のための石英のガラス管は自ら加工方法を習得し、最適な太さや長さを試すことで、きれいにガスを流せるようになった。サセプタもガスの流れを見て、自分で斜めに改造した。もともと MOVPE 装置 1 号機は自作の装置であったため、自分の思うように改造することができたことが功を奏した。

この結果、ウェハ上全面に均一な膜を作ることができるようになった。しかしまだ当初の目標であるような均一な GaN 結晶はできなかった⁵¹。



(出所) 日経テクノロジーオンライン『青色 LED を最初に光らせた赤崎氏と天野氏』。

図 3-10 GaN 結晶成長のためのガス流量制御

原料ガスの流速と当て方を工夫しても結晶内の欠陥が非常に多く、電気特性が悪い主な原因は、基盤のサファイアと GaN の格子定数のギャップが約 15%あることと、熱膨張係数の差が大きいことであった。これによって結晶が規則正しく成長しないため、十分な電気的特性を得られなかった。

⁵¹ 日経テクノロジーオンライン『青色 LED を最初に光らせた赤崎氏と天野氏』
2014.10.9 <http://techno.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20141008/381461/> (2015.5.26 取得)。

また、当時の結晶成長の主流の考え方は、「平滑できれいな基板上に精密に原子を成長させること」であった。当時主流であった GaAs 系Ⅲ/V族化合物半導体の結晶成長では、単層の制御が議論されていた。すなわち、結晶成長とは原子一個一個を人工的に制御して並べるものという考え方が大勢を占めていた⁵²。従って、欠陥の無い均一な結晶を作るには、欠陥のきっかけとなるものは微細であっても基板上から取り除き、平滑できれいな状態にしておくことが常識であった。

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）結晶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。赤崎は天野に格子定数が大幅に異なる結晶成長のバッファ層の材料として、GaN と格子定数の近い AlN、ZnO、GaN、SiC を挙げていた。特に、赤崎は 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から、AlN を勧めていた。しかし、3 年間で合計 1500 回にも及ぶ実験にも関わらず、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）。

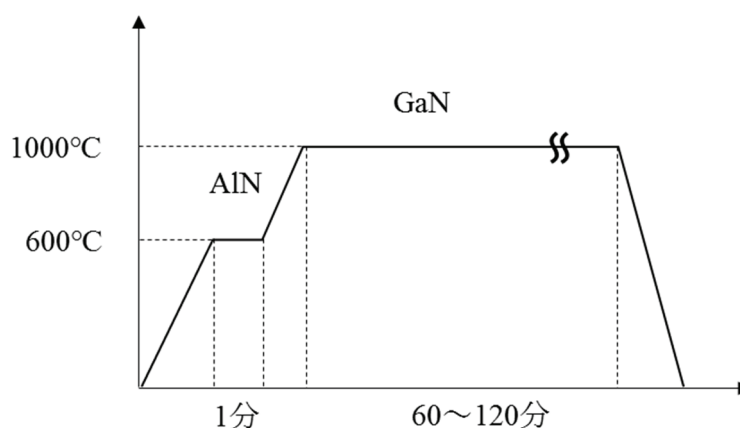
この時、AlN 低温バッファ層のアイデアをひらめいた。電気炉の温度が上がらないという偶然のきっかけから、澤木の「汚い結晶表面でも良い場合がある」という言葉を思い出した⁵³。そこで、澤木の話と同じように汚い結晶表面のバッファ層を形成した後に GaN 結晶を成長させてみようと考えた。澤木のボロンリン（以下 BP）

⁵²天野浩 赤崎勇 『サファイア基板上Ⅲ族窒化物半導体成長における低温堆積層の効果と機構』応用物理 第 68 巻 第 7 号 (1999) 768 より。

⁵³ 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）において、朝日新聞の記者の質問に対して、澤木のエピソードを紹介した上で感謝の意を述べた。（<https://www.youtube.com/watch?v=mfvAS5H-Edo> 「(全録)ノーベル賞・天野浩教授が記者会見 その 1」4 分 48 秒より 2016/5/8 取得）

結晶成長の経験談⁵⁴から、まばらな結晶の「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。バッファ層の材料は AlN にしようと考えた。一緒に実験していた小出の作る AlN が天野の GaN より表面が平坦だったためである⁵⁵。天野は、小出の実験から AlN の結晶成長の条件と出来上がる結晶の状態を熟知していたため、AlN の結晶の核をサファイア上にまばらに成長させて、「汚い結晶表面」にするための実験条件を、すぐに考えることができた。

そこで、まず図 3-11 に示すように、低温の 600℃で AlN を短時間成長させて、結晶の核をサファイア基板上に成長させ、その後に 1000℃で従来と同じように GaN を成長させた。



(出所) 筆者作成。

図 3-11 AlN 低温バッファ層による結晶成長条件

この結果、GaN 結晶のマクロ、ミクロな欠陥や不純物が大幅に低減し、結晶性、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。すなわち、以下の

⁵⁴ 澤木はシリコン基板上への BP 結晶成長で、ミスマッチが大きくなかなかうまくいかなかったが、シリコン基板にリンを先に流すことできれいな BP 結晶成長に成功した。リンの結晶の核を起点としてボロンリンが基板の横方向に成長したと推定していた。リンを先に流した時の基板の見た目が汚かったため、「汚い結晶表面でも良い場合がある」といわれていた。天野 (2015, p94-95) より。

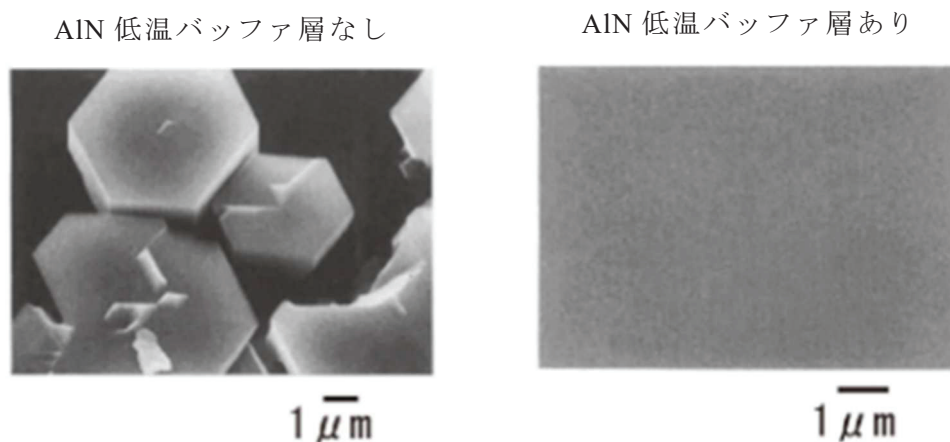
⁵⁵ 天野 (2015, p.95) より。

5 つの特徴をもつ GaN 結晶を得られた⁵⁶。

- ①クラックやピットのない平滑かつ透明な単結晶膜が、再現性良く得られる。
- ②X 線回折線幅が、従来の数分の一に低減した。
- ③発光特性が大幅に改善した。
- ④電子密度が 2～3 桁減少、移動度は 1 桁以上向上した。
- ⑤欠陥は界面近傍 200nm までで、上層部にはほとんど観察されない。

これらは、これまでの GaN 結晶の特性を大幅に上回る画期的な成果であり、まさに第 1 のブレイクスルーであった。

図 3-12 に AlN 低温バッファ層によって均一平滑性を得られた結晶表面を示す。AlN バッファ層がないと表面に大きな凹凸が見えるが、AlN バッファ層があると結晶欠陥が無く平滑なため、まるでそこに何も無いかのように見えるほど透明で均一な GaN 結晶を得られた。



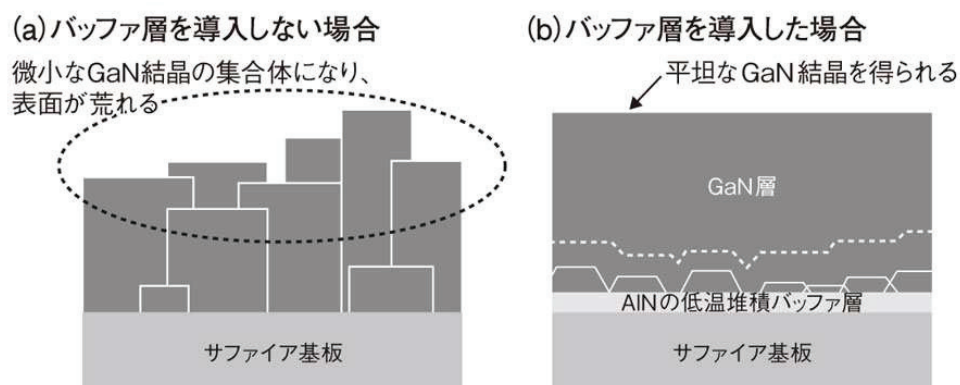
(出所) コバルトブルーに魅せられて -前人未到の GaN p-n 接合への挑戦-
(<https://www.adcom-media.co.jp/remark/2014/10/08/19433/5/> 2017/5/8 取得)。

図 3-12 AlN 低温バッファ層による結晶表面

ところが、なぜ AlN 低温バッファ層があるとき綺麗な結晶が得られるのか、そのメカニズムはあくまで天野の頭の中での想像に過ぎなかった。

⁵⁶ 赤崎勇 私とブレイクスルー GaN のヘテロエピタキシー - Empirical philosophy
- 応用物理 60 周年記念特集号 応用物理とブレイクスルー 応用物理 第 61 巻
第 4 号 (1992) 382. より。

そこで、その後成長条件を変化させた時の結晶の SEM (電子顕微鏡) 断面観察や、結晶成長中の電子線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を進めた⁵⁷。その結果、図 3-13 に示すように、バッファ層を導入しない場合はサファイア基板上に微小な GaN 結晶が思い思いに成長するため凹凸となるが、バッファ層を導入するとその後に GaN を高温で成長させることで、凹凸の無い平らな結晶面が形成されることがわかった。



(引用) 日経テクノロジーonline「ノーベル賞で注目の GaN 研究の歴史を振り返る」⁵⁸より。

図 3-13 AlN 低温バッファ層による GaN の均一な結晶成長のメカニズム

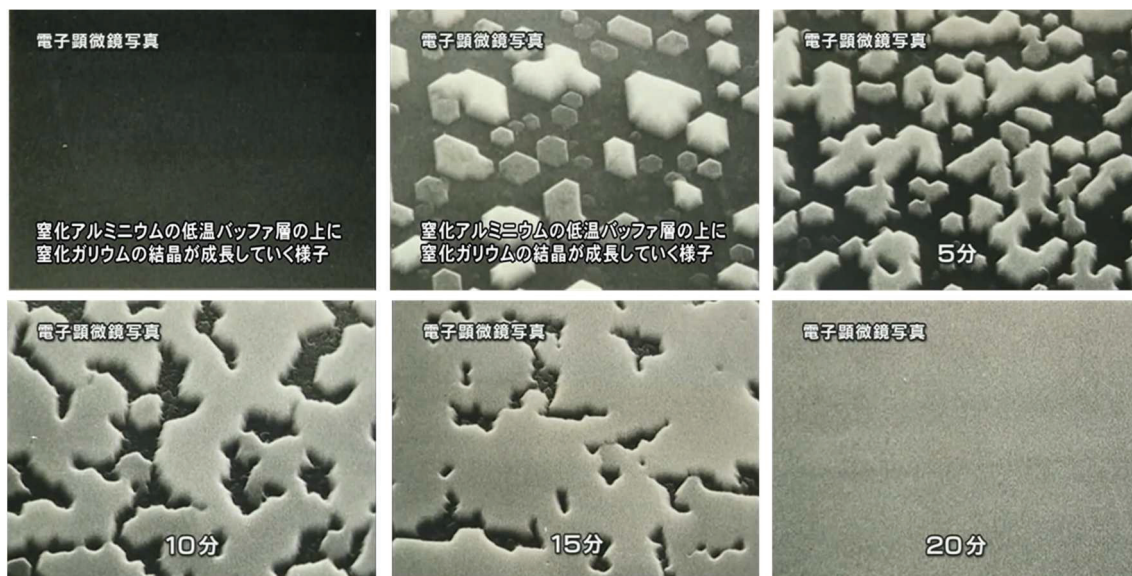
さらにその後、結晶成長中での電子顕微鏡による「その場観察」⁵⁹によって、詳細な結晶成長のメカニズムが明らかになった。すなわち、低温で成長した厚み数十 nm の AlN 薄膜は、非晶質あるいは多結晶状の膜だが、昇温過程において一方向に配向した直径 10~20nm の柱状の結晶に変化する。そして、均一核発生→幾何学的選別→島状成長→横方向成長→合体→層成長の順で、欠陥のない均一な GaN 結晶が成長することが明らかになった⁶⁰ (図 3-14)。

⁵⁷ H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide and N. Sawaki: J. Cryst. Growth 98, 209 (1989).より。

⁵⁸ <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/FEATURE/20141010/381871/?P=2> より (2017/5/8 取得)。

⁵⁹ <https://sciencechannel.jst.go.jp/D040506/detail/D040506001.html> より (2017/5/8 取得)。

⁶⁰ 平松和政 基礎講座 『GaN のエピタキシャル成長の実現まで』 応用物理 第 82 巻 第 5 号 (2013)。K. Hiramatsu, S. Ito, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi,



(出所) 科学技術振興機構 サイエンスチャンネル 青色発光ダイオード開発物語より

(<https://sciencechannel.jst.go.jp/D040506/detail/D040506001.html> 2017/5/8 取得)。

図 3-14 電子顕微鏡写真による GaN 結晶成長の「その場観察」

このように、結晶成長条件が最適化され、再現性が確認されたことで新たな革新技術が再構成された。これらの情報は学会や論文⁶¹、論文の引用を通じて世の中に知られて、次の p 型化、InGaN 結晶の技術開発のベースとなった (天野,2015)。

3.6 GaN の p 型化

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⁶²に 2 価原子⁶³を混ぜれば p 型化する」とい

and K. Oki: J. Cryst. Growth 115, 628 (1991).より。

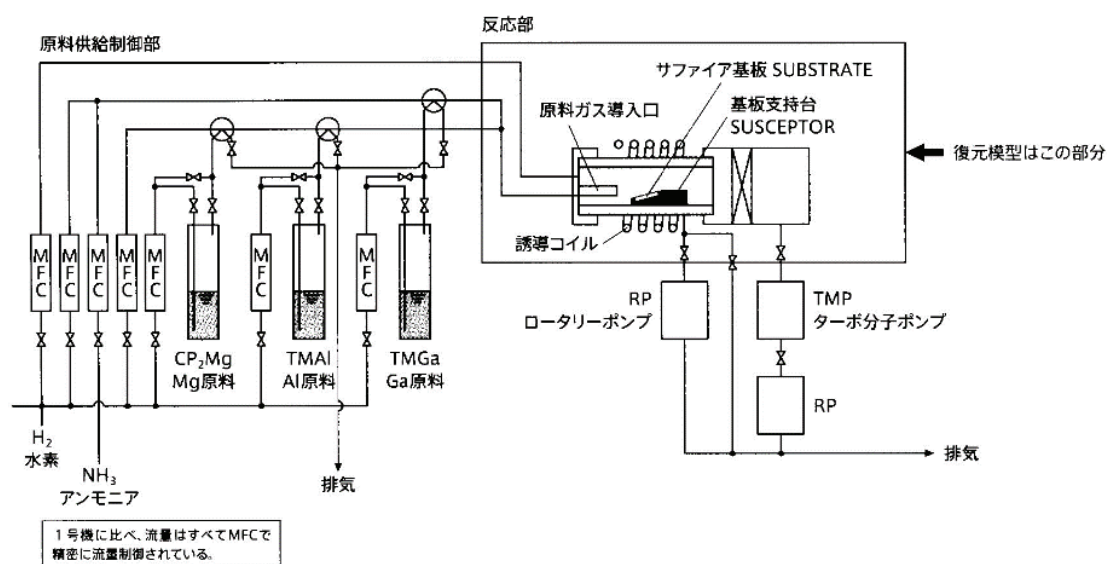
⁶¹ H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda. 1986: Appl. Phys. Lett. 48, 353.

⁶² III 族、V 族とは、化学元素の周期表における 1990 年改訂以前の呼称であり、現在では III 族は 13 族 (ホウ素 B, アルミニウム Al, ガリウム Ga, インジウム In)、V 族とは 15 族 (窒素 N, リン P, ヒ素 As, アンチモン Sb) を指す。本論文では、開発当時の呼称を尊重し、III 族、V 族を用いる。

⁶³ 2 価とは、原子の最外殻の電子の数が 2 個であることを指す。原子周期表において 2 族 (Be, Mg, Ca など) と 14 族 (Zn, Cd, Hg) が該当する。

う既存技術に則り、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、Pankove は「自己補償効果」⁶⁴により、原理的に 2 価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）してしまうと主張し、それが常識であった。

p 型化の実験にあたり、MOVPE 装置 2 号機を新たに購入して立ち上げた。図 3-15 は MOVPE 装置 2 号機の配管模式図である。



（出所）赤崎記念研究館 LED 展示室パンフレットより。

図 3-15 MOVPE 装置 2 号機の配管模式図

本装置は豊田合成株式会社との共同研究に対する旧新技術開発事業団（現 JST、科学技術振興機構）の研究支援予算によって ULVAC 社から購入したもので⁶⁵、基本的には MOVPE 装置 1 号機と同様に、原料となるアンモニアと金属ガスを水素キャ

⁶⁴ G. Mandel., 1963. *Self-Compensation Limited Conductivity in Binary Semiconductors. I. Theory*, Phys. Rev. 134A, 1073-1079 より。

⁶⁵ 天野浩『青色 LED 開発の軌跡とこれからの豊田合成の皆さんへの期待』豊田合成技報 Vol. 57 2015 (http://www.toyoda-gosei.co.jp/kigyou/technology/report/vol57/pdf/vol57_004.pdf 2016.5.8 取得) より。

リアガスで石英管の中で誘導加熱されたサセプタ上のサファイア基板に流す機構になっていた。2号機の特徴は、横型として原料ガスの基板上での流れを改良したことと、基板準備室を真空引きしてゴミが入りにくい設計として p 型化の特性に大切な余分な不純物を減らせる構造としたことである。半導体における伝導制御の正道は結晶をとことんまできれいにし、適切なアクセプター不純物をドーピングすることであり、これを極めればきっと p 型化ができると信じていた。

「p 型半導体を絶対作るぞ」と意気込んで、1985 年から 1988 年に渡り約 4 年間に渡り亜鉛を GaN にドーピングする実験を行ったものの鳴かず飛ばずで、GaN を p 型化することができなかった⁶⁶。

亜鉛ドーピングによる p 型化がなかなかうまくいかなかった時、1987 年に天野はインターンシップとして NTT 武蔵野通信研究所へ行き、GaAs（ガリウムヒ素）のカソードルミネッセンス（以下 CL）の実験をした。CL とは、半導体試料に電子線を当てた時の発光波長や強度を見ることで、結晶に含まれる不純物や欠陥の濃度を計測する方法である。天野にとっては、大学で実験ばかりしていたため、少しは社会の風に触れて外の空気を吸ってきた方がよいと赤崎が配慮してくれたものだと考えていた⁶⁷。一方の赤崎は、昔に比べて格段にきれいな亜鉛ドーピング GaN の CL での発光波長と強度の特性に興味があり、インターン先として CL の測定装置のある NTT 武蔵野研究所を選び、友人の石井芳一室長に天野のインターンシップ受け入れを依頼していた⁶⁸。

インターンシップの最後に自由に装置を使ってよいという許可をもらい、名古屋大学で作製した亜鉛をドーピングした GaN 結晶の CL 実験を行った。すると、不思議なこと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に気づいた。これを LEEBI（低速電子線照射）効果と名付けた⁶⁹。この時そのメカニズムは不明であった

⁶⁶ 天野（2015, p114）より。

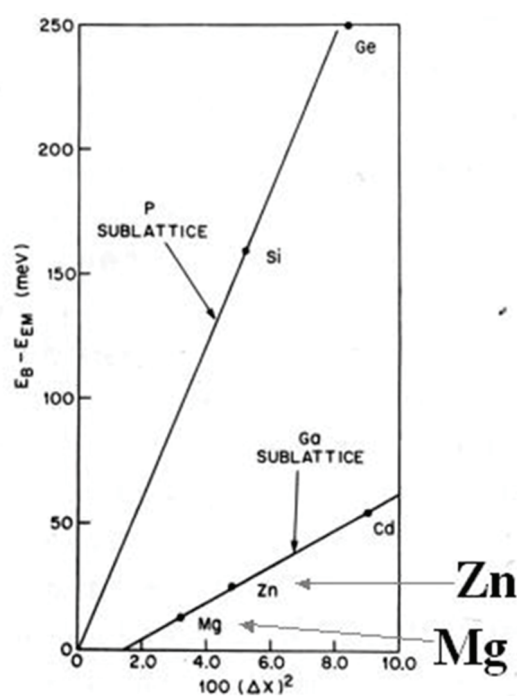
⁶⁷ 天野（2015, p115）より。

⁶⁸ 赤崎（2013, p169）より。

⁶⁹ 天野ら（1989）P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)より。

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。この電子線を照射することによる活性化によって、p 型化しているかもしれないという期待があり、NTT で CL 実験をした亜鉛ドーパ GaN のホール効果測定を行ったが、残念ながら p 型化はしていなかった。

その後、天野は助手になるため講義に使用する教科書を探すため読んでいたフィリップス著の「半導体結合論」のグラフを見て、これまで検討していた亜鉛よりマグネシウムの方が、活性化エネルギーが小さく p 型化しやすいことに気づいた。図 3-16 は「半導体結合論」のグラフで、横軸の電子親和力と縦軸の活性化エネルギーがリニアな関係を持つことを示している。そのライン上に亜鉛 (Zn) とマグネシウム (Mg) が記載されているが、天野はこれに気づいたのである。



(出所) フィリップス「半導体結合論」より。

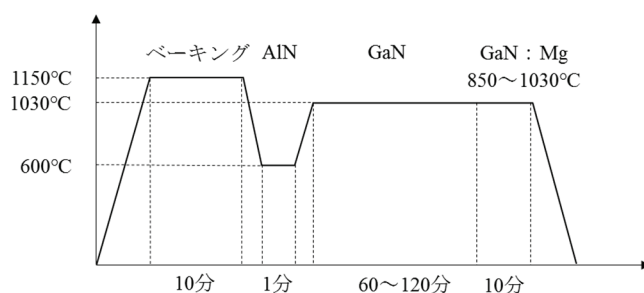
図 3-16 フィリップス著の「半導体結合論」のグラフ

そこで、マグネシウムの材料を 2 種類購入することとした。粉状の CP2Mg (ダルトン)、液体状の MCP2Mg (住友化学) である。当時これらの材料は 50 万円と高価であったが、マグネシウムの方が p 型化しやすい確信があったことと、当時 GaN

へのドーピングは亜鉛でないといけない風潮があったが、マグネシウムをドーピングする報告もあることから赤崎を説得して購入した。材料が届くまで8か月かかったが、入手するとすぐにマグネシウムをドーピングした GaN 結晶の成長実験を行った。そこで、マグネシウム注入量と濃度、サファイア基盤温度の影響、マグネシウムの注入深度を実験し、亜鉛より添加効率が高いこと、1000℃付近で温度影響がないこと、濃度調整が容易であることを確認し、きれいな結晶を作ることができるようになった⁷⁰。しかし、残念ながらマグネシウムを使っても、p 型化はしなかった(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天野はひらめいた。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電子線照射によって p 型化するのではないかと考えた。天野はすぐに定例ミーティングの場で鬼頭雅弘(当時名古屋大学大学院修士課程)に実験を指示した。マグネシウムを混ぜた GaN 結晶の成長条件は、これまでの実験結果から図 3-17 のように設定した。

原材料(単位)	AlN	GaN	GaN : Mg
TMA (μmol/分)	3.6		
TMG (μmol/分)		68	68
CP2M g (μmol/分)			0.2~6.0
MCP2M g (sccm)			25~200
H ₂ (slm)	3.0	2.0	2.0
NH ₃ (slm)	1.5	1.5	1.5



(出所) 名古屋大学大学院修士論文(鬼頭)より筆者作成。

図 3-17 マグネシウムドーピング GaN の結晶成長条件

⁷⁰ 2016 年 10 月 14 日 13:00-15:00 の鬼頭へのインタビュー、名古屋大学大学院修士論文(鬼頭)より。

肝心の電子線照射については、大学の機器では電子線の強度が不十分であったため、1986年から共同開発を行っていた豊田合成株式会社の RHEED 装置を借用させてもらった。電子線照射には 1 回あたり 7~8 時間かかったが、豊田合成株式会社の技術者は快く実験させてくれた。そこへ、天野と鬼頭は、片道 1 時間かけて何度も通って、実験を行った。

結果、電気抵抗が大幅に減少することを確認できたが、アルミ電極ではオーミックコンタクトが取れず、すぐには p 型を確認するための Hall 効果を測定できなかった。そこで電極をアルミから金に換えて、ようやく p 型であることを確認できた。当時を振り返り、鬼頭は以下のように述べている⁷¹。

「世の中ではできないはずの P 型ができたので証明が大変だった。論文投稿に向けて約半年かけて慎重に測定を行った。」

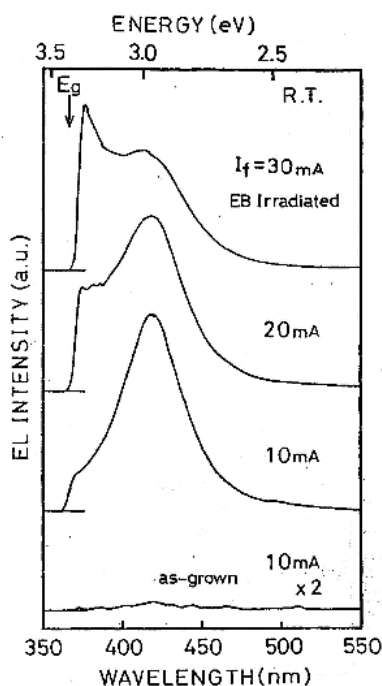
光を当てて励起光の波長を測定する PL（フォトルミネッセンス）法⁷²では P 型かどうかわからなかった。このため、pn 接合で電気発光を見る EL（エレクトロルミネッセンス）法⁷³で紫外光を観測し p 型の確証を得た。実はこの時、電流値 20mA まてだと、p 型であることを証明できなかった。図 3-16 を見てわかるように、電流値 30mA のグラフが示す短波長でのシャープな発光強度こそが p 型化の証であった。大きめの 30mA の電流を流して計測しようと考えたことが功を奏して紫外スペクトルを得たことが p 型化の証明につながったのである⁷⁴（図 3-18）。

⁷¹ 2016 年 10 月 14 日 13:00-15:00 の鬼頭へのインタビューより。

⁷² ルミネッセンスの一種。蛍光体などの物質が外部から光・紫外線・X 線などのエネルギーを吸収して励起し、基底状態に戻るときに発光する現象（デジタル大辞林より）。

⁷³ 電界による固体の発光現象。電場発光，電界ルミネッセンス，略して EL とも呼ばれる（デジタル大辞林より）。

⁷⁴ 2016 年 10 月 14 日 13:00-15:00 の鬼頭へのインタビューより。GaN の p 型化は不可能だと言われている中で、p 型化を証明するための方法確立するために、多くの努力が払われたという。



発光スペクトル ($[Mg] : 5.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)

(出所) 名古屋大学大学院修士論文 (鬼頭) より。

図 3-18 EL 法による p 型 GaN の紫外スペクトル

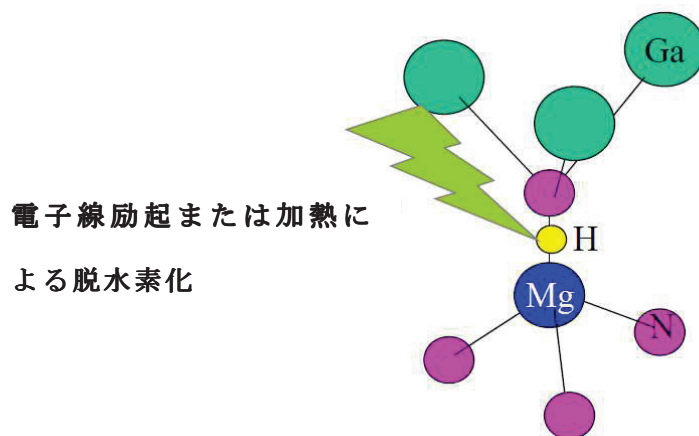
これにより軽井沢の GaAs シンポジウムで GaN の p 型化について学会発表を行ったが全く反響が無かった。しかし、中国のルミネッセンス国際会議では多くの研究者が興味を持ってくれた (天野, 2015)。p 型化を実現した天野は、1989 年 pn 接合型の青色発光ダイオードを世界で初めて製作し、論文を発表した⁷⁵。

天野は、自己補償効果などで極めて困難と言われた p 型 GaN を実現できたこと、低電圧駆動可能な pn 接合が実現したことによって、未踏と言われた GaN 系半導体の実用化の可能性を示す、ブレイクスルーと呼ぶにふさわしい功績を残した⁷⁶。

⁷⁵ Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., and Akasaki, I. 1989., *P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)*, Jpn. J. Appl. Phys. Lett. 28, L2112. より。

⁷⁶ 赤崎勇 私とブレイクスルー GaN のヘテロエピタキシー — Empirical philosophy — 応用物理 60 周年記念特集号 応用物理とブレイクスルー 応用物理 第 61 巻 第 4 号 (1992) 382 より。

電子線照射による p 型化という新たな解決方法を見出せたが、まだメカニズムは不明であった。電子線照射では、電子よりはるかに質量の大きな原子を動かすことはできないので、なぜ電氣的に活性するかがわからなかった。しかし、後に中村ら熱を与えることによって p 型化できることを発見し、図 3-19 のようにドーパされたマグネシウムをパッシベーションしていた水素が、電子線や熱によって離脱するため p 型化するのではないかと考えられた⁷⁷。さらにドーパされた GaN での水素の振る舞いの研究が進み⁷⁸、p 型化のメカニズムは明らかにされていった。



(出所) 科学技術政策研究所シンポジウム 近未来への招待状より⁷⁹。

図 3-19 電子線照射による p 型化のメカニズム

このように、「III/V族半導体に 2 価原子を混ぜれば p 型化する」という既存の技術に対して、「GaN にマグネシウムを混ぜて電子線を照射する」という新たな革新技術を生み出すことができた（天野,2015）。

⁷⁷ S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, and T. Mikai, "Hole Compensation Mechanism of P-Type GaN Films", Jpn. J. Appl. Phys., 31, pp. 1258-1266 (1992). より。

⁷⁸ Jorg Neugebauer and Chris G. Van de Walle, "Role of hydrogen in doping of GaN", Appl. Phys. Lett. 68 (13), 25 March 1996. より。

⁷⁹ 天野浩『近未来への招待状』科学技術政策研究所シンポジウム 2010.4.22
<http://www.nistep.go.jp/conference/nt100422/pdf/02amano.pdf> (2016.1.28 取得) より。

3.7 InGaN 混晶⁸⁰

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⁸¹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、すでに赤崎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。

次に、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。ところが、なかなか結晶化できず条件探索を繰り返していた。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気づきがあった。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⁸²半導体の気相・固相間の平衡蒸気圧のデータを見て、InN

⁸⁰ 松岡隆志『～ノーベル物理学賞講演会を終えて～ 青色 LED ができるまでの窒化物半導体の開発経緯と今後の期待』Material Eyes, IMR NEWS KINKEN vol.76, pp.6-7 (http://www-lab.imr.tohoku.ac.jp/~pro/imr_news/pdf/vol76.pdf :2015.2.4 取得)、松岡隆志 Samco-Interview 3-4 (https://www.samco.co.jp/samconow/pdf/68_interview.pdf :2015.2.4 取得)、中嶋 (2003)、天野 (2015) で開発の経緯を整理し、詳細を 2016 年 2 月 8 日 10:30-13:00 の松岡へのインタビューよりまとめた。

⁸¹ 2 種以上の物質が混合して 1 つの均一な結晶をつくったもの。固溶体と同義に使われることもあるが、主として非金属結晶の場合にいう。結晶格子、原子半径の類似したものが混晶をつくることが多い (デジタル大辞林より)。

⁸² III 族、V 族とは、化学元素の周期表における 1990 年改訂以前の呼称であり、現在では III 族は 13 族 (ホウ素 B, アルミニウム Al, ガリウム Ga, インジウム In)、V 族とは 15 族 (窒素 N, リン P, ヒ素 As, アンチモン Sb) を指す。本論文では、開発当時

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。図 3-20 は、横軸温度の逆数、縦軸平衡蒸気圧のグラフで、GaAs や GaN よりも InN のグラフは右上にある。すなわち、同じ温度でも平衡蒸気圧が非常に高いことを示している。このデータによると、結晶成長温度を 1000°C の場合、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と圧力を下げることとはできるが結晶化の反応が進まないため、トレードオフの壁に直面した。

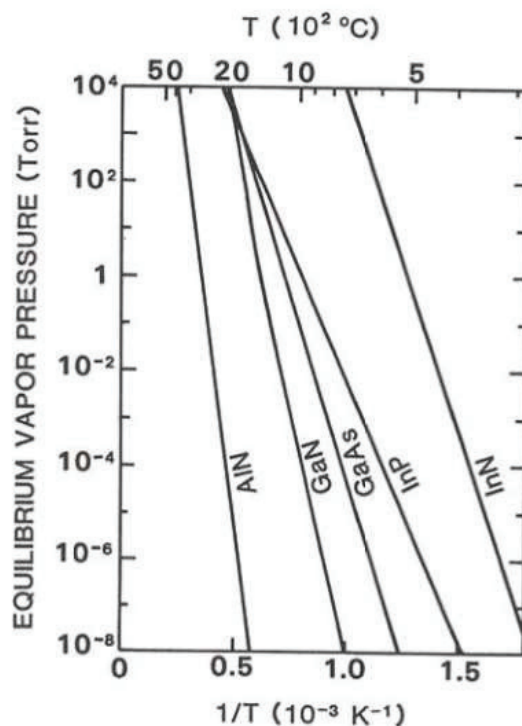


Fig. 2 Equilibrium vapor pressures of N_2 over AlN, GaN and InN, the sum of As_2 and As_4 over GaAs, and the sum of P_2 and P_4 over InP.

(出所) Wide-Gap Semiconductor (In,Ga)N 松岡ら (1990) より。

図 3-20 InN の平衡蒸気圧と温度の関係

そこで松岡は、反応温度が低くてもガスが分解することがあるという化学の文献

の呼称を尊重し、III族、V族を用いる。

から、アンモニアの流量を桁違いに増加させ、V/III族ガス混合比を飛躍的に高める方法をひらめいた。すなわち、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、結晶成長温度は 500℃と低く、V/III族ガス混合比 160 万とアンモニアの流量を桁違いに多くすることを考えた。これらは、いずれも従来の常識から大きく外れていた。

ところが、実際にアンモニアの流量を増やそうとしても、桁違いに大きいため実験装置が対応していない。このため、実験をするためには、アンモニア流量増加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、そのような桁違いのアンモニアに対応した実験装置は市販されていない。そこで、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、特注で約 1.5 億円かけて実験装置を製作した⁸³。製作のための予算の確保を研究所長にかけあった。当時の研究予算はおおよそ 1 人あたり 1 億円と潤沢であったという。しかし、いきなりそれだけの予算を説得するには何かしらの確証が必要であった。このため、予め原理確認の実験を行い、その結果を以って研究所長に交渉して承認をもらうことができた。

新たに製作した実験装置を使用し、サファイア基板の温度を 500℃として、アンモニアの流量を調整してV/III比を 16000 から 16 万以上まで増加させていくと、InN の非常に均一で平滑な結晶を得ることができた。図 3-21 にV/III比を変化させた時の結晶表面の状態の変化を捉えた顕微鏡写真を示す。

⁸³ 2016 年 2 月 8 日 10:30-13:00 の松岡へのインタビューより。

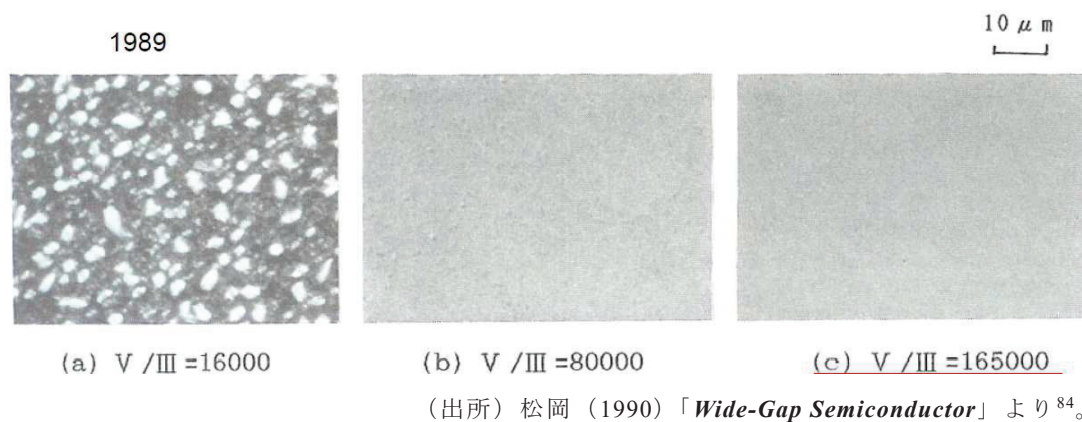
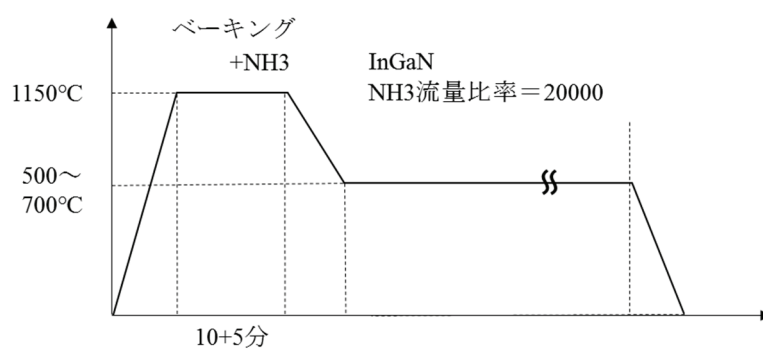


図 3-21 InN の V/III 比と結晶表面の関係

そこで、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、InN と同様の方法で結晶成長できることがわかり、結晶成長温度を下げて、V/III 族ガス混合比を 2 桁以上上げる条件で、見事 InGaN の結晶を得ることができた。

図 3-22 はその後発表された論文をベースとした InGaN 混晶の成長条件の模式図である。



(出所) *Wide-Gap Semiconductor (In,Ga)N* 松岡ら (1990) より筆者作成。

図 3-22 InGaN の結晶成長条件

⁸⁴ 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. より。

最初にサファイア基板をベーキングして洗浄した後、アンモニアを流してなじませた後、GaN 結晶成長の温度より低い 500~700℃で、アンモニアとガリウム原料ガスの流量の比率を 20000 としている。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℃、V/III族ガス混合比 1 万 6 千」という条件による InGaN 混晶の生成技術を生み出し、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⁸⁵。

3.8 AlN コートサファイアへの GaN 結晶成長⁸⁶

1983 年、工業技術院電子技術総合研究所の吉田貞史らが、rMBE 法 (Reactive Molecular Beam Epitaxy) でサファイア基板上に AlN 層を形成することで、GaN 単結晶の電気特性改善に成功している。これは、赤崎、天野らが AlN バッファ層で均一 GaN 結晶成長に成功する 3 年も前である。実際に赤崎、天野らの均一 GaN 結晶成長の論文にも、吉田らの論文が引用されている。吉田の AlN コートに対し、天野の均一 GaN 結晶成長での差異点は、AlN 層を薄くし温度を下げるだけである。しかし、3 年も前に AlN 層を先に成長させる方法を見出しておきながら、なぜ均一 GaN 結晶成長の解決方法に辿り着けなかったのだろうか。

吉田は、1970 年代に電氣的、機械的、熱的に特異な性質を見せ、未開の材料であった III/V 族半導体の結晶成長の研究をしていた。1975 年、AlN が耐熱性、高熱伝導度に優れ、大きなバンドギャップ (~6eV) に着目し、未だ大きな単結晶を得られていないことから、AlN 結晶成長に取り組み論文を発表した^{87,88}。基板はサファイア、結晶成長方法はアンモニア雰囲気下での Al 蒸着を選択し、結晶成長に成功した。その後、1979 年に MBE 法による AlN 結晶成長を報告している⁸⁹。基板は

⁸⁵ 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. より。

⁸⁶ S. Yoshida, S. Misawa, and S. Gonda, Appl. Phys. Lett. 42(5), 427-429 (1983). より。

⁸⁷ S. Yoshida, S. Misawa, and A. Itoh, Appl. Phys. Lett. 26, 461 (1975). より。

⁸⁸ S. Yoshida, et. al., 1975 『応用物理』 44 (11) 1210-1214. より。

⁸⁹ S. Yoshida, S. Misawa, Y. Fujii, S. Takada, H. Hayakawa, S. Gonda, and A. Itoh, J. Vac.

サファイアだが、結晶成長方法は最新鋭の MBE 法であった。1982 年には、さらに AlN と GaN の混晶である AlGaIn 結晶の成長を報告した。基板はサファイア、MBE 法を使い、アルミニウムとガリウムの組成比を制御している。その後ほどなく、1983 年にサファイア基板上へ AlN 層を MBE 法で形成した後に GaN 単結晶を成長させ、電気特性改善に成功した。

AlN 層と GaN 層の積層のアイデアは、AlN と GaN の格子定数の近さと、もともと吉田らがサファイア上に AlN 層を成長させていたことから生まれた。しかし、後の赤崎らの論文での指摘によると、吉田の取り組んだ方法には 3 つの問題があった⁹⁰。

- ① MBE 法には真空中での成膜のため窒素の抜けが発生しやすく、結晶の品質が高まらないという本質的な問題があった。
- ② サファイアと AlN の格子定数のズレが大きく、AlN と GaN の相性は良くても、サファイア基板上の AlN 結晶がうまく出来なかった。
- ③ 電気特性には着目しているが結晶性には言及していなかった。

1986 年に赤崎や天野らが低温 AlN バッファ層による均一 GaN 結晶成長の論文を発表した後は、GaN の電気的特性の改良や混晶には取り組まず、1991 年に MBE 法による GaAs 上への立方晶 GaN の結晶成長⁹²といったあくまで MBE 法の良さを生かせる学術的な研究の方向性を持った論文を報告している。

3.9 小括

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。この結果、いずれも技術ブレイクスルーの事例としてふさわしい、革新的な技術的成果を挙げたことがわかった。そして、いずれも何年にもわた

Sci. Technol 16, 990 (1979). より。

⁹⁰ S. Yoshida, et. al., 1999 『応用物理』 68 (7) 780-786. より。

⁹¹ H. Amano, N. Sawaki, and I. Akasaki, Appl. Phys. Lett., 48, 353, 1986. より。

⁹² H. Okumura, S. Misawa, and S. Yoshida, Appl. Phys. Lett., 59 (9), 1991 1058-1060. より。

る技術開発の末に、これまで考えても見なかったような解決方法を自らの頭で考えだしたことがわかった。

均一 GaN 結晶成長の事例では、AlN 低温バッファ層をひらめき、実際に実験することで、これまでにない品質の結晶を得ることができた。

GaN の p 型化の事例では、マグネシウムドープ GaN に電子線を照射する方法をひらめき、理論的にできないと言われていた p 型化を達成した。

InGaN 混晶の事例では、基板温度を下げてアンモニアガスの流量を桁違いに増やす方法をひらめき、In と GaN の組成比を制御できるようになった。

これら 3 つの事例は、いずれも既存技術の延長ではなく、偶然その解決方法に遭遇したわけでもなく、「ひらめきの期待試行」により既存技術の限界を突破しており、まさに本研究にふさわしい技術ブレイクスルーの事例であることを確認できた。

一方で、同様の技術ブレイクスルーを狙って技術開発を同時期に先行して行っていたにも関わらず、性能が及ばなかった吉田の AlN コート GaN 結晶成長の事例も抽出できた。

次章では、これらの 3 つの成功事例を技術ブレイクスルーの仮説モデルに当てはめて検証を行うことで、新たな含意を得ることとしたい。

第4章 仮説モデルの検証

本章では、第3章で述べた青色LED半導体材料開発の技術ブレイクスルー事例を用いて、第2章で示した技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説を検証する。

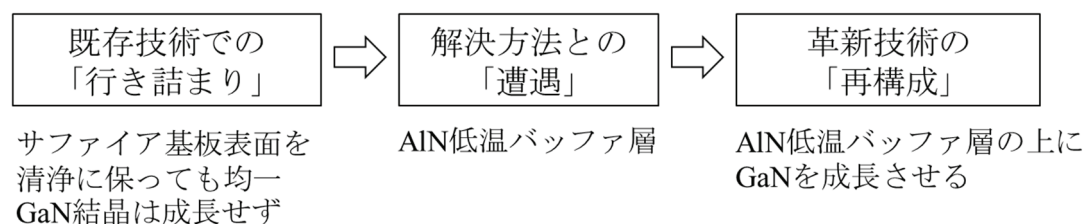
ここでは、3つの技術ブレイクスルーの事例のそれぞれにおいて、既存技術と革新技术を明らかにし、技術ブレイクスルーのプロセスを整理した上で、既存技術での「行き詰まり」、解決方法との「遭遇」、革新技术の「再構成」の詳細に言及する。

4.1 技術ブレイクスループロセス

第2章において技術ブレイクスループロセスの仮説モデルを、①既存技術での「行き詰まり」、②解決方法との「遭遇」、③革新技术の「再構成」、の3つのステップとした。そこでまず、第3章で述べた3つの技術ブレイクスルー事例が、上記仮説モデルのプロセスを整合しているかの検証を行なう。

4.1.1 均一 GaN 結晶成長の事例検証

均一 GaN 結晶成長の事例では、サファイア基板表面を清浄に保ち結晶成長するという既存技術に則り実験を行ったがなかなか目標とする均一な GaN 結晶を得られなかった（既存技術での行き詰まり）。そこで、AlN 低温バッファ層という、従来の清浄な基板上への結晶成長とは異なる、汚れた結晶をバッファ層とするアイデアをひらめき、実際に実験をしてみた結果、均一な GaN 結晶を得られることがわかった（解決方法との遭遇）。その後、AlN 低温バッファ層の様々な条件を変化させた実験や、結晶成長の様子を観察とメカニズム考察を積み重ね、AlN 低温バッファ層による GaN 結晶成長という新たな技術を生み出した（革新技术の再構成）。技術ブレイクスルーの仮説モデルに適用すると、図 4-1 のようになる。

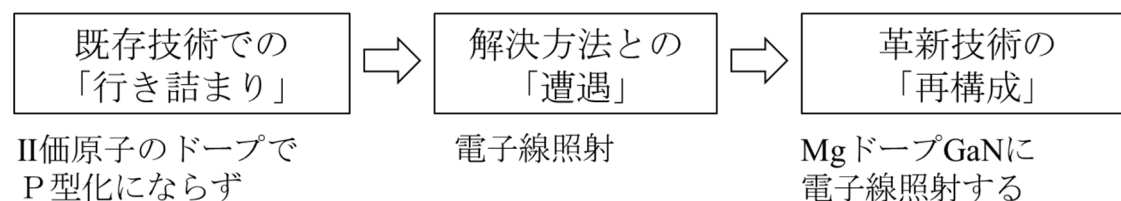


（出所）筆者作成。

図 4-1 技術ブレイクスルーモデルへの適用 均一 GaN 結晶成長

4.1.2 GaN の p 型化の事例検証

GaN の p 型化の事例では、III/V 族の半導体結晶に 2 価の原子を混ぜるという、既存の半導体結晶成長技術に則り、亜鉛やマグネシウムを GaN に様々な割合でドーピングして電気的特性を測定したが、p 型化させることができなかった（既存技術での行き詰まり）。ところが、NTT へのインターンで発見した亜鉛ドーピング GaN への電子線照射での発光強度増大の現象（LEEBI）から、マグネシウムドーピング GaN への電子線照射という、従来の p 型化の方法や理論からは想像もつかない方法をひらめいた。早速マグネシウムをドーピングした GaN 結晶に低速電子線を当てたところ、電気伝導度が上がり結晶の電気的発光特性に変化があり、p 型であることがわかった（解決方法との遭遇）。このため、様々なマグネシウムドーピングや電子線の条件を変化させて最適化とメカニズム構築を行い、マグネシウムドーピング GaN に電子線照射するという新たな p 型化のための新たな技術を確立した（革新技術の再構成）。技術ブレイクスルーの仮説モデルに適用すると、図 4-2 のようになる。

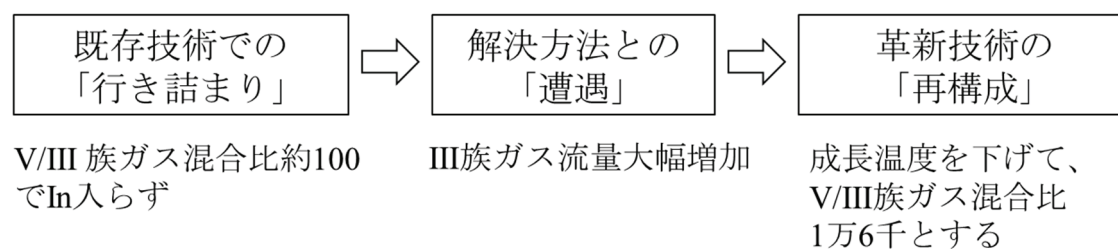


（出所）筆者作成。

図 4-2 技術ブレイクスルーモデルへの適用 P 型化

4.1.3 InGaN 混晶成長の事例検証

InGaN 混晶成長の事例では、インジウムと窒素の原料ガスの混合比を「V/III族ガス混合比は約 100」という既存の技術に則ってガス混合比率を決めて、流量や成長温度の条件を探索した。しかし、一向にきれいな結晶ができなかった（既存技術での行き詰まり）。ある日、低温でのIII族ガス流量の大幅増加というアイデアをひらめき、大量の窒素ガスを導入した結果、きれいな InN の結晶を得ることができ、同様の手法で InGaN の混晶を得た（解決方法との遭遇）。このため、ガス流量を変化させてインジウムとガリウムの組成比のコントロールのテストを進め、「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革新技术となった（革新技术の再構成）。技術ブレイクスルーの仮説モデルに適用すると、図 4-3 のようになる。



（出所）筆者作成。

図 4-3 技術ブレイクスルーモデルへの適用 InGaN 混晶

4.2 既存技術での「行き詰まり」

前節では、3 つの技術ブレイクスルー事例はいずれも仮説プロセスモデルの 3 つのステップを踏んでいることを確認できた。以下では、3 つのステップについて、それぞれのプロセスの詳細を確認していく。

青色 LED 半導体材料開発の 3 つの事例では、既存技術に則り、機能や性能等の目標を達成するために、実験による技術変数の選択と検証を繰り返した。しかし、それぞれ数年間といった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。

均一 GaN 結晶の事例では、「結晶成長前にできる限り表面を清浄に保つ」という既存の結晶成長技術の常識に則って 1500 回にもおよぶ実験を行ったが、ことごとく失敗した。

GaN の p 型化の事例では、p 型化するには「II 族原子を混ぜる」のが既存技術の常識であったが、約 3 年間の実験でも全く上手くいかず、さらに GaN は P 型化しないとまで言われていた。

InGaN 混晶成長の事例では、「III/V 族ガス混合比は約 100」という既存技術に従い、約 2 年間に渡り、ガスの流量や温度などの技術変数を変化させて実験を行ったが、うまくいかなかった。

4.3 新たな解決方法との「遭遇」

では、「行き詰まり」の状態からどのように新しい解決方法と「遭遇」したのだろうか。3 つの事例は全て、ある日新たな解決方法を突然「ひらめき」、実際に実験を行なってみて成功したことで、それが求めていた解決方法であることを知ったことに特徴がある。

均一 GaN 結晶の事例では、「AlN の低温薄層の上に GaN を成長させる」というアイデアがひらめき、実験で解決方法であることを確認した。

GaN の p 型化の事例では、「Mg ドープ GaN に電子線を照射する」というアイデアをひらめき、実際に実験することで P 型化を確認した。

InGaN 結晶の事例では、「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」というアイデアをひらめき、実験により効果を実証した。

これらはいずれも既存の技術からは演繹的に推測不可能であり、これまでの常識からは考えられない方法であった。すなわち、連続的な革新技术ではない。次に、新たな解決方法は実験中に意図しないで偶然できたのではなく、行為主体が新たな解決方法を自分の頭でひらめき、実際に試行して成功を確認する、すなわち「ひらめきの期待試行」によるものであった。以下に、それぞれの事例が確かに「ひらめきの期待試行」によるものだと考える根拠を挙げた。

均一 GaN 結晶の事例では、①天野が偶然できたのではなく、着想して実験したと証言していること、②あえて低温で表面が粗い層を付けること自体が常識外れであったこと、③AlN バッファ層を低温で薄く成長させた後に GaN を通常の高温で成長させる必要があり、その結晶成長工程から考えて偶然結晶ができたとは考えにくいこと、が挙げられる。

GaN の p 型化の事例では、①天野が着想したと証言していること、②p 型化するのに電子線を当てるというのは常識的にありえないこと、③同じ研究室の後輩にあたり、一緒に実験していた鬼頭が、天野がある日のミーティングで電子線を当ててことを提案してきたと証言していること、④天野がインターンで LEEBI 現象を発見した時、発光強度の増した亜鉛ドーパド GaN が p 型化していないことを確認した上で敢えて提案していること、が挙げられる。

InGaN 混晶の事例では、①松岡が着想したと証言していること、②桁外れのアンモニアガス流量は常識では考えられないこと、③桁外れのアンモニアガス流量を流すには、排ガス処理施設等新たな設備の開発と製作が必要であり、既存設備で偶然にできることではないこと、が挙げられる。

4.4 革新技术の「再構成」

いずれの事例も新たな解決方法に遭遇した後、新たな技術変数の制御性や再現性、変数間の因果関係を、数か月から 1 年ほどの時間をかけた詳細な追加実験により確認し、技術メカニズムを構築している。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る。これにより新たな革新技术が再構成され、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、技術ブレイクスルーのプロセスにおいて、既存の技術での行き詰まりの後、解決方法との遭遇を経て、新たな革新技术が再構成されていったといえる。

均一 GaN 結晶成長の事例では、結晶成長の温度やガス流量の組み合わせを実験することで新たな結晶成長のメカニズムを構築し、「AlN 低温バッファ層」という新たな革新技术を再構成した。これは論文を通して世の中に知られ、広く用いられるよ

うになり、後の p 型化や InGaN 混晶の技術ブレイクスルーの前提となる重要な革新技術となった。

GaN の p 型化の事例では、何度も追試を行い、マグネシウムの混合や電子線照射の条件を確認し、p 型化のメカニズム構築と最適条件の確立をしていった。これも、学会発表や論文を通して世の中に知られ、新たな革新技術として広く用いられた。

InGaN 結晶成長の事例では、その後の実験でガス流量とインジウムとガリウムの混合比率を測定し、制御範囲を確認してメカニズムを構築し、論文発表により公表し、新たな革新技術として、世に広く用いられるようになった。

以上、事例研究の結果より、既存技術と新たな革新技術が何であったかを確認した上で、新しい解決方法と「ひらめきの期待試行」によって遭遇したことを示すことができた。さらに、事例における技術ブレイクスルーでは、プロセスモデルの仮説である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」、の 3 つステップのプロセスを経ていることを確認できた。

4.5 事例研究から得られた含意

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、仮説モデルを検証した結果、3 つの事例全てにおいて、既存技術からの飛躍は「ひらめきの期待試行」による解決方法との「遭遇」によって起こったことを確認できた。ここで、以下の 3 つの含意が得られたと考えられる。

- ①「ひらめき」は「期待試行」の必要条件である。
- ②技術の「ひらめき」には「行き詰まり」での技術蓄積が必要である。
- ③新たな技術変数が「ひらめき」をもたらす。

以下の項でこれらについて詳しく述べていきたい。

4.5.1 「ひらめき」は「期待試行」の必要条件である

技術ブレイクスルーのプロセスモデルを事例検証した結果、最初に語るべき含意は、「ひらめき」は「期待試行」の必要条件であるということである。すなわち、ひらめかないと期待試行できないが、ひらめけば期待試行できるというわけではないということである。これには3つの理由がある。2つは必要条件の理由で、残りの1つは十分条件ではない理由である。

事例研究の結果、意図して新しい解決方法と遭遇するために必要な要件は何であったか。新しい解決方法は、既存の技術からは演繹的に類推不可能な常識外れの方法であった。しかしながら、その方法は偶然得られたのでは無く、まず行為主体が新たな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、の2つが大切な要件であった。すなわち、技術ブレイクスルーのための解決方法に遭遇するための「ひらめきの期待試行」では、「ひらめき」の次に「期待試行」というように、2つの要件を順番に行わなくてはならない。これがまず1つ目の必要条件たる理由である。

次に、ひらめきゆえに期待試行できるという、2つの要件のつながりである。行為主体にとって実験できる時間やリソースは限られており、成功すると期待できる技術変数の効果を優先して実験するのが普通である。従って、単なる思いつきよりも、既存技術に則った実験を優先して行うといった経路依存性が存在する。しかし、ひらめきは行為主体に対して成功への期待による強烈な動機を与えるため、経路依存性を越えて優先的に実験による検証を行うと考えられる。すなわち、ひらめきゆえに期待試行すると考えられる。これが必要条件たる2つ目の理由である。

ところが、「ひらめき」は「期待試行」の十分条件ではない。青色LED半導体開発の事例研究では、3つの技術ブレイクスルーの事例全てで「期待試行」をすることができた。しかし、ひらめけば必ず期待試行できるわけではない。そこには、必ず「試行のコスト」の問題が関係するためである。ひらめいても、そのアイデアが既存から飛躍している以上何らかの投資や時間が必要となり、費用対効果の問題でその試行を阻まれることが容易に想定できる。

このように、「ひらめき」と「期待試行」は強い関係性があり、解決方法と遭遇するためには、ひらめく必要があるが、ひらめくだけでは十分ではないことがわかった。次章では、これら2つの概念の関係性に留意した上で「ひらめき」についての詳細の議論と、その結果としての「期待試行」についての詳細な議論をすることとしたい。

4.5.2 技術の「ひらめき」には「行き詰まり」での技術蓄積が必要である

3つの技術ブレイクスルーは全て技術の「ひらめき」に端を発して新たな解決方法に遭遇した。では、その「ひらめき」は何の事前の取り組みも無い所に天から突然降ってきたのであろうか。

事例研究の結果、何も無いところに天から降って来たというよりは、かなりの時間をかけて「行き詰まり」の中で技術蓄積をした結果として得られたようである。「行き詰まり」とは、既存技術で考え得るあらゆる選択肢での実験にも関わらず、目標を達成できない場合である。すなわち、新たな解決方法に遭遇するための「ひらめき」には、実は既存の技術パラダイムに則った技術蓄積を充分に行ったことが大きく貢献しているのではないか、ということが含意として得られた。

「行き詰まり」が無くても解決方法と「遭遇」できるだろうか。可能性はゼロとは言えない。しかし、2つの理由から可能性が低すぎると考えられる。1つは、「行き詰まり」があるからこそ、既存技術の延長を超えた飛躍的な解決方法を探そうと考えるわけである。飛躍的な解決方法を積極的に探そうとしないところで「遭遇」する可能性は低すぎる。もう1つは、新たな解決方法のために選択し得る技術変数の候補の数が多すぎて、既存の技術という手掛かりが無い中で「遭遇」するには、可能性が低すぎる。むしろ、「行き詰まり」があれば、既存技術で考えられる範囲を考えた後なので探索の対象が絞られているため、解決方法と「遭遇」できる可能性が高くなる。ただし必ず「遭遇」できるというわけでもない。従って、「行き詰まり」はあくまで解決方法との「遭遇」の可能性を上げるための必要条件だと言える。

では、技術の「ひらめき」のために必要な技術蓄積とはどのようなものか。そしてその役割は何か。さらに、それらを駆動する要件は何か。この3つの疑問について、次章で掘り下げて考察を進める。

4.5.3 新たな技術変数が「ひらめき」をもたらす

技術の「ひらめき」のための技術蓄積が必要だとしても、それだけでは「ひらめき」にはならない。ではなぜ技術蓄積の末にひらめくことができるのか。これが事例のプロセスモデル検証から得られた3つ目の含意である。

3つの技術ブレイクスルーの事例では、解決方法のひらめきに至る直前で、新たな技術変数を見出していることがわかった。すなわち、既存技術にこれまで気づかなかった新たな技術変数を組み合わせることによって、物質の状態変化を制御するための新たな方法を創造していると言えそうである。

均一 GaN 結晶成長の事例では、「結晶の核」という新たな技術変数を得たことでサファイア基板上に形成することをひらめいた。GaN の p 型化の事例では、「電子線照射」という新たな技術変数を得たことで、p 型化に成功した。InGaN 混晶の事例では、「III 族ガスの流量」という新たな技術変数を得たことで、結晶成長に成功した。

従って、技術ブレイクスルーにおいて、既存技術の演繹的推論の先には無い新たな技術変数を、いかに見出してそれが解決のために適切であるかを知ることが重要なポイントであると考えられる。そしてこれは、単なる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ことと関係があるのではないか。すなわち、既存の延長にない新たな技術変数が既存技術の蓄積とどのような関係になっているか、この一見相反する概念の関係性を考えることが「ひらめき」の構造を解く鍵なのではないかと考える。この観点についても次章で掘り下げて考察したい。

4.6 小括

本章では、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仮説モデルを検証した結果、「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。

従って、「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。

また、事例で仮説モデルを検証した結果、新たに以下の 3 つの含意が得られた。

- ①「ひらめき」は「期待試行」の必要条件である。
- ②技術の「ひらめき」には技術蓄積が必要である。
- ③新たな技術変数が「ひらめき」をもたらす。

そこで、次章では「ひらめき」と「期待試行」の成立要件について詳細の考察を行ない、上記の 3 つの含意から得られた新たな問いについて、その論理を明らかにする。これによって、なぜ技術開発の場で技術ブレイクスルーは頻繁かつ簡単には起こらないのか、そしてどのようにして「ひらめきの期待試行」が成立し、技術ブレイクスルーが起こるのかを明らかにしていく。

第5章 「ひらめきの期待試行」の成立要件

本章では、「ひらめきの期待試行」の成立要件を明らかにすることを目的とし、前章で得られた含意を基にした以下の3つの観点について考察を行う。

- ①「ひらめきの期待試行」の発生プロセスとその論理。
- ②技術の「ひらめき」のために必要な技術蓄積の中身、役割、駆動要件。
- ③新たな技術変数が得られるプロセスと、既存技術の蓄積との関係。

このため、まず技術の「ひらめき」とは何かについて明らかにした上で成立プロセスの仮説を提示し、事例での検証と各々の要件について詳しく考察を行う。次に技術の「期待試行」について、成立要件および「ひらめき」との関係性に言及する。

5.1 技術のひらめきとは何か

技術の「ひらめき」の成立要件について考察するにあたり、最初に技術の「ひらめき」とは何かについて言及しておく。まず、先行研究について、多くひらめきの研究がなされている心理学、そして経営学における知識創造理論についてレビューし、本論文の位置づけを明らかにした上で、技術の「ひらめき」を定義する。

5.1.1 心理学でのひらめきの取り扱い

技術開発などの問題解決における行為主体のひらめきについて、心理学の中でも創造的な思考プロセスを研究する分野で多く考察されてきた。そこで、本項で代表的な研究をレビューし、本論文の目指す方向性との違いを明らかにしておきたい。

心理学の分野において、ひらめきを伴う問題解決は、試行錯誤的に行われるのではなく洞察学習⁹³によるものと考えられ、認知的側面から研究されてきた。三輪

⁹³ 洞察学習とは、Kohler (1921) により提唱された概念で、Thorndike (1898) が提唱した試行錯誤による学習とは異なる。それまでの経験からの洞察により、突如として新たな解決方法が生まれることを示している。

(2009) は、「ひらめき」を伴う問題解決を認知科学分野における「洞察問題解決」として捉え、背後の認知プロセスやメカニズムに言及し、洞察問題解決特有の特徴として、「手詰まり状態 (impasse)」「Aha 体験」「答えを知ると単純な問題に転じる」の 3 つを挙げている。また、背後の認知プロセスとして、「制約の緩和」「類推の利用」を提示している。いずれも「ひらめき」の背後で起こっている潜在意識の関与に重点をおいて言及している。

Wallas (1926) は、ひらめきのような創造的なアイデアが生まれるプロセスとして、「準備期」「孵化期」「啓示期」「検証期」の 4 つを提示している。また、Young (1975) は、「資料集め」「心の中で手を加える」「孵化段階」「アイデアの誕生」「アイデアの具体化」の 5 つのステップを提示している⁹⁴。Young (1975) は基本的に Wallas (1926) のプロセスを踏襲した上で、「準備期」を「資料集め」と「心の中で手を加える」の 2 つに具体的に分割している。これらのプロセスはあくまでも人間がその時々においてどのような行動を取っているかを観察した結果を抽象化したものであり、認知的側面での考察のため、その中身やそれらの関係性の論理についての言及が充分でない。

このように、心理学の分野ではひらめきにおいて実際に人間がどのような認知的活動を行うかについて言及している。しかしながら、本研究が目指している技術のひらめきが発生するための具体的なプロセスの中身とその関係性の論理についての言及はなく、本論文において考察する余地があると言える。

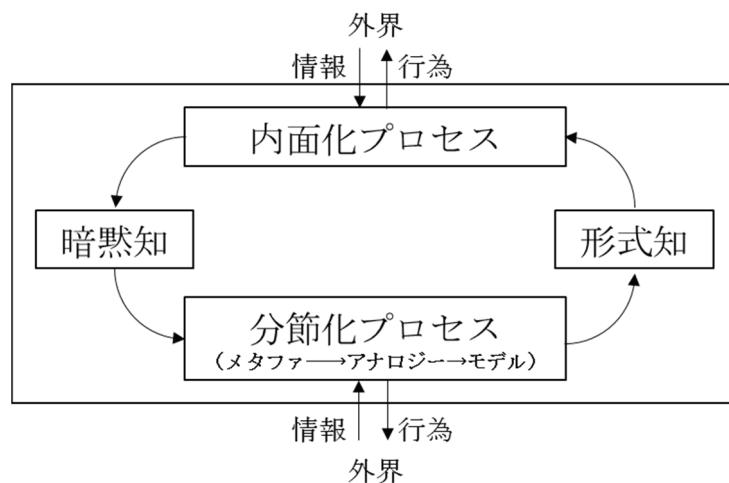
5.1.2 知識創造理論でのひらめき

野中 (1990) は、個人レベルを含めた知識創造の一般的枠組みを示している⁹⁵ (図 5-1)。ここでは、暗黙知から形式知への変換プロセスを「分節化」と呼び、「メタフ

⁹⁴ Young (1975, p.39-40) より。今井訳 (1988)『アイデアのつくり方』p.54-55 の対訳を参照した。

⁹⁵ 野中 (1990) の議論の中心は組織内での知識創造であるが、p69 で組織内の知識創造を考察する前段としての個人レベルの知識創造についても同じ枠組みに言及している。

ァー」「アナロジー」「モデル」という3つのプロセスを提示している。



(出所) 野中 (1990, p.63) より筆者作成。

図 5-1 暗黙知と形式知の相互作用による知の創造プロセス

技術の「ひらめき」は、それまで技術者の頭の中に蓄積された知識が、明示的に新しい解決方法として表出したと考えると、暗黙知から形式知への変換と捉えることができる。すなわち、技術者本人の実験による内面化プロセスで得られた暗黙知から、分節化のプロセスによって、新たな解決方法が形式知として生まれると言える。

しかしながら、野中 (1990) のモデルは、分節化における「メタファー」「アナロジー」「モデル」の中身の具体性に欠けることと、「アナロジー」から「モデル」へのプロセスと論理が示されていない。そこで、本論文では、技術の「ひらめき」について、上記「分節化」のプロセスの具体的で精細な中身を提示する余地があると考えられる。

5.1.3 技術のひらめきの定義

「ひらめき」について、Polanyi (1958) は「科学的発見は、発見的ヴィジョンの瞬間に思考の限界を打ち破り、棲み込みの状態を脱出する」⁹⁶と述べている。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」⁹⁷と述べている。本論文において、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、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。従って、技術の「ひらめき」では、新たな技術変数が見つかることによって、目標を達成するのに必要な物質の状態変化、すなわち現象を技術的に制御することができるという具体的な解決のための現象のメカニズムのイメージが得られると考えられる。これにより、技術の「ひらめき」(Technological inspiration)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。

5.2 技術のひらめきの成立プロセスの仮説

では、技術の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」⁹⁸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⁹⁹。また、Young (1975) は、新たなアイデ

⁹⁶ Polanyi (1958, p.208-209) より。長尾訳 (1985)『個人的知識』p.182-183 の対訳を参照した。「棲み込み (indwelling)」とは、我を忘れて問題解決に没頭している状態を指す。

⁹⁷ Arthur (2009, p.116) より。有賀ら (2011)『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』p.149 の対訳を参照した。

⁹⁸ Arthur (2009, p.116) より。有賀ら (2011)『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』p.149 の対訳を参照した。

⁹⁹ Arthur (2009, p.113-114) より。有賀ら (2011)『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』p.146 の対訳を参照した。

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¹⁰⁰。

事例研究によると、技術開発でのひらめきは、既存技術の延長での開発をとことんまで突き詰めた後で、新たな1つの技術変数を見出すことで発生している¹⁰¹。従って、技術開発における新たな解決方法のひらめきは、行為主体である技術者が、既存の技術に基づいた実験検証の結果得られた技術蓄積と、あるきっかけから得た新たな技術変数が頭の中で組み合わせあったことで生まれると考えられる。そのような技術蓄積が準備できた状態を「空白のある地図 (detailed map with blind area)」の確定と本論文では呼ぶこととする。行為主体がひらめくために十分な技術蓄積ができた状態を表す言葉が従来に無いため、その状態を比喩的に表現する言葉を新たに定義することとした。そして、「空白のある地図」の空白を埋めてひらめきを生み出すことができる新たな技術変数を、それが解決のキーとなる重要かつ中心的な技術変数であることから、「キー技術変数 (key technological parameter)」と呼ぶことにする。すなわち、「空白のある地図」の確定とは、既存の技術変数間の精密な関係性が明らかになっているにも関わらず、現象のメカニズムが未完成で、問題解決できない状態である。また、「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。

このような「空白のある地図」が確定した状態とは、その後のひらめきに必要なら「既存の技術変数間の精密な関係性」が得られたと同時に、既存技術からは考えられない新たな解決のための技術変数があるのではないかという「未知のキー技術変数の存在仮説」が生まれた状態といえることができる。

「空白のある地図」は、行為主体の実験により確定される。このため、その前提として、技術開発における「突破点 (breakthrough point)」の絞り込みが必要と考えられる。なぜなら、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

¹⁰⁰ Young (1975, p.15-16) より。今井訳 (1988)『アイデアのつくり方』p.27-28 の対訳を参照した。

¹⁰¹ 均一 GaN の事例では結晶の「核」、p 型化の事例では「電子線照射」、InGaN の事例ではガスの「流量」が、解決のために得られたキー技術変数であった。

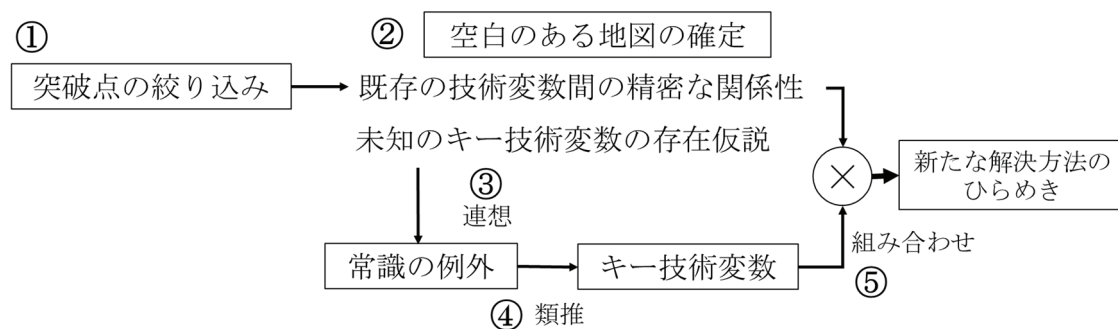
込まないと現実的に実験検証による技術変数間の関係性を解明できないからである。

一方の「キー技術変数」はどのように得られるのだろうか。事例研究より、ある時連想された「常識の例外 (exception in common sense)」から類推されることが考えられる。「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。「連想 (association)」とは、あるキーワードを基にして、既知の事例や現象を思い出すことである。「類推 (analogy)」とは、類似した既知の現象を基にして、問題解決の糸口を得ることである。

以上の考察から、技術の「ひらめき」は、行為主体が以下の5つの要件からなるプロセスを経て生まれるという仮説を提示する。

- 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「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。

これらの5つの要件は図 5-2 に示すような関係になっていると考えられる。



(出所) 筆者作成。

図 5-2 技術のひらめきモデル

すなわち、①「突破点の絞り込み」の結果、“既存の技術変数間の精密な関係性”が構築され、これによって“未知のキー技術変数の存在仮説”が立つ。これが②「空白のある地図の確定」である。“未知のキー技術変数の存在仮説”によって、③「常識の例外の連想」が誘発され、④「キー技術変数の類推」が起こる。その結果、⑤「“既存の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」によって、新たな解決方法がひらめく。

上記プロセスモデルを含む「ひらめきの期待試行」のプロセスを、Wallas (1926) の4段階プロセスと照らし合わせると、「準備期」において「突破点の絞り込み」と「既存技術変数間の精密な関係性」、「孵化期」において「未知のキー技術変数の存在仮説」、「啓示期」において「常識の例外の連想」、「新たなキー技術変数の類推」「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」、「検証期」において「期待試行」が実際に行为主体によって行われる中身と言えそうである。すなわち上記仮説により、Wallas (1926) が提示した認知的な4段階プロセスの中身とそれらの関係性を具体的に示せる可能性があると言える。特に啓示期では技術をひらめく時の行为主体的の頭の中で起こっているプロセスをより詳細に表せる可能性がある。

一方で野中(1990)のモデルについて、分節化における「メタファー」「アナロジー」「モデル」はそれぞれ、「常識の例外」「キー技術変数の類推」「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」と言い換えることができそうである。すなわち、上記仮説によって、技術のひらめきの構造について、より詳細な中身を示すことができる可能性がある。

また、Young (1975) の研究に対する一般的な疑問は、「組み合わせるべき既存の要素とは何か」ということと、「各要素が関連付けられるプロセスは何か」ということである。これに対して、本論文の仮説では、技術のひらめきで組み合わせるべき要素は、「既存の技術変数間の精密な関係性」と「キー技術変数」である。また、各要素が関連付けられるプロセスについて、「キー技術変数」は、「既存の技術変数間の精密な関係性」の構築の結果、「未知のキー技術変数の存在仮説」が立ち、連想による「常識の例外」から類推されると説明することができそうである。

ここで、技術のひらめきモデルと技術ブレイクスルーのプロセスモデルとの関係を整理しておく。技術のひらめきモデルにより、ひらめくには「突破点の絞り込み」「空白のある地図の確定」といった事前の準備と前提が必要である。そして、「常識の例外」の連想から実際にひらめくまでは、「解決方法との遭遇」のプロセスの初期に行われる。

従って、①「突破点の絞り込み」と②「空白のある地図の確定」は、「既存技術での行き詰まり」の中で行われる。そして、③「常識の例外の連想」④「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」は、「解決方法との遭遇」の中で行われる。このように、「既存技術での行き詰まり」での技術蓄積の在りようが、実はひらめくか否かに大きな影響を与えようと言える。そうである。

次節では、上記の「技術のひらめきモデル」の仮説を、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を用いて検証する。

5.3 事例による「技術のひらめきモデル」の検証

本節では、前節で提示した技術のひらめきのプロセスモデルについて、まず全体の流れを 3 つの技術ブレイクスルーの事例で検証する。技術のひらめきモデルのそれぞれの要件については、次節でさらに詳しく考察することとする。

5.3.1 均一 GaN 結晶成長における技術のひらめき

均一 GaN 結晶成長の事例では、赤崎の約 20 年の長きに渡る実験結果により、GaN とサファイアの結晶界面の欠陥を無くしたきれいな結晶を MOVPE 法で作ることを突破点と定めた。そして、1500 回にも及ぶ実験に集中して取り組み、既存のあらゆる技術変数を変化させた実験を行い、「空白のある地図」が確定した。ある日、偶然起きた電気炉の故障をきっかけに、澤木の「汚れた結晶」の話、すなわち BP 結晶成長で結晶表面が汚れても良い場合があるという結晶成長の「常識の例外」を連想し、リンの「核」の形成の成功事例から、結晶の「核」という「キー技

術変数」を類推した。そこで、これまでの実験で得られた GaN や AlN の結晶成長の技術変数間の関係性と合わせて、AlN の低温薄層の上に GaN を成長させ「低温バッファ層」のアイデアをひらめいた（図 5-3）。

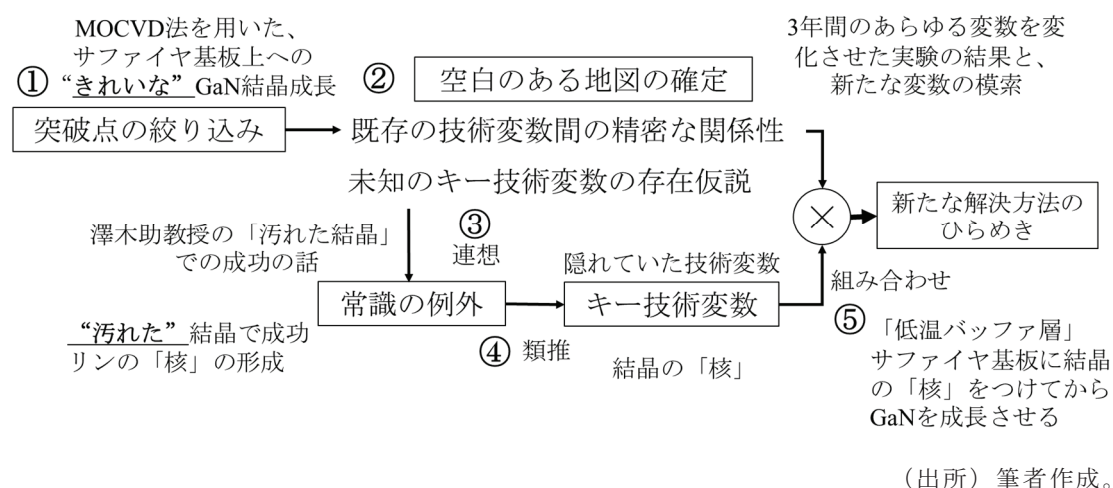


図 5-3 技術のひらめきモデルへの適用 均一 GaN 結晶成長

5.3.2 GaN の p 型化における技術のひらめき

GaN の p 型化の事例では、天野は、赤崎の約 20 年の長きに渡る実験結果と自らの数年の実験結果を踏まえ、MOVPE 法で、AlN 低温バッファ層を用いてサファイア基板上に結晶成長させた GaN に、2 価原子のドーピングによる p 型化を突破点とした。そして、約 4 年にわたり実験を行い、亜鉛やマグネシウムをドーピングした GaN 結晶の実験をやりきった結果、どのような条件でも p 型化しないことがわかり、「空白のある地図」が確定した。ある日、p 型化の常識から外れているが、NTT のインターンで経験した亜鉛ドーピング GaN への電子線照射による励起光強度増加という「常識の例外」を連想し、GaN 結晶中にドーピングした原子を活性化する「キー技術変数」として「電子線照射」を類推した。そこで、マグネシウムドーピング GaN の結晶成長実験で得られた技術変数間の関係性と合わせて、「マグネシウムドーピング GaN に電子線を照射する」ことをひらめいた（図 5-4）。

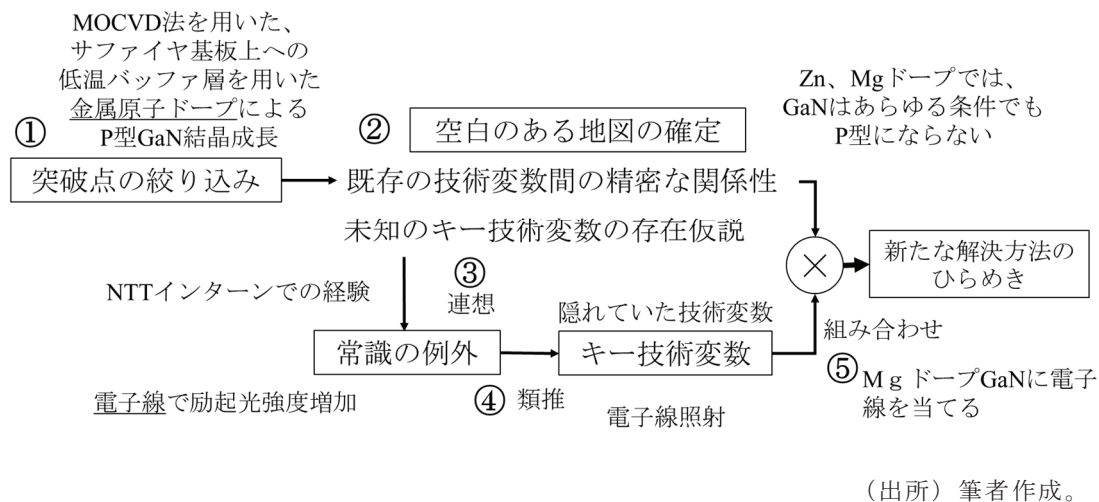


図 5-4 技術のひらめきモデルへの適用 P 型化

5.3.3 InGaN 混晶における技術のひらめき

InGaN 混晶の事例では、松岡は通信用半導体レーザー開発の経験と、赤崎らの論文を基にした GaN の結晶成長実験の結果を踏まえ、まずは難易度の低い InN を対象に、MOVPE 法でサファイア基板上に既存技術である高温かつ低ガス流量で単結晶を作ることを突破点とした。そして約 2 年にわたり実験を行い、平衡蒸気圧と基板温度がトレードオフとなり、どのような条件を変化させても目標を達成できないことがわかり、「空白のある地図」が確定した。ある日、低温では窒素原子が結晶化しないという常識に対し、低温でも少量のアンモニアガスが分解反応するという「常識の例外」を連想し、アンモニアガスの「流量」というキー技術変数を類推した。そこで、結晶成長実験で得られた技術変数間の関係性と合わせて、「結晶成長温度を下げてもアンモニアガスの流量を桁違いに上げる」ことをひらめいた（図 5-5）。

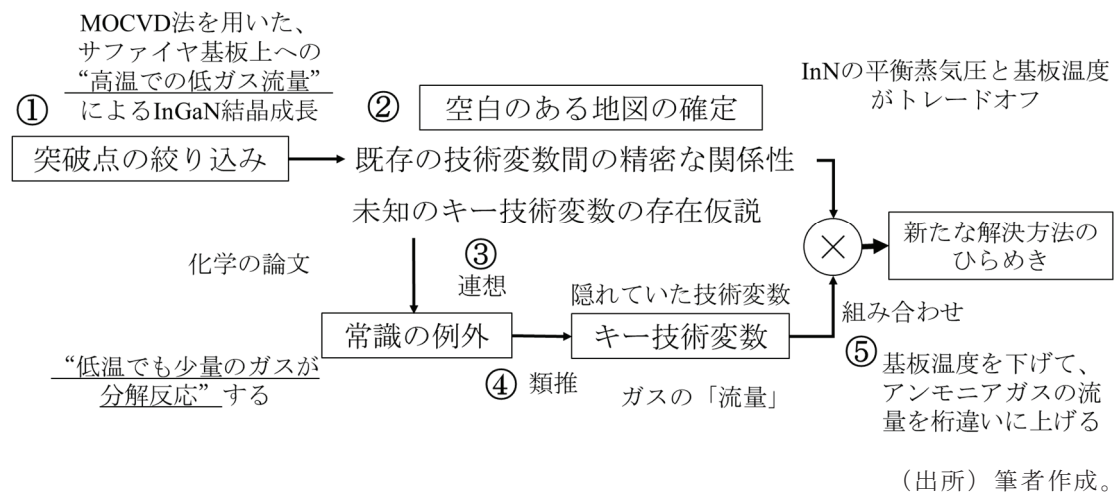


図 5-5 技術のひらめきモデルへの適用 InGa_N 混晶

以上により、青色 LED 半導体材料開発の技術ブレイクスルーの 3 つの事例全てが、技術のひらめきモデルに当てはまることを確認できた。本節以降では、技術のひらめきモデルの 5 つの要件とそれらの関係性についてさらに詳細な考察を進めていきたい。

5.4 「突破点」の絞り込み

5.4.1 絞り込みとは

技術の「ひらめき」に必要な「空白のある地図」を確定させるには、既知の技術変数間の精密な関係性を構築する必要がある。このためには、技術開発において突破点を絞り込むことが大切だと考えられる。突破点とは、解決すべき根本課題の仮説である。技術開発の突破点が不適切だと、どんなに実験を積んでも解決策は得られない。このため、何を突破点として絞り込むかを決めることは、ひらめくために重要な最初のプロセスである。

均一 GaN 結晶成長の事例では、赤崎が約 20 年の長きに渡る実験結果により、MOVPE 法を用いて 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、天野が専任担当として集中して解決のための実験に取り組んだ。

GaN の p 型化の事例では、赤崎の約 20 年の長きに渡る実験結果と天野の均一 GaN 結晶成長の成功を踏まえ、2 価原子のドーピングによる p 型化を突破点とし、天野は実験に取り組んだ。

InGaN 混晶の事例では、松岡はそれまで取り組み成功させた通信用半導体レーザー開発の経験と、1 年間取り組んだ赤崎らのバッファ層を用いた GaN 結晶成長方法の習得を踏まえ、まずは難易度の低い InN を対象に、MOVPE 法によるサファイア基板上での結晶成長を突破点とし、その条件探索の実験に取り組んだ。

このように、いずれの事例も、長きに渡る実験経験から独自の突破点を絞り込んでいることがわかる。

ではなぜ、突破点の絞り込みが大切なのだろうか。それは、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による技術変数間の関係性を解明できないからである。

GaN の均一結晶成長の事例における開発テーマの選択肢は主なものだけでも、材料が GaN、ZnSe、SiC の 3 種、結晶成長方式が MOVPE 法、MBE 法、HVPE 法の 3 種、基板がサファイア、SiC、GaAs、Si の 4 種、テーマが単結晶成長、P 型化、n 型化、混晶成長の 4 種あり、これだけでも 144 通りのテーマがあり得る。さらに具体的な技術変数は個々の材料やテーマによって異なり、仮に 1 つのテーマの実験で取り扱う技術変数が 10 個¹⁰²だと仮定すると、その組み合わせは 3628800 通りと膨大である。これだけの技術変数の組み合わせに対して、関係性を確認することは現実的に不可能であり、突破点を適切に絞ることが必要である。

では、突破点の絞り込みはどのように行われるのであろうか。それは、洗練の後に集中することだと考えられる。次項では、まず突破点の洗練について言及したい。

¹⁰² ここでは、実験で用いる技術変数を、基板温度と温度上昇率、アンモニアガス流量と時間、トリメチルガリウムガス流量と時間、アンモニア/キャリアガス比、トリメチルガリウム/キャリアガス比、アンモニア/トリメチルガリウムガス混合比、基板傾斜角度の 10 種類と仮定した。

5.4.2 突破点の洗練

突破点の絞り込みのためには、あるべき突破点、すなわち解決すべき根本課題の仮説が明確になっている必要がある。課題とは、目的を達成するために、明示的に表された解決すべき問題である。技術開発における課題選択と解決のための仮説検証の繰り返しの中で根本課題を探究することで、それは次第に明らかになっていく。これを本論文では突破点の洗練と呼ぶ。では、その突破点の洗練はどのように行われるだろうか。

技術開発では、実験による仮説検証が繰り返される。実験の主目的は、技術的な解決方法の探索であるが、副次的な効果として、技術変数間関係性の蓄積と共に突破点が洗練される。すなわち、実験を繰り返し行うことによって、何が問題の本質で何を解決すべきかが明確化になっていくと考えられる。

(1) 突破点の洗練のポイント

突破点の洗練において重要なポイントは何であろうか。ここでの洗練とは、技術開発における課題選択と解決のための仮説検証の繰り返しの中で根本課題を探究することである。このため、突破すべき課題の「階層性」、仮説検証の繰り返しにおける課題の「掘り下げ」と「再選択」について、それぞれ考察をする。

① 課題の「階層性」

課題の「階層性」とは、技術的目標を解決するための課題が、論理的な主従関係を持つ上下階層を持つことを意味する。Polanyi (1966) は、実在するものの間には階層があり、上位と下位を支配する論理的関係があると述べている¹⁰³。技術的な課題の階層性について Polanyi は明示していないが、ある課題とそれを解決するために必要な別の課題の間に論理的な主従関係が存在し、それが階層構造を持つことは、容易に類推できる。

¹⁰³ Polanyi (1966, p.34-35) より。高橋訳 (2003) 『暗黙知の次元』 p.64-65 の対訳を参照した。

技術開発において、技術者は実験を行う際に、階層化した既存の選択肢から課題を選択して実験による仮説検証を行う。実験が進むことでより下層又は横並びの新たな課題が明らかになることがある。すなわち、技術開発における課題の階層の特徴は、目的に端を発して、その目的を達成するための課題が、ピラミッド状に階層構造を形成していくことと考えられる。その中で突破点は、実験を進める上で明らかになり階層化された課題の中で、本質的と思える根本的な課題であると考えられる。

② 課題の「掘り下げ」

次に、課題の「掘り下げ」とは、ある課題を解決するために、下位階層の課題を設定し、解決を試みることを繰り返すことである。技術開発では、上位階層の課題を解決するために必要な下位の課題は、幾層にも階層性を持っている。これらは既存技術の中で全て明らかになっているわけではなく、技術開発を進める中で必要性に迫られて新たに設定していくものである。この課題の「掘り下げ」が充分でない、本質的な課題である「突破点」に到達せず、上位の課題を解決できない。

課題の「掘り下げ」には、下位階層を深めていく「深耕」と、1つの下位階層で別の課題を探索する「展開」があり得る。課題の「深耕」では、ある課題を解決するための課題、それを解決するための課題といった具合に、課題の主従関係のつながりを追求することで、本質的な課題を浮き彫りにすることができる。一方の課題の「展開」とは、ある下位階層の課題を設定する際に、1つの階層に複数の課題を設定することである。こうして、突破点が洗練される過程において、課題の「掘り下げ」の際の「展開」と「深耕」によって、あたかも樹木の根のように枝分かれした階層構造が形成されていく。

③ 課題の「再選択」

また、課題の「再選択」とは、ある課題が解決しない場合、上位階層へ立ち返り別の課題を新たに選択して取り組むことである。

課題が解決しない理由には、技術変数の単純な性能限界と、技術変数間の性能トレードオフがあり得る。ある技術変数の範囲を変化させた時に得られる性能には限

界がある。同時に、技術変数を変化させることである性能は向上するが、別の性能は低下し両立可能な性能に限界があるということもあり、これがトレードオフである。この時、解決の方法として、新たな技術変数を見出してブレイクスルーする道以外に、上層又は同層の課題の選択肢を再選択して解決に取り組む道がある。ここで、再選択するか否かの判断は非常に難しい。なぜなら掘り下げた先に解があるか、再選択した別の課題を掘り下げた先に解があるのか、その再選択を判断する時点では判別がつかないからである。従って、技術のスジ読み、すなわち科学原理に照らして本質的に正しいかの判断が必要である¹⁰⁴。このように、突破点は、技術の課題の選択と実験検証、再選択の繰り返しにより洗練されていくと考えられる。

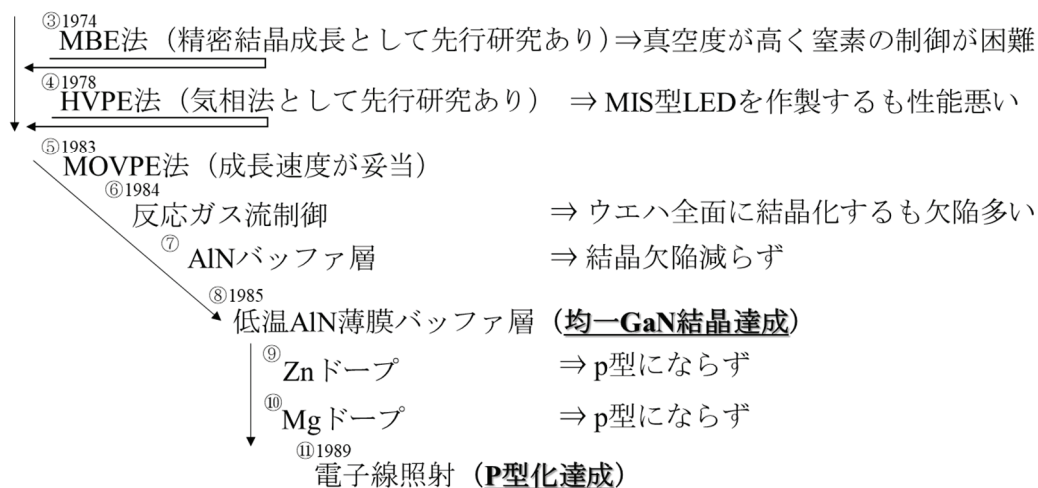
以上を踏まえて、均一 GaN 結晶成長と GaN の P 型化の事例において、赤崎と天野が実際に行った課題の階層と再選択の経緯を確認する（図 5-6）。

SiC（p n 接合できるが間接遷移型）

ZnSe（直接遷移型で、低温でもつくれる）⇒発光が弱い、寿命が短い

① GaN（難しいがレーザーまで見越すと妥当）

② サファイア基板（格子定数GAPあるが、耐久が妥当）



（出所）筆者作成。

図 5-6 課題の選択、再選択の経緯（均一 GaN 結晶成長、P 型化）

¹⁰⁴ 伊丹（2009）は、技術のスジの第一の条件を「科学の原理に照らして、原理的深さをもつ（p.22）」と述べている。また、スジの良い技術を嗅ぎ分けることのできる「技術の目利き」は、「原理の高みに上って技術の俯瞰図を描ける人（p.33）」と述べている。

赤崎は、青色 LED 半導体材料の開発を開始する際に、材料として SiC、ZnSe、GaN から、GaN を選択し、その結晶成長を課題として設定した。そして、結晶成長基板について、サファイア、シリコン、を実験して、サファイア基板上への結晶成長を課題とした。続いて、結晶成長法についても、MBE 法をまず選択し、実際に結晶を作製するレベルまで課題を掘り下げ到達したが、真空度が高く窒素原子の制御が困難であることがわかった。次に、HVPE 法を再選択し、ここでは MIS 型ではあるが実際に青色 LED の商業サンプルを初めて作り上げた。しかし、輝度の低さや寿命の短さにより、同方法での限界を見極め、新たに MOVPE 法を再選択している。そこで、まずはサファイア上へのエピタキシー法で均一 GaN 結晶を作ること、次に II 価原子ドーピングによる p 型化の課題に突破点を洗練させ、そこに集中していった。

均一 GaN 結晶成長では、反応ガス流の制御から AlN バッファ層への再選択の後、低温 AlN 薄膜バッファ層へと課題を掘り下げ、目標を達成した。p 型化ではさらに亜鉛ドーピング、マグネシウムドーピングの後、電子線照射へと掘り下げて、目標を達成した。

このように、課題の階層性の中で、本質的な課題の仮説である突破点は、課題の選択、掘り下げ、再選択の繰り返しの中で洗練されている。その後、一度突破点を絞り込んだ後は、その突破点を徹底的に掘り下げることによって、ひらめきに至っていることがわかる。

(2) 突破点の洗練の障害

突破点の洗練のプロセスにおいて、掘り下げだけでなく再選択が重要であることがわかった。洗練の目的は、掘り下げると解がある課題を特定することであることから、掘り下げた先に解があるか無いかを考えて、課題を掘り下げるか再選択するかを判断する必要がある。ここで、掘り下げ過ぎて行き詰ったままになる場合や、中途半端な掘り下げと再選択を繰り返し、実際は掘り下げると解がある課題を見抜けず、うまくいかないからといって課題を再選択してしまう場合があり得る。この

でような場合では、いずれも突破点は洗練されない。

従って、再選択のためには、それまで取り組んでいた課題の見切りの難しさという問題がある。現実の技術者にとって、現在選択している課題が解決していない場合、まだ十分に掘り下げられていないのに他の課題をすぐ再選択してしまう「掘り下げの阻害」の要因がある。一方で、再選択しにくい要因として、「まだやりきれていない」「その先にブレイクスルーがあるかもしれない」といった「掘り下げの促進」と、新たな選択肢に眼を向けにくくする「再選択の阻害」の2つの要因が存在し、どこまで掘り下げたらやりきれたと言えるか、見切ってもいいのかの判断が難しいのが実際である。

「掘り下げの阻害」とはどのような場合に起こるのであろうか。現在取り組んでいる課題の「掘り下げ」を阻害する要因は、内部要因と外部要因に分類できる。内部要因としては、何度実験しても成功しないことによる他への目移り、苦しさからの脱却が挙げられる。外部要因としては、会社や研究室の方針転換によるトップダウンでの課題変更があり得る。

一方、「掘り下げの促進」と「再選択の阻害」はいずれも再選択をしにくくする要因である。現実の技術開発では再選択しにくいことの方が起こりやすく、深刻である。その原因は実験を行う上での経路依存性だと考えられる。経路依存性がゆえに掘り下げが促進され、なおかつ再選択をしにくくなる。

そこで、実験において欠かせない、「技術的方法」「実験装置」「技術者の専門性」に着目して、これらによる経路依存性について考察する。

① 技術的方法への粘着性による経路依存性

「技術的方法への粘着性による経路依存性」とは、一度ある技術的方法を選択すると、その方法での掘り下げを促進すると同時に、次の方法選択の自由度が低下し、再選択を阻害することである。

ではなぜ、一度ある技術的方法を選択すると再選択の自由度が低下するのだろうか。それは、「選択の正統性の維持」「技術者の意地」「学問的新規性」「方法学習のコスト」に起因する粘着性により、一度選択した技術的方法の本質的な問題点に気

づいたとしても、新たな技術的方法の再選択をしにくくなると考えられる。

「選択の正統性の維持」とは、ある課題を選択した理由の正統性には慣性があり、一度合意された正統性を覆すことは容易でないことである。技術開発にはマンパワーや投資を伴うため、ある技術課題を遂行するためには、その課題を選択した理由の正統性を組織内で示し、合意される必要がある。その後、課題解決がうまくいかないからと言って別の課題を再選択することは、それまでの正統性に反するため、容易ではない。

「技術者の意地」とは、課題選択は技術者の意思で行われるため、その選択が間違っていたことを容易には認められず、従って再選択を妨げることである。それは、トップダウン、ボトムアップの両方のパターンであり得る。特にトップダウンすなわち上位者の技術者が課題を選択して下位の技術者が実行している場合は、上位の技術者の意地が経験の長さ、上位者としての立場でより強まった結果、再選択をより難しくする。

「学問的新規性」とは、ある技術的方法を選択した時にそれが学問的に新規であることを指す。学問的に新規であればあるほど、技術変数間関係性は未解明の部分が多く、その関係性を明らかにするための実験の数が多くなり、目の前に実施できることがたくさんある状態となる。すると、たとえ解決のためのスジが悪いと感じていても、その実験を実施すること自体が学問的には新規性があり意味があるため、ついつい目の前のことをやってしまい、新たな技術的方法を再選択しにくくなる。解決すべき課題が、新しい現象であればあるほどこの傾向が強いと考えられる。なぜなら、新しい現象は、それを制御するために効果的な技術変数やその組み合わせの多くが不明のため、技術変数の相関関係やトレードオフの存在確認を始めとして、技術変数間の相関関係の切り分けや因果関係の解明など、多くの実験を行う余地があるためである。

「方法学習のコスト」とは、ある技術的方法を選択して実験をするために必要な方法の学習には相応のコストがかかるということである。そこには材料そのものや制御変数に関する知識、実験を行うための材料入手・保管、材料の調合、装置運転

等、多岐に渡る知識の学習が必要であり、投資と時間が必要である。従って、一度ある技術的方法を選択し学習すると、その切り替えコストが障壁となり、新たな技術的方法を選択しにくくなる。

② 実験装置による経路依存性

「実験装置による経路依存性」とは、ある技術的方法を実現するために導入した実験装置仕様の事前決定によって、実験可能な技術変数や制御範囲が限定されることである。その結果、その装置で制御可能な技術変数に関わる課題の掘り下げが促進されるのと同時に、一度導入した「装置への粘着性」により課題の再選択が阻害されてしまう。この「装置への粘着性」には、「装置購入の投資」と「実験装置の育成」の2つのコストに係わるポイントがある。

まず、装置購入には投資が必要である。それは、装置そのものの金額のみならず、装置の仕様決定、メーカー検収、試運転など、人と時間の投資も莫大である。従って、1 つ装置を導入すると、同様の目的で異なる方式の装置を購入することへの投資コストが大きな障害になる。

また、技術開発は実験装置を中心に進められる。実験の繰り返しによって得られた実験方法や技術変数の制御方法は実験装置の改造という形で具現化していく。それは「実験装置の育成」とも表現できる行為である。実験装置は、実験の結果を基に改造することによって、実験を行う毎に使いやすくなり、望みの実験を実行しやすくなっていく。これは、お金だけでは解決できない、技術蓄積への投資でありその価値も高い。従って、育ててきた使いやすく価値の高い実験装置を見切って、未知の新たな実験装置導入することに対して、単に装置購入の投資だけでなく、その後の実験装置の育成のコストを含めて、再選択の際には障害になり得る。

ここまで、実験装置による経路依存性が起こす再選択の障害について述べてきた。一方で、実験装置によって掘り下げを促進できているように見えて、実は実験装置の持つ限界により掘り下げの範囲の限定が起こり得る。これは、技術者が知らぬ間に嵌る経路依存性であり、突破点の洗練のみならず次の「空白のある地図の確定」にも影響を与えてしまう。

実験装置を導入する場合には、その機能を実現するための装置仕様、すなわち制御できる変数の因子と範囲を事前決定する必要がある。しかし、装置を導入するタイミングではまだ技術開発がスタートしていない、又は別の装置で技術開発をしていることから、新たな技術開発で制御したい変数の因子の種類や範囲が明確でないことがある。しかし、装置を導入しないことには技術開発が始まらないため、多くの場合見込みで装置仕様を事前決定して導入することになる。すなわち、装置が無いと実験できないが、実験しないと装置仕様がわからないというジレンマが、後の実験を進める上での技術変数の選択や制御範囲の限定を知らず知らずのうちにもたらすことがある。

実験装置というものは、技術者が実験をする上で中心となるものである。それゆえ、実験装置に対する経路依存性が強く、掘り下げにも再選択にも大きな影響を与えることを意識しておくことが大切である。

③ 技術者の専門性による経路依存性

「技術者の専門性による経路依存性」とは、実験の中での試作、計測、評価の観点が、技術者の専門性に強く依存することである。この専門性は長期に渡る専門教育と実践に裏付けされているため、専門性の逸脱、すなわち新たな専門性の学習のコストは異常に高く見合わない。この結果、課題の掘り下げが偏った方向に促進されると同時に、専門を逸脱した課題への再選択を阻害され、突破点の洗練を妨げることがある。従って、試作や計測、評価の内容がある専門分野に偏ると、技術メカニズムの仮説を正しく立てられないため、本質的な課題を見極められない危険性がある。

赤崎は均一 GaN 結晶成長において、LED を作るための電気特性を目標としていたが、結晶そのものにも着目し、結晶欠陥の観点からも評価を行っていた。一方吉田は、結晶状態よりも電気特性の改善により着目をしていた。その結果、吉田が AlN バッファ層で多少の電気特性の改善で満足し、その後の掘り下げが不足したのに対し、赤崎は電気特性の改善よりも、結晶状態の改善に主眼を置き、そのための実験

を行ったため、最終的に大幅に電気特性を改善できる GaN 結晶を得ることができた。

(3) 再選択のための課題の見切り

突破点の洗練のプロセスにおいて、再選択には大きな障害が幾重にも存在することがわかった。しかし、突破点を洗練するには、それまで取り組んでいた課題の「見切り」による再選択が必要である。では、どこまで掘り下げたらやりきれたと言えて、どのように見切ると次の課題の再選択が成功しやすいのだろうか。

再選択のための見切りには、実際に現物を作製することが必要である。そして量産まで視野に入れて掘り下げることである。これは相当に時間がかかり大変なことである。洗練というには掘り下げ過ぎているように思えるかもしれない。しかし、まず量産を視野に入れたレベルまで掘り下げようと思うと、そこまでに解決すべき多くの難しい課題があり、容易に掘り下げられない。

しかし、無理にでも掘り下げようすると、現物を作るために必要な方法や装置、その再現性、安定性、生産効率性など、現在選択している方法の良さと同時に悪さが際立って実感できるようになる。その結果、その課題の本質が見えて掘り下げるか見切るかを選択が容易になる。そして、そこまで掘り下げてからの再選択の際には、次は失敗しないように選択肢をよく考えて決定するようになる。さらに、再選択する際につきものである障害をクリアするための強い説得材料が得られる。

赤崎は、MOVPE 装置で GaN の pn 型 LED を作ると決めて、方法を再選択する前に、HVPE 装置で MIS 型 LED の試作品を 8 千個作り上げて、展示会に出品していた。そこから得られる示唆は、顧客に見せることができるところまで掘り下げること、すなわち少なくとも最低限の機能と性能を満たすレベルまで掘り下げることである。試作品ではあるが、8 千個という量産に近い形での結晶成長をやりきること、HVPE 装置の科学原理に基づく本質的な限界を理解でき、逆に MOVPE 装置の制御性の良さに気づき、新たな方法を再選択する判断を下せたと言える。

5.4.3 突破点への集中

突破点が洗練された後、そこへ集中することで初めて絞り込んだと言えることができる。突破点へ集中すると、仮説検証の範囲が狭くなるため、現実的に実験可能となり解決しやすくなる。範囲が広いと、技術変数の数の多さとその関係の複雑さにより、現実的に費やせる時間や、使用可能な材料・設備を使った実験検証をやりきれない。一方、範囲が狭いと、現実的な時間やリソースで、既知の技術変数間の関係性を解明することができる。

しかし、集中することで解が見つからないリスクを恐れてしまい、ついつい突破点を絞れない。突破点を絞るには、相当な実験量を積んで突破点が洗練された状態、すなわちかなりの確信をもって突破点を選択できる状態になる必要がある。

均一 GaN 結晶成長の事例では、4 年間、1500 回もの実験を行っている。GaN の p 型化や InGaN 混晶の事例でも数年間の間実験を行っている。その際に、当初定めた突破点から逸脱せず、集中して実験に取り組んでいる。突破点が洗練されていれば、数年間目標に到達しなくても他の課題に目移りせず愚直に突破点に集中して空白のある地図を確定させることができ、そして解決方法のひらめきにつながるということが言えそうである。

5.4.4 失敗事例の分析

吉田の GaN 結晶成長事例（吉田, 1983）では、AlN コートによる結晶成長のアイデアを試し、十分な結果を得られなかった。その後、3 年間先行していたにも関わらず、結局低温 AlN バッファ層には到達しなかった。このことの主な原因は、突破点の絞り込みが不十分であったことではないだろうか。

まず目的が異なるが故に突破点が洗練されていない。赤崎は青色 LED を pn 接合で作ることを目的にしているが、吉田は青色 LED にも使える新たな材料を作ることが目的としている。直近の論文でも、材料は AlN、AlGaIn、AlN コート上の GaN、結晶成長方法は蒸着から MBE、と 1975 年から 1983 年にかけて組み合わせを含めて変化している。

また、突破点の洗練が不足し、MBE 法に見切りをつけるレベルに達していない。赤崎は吉田と同様に MBE 法も試して GaN 結晶を作製しているが、高真空による窒素抜けと成長速度の遅さを理由に撤退し、MOVPE 法に乗り換えている。赤崎は、GaN 結晶成長の実験を通して突破点を洗練し、その洗練過程の中で十分な掘り下げと再選択を繰り返した結果、本質的な課題を探しあてているように見える。一方の吉田は掘り下げが不十分で技術蓄積が足らなかったため、MBE 法の問題点を明確にできず、従って MOVPE 法の再選択へ進むことができなかった。

吉田の GaN 結晶成長事例では、突破点の洗練における再選択において、特に以下の経路依存性による阻害が支配的に発生していると考えられる。

まず、「技術的方法への粘着性による経路依存性」について、吉田は、MBE 法を選択したことにより、正統性を維持せざるを得なくなった結果、方法選択の自由度を失った。このため、MBE 法は高真空での成膜のため窒素欠陥しやすく膜質が悪いことに気づいたとしても、容易に MOVPE 法へ技術的方法を変更することができなかった。また、そこには、技術者の意地として一旦 MBE 法を選択したのであるから、MBE 法の長所を生かして何とか良い特性の結晶を作ろうと考えたであろう。さらに、当時 MBE 法による III/V 族半導体の研究報告例は数少なく未解明の現象も多かったため、実験さえすれば新しい論文を書ける状態であり、取り組むべき実験の数も豊富であったと考えられる。このような状況なので、あえて技術的方法学習のコストをかけて他の方法を検討するという気が起こりにくかったのである。従って、吉田は MBE 法をむしろ掘り下げる状況にあったと考える。

一方の赤崎は、MBE 法での GaN 結晶成長の取り組みを 1974 年に松下電器東京研究所時代に行い、結晶成長にも成功していた。しかし、超高真空の MBE 法では結晶欠陥低減に限界があることや量産適性が低いことなどのスジの悪さを、身をもって体験した。このため、1975 年から 3 年間の旧通商産業省のプロジェクトでは、原料ガスを使用する HVPE 法を併用して、実際に光る青色 LED を作り上げた。そこでも HVPE 法の反応性の速さからその制御性に疑問を持ち、最終的に MOVPE 法を採用している。従って、赤崎は「技術的方法への粘着性による経路依

存性」に対して、目的が GaN の結晶成長であることを見失わなかったことと、その方法で実際の結晶や青色 LED を作り上げるところまで取り組み本質的な課題を見切ることによって、粘着性を排除したと言える。

次に、「実験装置による経路依存性」について、MBE 装置を購入した吉田は、MBE 装置を中心に AlN、AlGaIn 等の研究テーマ設定を行っている。MBE 装置は、高真空チャンバーを中心に構成された装置で、材料供給も金属は固体ターゲットを用い、窒素はアンモニアを高周波電圧でラジカル化するという、特殊な装置である。このため、研究の目的も青色 LED 材料開発一筋ではなく、広く特異な性質を持ち、未開の材料であった III/V 族半導体の結晶成長を対象に、MBE 装置を用いて結晶成長と特性評価を行うというものであった。従って、GaN 結晶をどのようにうまく成長させるかという視点を中心に、実験装置を考えることができていなかったと考えられる。さらに、市販の MBE 装置を改造することは容易ではなく、その装置が制御可能な技術変数の範囲の中で実験をせざるを得なかったと考えられ、自ずとテーマや実験の範囲が限定的になってしまったことは想像に難くない。また、例え MBE 装置が GaN 結晶成長に向いていないと考えたとしても、高価な MBE 装置への粘着性により、別の装置を購入するということは至難であったであろう。

一方の赤崎は、MBE 装置での GaN 結晶成長を行うにあたり、真空蒸着装置を改造して実験を開始している。必要に応じて自由に改造できたことで、装置固有の技術変数の縛りが弱かった。HVPE 装置は国家プロジェクトで新たに準備したことと、RCA 研究所の H. P. Maruska が同装置での GaN 結晶成長について先行論文を出していたため、必要な仕様を比較的確からしく決められたであろう。その後 GaN での青色 LED 開発の課題が中止になるため、新天地の名古屋大学では、また新たな装置として、MOVPE 装置を準備することとなったが、これも手作りであり自由に改造することで、装置に技術変数を縛られにくかった。

すなわち、赤崎は作るものを主眼に装置を選び、その装置を自作したことによって、実験での技術変数選択も実験装置再選択も縛られることが無く、そのあり得べき粘着性が障害にならなかった。

また、「技術者の専門性による経路依存性」について、吉田は電気的特性で結晶成長の善し悪しを判断していた。一方、赤崎と天野は、電気特性だけでなく、結晶特性（クラック・ピット）を見て善し悪しを判断していた。これは専門性に起因する視野狭窄と経路依存と考えられる。吉田は結晶性に対して深く専門的な着眼点を持てなかったことが、AIN コートの低温薄膜化によるバッファ層というアイデアにつながらなかった理由の 1 つと言えそうである。

5.5 「空白のある地図」の確定

5.5.1 2つの要件

「ひらめき」のプロセスにおいて、「突破点」を絞り込んだ技術開発への取り組みにより得られるのが、「空白のある地図」の確定である。「空白のある地図」とは、既存の技術変数間の精密な関係性が明らかになっているにも関わらず、現象のメカニズムが未完成で、問題解決できない状態である。そこへ新たな「キー技術変数」が出現すると、現象のメカニズムが完成し、問題の解決方法を得られる。

「空白のある地図」が確定していないと、「キー技術変数」を見ても解決方法をひらめかない。従って、「空白のある地図」の確定と「キー技術変数」の順番が大切である。

では、「空白のある地図」は何をもって確定と言えるのであろうか。それは、「既存の技術変数間の精密な関係性の構築」と「未知のキー技術変数の存在仮説」の 2 つである。ひらめくために「既存の技術変数間の精密な関係性」は必須である。しかしそれだけでは不足である。既存技術からは導き得ないキー技術変数を求めるモチベーションが必要である。それが「未知のキー技術変数の存在仮説」である。そして、それは「既存の技術変数間の精密な関係性の構築」によって生まれる。

Polanyi (1966) は、「問題を考察するということは、隠れた何かを考察することである。今はまだ詳細が明らかになっていない一貫性を暗に認識することである。」¹⁰⁵

¹⁰⁵ Polanyi (1966, p.21) より。

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、既存技術の中で「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。すなわち、「既存の技術変数間の精密な関係性の構築」によって、「未知のキー技術変数の存在仮説」が生まれると考えられる。

5.5.2 技術変数間の精密な関係性

技術のひらめきに必要な既存技術変数間の精密な関係性とは何であろうか。その議論に入る前に技術変数について深く言及しておく必要がある。第2章で、技術において用いられる変数を特に「技術変数」と呼ぶこととし、物質の状態変化の方式や手段により制御される因子とその範囲を表しているとした。実験で関係性が明らかになる技術変数には、既存技術で影響の大きい変数として知られた独立変数、試作の結果生成されたモノが示す機能や性能を表す従属変数、独立変数や従属変数と相関関係を持つが影響が小さい変数、独立変数とも従属変数とも相関関係を持たない変数の4種類がある。ここで、独立変数や従属変数と相関関係を持つが該当する実験では取り扱わない変数を関連変数、独立変数とも従属変数とも相関関係を持たない変数を非関連変数と呼ぶことにする。

具体的には、独立変数として「結晶の成長温度」を上げると、従属変数の「結晶の電気移動度」が上がるが、非関連変数である「装置外の湿度」を上げて「結晶の電気移動度」は変化しないといったことである。

技術開発の実験では、既存技術で知られた技術変数を独立変数として用いて、求める従属変数が目標を達成するための独立変数の組み合わせと数値範囲を探索していく。その過程で実験を繰り返し行うことにより、副次的に2つの関係性が定量的に明らかになる。1つは直接副次的に得られる独立変数と従属変数の相関関係とその度合いである。もう1つは間接副次的に得られる関連変数、非関連変数との相関関係とその度合いである。実際の実験では、独立変数と関連、非関連変数を切り分けることがとても難しい。なぜなら、それらの技術変数間にどのような相関関係があるか当初は不明だからである。このため、実験の中で関連、非関連変数の関係

性を確認しながら切り分けをしていく作業が必要となる。従って、間接的ではあるが副次的に関連、非関連変数との相関関係やその度合いが明らかになる。この際、独立変数を関連、非関連変数から切り分けるために、2つのことに留意する必要がある。1つは、既存技術をベースに独立変数と関連変数の違いを明確に認識すること、もう1つは、変数を独立に制御可能な実験方法、装置を準備することである。

このことから、技術変数間の関係性が精密であるとは、ある物質の状態変化について、関係する技術変数とそれらの関係性を細部に渡り知り尽くしていることと考えられ、以下の2つを満たす必要がある。1つ目は、目的とする物質の状態変化に関わる技術変数の中で、独立変数、従属変数、関連変数、非関連変数が明確に区別できることである。2つ目は、それらの技術変数間の相関関係とその度合いが明らかになっていることである。

赤崎と天野は、MOVPE法で均一なGa_{0.5}In_{0.5}N結晶を成長させることを突破点とし、そのための絞られた技術変数¹⁰⁶について、実験検証の繰り返しによって関係性を精密化していった。一方の吉田の事例では、突破点が絞り込めず、まだ洗練のための課題の再選択の状態であったことは前節で述べた。従って、「空白のある地図」を確定できておらず、「ひらめき」が得られる状態では無かったのではないかと推察される。

5.5.3 技術変数間関係性の精密化の駆動要因

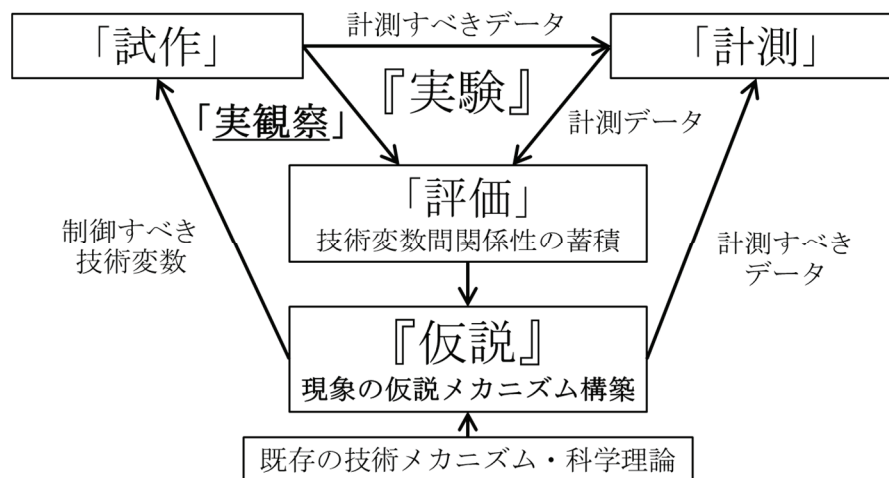
前項で技術変数間関係性が精密であるとは、ある物質の状態変化に関係する技術変数とそれらの相関関係やその度合いの詳細を知り尽くしていることだと述べた。では、どのように技術変数間の関係性は精密化するのだろうか。それは、実験による技術変数間の相関関係の解明と現象のメカニズムの仮説検証の相互作用によって行われる。技術変数間の相関関係がわかると現象のメカニズムの仮説が立つ。現象のメカニズムの仮説が立つとそれを検証するための実験によって、相関の度合いや新たな相関関係がわかるためである。

¹⁰⁶ 均一 GaN 結晶成長の実験で用いられた技術変数は、各種ガスの流量比・流速、基板角度・温度、時間といった、ごく限られたものである。

本論文において実験とは、「実際に目的物を試作、計測、評価することにより、仮説を検証する行為」である。従って、技術開発の実験の場では「試作」「計測」「評価」のサイクルで情報が流れる。ここで本論文における「試作」「計測」「評価」の定義を確認しておく。「試作」とは、素材と素材を加工する装置を用いて、技術変数を任意に制御することで、目的物を実際に作ってみることである。

「計測」とは、試作での技術変数の数値、および実際に作った目的物の機能、性能、生産性のレベルを定性的または定量的に明らかにすることである。「評価」とは、「試作」と「計測」の結果を整理し、当初の仮説検証の目的に対して実験で得られた知識と事物を明らかにすることである。

次に、実際の仮説構築と実験検証における情報の流れと蓄積について整理する。「試作」では、「変数制御方法」が蓄積され、実験において制御したい変数を、他の変数と独立して、なおかつ正確な数値で制御できるようになる。「計測」では、「計測方法」が蓄積し、それぞれの変数を正確な値で計測することができるようになる。「計測」へは「試作」の中で測定すべきデータの情報が流れる。「評価」では、「試作」での「実観察」と「計測」での計測データによって「技術変数間の関係性」が蓄積される。この結果、既存技術と科学理論によって、既存の技術メカニズムから「現象の仮説メカニズム」が構築される。この仮説メカニズムから、次の試作で制御すべき技術変数と測定すべき技術変数が明らかになる。従って、実験を繰り返すと、「変数制御方法」と「計測方法」が蓄積することと、仮説メカニズムが修正されていくことによって、仮説検証のサイクルがより精緻に回り、技術変数間の関係性が精密化していく（図 5-7）。



（出所）筆者作成。

図 5-7 技術開発の実験における情報の流れ

技術変数間の関係性を精密化するための駆動要因は何であろうか。技術開発の実験における情報の流れの中では、「試作」から「評価」へ直接大きな情報が流れるための「実観察」、「評価」の結果から次の「試作」と「計測」の内容を決定する「仮説」を深めるというための「現象の仮説メカニズム構築」が重要だと考えられる。さらに、実験における「試作」「計測」「評価」の全てに眼を配る「1人3役」が、実験サイクル全体を駆動するために重要と考えられる。

（1）実観察

まず「実観察」とは、実験の現場で現象を自ら観察することにより、技術変数と物質の状態変化の関係の詳細を知ることである。「実観察」において、技術変数と物質の状態変化の関係の詳細を知るために必要なことは、2つあると考えられる。1つは既存の技術やメカニズムに則って現象を予測すること、もう1つは現象の時間変化を観察することである。なぜなら、まず実際に自分の目で現象を観察するためには、観察の際にどこを見ればよいかといった、観察の観点が必要である。これが、既存の技術やメカニズムに則った予測である。既存の技術やメカニズムに

よる予測を基に、実際の現象との差異を観察すれば、物質の状態変化の詳細を捉えやすくなる。

一方、現象には必ず時間変化がある。物質の状態は技術変数によって時間と共に変化し、これを観察することが、すなわち物質の状態変化の関係の詳細を知ることそのものである。

実験での「実観察」では、計測データのみを聞いて評価する場合に比べて、学会、論文等で一般的に知られた既存の技術変数や評価方法に必ずしも依らない3種類の情報、①「技術変数間関係性の効き」、②「物質の時間的狀態変化のプロセス」、③「非数値変数」を新たにもたらす。これらは既存の技術変数間の関係性の詳細を現わす情報なので、技術変数間の関係を精密に構築することができる。

① 「技術変数間関係性の効き」

「技術変数間関係性の効き」とは、物質の状態変化を制御する時の技術変数の影響の強弱である。技術変数間の精密な関係性を知るには、単なる相関関係だけでなくそれらの影響の強弱まで知る必要がある。機能性材料生成において、技術変数を変化させると1対1で即反応が起こる訳ではなく、各々の技術変数やそれらの組み合わせによって、効果の強弱が様々に変化し得る。すなわち、効果の独立した技術変数であれば、各々の技術変数の変化が各々の強弱で効果をもたらす。また、相互に影響を持つ技術変数であれば、技術変数の組み合わせとその変化に応じて、効果の強弱が変わる。材料が合成されて出来上がった状態の機能や性能を計測しただけでは、上記の技術変数間関係性の効きは知りえない。従って、試作で技術変数を変化させた時に、材料がどれだけ状態変化したかとそれらの計測結果を両方ともに知っておくことが大切である。

均一 GaN 結晶成長の事例では、天野が AlN の結晶成長温度が低いと均一なすりガラス状の結晶ができることをそれまでの実験で知っていた。このことが、ひらめきにつながった。すなわち、結晶成長温度という技術変数を変化させた時の結晶の状態変化の強弱を知っておくことが大切であった。

② 「物質の時間的狀態変化のプロセス」

「物質の時間的狀態変化のプロセス」とは、物質がある技術変数の作用によって状態変化する際の時間的な現象の移り変わりの様子である。機能性材料の生成プロセスには複数の段階があり、それぞれの段階で技術変数を変化させる際の時間因子が重要である。いくら材料の混合比率や温度条件がレシピ通りでも、その混合の時間的タイミングが少しでも異なると、全く異なる物質が出来上がるためである。そして、出来上がった現物のデータだけ見ても、その変化がどのような状態であったかを知ることはできない。従って、試作の時に物質の時間的狀態変化を逐一観察し、技術変数の時間的な影響を把握しておくことは、技術変数間の関係性を精密に構築するために、大切なポイントである。

GaN の P 型化の事例では、天野が NTT 武蔵野研究所のインターンで、亜鉛ドーピング GaN に CL（カソードルミネッセンス）の電子線を当てた時に、時間と共に発光強度が増すことを発見し、これが後に P 型化のひらめきにつながる重要な観察となった。

③ 「非数値変数」

「非数値変数」とは、技術変数の作用により現象が変化しているが、未だ変数化、および数値化されていない技術変数である。実験を行う時、試作のための条件や計測の内容は、既存の数値化され得る技術変数で構成される。しかし、実際の現象は、既存技術では認識されていない名前さえも不明な変数をも包含しており、新たな解決方法を見出すには、これら非数値変数が精密な技術変数間の関係性の構築のために必要な場合があると考えられる。従って、実験の時に、数値化された情報でない非数値変数にも目を向けて、その現象を認識し変数化しておくことが、技術変数間の関係性を精密にするために必要である。

均一 GaN 結晶成長の事例では、天野は来る日も来る日も実験で「汚い結晶」を作っていた。しかし、一言で「汚い」といってもその汚さの違いに着目して結晶の空孔や亀裂を観察し、どのように結晶が成長しているかを観察し変数化した。その結果、低温での AlN 結晶成長によるバッファ層で、サファイア基板上に結晶の核

を作ることができることや、核から GaN 結晶を成長させると欠陥の無い結晶が成長することをひらめくことができた。

(2) 現象の仮説メカニズム構築

「現象の仮説メカニズム構築」とは、実験で得られた技術変数間の相関関係と既存の現象のメカニズムとのギャップに対して、既存の技術メカニズムや科学理論をベースに新たな現象のメカニズムの仮説を構築することである。この現象の仮説メカニズムの検証を目的とした試作を行うことで、技術変数間の関係性は精密化する。「技術変数間の関係性」が蓄積すると、それらの因果関係から現象の仮説メカニズムを立てることができる。既存の現象のメカニズムに基づいた技術変数の組み合わせで問題が解決できない場合、新たな現象の仮説メカニズムを立てて実験で検証することを繰り返すことで、物質の状態変化の現象に関わる技術変数やそれらの関係性はより明らかになる。これにより、技術変数間の関係性が精密化すると考えられる。

実験の「試作」「計測」「評価」の流れで得られた技術変数間の相関関係から仮説なしに次の試作の内容を決めることはできない。なぜなら、次の実験を行うための技術変数は、たとえ明確な根拠が無かったとしても、何らかの仮説が無ければ選択できないためである。そして、それでは精密な関係性は得られない。なぜなら実際は多くの技術変数が複雑にからみ相互作用を持っているため、立脚すべき筋道がないと技術変数の選択やその範囲、組み合わせの選択をしにくいためである。仮説であってもメカニズムに立脚することで効果が高いと推測される技術変数から順に試作で試すといった道筋を描ける。このように、得られた技術変数間の関係性から、技術変数間の因果関係すなわち現象のメカニズムの仮説を立てて、検証すべき要因を一つ一つ明確にするための試作を行うことが大切である。

現象の仮説メカニズムはどのように構築するのが良いだろうか。それは、実験で得られた技術変数間の相関関係を、既存の技術メカニズムや科学理論に照らし合わせて、現象のメカニズムの修正を繰り返すことだと考えられる。これまでの議論

をまとめると、ここで重要なことは、①あくまで既存の技術メカニズムをベースに現象の仮説メカニズムを構築すること、②既存の科学理論による技術変数の洗い出しと選択を行うこと、③実験で得られた技術変数間の相関関係と現象のメカニズムとのギャップから新たな現象の仮説メカニズムを構築すること、である。この繰り返しによって、技術変数間の関係性は精密化していく。

(3) 1人3役

「1人3役」とは、行為主体の技術者1人が、実験サイクルの「試作」「計測」「評価」の3役を全て行うことである。これによって、正確かつ豊富な情報が瞬時に蓄積されて仮説検証が進み、技術変数間の関係性が精密化すると考えられる。

青色LED半導体材料の結晶成長技術開発において、天野も松岡も自らの手で実験を行っていた。均一Ga_{0.5}In_{0.5}N結晶成長の事例では、天野は約2年間で1500回にも及ぶ実験に自ら取り組んだ。Ga_{0.5}In_{0.5}NのP型化の事例では、天野は自ら約4年にわたり実験を行った。InGa_{0.5}N混晶の事例では、松岡は約2年にわたり自ら実験を行った。いずれの事例も、数年間にわたり実験のサイクルを自ら行い、既存の技術変数間の精密な関係性を構築していた。

一方で、「試作」「計測」「評価」には非常に多くの技術的なノウハウがあり、1人の技術者が全てを把握して取り組むことは、むしろ精密化の弊害になるのではないとも言える。すなわちそれぞれを専門家に任せる方が良いのではないかという指摘もあり得る。しかしながら、専門家は基礎的な学問習得と実践での学習によって専門家になるため、新しい技術開発での実験において専門家がいなくてもあり得る。その場合は従来技術の専門家に任せていても実験が進まないため、技術開発の担当者が自ら実験する必要がある。

また、試作に使用する装置や計測のための測定装置、評価のための科学理論や考察のための方法には、それぞれ専門家がいる場合が多い。しかし彼らは、専門家として過去に実施した内容や経験に沿って試作装置や測定装置を動かし考察するため、既存の技術パラダイムに捉われて、新たに開発しようとしている技術の実験に

そぐわない提案や行動を取ることがある。その場合は、やはり技術開発の担当者が自ら赴いて、専門家と一緒に試作装置や測定装置の動かし方や設定条件、改造内容、さらに試作や測定の内容を考えていくしかない。すなわち、結果として1人3役をしないと実験サイクルが回らない。一方で専門家は、試作装置や測定装置の操作方法や観察方法についての多くの蓄積があるため、新たに実験したいことに対して目的を共有できれば、適切な方法を提案できる引出しを多く持っているというメリットもある。

従って、新しい技術開発で技術変数間の関係性を精密に解き明かすにあたり、実験サイクルを自ら思うように回すためには、「1人3役」が必然的に必要である。そして、もしその道の専門家がいたのであれば、あくまでもサポートをもらうことでより精密化を促進することが可能である。

5.5.4 未知のキー技術変数の存在仮説

「空白のある地図」を構築していくと、既存の技術変数間の精密な関係性が明らかになるのと同時に、解決のための現象のメカニズムが描けないという状態に到達する。この時、問題の解決のための「未知のキー技術変数の存在仮説」が立つ。すなわち、既存の技術で効果が高いと考えられる技術変数を順番に検証し、全てを確認しきっても解決できない場合、既知の技術変数の組み合わせと最適化では技術的目標に到達できず、未知の隠れた「キー技術変数」があるのではないかと考え始める。

未知の「キー技術変数」の存在仮説が得られる要件は何であろうか。それは、既存技術変数間の精密な関係性を構築した時の、①「技術軌道の果て（frontier of technological trajectory）」への到達と、②「説明不可能な現象（unaccountable phenomena）」の観測だと考えられる。

(1) 「技術軌道の果て」への到達

既存技術変数間の関係性を解き明かすための実験を行っている時、すなわち技術軌道上で技術開発を掘り下げている時は、その経路依存性が故に既存には無い未知の「キー技術変数」を外に求めることは難しい。しかし、「技術軌道の果て (frontier of technological trajectory)」に到達すると初めて外を向くことができる。なぜなら、果ての先には外の視界しか残されていないからである。「技術軌道の果て」とは、現在の技術や科学理論で考え得る技術変数の組み合わせと最適化をやりきっても技術的目標に到達できないことがわかった状態である。空白のある地図の確定において「技術軌道の果て」に到達することで、既存には無い未知の「キー技術変数」が外に存在するのではないかと、初めて思えるようになる。

(2) 「実験における説明不可能な現象」の観測

一方、未知の「キー技術変数」の存在仮説は、既存技術に基づく「試作」「測定」「評価」の実験サイクルで得られる「技術蓄積の果て」だけから生まれるわけではない。なぜなら技術的に達成不可能という結果が出るだけだからである。では、なぜ未だ知らない「キー技術変数」が存在すると思えるのだろうか。それは、実験での「実観察」の積み重ねで観測された「説明不可能な現象 (unaccountable phenomena)」があるからだと考えられる。「説明不可能な現象」とは、実験の失敗を重ねる中で「実観察」してきた、既存の技術や科学理論では説明できない現象である。このような現象との対峙を続けると、解決のためには、既存の技術変数の組み合わせ以外に、未だ見えぬ新たな技術変数があるかもしれないと考えるようになる。

均一 GaN 結晶成長の事例では、赤崎は自ら作った欠陥が多く失敗した GaN 結晶を顕微鏡観察した時に、極稀に小さいけれどもとてもきれいな結晶の粒を、クラッ

ク（割れ目）やピット（穴や窪み）の多い結晶の中に見つけ、上手くいく可能性は「0ではなく1だ」と考えたという¹⁰⁷。

p型化の事例では、亜鉛やマグネシウムを GaN 結晶に適切だと思われる割合でドーピングできていることやその割合を制御できていること、結晶性の観察で大きな欠陥も見つからないにも関わらず一向に p 型化しないこと、といった実観察の結果から、なぜ p 型化しないか不思議でならなかった。そして、何か未だ知らない技術変数があるのかもしれないと考えるに至っていたという¹⁰⁸。

5.5.5 「空白のある地図」の確定の役割

未知の「キー技術変数」の存在仮説が立ったとはいえ、その候補は膨大で、なおかつ既存のメカニズムからは推測できない。このため、いくら既存の科学理論をベースに考えても得られない。すなわち、この外からやってくる「キー技術変数」を捕らえるには、既存の技術変数の関係性が精密に構築されていることだけではなく、同時に「空白のある地図」に当てはまるべき「キー技術変数」が外からやってくるという仮説を持っていることが必要である。それら2つの要件が揃っていれば、あてはまるべき「キー技術変数」が外から示された時、それに気づくことができ、そしてそれが求めていた技術変数であることがはっきりとわかる。

従って、技術の「ひらめき」における「空白のある地図」の確定の役割は、①新たなキー技術変数を外に求めること、②外から得られた技術変数が求めていたものかどうかわかること、と言える。

5.6 「常識の例外」の連想

既存の技術に基づき、精密な技術変数間関係性を構築した後、どのように革新技術を導く新たな解決方法に飛躍するのだろうか。この疑問に応えるのが、「常識の例外」の連想と、「キー技術変数」の類推による飛躍である。

¹⁰⁷ 赤崎（2013, p131）より。

¹⁰⁸ 2016年10月14日13:00-15:00の鬼頭へのインタビューより。

本節で、「常識の例外」の連想について考察する。これは、偶然の介在による 1 つ目の飛躍と言える。次節で「常識の例外」からの新たな「キー技術変数」の類推について考察する。これが類推による 2 つめの飛躍である。

5.6.1 常識の例外とは

「常識の例外」とは、「当該の技術分野において常識的にはうまくいかないと推論できるが、例外的な効果がある事例や現象のこと」である。ここで常識(common sense)とは広辞苑¹⁰⁹によると、「普通、一般人が持ち、また、持っているべき知識。専門的知識でない一般的知識とともに理解力・判断力・思慮分別などを含む」である。従って、本研究において行為主体にとっての技術的な常識とは、行為主体の属する技術分野の技術者が当然知っているであろう、既存の科学理論、技術メカニズム、技術的解決方法といった知識や考え方だと言える。

「常識の例外」はひらめきの時点で行為主体である技術者にとって既知の情報であり、組織内の先行事例、自身が経験した当該分野または他分野の事例がありうる。いずれも、既存の科学理論で充分には説明できない例外的な現象であり、技術メカニズムは完全には解明されていないが、その技術変数間の関係性は知られているものである。

技術のひらめきをするには、「空白のある地図」を確定した後に「常識の例外」から類推した「キー技術変数」を組み合わせる必要がある。このため、「空白のある地図」が確定した後に「常識の例外」に出会えば、その時点でひらめきが起こる可能性が高いが、「空白のある地図」の確定の前に「常識の例外」に出会っている場合があり、その場合は思い出す必要がある。

しかし、「常識の例外」を最初に知った時、常識的にはうまくいかないと推論できるため関心の外にあることが多い。むしろ非常識だということによって「常識」の枠組みに気づきやすいため¹¹⁰、「常識」である既存技術での解決方法の探索に焦点を

¹⁰⁹ 広辞苑第 4 版より。

¹¹⁰ 石井（2001）は常識の境界について、社会心理学の観点で分析している。そこで

絞り、「常識の例外」を忘れる傾向が強いと考えられる。

このため、「常識の例外」を思い出すには、何らかの導きが必要である。それが「キーワード」による「連想」である。また、かつて一度関心の外へ追いやった「常識の例外」と向き合うには、「空白のある地図」が確定することによる、「新たなキー技術変数の存在仮説」が必要である。

均一 GaN 結晶成長の事例では、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「常識の例外」を連想した。GaN の P 型化の事例では、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」を、ある日ふと連想した。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、低温でもガスが分解反応するという常識の例外を連想している。

5.6.2 連想とは

「連想 (association)」とは、あるキーワードを基にして、既知の事例や現象を思い出すことである。前項で述べたように、以前獲得した知識としての「常識の例外」を思い出すには、何らかの導きが必要であり、それが「連想」である。「連想」に必要なのは、連想の内容を決定する「キーワード」と、連想を引き起こす「きっかけ」である。以下でそれぞれについて考察を行う。

(1) 連想の「キーワード」

空白のある地図を構築するための実験の中で得られた「キーワード」が、空白を埋めるのに必要な「常識の例外」を思い出すための橋渡しをしていると言える。従って、連想のための「キーワード」を、空白のある地図を構築する中で得ることは非常に重要なポイントである。

では、「常識の例外」を連想するための「キーワード」の要件は何であろうか。そ

は、普段人は常識を明確に認識していないが、非常識には敏感であり、非常識との出会いにより常識を認識すると論じている。

れは、①「最大関心事」②「抽象度」③「オリジナル」であると考えられる。

①「最大関心事」

「最大関心事」とは、課題解決において最も関心の高い事柄である。それは、試作した現物の見た目などの状況、技術的な制約、解決したい課題など、実現したくてもできていない事柄である。実験において、様々に技術変数の数値や組み合わせを変えても解決できず失敗が続くと、1つの関心事に思考が集中されてきて、その解決を常に考えるようになる。すると、その「最大関心事」が「キーワード」となり、「最大関心事」に関連した例外的な成功事例である「常識の例外」を連想することができる。

②「抽象度」

実験で繰り返し失敗することで「関心事」が洗練されてきても、それはまだ技術者の頭の中に漠然として存在しているに過ぎない。「連想」するためには、それを言葉に変換し、「キーワード」として明確に意識することが必要である。

ただし、その言葉は汎用的すぎても、専門的すぎても「キーワード」として生きてこないため、抽象度が大切である。汎用的な言葉はその「連想」の範囲を広げすぎるため、現在の技術開発に関連性の薄い事例まで対象となり、「常識の例外」に当たる可能性を大きく低下させてしまう。一方、専門的すぎると、その技術分野の範囲に近い事例が対象になり、既存技術の事例ばかりが連想されてしまう可能性が高い。とは言え、その抽象度のレベルを予め明確に規定することは難しい。「常識の例外」を連想する目的から言えば、「キーワード」の抽象度はどちらかと言えば高い方が良いと考えられる。

③「オリジナル」

「キーワード」は技術者本人の課題解決に対する問題意識の表れである。このため、自分の実験の失敗経験から思い至り確信を持つものである。それは自分なりのオリジナルな言葉であればよく、必ずしも他人がそれを重視する必要や、業界や学会で一般的な言葉である必要はない。

(2) 連想の「きっかけ」

一方で、「連想」をするには「きっかけ」が必要である。そこには偶然が介在する。ある時、ある「きっかけ」で偶然に「連想」するため、ここには直接的な必然性は存在しない。しかし、「きっかけ」の中には、間接的な必然性を感じずにいられない事例も存在する。また、最初の「きっかけ」は全く必然性の無い出来事だが、その後連想が連鎖して「常識の例外」にたどり着く場合もあり得る。

GaN の均一結晶成長の事例では、ある日基板温度制御のための誘導加熱式電気炉の調子悪く、当初狙いの 1000°C に対して 850°C までしか温度が上がらないというトラブルが発生した。ここで、天野は「基板温度 850°C では“汚い結晶”しか作れない」と考えたが、同研究室の澤木が約 1 年半前に語っていた“汚い結晶”でも良い場合がある」という言葉から、BP 結晶成長でリンの核を形成する方法を「常識の例外」として「連想」した。すなわち、“汚い結晶”を「キーワード」として、澤木から聞いた BP 結晶成長の話「連想」した。

天野にとって“汚い結晶”は来る日も来る日も悩まされ続けたまさに「最大関心事」であった。また、“汚い結晶”は専門的には“クラック”や“ピット”といった汚さを表す言葉があったが、“汚い”というのはそれらを総称した抽象的な言葉である。さらに、“汚い”というだけでは、汎用的すぎてそこから「連想」される事例の範囲は膨大であるが、「結晶」という言葉により、「抽象度」が高くなりすぎず、結晶成長の分野での「常識の例外」を「連想」できたと言える。「汚い結晶」というのは、自分の実験経験から出た問題意識に基づく言葉であり、学会論文等で用いられる言葉ではなく、自分なりの「オリジナル」の言葉であった。

GaN の p 型化の事例では、GaN 結晶の中にマグネシウム原子が混ぜることができているにも関わらず、電氣的に p 型の特性を示さないことから、マグネシウム原子の電氣的な“活性化”が「最大関心事」であった。ある時天野は、この“活性化”を「キーワード」に、NTT のインターンで経験しその後研究を進めた、亜鉛ドーピング GaN の CL (カソードルミネッセンス) での発光現象で起きた、電子線照射での電氣的な“活性化”を「連想」した。専門的には、バンド理論に基づく電子状態でその

状態を記述するわけだが、電氣的な“活性化”という言葉は抽象的ではあるが、広く汎用的な言葉というほどでもない。また、この“活性化”という言葉は、天野が LEEBI を研究する中で、現象を表現するために使った、「オリジナル」な言葉であった。

InGaN 混晶の事例では、結晶成長のための基板温度と平衡蒸気圧のトレードオフに悩み、アンモニアガスの“低温分解反応”が「最大関心事」であった。そこで、ある時、“低温分解反応”を「キーワード」として、以前に見たことのある化学論文を「連想」し、そこから低温でも少量ではあるが分解反応するということを得た。松岡は電気物理が専門で、化学反応の専門的な内容に精通してはいなかったため、「キーワード」が専門的すぎず、しかし汎用的ではない「抽象度」であったと考えられる。また、“低温分解反応”という「キーワード」は、松岡自身の問題意識から発した言葉で、「オリジナル」な言葉であった。

5.6.3 どのように「常識の例外」を知るか

では、「常識の例外」はどのように知ればよいのだろうか。「常識の例外」は、成功事例ではあるが既存の技術や科学の常識から外れていて説明できない知識である。これは、行為主体にとっての常識の世界にいても知ることはできない。外の世界を見聞して、初めて知る機会を獲得できるはずである。

外の世界の話を知るには、外の人のお話を聞くか、自分が外に行くしかない。そして、そのための機会を逃さないようにする必要がある。従って、それぞれの観点で、①外の人のお話を聞く、②自分が外の「隣接領域で実験する」、③機会を逃さないために「不思議へのアンテナを張る」、について考察を行った。

(1) 経験談を聞く

「常識の例外」は成功事例である。このため、経験談として語られることが多いはずである。さらに既存技術や科学で説明できないため、表立って語られるというよりは、過去の面白い経験としての位置づけになっていると考えられる。

均一 GaN 結晶の事例では、天野は澤木の BP での経験談を、ひらめく 1 年以上前に聞いていた¹¹¹。ある技術開発のグループに所属していれば、グループ内の公式な報告会の場に加え、非公式の場でメンバーの実験での体験談を聞く機会が頻繁にあるだろう。「常識の例外」が普段からたくさん起こるとは思えないが、もし稀に起こった時にいかに聞くかが重要である。また、興味深いがメカニズムがわからない現象は、公式な議論の場では理論的な説明が難しいため、詳細に言及できない場合や、そもそも話に上らない場合があり得る。そういう話の詳細を知るには個別に話を聞く必要があるため、自らが聞く耳を持つことや話をしてもらいやすくするための工夫が大切である。

従って、組織内での非公式の情報、特に個人的な体験談を多く獲得するために、他のメンバーと普段から話をする機会を増やすこと、話をしてもらえるように普段から聞く耳を持ちかわいがってもらうことが、様々な「常識の例外」が耳に入ってくる可能性を高めるために大切と考えられる。

(2) 隣接領域で実験する

「常識の例外」が現在取り組んでいる技術的専門分野¹¹²では無い分野での成功事例であることを考慮すると、技術的専門外の分野を探索することが良さそうである。それが「隣接領域」である。ここでの技術分野の「隣接領域」とは、背景となる科学理論又は技術が同じで、取り扱う材料や方法、機能・性能の目標が異なる領域を指す。1 つの専門分野には多くの「隣接領域」があるが、少しずつ取り扱う技術の常識が異なる。このため、「隣接領域」で実験をすると、自分の専門分野にとっての「常識の例外」に出会う可能性が高まる。また、単に経験談を調査するのでは無く、

¹¹¹ 天野 (2015, p94) より。

¹¹² 技術的専門分野とは、ここでは狭義の技術分野を指し、高度に専門化された技術範囲を指す。すなわち、目的とする材料、生成のための素材の属性と加工方法の組み合わせなどによって、全て異なる専門分野と見なした。現実の技術開発では、素材と加工方法は統合化され専門性の高いものになっている傾向が高い。このため、類似の科学原理の基づく加工方法であっても、目的とする材料や取り扱う素材などによって、その技術の中身は大きく異なると考えられるためである。

自ら実験をすることで「常識の例外」に出会うことを狙ってもよい。実際に実験をすることでその「隣接領域」での体験談を聞きやすくなるという効果もあり得る。あまり離れた領域では実験をすること自体が障壁となるが、隣接領域であれば実験をしやすいためであろう。

GaN の P 型化の事例で、天野は NTT ヘイニターンに行き、そこで GaAs の CL (カソードルミネッセンス) の実験をした。そこで新たな知見を得た天野は、自ら作製した亜鉛をドーピングした GaN の CL 実験をしたことで、LEEBI 効果という「常識の例外」を自ら手にした。

行為主体の技術的専門分野の「隣接」ではない「離れた」領域から「常識の例外」は得られないのだろうか。得られないとまでは言えないが、その可能性は著しく低くなると考えられる。それは、「キーワード」と「技術変数」で使用される言語の違いの観点から説明できる。まず、「キー技術変数」を得るための「常識の例外」事例は、ある技術的課題を言語化した「キーワード」によって連想される。また、その事例の中で使われる「技術変数」は、ある技術分野の中では共通の言語だが、「離れた」技術分野では使われない言語である可能性が高く、連想も後述の類推も起こり得ない。従って、使用される言語の異なる技術分野の事例からは「連想」は起こりにくく、「隣接領域」又は「離れた領域」であってもたまたま同じ言語を使用していた場合のみ「連想」が起こると考えられる。

では、どのような技術の「隣接領域」で実験をするのが良いのだろうか。「常識の例外」を得やすい技術の「隣接領域」には、背後の科学原理と技術変数の観点で 2 つのパターンがあり得る。1 つは、「背後にある科学原理は異なるが、取り扱う技術変数の多くが同じ領域」、もう 1 つは、「科学原理は同じだが、取り扱う技術変数の多くが異なる領域」である。科学原理と技術変数の多くが異なる領域では離れすぎ、同じ領域では近すぎるためである。

天野の p 型化の事例と、InGaN 結晶の松岡のアンモニア流量の事例は、いずれも後者のパターンであった。本質的な科学原理が異なる場合の解を追求していないことと、これまで気づいていない新たな技術変数による「常識の例外」が、解決方法

を得るために必要であることを考えると、後者の「科学原理は同じだが、取り扱う技術変数の多くが異なる領域」の方がより好ましいと考えられる。

(3) 不思議へのアンテナを張る

前述の2つは、「常識の例外」となる現象に出会いやすくするためのポイントであった。さらに、その出会いの可能性を高めることと、それを記憶しておくことが大切である。それが、「不思議」へのアンテナを張ることである。「常識の例外」は、既存の技術や科学の常識を外れていて説明できないという特徴を持っている。つまり「不思議」な現象である。そこで、「不思議」へのアンテナを張る、すなわち既存の理論で説明がつかないことへの感度を上げて情報を収集し、因果関係と現象のメカニズムの仮説を整理しておくことである。これにより、「常識の例外」の候補となり得る情報が集まり、なおかつ欲しいタイミングで整理された情報として記憶の中から呼び覚まされやすくなる。

5.7 新たな「キー技術変数」の類推

連想により頭に浮かんだ「常識の例外」から、どのように「キー技術変数」を類推しているのだろうか。これは、連想に続く2つめの飛躍と考えられる。類推とは、類似した既知の現象を基にして、問題解決の糸口を得ることである。つまり、メカニズムの有無やその妥当性に依らず、その表層的、あるいは構造的な類似性¹¹³によって、「常識の例外」で効果のあった技術変数が現在の課題を解決するキー技術変数と見なすことである。

5.7.1 類似の「ボトルネック」による類推

「常識の例外」の技術変数を適用しようとするすると常識外れ、すなわち既存の科学理論や技術メカニズムに基づくと失敗すると推論できる。しかし、類似の「ボト

¹¹³ Gentner (1983) は構造写像理論において、人間の類推に関与する類似性として、表層的類似性と構造的類似性を区別して提示した。

ルネック」を解決できていることに着目して、解決のキーとなると類推する。「ボトルネック」とは、技術的な課題の解決にあたり本質的に制約となる課題である。すなわち、解決しようとしている「ボトルネック」と、「常識の例外」で解決された「ボトルネック」との「類似性」から、解決の鍵となった技術変数、すなわち「キー技術変数」だけを抽出すると考えられる。従って、「キー技術変数」の類推の背景に科学理論や技術メカニズムに基づいた演繹的推論は不問である。これが2つ目の飛躍の所以である。

均一 GaN 結晶成長の事例では、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「常識の例外」から、結晶の「核」という「キー技術変数」を類推した。澤木と天野の「ボトルネック」は、どちらも格子定数のギャップの大きい基板上への結晶成長であり、澤木が解決した時の技術変数である結晶の「核」が「キー技術変数」であった。この時、澤木の BP 結晶成長のメカニズムはまだ解明されておらず、そのメカニズムに関わらず効果があったということだけで、結晶の「核」を類推したと考えられる。

GaN の P 型化の事例では、亜鉛ドーピング 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、GaN 結晶中にドーピングした原子を活性化する方法として電子線照射という「キー技術変数」を類推した。この中で、共通となる「ボトルネック」は結晶内の電子状態の活性化であり、LEEBI で結晶内の電子状態を活性化させた電子線照射が「キー技術変数」であった。天野は LEEBI の研究をしていたが、そのメカニズムは当時まだ不明であり、電子状態を活性化させるという効果だけで、電子線照射という技術変数を類推したと言える。

InGaN 混晶の事例では、低温でも少量のガスが分解反応することがあるという「常識の例外」から、アンモニアガスの流量という「キー技術変数」を類推した。この中で、共通となる「ボトルネック」は低温での化学的なガスの分解反応であり、分解反応させるガスの流量が「キー技術変数」であった。この時、低温での化学分解反応のメカニズムは不問として、ガスの流量という技術変数を類推した。

5.7.2 「キー技術変数」を類推するための要件

では、「キー技術変数」を類推するための要件は何であろうか。それは、事例研究とこれまでの議論により、「眼のつけどころ」「メカニズム不問」「信頼する情報」の3つが考えられる。

「眼のつけどころ」とは、「常識の例外」の中で眼をつけるポイントである。これはボトルネックだと考えられる。これを「類似点」として、キー技術変数を類推している。ボトルネックは、「空白のある地図」を確定する過程で明らかになっていく。

「メカニズム不問」とは、ボトルネックの解消へ限定された視点により、メカニズムを度外視することである。これによって、「常識の例外」の背後のメカニズムや、ボトルネック解消のメカニズム、実施の制約に捉われずに、「キー技術変数」を類推できると考えられる。

「信頼する情報」とは、常識の例外の解決方法としての「キー技術変数」への信頼を指す。この情報への信頼がないと、メカニズム不問で解決できたことを信じることができず、解決の鍵だと思えることができない。従って、「常識の例外」は、研究室の先輩といった信頼する技術者の経験、自らの経験、他分野の常識等、信頼を担保できる情報である必要がある。

均一 GaN 結晶成長の事例では、天野は研究室の尊敬する先輩である澤木の実験結果から、キー技術変数を類推した。GaN の P 型化の事例では、天野は自らがインターンで発見した発光強度増大の現象からキー技術変数を類推した。いずれの事例も、信頼のおける情報であるからこそ、解決のためのキー技術変数として類推できたと考えられる。

5.7.3 なぜ「常識の例外」なのか

なぜ、ひらめきのためのキー技術変数は、「常識の例外」から得られるのだろうか。他にキー技術変数を得る経路は無いのだろうか。この疑問に対して、「常識

の例外」以外の方法ではキー技術変数が得にくい理由と、「常識の例外」からキー技術変数を得やすい理由、の2つの理由を考察してみたい。

(1) 「常識の例外」以外の方法ではキー技術変数が得にくい理由

まず、「常識の例外」以外の方法ではキー技術変数が得にくい理由について考察する。キー技術変数は、既存の技術メカニズムや科学理論からの演繹的思考では効果を推論できない技術変数である。このため、キー技術変数を得ることができるのは、偶然に現れる場合と思考により現れる場合があると考えられる。

偶然に現れる場合とは、キー技術変数そのものをふと何の脈絡もなく思い浮かぶ、話している時に他人が言う、本を読んでいる時に目にする、といった場合である。しかしながら、偶然に現れる可能性は極めて低い。そして、何の脈絡もないため、見逃す可能性が高い。

一方、思考により現れる場合が、「常識の例外」からの類推である。キー技術変数は、演繹的な推論からは得られないため、類推で得るしかない。そして、「常識の例外」は類似のボトルネックを持つ成功事例であるから強い脈絡を持っており思考を進めやすく、見逃すことも少ない。従って、「常識の例外」以外の方法ではキー技術変数を得にくいと考えられる。

(2) 「常識の例外」からキー技術変数を得やすい理由

次に、「常識の例外」からキー技術変数を得やすい理由について考察する。キー技術変数は未知の技術メカニズムに基づいており、既存の科学理論ではその技術変数でなぜ問題が解決するのか説明することができないというものである。この未知の技術メカニズムと類似の技術メカニズムによって起こる現象が「常識の例外」である。「常識の例外」は類似の課題を解決した成功事例であるが、同様に既存の科学理論で説明できない技術メカニズムに基づいている。

キー技術変数が「常識の例外」から得られるのは、それぞれが未知の技術メカニズムに基づいていることの共通性によっていると考えられる。この共通性には、構造的な共通性と背後の科学理論の共通性があり得る。

構造的な共通性とは、解決すべき課題と「常識の例外」のそれぞれで未知の技術メカニズムは別物ではあるが、それらの持つボトルネックや技術的な分野が類似していることを指す。ただし、未知の技術メカニズムに関連性がないため、類推した技術変数で課題解決できる可能性は低く、偶然性に頼らざるを得ない。

一方の背後の科学理論の共通性について、「常識の例外」に隠れている未知の技術メカニズムとキー技術変数が基づく未知の技術メカニズムの背後に、未だ解き明かされぬ科学的な共通理論がある場合、「常識の例外」からキー技術変数を得ることができると考えられる。

以上のように考察すると、ひらめきのためのキー技術変数を得る経路として、「常識の例外」から類推することが、最も可能性が高い方法であると考えられる。

5.8 「既存の技術変数間の関係性」と「キー技術変数」の組み合わせ

本節では技術の「ひらめき」の最終段階について詳細を考察する。「空白のある地図」の確定までは長い時間をかけた技術蓄積が必要であった。その後、「常識の例外」の連想を経て「キー技術変数」が類推された。新たに解決方法がひらめくのは、これらの経路から得られた「既存の技術変数間の精密な関係性」と「キー技術変数」が組み合わせられた時である。このプロセスにかかる時間は非常に短時間である。場合によっては1秒もかからず、技術者の頭の中でこれらのプロセスが瞬時に処理される。では、「既存の技術変数間の精密な関係性」と「キー技術変数」の組み合わせとはどんな現象なのであろうか。そして、なぜこれらの組み合わせによって、新しい解決方法がひらめくのであろうか。

5.8.1 「ひらめき」に必要な組み合わせ

技術のブレイクスルーにおいて、「空白のある地図の確定」の後に新たな「キー技術変数」を得ることで「空白」が埋まり、キー技術変数を含めた技術変数間の関係性が全てつながりを持ち、現象のメカニズムの大筋が描ける。これが「ひらめき」である。

既存の技術に基づく実験検証で得られた「空白のある地図」だけでは、新しい解決方法は見いだせない。あくまで既存技術の延長であるためである。一方で、「新たな技術変数」だけでも新しい解決方法は見いだせない。現象のメカニズムを描くには、そのために十分に精密な「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築していることが前提となる。すなわち、「空白のある地図」が確定しないと、「キー技術変数」が現れてもひらめかない。また、「空白のある地図」が確定していても、不適切な技術変数ではひらめかない。「ひらめき」に必要な組み合わせは、「空白のある地図」の確定を前提とした、「既存の技術変数間の精密な関係性」と「キー技術変数」であり、それらが順番に現れることが必要である。

均一 GaN 結晶成長の事例では、GaN 結晶成長や、サファイア基板への AlN のバッファ層形成における技術変数間の精密な関係性が構築された後に、結晶の「核」という「キー技術変数」を得たことで現象のメカニズムを描くことができた。結晶の「核」の話は、GaN や AlN 結晶成長の技術変数間の精密な関係性を描く前に澤木から聞いていたが、その時には何もひらめかなかったことが、その組み合わせと順番という 2 つの重要性を物語っている。

GaN の P 型化の事例では、電子線照射での GaN 発光と、マグネシウムドーピング GaN の結晶成長での技術変数間の精密な関係性が構築された後に、「電子線」という「キー技術変数」を得たことで現象のメカニズムを描くことができた。その前に電子線照射した亜鉛ドーピング GaN が p 型化しないことを確認していたが、その後の電子線照射での GaN 発光特性の掘り下げと、マグネシウムドーピング GaN 結晶成長の膨大な実験の後、改めて電子線照射による p 型化の現象のメカニズムを描けた。このことから、やはりその組み合わせと順番が重要だと言える。

InGaN 混晶の事例では、InN の結晶成長実験での技術変数間の精密な関係性が構築された後に、「アンモニアガスの流量」というキー技術変数を得たことで現象のメカニズムを描くことができた。これも、InN 結晶成長において、基板温度とガス流量を変化させた実験によって、精密な技術変数間の関係性が描けた後に、「アンモニアガス流量」というキー技術変数を得たということが、「ひらめき」のために必要であった。

5.8.2 「組み合わせ」の結果なぜ成功できると思えるのか

では、「既存の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」の結果、「キー技術変数」が「既存の技術変数間の精密な関係性」の中の空白に適切だと思える、すなわち成功できると思えるのはなぜだろうか。

その理由は、①「プラスワン」の技術変数、②「度外視」していた技術変数、の2つだと考えられる。

(1) 「プラスワン」の技術変数

「プラスワン」とは、精密な関係性が構築された既存の技術変数が数多いのに対して、新たに加わるキー技術変数は1つということである。すなわち、既知の多くの技術変数間の精密な関係性が、膨大な数の実験結晶での失敗の繰り返しで構築されているのに対して、新たなキー技術変数はたった1つだけのため、その組み合わせにおいて技術的推論が効きやすいと考えられる。

(2) 「度外視」していた技術変数

もう1つの「度外視」していた技術変数とは何か。これは、既存技術から効果が無いと推測され、他の技術変数との関係性を確認していない技術変数である。

「プラスワン」とはいえ、得られた「キー技術変数」が全くの見ず知らずの変数である場合、技術的推論は難しいであろう。しかし、これを可能にしているのが、「度外視」していた技術変数である。未知であった「キー技術変数」も蓋を開

ればある特定の技術分野の開発で取り扱う技術変数の1つに過ぎない。「常識の例外」からの類推で、該当する技術分野において全くの新規の技術変数が出てくることはほとんどあり得ない。どちらかという、「キー技術変数」は独立変数のような主役の扱いでは無いものの、制御変数として存在は知っているが既存技術での推測によって影響しないと思いこんで「度外視」していた技術変数である。「空白のある地図」の段階では「未知のキー技術変数」であったが、「ひらめき」によって「度外視」していた技術変数が突然脚光を浴びる。出会ってしまえば全く知らないわけではないため、技術的な推論が効きやすいということである。もし、全くの新規の技術変数が出てきた場合、技術的推論が効かなかった場合は、技術の「ひらめき」にはならないであろう。

均一 GaN 結晶成長の事例では、これまでの GaN や AlN のバッファ層を含む結晶成長における技術変数間の精密な関係性に、結晶の「核」という「キー技術変数」を組み合わせ、「AlN の低温バッファ層の上に GaN を成長させる」ことをひらめいた。「核」という技術変数は、GaN 結晶成長の既存の技術変数には無く実験したことも無かったが、基板表面上での様々な結晶成長の様子を実験で観察してメカニズムを考察していたので、「核」を形成すれば GaN の結晶は横方向に成長した後、厚み方向に成長するという現象のメカニズムを描くことができた。

GaN の P 型化の事例では、マグネシウムドーピング GaN の結晶成長での技術変数間の精密な関係性に、「電子線」を組み合わせ、「マグネシウムドーピング GaN に電子線を照射する」ことをひらめいた。天野は NTT でのインターンで、亜鉛ドーピング GaN の電子線照射での活性化現象を掘り下げて多くの実験を行っていたため、活性化エネルギーの低いマグネシウムドーピング GaN に電子線を照射すれば、ドーピングされたマグネシウムが活性化して、p 型の電気特性を得られるという現象のメカニズムを描くことができた。

InGaN 混晶の事例では、InN の結晶成長実験での技術変数間の精密な関係性に、「アンモニアガスの流量」を組み合わせ、「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」ことをひらめいた。アンモニアガスは InN や GaN 結晶成長実験で常に用いていたため、変数の範囲としては桁違いであったであったが、因子としては新規ではなかった。このため、基板温度を変化させた時にアンモニアガスの分解がどのように振る舞うかといったことの技術的推論が効き、InN 結晶成長の現象のメカニズムを描くことができた。

いずれの事例も、既存技術に基づく実験検証で得られた技術変数間の精密な関係性に、常識的には度外視されるであろう「キー技術変数」を組み合わせ、現象のメカニズムを描くことができ、新たな解決方法をひらめいていることがわかった。

5.8.3 「ひらめき」と「思いつき」の違い

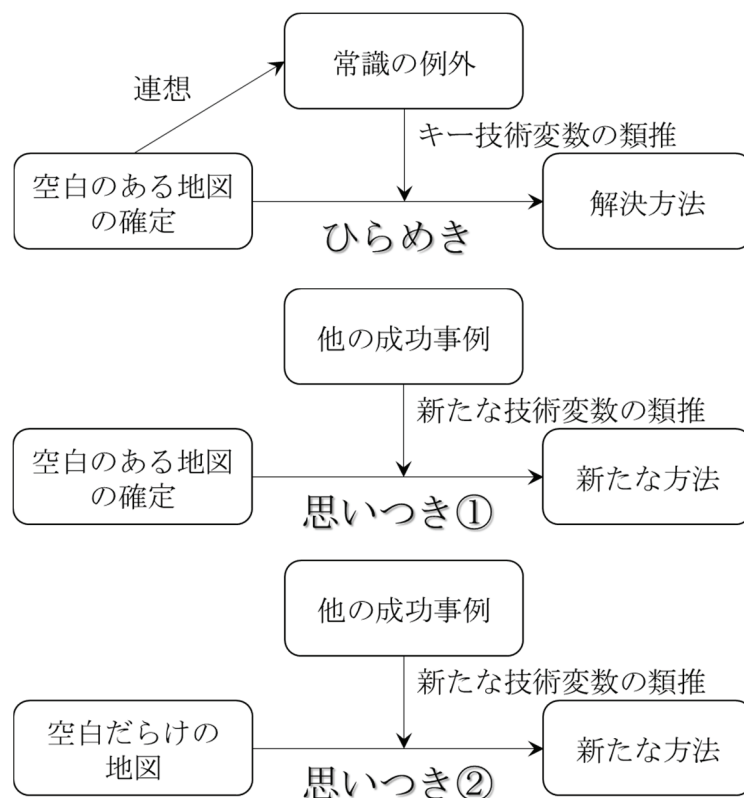
既存技術での行き詰まりの中で、一見「ひらめき」のようで「ひらめき」でないアイデアがあり得る。それは、新しい解決方法を着想したが現象のメカニズムを描けていない場合であり、これを「思いつき (just thought)」と呼ぶことにする。すなわち、技術開発での「思いつき」とは、新たな技術変数を組み合わせ、成功の確信の無い新たな制御方法を考案することである。

「思いつき」の類型は 2 種類あると考えられる。1 つは、「空白のある地図」が確定した状態で、空白を埋められない新たな技術変数による制御方法である。もう 1 つは、「空白のある地図」が確定しない状態で得た、技術変数による新たな制御方法である。

図 5-8 に概念図を示す。「ひらめき」は「空白のある地図の確定」「常識の例外」からのキー技術変数の類推により解決方法を得ている。

これに対して、1 つ目の「思いつき」（図中①）は、「空白のある地図の確定」にも関わらず、技術変数を「常識の例外」では無く他の成功事例から類推したため、単なる新たな方法に過ぎず、解決方法にならない。

2つ目の「思いつき」（図中②）は、「空白のある地図の確定」ができておらず、いわば「空白だらけの地図」に対して、適当な事例からの技術変数を組み合わせて新たな方法を得ているため、これも解決方法にはならない。



（出所）筆者作成。

図 5-8 ひらめきと思いつきの類型

実は、技術開発において、これらの「思いつき」は多く起こり得る。むしろ多くの実験で、既存技術の延長のアイデアに混じって「思いつき」が試される。「思いつき」のアイデアでは現象のメカニズムを描けないため成功の確信は無いが、特に行き詰っている時には祈るような気持ちで実験を行ってしまう。これが実験装置の大掛かりな改造を伴うものだと、時間と投資を無駄にしまい、技術開発の存続にまで影響を与えかねない。

とはいえ、これらの「思いつき」は技術変数間の精密な関係性の構築には一役買うため、むしろ多くの「思いつき」を試行すべきであり、全てを無碍にすることは得策ではないという一面もある。全てが失敗談のため、なかなか文献やインタビューには出てこないが、実は成功の陰には多くの「思いつき」が潜んでいる可能性があり得る。

吉田の GaN 結晶成長での AlN コートサファイア基板のアイデアは、「思いつき」であったと考えられる。このアイデアは、出発点がこれまで開発してきた AlN コートサファイアの活用であり、GaN 結晶成長は格子定数が近いことに由来する「思いつき」であったと考えられる。GaN 結晶成長の行き詰まりの中で AlN コートをひらめく場合と根本的に目的が異なっていて、そこにひらめき感はない。従って、そもそもの AlN とサファイアの格子定数の不整合に起因する結晶欠陥の解消という重要な課題を解決できておらず、結果、GaN の結晶性も改善できなかったと考えられる。

以上、事例研究により「ひらめき」のプロセスとその要件の仮説を導出することができた。しかしながら、これらの概念とその関係性はあくまで青色 LED 材料開発の事例から導出した仮説であり、個々の要件の成立条件や他事例への適用可能性についてさらなる考察をする余地がある。従って、第 6 章では他の事例研究による適用可能性の確認を行う。

5.9 技術の期待試行

5.9.1 「ひらめき」と「期待試行」の関係

前節まで技術の「ひらめき」がどのようにして発生するかについて言及してきた。しかし、ひらめいただけでは技術ブレイクスルーにおける新しい解決方法との「遭遇」はできない。ひらめいた方法を実際に実験で試行することによって、確かに頭の中でひらめいた現象のメカニズムが現実再現され、現物の機能や性能が従来技

術を大幅に凌駕していることを証明しなくては、解決方法との「遭遇」とは言えない。

技術の「期待試行」とは、ひらめいた技術的な解決方法の成功を強く期待して、実際に実験してみようと考え、実行することである。「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に意味がある。

しかし、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。ひらめいた解決方法は、これまでの議論のように既存の技術パラダイムを逸脱した方法であるため、実験材料や装置の準備、そのための時間やお金を投資することについての所属する組織の説得等が必要である。従って、ひらめいた解決方法を試行しようとしても大きな障壁が存在し、簡単にはいかない場合がある。

このため、技術の「ひらめき」を試行するには、新たな解決方法の成功を強く期待できることが必要である。「ひらめき」によって、解決のための現象のメカニズムの大筋を描くことができたため、成功への期待は非常に大きく、試行へのモチベーションはとても高い。「ひらめき」ゆえの「期待試行」と言うことができる。

「ひらめき」によって「期待試行」の際の成功への強い確信は、「自前の理」と「実行可能性」の2つの要件によって裏打ちされていると考えられる。次項より、「自前の理」と「実行可能性」について、それぞれ詳細に言及したい。

5.9.2 「自前の理」

「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と実現性について論理付けされる。「ひらめき」によって解決のための現象のメカニズムの大枠が描けたことで、これまで取り組んでいた技術変数間の精密な関係性と合わせて緻密な論理付けができると、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。

しかし、その論理はあくまで「自前」の論理である。なぜなら、既存の技術や科学理論で説明できない飛躍したアイデアのためである。自分なりに確からしいと思える現象のメカニズムとそれによる解決方法に過ぎず、それらの本当の成否は、試行してみるまでわからない。さらに、確かにその「ひらめき」で解決できることは試行によってすぐにわかるかもしれないが、その背後にある現象のメカニズムは、その後の現象解析の結果を待つ必要があるため、ことによると 10 年、またはそれ以上の時間がかかるかもしれない。

「自前の理」は自分なりの論理であるため、成功を期待し、試行のモチベーションになるという意味で、「期待試行」の大切な必要条件である。しかし、それは他人、特に実験やそのための投資を承認する立場の人を説得するために十分かと言えそうではない。既存の技術や科学理論からは推論できない、技術者本人の想像の部分が必ず存在するためである。このため、「自前の理」は緻密に構成されているにもかかわらず、他人からは「思い込み」と言われ試行の許可が出ないという状況が起こり得る。

均一 GaN 結晶成長の事例では、天野は 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いう「自前の理」を考えた。天野は当初の実験予定をキャンセルしてすぐに実験を行い、その効果を確認した後に赤崎へ報告している。すなわち、ひらめいた解決方法は自分の采配の範疇で実験できる範囲であったため、上司たる赤崎にその試行を相談することなく、実験による確認をすることができた。

GaN の P 型化の事例では、天野は以前に亜鉛ドーピング GaN に電子線照射しても P 型化しなかったにもかかわらず、マグネシウムドーピングであれば亜鉛ドーピングより活性化しやすいことから、電子線照射によって結晶内が活性化して P 型化するという

「自前の理」を考えた。これも当時助手であった天野が、修士学生の鬼頭にすぐに実験を指示して、その効果を確認している。片道 1 時間、電子線照射時間 8 時間という非常に手間のかかる実験であったが、最優先で取り組んだ。電子線照射には豊田合成株式会社の RHEED 装置を借用する必要があったが、共同研究の枠組みとこ

れまでの LEEBI 現象の研究での実績によって、特に面倒な稟議や説得は無かったようである。また、実行にあたっては自分の部下に実験を指示しており、そこに厳密なメカニズムへの言及や実施許可の手続き等は無かったため、すぐに試行できた。

InGaN 結晶成長の事例では、松岡は基板温度が低温ではアンモニアの分解反応量が少なくても、アンモニアガス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。しかしこの実験は既存の装置では実施不可能であり、実験をするためには大規模な実験装置の改造のため、上司の許可が必要であった。早速説得にかかろうとしたが、お金と時間がかかることから、自作の装置で小規模ではあるが原理実証テストを行い、「自前の理」の成功の可能性を裏打ちした¹¹⁴。

以上の事例から、「自前の理」は期待試行の必要条件であり、すぐに実験による確認をしようと思うモチベーションになっているが、一方で実験を行うために他人を説得する必要がある場合、足かせになってしまうことが確認できた。

5.9.3 「実行可能性」

次に、「期待試行」のもう 1 つの必要条件である「実行可能性」について考察する。「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ため、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、①「制御可能な変数であること」、②「設備インフラや材料が世の中にありそうであること」、③「リソースや意思決定の制約が少ないこと」の 3 つだと考えられる。

①制御可能な変数であること

¹¹⁴ 2016 年 2 月 8 日 10:30-13:00 の松岡へのインタビューより。

まず、実験したことがなくても物理学や化学などで想定され得る、または実験装置で制御可能な変数であれば、実行可能と思えるであろう。

均一 GaN 結晶成長の事例では、結晶の「核」を作るために結晶成長温度を下げることや、成長時間を短くして薄膜にすることは、特に目新しくなく制御可能と思えるものであった。

GaN の P 型化の事例では、マグネシウムドーピング GaN 結晶に電子線照射することは、従来の実験の組み合わせであり、簡単に制御可能と考えた。

InGaN 結晶成長の事例では、アンモニアガスの流量を桁違いに増やす必要があったが設備インフラが対応していなかった。しかし、流量を増やすということに関しては、制御可能な変数であると考えられた。

②実験インフラや材料が世の中にありそうであること

次に、実験インフラや素材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、実行可能であると思えるであろう。実験インフラとは、実験を行うにあたって必要な、試作装置・計測装置とそのオペレーション人員・ノウハウのことである。

均一 GaN 結晶成長の事例では、AIN を使用することや想定した成長温度・成長時間に対応した装置インフラが手元にあったため、容易に実行可能であると考えた。

GaN の P 型化の事例では、すでにマグネシウムドーピング GaN を結晶成長させていたことと、電子線照射の実験も LEEBI 研究の実績で豊田合成株式会社の RHEED 装置を借用していたため、実行可能と考えた。

InGaN 結晶成長の事例では、アンモニアガスの流量を増やすための実験インフラが対応していなかったが、流量を増やすには配管を太く、ポンプを大きくすればよく、アンモニアガスの処理も処理装置を大きくすれば可能と考えた。

③リソースや意思決定の制約が小さいこと

予算、マンパワー、実働時間といったリソースや、技術開発のグループや企業の技術開発方針といった意思決定の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。技術のブレイクスルーはどこであってもいい。し

かし、上記の制約には環境要因の影響があり得る。例えば、営利を第一とする企業と、利益よりも新規研究テーマを是とする大学では、リソースや意思決定の閾値が異なる。一般に、企業は投資対効果の閾値が高く意思決定の制約が大きい、意思決定できるとリソースは大きい。一方で大学は、意思決定の制約は小さいが、かけられるリソースも小さい。マクロには、企業と大学はお互い一長一短の関係であるが、ミクロにはその投資の規模に応じて共同研究やアングラ研究などにより、様々な工夫をして、その制約を最小にしている。

均一 GaN 結晶成長の事例では、MOVPE 装置での実験内容の決定は自分で自由に決定できたことと、現状の実験装置のままで実験できるため、実行にあたっての制約は非常に小さかった。

GaN の P 型化の事例では、実験内容は部下も含めて自分の采配で決定できたこと、豊田合成株式会社での電子線照射は共同研究の枠組みがあり費用の問題が発生しなかったこと、大学の研究室なので労働時間の縛りが緩かったことにより、実行にあたっての制約は非常に少なかった。

InGaN 結晶成長の事例では、アンモニアガスの流量を増やすための設備インフラを作るための稟議が必要であり制約は大きかった。しかし、原理検証実験での妥当性の向上により研究所長を説得することで、制約をクリアした。

以上により、3つの事例研究から、「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」が行われることが確認できた。一方で試行にあたっては、逆に「自前の理」と「実行可能性」による障壁もあることがわかった。

5.10 小括

本章では、「ひらめきの期待試行」の成立要件を明らかにすることを目的とした。このため、技術の「ひらめき」と「期待試行」について定義を明らかにした上

で、「ひらめき」の発生プロセスと成立要件、「ひらめき」と「期待試行」の関係性について言及した。

まず、技術の「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」と定義した。そして、「ひらめき」の発生プロセスモデルとして以下の5つを提示した。

- 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。

また、技術の「ひらめき」のために必要な技術蓄積の中身、役割、駆動要件について、「突破点の絞り込み」「空白のある地図の確定」の項で言及した。この結果、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が必要な技術蓄積の中身であり、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かわること」であった。そして、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」の3つであることを提示した。

新たなキー技術変数が得られるプロセスと、既存技術の蓄積との関係について、「常識の例外からの類推」「キー技術変数の類推」「既存技術変数間の精密な関係性とキー技術変数との組み合わせ」の項で言及した。この結果、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」の連想とそこから類推によって得られることを示した。そして、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」が発生することを示した。

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と定義した。「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」には成功への強い確信があり、それは「自前の理」と「実行可能性」の2つの要件によって裏打ちされていることを示した。一方で、それら2つの要件ゆえの試行への障害もあることもわかった。

以上により、技術ブレイクスルーを発生させるための「ひらめきの期待試行」のプロセスモデルの仮説が明らかになり、本章の最初で挙げた以下の3つの問いに答えられたと言える。

- ① 「ひらめきの期待試行」の発生プロセスと成立要件。
- ② 技術の「ひらめき」のために必要な技術蓄積の中身、役割、駆動要件。
- ③ 新たな技術変数が得られるプロセス。既存技術の蓄積との関係。

技術ブレイクスルーを願う技術者は、本章のプロセスモデルと要因を念頭に技術開発を進めることが肝要であろう。しかしながら、あくまで本章で明らかになったプロセスモデルは、青色 LED 半導体技術開発という、物理学を中心とした分厚い科学理論を背景にした無機材料の技術開発における3つの事例研究から導いた仮説にすぎない。

そこで、次章では全く別の事例で仮説の適用可能性を確認することとする。これによって本論文で提示したプロセスモデルの仮説が、青色 LED 半導体技術開発に固有のものでないことを明らかにすることと、新たな含意を得ることとしたい。

第6章 他事例への適用可能性の確認

本章では、青色 LED 半導体材料開発の事例から導出した技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説を、ヘキサアリアルベンゼン（以下 HAB）の有機化学合成技術開発の技術ブレイクスルーの事例に当てはめることで、その仮説の他事例への展開性を確認する。事例研究により得られた仮説の妥当性の検証には限界があることを理解した上で、青色 LED 半導体材料開発に固有の仮説ではなく、少なくとも他の事例に適用できる可能性があることを示すことを本章では目指す。

確認方法として、技術ブレイクスルーという現象の希少さと技術開発プロセスの定量観察の困難さから、定量的な大量観察は困難である。従って、青色 LED 半導体材料開発とは別の事例の詳細を観察することで、プロセスモデルの適用の可能性を確認することとした。

確認に用いる事例は、機能性材料の生成技術の範囲の中で、青色 LED 半導体技術とは異なり、なおかつ偶然に頼りやすいと考えられる技術分野から選択をした。すなわち、背景の科学理論の重厚な物理学を背景とした無機材料を取り扱う半導体技術開発に比べて、有機材料の複雑性や科学理論構築の未熟さゆえに¹¹⁵、偶然に頼る傾向が高いと思われる有機化学合成技術の分野を選択した。そこで技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説が成立することを示すことができれば、本論文で提示した仮説が青色 LED 半導体技術開発に固有のものでないことを明らかにでき、他事例への適用の可能性を示すことが可能と考える。

¹¹⁵ 半導体を構成する無機材料は、原子をイオン結合で 3 次元構造としたものであり、原子の種類や結合のパターンが限られているため、理論深耕が比較的進んでいる。一方、有機材料は炭素原子を骨格とした共有結合の分子鎖が、分子間力で構造化しているため、その分子構造のパターンは構成する原子の種類も考慮すると桁違いに多く複雑である。従って、有機材料は無機材料に比べて、物質生成技術という意味では理論構築も浅く、未知の領域が多く残っている分野と言える（横田健二『高分子を学ぼう』化学同人、p. 80-81 を参考とした）。

6.1 事例の選定と調査

6.1.1 事例の選択理由

仮説検証のための事例として、HAB（ヘキサアリールベンゼン）の有機化学合成技術を選択した。まず、仮説の展開性を確認するために1つの事例を選択した理由は2つある。1つ目は、技術ブレイクスルーという現象の希少さと技術開発プロセスの定量観察の困難さから、定量的な大量観察は困難であることである。もう1つは、本章の目的が他事例への展開性の確認であり、前章までで提示した仮説が青色LED半導体材料開発に固有ではないことを示せばよいためである。

次に、HABの事例選択の妥当性について、以下の3つの価値で説明する。

①革新技術の価値

ベンゼンの構造発表から長年未解決の問題を解決したことによる、革新技術の価値の高さに着目した。現時点ではその経済的な価値は算出できないが、将来の発展性や展開性といった社会的影響の大きさという意味でも価値が高いと考えた。

②研究対象としての価値

青色LED半導体材料開発の事例と異なる分野の技術開発事例として、有機化学合成技術開発の事例を選択した。有機化学合成の分野は、青色LED半導体材料開発が背景とする物理学や無機材料に比べると科学理論の構築が進んでおらず、なおかつ技術変数間の関係性が極めて複雑である。このため、一般的に有機化学合成技術開発では、既存の理論や考え方が確立されていないために「経路依存性」が弱いこと、すなわちやってみないとわからないことが多いためにメカニズムに依らない技術変数の組み合わせで実験を行うこと、により技術変数間の関係性の精密化をしにくいと考えられる。従って、有機化学合成の技術開発では、物理学による無機材料の取り扱いを前提とする半導体材料の技術開発に比べて、「偶然による実験代行」による新しい解決方法との遭遇が起りやすく、「ひらめきの期待試行」が難しい環境の分野と考えられる。そのような環境の中であっても、HAB化学合成の事例は、「ひらめきの期待試行」による技術ブレイクスルーが起

こったと考えられ、仮説の展開性を確認するために高い価値がある事例と言える。

③必然による飛躍

HAB 化学合成は、試行錯誤の中での偶然ではなく、技術者が既存技術の開発をつきつめた結果、ひらめきを得て試行したことで技術ブレイクスルーに成功した事例である。白川の導電性高分子のように偶然合成できるといった事例もある中で、必然の結果としての飛躍の事例が公になっている例は稀有であり価値が高い。

6.1.2 事例調査の方法

事例研究において、青色 LED 半導体技術開発と同様に、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 つの原則である、「複数の証拠源」「公式の証拠の集合」「証拠の連鎖」に従った。

HAB 化学合成技術開発の事例は情報が 2015 年と新しい事例であり、オープンかつ新鮮で記憶の喪失、編集が少ない。また、論文、大学広報、業界雑誌で、本人のインタビュー記事を含めて多く公表されていること、行為主体が存命でインタビューを行うことで、「複数の証拠源」「公式の証拠の集合」の要件を満たしており、詳細で正確な情報を収集しやすいと考えた。

さらに、公開論文と開発者を中心として、証拠間の関連性が強いため、リサーチクエスチョン、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しやすい。

実際の HAB の化学合成技術開発の事例調査は、公表された論文、文献、HP での公開情報により実施した。また、実際に技術開発を行った技術者へのインタビューを、名古屋大学の伊丹健一郎教授と、名古屋大学大学院博士後期課程の鈴木真氏に行なった。

6.2 多置換ベンゼン問題

「多置換ベンゼン問題¹¹⁶」とは、ベンゼン¹¹⁷の水素基を望みの置換基に置き換えて、様々な化学構造を意のままに作り分ける技術の開発への取り組みである。これは、ケクレがベンゼンの構造に関する論文を発表した 1865 年以来 150 年近くたっても長年解決されず、化学の発展を支える最重要課題の一つであった。多くの科学者がこの問題を解決しようと試みたが、「莫大な置換基の組み合わせが存在すること」「化学合成技術の未熟さ」によって、未解決であった。もし多置換ベンゼン問題が解決して、自由に合成できた場合、理論上、10 種類の置換基であれば 8 万以上、50 種類の置換基であれば 13 億種類以上の、様々な化学的・物理的性質を持った HAB（ヘキサアリールベンゼン）を生成可能で、新たな機能性素材を生み出す可能性を拓げる、非常に価値の高い取り組みであった。

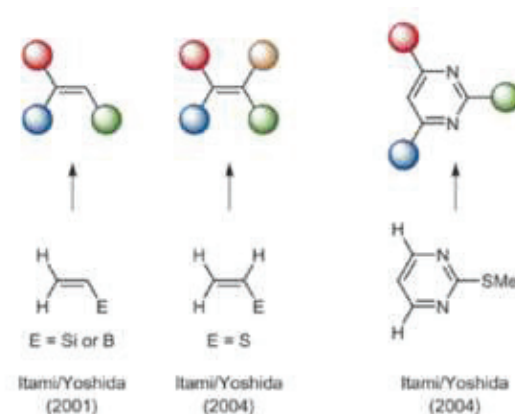
伊丹健一郎（名古屋大学教授）は、有機化学合成技術の専門家として HAB の実現を夢見ていた¹¹⁸。そこで、独自の「プログラム合成法」¹¹⁹を用いて、徐々に炭素分子の数が多き有機分子の合成方法を確立していった（図 6-1）。2005 年には、メトキシベンゼンの C-H 結合を、クロスカップリング反応で所望の有機分子に自在に変えて、HAB を作ろうとした。しかし、ベンゼンの対称性の高さ故に合成に苦戦し、2007 年に一時撤退した。

¹¹⁶ 名古屋大学トランスフォーマティブ生命化学研究所 HP 研究ハイライト「置換ベンゼンを意のままにつくる」（<http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp/ja/research/2015/01/Itami-HAB.php> 2017/2/8 取得）より。

¹¹⁷ ベンゼンとは、ベンゼン環と呼ばれる 6 角形に結合した炭素原子の外側に、水素原子が結びついた構造を持つ化学化合物で、1825 年にファラデーが発見してから 190 年あまりとなる。ベンゼン環の周りの水素原子を様々な原子、分子に置き換えると、医薬、エレクトロニクス、を始めとしたあらゆる産業分野において様々な機能性を発現する材料となるため、産業上重要な素材である（<http://toyokeizai.net/articles/-/59006> 2015/11/25 取得より）。

¹¹⁸ 2016 年 11 月 25 日 10:30-11:30 の伊丹健一郎教授へのインタビューより。

¹¹⁹ 「プログラム合成法」とは、ある化学合成スキームで構造異性体の全てを作ることができるプログラム化された化学合成法である。従来の一品一様の化学合成法に対して、その応用範囲の広さから合成化学の決定版と言われる（http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/public/nu_research_ja/highlights/detail/0002837.html 2015/11/25 取得より）。



(出所) 名古屋大 ITbM、学術研究・産学官連携推進本部 HP¹²⁰より。

図 6-1 多置換有機分子のプログラム合成

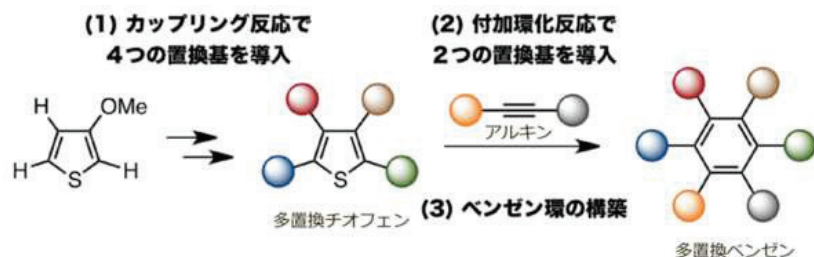
2009 年に、独自の「C-H カップリング法」¹²¹を開発することで、テトラアリアルチオフェンの自在合成に成功した。その後、2012 年に伊丹研究室の山口潤一郎（当時名古屋大学准教授）がテトラアリアルチオフェンにジアリアルアセチレンを合成すると、HAB を合成できることを提案した。図 6-2 に示すように、チオフェンにカップリング反応によって 4 つの置換基を導入してテトラアリアル（4 置換）チオフェンを合成し、付加環化反応でアルキンの 2 つの置換基を導入することで、6 置換ベンゼンを合成する方法である。

¹²⁰ ハイライト論文「若手の力で、前人未到のベンゼン分子誕生」より抜粋。

(http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/public/nu_research_ja/highlights/detail/0002837.html 2017/5/8 取得)

¹²¹ ベンゼン類の合成法として有名なのは、2010 年にノーベル賞を受賞した鈴木章名誉教授らが確立した「鈴木-宮浦カップリング法」だが、伊丹らは不活性な C-H 結合を切断して新たな結合を生成する「C-H カップリング法」を開発した

(<http://www.chem-station.com/odos/2009/09/c-h-catalytic-c-h-activation.html> 2017/7/8 取得より)。



(出所) 名古屋大 ITbM、学術研究・産学官連携推進本部 HP¹²²より。

図 6-2 テトラアリールチオフエンとジアリールアセチレンによる HAB 合成

山口は HAB を合成するのに、対称性の高い炭素原子を 6 つ持つベンゼンよりも、4 つの炭素原子を持つテトラアリールチオフエンと 2 つの炭素原子を持つジアリールアセチレンを合成した方が、官能基の位置を自在に制御できると考えた。山口は、天然物合成の専門家であり、Dragmacidin D の全合成¹²³の経験で、チオフエン（5 員環）の環を壊してベンゼン（6 員環）を合成する技術を持っていたため、CH アリール化が比較的簡単なチオフエンをベンゼン化する方法を考案した。

アイデアを聞いた伊丹は、すぐさまその価値と同時に、合わせ持つ大きな欠点を理解した。すなわち、同合成ルートで 6 置換ベンゼン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。当初伊丹はやるべきか悩んだが、未だ見ぬ 6 置換ベンゼンを合成する最短の道だとの考えに至り、開発方針を転換して同研究室の鈴木真（当時名古屋大学大学院修士課程）にテーマを与えた。その後、2013 年 12 月、5 つの異なる置換基を有する HAB の

¹²² ハイライト論文「若手の力で、前人未到のベンゼン分子誕生」より抜粋。

(http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/public/nu_research_ja/highlights/detail/0002837.html 2017/5/8 取得)

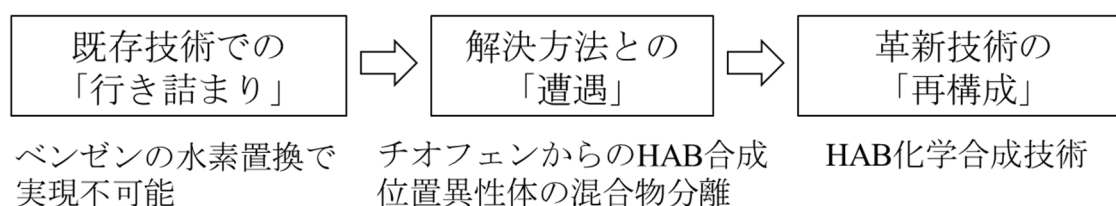
¹²³ Dragmacidin D とは、海洋天然物でありパーキンソン病、アルツハイマー病のリード化合物として着目されている。伊丹らは、同化合物の全ての炭素間結合を独自の芳香環直接連結反応で構築することで、迅速合成を達成している (**Synthesis of Dragmacidin D via Direct C-H Couplings**, Debashis Mandal, Atsushi D. Yamaguchi, Junichiro Yamaguchi, Kenichiro Itami, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, in press.)。

(<http://synth.chem.nagoya-u.ac.jp/wordpress/publication/synthesis-of-dragmacidin-d-via-direct-c-h-couplings> 2017/7/9 取得より)。

合成に成功。続いて 2014 年 7 月に 6 つの異なる置換基を有する HAB の合成に成功した¹²⁴。

6.3 HAB 化学合成の技術ブレイクスルー

HAB 化学合成技術のブレイクスルーは、「チオフェンからの HAB 合成と位置異性体の混合物分離」だと考えられる (図 6-3)。



(出所) 筆者作成。

図 6-3 HAB 化学合成の技術ブレイクスルー

従来、ベンゼンの水素原子を任意の置換基に置換する方法が常識であったが、長年 HAB を実現することができなかった。しかし、チオフェンからの合成という新たな方法により HAB を実現できた。従って、「チオフェンからの HAB 合成」は 1 つ目の技術ブレイクスルーの重要なポイントといえそうである。

「チオフェンからの HAB 合成」だけでは位置異性体が等量合成されるため、完全に選択的な HAB を合成することはできなかった。このため「位置異性体の混合物分離」が突破点となったが、従来の混合物分離の常識であるクロマトグラフィー法ではどうしても分離できなかった。ところが、鈴木真 (当時名古屋大学大学院修士課程) が、通常は等量の混合物の分離には用いられない「再結晶法」による位置異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。従って、「位置異

¹²⁴ "Synthesis and characterization of hexaarylbenzenes with five or six different substituents enabled by programmed synthesis" by Shin Suzuki, Yasutomo Segawa, Kenichiro Itami* and Junichiro Yamaguchi*, Nature Chemistry (2015). 2017/7/9 取得より。

性体の混合物分離」は、HAB 化学合成の 2 つ目の技術ブレイクスルーの重要なポイントと考えられる。

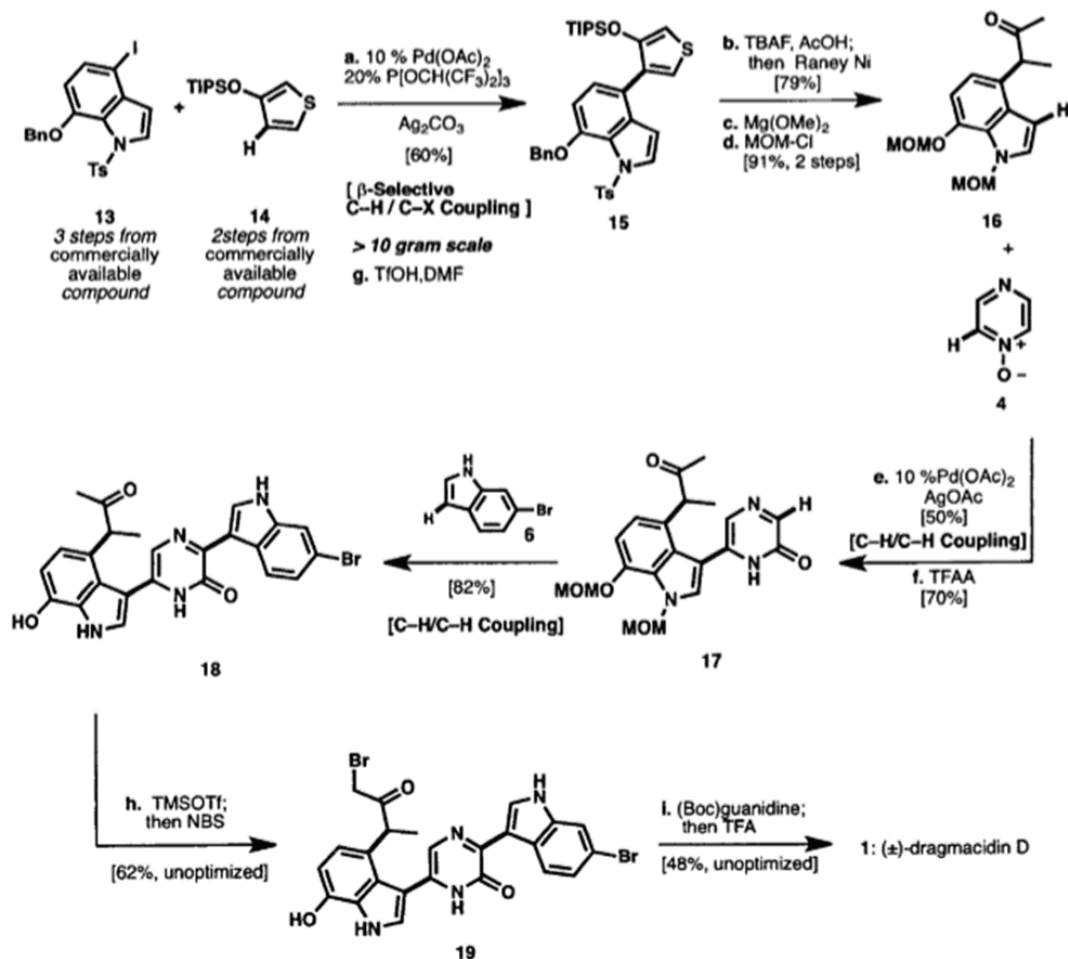
6.4 チオフェンからの HAB 合成

伊丹は、多様な分子構造を意のままに合成できる、「プログラム合成法」を開発し、HAB 合成への取り組みの前に、ベンゼンよりも炭素数の少ないアルケン、チオフェン、チアゾールといった有機分子への任意の置換基の合成法を確立してきた。このため、HAB の合成でも従来と同様に、メトキシベンゼンの C-H を自在に変えて、最後にクロスカップリング反応合成を試行錯誤したが、なかなかうまくいかず、2007 年に一時撤退を余儀なくされた。

2012 年、同研究室の山口が 4 つの炭素原子を持つ多置換チオフェン（2009 年に実現）に、2 つの炭素原子を持つアルキンを反応させれば、HAB を合成できることを提案した。山口は、天然物や医薬品の合成が専門であり、Dragmacidin D の全合成¹²⁵の経験から（図 6-4）、炭素原子の足し合わせでベンゼン構造を合成することに長けていた。

¹²⁵ 山口ら（2011）『C-H アリール化反応を駆使した dragmacidin D の全合成』天然有機化合物討論会講演要旨集（53）, 265-270, 2011-09-02, p 268 より
（<http://ci.nii.ac.jp/els/contents110009986546.pdf?id=ART0010542805> 2017/7/8 取得）。

Scheme 3. Synthesis of dragmacidin D (1).



(出所) 山口 (2011) 『C-H アリール化反応を駆使した dragmacidin D の全合成』より。

図 6-4 Dragmacidin D の全合成ルート

山口は、当時を振り返って以下のように語っている。

「チオフェンは有機導電体など機能性分子によく出てくる骨格ですが、合成屋である自分には、シンプルに 4 炭素のユニットに見えていました。これを、2 炭素のユニットと Diels-Alder 反応で結合させればベンゼン環になる、という単純な発想です。チオフェンそのままでは、Diels-Alder 反応を受けつけないのは常識です。ただ僕は、このような芳香環を壊すこともテーマとしていましたので、チオフェン環を酸化して S-オキシドにすることで芳香族性をなくし、ジエンとして反応

させる着想はすぐに出てきました。これをジアリールアセチレンと一緒に加熱すると Diels-Alder 反応が進行し、一酸化硫黄の脱離を伴って HAB の骨格が出来上がります。」¹²⁶

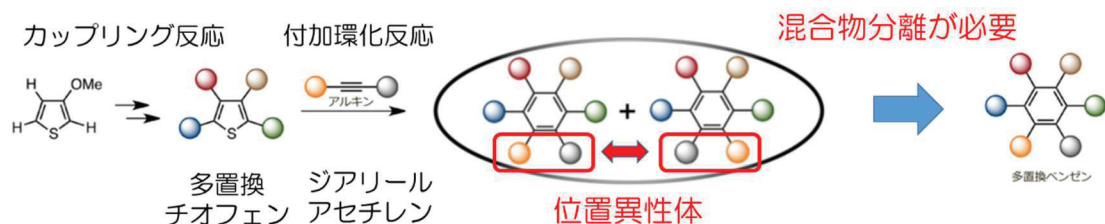
当初この山口の案に伊丹が難色を示したのはなぜか。それは、これまでベンゼン環の水素原子を所望の有機分子に置換することで、直接望みの HAB を得ることを目指していたため、位置異性体が等量合成されるという路線変更に違和感を持ったためである。しかし、これまでのクロスカップリング法によるベンゼンの水素原子の置換は、その対称性ゆえに困難を極めていたのに対し、この山口の提案であれば、位置異性体が生まれるとはいえ HAB を合成することができると思い直した。すなわち、課題の突破点を「ベンゼンの水素原子の置換」から「位置異性体の分離」へ再選択したと言える。

そこで伊丹はすぐに当時学部学生であった鈴木にこのテーマを与えた。実際に実験を行ったところ、すぐにうまく合成できて、HAB の位置異性体を得られることを確認できた。

6.5 位置異性体の混合物分離

4つの炭素原子を持つテトラアリールチオフェンと2つの炭素原子を持つジアリールアセチレンを合成すると、2つの位置異性体の混合物が得られる。しかしながら、これを選択的に分離できないと HAB を合成したことにならない（図 6-5）。

¹²⁶ Nature Chemistry 7 227–233 (2015) より抜粋。(http://www.natureasia.com/ja-jp/nchem/interview/contents/1 : 2017/7/8 取得)



(出所) 名古屋大 ITbM、学術研究・産学官連携推進本部 HP¹²⁷より筆者作成。

図 6-5 位置異性体の混合物合成と分離

ところが、通常芳香族の異性体分離に用いられるクロマトグラフィー法では、溶媒との親和性に差が無かったためどうしても分離できなかった。溶媒や HAB の置換基の組み合わせを考えられる限り変更して、位置異性体間の溶媒との親和性を制御できないかと約半年間にわたり試行錯誤したがうまくいかなかった。大学院修士課程の学生であった鈴木は当初就職を希望していたため半年間就職活動を行ったが、何とか解決したいと思っていたという¹²⁸。

一般的に有機化学合成のゴールは、出来上がった結晶の構造決定である。異性体を分離できていなかったが、何とか構造を見たいという気持ちが強かった。鈴木は当時を振り返り、次のように述べている。

「分離手段がなく構造決定を行うことができない中、なんとかして構造を決めないと、という思いがありました。X 線結晶構造解析では、純度の高い単結晶 1 粒があれば、構造を決定することが可能です。1 粒の単結晶が、片方の異性体から生成しているかどうか分かれば、構造決定の突破口になると考えました。」

そこである日、X 線構造解析のための純度の高い結晶が欲しいという思いから、パスツールの鏡像発見のエピソードを「連想」し、再結晶によって分離できるので

¹²⁷ ハイライト論文「若手の力で、前人未到のベンゼン分子誕生」より抜粋。
(http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/public/nu_research_ja/highlights/detail/0002837.html
2017/5/8 取得)

¹²⁸ 2016 年 11 月 25 日 11:30-12:30 の鈴木へのインタビューより。

はないかとひらめいた。パスツールのエピソードとは、酒石酸に2種類の鏡像構造の違いがあることを、結晶を顕微鏡で見ることで発見したというものである。

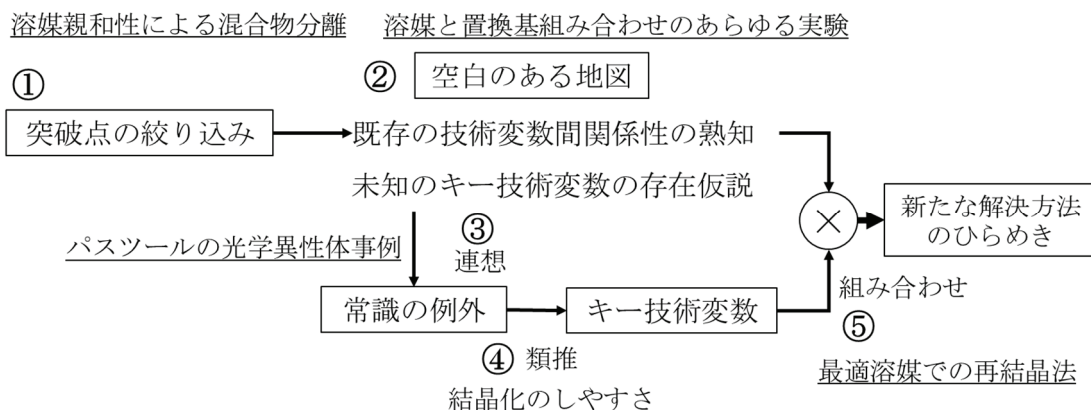
芳香族の等量の混合物分離には、再結晶を用いないのが常識であった。しかし、パスツールが酒石酸の光学異性体を再結晶で分離することができたことから、HABの異性体混合溶液を再結晶すると構造の違いによって分離できるはずと、「結晶化のしやすさ」という「キー技術変数」を「類推」したと考えられる。

早速、HABを最適な溶媒を用いて再結晶し、NMR（核磁気共鳴）で成分分析したところ、2つの位置異性体の含有率に差があることがわかった。このため、再結晶を繰り返すことで、高濃度の位置異性体を選択的に分離できるようになった。

実は再結晶法で混合物を分離できたものの、肝心のX線結晶構造解析はHABの分子対称性によりできなかった。このため、その後再結晶法での成功をヒントに目印の分子を合成することでの分子対称性を回避してX線結晶構造解析を可能にしたと同時に、位置異性体の混合物の分離にも成功した。鈴木は、パスツールのエピソードからの再結晶法のひらめきが無ければ、この成功は無かったと述べている¹²⁹。

上記事例研究の結果により、HABの化学合成技術開発における「位置異性体の混合物分離」というブレイクスルーは、異性体分離方法への「突破点の絞り込み」、既存技術に基づくあらゆる異性体分離手法を実験することによる「空白のある地図」の確定、パスツールのエピソードの連想と結晶化のしやすさという「キー技術変数」の類推により、再結晶法による混合物分離という「ひらめき」を得た結果実現したと言えそうである（図6-6）。

¹²⁹ 2016年11月25日11:30-12:30の鈴木へのインタビューより。



(出所) 筆者作成。

図 6-6 技術のひらめきモデルへの適用 HAB 位置異性体の混合物分離

6.6 HAB 事例研究における「ひらめきの期待試行」

有機化学合成技術開発の特徴は、1つの現象に関わる技術変数の関係性が極めて複雑であり、バックグラウンドになる科学理論の解明が物理学に比べると遅れていることである。このため、有機化学合成の技術開発では、既存の理論や考え方が確立されていないことによって、それらへの「経路依存性」が弱く、メカニズムに依らない“絨毯爆撃”による実験、すなわち思いつきの技術変数の組み合わせを次々と確認していくような実験の進め方をせざるを得ない傾向があると考えられる。また、新たな技術変数や知見を得るためには、複雑さ故の演繹的思考のしにくさと技術メカニズムの希薄さから、“出たところ勝負”“偶然頼み”になりやすく、技術変数間関係性がなかなか精密化しにくいと言える。

しかし、HAB の事例では、有機化学合成技術の分野でも青色 LED 材料開発の事例と同様に、技術ブレイクスルーが「ひらめきの期待試行」による「解決方法との遭遇」によって起こり得そうであることがわかった。

そこで、HAB の「位置異性体の混合物分離」の事例における「ひらめきの期待試行」のプロセスモデルの概念についてさらに詳細を整理して、仮説の適用可能性を確認したい。

6.6.1 HAB 事例の「突破点の絞り込み」と「空白のある地図の確定」

(1) HAB 事例の「突破点の絞り込み」

技術のひらめきを得るための最初のプロセスは「突破点の絞り込み」である。テトラアリアルチオフェンにジアリアルアセチレンを合成すると HAB が合成できるというアイデアには大きな課題が存在した。それが「位置異性体の混合物分離」である。伊丹はすぐにそこに気づいたが、これを突破点と考えた。すなわち、メトキシベンゼンの C-H 置換の課題を見切り、テトラアリアルチオフェンへのジアリアルアセチレン合成という課題へ再選択をした上で、下位課題として位置異性体の混合物分離を設定し、そこを突破点に洗練した。再選択への障害という観点では、技術的方法や専門性による経路依存により、メトキシベンゼンの C-H 置換方法を掘り下げていたため、外から来た山口の提案に伊丹が一旦難色を示した。しかし、すでに現物を作製する中で、多くの解決すべき課題を目の当たりにしていたため、見事に見切りをつけて、再選択することができた。そして、鈴木の研究テーマに設定し、クロマトグラフィーを中心とした混合物分離に集中した。このように、時間をかけて突破点を洗練し絞り込んだことが、解決のために大切であったと考えられる。

(2) HAB 事例の「空白のある地図の確定」

鈴木は、位置異性体を分離するため、既存の方法としてクロマトグラフィーを用いて、溶媒との親和性をコントロールする実験を半年にわたって徹底的に行ったが、うまくいかなかった。この時、溶媒の種類、置換基の種類と HAB の置換位置といった既存技術変数の関係性が精密化された。鈴木は、実験における試作、計測、評価を全て自分自身の手で行い、実観察、仮説メカニズム構築、1人3役を地で行っていた。そして、クロマトグラフィーによる分離の実験をやりきり、技術軌道の果てに到達していた。しかし、実観察の中で分離には至らないものの、何らかの技術変数でわずかな親和性の差を作ることはできるはずだと考えていた。

このように、有機化学合成分野の技術開発においても、青色 LED 半導体材料開

発と同様に、「突破点の絞り込み」の後「空白のある地図の確定」に至るということが技術のひらめきのために必要そうであることがわかった。

6.6.2 HAB 事例の「常識の例外の連想」と「キー技術変数の類推」

(1) HAB 事例の「常識の例外の連想」

鈴木が連想した「常識の例外」は、パスツールの鏡像発見のエピソードである。パスツールは酒石酸の構造異性体を結晶化することで分離した。ベンゼンの化合物である芳香族の等量の混合物分離には通常用いられないことから、これが「常識の例外」となった。これは、化学を学んだものであれば誰もが知っている情報だが、クロマトグラフィーでの解決に集中していた鈴木が、就職活動期間に研究から離れたことで眼を外に向けることができ、連想することができたと言える。

鈴木がこの「常識の例外」を連想した時のキーワードは「結晶」である。この時の鈴木にとって、論文を書くために結晶の構造を知る事が「最大関心事」であった。そして、「結晶」は汎用性のある専門用語であり、適度な抽象度であった。さらに、これは鈴木独自のオリジナルな問題意識でありキーワードであった。また、連想のきっかけは、ある時 X 線構造解析にはほんの少しでも結晶が欲しいと思ったことであった。

(2) HAB 事例の「キー技術変数の類推」

「常識の例外」から類推した「キー技術変数」は、「結晶化のしやすさ」である。類推に必要である共通の「ボトルネック」は、「結晶の分離」であった。パスツールは鏡像異性体の結晶分離、鈴木は位置異性体の結晶分離である。しかし、化学的なメカニズムからは、鏡像異性体と位置異性体の分離に共通性はなく、同じ結晶化による方法で分離できるとは言えなかった。しかし、鈴木は結晶の分離というボトルネックの共通性に眼をつけ、背後のメカニズムを問わずに、しかし高名な科学者の有名な実験結果を信頼して、「結晶化のしやすさ」というキー技術変数を類推したのだと言える。

このように、有機化学合成の分野であっても、「常識の例外」の連想と、そこから「キー技術変数」を類推するための要件は、前章で示した青色 LED 半導体材料開発の要件と共通でありそうである。

6.6.3 期待試行

鈴木はパスツールの事例からの類推で再結晶法を試し始めた時、同僚にそんなことをやっても意味がないとからかわれたという。新しいことは非常識に見え、時として障害が現れ、試行を妨げる場合があり得る。しかし、自分なりの自前の理があったため、人の意見に流されず、結果として成功を手にした。周りが何と言おうと、自分がひらめいたのであれば、自前の理に従い検証を進めることが大切であったことがわかる。

鈴木が結晶化の実験を行うことは極めて簡単であった。すなわち実行可能性の要件については、ひらめいた技術変数は実験で制御可能であり、設備インフラや材料は手元にあり、リソースや意思決定の制約は無く、自分が試行しようと思えばすぐに試行できる環境にあった。

以上により、本章において、青色 LED 半導体材料の技術開発事例から導いた技術ブレイクスルーにおける仮説プロセスモデルを、異なる分野である有機化学合成の技術開発の事例においても、適用できそうな事例があることを確認できた。このことから、本研究における技術ブレイクスルーの仮説プロセスモデルは、他の事例への適用可能性があると言えそうである。

6.7 小括

本章では、前章までで導出した技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説の適用可能性を確認することを主な目的とした。すなわち、HAB の有機化学合成技術開発の事例にプロセスモデルが当てはまることを確認することによって、本論文で提示したプロセスモデルの仮説が青色 LED 半導体技術開発に固有のものでないこと

を示すことを目指した。

その結果、無機材料と比べると背景にある科学理論の構築が進んでおらず、技術変数間の関係性が極めて複雑で精密化しにくい有機材料の化学合成の分野においても、青色 LED 半導体材料開発の事例と同様に、技術ブレイクスルーが「ひらめきの期待試行」により発生する場合があることを確認できた。また、HAB における技術ブレイクスルーの事例は、前章で提示した「ひらめきの期待試行」の仮説モデルで説明できることを確認できた。

さらに、技術変数間関係性を精密化しにくい有機化学合成分野では、突破点の洗練が重要であることや、精密化しにくいがゆえに精密化に没頭しやすいことから、いかに「外」に眼をむけてキー技術変数をつかむのかが重要であるという含意を得られた。また、周囲の反対を乗り越えて期待試行を進める上で、「自前の理」を貫くことの重要性も、インタビューから明らかになった。

本章までの議論で、行為主体である技術者が技術ブレイクスルーを実現するためのプロセスモデルの仮説が得られたことから、次章では技術開発マネジメントに視点を変えて、技術ブレイクスルーを実現するための示唆について考察する。

第7章 技術開発マネジメントへの示唆

第1章で述べたように、本論文の目的は、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、を考察することによって、技術ブレイクスルーの構造を明らかにすることである。

前章までの先行研究、事例研究、考察によって、行為主体である技術者にとって技術ブレイクスルーはどのようなプロセスを経て実現し、そのための要件が何かについて明らかにしてきた。同時に実際の技術開発の現場において、技術者本人が陥りやすい障害についても明らかになった。従って、技術ブレイクスルーを実現するために、行為主体である技術者本人の取り組みが重要であるのと同時に、技術者が適切なプロセスを経て要件を満たすように、技術開発の管理者がどのようなマネジメントをすべきかという観点も重要なポイントであると考えられる。

そこで、本章では技術開発マネジメントに焦点を当てて、技術ブレイクスルーを実現する要件を満たすための示唆を考察する。行為主体である技術者本人だけでなく、技術開発のマネジメントがどうあるべきかを明らかにすることによって、技術ブレイクスルーをなおいっそう実現しやすくすることができると考えるからである。

しかしながら、技術開発マネジメントといってもその言葉の表す範囲は非常に広範囲である。そこで本論文では、技術開発において技術ブレイクスルーを実現するにあたって、管理者が技術者に対して、技術開発の状況に応じてどのような意思決定や指導を行えば良いかについて考察する。

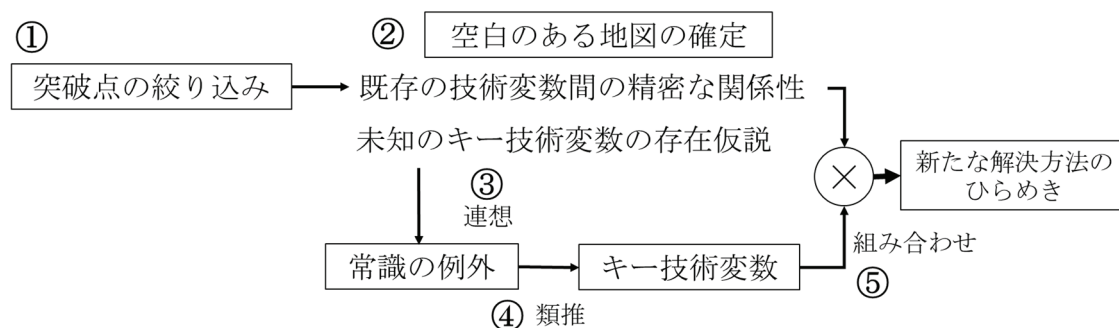
7.1 5つの示唆

技術ブレイクスルーを実現させるためのひらめきの期待試行、すなわち技術者が新しい解決方法をひらめき、そのアイデアが正しいか実際に試行して確認することを実施しやすいように、技術者の技術開発行為をマネジメントすることが必要であ

る。なぜなら、現場の技術者本人が技術開発プロセス全体の中のどの段階にいるかを知り、何をやるべきかを客観的に判断することは難しいからである。明確な技術開発の判断指針というものが存在しない以上、技術者本人は個人的な経験と知識に基づいて技術開発の判断を行うため、掘り下げるべきところを他の方法へ変更したり、飛躍すべきタイミングにもかかわらず既存技術にこだわったりしてしまう。なぜなら、新しい解決方法をひらめくためには、第5章で言及してきたように既存技術の深耕と外からの技術変数獲得のバランスとタイミングが大切だが難しく、どうしても判断を誤りやすくなるためである。従って、技術ブレイクスルーを行為主体である技術者本人だけで実現するのは至難の技であり、その実現可能性は大きく損なわれると考えられるため、適切な技術開発のマネジメントについて考察する必要がある。

では、「ひらめきの期待試行」を行うために、どのようなマネジメントをすることが大切なのだろうか。この疑問に応えるため、技術者の「ひらめきの期待試行」のプロセスと対応させて、技術開発マネジメントへの示唆を考察した。

まず、技術の「ひらめき」を実現するために、既存技術での行き詰まりにおいて突破点を絞り込み空白のある地図を確定させるという技術蓄積と、常識の例外の連想とキー技術変数の類推という飛躍を、どのようにマネジメントするかが大切である。そこで、あらためて図7-1に5章で提示した技術の「ひらめき」のプロセスモデルを示し、内容を再確認する。



(出所) 筆者作成。

図 7-1 技術のひらめきモデル (図 5-2 の再掲)

①「突破点の絞り込み」の結果、“既存の技術変数間の精密な関係性”が構築され、これによって“未知のキー技術変数の存在仮説”が立つ。これが②「空白のある地図の確定」である。“未知のキー技術変数の存在仮説”によって、③「常識の例外」が「連想」され、④「キー技術変数」が「類推」される。その結果、⑤「“既存の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」によって、新たな解決方法がひらめく。

すなわち、技術者は解決方法をひらめくために、「突破点の絞り込み」の後に「空白のある地図」を確定させること、「常識の例外」を知ること、その後「連想、類推、組み合わせ」が起こること、の全てを満たす必要がある。これらの概念は1つも欠けてはならず、なおかつその順番が大切である。

さらに「ひらめき」がこれまで到達できなかった技術的目標を満たせる解決方法であることを確認するには、「ひらめき」の後に「期待試行」、すなわちひらめきによる成功を確信して実際に試行して成否を確認することが必要である。

従って、技術者の「ひらめきの期待試行」のためには、そのプロセスを構成するそれぞれの要件を実行させることと、その順序をマネジメントすることが大切である。このため本章では、「ひらめきの期待試行」のためのそれぞれの要件について、技術開発マネジメントへの示唆を提示する（図 7-2）。

技術者による「ひらめきの期待試行」		技術開発マネジメント
「ひらめき」	「突破点の絞り込み」	行き詰まりでの「原点返り」
	「空白のある地図」	既存技術を「徹底的に掘り下げる」
	「常識の例外」	「外の空気」を吸わせる
	「連想」「類推」「組み合わせ」	「新参者」に任せる
「期待試行」		「ひらめきの試行」を許容する

（出所）筆者作成。

図 7-2 技術開発マネジメントへの示唆

①「突破点の絞り込み」

突破点を絞り込むには、“行き詰まりでの「原点返り」”が必要である。既存技術で限界突破できない行き詰まりの状態の中で、技術者が客観的に突破点を絞り込むのは非常に難しいため、技術開発マネジメントがリードすることが大切だと考えられる。

②「空白のある地図」の確定

「空白のある地図」を確定するには、既存技術変数間の精密な関係性を構築する必要があるが、技術者には様々な障害が存在するため、“既存技術を「徹底的に掘り下げる」”ためには、その障害を理解した上で技術者をマネジメントすることが重要である。

③「常識の例外」

「常識の例外」は出会わないことには連想も類推もできない。このため、技術者が「常識の例外」に出会いやすい環境とタイミングを与えることがマネジメントの仕事であり、それが“「外の空気」を吸わせる”ことである。

④「連想、類推、組み合わせ」

既存の技術変数間の精密な関係性の構築と、新しい技術変数の獲得を両立させるには、“「新参者」に任せる”ことが有効である。

⑤「期待試行」

技術者が成功を確信しても、管理者には納得がいかないのが「技術のひらめき」の「期待試行」の難しい問題である。技術開発のマネジメントは“「ひらめきの試行」を許容する”ためのポイントを知って判断する必要がある。

以下の節で、それぞれの示唆について、その内容の詳細を考察していく。

7.2 行き詰まりでの「原点返り」

技術開発での行き詰まりから脱出し新たな解決方法に遭遇するためにまず実施すべきことは、「突破点の絞り込み」であることを第5章で示した。ここで、これまでの技術開発を振り返り、本来の目的と本質課題を改めて腹に落とすことが大切であ

る。これが、行き詰まりでの「原点返り」である。行き詰まりにおける適切な突破点の選択とは、これまでの路線とは異なる路線の再選択に他ならない。そこで、技術者にとって障害になるのは経路依存性であることはすでに第5章で述べた。すなわち、目の前の実験に夢中になり過去の積み上げにこだわりがちな技術者に対して、マネジメントは一步引いた視点を持ち、そもそもの目的の再確認と、そのために解決すべき突破点を考える必要がある。

赤崎は、松下電器で HVPE 法による MIS 型青色 LED の試作品を作るところまで成し遂げたが、輝度が低く全く売れないこと、安定して作れないという問題があった。そこで、pn 型を作るという本来の目的に「原点返り」をして、MOVPE 法でサファイア基板上に GaN 結晶成長させるという突破点に考え至った。

「原点返り」で行うべきことは、GaN の事例研究によると、それまで作りあげてきて一定の成果のある方法を捨てて、本来の目的を思い出して今何をやるべきかを改めて考察し、提示することである。すなわち、まず過去の実績を捨て、次に本来の目的に立ち返り、そして突破点を明言することが重要だと考えられる。以下でそれぞれについてさらに言及する。

7.2.1 過去の実績を捨てる

「原点返り」で行うことの1つ目は、過去の実績を捨てることである。新たな成功へ向けた取り組みは、現状を否定することから始まる。過去の実績をひきずることは足枷となるためである。技術者の経路依存性を断ち切るには、客観的なマネジメントの観点が必要である。

松下電器にいた赤崎は、電気メーカーとしての方針に従い、MIS 型で青色 LED を商品化するという大きな功績を残した。しかし、MIS 型の青色 LED の試作品に対して世界から反響が無いことに気づいた赤崎は、MIS 型をやめると決めた。今のままでは不十分であると考え、これまでの功績を否定することから原点返りが始まった。

伊丹は、山口からチオフェンにアセチレンを合成するアイデアを聞いた時、これまで取り組んでいたメトキシベンゼンへの有機分子置換の方法を捨てて、新たな方法に取り組むことを決めた。

7.2.2 本来の目的に立ち返る

2つ目は、本来の目的に立ち返ることである。過去の実績を捨てた上で、本来やるべき目的を考えることで、思考が絞られ本質に迫ることができる。様々な避けがたい制約によって、本来の目的からのズレが生じることは常である。しかし、ここで、本来の目的が何であったかに立ち返り、再度俯瞰的に見つめ直して新たなスタートラインに立つことが必要である。

ここで重要なのは、過去の実績を捨てた後に本来の目的に立ち返るという順番である。過去の実績を捨てた上で目的を考えるから新たな選択肢を再選択できるのであって、先に目的に立ち返ると、当初その目的を達成するために実績を積んだことを考慮すると、過去の実績に引きずられやすいためである。

赤崎は、MIS 型の不成功を受けてそれを捨てた上で、本来の目的が pn 型の明るい青色 LED を開発することだと思い直し、もう一度その実現方法を真剣に考え始めている。

伊丹は、メトキシベンゼンを用いる方法を捨てた上で、HAB の分子を合成するという本来の目的に合った、新しいチオフェンを用いる方法を採用している。

7.2.3 突破点を明言する

3つ目に、突破点を明示することである。本来の目的に立ち返ると、これまでの技術開発で洗練されてきた突破点に考えが至る。これが解決すべき本質的な課題である。しかしこの突破点は必ずしも明示的でない。明示的でない突破点には集中しにくい、明示された突破点には集中しやすい。それは、明示された突破点には、洗練による明確な論理が備わっているからである。従って、原点返りにおいて、突破点を明示することが大切である。

赤崎は、pn 型を実現するための開発のシナリオを考え抜き、まずサファイア基板上に MOVPE 法で GaN の欠陥の非常にすくない均一な結晶成長を行うことを明示した。それを、当時在籍していた松下電器で提案したが、会社の方針である「光プロジェクト」¹³⁰での通信用のレーザー開発と合致せず、結果的には名古屋大学へ移籍して、pn 型の青色 LED の実現へ向けて開発に取り組むこととなった。

伊丹は、チオフェンを用いた合成方法を選択するにあたり、本質的な課題である位置異性体の混合物分離を突破点と定めて、それを鈴木テーマとして明言している。

7.3 既存技術を「徹底的に掘り下げる」

7.3.1 徹底的とは何か

原点返りの結果突破点を絞り込んだら、既存技術を徹底的に掘り下げればよい。なぜならすでに突破点は洗練されており、課題の再選択は必要ないからである。絞り込まれた範囲の中で、これはと思う順でよいから技術変数の組み合わせを全て確認して、次の手が無くなるまでやりつくすことが大切である。

それには2つの理由がある。1つは、ひらめきのための「空白のある地図」を確定させるため、技術変数間関係性を精密化する必要があるからである。もう1つは、実はこれは技術ブレイクスルーの論理からは外れるが、既存技術の掘り下げで成功する場合もあるからであり、これも技術開発のマネジメントとしては重要な観点である。

では、「徹底的」とは何か。それは、実験可能な既存技術変数の全てを組み合わせることである。つまり、絞られた突破点に限定はされているが、その範囲での関係性を全て実験によって理解するということである。

しかしながら、「全て」といっても実際には人によってばらついてしまう。技術者によって専門も実験経験も異なるため、既存の技術変数の因子やその制御範囲

¹³⁰ 赤崎（2013, p137-138）より。

についての知識の量は大小様々かつ偏在している。このため、技術者本人だけに任せておくと、打ち手が無くなり手詰まり状態になり、徹底的に掘り下げられなくなることがあり得る。従って、技術開発のマネジメントは、既存の技術変数の全てを組み合わせるために、技術者個人の知識の範囲を超えて、先人の知識との足し合わせによって実験における技術変数を補完する必要がある。このようにして、個人の限界を超えることによって、「徹底的」に掘り下げることが可能になる。ただ単に技術者に“頑張れ”というだけでは、徹底的に掘り下げることができないということである。

赤崎は研究室で定期的なミーティングを行い、そこで天野の実験の結果や考察について、他の技術者と議論をしたという¹³¹。このようなミーティングの中で、天野は既存技術やメカニズム、実験の方法などを先輩や同僚から学び、天野自身の知識の範囲を超えて次の実験で確認すべき技術変数を獲得した。

伊丹は技術者を1つの大部屋に集めて、オープンなミーティングスペースを設けている。技術者同士が普段から自由に議論をしやすい環境を設定することで、鈴木は先輩や同僚と実験の方法や化学合成技術について知識を得て、次の実験の内容を考察していた¹³²。これにより、鈴木は知識の範囲を超えて、既存技術の最先端の知識をベースにした掘り下げが可能になったと考えられる。

7.3.2 徹底的に掘り下げることへの障害

空白のある地図を確定させるために、原点返りにより絞り込まれた突破点を徹底的に掘り下げることが大切であることはわかった。しかしながら、徹底的に掘り下げるには内なる障害と外からの障害があり得る。それは、技術者自身に内在する問題と外的なコストの問題であると考えられ、以下で詳細を考察する。

¹³¹ 2016年10月14日13:00-15:00の鬼頭へのインタビューより。

¹³² 2016年11月25日11:30-12:30の鈴木へのインタビューより。

(1) 技術者自身に内在する問題

技術者自身に内在する問題とは、先が見えず失敗を繰り返す中でどこまで掘り下げれば良いのかという内なる問いである。愚直なまでに既存技術を徹底的に掘り下げることはとても難しい。それは人間の心の弱さから来る逃げたい気持ちによって、他への「飛び」の欲求、あるいは抜本策の幻想による「思考停止」が起こるからである。

① 「飛び」

既存技術の掘り下げで技術的目標を達成できない場合、苦しいから目移りしやすく「飛び」たくなる。長らく失敗が続くと、このままで解が無いかもしれないという恐怖心、自信の喪失が起こり、目についた全く別の方法をつまみ食いしたくなる。しかし決して飛ばせてはならない。空白のある地図が確定するまで、決して安易に外を探索してはならない。なぜなら、空白のある地図が確定していないのに外を探しても、得られた技術変数が適切かどうか判断できず、「思いつき」にしかないからである。

② 「思考停止」

2つ目のパターンは、抜本策の幻想による「思考停止」である。見通しの立たない既存技術の掘り下げに対して、抜本策という幻想が目の前をちらつく。現時点で具体的かつ効果的な抜本策は手元に無いにも関わらず、抜本的な方法への希求だけがついつい増してしまう。すると「思考停止」に陥り、今の実験は意味が無いのではないかと考え実験が手につかなくなる。このため、動機づけをして頭と手を止めさせないことが必要である。思考停止した状態で実験を続けても、実観察、評価、現象の仮説メカニズムの構築が鈍り、技術変数間の関係性の精密化が進まなくなるからである。

従って、技術ブレイクスルーを目指すマネジメントにおいて、ついつい「飛び」やすく「思考停止」しやすい技術者に対して既存技術の掘り下げを「徹底的」に行うよう指導する必要がある。

(2) 外的なコストの問題

次に、外的なコストの問題である。徹底的に掘り下げるには、当然時間と投資が必要である。しかしながら、どれだけ寛容であっても限度がある。ここで問題になるのは、「投資の採算性」と「実験の効率性」である。

① 投資の採算性

投資の採算性に関わる問題は、時間と投資がかかるわりに成果が出ないことで計画中止になるということである。技術のブレイクスルーはどこであってもいい。しかし、環境要因の影響があり得るとすれば、既存技術を徹底的に掘り下げる時の投資採算の問題である。すなわち企業や大学といった実験環境で、投資採算の判定基準は異なるであろう。営利追求の企業であれば当然厳しく、大学であってもたとえ新規性を主張できても、論文が書けない研究を存続させることは資金繰りの問題で難しい。

青色 LED 半導体技術開発の事例では、企業と大学それぞれで掘り下げを行っている。赤崎は松下電器東京研究所で、HVPE 法を用いた青色 LED を作製するところまで掘り下げを行った。一方で、その次の MOVPE 法による pn 型の青色 LED への掘り下げを松下電器は許さなかったため、名古屋大学に転職して取り組んだ。松岡は、NTT 茨城研究所で InGaN 混晶成長の掘り下げを行い技術ブレイクスルーに成功したが、その後の青色 LED の開発は通信用半導体に集中するという方針のため中止となった。企業の中央研究所が比較的投資採算に甘かった時代は、企業でも長期に渡る掘り下げが許容されたが、企業の採算が悪化するとそれも叶わなくなってしまう。

一方で、大学であっても国立法人などの研究予算助成に採択されると多額の予算を得ることができる。青色 LED 半導体材料開発の事例でも、均一 GaN 結晶成長が成功した後の 1987 年からは、新技術開発事業団（現科学技術振興機構）プロジェ

クトの研究案件であった¹³³。また、HABの化学合成技術開発の事例はJST ERATOプロジェクトの研究案件であった¹³⁴。

② 実験の効率性

一方の「実験の効率性」とは、時間と投資が限られた中でつい取りがちな手で、実験の中で無駄だと思われる内容を省くことや、不得意と思われる内容を外注することである。例えば、「実験計画法」のような実験数節約のためのツール、試作や分析のアウトソーシングなどが挙げられる。実験の効率化の難しさは、何が重要で何が無駄かということは実験をしないとわからないが、実験前に決める必要があることである。このため、重要なポイントを実験しないとか、外注に出してしまうという、意図しない「実験の非効率化」が起こってしまう。

赤崎と伊丹の事例では、いずれも実験は全て技術者が自前で行い、外注などはしていなかった。また、実験の効率性というよりは、現象を深く掘り下げていくことに数年間を費やすことを厭わなかった。

このように、ただ単純に技術者に徹底的に掘り下げるように指示すれば掘り下げることができるというわけではない。従って、技術開発のマネジメントは、上記のような障害が起こることを知った上で、それらを回避するための手当てを技術者に対して行うことが必要である。

7.3.3 自分で掘らせる

技術変数間の関係性を精密化するために、事例研究では1人の技術者が専任で取り組み、少なくとも数年の時間がかかっている。これは、技術変数間の精密な関係性を構築して空白のある地図を確定させるには、絞られた突破点の極狭い範囲でよ

¹³³ 新技術開発事業団 GaN 青色発光ダイオードの製造技術
(<http://www.jst.go.jp/tt/50th/pdf/seika06.pdf> より :2017 年 10 月 30 日取得)

¹³⁴ 科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 ERATO 伊丹分子ナノカーボンプロジェクト (https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/ibn_PJ.html より : 2017 年 10 月 30 日取得)。

いので、1人の技術者が実験での情報の流れを全て把握することが大切であることを示唆している。実験は他人に任せてはならず、自分で掘らせる、すなわち技術者はデータを見て考察するだけでなく、技術者自身が自分の手で実験の準備から試作、計測、評価にまつわる全てのことを実行することが大切である。

均一 GaN 結晶成長の事例では、研究室の先輩である小出にサポートをもらったにせよ、天野は実験装置の製作、改造から試作、計測、評価に至るまで、全て自分で実験を行った。GaN の p 型化の事例でも、亜鉛ドーピング GaN の結晶成長や計測、電子線照射による LEEBI 現象の解析を、鬼頭のサポートがあるものの基本的には天野が全て自分で行った。また、松岡も佐々木のサポートがあるものの、InGaN 混晶の実験を自ら行った。松岡は企業の研究所にいたが、実験の分担や評価の外注などせずに、自分で全て実験を行った。

HAB の事例でも、鈴木が合成から計測まで全て自分の手で行っている。「1人3役」で自分の手を使って実験をするから技術変数間の関係性が精密化するのであって、実験を分担していたら技術のひらめきは生まれなかったであろう。

しかしながら、技術開発のマネジメントはこれを効率的に行おうと考える。するとそこに罣が待っている。実験における精密化の駆動要因のうち、「実観察」「1人3役」の2つにその罣が仕掛けられている。技術者が全ての実験を行うのは非効率であるとして、実験助手に試作を任せることや、外注に計測を依頼するといった効率化を目的とした行為は、「実観察」や「1人3役」による技術変数間関係性が精密化しないことにより、技術ブレイクスルーを阻害する「効率化の罣」と考えられる。

「効率化の罣」の発生要因は、外的要因と内的要因に分類できる。まず外的要因とは、例えば企業のトップダウンなどである。これらは資金とマンパワーが否応なく潤沢に投入される一方で期限が設定される。何億円もの資金を使い切る必要があるため、高価な設備や計測器を購入する。そして、多くの技術者を集めて、細かく分担作業をすることで、決められた期限に対する効率化を狙うのが常である。

一方の内的要因は、商品化、特許、論文などの技術的成果を短期間で最大化することを求められる企業に内在する方針や文化、技術開発マネジメントのあり方などが当てはまる。ここでもついつい一つの課題を複数の専門家で分担して「効率化」を図りたくなってしまう。

このように、技術者自身に徹底的な掘り下げを1人で行うことが良いと思っても、上記のような効率化の罠により、複数人にテーマ設定してしまいがちである。しかし技術ブレイクスルーを実現したいのであれば、絞られた突破点の極狭い範囲に絞り込んだ上で、大変でも時間がかかっても、担当の1人の技術者が試作、計測、評価の全てに立ち会うことを、マネジメント側が意図して指示することが必要である。

7.3.4 掘り下げの判断基準

既存技術での掘り下げを徹底的に行うとしても、限度があるはずである。金が埋まってなければ掘っても出てこないからである。では、どこまで掘ったら外の世界を見てよいのか、他を探してもよいのか、という疑問が湧いてくる。すなわち、「精密な関係性」とは、どういう状態まで達すれば精密になったと言えるのだろうか。

これは、事例研究から「その道の専門家が見て手が無いと思うレベルに達しても、技術者本人がなお可能性を捨てず掘り下げている状態」と考えられる。すなわち、既存技術の専門家が長期間かけて積み上げて、意味があると思える既存の変数を全て確認したにもかかわらず、さらに掘り下げようとしている状態であり、この状態であれば相当に精密であると言えよう。

均一 GaN 結晶成長の事例で、天野は修士課程2年の時、すでに3年間にわたって様々な技術変数の組み合わせをテストし尽くしているにも関わらず失敗が続いていた。卒業のための論文も書くことができず、途方に暮れていた。しかし、本人にとってはまだまだ実験のアイデアはたくさんあり、まだまだこれからだという気持ち

であった¹³⁵。その天野に、赤崎は博士課程へ行き、さらに実験をするように勧めている。まさに、空白のある地図が確定されようとしているタイミングであることを赤崎が察したのではないか。実際その後まもなくして、天野が低温 AlN バッファ層のアイデアをひらめいている。

また、赤崎は p 型化に取り組む天野の煮詰まった様子を見て、NTT ヘインターンに行くことを勧めた。この時、赤崎から見ても、すでに考え得る効果的な変数の範囲は調べつくし、新たなアイデアが必要だと考えたのだと思われる。

伊丹は、鈴木が位置異性体の混合物分離で煮詰まった状況を見て、就職活動を容認した。そこで鈴木はパスツールのエピソードによる「常識の例外」に出会うことができた。

このように、技術開発のマネジメントが技術者に対して指導すべきことは、既存技術の徹底的な掘り下げの状況を観察し、その道の専門家が見て「もう手が無い」と言ったタイミングを見計らって、外を向かせることだと言えそうである。

7.4 「外の空気」を吸わせる

7.4.1 「空白のある地図」を持たせて「外」に出す

ひらめきのキー技術変数を類推するには、「常識の例外」を知ることが必要である。「常識の例外」は「外」にある。しかし、適切なキー技術変数を見分けるには「空白のある地図」が確定していなくてはならない。従って、「空白のある地図」を持たせて「外」の空気を吸わせるのが良い。とことんやっても解決できない状況の技術者を「外」に出すと、見るもの全てを自分の課題に結び付けて考えるものである。すると、「常識の例外」に出会い、ひらめく可能性が高まる。従って、「空白のある地図」が確定したら、「外の空気」を吸わせるのが最もよい。

赤崎は、なかなかうまくいかない天野を見て、外の空気を吸わせるために、NTT

¹³⁵ 天野（2015, P93-94）より。

のインターンに派遣した。そこで、GaAs の CL (カソードルミネッセンス) の実験を担当したことで、電子線照射による発光強度上昇という「常識の例外」に出会えた。

天野にとっては、大学で実験ばかりしていたため、少しは社会の風に触れて外の空気を吸ってきた方がよいと赤崎が配慮してくれたものだと考えていた。一方の赤崎は、昔に比べて格段にきれいな亜鉛ドーピング GaN の CL での発光波長と強度の特性に興味があり、インターン先として CL の測定装置のある NTT 武蔵野研究所を選び、友人の石井芳一室長に天野のインターンシップ受け入れを依頼していた¹³⁶。赤崎は、ただ単に「外」に出すのではなく、赤崎なりに意味のある「外」に天野を出しているように見える。

鈴木は、修士 2 年の時に構造異性体の分離に半年間取り組んだが、うまくいかない状態であった。その後、半年間の就職活動で企業に研究紹介をしたことによって、やはり結晶にしないと構造が同定できないと思い至ったことで、ふとパスツールの話が思い浮かび、結晶化による構造異性体の分離のアイデアをひらめいた¹³⁷。

いずれの事例でも、「外」の空気を吸うことで、「常識の例外」をつかむチャンスを得やすくなったと言える。

7.4.2 「外」の選定基準

「常識の例外」に出会うための「外」とはどこか。それは、「専門性は異なるが、類似の課題を持つ分野」だと考えられる。「常識の例外」に出会うための

「外」が近すぎるとそれは既存の常識的な技術そのものでしかない。しかし、遠すぎるとキー技術変数を類推できない。すなわち、専門性が異なるため近すぎはしないが、類似の課題を持つという意味で遠すぎない分野が、「常識の例外」を得やすい「近からず遠からず」の「外」なのではないか。

¹³⁶ 赤崎 (2013, p169) より。

¹³⁷ 2016 年 11 月 25 日 11:30-12:30 の鈴木へのインタビューより。

天野は澤木の「常識の例外」から低温バッファ層をひらめいた。澤木は同じ研究室の助教授であり一見近い。しかし、澤木が従来扱っていた化合物や結晶成長手法が異なり専門が理論であることから、GaN の MOVPE による結晶成長に取り組む、実験専門の天野から少し専門性が離れている。これが絶妙の「常識の例外」を生んだとと考えられる。赤崎は、名古屋大学に研究室を作る時にあえて理論屋と実験屋を同居させた結果¹³⁸、相互の「近からず遠からず」の情報交換が行われたと言える。

また、赤崎は p 型化への取り組みの中で、亜鉛ドーピング GaN の CL での発光波長と強度の特性に興味があり、インターン先として CL の測定装置があり、GaAs の研究をしていた NTT 武蔵野研究所を選んだ。すなわち、材料の専門こそは異なるが、技術的な課題としては関連の強い場所を「外」として意図して選定している。

小山は伊丹の HAB 合成研究を見て、テトラアリア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ひらめいた。小山は伊丹と同じ有機化学合成の専門家ではあるが、天然化合物の合成が専門であった。伊丹は自らが拠点長を務めるトランスフォーマティブ生命分子研究所 (ITbM) で、専門が異なるという意味での「近からず遠からず」を、意図して実現しているという¹³⁹。ここでは、合成化学、触媒化学、システム生命科学、動植物科学といった専門性の異なる分野の研究者をあえて大部屋に同居させ共通の課題解決に取り組んでいる。これは、相互の「常識の例外」を交流させ、ひらめきを誘発しやすい環境づくりをしていると言える。

鈴木は、就職活動中に企業に研究紹介をする機会を得ることで、結晶構造の同定の大切さに気づき、結晶をキーワードとして、パズルの結晶化による光学異性体の分離という「常識の例外」に出会うきっかけを得た。主に就職先として考えていた企業は化学メーカーであり研究職を希望していたため、面接での研究紹介で

¹³⁸ 2016 年 10 月 14 日 13:00-15:00 の鬼頭へのインタビューより。

¹³⁹ 2016 年 11 月 25 日 10:30-11:30 の伊丹健一郎教授へのインタビューより。

も専門的な議論がなされたと推測できる。すなわち、就職活動先のメーカーは、材料や専門は異なるものの、技術的な課題としては関連の強い場所であった。

では、「常識の例外」に出会うために適切な距離感である「近からず遠からず」の「外」をどのように判断すればよいか。伊丹はインタビューで、適切な距離感のテーマの選定基準を「未知の分野の課題であっても、自分の専門分野で活かせるようなアイデアがたくさん湧いてくると」と答えている¹⁴⁰。赤崎は p 型化での天野のインターン先を、材料の専門は異なるが技術的な課題としては関連の強い場所を選定した。そこから考察すると、「近からず遠からず」の距離感の「外」とは、「専門性は異なるが、類似の課題を持つ分野」と言えるのではないか。

7.5 「新参者」に任せる

「新参者」とは、長年の技術開発の後に、新たに参入する技術者である。実は、事例研究の中で技術ブレイクスルーを果たした天野、松岡、小山、鈴木は、全て「新参者」である。天野と鈴木は学生、松岡は赤色レーザーの専門家、小山は天然有機物の化学合成の専門家であった。彼らは既に長期間取り組んでいるが未解決の分野に、新参者として参入後 1~3 年でひらめきに至る技術ブレイクスルーに貢献している。

既存技術を掘り下げ、空白のある地図を確定させること、常識の例外を知ることが重要だと言いながら、「新参者」に任せるのが良いとはどういうことか。本節でその論理を考察してみたい。

7.5.1 「新参者」の「環境」と「特性」

技術のひらめきの要件の骨子は、これまでの議論から、「空白のある地図の確定」と「キー技術変数」の組み合わせであった。すなわち、既存技術開発から突破点を絞り込み、技術変数間の精密な関係性を構築するといった、既存技術での膨大

¹⁴⁰ 2016 年 11 月 25 日 10:30-11:30 の伊丹健一郎教授へのインタビューより。

な蓄積の上での技術深耕と、既存技術からは思いもよらない技術変数を常識の例外から類推して組み合わせるといふ、一見相反することを両立しなければならない。特に、既存技術の深耕は多くの技術者にとって取り組みやすいことであるが、それらを踏まえて一見関係が無いように見える技術変数を組み合わせる意味があることにすることは、至難である。すなわち、「常識の例外」の連想、「キー技術変数」の類推、「既存の技術変数間の精密な関係性」と「キー技術変数」の組み合わせをいかに実行するかが、ひらめきのために重要な問題となる。

そこで、「新参者」である。「新参者」とは長年の技術開発の後に、新たに参入する技術者であり、既存の技術蓄積によって数年で空白のある地図を確定できるという「環境」と、過去の技術蓄積に対するこだわりが無く、常識に捉われずに新たな技術変数を受け止められるという「特性」の2つの観点で技術のひらめきが起きやすいと考えられる。

(1) 「環境」

まず「環境」について、「新参者」が参入するのは、すでに多くの技術が蓄積された分野であることが前提である。ゼロベースで一から作り上げる必要はなく、すでに膨大な技術蓄積があり、技術開発の目的や方法の道筋が描かれ、突破点が絞られている。従って、空白のある地図を確定させるのに必要な、専門分野の常識や膨大なデータ、実験インフラといった地盤が整い、突破点が洗練されている。新人がゼロから新たに技術変数間の関係性を構築するのとは蓄積の量が大きく異なる。

多くの技術蓄積のある分野に参入した新参者は、まずは見習いとして論文や先輩技術者から既存の技術を学びながら開発を進める。往々にして新参者に新たな取り組みの選択肢は無く、愚直に既存技術に則り突破点を掘り下げることが第一とする。さらに、ゼロから学ぶため、実験も1人で全てやる。「新参者」は既に多くの技術蓄積があり突破点が洗練された中で、さらに数年かけて愚直に突破点を掘り下げることができる環境にあることにより、技術変数間の関係性が精密化しやすい。

赤崎は、当時学生为天野に MOVPE 装置の製作改造、均一 GaN 結晶成長の実験を任せた。GaN の結晶性能についての膨大な技術蓄積のある赤崎研究室で、全くの素人であった天野は、すでに絞り込まれた突破点において、掘り下げることだけに数年間取り組める環境にあり、そこで基本的に 1 人で実験に取り組むことができた。

伊丹は、HAB 合成のため、テトラアリアルチオフェンにジアリアルアセチレンを合成する方針に変更した時に、当時学生の鈴木に実験を任せた。プログラム合成法をはじめとする有機化学合成の最先端の技術蓄積がある伊丹研究室で、素人の鈴木は与えられた突破点に集中して取り組む環境にあったと言える。

(2) 「特性」

一方の「特性」について、「新参者」は新たな技術変数への先入観が少なく、新たな組み合わせへの抵抗感が少ない。従って、過去の蓄積情報の獲得と、新たな組み合わせの両立がしやすい。

その道の古参は常識を作り上げてきた立場なので、自らが構築した常識に捉われやすいため、ひらめきに必要な「常識の例外」やそこからの類推に対して拒否感が強い。一方、「新参者」は、新たな技術変数への先入観なく、制約を知らないがゆえに、「常識の例外」の事例の受け止めや、そこからの技術変数の類推、さらに技術変数を既存の技術変数と組み合わせることに対して恐れない傾向が強い。むしろ自分が新しい世界を作りたいという気概が強く、外に眼を向けやすい。

しかし、「新参者」に対して、好き勝手に実験をさせれば良いという訳ではない。過去の膨大な取り組みから突破点を絞り、数年間かける覚悟で既存技術に則った「空白のある地図」の確定をすることが大前提である。新しい視点を入れるといて、「空白のある地図」の確定をせずに自由に取り組ませると、むしろ技術ブレイクスルーから遠ざかってしまう。「新参者」にまずはしっかりと、突破点を徹底的に掘り下げてもらうことが、その後の飛躍につながるのである。

7.5.2 ベテラン技術者にとっての障害

前項において、新参者が「ひらめき」を得やすい要件を述べた。では、ベテランの技術者、すなわち例えばある専門分野で10年以上の技術開発経験を持ち、連続的、非連続的に限らず革新技术を生み出してきた技術者は、技術の「ひらめき」を得にくいのだろうか。

ベテランの技術者は、ある専門分野での技術開発経験を経た結果、技術の常識の範囲が明確に区分けされている。効果のあったことと無かったことを自ら経験したが故に、確信を持って言うことができる。また、その常識の範囲での判断が様々な技術開発で多く成功した結果、常識の範囲の信頼が高まり、確固たるものとしている。

従って、ベテランならではの「技術変数の仕分け」の精密さと、「常識と非常識の境界」の明確さ、の2つの在り方が、技術の「ひらめき」において、空白のある地図の確定と「常識の例外からの類推」や、「キー技術変数との組み合わせ」に対して障害になると考えられる。

(1) 「技術変数の仕分け」

ベテランの技術者は新参者と比較して、その技術開発経験の豊かさから、効果のある技術変数と効果の無い技術変数の仕分けとその論理付けが精密になされている。このため、一見技術変数間の関係性を精密化しやすいように見える。しかし、その仕分けの濃淡がはっきりとし過ぎているが故に、効果が無いと思う技術変数をあえて実験して関係性を確認することをしない傾向があり得る。すると、頭の中でわかった気になっているだけで、実際の実験で得られるべき技術変数間の関係性が蓄積されず、それによる現象のメカニズムが構築されないため、かえってベテランの方が空白のある地図を確定しにくく、従ってひらめくことができないということがある。

(2) 「常識と非常識の境界」

ベテランと新参者では常識と非常識の境界が異なる¹⁴¹。新参者は常識の範囲が狭いが境界があいまいなので、常識でない事象を見ても非常識と思いにくく、受け入れやすい。一方のベテランは、自らの豊富な経験から「常識」の範囲と境界を確固として持っているため、「常識」でない事象を「非常識」と捉えやすく、「常識の例外」のようなあいまいな事象を認めにくく、排除しがちな特徴を持つ。すると、「常識の例外」に対して「非常識」として目を向けない結果、そこで効果のある変数を適用しようと思いつかず、「常識の例外からの類推」をしにくくなるということがあり得る。このため、「キー技術変数との組み合わせ」ができず、ひらめくことができない。

もちろん、全てのベテランが上記にあてはまるわけではない。柔軟な考え方をもち、常識の例外を非常識と見ず、興味を持って目を向ける人もいると考えられる。しかし、ベテランが豊富な経験を得ている以上、常識と非常識の境界を明確に設定しやすい傾向が強いことは確かであろう。

7.6 「ひらめきの試行」を許容する

7.6.1 技術メカニズム不問

技術者に「ひらめき」があった時、説明を受けた上司は、その技術に精通していればいるほど「そんな馬鹿な」と思うものである。その理由は、理屈や経験で説明できないことと、そのために実現性を予測できないためだと考えられる。

(1) 理屈で説明できない

1つ目は既存技術メカニズムで説明できない、すなわち理屈で説明できないからである。それが本物のひらめきだとしても、新たな未解明の技術メカニズムに則っているため必ず説明に飛躍が生じ、理論に基づいた説明ができない。自前の理は、

¹⁴¹ 石井（2001）は「常識の境界」において、ベテランと新参者は「変」と思えるかどうか、すなわち常識の境界が異なると述べている。

主観的には正しくても、客観的には論理の飛躍が必ず存在する。なぜなら科学理論としては未解明で実際にやってみないとわからないことをベースに自前の理が構成されているためである。

(2) 経験で説明できない

2つ目は、上司には上司の経験と考えに基づいた仮の「答え」があるが、それに合致しないということが考えられる。また、仮の「答え」が無かったとしても、新たな解決方法はこれまでに経験がない方法である。上司を含めてマネジメントの判断基準は経験しかないため、これまでに経験したことが無い方法についてはその効果を説明できない。技術者は現場で実際の現象を目の当たりにしているため、正に現場で起こっている現象を判断基準とすることができるが、マネジメントする立場の人は実際の現象を見ていないため、過去の経験を基準として判断せざるを得ないためである。

(3) 実現性を予測できない

3つ目は、多くが明らかに非常識な方法であり、実現不可能な理由の枚挙にいとまがないためである。すなわち、その実現性を予測することができないためである。理屈と経験で説明できないためそれは当然と言えよう。マネジメント側からすれば、「試行すれば成功すると思うから試行したい」と、全く根拠やその実現性の予測なしに、「想い」だけで実施承認の許可を得ようとしているようなものである。

しかしながら、「ひらめき」はそれが真実であればあるほど、上記3つの理由を避けがたいものであり、真面目に考えれば考えるほど否定せざるを得ない。技術者本人にとっては、他人には理解してもらえず、話しても潰されるのであれば、無理にでも実行して示すか、転職するしかないと考える。従って、「ひらめき」を潰

さずモノにするためには、「技術メカニズム不問」でまず実行させるのが正解だと考えられる。

7.6.2 技術者「ひらめき」に対する覚悟

「ひらめき」を試行するには、投資がかかる場合がある。それは、従来実施したことのない方法であり、場合によっては実験装置や素材といった実験インフラを新たに手配する必要がある可能性があるためである。

GaN の P 型化の事例では、天野が電子線照射をひらめいた時、手元に実験装置が無かった。幸い、共同研究先の豊田合成株式会社に電子線照射の装置があったため、片道 1 時間かけてスクーターで通う必要はあったが借りることができた¹⁴²。もし簡単に借りられる電子線照射の装置が無ければ、購入するか、高額なレンタル料を支払って借りる必要があった。

InGaN 結晶の事例では、松岡がアンモニアの流量を桁違いに増やすことをひらめいたが、そのような流量を流して処理できる装置が世の中に無く、結局 22 社を調査した後、特注で約 1.5 億円かけて実験装置を製作した¹⁴³。

このように、技術者がひらめいたら投資を覚悟すべきである。しかしそれには、資源投入の自由度が欠かせない。技術メカニズムに則っておらず納得しづらい案件へのお金と時間と人の投資を判断するのは非常に難しい。しかし、これを潰すと技術ブレイクスルーはありえないのである。従って、技術ブレイクスルーをマネジメントするのであれば、予め「ひらめき」を試行するための予算の準備と、そこでの投資や失敗のリスクまで覚悟しておくことが大切である。いざ、技術者が「ひらめき」の試行のための投資の相談に来た時こそ、技術開発マネジメントとしての深慮遠謀が試される。

¹⁴² 天野 (2015, p124) より。

¹⁴³ 2016 年 2 月 8 日 10:30-13:00 の松岡へのインタビューより。

7.6.3 「思いつき」の見抜き方

「ひらめきの試行」を許容するにあたって、「ひらめき」と「思いつき」の違いをどう見抜くのだろうか。「ひらめき」は、「空白のある地図」が確定した状態で、空白を埋められる新たな技術変数を常識の例外から類推して得た時の解決方法であった。これに対して、「思いつき」とは、「空白のある地図」が確定した状態で、空白を埋められない新たな技術変数による制御方法と、「空白のある地図」が確定しない状態で得た新たな技術変数による制御方法の2つである。

「思いつき」を見抜くことは、技術者をマネジメントする上で重要な問題の1つである。「自前の理」は理論的な飛躍を内包するものなので、そこを突き詰めても「ひらめき」と「思いつき」の違いは見抜けない。また、「空白のある地図」の確定具合や「常識の例外」からの類推の内容を問いただしても、その技術変数が空白を埋められて、適切な解決方法になっているかどうかはわからない。

そこで、「ひらめき」と「思いつき」から得られる事の違いを考えることから、「思いつき」の見抜き方を考察する。「ひらめき」と「思いつき」の違いは、現象のメカニズムを描けているか否かである。「ひらめき」であれば、その「自前の理」によって現実の現象を矛盾なく説明できるであろう。そして、その「自前の理」を自然に多く語ることができるであろう。さらに、その「自前の理」には強い確信があるため、否定されても納得がいかず、試行したい気持ちは衰えることは無いであろう。従って、「思いつき」の見抜き方として、以下の3つを考察した。

(1) 現実の現象をよどみなく説明できること

まず、「ひらめき」とは、解決のための現象のメカニズムの大筋を描けることである。「思いつき」はこじつけのメカニズムなので、現象のメカニズムを描けない。そこに説明のスジの通り方の差が出てくる。すなわち、「ひらめき」であれば現実の現象をよどみなく説明できるが、「思いつき」では説明しきれないことが出てきてしまうと考えられる。ここでの「よどみなく」とは、終始一貫して理路整然としていることである。従って、技術者に対して現実の現象について様々に質問を

して、彼が「自前の理」を使い、筋道を通してよどみなく語れるかを確認することが、「ひらめき」か「思いつき」かを判断する 1 つの方法になり得る。

(2) 「自前の理」があふれ出ること

次に、ひらめくと「自前の理」というものは自然にあふれ出てくる。ここでの「あふれ出る」とは、新たな解決方法で成功する理由やその実現性の説明を話しながら、論理が補強されたり、より具体的な実現方法に気づいたりして考えが進む、すなわち「考えが話を追い抜く」現象である。キー技術変数によって現象のメカニズムの大筋を描けることで、これまで不可解であった様々な現象の説明が可能になるため、技術者はその嬉しさと自慢したい気持ちによって、それらにまつわる「自前の理」をまるでその現象を自分で見てきたかのように語りたくなる。一方、思い付きでは、「自前の理」があふれ出てこない。それは取って付けた技術変数が、現象のメカニズムを説明できず、従って新たな解決方法で成功する理由やその実現性について説明しようとしても、ところどころで言葉に詰まるためである。「まあ、やってみないとわかりません」という話であれば、それは大方「思いつき」の可能性が高いと言える。

このように、技術者が「自前の理」についてあふれ出るかの如く語れるか否かが、新たなアイデアがひらめきか思いつきかを見極めるもう 1 つの判断材料になると考えられる。

(3) 否定されてもあきらめない

さらに、ひらめくと新たな解決方法での成功に対する強い確信が、「自前の理」を考えることでより強固になる。このため、たとえ周囲やマネジメントから拒否されても、「ひらめきの試行」への固執は消えず、実行するための別の手段を講じたり、何度も“手を変え品を変え”したりして、承認を得るために説明をしに来ると考えられる。すなわち、マネジメント又は専門家としてあり得ない解決策だと思っ

たとしても、何度否定しても試行の承認を懲りずに得に来るようであれば、「ひらめき」の可能性が高いと言えそうである。

以上、「思いつき」がどのようなもので、それらを「ひらめき」と区別して見抜くにはどうすればよいかということについて考察した。とはいえ、第5章でも述べたように、「思いつき」は決して全てが悪というわけではない。「思いつき」の実験が技術変数間の関係性を蓄積し、「空白のある地図」の確定に貢献するという側面もあるからである。従って、技術開発マネジメントで重要なのは、「ひらめき」と「思いつき」を見極めた上で、試行許可を出す、目をつぶる、中止させるといった意思決定を行うことである。

7.7 小括

本章では、前章までとは視点を変えて、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。

これらの示唆は、技術開発のマネジメントを実践しているものであれば、どこかしらで聞き、経験し、または実際に実行している事かもしれない。しかし、本論文におけるこの示唆の価値は、それが先行研究と事例研究から得られた、技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説に依拠している点である。単なる経験談のグルーピングや抽象化でないということである。

従って、実際の技術開発で技術ブレイクスルーを起こすにあたり、実のある示唆になり得ると考えられる。本論文で得られた仮説を軸として、さらなる事例研究による新たな因子や論理の考察や、統計的手法による妥当性の検証が進められることを期待したい。

第8章 総括

8.1 まとめ

8.1.1 第1章「問題意識」

第1章では、本論文の目的、意義、リサーチクエスチョンを提示した。本論文の目的は、革新技术の開発において、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、本論文では青色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、上記事例の無機材料と技術開発の特性が異なる有機材料の技術ブレイクスルー事例である、HAB（ヘキサアリアルベンゼン）の化学合成技術開発の事例を、上記仮説モデルを用いて説明できることを確認した。

革新技术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、既存技術の枠組みに捉われ、非連続的な革新技术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のが実情である。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少なく、それらの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、本論文では、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。

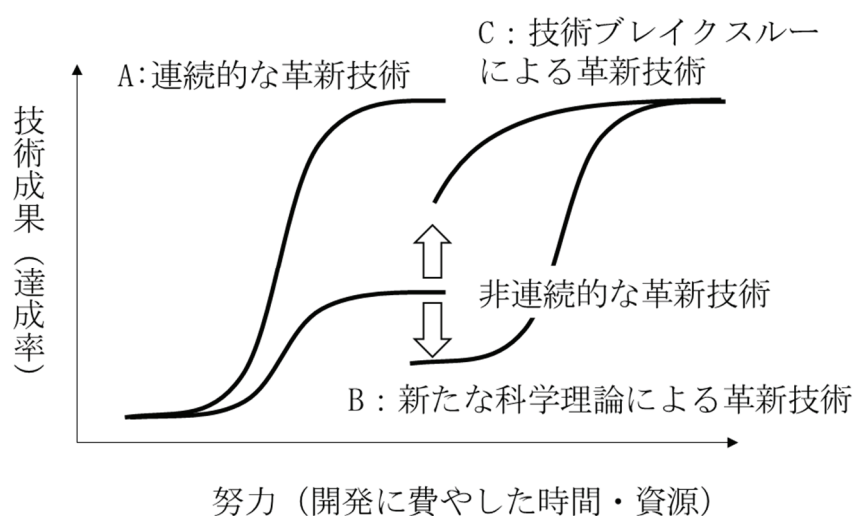
- ① 技術ブレイクスルーはどのようなプロセスを経て実現するか
- ② 技術ブレイクスルーを実現するために必要な要件は何か

8.1.2 第2章「先行研究と仮説モデル」

第2章では先行研究レビューにより技術ブレイクスルーの位置づけを明らかにした上で、プロセスモデルの仮説を提示した。

本論文における「技術」の定義は、Dosi (1982)、Arthur (2009)の定義におけるポイントを重ね合わせることと、本論文の目的により、「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、非連続的な革新技术を創造する現象 (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」と定義した。そして、連続的な革新技术 (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术 (山口, 2006) との区別をした。すなわち、本論文では革新技术を、Foster (1986) のS字カーブに基づいて横軸を開発に費やした時間・資源 (Effort、Funds)、縦軸を技術成果 (Performance) とした時に、以下の3つに類型化した (図8-1)。



(出所) Foster (1986)に基づいて筆者作成。

図8-1 技術ブレイクスルーの位置づけ (図2-4の再掲)

「A:連続的な革新技术」は1つのS字カーブで表される。次に、あるS字カーブが飽和状態になった後、新たな科学理論に基づいてより高い技術成果をもたらす新たなS字カーブで表されるのが、「B:新たな科学理論による革新技术」である。そして、あるS字カーブが飽和状態になった後に、そこから新たに飛躍的な技術成果をもたらすのが、「C:技術ブレイクスルーによる革新技术」である。そして、これらBとCは非連続な革新技术である。

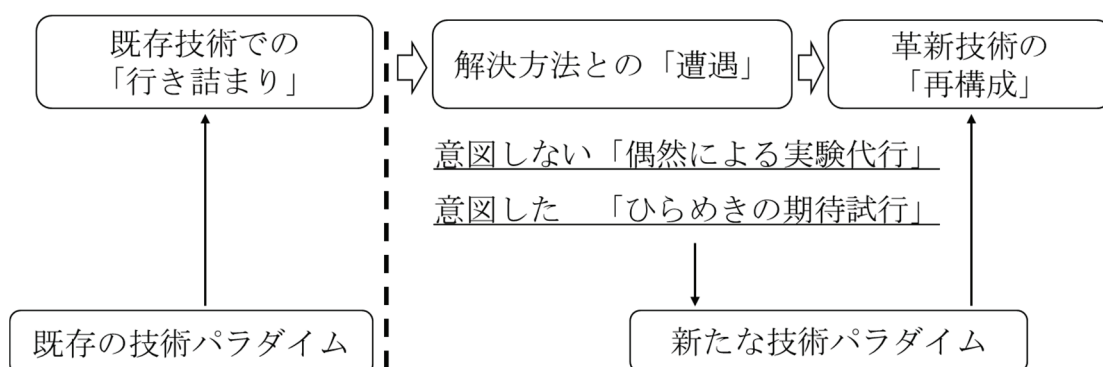
既存技術パラダイムに則った技術開発を行ったが目標を達成できない状態を、既存技術での「行き詰まり」と定義する。ある日、技術者は新たな解決方法と「遭遇」する。それは、既存技術から演繹的に考察して得られたのではなく、突然常識外れとも言えるべき非連続的な新たな解決方法を得られることに特徴がある。解決方法が見つかり、再現性や制御性といった技術変数間の因果関係を、詳細な追加実験により確認し、新たな技術パラダイムを構築し、最適な技術的方法や条件範囲を導出していく。これにより新たな革新技术が再構成される。従って、技術ブレイクスルーのプロセスの仮説モデルを、①既存技術での「行き詰まり」、②解決方法との「遭遇」、③革新技术の「再構成」とした。

解決方法との「遭遇」には、「解決方法が意図せず偶然に見つかる場合」と、「自ら着想したことを意図して実験検証した結果見つかる場合」の2つのパターンがあると考えられる。このうち前者については、先行研究において議論されており（伊丹,1986; 藤井,2002）、意図しない「偶然による実験代行」により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ことが明らかにされている（志賀,2015）。

一方で後者は、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である。このような意図した解決方法との遭遇プロセスについて、先行研究で言及された例を見ない。このため、本論文では上記の現象を、「ひらめきの期待試行（expected trial by inspiration）」と呼ぶこととした。こ

こでの「ひらめき」とは、「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」である。また、「期待試行」とは、「ひらめいた技術的な解決方法の成功を強く期待して、実際に実験してみようと考え、実行すること」である。

従って、技術ブレイクスループロセスの仮説モデルは図 8-2 のように表すことができる。



（出所）筆者作成。

図 8-2 技術ブレイクスループロセスの詳細仮説モデル（図 2-9 の再掲）

偶然からどのように新しい解決方法を得るかは、技術開発の中でも非常に重要なテーマである。しかしながら本論文では、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が技術開発の現場で求められることと、先行研究において十分に言及されていないことを考え併せて、「ひらめきの期待試行」の概念を中心に事例分析を行なうこととした。

8.1.3 第 3 章「事例研究」

第 3 章「事例研究」では、技術ブレイクスルーの新たな仮説導出のために事例研究を行なった。そこで、技術ブレイクスルーによって近年を代表するイノベーションに成功した典型的な事例である青色 LED 半導体材料開発に着目し、3 つの技術ブレイクスルー事例「均一 GaN 結晶」「GaN の p 型化」「InGaN 混晶」を調査した。

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板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。

均一 GaN 結晶に成功した赤崎と天野は 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 p 型化することはなかった。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成功しなかった。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、実験を試みた結果、p 型化することを確認した。

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、反応温度が低くてもガスが分解することがあるという化学の文献から、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。

8.1.4 第 4 章「仮説モデルの検証」

第 4 章では、第 2 章で提示した技術ブレイクスループロセスの仮説モデルで、第 3 章の事例を説明できることを確認した。

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は、「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」によるものであり、仮説プロセスモデルで説明できることを確認した。また、「ひらめきの期待試行」、について、以下の3つの含意を得られた。

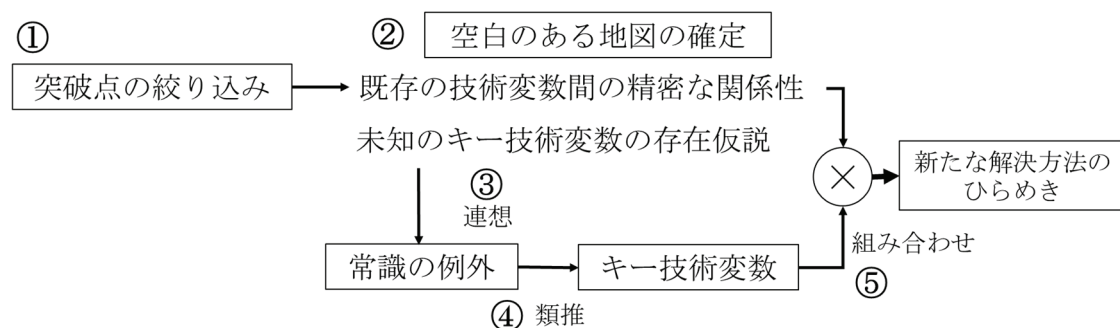
- ①「ひらめき」は「期待試行」の必要条件である。
- ②技術の「ひらめき」には「行き詰まり」での技術蓄積が必要である。
- ③新たな技術変数が「ひらめき」をもたらす。

8.1.5 第5章「ひらめきの期待試行」の成立要件

第5章では、本論文で最も重要な概念である「ひらめきの期待試行」の成立要件について以下の3つの観点で詳細に考察した。

- ① 「ひらめきの期待試行」の発生プロセスと成立要件。
- ② 技術の「ひらめき」のために必要な技術蓄積の中身、役割、駆動要件。
- ③ 新たな技術変数が得られるプロセス。既存技術の蓄積との関係。

まず、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」とした。そして、「ひらめき」のプロセスの仮説モデルを提示した（図 8-3）。



（出所）筆者作成。

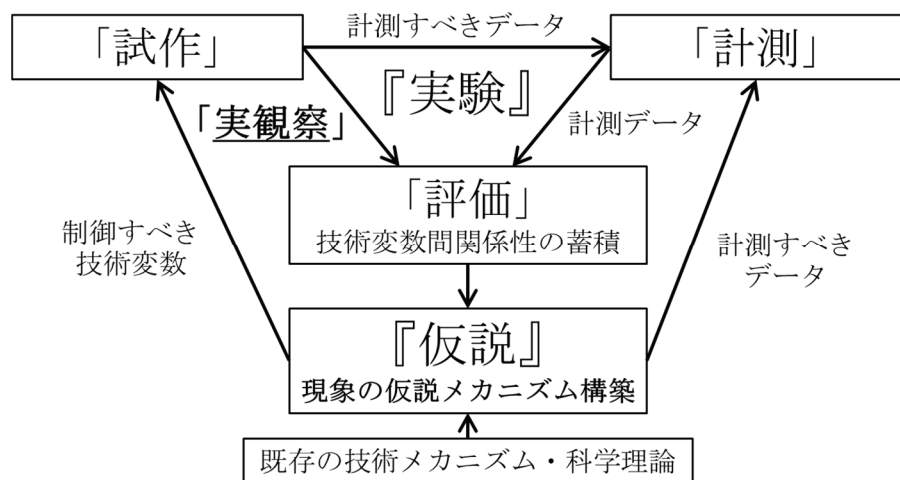
図 8-3 技術のひらめきモデル（図 5-2 の再掲）

すなわち、①「突破点の絞り込み」の結果、“既存の技術変数間の精密な関係性”が構築され、これによって“未知のキー技術変数の存在仮説”が立つ。これが②「空白のある地図の確定」である。一方で、“未知のキー技術変数の存在仮説”によって、③「常識の例外の連想」が誘発され、④「キー技術変数の類推」が起こる。その結果、⑤「“既存の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」によって、新たな解決方法がひらめく。

「突破点」とは、解決すべき根本課題の仮説であり、「絞り込み」とは、洗練の後に集中することである。技術変数とその組み合わせは無限に存在するため、適切な突破点に絞り込むことで、現実的に実験検証による技術変数間の関係性を解明し、「空白のある地図」を確定できる。突破点の絞り込みで重要なポイントは、「階層性」「掘り下げ」「再選択」の3つである。

「空白のある地図」の確定とは、既存の技術変数間の精密な関係性が明らかになっているにも関わらず、現象のメカニズムが未完成で、問題を解決できない状態である。そこに至るための要件は、「既存の技術変数間の精密な関係性」と「未知のキー技術変数の存在仮説」である。技術のひらめきのための「空白のある地図」の確定の役割は、「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るものかどうかわかること」である。

技術のひらめきに必要な「既存の技術変数間の精密な関係性」の精密化を駆動する要因は、仮説と実験（試作⇒計測⇒評価）のサイクルにおいて、既存技術やメカニズムからの予測と現実との差異情報である「実観察」、仮説検証サイクルを回すことによる「現象の仮説メカニズム構築」、1人が3役をこなすことで仮説検証が進む「1人3役」の3つが重要である（図8-4）。



(出所) 筆者作成。

図 8-4 技術開発の実験における情報の流れ (図 5-7 の再掲)

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といった 2 つの飛躍によって得られる。「常識の例外」とは、「当該の技術分野において常識的にはうまくいかないと推論できるが、例外的な効果がある事例や現象のこと」である。これは、既知の情報であるが、既存理論で説明できない例外現象であり技術メカニズムは不明である。また、連想のためのキーワードで重要なポイントは、「最大関心事」「抽象度」「オリジナル」の 3 つである。

一方の「キー技術変数」の類推は、現状の課題と「常識の例外」の 2 つの課題におけるボトルネックの「類似性」によって、解決の鍵となる技術変数のみを抽出することによって起こる。これには、尊敬する先輩技術者の経験、自らの経験、他分野の常識といった情報の信頼性と、メカニズム不明ゆえの短絡適用によるメカニズム不問が重要である。

「空白のある地図」が確定した後に、「キー技術変数」が得られると「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。「キー技術変数」が、「空白のある地図」の空白にぴったりだとわかるのは、「プラスワンの技術変数」「度外視されていた技術変数」の 2 つの理由によると考えられる。「プラ

スワンの技術変数」とは、既知の多くの技術変数に対して、新たなキー技術変数はたった1つであり、その組み合わせにおいて技術的推論が効きやすいことである。また、「度外視されていた技術変数」とは、実験の中で存在は認識しているが効果が無いと度外視していた技術変数であり、全く知らない技術変数ではないので、その組み合わせにおいて見当がつくということが言える。

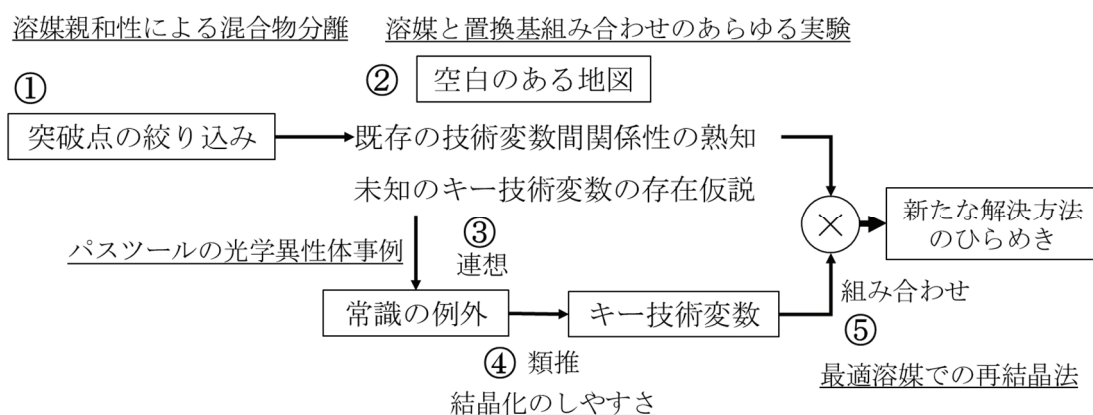
「ひらめきの期待試行」では、「ひらめき」の後「期待試行」をすることで、初めて解決方法と遭遇したと言える。技術の「期待試行」とは、「新たにひらめいた解決方法の成功を期待しながら実行すること」である。「ひらめき」だけでは、単なるアイデアのみであり、試行によって問題が解決できることを実証することに意味がある。また、「期待試行」の成功への強い確信は、「自前の理」と「実行可能性」によって裏打ちされている。「自前の理」とは、「着想した解決方法で成功できると考える自分なりの論理」である。これは、ひらめきの後付け論理であり、自分なりに強い成功の確信があり、考えれば考えるほど成功の確信が深まるものである。これは、論理的だがやってみないとわからず、既存理論で説明できないものである。「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。実行したことは無いが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）が少ないことがポイントである。

8.1.6 第6章「他事例への適用可能性の確認」

第6章「他事例への適用可能性の確認」では、技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説で他の事例を説明できるのかを確認した。HABの化学合成技術開発の事例を選択した理由は、第3章の青色LED半導体材料開発の事例で取り扱った無機材料と比較して、高い複雑性と科学理論構築の未熟さによって、「ひらめきの期待試行」が起こりにくいと考えられる有機材料で技術ブレイクスルーが起こったためである。

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、テトラアリアルチオフェンにジアリア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ないが、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、パスツールの「常識の例外」事例から、通常は用いられない「再結晶法」による位置異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（図 8-5）。



（出所）筆者作成。

図 8-5 HAB 位置異性体の混合物分離（図 6-6 の再掲）

このように、技術ブレイクスルーのプロセスモデルの仮説が、青色 LED 半導体技術開発に固有のものではなく、有機材料である HAB 化学合成の事例を説明可能であることを確認した。

8.1.7 第 7 章「技術開発マネジメントへの示唆」

第 7 章では、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。

総括して、技術ブレイクスルーを考えることは、既存技術の限界をいかに突破するかを考えることであった。そこで飛躍的な解決方法を得るためには、飛躍的なことを探すのではなく、むしろ既存の技術での技術蓄積を自ら徹底的にやりきることが大切であることがわかった。そして新たな解決方法のひらめきへの飛躍は新たな技術変数の獲得によってなされ、その徹底的な技術蓄積によってのみ、飛躍の動機と得られた解決方法による成功の確信は得られないということがわかった。このことは、技術開発の行き詰まりが起こった時に、すぐに安易に他の方法を探したくなる技術開発の現場に対して有効な示唆である。今後の論理深耕と実践での効果の確認が望まれる。

8.2 本論文の貢献

従来、非連続的な革新技術についての議論は多くある。それらは、「技術パラダイム転換」や「S 字カーブ」といった、非連続的な現象を可視化するという意味で大きな貢献があった。しかし、その非連続的な技術革新がどのように起こるのかというプロセスと要件に対しては十分な議論をされてこなかったように見え、新たな研究の余地があった。

そこで、本論文では、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。このことは、本論文による大きな貢献だと考えられる。以下に本論文の 4 つの貢献について言及する。

まず、新たな科学理論の登場による革新技術の開発プロセスを取り扱った研究は

あるが、技術ブレイクスルーに言及した先行研究はほとんど例を見ない。このため、革新技术開発のプロセスにおける技術ブレイクスルーの位置づけを明らかにするため、非連続的な革新技术には、新たな科学理論の登場によるものと、技術ブレイクスルーによるものの2つの類型があることを提示した。非連続的な革新技术の開発プロセスで従来主に議論されてきた新たな科学理論の登場による革新技术に対して、技術ブレイクスルーが異なる位置づけであることを明らかにすることで、イノベーション・プロセス研究分野においてより精密に革新技术プロセスを分析できるようになったと考えられる。これが1つ目の貢献である。

次に、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、「偶然による実験代行」「ひらめきの期待試行」の2つの類型を定義した。その上で「ひらめきの期待試行」に着眼し、プロセスと要件、それらをつなぐ論理について、事例研究から仮説を導出した。これまで明らかにされていなかった技術ブレイクスルーのプロセス、解決方法との遭遇のパターンを明示することによって、現実には起きている革新技术に対して、これまでより精密な現象観察をするための足掛かりができた。また、技術の「ひらめき」のプロセスの仮説モデルを提示したことで、現実の技術開発の中で新たな解決方法をひらめきやすくなることや、学術的に新たな概念を用いた分析が可能になることによって、イノベーション・プロセス研究の深耕の一助となり得ることが挙げられる。さらに「ひらめき」のメカニズムが明らかになることで、将来的に人工知能で「ひらめき」を起こすためのアルゴリズムを組む上での中心的な理論の1つになり得るとも考えられる。これが2つ目の貢献である。

「ひらめきの期待試行」による技術ブレイクスルーのプロセス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。これによって、技術者の技術ブレイクスルーをサポートするためのフレームを得られ、技術ブレイクスルーを起こしやすくなることが3つ目の貢献である。

本論文で中心的な事例である青色LED半導体材料開発は、その高いイノベーションの価値から、他の論文にも多く取り上げられている。本論文ではその技術ブレ

イクスルーのプロセスにフォーカスし、新たな仮説を導出することができた。高い価値を持つ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は、本論文の4つ目の貢献と考えられる。

ただし、本論文の位置づけは、非連続的な技術革新の一部である技術ブレイクスルーの、さらに意図した解決方法との遭遇について、新たな仮説を導出したに過ぎない。しかしながら、本論文は今後の技術革新プロセス研究における、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つのきっかけとして、貢献できるのではないかと考える。

8.3 今後の研究課題

本論文によって、これまで未解明であった非連続的な革新技术の開発プロセス研究の一部に、小さくはあるが価値ある風穴を開けられたように思う。現実の技術開発のプロセスにおいて起こっている現象は非常に複雑であり、その全容を語るにはまだまだ不十分である。さらに、現実的な技術開発マネジメントからの要請は非常に多く、多岐に渡り、そして深刻で判断しにくいものであるのに対し、本論文がカバーできる範囲は大平原の中の一本の木のようなものかもしれない。しかし、同分野の1つのベンチマークとなり得る道筋を描けたのではないかと信じている。

今後の課題としては、まず本論文で示した仮説の一般性の検討である。技術の「ひらめき」のプロセスモデルはあくまで単一事例による仮説であり、別の分野の事例で適用可能性を最低限確認したとは言え、その十分条件の検討や普遍性の確認が必要である。今後、この新たな概念に基づいて、他の事例研究を積み重ねることや、定量データ収集と分析による検証をすることが望まれる。

その他に、本論文でカバーしきれなかった実務にフォーカスしたミクロな観点として、技術開発の限界を感じた時、新たな科学理論によるジャンプと技術ブレイクスルーをどのように選択するのかといった研究課題があり得る。また、現実的に突破点の絞り込みの範囲をどうするか。技術変数間関係性の精密さをどのように判断するかといった、現場での線引きについての難しい研究課題が残っている。さらに

常識の例外とどのように出会い、キー技術変数をどのように類推できるのか等々、他にも多くの研究課題があり得る。

また、本論文は行為主体として実際に技術開発を行う技術者個人にフォーカスしたが、今後は個人と組織の相互作用、技術者の所属する組織間の相互作用へと、研究領域を拡げることができると考えられる。

本論文の最初のモチベーションは、革新技术の開発において、日々技術ブレイクスルーを目指し、真剣に取り組んでいる技術者の存在であった。新たな科学理論を待たず、技術ブレイクスルーによって既存技術の限界を突破することは、技術開発に携わる者にとっての悲願である。その中で偶然による結果から新たな解決方法を得ることはとても重要であることは間違いない。しかし本論文では、意図した技術の「ひらめき」によるブレイクスルーの高い価値に着目し、そのプロセスの仮説モデルについて深く考察を行った。このことは、技術開発に携わる技術者、およびそれらの管理者にとって、技術ブレイクスルー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につながるため、革新技术開発の成功の可能性を高めるために大きな意義がある。今後、本論文がベンチマークになることによって、それら革新技术開発の促進に貢献できることを期待している。特に、本論文で新たに提示した「ひらめきの期待試行」と「常識の例外」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る傾向が強い技術開発の現場で有効な示唆と考えられ、実践での効果の確認が望まれる。

最後に、本論文は、実践現場にとってより大きな関心があると考えられる、技術ブレイクスルーと意図した解決方法との「遭遇」にフォーカスした。しかし、意図する場合も意図しない場合のいずれも必然の技術蓄積が必要だと考えられる。伊丹（1986）は、意図しない現象との遭遇から起こる技術革新を「偶然を必然がつかまえる」と表現した。ある時起こる偶然を起点として、それまでの必然の技術開発がその大きな偶然を活かすからそのような表現になったのであろう。それに対し、本

論文の本質を一言で表すと「必然が偶然をつかまえる」ではないかと思いついた。すなわち、「ひらめきの期待試行」による技術革新は、必然的な技術開発の末に偶然をきっかけとしてひらめきが起こる。主語はどちらの表現も“必然”であり、文法上は同じ意味のように見える。しかし、そこには大きな2つの意味が隠されている。1つは、やはり“必然”が重要であり欠かせないこと。もう1つは、解決方法を明かす起点のウェイトが偶然にあるか、必然にあるかの違いである。前者については、技術開発において必然をおろそかにすると、いずれの遭遇パターンにおいても偶然を活かせないという示唆であるように思える。後者について、偶然が解決方法を明かす起点になるか、必然を飛躍させるきっかけであるかの違いを表しており、文章表現上の差は小さいようで、実際の意味の差はとても大きいと言えるのではないだろうか。

革新技術の開発はイノベーションの源泉である。ますます技術が発展し革新技術を生み出すことが難しくなっていく中で、今後革新技術が生まれるプロセスの研究が進み、大きなイノベーションをもたらすことに貢献することを期待している。そして、その中で本論文が1つの礎になり得るのであれば、幸いである。

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。
- 石井徹（2001）「常識の境界」『社会心理学研究』第 16 巻，第 3 号，pp.133-146。
- 伊丹敬之（2009）『イノベーションを興す』日本経済新聞出版社。
- 今井賢一編著、伊丹敬之他（1986）『イノベーションと組織』東洋経済新報社。
- 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。
- 内海京久（2017）『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-』法政大学 イノベーション・マネジメント No.14， pp.65-81。
- 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。
- 司馬正次（2003）『ブレークスルー・マネジメント』東洋経済新報社。
- 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。
- 新村出編（1991）『広辞苑第 4 版』岩波書店。
- 沼上幹（1999）『液晶ディスプレイの技術革新史 行為連鎖システムとしての技術』白桃書房。
- 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。
- 藤井大児（2002）「イノベーションと偶然性」『組織科学』、Vol.35、No.4：pp.68-80。
- 堀川裕司（2010）「科学的暗黙知が生み出すイノベーション」『組織科学』、Vol.4435、No.1：pp.60-73。
- 宮永博史（2006）『成功者の絶対法則 セレンディピティ』祥伝社。
- 三輪和久（2009）「飛躍を伴う発見における潜在的意識の関与 - 洞察問題解決研究

- からの知見ー』『計測と制御』、第 48 巻、第 1 号：pp.33-38。
- 山口栄一 (2004)『イノベーションの構造ーパラダイム破壊型イノベーションとは何かー』 ITEC Research Paper Series、04-13。
- 吉川弘之監 (1997)『技術知の本質 文脈性と創造性 (新工学知)』東京大学出版会。
- Abernathy, W.J. and J. M. Utterback. 1978. *Patterns of Industrial Innovation*, Technology Review, 80 (7), pp.40-47.
- Anderson, P., and M. L. Tushman. 1990. *Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model of Technological Change*. Administrative Science Quarterly, Vol. 35, No. 4, pp. 604-633.
- Anderson, Philip, and Michael L. Tushman. 1991. *Managing Though Cycles of Technological Change*. Research Technology Management, Vol. 34, No.3, pp. 26-31.
- 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』みすず書房、2011 年)
- Castellacci, Fulvio. 2008. *Technological paradigms, regimes and trajectories: Manufacturing and service industries in a new taxonomy of sectoral patterns of innovation*. Research Policy, Vol. 37, Issue 6/7, p978-994.
- Dosi, G. 1982. *Technological paradigms and trajectories*. Research Policy, 11; 147-162
- Foster, R. N. 1986. *Innovation: The Attacker's Advantage*, New York: Summit Books (大前研一訳 (1987)『イノベーション：限界突破の経営戦略』TBS ブリタニカ)。
- Gentner, D. 1983. *Structure-mapping: A theoretical framework for analogy*. Cognitive Science, 7, pp. 155-170.
- Kline, S.J. and N. Rosenberg. 1986. *An Overview of Innovation, in R. Landau and N. Rosenberg (eds) The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*, Washington D.C.: National Academy Press, pp. 275-304.
- Kohler, W. 1921. *Intelli-genzpru fungen an Menschenaffen*. 2nd ed. Berlin: Springer. (宮孝一訳『類人猿の智慧試験』岩波書店。)

- Kuhn, T. S. 1962. *The structure of scientific revolutions*. Univ. of Chicago Press. (中山茂
訳『科学革命の構造』みずず書房。)
- 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., and 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. 1958. *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*. Chicago,
University of Chicago Press. (長尾史郎訳『個人的知識 脱批判哲学を目指して』ハ
ーベスト社、1985 年)
- Polanyi, M. 1966. *The Tacit Dimension*, Doubleday, Garden City, NY. (高橋勇夫訳『暗黙
知の次元』ちくま学芸文庫、2003 年)
- Rosenberg, N. 1969. *The Design of Technical Change: Inducement Mechanisms and
Focusing Devices*, Economic Development and Cultural Change, vol. 18, pp. 1–24.
- Rosenberg, N. 1982. *Inside The Black Box: Technology and Economics*. Cambridge,
Cambridge University press.
- Schumpeter, J. A. 1926. *Theorie der wirtschaftlichen entwicklung*. 2. Aufl. Dunker &
Humblot. (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)
- Stefik, M. Stefik, B. 2004. *Breakthrough: Stories and Strategies of Radical Inovation*.
Massachusetts Institute of Technology. (鈴木浩監訳、岡美幸・永田宇征共訳『ブレイ
クスルー イノベーションの原理と戦略』オーム社、2006 年)
- Thorndike, E. L. 1898. *Animal intelligence*. Nature. Vol.58, Issue 1504, p. 390.
- Von Tunzelmann, Nick, Malerba, Franco, Nightingale, Paul, Metcalfe, Stan. 2008.
Technological paradigms: past, present and future, Industrial & Corporate Change.
Jun2008, Vol.17, Issue 3, p.467-484.

- Utterback, J. M, and W. J. Abernathy. 1975. *Dynamic model of process and product innovation*. Omega, Vol.3, Iss.6, p.639-656.
- Wallas, Graham. 1926. *The Art of Thought*, NewYork: Harcourt Brace.
- Yin, R. K. 1994. *Case study research*. Sage publications, Thousand Oaks, CA. (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. Advertising Age Classics Library. (今井茂雄訳『アイデアのつくり方』阪急コミュニケーションズ、1988 年)

事例論文一覽

①青色 LED 材料開発

- Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., and Akasaki, I. 1989., ***P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)***, Jpn. J. Appl. Phys. Lett. 28, L2112.
- H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda. 1986: Appl. Phys. Lett. 48, 353.
- H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda, Y. Ishii J. Lumi 40&41 .1988. 121-122 North-Holland, Amsterdam.
- H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide and N. Sawaki. 1989 . J. Cryst. Growth 98, 209.
- K. Hiramatsu, S. Ito, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi, and K. Oki. 1991. J. Cryst. Growth 115, 628.
- G. Mandel., 1963. ***Self-Compensation Limited Conductivity in Binary Semiconductors. I. Theory***, Phys. Rev. 134A, 1073-1079.
- H. P. Maruska and J. J. Tietjen, 1969. ***The Preparation and Properties of Vapor-deposited Single-crystalline GaN***, Appl. Phys. Lett., 15, pp. 327-329 .
- S. Nakamura, 1991. ***GaN Growth Using GaN Buffer Layer***”, Jpn. J. Appl. Phys., 30, pp. L1705-1707 .
- S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, 1992. ***Thermal Annealing Effects on P-Type Mg-Doping GaN Films***, Jpn J. Appl. Phys., 31, pp. L139-L142.
- S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mikai, 1993. ***p-GaN/n-InGaN/n-GaN Double-heterostructure Blue-light-Emitting Diodes***, Jpn J. Appl. Phys., 32, pp. L338-341.
- Jorg Neugebauer and Chris G. Van de Walle, *Role of hydrogen in doping of GaN*, 1996. Appl. Phys. Lett. 68 (13).
- 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.

- J. I. Pankove, E. A. Miller, and J. E. Berkeyheiser, 1971. *GaN Electroluminescence Diodes*, RCA Review, 32, pp. 383-385.
- S. Yoshida, S. Misawa, and S. Gonda, 1983. Appl. Phys. Lett. 42(5), 427-429.
- S. Yoshida, S. Misawa, and A. Itoh, 1975. Appl. Phys. Lett. 26, 461.
- S. Yoshida, et. al., 1975 『応用物理』 44 (11) 1210-1214.
- S. Yoshida, S. Misawa, Y. Fujii, S. Takada, H. Hayakawa, S. Gonda, and A. Itoh, 1979. J. Vac. Sci. Technol 16, 990.
- S. Yoshida, et. al., 1999 『応用物理』 68 (7) 780-786.
- 平松和政 (2013) 「基礎講座 - GaN のエピタキシャル成長の実現まで - 」『応用物理』 第 82 巻、第 5 号。
- 赤崎勇 (1992) 「私とブレークスルー GaN のヘテロエピタキシー—Empirical philosophy— 応用物理 60 周年記念特集号 応用物理とブレークスルー」『応用物理』 第 61 巻、第 4 号、382。

②HAB 化学合成技術開発

- Synthesis of Dragmacidin D via Direct C-H Couplings.** Debashis Mandal, Atsushi D. Yamaguchi, Junichiro Yamaguchi, Kenichiro Itami, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, in press.
- "Synthesis and characterization of hexaarylbenzenes with five or six different substituents enabled by programmed synthesis"** by Shin Suzuki, Yasutomo Segawa, Kenichiro Itami* and Junichiro Yamaguchi*, *Nature Chemistry* (2015).

インタビュー

2016 年 2 月 8 日 10:30-13:00 東京理科大学大学院イノベーション研究科にて

東北大学教授 松岡隆志氏

2016 年 10 月 14 日 13:00-15:00 名古屋大学大学院にて

名古屋大学教授 鬼頭雅弘氏

2016 年 11 月 25 日 11:30-12:30 名古屋大学 ItbM にて

名古屋大学教授 伊丹健一郎氏

2016 年 11 月 25 日 11:30-12:30 名古屋大学大学院にて

名古屋大学大学院後期博士課程 鈴木真氏