

博士学位論文

セレンディピティの構造研究

-偶然と必然の相互作用-

イノベーション研究科
イノベーション専攻

2015 年 2 月
志賀 敏宏

はじめに

セレンディピティについて研究しようと考えた動機、理由は大きく二つある。

第一に、我々は、計画的、戦略的に努力を積み重ねてイノベーションを成就しようと努力しているにもかかわらず、多くの、技術革新に成功したイノベーターが、偶然の作用を語るからである。「運が良かった」は、謙遜のレトリックかも知れないが、それにしても多くのイノベーターが、偶然、運の良さを語ると感じる。真実だろうか。そうだとしたら、大変興味深いことである。偶然と必然がいかに関係して、セレンディピティが成就するのだろうか。必然のあり方を工夫することにより、セレンディピティを幾分なりとも“操作”することができるのだろうか。

加えて、特に、画期的なイノベーションにおいて、セレンディピティが語られるように思うが、真実だろうか。真実ならば何故だろうか。

もし、上記の問いに答えることができれば、セレンディピティによる画期的なイノベーションを「意図する」という“矛盾”を目指せるだろうか。

第二に、現在、イノベーションの“マネジメント”として語られるものに、あまりに硬直的な内容も多いと思うからである。横並びで目標を設定し、願望による期限を出発点に希望的に逆算してマイルストーンを定める。そして、マイルストーン通りの日程と内容でなければ、すなわち失敗であるかのようなマネジメント……。それで済むのなら、ほとんどのイノベーションは「とっくの昔に成功している」のではないか。イノベーションが困難である原因のひとつは、セレンディピティの対極にあるような、こうしたマネジメントの“流行”ではないか。

以上の動機で、セレンディピティについて、その構造を中心に考えたのが本研究である。これは、思った通り、思ったより簡単なことではなかった。ずいぶん捉えたと思うと、次の瞬間、掌中からするりと滑り落ちるような感覚と共に考えて来た。

こうした私の悪戦苦闘を支えて下さった方々には感謝の申し上げようもない気持ちである。大幅に「遅れて来た」私を、よく指導していただけたと思いながらも、甘えてしまった。

その一番の被害者は伊丹敬之先生であろう。遅れて来たうえに、未だ不勉強である私を、文字通り叱咤激励して下さった。そのご恩に感謝の言葉を失う。加えて、先生の背中が多くを語られた。これだけの方が、これだけ真摯に集中して思索されるのだと知って、私も自ら叱咤せざるを得なかった。何よりも、創造の辛さと面白さをお教えいただいた。先生と違って、いたって凡庸な私にも感じられる喜びであり、大変ありがたく、本研究をここまで続けるエネルギー源となった。ありがとうございます。

加えて、東実先生、坂本正典先生、西野和美先生、松島茂先生、宮永博史先生には、本研究に関し、直接的に、様々な観点からのご指導をいただいた。研究の方法、論理、資料のご教示等その内容は様々であるが、どのご指導がなくても本研究はここにたどり着けていない。深い感謝の気持ちをお伝えしたい。

本研究での事例研究のインタビューについては、吉田佳一さん（島津製作所 常務執行役員）、入江正弘先生（立教大学未来分子研究センター副センター長）に大変丁寧なご対応をいただいたことを記しておきたい。

振り返れば10年前、不惑を過ぎた私をこの道に誘って下さった、前青森公立大学学長の佐々木恒男先生がいらっしゃらなければ今日の私の学びも思考もない。それは、青森公立大学教授 佐々木俊介先生（元 三菱総合研究所研究理事）のお蔭である。そして、それは20年勤務した三菱総合研究所の先輩にして大恩ある水島温夫さん（フィフティ・アワーズ代表取締役）がいらっしゃったからこそである。また、今回の学びへの道は、森健一先生（前東京理科大学 専門職大学院教授、元東芝 常務取締役）にお教えいただいた。

加えて、企業勤務20数年を振り返り、大野二郎先生（跡見学園女子大学教授、元三菱総合研究所）、内海和夫先生（東京工業大学総合研究院 研究参事、元三菱総合研究所）、中川一三夫さん（前日立プラズマパテントライセンシング取締役社長）からのご恩を痛感する。

自らの微力を強く感じながら、それでも今私がここにいることを思い、以上にお名前をあげた方々に、改めて、特に深く御礼申し上げたい。ありがとうございます。

2015年2月

志賀 敏宏

セレンディピティの構造研究

-偶然と必然の相互作用-

目次

| | |
|---|----|
| はじめに | 1 |
| 第1章 本研究の動機とリサーチクエスチョン | 1 |
| 1. 本研究の動機 | 1 |
| 2. 本研究の範囲と中核概念の定義 | 1 |
| 3. 本研究のリサーチクエスチョン | 2 |
| 第2章 本研究の方法論と本論文の構成 | 4 |
| 1. 本研究の方法論 | 4 |
| 2. 本論文の構成 | 5 |
| 第3章 先行研究の検討と本研究が目指す貢献 | 7 |
| 1. 先行研究の概要 | 7 |
| (1) セレンディピティ事例を複数紹介する研究 | 7 |
| (2) セレンディピティの成功要因に関する研究 | 7 |
| (3) セレンディピティの意義を提示する研究 | 8 |
| (4) セレンディピティにおける構造化への示唆・萌芽を示す研究 | 9 |
| (5) セレンディピティのモデル化に関する研究 | 9 |
| 1) プロセスのモデル化について | 10 |
| 2) 類型化モデルについて | 10 |
| 2. 本研究が目指す貢献 | 13 |
| (1) セレンディピティのプロセスモデル構築 | 13 |
| (2) セレンディピティの類型化モデル構築 | 13 |
| (3) セレンディピティのマネジメント可能性へのインプリケーション | 13 |

第4章 モデル構築・類型提案のための事例研究..... 15

| | |
|--|----|
| 1. 導電性ポリマー | 15 |
| (1) 偶然によるポリアセチレン薄膜の合成 | 15 |
| (2) ポリアセチレン薄膜合成法の確立とその応用 | 18 |
| (3) マクダイアミッド博士との出会いと導電性ポリマーの創造..... | 20 |
| (4) 偶然の出来事に対する白川の対応と思考・行動様式..... | 22 |
| 1) 失敗を放置せず着目した経緯と思考・行動様式..... | 23 |
| 2) 意義を把握した経緯と目的意識 | 24 |
| 3) 解析を可能とした経緯と知識蓄積、組織能力 | 24 |
| 4) 上記に通底する白川の基本認識 | 25 |
| 2. トランジスタ | 26 |
| (1) 本研究での考察対象と留意点..... | 26 |
| 1) 本研究での主たる考察対象 | 26 |
| 2) 本研究での考察に関する留意点 | 27 |
| (2) 電界効果型トランジスタの実験失敗と表面準位仮説..... | 29 |
| 1) 三人の物理学徒 | 29 |
| 2) 第二次世界大戦におけるレーダー技術の深耕と半導体..... | 33 |
| 3) ショックレーによる電界効果型トランジスタ構造仮説と失敗..... | 33 |
| 4) バーディーンによる表面準位仮説の提示..... | 35 |
| (3) 表面準位仮説の検証実験とそこでの偶然の生起..... | 37 |
| 1) 光起電効果の確認実験..... | 37 |
| 2) 低温での結露という偶然 | 37 |
| (4) 直接目的実験の加速化と電界効果型トランジスタの動作確認 | 39 |
| 1) The will to think, magic month | 39 |
| 2) Creative-Failure の意義：電界効果型トランジスタの動作確認 | 41 |
| 3) この後のトランジスタ創造に残された課題..... | 42 |
| (5) 点接触トランジスタの誕生 | 43 |
| 1) 高圧印加による予期せぬ酸化ゲルマニウムの形成 | 43 |
| 2) 過剰洗浄による酸化膜の消失と点接触トランジスタの誕生..... | 43 |
| 3. ペニシリン..... | 46 |
| (1) フレミングによる抗生作用の有効性に関する仮説構築..... | 46 |
| 1) 医学者への道と第一次世界大戦への従軍経験 | 46 |
| 2) リゾチームの発見と有効な抗生作用の存在に関する潜在的認識 | 48 |
| (2) ブドウ球菌変異株の培養実験中の偶然の生起 | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 1) 細菌大全への執筆のためのブドウ球菌変異株の培養実験 | 51 |
| 2) 青黴によるブドウ球菌の繁殖抑制作用の発見 | 52 |
| 3) 青黴によるブドウ球菌の繁殖抑制という偶然の稀少さ | 56 |
| (3) ペニシリンの再発見と実用化への道 | 58 |
| 4. アリセプト, | 60 |
| (1) アルツハイマー型認知症とコリン仮説 | 60 |
| (2) コリン仮説の採用とタクリン誘導体での失敗 | 62 |
| (3) 実験・評価範囲の拡大による偶然の結果の取り込み | 63 |
| (4) 実用新薬の開発 | 66 |
| (5) 実験・評価範囲の拡大と杉本の「マイ・ライブラリー志向」 | 68 |
| 第5章 意図せざる「実験代行」を核心とするプロセスモデル構築 | 71 |
| 1. プロセスモデル検討の枠組み | 71 |
| 2. 偶然：意図せざる「実験代行」ステージ | 72 |
| (1) 意図せざる実験代行の関与しないイノベーションのプロセスモデル | 72 |
| (2) 意図せざる実験代行の関与するモデル | 75 |
| (3) 意図せざる「実験代行」ステージの二面性（外形と内容） | 78 |
| 1) 不合理な外形の顕在 | 78 |
| 2) 合理的な内容（因果関係）の潜在 | 79 |
| 3. 事前必然1：「仮説構築」ステージ | 80 |
| (1) 仮説構築ステージの内容と作用 | 81 |
| (2) 仮説構築ステージの意義 | 82 |
| 4. 事前必然2：意図的な「実験」ステージ | 84 |
| (1) 実験ステージの内容と作用 | 84 |
| (2) 実験ステージの意義 | 85 |
| 5. 事後必然：「論理抽出」ステージ | 86 |
| (1) 着眼 | 87 |
| (2) 因果解析 | 89 |
| 6. まとめとプロセスモデルによる事例研究の確認 | 90 |
| (1) セレンディピティによるイノベーションのプロセスモデルのまとめ | 90 |
| (2) 事例研究の確認 | 91 |
| 1) 導電性ポリマー | 91 |

| | |
|---|------------|
| 2) トランジスタ | 92 |
| 3) ペニシリン | 93 |
| 4) アリセプト | 94 |
| 第6章 駆動要因による類型化モデル構築 | 96 |
| 1. 主たる駆動力による類型化 | 96 |
| (1) 着眼駆動型 | 97 |
| (2) 実験駆動型 | 98 |
| (3) 仮説駆動型 | 98 |
| 1) 仮説構築が実験代行を駆動する強い駆動要因となる場合 | 98 |
| 2) 仮説構築が論理抽出を駆動する強い駆動要因となる場合 | 98 |
| 2. 各ステージの駆動作用の詳細検討 | 99 |
| (1) 仮説構築ステージの駆動作用 | 99 |
| 1) 仮説構築の素晴らしさによる実験代行の誘引（強い駆動作用） | 99 |
| 2) 仮説構築の素晴らしさによる論理抽出の促進（強い駆動作用） | 100 |
| 3) 仮説構築の素晴らしさによる実験の起動（弱い駆動作用） | 100 |
| (2) 実験ステージの駆動作用 | 101 |
| 1) 実験の執拗さによる論理抽出の起動（強い駆動作用） | 101 |
| 2) 実験の執拗さによる実験代行の誘引（弱い駆動作用） | 102 |
| (3) 論理抽出ステージへの駆動作用 | 102 |
| 1) 第一の駆動要因による駆動作用 | 102 |
| 2) 論理抽出ステージでの自律的駆動作用 | 103 |
| 3. 類型化モデルの事例研究への適用と類型化モデルの吟味 | 104 |
| (1) 導電性ポリマー | 104 |
| (2) トランジスタ | 105 |
| 1) 仮説構築ステージの駆動作用 | 105 |
| 2) 実験ステージの駆動作用 | 106 |
| 3) 論理抽出ステージへの駆動作用 | 107 |
| (3) ペニシリン | 107 |
| 1) 仮説構築ステージ | 107 |
| 2) 論理抽出ステージ | 108 |
| (4) アリセプト | 109 |
| 1) 仮説構築ステージ | 109 |
| 2) 実験ステージ | 110 |

| | |
|---|------------|
| 3) 論理抽出ステージ..... | 111 |
| (5) 事例の類型ごとの駆動要因とその作用に関する評価..... | 111 |
| (6) 類型化モデルの意義の吟味 | 113 |
| 第7章 セレンディピティモデルの普遍性検討 | 116 |
| 1. 着眼駆動型..... | 116 |
| (1) MK 磁石..... | 116 |
| (2) 電子レンジ..... | 118 |
| (3) ピッチ系炭素繊維..... | 119 |
| (4) チョクラルスキー法..... | 120 |
| 2. 実験駆動型..... | 123 |
| (1) リュープロレリン..... | 123 |
| (2) リブリウム..... | 126 |
| (3) イミプラミン..... | 127 |
| (4) 垂直磁気記録媒体..... | 128 |
| 3. 仮説駆動型..... | 130 |
| (1) 高分子質量測定法..... | 130 |
| (2) フォトクロミズム..... | 135 |
| (3) エサキダイオード..... | 138 |
| (4) IGZO 液晶の省電力駆動..... | 140 |
| (5) MnAlC 磁石..... | 142 |
| (6) ネオジム磁石..... | 143 |
| 4. モデルの普遍性確認のまとめと事例からの示唆事項 | 146 |
| (1) 着眼駆動型..... | 146 |
| (2) 実験駆動型..... | 146 |
| (3) 仮説駆動型..... | 147 |
| (4) 本研究のモデルの普遍性に関する結論 | 149 |
| 第8章 セレンディピティのマネジメントへの示唆 | 150 |
| 1. セレンディピティの駆動類型と駆動力..... | 150 |
| (1) 着眼駆動型..... | 150 |
| (2) 実験駆動型..... | 151 |
| (3) 仮説駆動型..... | 151 |

| | |
|---|------------|
| 2. 仮説構築ステージのマネジメント | 152 |
| (1) 求め続けるに値する本質的な目的を持つ | 152 |
| (2) 本質を問う、前提を見直す創造的仮説を構築する | 154 |
| (3) 不確かな推察によらず、事実立脚して素朴に仮説を採用する | 155 |
| 3. 実験ステージのマネジメント | 156 |
| (1) 執拗な実験と実験好きの重用 | 156 |
| (2) 実験・評価範囲の柔軟な設定とそれを支える評価の感度・効率向上 | 157 |
| 4. 論理抽出ステージのマネジメント | 158 |
| (1) 着眼 | 158 |
| 1) 着眼の根本動機としての強い目的意識 | 159 |
| 2) 偶然の意外な結果を機会・チャンスと考える | 161 |
| 3) 偶然の意外な結果をありのまま観察する | 162 |
| 4) 常に因果、原因を探求する | 164 |
| (2) 因果解析 | 164 |
| 1) 焦点化された専門的知識と解析能力 | 164 |
| 2) 分野横断的な幅広い知識と解析能力 | 165 |
| 3) 組織・体制・設備の条件整備 | 166 |
| 5. セレンディピティの可能性を念頭においたマネジメントの例示的素描 | 166 |
| (1) 仮説構築ステージ：目的設定と仮説構築 | 167 |
| 1) 目的設定 | 167 |
| 2) 仮説構築 | 168 |
| (2) 実験ステージ：実験と評価 | 169 |
| 1) 実験計画と実験 | 169 |
| 2) 実験・評価範囲の変更・拡大 | 170 |
| (3) 論理抽出ステージ：着眼と因果解析 | 170 |
| 1) 着眼 | 171 |
| 2) 因果解析 | 172 |
| 6. セレンディピティを念頭においた良いマネジメント（まとめ） | 173 |
| (1) 仮説駆動型を念頭においた場合の良いマネジメント | 173 |
| (2) 実験駆動型を念頭においた場合の良いマネジメント | 173 |
| (3) 駆動類型によらず、共通する論理抽出ステージでの良いマネジメント | 174 |
| (4) セレンディピティを念頭においた良いマネジメントを考える意義 | 174 |

| | |
|---|-----|
| 第9章 結言 | 176 |
| 1. セレンディピティの存在 | 176 |
| 2. セレンディピティにおける偶然と必然 | 177 |
| (1) セレンディピティにおける偶然 | 177 |
| (2) セレンディピティにおける必然 | 177 |
| (3) セレンディピティにおける偶然と必然の相互作用 | 177 |
| 1) 「仮説構築」ステージが「実験」ステージに果たす駆動作用 | 177 |
| 2) 「仮説構築」ステージが「実験代行」ステージに果たす駆動作用 | 177 |
| 3) 「仮説構築」ステージが「論理抽出」ステージに果たす駆動作用 | 178 |
| 4) 「実験」ステージが「実験代行」ステージに果たす駆動作用 | 178 |
| 5) 「実験」ステージが「論理抽出」ステージに果たす駆動作用 | 178 |
| 6) 「論理抽出」ステージが自律的に果たす駆動作用 | 178 |
| 3. セレンディピティのプロセスモデル | 179 |
| 4. セレンディピティの駆動力による類型化と類型化モデル | 179 |
| 5. セレンディピティのプロセスモデル、類型化モデルの普遍性確認 | 179 |
| 6. セレンディピティのマネジメント可能性 | 179 |
| 7. 本研究の主たる貢献と今後の研究に関する展望 | 180 |
| (1) 本研究の貢献は、セレンディピティを可視化する枠組みの提示である | 180 |
| (2) 今後の研究に関するミクロ視点、マクロ視点での展望 | 180 |
| 1) ミクロな視点でのセレンディピティの研究 | 180 |
| 2) マクロな視点でのセレンディピティの研究 | 181 |
| (3) セレンディピティに関する構造的理解の枠組みとしての本研究の位置づけ | 182 |

図表目次

| | |
|---|-----|
| 図 4-1 ポリアセチレン薄膜の繊維形状 | 17 |
| 図 4-2 銀色の金属光沢を有するポリアセチレンフィルム | 21 |
| 図 4-3 ショックレーの実験の概念図 | 34 |
| 図 4-4 電界効果型トランジスタの原理実現の構造 | 39 |
| 図 4-5 三人のノートの記述量 | 41 |
| 図 4-6 点接触トランジスタ | 44 |
| 図 4-7 リゾチームの殺菌作用を確認する培養器 | 49 |
| 図 4-8 フレミングがプライスに示した培養器 | 53 |
| 図 4-9 フレミングの実験ノートの描画 | 53 |
| 図 4-10 フレミングの実験機 | 55 |
| 図 4-11 1928 年ロンドンの気温推移（最高 - 最低気温） | 58 |
| 表 4-1 創薬研究に関わる機能（セクション） | 60 |
| 図 4-12 エーザイ筑波研究所の組織体制 | 61 |
| 図 5-1 プロセスモデル検討の出発点 | 71 |
| 図 5-2 意図的なプロセスのみからなるイノベーションモデル | 73 |
| 図 5-3 意図せざる「実験代行」の関与するモデル | 76 |
| 図 5-4 実験代行ステージの二面性（外形と内容） | 78 |
| 図 5-5 仮説構築ステージの活動内容 | 81 |
| 図 5-6 実験ステージの活動内容 | 84 |
| 図 5-7 論理抽出が偶然の実験代行に対してなす作用 | 87 |
| 図 5-8 論理抽出ステージの活動内容 | 87 |
| 図 5-9 意図せざる「実験代行を核心とする」プロセスモデル | 90 |
| 図 5-10 プロセスモデルによる導電性ポリマー事例の記述 | 91 |
| 図 5-11 プロセスモデルによるトランジスタ事例の記述 | 92 |
| 図 5-12 プロセスモデルによるペニシリン事例の記述 | 93 |
| 図 5-13 プロセスモデルによるアリセプト事例の記述 | 95 |
| 図 6-1 駆動要因による類型化 | 97 |
| 図 6-2 仮説構築ステージの駆動作用 | 99 |
| 図 6-3 実験ステージの駆動作用 | 101 |
| 図 6-4 論理抽出ステージへの駆動作用 | 103 |
| 表 6-1 類型ごとの事例の駆動要因・作用 | 112 |
| 図 6-5 各類型の位置づけ | 114 |
| 図 7-1 MK 磁石における偶然と必然の相互作用 | 117 |
| 図 7-2 電子レンジにおける偶然と必然の相互作用 | 118 |
| 図 7-3 ピッチ系炭素繊維における偶然と必然の相互作用 | 120 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 図 7-4 チョクラルスキー法..... | 121 |
| 図 7-5 チョクラルスキー法における偶然と必然の相互作用 | 122 |
| 図 7-6 リュープロレリンにおける偶然と必然の相互作用 | 125 |
| 図 7-7 リブリウムにおける偶然と必然の相互作用 | 127 |
| 図 7-8 イミプラミンにおける偶然と必然の相互作用 | 128 |
| 図 7-9 垂直磁気記録媒体における偶然と必然の相互作用 | 129 |
| 図 7-10 田中が観測したスペクトラム | 133 |
| 図 7-11 高分子質量測定法における偶然と必然の相互作用 | 134 |
| 図 7-12 アゾベンゼンを主鎖に含む高分子..... | 135 |
| 図 7-13 ジアリアルエテンのフォトクロミック反応 | 136 |
| 図 7-14 フォトクロミズムにおける偶然と必然の相互作用 | 137 |
| 図 7-15 エサキダイオードにおける偶然と必然の相互作用 | 139 |
| 図 7-16 IGZO 液晶における偶然と必然の相互作用 | 141 |
| 図 7-17 MNALC 磁石における偶然と必然の相互作用 | 142 |
| 図 7-18 ネオジム磁石における偶然と必然の相互作用..... | 144 |
| 図 7-19 永久磁石のエネルギー積の年次変化 | 145 |
| 表 7-1 偶然の実験代行結果と解析力の特徴 | 146 |
| 表 7-2 実験・評価範囲拡大の内容とタイミング | 147 |
| 表 7-3 仮説構築での想定とセレンディピティの結果..... | 148 |
| 図 8-1 駆動要因による類型化（図 6-1 再掲） | 151 |
| 表 8-1 セレンディピティを念頭においた良いマネジメント | 173 |

第1章 本研究の動機とリサーチクエスチョン

1. 本研究の動機

偶然、意図しない¹現象がイノベーションに大きく関わると言われることがある。それは、本当だろうか。必死に意図的な努力を積み重ねることによって、やっと実現できるイノベーションに偶然が関与するのだろうか。偶然が大きく関与したとされる場合、セレンディピティと呼ばれるが、セレンディピティは存在するのだろうか。

もし、セレンディピティの存在が真実ならば、偶然はイノベーションのプロセスのどこでどのように作用し、どのような効果を有するのだろうか。偶然の対極にあると考えられる必然（意図的な営為）は、イノベーションのどこでどのように作用し、どのような効果を発揮するのだろうか。その結果として、いかにしてイノベーションが成就するのだろうか。

また偶然と必然の絡み合いの望ましい姿を得ることによって、セレンディピティによるイノベーション促進の指針が見出せるだろうか。

特に大きな価値を有したイノベーション、例えばペニシリンやトランジスタの発見、発明に偶然が大きな関与をしているならば、そのプロセスを明らかに、セレンディピティによるイノベーション促進の指針を得ることで、我々はより価値の大きなイノベーションを企図していけるのではないか。

これらの探究、問題意識が本研究の動機である。

2. 本研究の範囲と中核概念の定義

本研究は、次に示すイノベーションの定義に則って行う。

「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」（伊丹 2009, p. 2）

「技術革新の結果として」と限定して、それに関連するセレンディピティに研究対象を絞り込む。同時に、「本研究は、イノベーションの成立から普及プロセスまでの全体過

¹ 本研究で「意図しない、意図せざる」というのは、日常的な言語表現としての「意図した通りでない」という意味である。Merton (1936)、沼上 (2000, p. 20) らによる社会学・経営学の専門用語 (unanticipated) としての語義、概念をさすものではない。

程を対象とするのではなく、技術革新の成立プロセス²に研究対象を焦点化」する。研究対象の焦点化によりその内容を深耕する。

また、定義後半に示される価値、意義が明らかになった事象に研究対象を限定する。

加えて、本論文では、セレンディピティの定義を次の通りとする。

偶然が重要な契機となり、その結果に着目し価値のあるものを見つけること³

そして、偶然とその反対概念である必然の意味を次の意味で用いる。

偶然：制御できない⁴、意図通りでない

必然⁵：制御できる、意図通りである

3. 本研究のリサーチクエスチョン

本研究は、後述する先行研究の成果⁶にも基づき、セレンディピティにおいて、偶然と必然が両者とも必須な成立要因としての役割を果たす、「絡まり合う」ことを重要な基本認識としている。偶然と必然の絡まり合ったセレンディピティによるイノベーションがなぜ起こるのかという出発点となる問いに即して、偶然と必然がそれぞれ、セレンディピティによるイノベーションのプロセスでいかに作用し、いかなる効果を発するのか、ということが本研究のリサーチクエスチョンである。

偶然と必然に二分して具体的に示すと次の通りである。セレンディピティにおいて、

①a-いかなる偶然が

①b-セレンディピティのプロセスのどこで

①c-どのように作用し、どのような効果を有するか

②a-いかなる必然が

②b-セレンディピティのプロセスのどこで

②c-どのように作用し、どのような効果を有するか

以上を見ることは、当然に

² 量産化過程以降を対象としていない。

³ OEDの定義のように「能力」とする考え方も示されている。本研究では、特段にその必要はないと考え、極力簡明な定義とする。The faculty of making happy and unexpected discoveries by accident. Also, the fact or an instance of such a discovery (OED).

⁴ 制御以前に予測すらできない場合を含む。

⁵ 以下で、必然的な営為を「必然」と省略している場合がある（特に形容詞先行の場合）。

⁶ 伊丹（1986），p. 34。

③a-いかなる偶然と必然が

③b-セレンディピティのプロセスのどこで

③c-どのように相互作用し、どのような効果を有するか

という問いとなる。これら問いへの答え全体が、セレンディピティがなぜ、いかに起こるのかを説明し、②、③に答えようとすることがセレンディピティの活用/促進の処方箋に繋がることを想定している。

第2章 本研究の方法論と本論文の構成

本章では、はじめに本研究の方法論を記す。加えて、本研究の結果を表すための本論文の全体構成を記述する。

1. 本研究の方法論

本研究の骨格をなす方法論とアウトプットは、「セレンディピティによるイノベーションの実態観察」→「セレンディピティによるイノベーションの構造に関する『仮説』の構築」→『『仮説』の妥当性、普遍性の吟味」→「一連の検討から抽出し得るインプリケーションの提示」である。「実態観察」は、詳細な事例研究による。

「仮説」の第一の内容は、セレンディピティによるイノベーションの「プロセスのモデル化」である。ここで、リサーチクエスションに即して、偶然と必然がどのように相互作用してイノベーションが成就するかに関する「標準的な因果プロセス」を描く。「仮説」の第二の内容は、セレンディピティにおけるイノベーションを特に駆動する「駆動要因による類型化モデル」である。セレンディピティによるイノベーションにおいて、偶然、必然の内、特に中核的な駆動要因を抽出して、それをモデル化する。

第一のモデルと第二のモデルには次の二つの関係がある。

- ① 第一のモデルに即して、セレンディピティのプロセスを観察することにより、その一般的な因果の流れと駆動力の核心を、統一的に見出し得る。
- ② 第一のモデルの一般的な理解に、第二のモデルによる類型的な理解を加えることにより、セレンディピティを一般性と個別性の両面から記述するモデル体系を得る。

『仮説』の妥当性、普遍性の吟味は、「プロセスモデル及び類型化モデル」と「セレンディピティによるイノベーション実態」の間の整合性、噛み合わせの確認である。ここでは、多様な14事例を対象に実態を検討する。

まず、プロセスモデルと類型化モデルがそれぞれの実態を説明し得ることを確認する。モデルが妥当であれば、特段の例外を除き、そのモデルの範囲内で実態を説明し、理解し得るであろう。合わせてそれぞれの成功要因や偶然、必然の意義が、プロセスモデルと類型化モデルによって、より深く、納得して理解できることを確認する。

ここまでで、セレンディピティによるイノベーションに関するプロセスモデルと類型

化モデルをセレンディピティの理解と活用に資するものにすることを目標とする。それによって、今後のセレンディピティ研究の基盤を構築すること、また実践におけるセレンディピティ成就に向けての「上手な対応方法」を見出したい。

加えて、多様な複数事例を対象としてモデルの妥当性、普遍性の確認を行うことにより、モデル構築段階までには、抽出し得なかった、「セレンディピティによるイノベーションの実態理解への示唆」と「セレンディピティのマネジメント可能性へのインプリケーション」を得ることができると考える。

セレンディピティによるイノベーションは、その定義によって偶然が介在するので、完全に操作可能なものではあり得ない。しかし、可能な限り、セレンディピティによるイノベーションの操作可能性を高める方法を模索する。

2. 本論文の構成

第1章は、既に記したように、「本研究の出発点の吟味」である。すなわち、本研究の動機、スコープと中核となる概念の吟味、リサーチクエスションを示す。

第2章（本章）は、本研究の方法論と論文全体の構成を示す。

第3章は、先行研究の検討を踏まえた上で、本研究が目指す貢献について述べる。

第4章は、セレンディピティによるイノベーションの4事例につき、詳細な事例研究を行う。この4事例は、モデル構築等セレンディピティの本質を考える上で、本研究の重要な指針となるものである。従って、プリサーベイの上、本研究でのイノベーション、セレンディピティの定義に則り、次の観点を重視して選択した。

①技術革新としての意義が大きいもの

②人間の社会生活の変革の程度の大きいもの

③イノベーションとして高度の必然的営為を前提としつつ偶然の果たした意義を考えるに値するもの

④セレンディピティの類型化を考えるに資する多様性を有する組み合わせとなるもの

加えて、文献レベルで詳細な情報が収集可能であるという条件も満たしつつ、できれば、あまり古くない⁷事例、そして、化学、物理、生命科学（医学・薬学）の分野に広が

⁷ 100年以内、できれば20世紀半ばから後半以降を条件と考えた。その理由は、①今後の科

ることを意識した。

4 事例の事例研究の方法論は、事象の詳細な因果関係にそって、できるだけその偶然と必然を抽出し、その作用、相互作用がいかにセレンディピティによるイノベーションの成就に繋がるかの分析・解明である。

第5章は、セレンディピティのプロセスモデルの構築である。できるだけ、「セレンディピティの核心—それを排除したらセレンディピティでなくなる、あるいはセレンディピティが成就しなくなる—」に焦点化することを重視した。合わせて、第4章の事例研究から、セレンディピティによって創造的なイノベーションが成就するためには、偶然が生起するより前の人為的な活動、特に仮説の持ち方、その質・量に重要な意義があると認識したので、その点を重視したプロセスモデルを構築した。

第6章は、セレンディピティの類型化モデルの構築である。ここでは、第5章の枠組みにそって、セレンディピティによるイノベーションのどこにセレンディピティ実現の駆動力があるのかを検討し、その駆動力の作用を考察した。その上で、第4章の事例も念頭におきつつ、その駆動力の内容と駆動力による類型化を行い、セレンディピティの類型化モデルを構築した。その後、第4章の事例研究に類型化モデルを適用した。

第7章は、二種類のセレンディピティモデルの普遍性の確認である。新たに、14の事例につき、予めモデルに従って仮説的に類型化した上⁸で、その事例をプロセスモデル、類型化モデルの枠組みに従って検討、吟味した。それにより、二種類のモデルの妥当性と普遍性を確認した。合わせて、モデルの枠内での各事例の特徴、類型内のバリエーションに関わる事項を抽出、整理した。

第8章は、以上の全体から得られるインプリケーション、具体的にはセレンディピティのマネジメントへの示唆を求め、記述した。

第9章は、結言であり、本研究のリサーチクエスションに関する結論と本研究の貢献、本研究の意義とそこから得られる今後の課題を述べた。

学・技術を基にするセレンディピティを考えるための参考とするため、②資料の信頼性を求めるからである。

⁸ 個々の内容の検討前の類型化は仮説的な類型化であるが、検討結果を踏まえて、この類型化は妥当であることを確認した。

第3章 先行研究の検討と本研究が目指す貢献

1. 先行研究の概要

(1) セレンディピティ事例を複数紹介する研究

先行研究の第一のタイプが、セレンディピティ事例を複数概説する研究群である。Shapiro (1986) , Robert (1989) が、事例の豊富さ等からそれを代表する先行研究と考えられる。

前者は、X線の発見、ペニシリンの発見等7つの事例を紹介している。各事例は、20 頁程度に短くまとめられ、本書の主眼は、「イノベーションの成立には、(意外にも)偶然の関与がみられることも多い」という、セレンディピティの初期研究として、その偶然性をやや強調する⁹メッセージの表明であるように読み取れる。「はじめに」にも、セレンディピティの「物語性」が述べられている。

後者は、セレンディピティの範囲を「偶然の契機による潜在的思考の刺激による創造」の範囲にまで拡大し、アルキメデスによる入浴中の体積測定原理の発見にはじまり、ノーベルによるダイナマイトの発明からポスト・イットの発明まで40余りの事例を取り上げており、それぞれの事例の記述は極めて簡単な内容に留まっている。

従って、これらの先行研究には、セレンディピティには偶然と必然が存在しているという以上の構造分析はほぼ見られず、またやや偶然性を強調した物語が描かれている。本研究は、これらの先行研究を時に参考資料とはしながらも、事例のより仔細な観察に基づく、偶然と必然の絡まり合いーセレンディピティの構造分析を行おうと考えるものである。

(2) セレンディピティの成功要因に関する研究

先行研究の第二のタイプが、セレンディピティにおける創造と成功の要因抽出・分析及び、セレンディピティ事例からの教訓を求める研究群である。

澤泉 (2002)、日野原 (2005)、宮永 (2006) が成功要因の提示の充実度等からこの先行研究の中で重要なものと考えられるが、その検討対象・アプローチ方法は各様である。澤泉は、セレンディピティ概念の紹介から概念の沿革、日常事例の紹介を含み、

⁹ パスツールの「チャンスは、待ち構えた知性の持ち主だけに好意を示す」という言葉も紹介されており、偶然だけでセレンディピティが成立するとの主張ではない。

まとめとして成功要因や方法論を語っている。幅広いが焦点が絞られていない憾みがある。日野原は、豊かな人生経験に基づき、人生における運の意義やそれを引き寄せるコツに関して述べている。含蓄を感じるが科学的アプローチを意識した内容ではない。

それらに対し、宮永は、タイトルの「成功者の絶対法則」が示すように、一見事例から発見的、経験的に（のみ）その成功要因を語っているようでありながら、本研究の立場から見ると、その背景にセレンディピティの構造が意識されているように読み取れる。「偶然をつくりあげるような下地（宮永 2006, p. 23）」、『『想定外』を考慮しておくことの重要性（同前, p. 115）」、「誰にでも訪れる『セレンディピティ（同前, p. 41）』、『偶然のひらめき』が生まれる瞬間（同前, p. 147）」とセレンディピティの全体構造を示唆するキーワードが本書の構成の骨格をなしていると考ええる。

従って、帰結されるセレンディピティの成功要因も、「想定外の機会のほうがはるかに大きい」－本研究での事前必然のあり方の議論と平行する論点、「素人発想」－本研究での事後必然と並行する内容である「偶然の機会に気が付くためには素人発想が大切」が示される等、背後にあるモデルを想定し得る議論がなされている。

以上から、このタイプの先行研究によって、次の二つの観点から本研究を吟味する示唆が得られると考える。第一に、これらの先行研究が示す「セレンディピティの成功要因」を本研究のインプリケーションと比較検討し、本研究の妥当性を検討し得る。第二に、特に宮永が非明示的に示している構造を、本研究のモデル化・類型化の参照材料、検証材料とすることである。

なお、本類型の研究として、Rond & Morley (2010)、Kingdon (2012) もあるが、前者はセレンディピティの成功要因と事例紹介の折衷的内容、後者はコンサルタントによる創造的過程のマネジメントのガイドライン集を中核とする内容で、本研究が目指す、セレンディピティの構造分析・モデル化を行おうとするものではない。

(3) セレンディピティの意義を提示する研究

先行研究の中で、他の先行研究とはやや異なる視点からセレンディピティを記述するものとして、丹羽 (2006, p. 196) がある。丹羽は、研究開発マネジメントにとてもっとも難しい課題は、偶然性と試行錯誤の取扱いだろうとして、それを研究開発

マネジメントのフロンティアと位置づける。その上で、計画できないことの計画について、いくつかの示唆を述べた上で、全く異なる観点として、計画外をむしろ積極的に活用するというマネジメントが重要であるとする考え方を紹介する。そして、その一類型、偶然に幸運の予想外の発見をすること（能力）としてセレンディピティを紹介している。そして、科学の全く新分野が拓かれるとすれば、それは、セレンディピティによるのだという Shapiro (1986, p. vii) の指摘を要約している。

丹羽は、ここでは、セレンディピティの実態やその成功要因には触れておらず、その位置づけ、意義を指摘しているにとどまるが、逆に他の先行研究では、こうした位置づけがなされている例はなく、稀少、貴重な意義があると考ええる。

(4) セレンディピティにおける構造化への示唆・萌芽を示す研究

伊丹 (1986) は、イノベーションにおける「偶然と必然の絡み合い」の理論研究の可能性と意義に関する見通しを考察している。ひとつの事例からの帰納に基づく考察であるが、それは極めて演繹的に理論の見通しを示している。本研究との関係は多くの論点に及ぶ。「自然の真理に対して人知が不備であるから、真理が顔を見せることが『偶然』に見えること」、またそれを意図的に見ることはできないから、偶然を契機にそれを感知するとの指摘等が論理的骨格として本研究への重要な示唆となる。また、偶然に前後する必然の活動を吟味することがこうしたイノベーションの成功にかかわるとの指摘も本研究の問題意識、モデル構築の方向性を先導する。

総じて、「偶然と必然の絡み合い」の理論研究のあり方とその構造検討の方向性を示唆している。

従って、本研究は、本先行研究に示された示唆をベースに、複数事例の詳細研究に基づき、具体的なプロセスモデルを提案し、そこからの含意・帰結を述べるものであるとまとめることもできる。なお、本研究では、プロセスモデル提案に加え、それに基づく類型化モデルの提案も行う。すなわち本先行研究を深耕することを目指している。

(5) セレンディピティのモデル化に関する研究

本研究で中核的意義をなすセレンディピティによるイノベーションに関するプロセスモデルと類型化モデルに関して、先行研究の成果を検討しよう。

1) プロセスのモデル化について

四半世紀余り前の「セレンディピティ研究の出発点」と言える Shapiro (1986)、Robert (1989) においては、紹介する多数の事例に関し、それを一般化しモデル化しようとの記述は全く見られない。

敢えて、その理由を想像すれば、①セレンディピティに関する研究の嚆矢として、セレンディピティの存在の主張、具体的には多数の事例紹介を主眼として書かれたため、プロセスのモデル化を課題と考えていなかった。②偶然により何かが起こり、それに気が付くか、気が付かないかという視点に焦点化されていた。つまり、敢えて言えば、セレンディピティは、偶然というコントロールできないものに気が付くか気が付かないかにポイントがあり、それをプロセスとして捉えるまでもないと考えていた。

本研究の観点から、特に指摘したいのは、彼らは偶然が起きて以降のプロセスに焦点を当てているため、③偶然以前のプロセスを本研究ほどには重視していないが故に、特段にそのプロセスをモデル化する意味を認識していないのだろうという点である。

なお、先に示した澤泉 (2002)、宮永 (2006)、特に宮永には、少なくとも偶然が生起して以降のプロセス、また偶然生起より前のプロセスについてもそれに触れる記述がなされている。セレンディピティの成功要因を考えるためには、プロセス全体に関する広い理解が必要であることを示唆していると考えられる。

2) 類型化モデルについて

セレンディピティについて、類型化のモデル検討に関する目立った先行研究はほとんど存在していない。数少ないその中で、代表的考察と考えられるのが Robert (1989, p. x) である。ここで、彼は、

①真セレンディピティ：思っけみなかつた物事を偶然に発見する

②擬セレンディピティ：追い求めていた目的への道を偶然に発見する

という言葉を作りたい、と記している。

①は目的設定もしてゐなかつた（全く意図してゐなかつた）価値あるものを偶然に発見する。②は、「目的設定」に基づく仮説をもって求めていた価値あるものの

「実現方法」を偶然に発見すると理解できる。

丹羽（2006, p. 198）が、この類型化をセレンディピティの分類方法として紹介している。後者を、「こつこつと努力を続ける内に女神が微笑むという言い方に近いかも知れない。」とし、研究者にとって、教訓として常識的かつ、心情的に理解しやすいことであろうと評価している。一方前者の「科学の全く新分野が拓かれる場合としての意義」を紹介した上で、革新的な研究開発を狙うならば今までとは違う立場からの考察とアプローチが重要になろう、と評価している。その上で、科学技術者が陥りがちな「従来分野の専門馬鹿」からの脱皮の重要性、研究マネジメントとしては「集中」思考よりも「拡散」思考に留意することの必要性を示していると述べている。

Robert の類型化とそれに対する丹羽の紹介に対して、本研究からの評価を述べれば次の通りである。確かに、敢えてセレンディピティを分類しようとすれば、この二類型には、一定の説得力はある。しかし、特に Robert の説明だけによれば、これは、セレンディピティの結果による分類であり、本研究で行おうとしている駆動要因による分析に比べ、セレンディピティをいくらかでも操作可能化したい、その成功確率を上げたい、という観点からはあまり有効ではないと考えられる。それに対し、丹羽の説明は、特に真セレンディピティに対し、新分野を切り拓くとその意義を高く評価した上で、「集中」よりも「拡散」マネジメントを示唆している等、セレンディピティの積極活用の可能性を考える本研究に対し、示唆的なものである。

後者に対しても、パスツールの「観察の場では、幸運はそれを心構えて待っているところに来る」を紹介し、その積極活用の基本スタンスを示唆している。ただし、丹羽は、計画が困難な場合の研究開発の考え方の一態様として、セレンディピティを紹介しているので、これ以上詳細なセレンディピティの活用、成功確率の向上に向けての議論は行っていない。

榊原（2011, 第五回 p. 141）は、Robert の真（正）/擬（似）セレンディピティの類型化をもとにして新たな4類型化の提案を行っている。

Robert の2分類軸に加え、榊原が提唱する「新しさの発見」の2分類軸を加え

た、2次元4類型である。「新しさの発見」の2分類とは、「出会い」と「意味の洞察」¹⁰である。榊原は事例をあげながら、以上の枠組みを整理したうえで、「偶然や奇遇がセレンディピティに転化する過程」で、それに関与するマネジメントの可能性について、次のように記述する。

最狭義のセレンディピティ、つまり真正セレンディピティの領域において、単なる「出会い」から「意味の洞察」に到るためには、まず、「出会いの機会」の数と多様性を増やすことが重要だとする。その上で、特に組織的に「意味の洞察」に到るための経営者の心構えのカギ概念として「偶然+洞察」の造語「偶察」を提唱する。それは、予期しない偶然・奇遇をきっかけとして、それを表面的に知覚するだけでなく、ふと立ち止まって物事の深層に分け入り、そこに潜む一般性のある理論をじっくり追及することだという。

続いて、擬似セレンディピティの領域で、「出会い」から「意味の洞察」に到るためには、まず、目的・戦略による強い方向づけ、目的思考のイノベーションを組み込んだ組織づくりの重要性を指摘している。その上で、失敗の後でセレンディピティがやって来るのだから、失敗を恐れず早期にそれを同定することが重要だと指摘する。そうした行動志向のマネジメントを前提に、経営者の心構えのカギ概念として、「転換」（コンバージョン）をあげる。目標や手段の選択に当たり、唯一最善や無謬を目指す必要はなく、ことに応じて目標・手段、視点・文脈の転換をはかるべきだとする。

以上を通じて、人間がアレンジできない偶然・奇遇、セレンディピティが全くマネジメントの対象外ではないとし、それに有用なマネジメントのポイントを指摘している。

セレンディピティに関して、可能なマネジメントを探ろうとする問題意識、帰結として提示される心構え等、本研究に参考になることが多々ある先行研究である。

ただし、セレンディピティのプロセスを一般的にモデル化した上で、マネジメントの可能性を探るのではなく、事例から直接それを探っていること、また、真/擬

¹⁰ この2分類は排他的ではなく、「出会い」に「意味の洞察」が加わる、つまり累積尺度であるとする。

セレンディピティという分類を前提、すなわちセレンディピティの結果からこれを分類しようとしていること等、本研究が目指すところとは、異なるアプローチと結論である。

2. 本研究が目指す貢献

(1) セレンディピティのプロセスモデル構築

上述した先行研究に比べ、本研究の特徴は、まず、リサーチクエスチョン—セレンディピティにおける偶然と必然の相互作用の解明—に対してセレンディピティのプロセスの一般化、つまりプロセスモデル構築を行うことである。

偶然はいかなる役割を果たすのか、偶然の生起前の必然活動は、生起するセレンディピティの質・生起確率にいかなる意味を有するのか、加えて、偶然が生起して後の必然活動がいなくなるものであれば、偶然の機会を活かせるのか、それらを考えるためのモデル構築を目指す。

(2) セレンディピティの類型化モデル構築

プロセスモデルに続き、本研究では、セレンディピティの駆動要因に基づいてその類型化モデルを構築する。

これには、セレンディピティのプロセスモデルでの一般化を、具体化に引き戻す意味がある。プロセスモデルは、セレンディピティを極力一般的に捉える理解を重視することに対して、類型化モデルは、一部その特殊性を抽出しながら理解しようとする。

プロセスモデルの各プロセス、偶然、必然に注目しその果たした役割の軽重、意義から類型化モデルを導出する。

実践的には、各類型のセレンディピティの駆動力を焦点化することにより、そこへの注力、その方法の洗練等を考えることから、セレンディピティによるイノベーションの活性化、活用、一部操作可能化を目指す。また、本類型化により、今後のセレンディピティ研究に、基本的な枠組み—白地図を描くことを目指している。

(3) セレンディピティのマネジメント可能性へのインプリケーション

さらには、上記の実践的意味を深堀し、セレンディピティによるイノベーションのプロセスに加え、それを可能とする研究者、イノベーター個人の知識蓄積、思考・行動様式のあり方、目的意識の持ち方等の検討を通じて、セレンディピティ、イノベ

ションを可能とするマネジメントのあり方についての示唆を求めたいと考える。

第4章 モデル構築・類型提案のための事例研究

1. 導電性ポリマー¹¹

(1) 偶然によるポリアセチレン薄膜の合成

白川英樹 (2001b, p. 28) は、1936 年 8 月 20 日東京に生まれ¹²、軍医であった父親の仕事の都合で、3～4 歳ころ台湾、その後、旧満州に渡りあちらこちらに移動し、1944 年、白川が小学校 3 年生の時に母親の故郷である飛騨高山（岐阜県高山市）に落ち着いた。白川はこの頃から自然に親しむようになり、学校に行く以外の時間を、野草をみたり昆虫を採ったり山を歩いて過ごしたという。

1957 年に東京工業大学に入学、1961 年同理工学部化学工学科卒業、1966 年同大学院にて博士号を取得した。大学院時代も、もともとのおんびりとした性格である一方、きちんとものごとをしないと収まらない完璧主義のところがあつて、なかなか将来を構想したりできず、「実験に忙しく過ごした」という。実験をやって十分に満足いく結果がでないと論文を書く気になれない。論文を書いていると欠けているところが分かって来る。そうすると新しく別の実験をして結果を出さない限りそこは満たされない。そうしたことを繰り返して、ひとつの論文を書き上げるのに長い時間がかかる、そんな研究生生活を送っていたという。

こうした試行錯誤を積み重ね、実験の量が多いけれどもあまり論文が多くない状況で、まわりからは「何をもたもたしているんだ」と思われていただろうと振り返っている。しかし、当時とはとにかく「実験が第一だと思っていた」という。

1966 年、東京工業大学資源化学研究所の池田朔次教授の講座の助手となった。ここで、当時、ほとんど誰も研究していなかったポリアセチレン¹³の重合の仕組みの研究を開始した。しかし、当時合成されていたポリアセチレンは粉末、非結晶であり、分析は困難で、研究は進まなかったという。

1967 年秋、韓国の原子力研究所から、化学には門外漢の研究生、邊衡直が池田研究室を訪れ、白川にポリアセチレンの重合実験を体験したいと言った（白

¹¹ 本節の参考文献は、特に断りのない限り、白川英樹 (2001a)。

¹² 『ブリタニカ国際大百科事典 電子辞書対応版』。

¹³ 多数のエチレン分子 (C_2H_4) が鎖のように結合した高分子、化学式は $-(CH_2-CH_2)-$ 。

川, 2008, p. 905)。邊は、好奇心旺盛な人なのでこの専門外の体験を希望したのでだろうという。彼は、日本語の教育を受けた世代なので日本語に不自由はなく、かつ、すでに研究者であり学生ではないので、白川は、当時池田研究室でのポリアセチレン粉末の合成の定法（特に触媒の量や調整方法等）を書面にして渡して実験を任せた（白川, 2001a, p. 28, p. 68）。ほどなく邊は、重合反応容器の触媒溶液をかきまぜるために入れてある磁気攪拌子が回転せず、水銀圧力計が示すアセチレンの圧力に変化がないことなどを理由に、重合反応が全く進行していないからこの実験は失敗である旨を白川に告げた。

白川が反応装置を見ると、触媒溶液の表面は、液体の表面というより何か黒色の膜が張りつめたようであり、磁気攪拌子はこの膜の一部に引っかかっているため回転できないことが分かった。

白川は、「失敗は失敗としても、同じ失敗は二度と繰り返したくないから」失敗の生成物が何であり、どうしてそれができたかを調べることにした。

最初にできた膜は相当膨潤していてぼろぼろのものだった。「ポリアセチレンとはちょっと分からないけれども、装置から外して色々と調べてみるとポリアセチレン以外には考えられない」、「ひょっとして、これは表面で重合が起こって膜になったのかも知れない。界面で反応が起きることが分かったが、どうしてできたのかが分からない」ということであつた。たぶん 1967 年 9 月の出来事だという。

おそらく、すぐに白川は邊にどのように実験を行ったかを詳細に確認したと思われる。「触媒の量を間違えたかもしれないというので、触媒の量をどんどん濃くしていったら、あるところできれいな膜ができた」、「とりわけガラスの表面で触媒の濃い溶液を作ったところで重合させると、ぴかぴかのフィルムができると分かった。」

白川は、この間の経緯を具体的に生々しく語っている（赤木他, 2002, p. 4）。邊の“失敗”作を見た後に、「(多くの試行錯誤を経ずに) すぐに(再現)できました。実に簡単に失敗の原因が分かった。触媒が濃いためにこういう現象が起こったのだろうと。それと偶然に磁気攪拌子が止まってしまったことも一因でした。それで、濃い触媒溶液を意識的につくって試してみたら、見事に黒色のぼろ雑巾のようなものが簡単につくれたわけです。それをきれいに洗って精製してみると薄膜ができてい

た。・・・それはもう（ポリアセチレン薄膜だろうと）直感しました。ほかには考えられませんから。割としなやかな有機物のフィルムですから。」

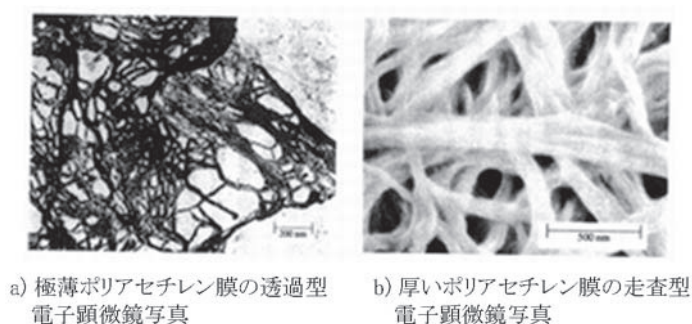
さらに、“失敗作”がポリアセチレン薄膜ではないかと気が付いた、あるいは、ある種そうしたものを求めている（目的意識）とも言える理由を次のように語っている。

「当時、ポリアセチレン（粉末）の圧縮ペレットをつくるのに夢中でしたからね。・・・従来はポリアセチレン（粉末）の圧縮ペレットでX線解析をとって（行って）いたわけですが、（薄膜、結晶¹⁴が手に入れば）加工していない生の状態でとれる。そうすれば、構造がはっきりわかり、重合メカニズムも解明できる。」

すなわち、当時の白川の強い目的意識、「研究テーマであるポリアセチレンの重合メカニズムの解明を進めたい。そのためには、できるだけ精緻に解析できるポリアセチレン試料を獲得、あるいは準備して解析を行いたいという願望」が薄膜らしきもの―結晶であろうから精緻な解析の可能性が高い―に対し強く反応し、“失敗作”であったにもかかわらず、白川の注意・興味をそれに向けさせたと考えられる。

白川（2001a, p. 29）は、ポリアセチレン薄膜ではないかという直感に加え、厳密にそれを確認するため、膜を透過型電子顕微鏡で観察した。その結果、膜はポリアセチレン分子が結晶化してできたミクロの繊維が絡み合っていることが分かった。また、比較的厚い膜の表面を走査型電子顕微鏡で調べてみたところ、同じように繊維が絡まりあった構造であることが分かった。

図 4-1 ポリアセチレン薄膜の繊維形状



資料：白川（2001a, p. 30）

¹⁴ 空間的に周期的な原子配列をもった固体物質（『岩波 理化学辞典 第5版』岩波書店）。

ポリアセチレンが意図通り、薄膜状の結晶として合成できるようになれば、粉末ではできなかった物性の測定が簡単にできる。例えば赤外線や紫外線の吸収スペクトラムを測定すれば、二重結合の共役¹⁵状況が分かる。これらの結果、分子の構造を正確に知ることができる。白川は、本来の仕事を脇においてでも、ポリアセチレン薄膜の合成研究に取り組む価値があることを直感したのだった。

(2) ポリアセチレン薄膜合成法の確立とその応用

白川は、さっそく、どうしてポリアセチレンの薄膜ができたか、どうすれば任意の厚さの薄膜を合成することができるかの詳細解析のため、新しい実験をはじめた。最初の失敗実験は邊氏の実験であるから白川の実験ノートに記載はないが、1967年11月8日の実験ノートに、はじめて意図してポリアセチレン薄膜を合成した記録が出てくる。

白川は、邊の実験が“失敗”し、ポリアセチレン薄膜が合成できた理由を次のふたつの失敗と、偶然（触媒の性質）、ポリアセチレン本来の性質によると解析した。

失敗1：触媒量の誤り

化学反応では触媒は少量しか使わないのが常識であり、その量は1モルの千分の一のミリモル単位が普通である。しかし、この場合、指示者または実験者がミスを落としてしまい、触媒量が1,000倍の濃度となった。

失敗2：磁気攪拌子の回転をその場においてコントロールしなかった

この実験は、気体のアセチレンを触媒溶液に吸収させながら行うため、攪拌が必須である。実験者は実験を注意深く見守り回転を調整することが必要であるが、この場合には、それを行わなかった。もし、攪拌を続けていたら普通に粉末が合成できただろうから、この失敗も薄膜の合成を可能とした条件である。

偶然（触媒の性質）：この際用いた触媒が均一溶液系であった

多くのチグラール-ナッタ触媒¹⁶は不均一系と呼ばれるもので、薄膜の生成が困難であり、もし薄膜が形成されても付着した固体触媒の除去が困難である。この

¹⁵ 有機化合物で、2個以上の二重結合や三重結合が1個の単結合をはさんで存在、これらの結合が相互作用を示すこと（『ブリタニカ国際大百科事典 電子辞書対応版』）。

¹⁶ チグラール-ナッタ触媒とは、オレフィン（C=C）の二重結合をひとつもつ不飽和炭化水素）の重合に用いる触媒。

際に用いた均一溶液系触媒は、偶然、薄膜合成には最も適したものであった。

ポリアセチレン本来の性質 1：ポリアセチレンの不溶性

ポリアセチレンがこれまで知られているいかなる溶媒にも不溶であること。もし溶媒に解けたら、表面で重合しても、溶液内に溶け込んで、膜状には固まらない。

ポリアセチレン本来の性質 2：ポリアセチレン結晶は粒状ではなく、繊維状

ポリアセチレンの結晶がもし粒状であれば、溶液より密度の高い結晶はすぐ溶液内に沈殿するから薄膜を形成しない。結晶が繊維状の結晶を作り、それらが絡み合うため表面に薄膜が形成される。

白川は、以上の解析を詳細に行い、任意の膜厚の純粋なポリアセチレン薄膜の合成方法を確立¹⁷した。しかし、それにもかかわらず、白川がポリアセチレンフィルムの合成方法を論文発表したのは、それから 7 年も後の 1974 年である¹⁸。これだけの時間がかかった主な理由は、ポリアセチレンフィルムを使つての、白川の本来の研究テーマである、ポリアセチレンの重合過程と構造の研究、及びその発表を優先させたからである。「ポリアセチレンの（合成）温度と cis-trans 構造の関係」の研究に 3 年余りをかけ、その論文（1971 年）を先に発表したのである（赤木他, 2002, p. 5）。この間の事情を語る以下の言葉が、白川の研究態度、性格をよく表している。「僕ものんびりしていて、業績をあげるとかそんな気は毛頭なかった。池田先生も将来のことを考えてペーパーを書くようにいわれましたがそんなに厳しくはなかった。マイペースで、できるだけきちんとした論文を書こうと（考えていた）、だから 1971 年の論文はすごく長い。とにかく、こつこつ時間をかけてやりました。」

以上の経緯で、白川は、後の導電性ポリマーの創造（ノーベル賞受賞）への決定的な中間到達点となる、極めて画期的なセレンディピティによるイノベーションを成し遂げたのである。しかし、当時、ポリアセチレン薄膜の合成成功は、全く特別の反応を呼ぶことはなかったという。というのも、この頃には、ポリアセチレン薄膜が実

¹⁷ 実際にはこうした合成原理に加え、様々なノウハウが加えられて、銀色に輝くポリアセチレン薄膜が合成される（赤木他, 2002, p. 6）。

¹⁸ Journal of Polymer Science, Polym. Chem, Ed., 12, 11(1974)。

現であれば大きな意味を持つであろうと考えられた「高分子半導体」の研究は世界的にすっかり下火になり、競争相手もいなくなっていたからだ。白川は、1974 年の論文発表前に、日本化学会や高分子学会の年会でも、ポリアセチレン薄膜の合成に関する口頭発表を行ったが、その時も 1974 年の論文発表時と同様に無反応¹⁹であったという。

なお、白川は、合成に成功したポリアセチレン薄膜に、塩素や臭素をドーピング²⁰する反応に興味を持ち、塩素でそれを実施した²¹（赤木他, 2002, p. 9）。これは不思議な結果を生んだ。ポリアセチレンそのものと大量に臭素を加えたものは、赤外吸収スペクトラムは存在しない。しかし、少しずつ、重量増加が分からないくらい微量の塩素を加えると、完全に赤外を吸収して、全く赤外を通さなくなったのである。

そして、たまたま研究室にあったテスターで塩素ドーピングしたフィルムの電気抵抗を測ってみたという。しかし、このテスターではこの試料の電気抵抗をうまく測定できず、白川は、その後導電性に関するテーマで研究を進めることはなかった。

（3）マクダイアミッド博士との出会いと導電性ポリマーの創造

ポリアセチレン薄膜の合成方法を確立してから 7 年後の 1975 年の秋、後に白川の共同研究者となるアラン・マクダイアミッドが交換教授として京都大学の熊田誠研究室に滞在中、東工大の資源化学研究所でセミナーを開く機会があった。（赤木他, 2002, p. 9 ; 白川, 2008, p905）。演題は、「ケイソ化学」であり、副題の「(SN) x」を見落としたため、白川はこのセミナーに参加しなかった。

マクダイアミッドは、無機の合成金属、具体的には、特に(SN) x を専門とする研究者であった。セミナー終了後、マクダイアミッドが資源化学研究所長の山本明夫とお茶を飲んでいて、彼は、金属光沢（金色）をした(SN) x のサンプルを山本に見せた。山本は、白川のポリアセチレン薄膜（銀色）を思い出して、「うちにもそういう金属光沢をもったフィルムをつくって研究しているものがある」と話した。すると、マ

¹⁹ ノーベル賞受賞時（2000 年）にはこの論文の引用件数は、白川の論文の中でも一番多くなっていた（赤木他, 2002, p. 5）。

²⁰ Doping、結晶に少量の不純物を添加すること（『岩波 理化学辞典 第 5 版』岩波書店）。

²¹ 導電性ポリマーは後にハロゲン（ヨウ素）ドーピングによって実現するが、これを共同研究者ヒーガーの発想とする説がある。しかし、元々、白川が実施していたアイデアである。ただし、導電性という目的に焦点をあてたアイデアではなかった。

クダイアミッドが会わせてくれと依頼したので、山本はすぐに白川を呼び出し、白川はポリアセチレン薄膜サンプルを持って所長室に行った。

マクダイアミッドは、「わあっと！」と言って大変驚いた。そして、自分たちもその方面の研究をしたいからと、その場で数分もしないうちに、白川に共同研究を申し入れた。白川も同意したが、すぐには渡米できず、マクダイアミッドともうひとりのノーベル賞の共同受賞者となる物理学者アラン・ヒーガーとが共同研究を行っていたペンシルバニア大学からの招聘を受け、1976年9月から1年間、ポスドクとして研究することになった。無機化学が専門のマクダイアミッド、物理が専門のヒーガー、高分子が専門の白川と、三者三様の異なった分野の体制が良かったと白川は振り返る。

図 4-2 銀色の金属光沢を有するポリアセチレンフィルム



資料：赤木他（2002, 書籍文頭写真）

白川は、渡米して、まずポリアセチレン薄膜を合成した。マクダイアミッド達も予め、白川の1974年の論文を参考にして、ポリアセチレン薄膜の合成を試みていたが、銀ピカとはほど遠く、黒いものしかできず、研究はほとんど進められていなかった。

ポリアセチレン薄膜を前に、白川が先の塩素ドーピングによる赤外吸収実験の話をする、先方から強い興味が示され、今度は臭素ドーピングの実験をすることになった。白川（2001a, p. 41, p. 76）は、1976年11月23日（金）のことを鮮明に覚えている。ヒーガーの地下の研究室で、彼の下にいた博士研究員のC・K・チャンとポリアセチレン薄膜に臭素を加え、四端子法で電気伝導度を測定する実験をしていた。四端子を付けたポリアセチレン薄膜を、アルゴンガスで置換した三角フラスコの中に

ぶら下げ、臭素を注射器でその中に加えるという初歩的な実験であった。チャンにしてみれば、これまでに体験した有機化合物の測定から電気抵抗の変化はせいぜい数桁程度に過ぎないと思っていただろうと考えられる。また、薄膜を合成した白川自身は、チャンが読みあげる数値をノートに記述する役で、どんなことが起こるかを予想もできないでいたという。

振り返れば相当粗っぽい実験であったと言うが、臭素を一滴加えたところ、伝導度が急激に上がり、1,000 万倍近くに跳ね上がった。測定器のレンジの切り替えが追いつかないほどであった。また、電流がどんどん大きくなるので、試料が焼き切れないか心配になるほどだった。二人は大いに興奮した。

その後、詳細な解析が行われ、ヨウ素のドーピングがさらに効果があることが分かりその伝導度の変化は、12 桁（1 兆倍、つまり 100 万の 100 万倍）にも到った。

この結果は、1977 年 6 月、ニューヨーク科学アカデミー主催の低次元半導体に関する国際会議ではじめて発表された。この発表の際、白川はマクダイアミッドの強い薦めで、その場でポリアセチレンフィルムにヨウ素をドーピングして、豆電球が光る実演を行い、拍手喝さいを浴びた。

その後、白川のポリアセチレン薄膜合成の成果自体も科学と工学の発展に多大な寄与をしている。加えて、三者の共同研究による導電性ポリマーの実現は、その後多くの高分子導電体の研究に繋がり発展し、コンデンサ、有機 EL 表示デバイス等種々の応用に実用化されている。携帯電話等多くの電子機器の利便性向上を通じて我々の社会生活に大きな影響を与える、極めて価値の大きなセレンディピティによるイノベーションとなった。

そして、2000 年 12 月には、白川英樹、アラン・マクダイアミッド、アラン・ヒューガの三者の共同研究に対してノーベル化学賞が授与された。

（４）偶然の出来事に対する白川の対応と思考・行動様式

韓国人の化学には門外漢の研究生、邊衡直の突然のポリアセチレン合成の失敗という偶然の結果からはじまった、導電性ポリマー実現へのイノベーション。そのための決定的な中間到達点が、「ポリアセチレン薄膜の合成方法の確立」である。白川が何故、突然の偶然・失敗の結果を見逃さず、意義を見出し、経過を解析し、製法を確

立てたのか、その点に関する白川の思考・行動様式の特徴とそれを象徴する発言とを合わせて整理する。

1) 失敗を放置せず着目した経緯と思考・行動様式

邊のポリアセチレン合成の失敗の生成物につき、白川（2008, p. 905）はその初見を「初めは何か変なものができるなという感じで、表面のところに膜が張っていた。当時、最初にできた膜は相当膨潤していてぼろぼろのものだった。」と話している。この発言から白川の思考・行動様式と関連する具体的認識の特徴として、次の三点を指摘することができよう。

- ① 「変なもの」という（直観・全体）認識。
- ② 「観察しありのままを見る」：変なものという直観・全体認識から、膜とその膨潤という個別・具体的認識を得ている。
- ③ 「膜」を見逃さない。

白川は、独創的な仕事をするために必要なものは何かと問われて、「予期しない現象に出会ったときこそ、しめたと思え、その異常さをつかむために、日ごろから専門以外の知識を蓄えておくことも肝要です」（赤木他, 2002, p. 15）と答えている²²。

これは、白川が①「変なもの」という（全体）認識を得て、であるからこそそれを無視せずそれに着目、観察したことと符合する。

また、同じ質問に対し、白川は「よく観察し、自然のままを観よということですかね」とも返答している。この行動様式は、②の観察し、ありのままを見るということに直結している。なお、こうした行動様式が養われた背景として白川

（2012, p. 11）は、中学時代に植物採集と昆虫採集に夢中になり、実物を見ることの価値を強く感じたことをあげている。

③の膜を見逃さなかった点は、次項の「意義を把握」したことがその理由になると思われるので次項で検討する。

最後に、以上の大前提として、白川（2001a, p. 68）の根本的な思考様式が、この

²² 白川がポリアセチレン薄膜発見の成果を踏まえてこう発言していると思われるが、それより前に白川がこうした考えを持っていなかったとは思われない。その後この考えが強化されたとは想像できるが。以下の行動・思考様式についても同様。

失敗に着目することを可能ならしめたと考える。それは、「失敗は失敗としても、同じ失敗は二度と繰り返したくないから原因を把握する」という思考様式である。

2) 意義を把握した経緯と目的意識

白川がこの生成物が薄膜であり、それは大きな意義を持つとの把握に早期に到った大きな理由として、「この偶然の結果との遭遇の際、白川はポリアセチレンの重合メカニズムの解明を主研究テーマとしていた。そのためポリアセチレンの構造において、解析しやすい試料形態を強く求めている」ことがあげられよう。すなわち、「強い目的意識が着眼と意義の早期把握」に繋がったと考えられる。

具体的には、白川は、ポリアセチレン粉末をペレットにして、ポリアセチレンのX線解析を行おうとしていた。しかし、もし、薄膜ならば、結晶構造である可能性が高く、粉末ペレットにする等の“弥縫策”に比べ、はるかに精緻な解析ができるからだ。

つまり、“失敗作”を一瞥した時点に、白川は膜構造であることを期待して見る前提を有していた。従って、事後から見れば、前項③の膜構造であるかどうかには、白川は極めて敏感であり、当然にこれを見逃さなかったと考えられる。

3) 解析を可能とした経緯と知識蓄積、組織能力

白川の解析内容は、“失敗作”が薄膜（結晶）構造であることの確定と、なぜ、薄膜合成が可能であったのかの因果の解析である。これは、白川個人と池田研究室における知識蓄積、特に専門分野での解析方式の蓄積（装置等含む）によるものであると考えられる。

薄膜（結晶）構造であることは、先に示した透過型・走査型電子顕微鏡による観察とX線解析等によってなされた。これは、白川と池田研究室の知識蓄積や装置をベースとしてなし得たものであろう。

なぜ、薄膜合成が可能であったかの因果の把握についても、第一に、池田研究室におけるポリアセチレン粉末の合成方法、定法が確固たるものであったことが重要な前提である。それがそもそも確固たるものだから、少しの異常も検知できたのだが、この場合、あまりの異常であるから、邊に彼の実験プロセスを確認することを含めれば、再現そして、ポリアセチレン薄膜合成の因果を解析することに際立った

困難はなかったと思われる。実際、邊の失敗から2か月後には、白川はほぼ完全にコントロールしたその再現を可能としていた。

4) 上記に通底する白川の基本認識

上述した、このセレンディピティによるイノベーションを可能とした、白川の思考・行動様式、目的意識、知識蓄積に関する特徴をまとめると次の通りである。

① 思考・行動様式：

- ・ 予期しない現象に対する敏感さ・備え
- ・ 自然（現象）をありのままに見ること
- ・ 失敗を繰り返さないために原因を追究する

② 目的意識：

- ・ 強い目的意識による意義の早期把握

③ 知識蓄積：

- ・ 個人・組織での知識・解析能力の蓄積、環境（機器等）の整備

これらに共通・通底する白川の基本認識は何であろうか。白川（2012, p. 12, p. 15）は、「自然は分かっているようでまだまだ分からない宝の山だということ」、「自然は解明しつくされたのかということ、本当はそうではなく、ほんの少し分かっただけです。まだわからないことがどっさりある。分かったことの方が少ない。ですから、教科書に書いてあることは分かったことだけで、先生が教えて下さることも分かったことだけ。しかもほんの少ししか分かっていない上に、教科書が間違っていることもある」との基本認識を示している。「知らないことを知る」、不知の知である。

不知の知をベースに、予期しない結果に敏感になる、物事をありのまま見る、物事がなぜそうなるかを考える。目的意識がそれらを先導し、獲得した知識がそれらの実行の裏づけとなる。これらが白川のセレンディピティによるイノベーションの成功を可能にしたと言えるだろう。

2. トランジスタ²³

(1) 本研究での考察対象と留意点

トランジスタは、本研究で対象としている事例の中でも、特に多段の経緯の産物である。登場人物も多く、個性豊かな人間像が錯綜した経緯でもある（谷光，2012）。事例研究対象の範囲や焦点の当て方、活用する情報源によって、種々に異なった様相を見せる。そこで、具体的な事例研究に入る前に、トランジスタ発明の全体像と本研究での主たる研究対象とその設定理由、及び留意点を述べておきたい。

1) 本研究での主たる考察対象

トランジスタ発明のプロセスにおいては、以下の三つの大きな偶然－異変が生じて、その結果、大きなブレイクスルー、セレンディピティを生んだ。

第一の偶然は、表面準位仮説を検証実験中のブラッテンらによる「急速な温度低下による実験試料（半導体の表面）の結露」である。表面準位仮説とは、ショックレーのアイデア²⁴による電界効果型トランジスタの動作原理の確認実験の失敗に関してバーディーンがその理由の説明のために提案した仮説である。この結露²⁵を契機に、電解質を介して電圧を印加することにより、表面準位効果を克服して、原理的には電界効果型トランジスタが動作することが確認された。

第二の偶然は、その後の電界効果型トランジスタの機能確認実験中のゲート（半導体表面）への高圧印加による「予期せぬ酸化ゲルマニウム膜の形成」である。これによって、液体の電解質でなく、酸化膜により表面準位効果を克服、電圧を印加して電界制御でき、増幅素子としての安定性と周波数特性の大きな改善を得る可能性を見出した²⁶。

第三の偶然は、上述の酸化膜を薄くしようとした際の「過剰洗浄による酸化膜の消失」である。その結果、電界効果型トランジスタの構造ではなく、偶然、バイポーラ型のトランジスタ構造²⁷が実現し、最初の半導体増幅素子である点接触ラン

²³ 本節の参考文献は、特に断りのない限り、Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997)。

²⁴ 後に、先発明者の存在が認識され、結局ショックレーを発明者とした電界効果型の基本構造特許は出願できなかった (Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997), p.144)。

²⁵ 結露、水は電解質（定義は後述）の一種である。

²⁶ 酸化膜形成は、半導体製造、集積回路形成の極めて基本的な製造プロセスとなっている。

²⁷ 電界効果型とバイポーラ型が現在実用に供されているトランジスタの構造である。

ジスタが発明された。

本研究では、原則として、第一の偶然「結露」を端緒とするセレンディピティについて考察、記述する。第一から第三、いずれの偶然もトランジスタの発明に重要な意義を有しているが、特に第一の偶然が、トランジスタ創造の特段の障害の克服に繋がり、研究・発明活動を活性化し、セレンディピティによるイノベーションの継続・成功に繋がったと考えられるからである。第二・第三の偶然とそれによるセレンディピティについては、本節の最後に簡単に記述する。

2) 本研究での考察に関する留意点

i) 情報源について

トランジスタの発明に関する主人公は、この発明でノーベル物理学賞を受賞した、ウィリアム・ショックレー、ジョン・バーディーン、ウォルター・ブラッテンである。三人の内、トランジスタ発明の経緯を詳細な文献として残しているのは、ショックレーのみである。バーディーンとブラッテンは、ノーベル賞受賞講演で発明の内容を語っているが、それは人的活動の経緯としてではなく科学・工学的な解明の経緯として述べられている。

ショックレーは、自らが開始したトランジスタの開発において、最初の金字塔となった点接触トランジスタの誕生に立ち会えず、その特許の発明者にも名を連ねられなかった。彼はそれに強い焦燥感を覚え、功名心に燃えて、その後、接合型トランジスタを考案した。さらに、そもそもショックレーは極めて傲慢、自己中心的な人物であったと言われる（谷光，pp. 121-122 他）。本研究で参考とした文献は、直接・間接にショックレーの手になるものが多く、本発明の貢献について、自身の手柄を強調しすぎている恐れも高く、その点には、特に留意が必要である。

本研究で、第一の偶然によって生じたセレンディピティに焦点を当てた理由のひとつは、この点への配慮である。バーディーンによる表面準位仮説の構築とブラッテンによるその検証実験中の第一の偶然を契機とするブレイクスルーについては、ショックレーもその意義を高く認めているからである。バーディーンは表面準位仮説を構築するにあたって、当時の物理学の限界を認識し、『『結晶の表面』の物理学をやり直してみる方が良いのではないか』と語った（菊池誠（2006, p. 72））。

さすがのショックレーも、菊池に「自分の人生を反省してみて、あの時のバーディーンの見解ほど深い意味を持っていて、私がしみじみ有難いと思ったものは、他になかったと言ってよい」と語ったという²⁸。

さらにショックレーは、「第一の偶然を契機とするセレンディピティによって、一気にショックレー、バーディーン、ブラッテンらの研究意欲や仮説構築量、仮説確認実験量が高まった」ことを特に指摘している。ショックレー (SHOCKLEY (1976), p599) は、第一の偶然の日のことを「“考える意欲 (the will to think)” という言葉は、1947 年 11 月 17 日に起こった例の出来事に始まる発明活動の頂点をよく表している。」と記述している。

ii) トランジスタの発明におけるセレンディピティの意義について

トランジスタの発明は、20 世紀半ばの企業の研究開発マネジメント、科学技術の粋とそれを体現した人材達による人類への賜物、結晶であると言って良いと考える。谷光 (2012, p. 115) は、この点につき、「トランジスタの発明には、偶然の発見の要素、応用・改善・改良意欲からの試行錯誤といった要素もあったが、発明に到る全体の経路を眺めると、(1) 企業戦略的、(2) 計画・系統的、(3) 集団的、(4) 先端学問的に進められてきた要素が強く感じられる発明であった」と記している。筆者も同感である。先に述べた人間模様のあり方も含めて、研究開発の教科書的事例と言うべきだと考える。全体として、人間の英知、企業の偉大さ、優れたマネジメント等がこれほど高度に結晶化した事例は極めて稀有であろう。

従って、トランジスタの発明について、「偶然の産物」という捉え方を突出して強調すべきではないと考える。しかし、こうした見事な計画的開発においても、「偶然を契機に人知の限界を超える」様子を考える意義があると思う。本研究の結論から言えば、それは、偶然の関与ではあるが、英知が誘引した偶然であり、英知が発見した偶然であるからだ。そこでは、偶然と英知、人知は矛盾せず、人知の偉大さが改めて感じられる。

²⁸ ショックレーがこう語ったのは、1950 年代後半 (ノーベル賞受賞後) ～1960 年代以降のことであると推測する。ノーベル賞受賞前のショックレーの行動、言動から、その頃、こうした客観的、自制的な発言をする余裕はなかったと想像する。

それでは、トランジスタの発明に到るセレンディピティのプロセスを具体的に見て行こう。

(2) 電界効果型トランジスタの実験失敗と表面準位仮説

1) 三人の物理学徒

i) ウィリアム・ショックレー

ウィリアム・ショックレーは1910年2月13日ロンドンのヴィクトリア・ストリート²⁹の豪華フラットで生まれた。父は、マサチューセッツ州に生まれ、MITを卒業後、鉱山技師兼コンサルタントとして働いた教養・品格ある男だった。母は、ごく初期のスタンフォード大学で美術と数学を専攻していた。

ショックレー一家は1913年米国に戻りカリフォルニア、パロ・アルトに居を構えた。1932年6月ショックレーはカリフォルニア工科大学を卒業し、9月に、MITの大学院に入学して物理の勉強を続けた。量子力学の勉強を決心したショックレーは、物理学科長のジョン・スレーターのもとで、「塩化ナトリウム（食塩）の波動関数」を研究した。カリフォルニアからMITへの旅（1932年）に同行したフレデリック・サイツ²⁹に何度も取材した、Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997), p. 71) らはこの頃のショックレーのことを「傍若無人」と記している。特に数学、物理、加えて国語等でも優秀な成績を残したショックレーは、無遠慮で野心・意欲を表面に表す性格だった。

1936年6月、ショックレーはベル研究所（以下ベル研）の研究局長であったマービン・ケリーにスカウトされ、ベル研に雇われた。ケリーは大恐慌後の新規採用凍結が解けて最初の、大量の新卒者³⁰からよりどりみどりで選べる絶好の状況の中で、ショックレーの採用を最優先した。ケリーは、固体増幅素子に関する理解のために量子力学の博士号をもつ有能なスタッフを探し求めている。

菊池誠(2007, p. 3)によると、ケリーは、「スピリチュアル・ファザー」と呼ばれ、ケリーがいなければ、トランジスタはできなかつただろうという。ケリーは、

²⁹ スタンフォード大学で物理を学び卒業し、プリンストン大学（院）の2年目であった。後に米国物理学会会長を長く務めた。

³⁰ 独・伊のファシズムから逃れて大量に流入してくるアインシュタイン達やその親族、教え子たちで、アメリカの物理学、特に量子力学の人材は充実度を高めていた。

1935 年ベル研で電子管研究部長を務めていた際、「わが研究所はアメリカ社会のために何をなすべきか」と自問自答し、「それはアメリカ全土を覆うクオリティの高い電話ネットワークである」と即答した。そして、電子管研究部長でありながら、その実現のためには、真空管ではだめだ³¹と明言した。それで、真空管に代わるものを誰かに作らせなければならない。そしてそのためには、量子力学に基づく固体物理学が重要な役割を果たす、その研究が鍵であるとはっきりノートに記した。そしてショックレーをスカウトした。

当初ショックレーは、実習として、所内の様々な場所、すべてエレクトロニクスに関係するところに送り込まれた。その一連のプロジェクトの中には、後にトランジスタの発明で重要な役割を果たすジョン・ピアス³²と共にした、多段階式増幅器、光電子倍增管の設計、製作の研究等があった。この教育期間中、ケリーはショックレーに「電話交換機に使われているリレー等に代わって、電子デバイスが使われる日が来ると予想する」と言った。この言葉は、ショックレーにとって忘れがたいものとなり、ベル研における常に変わらぬ研究の指針となった。

1940 年代に入り、ベル研は、戦争遂行に協力し、レーダーと対潜水艦戦の研究に注力し、ショックレーもまたその研究に携わった。そして、1942 年には、ベル研を一旦退所し、海軍の「対潜水艦戦オペレーショナル・リサーチ・グループ」の研究主任になった。この研究のリーダーは、MIT でショックレーに量子力学を教えたフィリップ・モースであった。この研究内容も確率・統計学、つまりある意味で量子力学の手法を応用し、不確定な敵の動きに対応する戦術を提案するものだった。

1945 年 3 月ショックレーはベル研に復帰し、7 月には彼が知的な面を、化学者のスタンリー・モーガン³³が管理面を担当する「固体物理研究グループ」が発足した。同時に、ベル研の組織の大再編成が行われ、「物理電子研究グループ」、「電子力学研究グループ」も発足³⁴した。

³¹ 消費電力、信頼性（真空管の寿命）、コスト等のためと思われる。

³² カリフォルニア工科大学を卒業し、入所したばかりであった。

³³ 「黄金の心」を持つ「気さくな男」と言われ、ショックレーのたりないところを補うにはこれ以上ない人物だったとされる。

³⁴ ケリーは、裁可書に「…固体量子物理学の理論的手法と、それに対応する先進的な実験テクニックを利用した、…取り組みは、かならずや大きな恩恵をもたらすと思われる」と、

ii) ジョン・バーディーン

ジョン・バーディーンは、1908年5月23日ウィスコンシン州マディスンに生まれた。父は、ウィスコンシン大学の解剖学教授、母は、プラット・インスティテュートで美術とデザインを学び教鞭をとった後、インテリアコーディネータの職に就いていた。二人の次男であったジョンが、幼少から「飛びぬけて頭が良い」ことは明らかであった。ジョンは、小学校3年で3年飛び級したが、それでも成績抜群で、特に数学ではそれが顕著であった。数学担当教員は彼に特別な宿題を与えた。母親は、「あの子は、父親が大人にだって難しいという問題に出会っても、何か近道を考えだしてしまうのです」と記している。また、ジョンは、学業でも、スポーツ・遊びでも、あらゆるものに対して根気よく頑固に取り組んだ。兄は彼について、「勉強もそうだよ。何か難しいことに出くわすと、猛烈ないきおいでぶつかっていくんだ」と語っている。

1923年秋、15歳になったバーディーンは、ウィスコンシン大学に入学し、電気工学を学んだ。職探しに有利³⁵、加えて、大好きな「数学をむやみに使う」と聞いたことがその動機であった。入学後、彼は数学と物理の専門課程も追加して取得した。その後、1930年まで在籍し、電気工学の学士・修士、物理学の修士を取得した。彼は、1929年マディソンを訪れたディラックの講義に感銘を受け、物理に専攻を変更しようかとも考えたが、1930年、就職の時期になると現実的な性格が勝ちをおさめ、ガルフ・オイルの誘いを受けた。

しかし、1933年、バーディーンは、ピッツバーグのガルフ・リサーチ研究所での石油鉱脈発見方法の開発の仕事をなげうって、プリンストン大学の大学院生となった。彼の能力がもっと大きなチャレンジを求めたのだ。

バーディーンは、ナトリウムの仕事関数の計算、電子の量子的なふるまい等の「砂まじりの『泥まみれ効果』」と格闘した³⁶。彼が、手動計算機で行う作業を見

トランジスタの創造を正確に予測するような記述をしている。

³⁵ 知的才能に溢れるバーディーンが職探しを考慮（心配）していたことは意外である。大恐慌の影響に加え、バーディーンの頑固ではあるが慎重深く謙虚な人柄によるものと想像できる。

³⁶ 彼は、ナトリウム表面に生じる電荷の二重層を含めた計算を行った。これが後の表面準位仮説の創造に役立った可能性があると考えられる。

て、「あれほどの知性の持ち主が、あんなめんどくさい計算で苦勞している」とため息をついた仲間がいたという。1935年に博士論文を書き上げた³⁷バーディーンは、ハーバードの特別研究員としての収入を得て、ケンブリッジ（ボストン）に移った。彼はここで、ショックレーの師であったMITのスレータら多くの固体物理研究者との交流を得た。

1938年、バーディーンは、特別研究員としての職を終え、ミネソタ大学物理学助教授の職を得た。しかし、戦火が広がった1941年夏、彼は大学の休暇をとり、ワシントンの海軍兵站部研究所での仕事を始めた。彼がリーダーとなったこの仕事は、戦略上重要な意味を持つことになったため、結局4年間に及んだ。1945年8月、終戦を迎えたバーディーンを、ケリーがベル研にスカウトした。大学の倍の待遇と「固体物理の基礎研究を行うチャンス」を提示してのことだった。同年10月15日バーディーンはマレイ・ヒル（ベル研）の固体物理研究グループに加わった。モーガンは、彼に固体の電気的特性についての資料を読むように言い、当面、ブラッテン、ピアスンと共有することになるオフィスに案内した。バーディーンは、実験物理学者達との同居が気に入った。彼は、理論のための理論を好んだのではなく、自分が解釈しようとしている現象を身近にみられることを好んだ。また、ブラッテンとは旧知の中であり、後に極めて親しくなった。

iii) ウォルター・ブラッテン

ウォルター・ブラッテンは、1902年2月10日厦門島（Amoy, 現在中国）に生まれた。父ロスは、前年5月に同じく米国育ちの女性オティーリアと結婚し、富裕な中国人のための私立学校で理科と数学を教えるため、同年7月、厦門に赴任していた。一家は1903年に帰国し、1911年ワシントン州に居を構え、牧場を開業した。ブラッテンは、そこで、自然と戯れる生活をしながら高校に進学し、牧場を手伝うため地元の高校に転校、進学校に再転校等しながら学校に通い、1920年に優秀な成績でモラン³⁸高校を卒業した。

³⁷ 彼は、この間にウォルター・ブラッテンの弟ロバートを通じて、ブラッテンと面識を得、週末に車で彼のいたニューヨークを訪れ、徹夜でブリッジに興ずる仲となった。

³⁸ ここではじめて物理のクラスをとり、素晴らしい成績を修めた。

同校では、週に何時間かは、手作業を行うことになっていた。彼は、エンジンの分解、調整、再組立て等ができるようになった。手を使って何かをするのは、そしてメカニカルなものを相手にするのは、彼にはぴったりだった。同年、彼は、ワシントン州のウィットマン・カレッジに入学した。

その後、ブラッテンは、1926 年秋、オレゴン大学で研究助手をつとめながら、修士号を取得した後、ミネソタ大学に物理学の博士号をとるために入学した。ここで彼は、ジョン・ヴァン=ヴレックから量子力学を学んだ。そして、博士課程を終え、1928 年 8 月ブラッテンは、ワシントン DC の国立標準局の無線技術者として働きはじめた。しかし、物理学者として職を得たいと考えたブラッテンは、翌 1929 年 4 月に同標準局を会場として開かれたアメリカ物理学協会の大会に参加していたミネソタ大学時代の恩師ジョン・テイトに声をかけた。テイトはその場で人探しをしていたベル研のジョゼフ・ベッカーにブラッテンを紹介し、その翌日彼のベル研入りが決まった。同年 8 月ブラッテンはベル研に入所し、ベッカーと真空管の電子放射を容易にするための金属表面処理の研究を開始した。

2) 第二次世界大戦におけるレーダー技術の深耕と半導体

第二次世界大戦は、科学の戦争であった。そして科学を制する意思と資金がその決着を大きく左右した。その成果であるキーコンポーネントのひとつがレーダーである。より小型の航空機、ロケットの機影を鮮明に認識するためには、レーダーに用いる電波の短波長化が枢要であった。そのためには、より短波長の電波の発信、受信・検波技術の長足な進歩が望まれた。前者の結果がマグネトロン（発信器）の発明・改良であり、後者の結果が鉱石検波器の洗練から半導体ダイオードの開発である。トランジスタの発明と密接に関係するのは、後者である。半導体以前の鉱石検波器は所詮不安定で操作可能性に大きな限界がある素子であり、量子力学の発展と材料開発と構造構築の実験の積み重ねにより、半導体、特にシリコンとゲルマニウムの科学と工学が急速に進展し、半導体ダイオードの限界性能と操作可能性を著しく高めたのである。

3) ショックレーによる電界効果型トランジスタ構造仮説と失敗

1945 年、ベル研での研究開発を再開したショックレーは、ケリーの命を受け、半

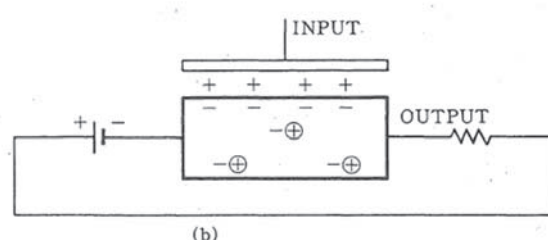
導体による増幅素子の開発に注力した。ここでのショックレーの目的意識は極めて強固であった。菊池誠（2006, p. 47）によれば、ケリーはショックレーに次のように語った。「広い国土に散らばって住んでいるたくさんのアメリカ人が、いつでも、どこでも、話を交わすことができる、というシステムはなにより重要な存在価値を持つ。真空管の機能の限界はもう見えている。そこで君をベル研に引き入れたんだ。君にやって欲しいのは真空管をはるかに超える増幅装置を考え出すことだ。」

ケリーとのこの会話が、「私の人生を決定した。それから私はこの仕事を、生きていく使命としたんだ。」とショックレーは何度も菊池に語ったという。

ショックレー（SHOCKLEY（1976）, p602）がはじめに実験で検証しようとした仮説は、彼が重視した「最も簡単な場合を調べよ」の考えに該当する構造である。

半導体に電流を通電し、その通電方向に対して直角向の電界を生じさせ、それにより半導体内のキャリア（電流を流す電子またはホール³⁹）密度を変化させ、通電量をコントロールする構造である。ショックレーは既に 1939 年 12 月にショットキー・ゲート電界効果型トランジスタ構造をノートに記している⁴⁰が、戦後ベル研に復帰した直後の 1945 年 4 月 16 日に、PN 接合を用いた電界効果型トランジスタの構造を記録し、実験を開始している（Michael Riordan, Lillian Hoddeson（1997）, p. 112）。

図 4-3 ショックレーの実験の概念図



資料：ショックレー（SHOCKLEY（1976）, p. 605）

³⁹ 絶縁体や半導体が電子によって完全には満たされていない場合に+e の電荷をもつ粒子としてふるまう（『岩波 理化学辞典 第5版』岩波書店より筆者抜粋）。

⁴⁰ 実験の記録は示されておらず、構想のみだったと思われる。

ショックレーはアシスタント⁴¹とともにシリコン層の上にあるギャップに高圧（1,000 ボルト）を印加し電界を生じさせ、それを変化させたが、シリコン結晶を流れる電流はほんのわずかなままで、電界の変化から計算される大きな電流変化は全く見られなかった。その変化は、最大でもショックレーの予想の 1,500 分の一ほどでしかなかった⁴²。この結果を解明できなかったショックレーはこの計画を一旦放棄して、別のテーマに興味を移した。

4) バーディーンによる表面準位仮説の提示

バーディーンがベル研に赴任してわずか 1 週間後の月曜日、1945 年 10 月 22 日、ショックレーは、バーディーンに半年前に行った上述の「電界効果型トランジスタ」に関する自分の計算結果と現実（失敗結果）との差異（1,500 分の一ほど）の検証を依頼した。ショックレーの計算が正しいならば、計算の前提または実験に間違いがあることになる。

二週間後、バーディーンは、ショックレーとは異なる理論の道筋をたどりながら、しかしショックレーの計算結果が妥当であるとの結果を得た。なぜ、二人の計算結果通りの実験結果、電界効果による電流の変化が得られないのだろうか。謎は定まった。

この謎（パズル）を捻り回す内、バーディーンは、10 年前のプリンストンでの金属仕事関数の計算⁴³での表面の電荷のアンバランスの検討経験等も踏まえ、この場合にも、金属と同様に N タイプシリコンの表面で、同様のアンバランスが起こっているのではないかと考えはじめた。

ショックレーに検討の途中経過を報告したバーディーンは継続の指示を受け、腰を据えてこの問題に取り組んだ。

この頃ショックレーが主催した会議でバーディーンは次のように発言したという（菊池誠（2006, p. 72））。「私は、ちょっと研究が目標に向かって急ぎすぎているように思う。つまり、増幅デバイスを作ろう、という方向に急いでいるため、見落と

⁴¹ この段階で実験を担当したのはブラッテンとの記述はない。ブラッテンか否か不明である。

⁴² 1945 年 6 月 23 日（SHOCKLEY（1976）, p602）。

⁴³ 本節（2）1）ii）参照。

していることがあるのではないだろうか？ 1930年代から、量子力学を取り入れて、結晶の中の電子の振る舞いについてかなり良くわかったように皆思っている。しかし、これは考えすぎだ（傍点筆者）。今の物理学は、大きな仮定の上に立っている。その仮定というのは、結晶が無限に大きいということだ。表面がないということだ。ところが、私たちが研究室でやっている実験では表面をもった結晶を相手にしているわけだ。薄い膜などでは、あるのは表面だけ、と言っても良い。こんなにもかけ離れた実験と理論とでは、現象を理解することも予測することもできないのが当然ではないか？ 一度このあたりで『結晶の表面』の物理学をやり直してみる方が良いのではないか。」これは、言われてみれば極めて当たりまえ、非常に素直で本質的な考え方であるが、いかに俊英ショックレーといえども見落としていた点であった。

後にショックレーは、よく菊池に「自分の人生を反省してみて、あの時のバーディーンの見解ほど深い意味を持っていて、私がしみじみ有難いと思ったものは、他になかったと言ってよい」と語ったという⁴⁴。

そして、半年余り後の1946年3月のグループミーティング⁴⁵の際、バーディーンは「表面準位仮説」を提示した。上述の発言にあるように極めて素直で、本質的な認識を出発点とした、創造的仮説である。半導体表面の電荷の二重層は、半導体の本来の性質かも知れないというのである。この仮説は、極めて本質的であり、これによれば、ショックレーの電界効果型トランジスタが機能しない理由だけでなく、当時の理論では説明できなかったモットとショットキーが観察した現象等の説明も可能であった。

この理論の提言は、ショックレーのグループの研究に新しい方向性を与えた。

ショックレーのグループは、増幅器をつくろうという試みを一旦放棄して、表面状態にかかわる新しい実験に専念した（Michael Riordan, Lillian Hoddeson

（1997）, p. 126）。ブラッテンがこの実験のリーダーとなり、自身のアイデア、バーディーン、ショックレーの示唆に従って表面状態に関する様々な実験を繰り返し

⁴⁴ 菊池誠（2006, p. 72 再掲）。

⁴⁵ 1946年3月19日と推定できる（SHOCKLEY（1976）, p. 602）。

た。半導体研究グループにとって、これは未踏の地に進む日々であり、彼らは毎日のように実験とミーティングを繰り返した。多くの場合、ショックレーが仮説を提示しては、皆の議論でそれを叩く。すると次に、ショックレーが別の仮説を提示する、また叩く、また仮説を提示するということの繰り返しだったという。

当初ショックレーはこの研究に集中したが、やがて優れたグループメンバーに任せ、固体物理の他の研究、軍の研究へのアドバイス、1947 年秋のプリンストンでの集中講義等にエネルギーを注いだ。

(3) 表面準位仮説の検証実験とそこでの偶然の生起

1) 光起電効果の確認実験

1946 年秋から 1947 年にかけての冬に、半導体研究⁴⁶グループは、表面状態は間違いなく存在すると確信できるだけのデータを収集した。バーディーンは、1947 年 2 月にこれを論文執筆し、フィジカル・レビュー（1947 年 5 月 15 日）に掲載された。

前年 3 月から 1 年以上にわたり、実験失敗、再実験を繰り返す内に、ブラッテンの表面状態に関する実験は大いに進歩し、表面状態の存在を証明する方法を提案するに到った。表面の電荷二重層は、光起電効果の生起を可能にするはずである。電荷の二重層に光子が衝突すると接触電位差を一時的に変化させ、表面に電荷を誘導するのである。これは極めて一瞬の現象で、観察・測定は大変困難であることが分かったが、1947 年 4 月に、ブラッテンは、手ごたえをつかんだ (Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997) , p.129)。液体窒素で半導体サンプルを冷やしてから光を当てると、シリコンでもゲルマニウムでもわずか（最大 0.1 ボルト）であるが、接触電位差が観察できたのである。

そして、1947 年 9 月には、ブラッテンは、室温でも光起電効果が観察できることを確認した。バーディーンはブラッテンに実験を続け、この現象の温度依存性を確認してほしい—それによって表面状態に関する理解がより深まる—と激励した。

2) 低温での結露という偶然

バーディーンの激励に応えるため、ブラッテンは魔法瓶にさし込める電極を作成

⁴⁶ 正式名称は、「個体物理研究グループ」(Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997) , p. 116)。

し実験を進めた。この低温実験は、最初の試みから明らかな変化が観察できたが、ブラッテンは、すぐにこの結果は「異変」が引き起こした見せかけの現象であることに気が付いた。「異変」とは、急激な低温化による魔法瓶内壁やシリコン表面の「結露」である。

観察された現象は、その「結露」が引き起こしている変化だった。これに対する正統的な解決方法は、装置全体を真空装置の中に作り直し、水分を完全に除去して再度実験を行うことであるが、それには多くの時間を必要とする。ブラッテンは発想を変え、装置全体を水以外の液体-エチル・アルコール、トルエン、アセトンに浸すことにしたのだ⁴⁷。この装置は、以前よりも大きな光起電効果を示した。11月17日の午後、ブラッテンは実験装置を蒸留水に浸してみた。「するとわけのわからないことが起きた、PN接合より大きな光電効果が起きたのだ」とブラッテンは、後に回想した。この結果をブラッテンから知らされたグループ内の物理化学者であるギブニーは、蒸留水に覆われた電極に電位がかかっている可能性を指摘し、装置に手を加えることを提案した。その指摘を受け、ブラッテンは装置に変更を加え、シリコンの表面に蒸留水を通じて電位をかけ、電位をコントロールできるようにした。そこにプラスの電位をかけると光電効果が増大し、マイナスをかけると減少どころかそれは消滅した。

ブラッテンはこの意味をすぐに理解した。蒸留水を通じて表面に電位をかけると表面の電荷をコントロールすることができるのだ。この装置は、かつて電界効果型トランジスタ原理の研究に用いたものに極めて似ていたが、電圧をかける電極とシリコンの表面の間に蒸留水（液体、電解質⁴⁸）があることが決定的に違っていた。水などのプラス・マイナス両方のイオンを含んでいる電解液中のイオンが電位によってシリコン表面の電荷を中和し、シールドが消え、内部に電界が生じたのである。表面準位仮説を検証しようとした実験中の偶然を契機に、その存在を検証でき

⁴⁷ この方法についてブラッテンは、「私は無精な物理学者なので、一番楽な方法でやるのが好きなんだ」と言っている (Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997), p.129)。

⁴⁸ 物質を水に溶かすとき、その溶液が電気を通す性質(電気伝導性、導電性)を示す場合がある。これは、その物質が水の中で電荷をもった粒子(陽イオンと陰イオン)に解離することによる。このように溶媒に溶かしたときに、イオンに解離し導電性を示す物質を電解質という (世界大百科事典 第2版)。

ただけでなく、それを克服する方法、すなわち電界効果型トランジスタの実現を可能にする発見・考案を成し遂げたのだ。

1947 年 11 月 17 日のブラッテンとギブニーが達成したブレークスルーの噂はたちまち半導体研究グループのメンバーに知れ渡った。

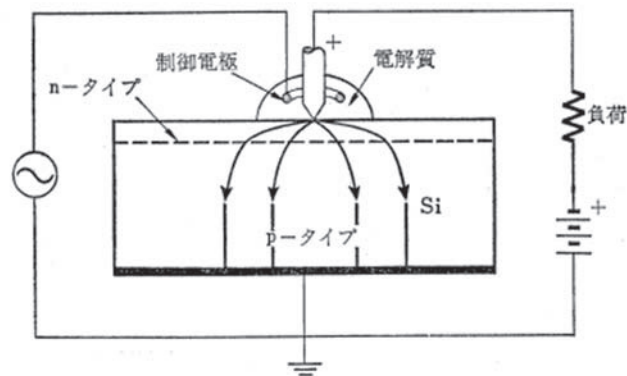
(4) 直接目的実験の加速化と電界効果型トランジスタの動作確認

1) The will to think, magic month

ここから、元来の目的であった、固体増幅素子開発のための直接目的の実験が一気に加速化する。ショックレー (SHOCKLEY (1976), p608) はこのことを次のように回想している。「この新発見は電撃的だった。実に長い道のりだったが、ブラッテンとギブニーはついに表面状態のブロック現象を—我々の電界効果実験が失敗を繰り返す原因になった障害を克服したのである。」

4 日後、11 月 21 日金曜日の朝、バーディーンは固体増幅器に関する新しいアイデアをもって、ブラッテンの研究室を訪れた。シリコンに先端のとがった金属（タングステン）の接点を差し込んで、その上を電解質で覆い、電解質に電荷を加え変化させるためリング状の制御電極を電解質の上部に置く案である。

図 4-4 電界効果型トランジスタの原理実現の構造



資料 : JOHN BARDEEN (1956, p. 336)

このリング状の電極にプラス 1 ボルト程度の電位をかけると、接点を流れる電流が 10%ほど増大した。ついに、電界効果型トランジスタの原理的動作が確認できたのだ。ショックレーが電界効果型トランジスタの実験を開始してから 2 年半余りの

時間が過ぎていた。

この日、ブラッテンは帰りの相乗りの車の中で、「今日はこれまで経験した中で最も重要な実験に参加したよ」と同僚に話した。そして帰宅した彼はバーディーンに電話し、すぐにショックレーにこの良いニュースを伝えた。翌々日の日曜日、バーディーンは、4つのタイプの電界効果型トランジスタ構造の考えをノートに書き記した。週明けには、バーディーンとブラッテンはシリコンの代わりにゲルマニウム、タングステンの代わりに金、その他さまざまなバリエーションを実験した。ブラッテンがデリケートな作業をこなし、バーディーンがブラッテンのノートに結果を記入する、といった共同作業であった。

ショックレーのグループにいた、奇妙な小道具作りを得意としたムーア（Michael Riordan, Lillian Hoddeson, p.132）は、蒸留水に代わる電界液として、電界コンデンサに使われていたホウ酸塩のグリコール溶液を使うという重要な提案も行った。蒸留水は蒸発し易く、実験中流れてしまいやすいが、グリコール溶液なら粘りがあり安定して蒸発もしにくかったからだ。

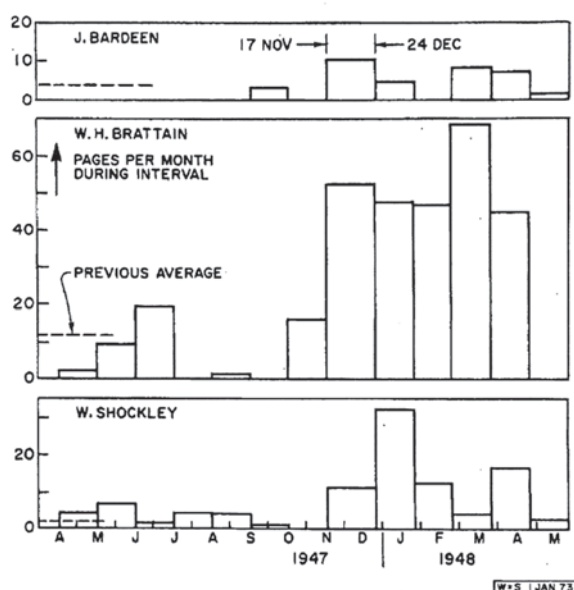
これまでしばらく、全く別の固体物理の問題に熱中していたショックレーも、いくつかのトランジスタ構造、点接触を使わないタイプのアイデアを提案した。

ショックレー（SHOCKLEY（1976）, p. 599, p608）は、この研究の活性化現象を、「可能性が開けたこと（表面準位効果が克服できたこと）が考える意欲（the will to think）を刺激した」と表現している。また、これは、Chance Favors Prepared mind というパスツールの言葉の第二の解釈を示唆していると考えられる。この言葉の第一義的解釈は、「偶然はそれを発見しようとよく準備されている場合に（のみ）発見されるのだ」という理解である。第二の解釈は、「それが起きたら、さらに次に進みたい・それを活かしたいと（真剣にそれを待ち望み）準備している場合に偶然が起こるのだ（それを見つけるのだ）」という理解である。二つの理解は矛盾しない。発見を目指してよく準備しているのは、多くの場合、それを発見して活かす目的が明確・強固だからであろうし、目的が明確・強固であれば、それを発見するための準備も充実するからである。

ショックレーは、具体的な現象として、これから約1か月、トランジスタの発明

日とされる 1947 年 12 月 23 日までの間、ショックレー、バーディーン、ブラッテンの実験ノートの量をレビューしている。ショックレーは、この 1 か月を magic month と表現している。確かに、1947 年 11 月 17 日を境に、三人の実験ノートの記述量が大幅に増大している。

図 4-5 三人のノートの記述量



資料：ショックレー (SHOCKLEY (1976) , p601)

2) Creative-Failure の意義：電界効果型トランジスタの動作確認

ショックレーはまた、トランジスタの創造プロセスにおける、何回かの「失敗、それを起点（契機）とする成功」の意義を Creative-Failure と称している。失敗がなければ創造は生まれなかった。創造は、失敗をうまく活かすことによって生まれたとの意と解釈できる。本研究は、特に失敗をうまく活かすプロセスに偶然・異変が関与しセレンディピティが生起している場合に特に注目している。ショックレーは、失敗を活かすために、まず失敗に対してどのような意図的営為を行ったかについて関心を寄せている。

電界効果型トランジスタを仮定したショックレーの実験は失敗した。そしてその失敗の原因は、全く説明不能であった。しかし、バーディーンがその現実を説明し得る理論（表面準位仮説）を企図したからこそ、その理論を確かめるためのブラッ

テンの実験が可能であった。そして彼らは実験を、元々の目的のためでなく、一旦その理論の検証のために行った。ショックレー (SHOCKLEY (1976), p. 605) は、バーディーンが表面準位仮説を構築して失敗原因を解明しようと企図したことを極めて高く評価する。「1946 年 3 月 19 日は、バーディーンがこの訳のわからない電界効果の失敗を創造的なステップへ変えた日である」、失敗を活かしそれを成功に転換したのは、バーディーンの貢献によるとしている。

ショックレー (SHOCKLEY (1976), p. 598) は、また、失敗を「限界を肯定的に認める」という意味でも有意義なものと捉えて、次のように記している。「自分の限界を認めるということが、いかに創造力を刺激するかという例を挙げよう。そこでは、失敗を単に能力の低さを表すものとして受け入れる必要はなく、むしろそれを進歩のステップとして利用できるのだということを示したいと思う。この創造的失敗の方法論の精神を伝えることがこの論文の主な目的のひとつだからである。この目的は、創造性にいわば、二重否定の貢献をしている。というのは、これは否定的態度を打ち消すように企てられたものだからである。」

3) この後のトランジスタ創造に残された課題

ここまでの研究開発プロセスで、電界効果型のトランジスタの原理的動作可能性が実証された。トランジスタ発明への大きな通過点を越えた。

ただし、この原理確認実験の結果には、性能上克服しなければならない二つの課題があった。

第一が周波数特性、つまり増幅できる周波数がたかだか数十 Hz⁴⁹だったのである。これは、電解質（粘性のある液体）を利用しているため、そこでの電界の変化速度以上の変化が必要となる高い周波数には応答できなかったからである。トランジスタ開発の目的であった電話での利用（有線音声通信）のためには、ほぼ千 Hz 程度の増幅を可能とする必要があった。

第二に、この素子は電圧増幅が不可能であった。これは、この素子の構造、材料による制約であった。

しかし、表面準位効果に代表される様々な障壁を克服し、固体増幅素子の原理が

⁴⁹ 交流信号の 1 秒間の振動数。

確認できたことは、極めて大きな成果であり、ショックレーの言う、Creative-Failure による the will to think, magic month に到る偉大な成果であった。

(5) 点接触トランジスタの誕生

本節の冒頭に記したように、この後、最初の実用向け半導体増幅素子として世に送られた点接触トランジスタの発明に到るまでに二つの偶然が関与した。小さなセレンディピティと呼べるブレイクスルーが起こった。それらを含むこの後の経緯について簡単に記述し、点接触トランジスタの発明までのプロセスを確認しよう。

1) 高圧印加による予期せぬ酸化ゲルマニウムの形成

1947 年 12 月 8 日、残された課題の内、電圧増幅を可能にしようと、バーディーン⁵⁰の提案により、ブラッテンは新たな高逆電圧ゲルマニウムを使った実験を行った。その結果、電解質を用いた電界効果型トランジスタは、電圧増幅が可能となり、電力にいたっては、300 倍もの増幅結果が得られた。しかし、依然として周波数特性は改善しなかった。粘性の高い、電解質を用いていたからである。

12 月 10 日、ブラッテンは同じ実験を繰り返した。そして、電解質の小滴にかかる電圧を思い切ってマイナス 45 ボルトまで上げた。ブラッテンは、この高圧印加によりゲルマニウムの表面に薄い膜（酸化膜）ができていることに気が付いた。

「いまでもあのグウ（電解質）を通して見た緑色（酸化膜）が目に焼きついてい
る」とブラッテンは回想した⁵⁰。この膜が酸化ゲルマニウム膜と分かり、また、ギブニーの提案でこの酸化膜を絶縁体として電解質の代わりに使い、金属片を接触させ電位をかけ電界を形成・制御することを試みることにした⁵¹。

2) 過剰洗浄による酸化膜の消失と点接触トランジスタの誕生

上記の試みのため、12 月 12 日、ブラッテンは、酸化膜に電圧印加用の金属片、金のスポットをいくつかおいたゲルマニウムのサンプルで正負の電位の印加による電流の変化を調べていた。しかし、金をかぶせる前の洗浄が過剰だったことにより、計画と異なり（偶然）、酸化膜は消失し、金は直接ゲルマニウムに接触していた。

⁵⁰ Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997, p134)。

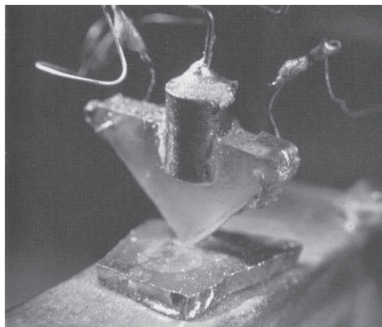
⁵¹ 現在まで、電界効果型トランジスタはこの酸化膜を利用した基本構造を採用している (MOS: Metal Oxide Silicon)。

その異変に気が付いたブラッテンは「自分自身に愛想がつきたが、金の縁あたりの接点で何か効果がおきないかどうか確かめてはいけない理由はない」と考えて実験を続けた。

12月14日、その縁にマイナスの電圧をかけた金接点において、金のスポットにプラスの電圧をかけて、増幅作用を観察した。電力利得はなかったが、電圧を増幅し、電解質を用いないから、当然に周波数特性は改善された。

12月15日、バーディーンとブラッテンは、表面の二つの接点（金属片）を近づけることにより電力利得と周波数特性の両立を得られるだろうと結論付けた。そして、実際、バーディーンの計算に基づき、接点を0.002ミリメートル程度に近づける実験装置を用意して、その特性を確かめた。その結果、12月16日電圧利得、電力利得、周波数特性が並立する、半導体増幅素子、点接触トランジスタの開発成功に到った。

図 4-6 点接触トランジスタ



資料：日本半導体歴史館（牧本次生, <http://www.shmj.or.jp/museum2010/exhibi304.htm>）

そして、ブラッテン、バーディーンは、点接触トランジスタの構造と動作に関して、周到な確認を重ね、1947年12月23日、ショックレーが招集した半導体研究グループの会議でそのプレゼンテーションを行った。そして、トランジスタ開発の成功が確認された。これは、後にベル研にとって最高のクリスマスプレゼントと言われることになった。20世紀後半以降の人類にとっても、人類史上まれな、際立った贈り物であったことは言うまでもない。

さらに、1956 年、ショックレー⁵²、バーディーン、ブラッテンの三名はトランジスタの発明によりノーベル物理学賞を受賞した。

⁵² 本節冒頭に記したように、ショックレーは点接触トランジスタの開発に関する自らの貢献、その扱いについて、強い不満を抱いた。そして、功名心をもばねとして、その後の実用的トランジスタの構造の出発点となる接合型トランジスタ構造を提案、実用化した。しかし、その間、功名心に燃え常軌を逸したともいえる彼の行動により、バーディーン、ブラッテンとは、決定的な亀裂を生み、後にショックレー自身もベル研を去ることになった。

3. ペニシリン⁵³

(1) フレミングによる抗生作用の有効性に関する仮説構築

1) 医学者への道と第一次世界大戦への従軍経験

アレクサンダー・フレミングは、1881年8月6日にスコットランド南部エアシア、ダーヴェル郊外の人里離れた農家に生まれた (Gwyn Macfarlane (1984), p. 1)。フレミングは壮大な丘陵や谷に抱かれたこの地で、釣りやウサギ狩りに興じ、鳥の名前や動きを知り尽くす子供であった。一方、彼は、室内での知的ゲームにも飽くことを知らなかった。10歳になると彼はダーヴェルの大きな学校に通った。成績が良く同級生の中で一番だったフレミングは、12歳になるとキルマーノックの中学校に入った。物覚えが良く、勉学意欲も旺盛で、1年目、首席であった。しかし、彼はものすごく勉強したのではなく、学校の授業はほとんど努力することなく身に付けたようだ。しかも、注意深く、批判的で、学んだことから自分の結論を引き出したという。

この中学校で18か月を過ごした後(1895年)、フレミングは、医者としてロンドンで開業をはじめた兄トーマス・フレミングの誘いを受け、キルマーノックの中学校をやめ、ロンドンに移ることを決めた。ロンドンでフレミングは工芸学校の実業過程に通った。彼は飛び級を重ね、16歳でそこを卒業して、一流の船会社の職員として働いた。しかし、この仕事に興味も満足感も持てなかったフレミングは、1901年に伯父の遺産250ポンドの受取りを前に、トーマスの薦めもあり医者になることを決心した。彼は医学に対する燃える様な情熱によってではなく、退屈な仕事から逃れるためにそれを決心したのである。フレミングは、他の新入生より2、3歳年上でありながらロンドン医学校に入るための入学資格試験に合格していない、かつ工芸学校卒業なのでラテン語を学び損ねたというハンディを負っていた。しかし、彼は夜間に勉強を見てくれる先生を探し、1901年7月、検定試験を受けた。聖書、歴史から算術、代数、幾何学、簿記、ラテン語等14科目に合格し、英語では一等という成績であった。13歳で学校を離れ、工芸学校に通い、4年間事務員をしていた彼が、改めてたいした努力をすることもなくトップをとれたことは驚くべきこと

⁵³ 本節の参考文献は、特に断りのない限り、Gwyn Macfarlane (1984)。

だが、家族にとってはそうではなかった。フレミングは、工芸学校のどの学年でもほぼトップの成績を修めていたし、試験にうまく合格する素養があったのである。それはこつこつ勉強した結果ではなかった。彼は、夜も勉強に没頭することはほぼなく、家族といっしょにゲームをすることが多かった。「競争は彼にとって熱中するものだった」と同級生は書いているが、彼が検定試験に素晴らしい成績で合格したのは、競争的な要素があったからという (Gwyn Macfarlane (1984) , p. 24)。

フレミングは、ロンドンにある 12 の医学校から好きなところを選び入学することができた。歩いて通える中から、そのチームと水球の試合をしたことがある、という理由でセント・メアリーズ病院医学校を選んだ。1901 年 10 月に入学した彼は、第一次世界大戦においてフランス戦線で過ごした期間を除いて、51 年の長きにわたる研究生生活のすべてをここで過ごした。

奨学金試験に合格、その他多数の優秀賞を受けながら 1904 年に臨床前の全過程を終え、中間医学士試験に合格した。彼の有能さを記憶力の良さに帰した伝記作家もあるが、弟のロバートは、それを「重要な事実を、論理的でたやすく記憶できる枠組みに変える選択眼と洞察力を備えた精神」と考えていた (Gwyn Macfarlane (1984) , p. 38)。

その後、フレミングは、臨床研修学生として、配属、指導を受け、1906 年に資格試験を受け、有資格の医師となり、セント・メアリーズ病院勤務となり、同年 6 月、かねてより指導を受けていたアームロス・ライトの助手となった。

セント・メアリーズ病院は、大学と一体で研究・教育と臨床を並行して行う医療機関であり、当時明らかになりはじめた様々な病原菌による感染症の治療と予防に力を入れていた。特に、フレミングの上司でもありセント・メアリーズ病院で指導的立場にあったアームロス・ライトは、予防接種の実用化、普及に力を入れていた。各種予防接種は、その実施だけでなく製造によってセント・メアリーズ病院の重要な収入源でもあった。

フレミングは、1914 年 10 月に第一次世界大戦の従軍医としてフランス戦線における野戦病院があったブローニュに赴き、傷病兵の治療にあたった。第一次世界大戦は、火器の殺傷力の高まりによって、傷病兵の外傷が深化、深刻化した。それに

よって、外傷への細菌感染症は治療の困難さを高めた。当時開発が進みはじめた化学消毒薬（石炭酸等）は、外科手術のような直線的傷の表面の消毒には相当有効であったが、戦傷のようなジグザグで深い傷に対しては浸透が進まず、有効でなかった。また、石炭酸を含む、多くの殺菌方法には、既に火器の殺傷力・土汚れ・細菌感染等で弱った細胞に対して、むしろ副作用・逆効果が目立つ等の様々な障害が立ちだかった。フレミングは、消毒剤の使い方を工夫する等優秀な臨床・研究医としての能力を発揮したが、戦場での悲惨な感染症、特にガス壊疽での多数の悲惨な死者を目の当たりにし、強い無力感を覚えた。

また、第一次世界大戦中、1918年には、インフルエンザ（スペイン風邪）が大流行し、死者は200万人を超え、戦争による死亡者数を過少評価させるほどであった。インフルエンザは、細菌でなくウイルスを原因とするが、死者の多くは、インフルエンザウイルスによって気道の粘膜をひどく傷つけられ、そこにレンサ球菌、ブドウ球菌等が感染し、肺の細菌感染症で亡くなった。

フレミングは、細菌感染症の悲惨さを痛感して、「病原菌に有効で傷の奥への浸透性が良好。一方人体、特に白血球に無害な殺菌方法」の必要性を痛感した。石炭酸等の消毒液は細菌に対して有効だが、それ以上に白血球（食細胞）に副作用を与えることが多かったのである。

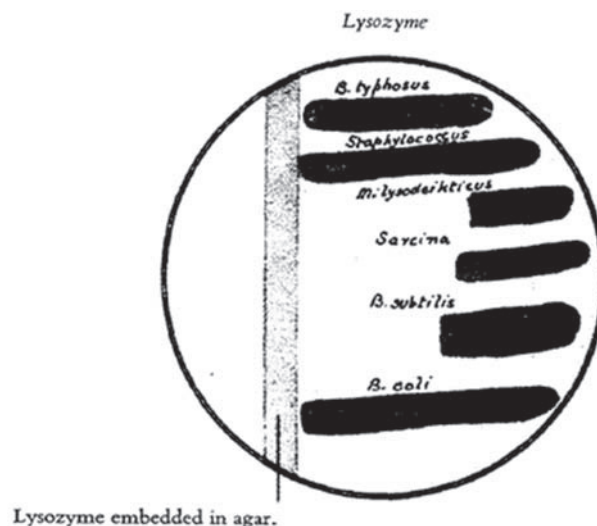
フレミングは、以上に示したように極めてまじめな医学者、細菌学者であったが、決してまじめ一辺倒、仕事のみ人間ではなかった。ゴルフ、カードゲーム、庭いじりに熱心なゲーム好き。無口ながら人付き合いの良い性格でもあった。また、柔軟な思考で自由を好むタイプでもあった。弟ロバートによれば、フレミングの思い付きで独自のルール、例えばすべてパターだけを使ってラウンドするゴルフをともにしたこともあるという（Gwyn Macfarlane (1984) , p. 73）。

2) リゾチームの発見と有効な抗生作用の存在に関する潜在的認識

第一次世界大戦後、セント・メアリーズ病院に復帰したフレミングは、1921年11月、彼の鼻汁中からリゾチーム（後にライトによってこう命名された）を発見した。当時彼の下で仕事をしており、後に著名な細菌学者となったアリソン博士の記録によれば、その経緯は次の通りである（Gwyn Macfarlane (1984) , p. 99）。

風邪をひいたフレミングが自分の鼻粘液をとって培養したところ、その培養器に空気中から細菌（後にマイクロコッカス・リソデイクティカスと命名）が混入して繁殖したが、鼻粘液に近いところでは、その細菌のコロニーが見られないのであった。いつものように培養器を捨てながらその中のひとつを手にして調べていたフレミングが「これは面白い」と言ってアリソンに見せたという。次にフレミングは、細菌を食塩水に懸濁した不透明な黄色の液を作り、それに鼻粘液を少しずつ加えたところ、ものの二分もたたない内にそれは、水のように澄んだ（細菌が殺菌された）。

図 4-7 リゾチームの殺菌作用を確認する培養器



資料：ALEXANDER FLEMING (1945, p. 86)

フレミングは、図 4-7 のような実験を行い、リゾチームがどのような細菌に対して溶菌作用があるかを確認した。垂直の寒天溝内にリゾチームが埋め込まれて、それに対し垂直（図に向かって水平）に各種細菌が右辺から培養されている。リゾチームは、マイクロコッカス・リソデイクティカス（上から三番目）に対して極めて有効であるが、白色ブドウ球菌、肺炎球菌、レンサ球菌、大腸菌（最下段）には溶菌作用を示さなかった。

以降、フレミングは、多くの人の通常時の鼻粘膜、涙、血清、血漿、腹水、胸

水、膿を調べ、それらに同じ溶菌作用があることを確認した。

続く数週間、フレミングのノートは、溶菌物質（リゾチーム）の自然界での分布とそれによって影響を受ける細菌の種類、溶菌物質の実体を調べるための実験記録で埋め尽くされている。

後のペニシリンの発見経緯から振り返るとリゾチーム発見の意義は、次の二つである。

第一に、フレミングがこのような生体（物質）間の作用－抗生作用による殺菌剤（病原菌には有効で人体、特に白血球の作用に無害）の可能性を強く認識したことである。ただし、リゾチームは原則として人体に無害な細菌にのみ作用して、病原菌には作用しなかった。それ故に、フレミング以外のほとんどすべての研究者は、「抗生作用はありふれた現象であり、有効利用の可能性はない」と再認識した。リゾチームが病原菌には作用しないというのは、素直に考えれば極めて当然のことである。即ち、人体に広範に存在するリゾチームが作用（溶菌）する細菌は病原菌にはなり得ず、そもそもそれが作用しない細菌の一部が病原菌となっているからである。

第二に、フレミングが図 4-7 に示した方法等、細菌とそれに対する抗生作用物質の関係を把握・実証する方法、その感度に関する評価方法を考案、習得、洗練させたことである。

このように、少なくとも、フレミングにとって、リゾチームの発見は後のペニシリンの発見に重要な意義をもっていた。このことを、Gwyn Macfarlane⁵⁴（1984, p. 98）は、「ペニシリンの発見に不可欠な予備段階であった」⁵⁵と評している。

しかし、1921 年 12 月にフレミングがライトの創設した医学研究会でリゾチームに関する発表を行った際、それは全く反響を呼ばなかった。その理由は、病原菌への抗生作用を見出したのではないという結論に加え、フレミングが講演上手ではな

⁵⁴ 1907 年生まれ。オックスフォード大学の臨床病理学名誉教授。晩年フレミングによるペニシリンの発見とフロリーらによる実用化に興味を抱き、本文献を著した。

⁵⁵ ペニシリンを「再発見」－「フレミングの発見」を発見し、それを量産、実用につなげたフロリーとチェインがフレミングの業績に注目したのは、リゾチームに関する研究に着目したからである。このことからリゾチームの発見には大きな意義があった。

かったからであると言われている。しばしば聞き取れない一本調子の話は、彼自身に取り組んでいる研究にほとんど情熱を持たず、重要な点を「放り出している」という印象を与えた。聴衆が理解できたのは「これまで聞いたこともない無害の細菌が涙や唾液で溶解する（傍点筆者）」ということだけだった。それが一体どうしたのだ、という疑問が浮かんだに違いない。

以上の経緯を踏まえて筆者は、「フレミングは、抗生作用の有効利用に関する可能性を認識していた—これをもって潜在的な仮説を持っていたと言って良いだろう」と考えている。その理由は、①第一次世界大戦に従軍したフレミングが戦傷およびスペイン風邪を目の当たりにして病原菌への治療法を切望していた、②リゾチームの発見とその後の研究で抗生作用の意義、可能性を強く意識していた、③物事に対して様々な可能性を考える柔軟・創造的な思考様式を持ち、かつ簡単には否定的結論を下さない性格だったこと等である。

（２）ブドウ球菌変異株の培養実験中の偶然の生起

１）細菌大全への執筆のためのブドウ球菌変異株の培養実験

フレミングは、他の研究と合わせ、リゾチームの研究も続けたが、1926年に到るも特段のインパクトを生み出せなかった。ただし、当時セント・メアリーズ病院の重要業務、主要収入源であった各種の予防接種作成のための細菌培養における雑菌の繁殖防止には、リゾチームが有効に使われた。

このころフレミングは細菌、特にブドウ球菌研究の権威者と目され、『細菌大全』のブドウ球菌の項の執筆を依頼された。彼はその執筆のため、1927年からブドウ球菌の培養実験を行った。彼は、特に毒性と関係すると思われた黄色ブドウ球菌変異株に注目した。菌をうえて、24時間恒温槽⁵⁶で培養し、それを室温で数日放置すると色の変化が起こることがあり、色の変化が変異株の存在を示すのだ。

彼は、研究生のD・M・プライスの手伝いを受け、実験を開始した。しかし、1928年2月にプライスは、司法解剖を学ぶためにフレミングの研究室を去った。フレミングはひとりで研究を続け、1928年7月研究室の日の当たらない場所にたくさん
のブドウ球菌変異株の培養を目的とした平面培地を置き、夏季休暇に入った。

⁵⁶ この場合には、室温より高い体温程度。

2) 青黴によるブドウ球菌の繁殖抑制作用の発見

プライスは、同年9月初めにセント・メアリーズ病院に戻り、研究の進捗状態を知るために、同じころ夏季休暇明けの仕事を再開したフレミングの研究室に「立ち寄った」⁵⁷。フレミングは、たくさんの平面培地を、クレゾールの入ったトレイにその液面より高く積み重ねていた。変異株が生成していない培養器の洗浄の準備として、まず病原菌をクレゾールで殺菌し危険を排除するためである。プライスに実験の経緯を説明するために、フレミングはたまたま液面より上にあった培地を取出して、もう一度調べていた。そのとき、一枚の培地の様子が違うのに気が付いた。

「これは面白い」といってもっと目を近づけ、今では有名な場所、すなわち、青黴の大きな塊の周囲のブドウ球菌が生えていないところを指さした。しかし、プライスは、自分の仕事のためにその場を去った。そして、彼は12、3年後まで、そこで起こったことについて、全くといって良いほど何も考えなかったという。

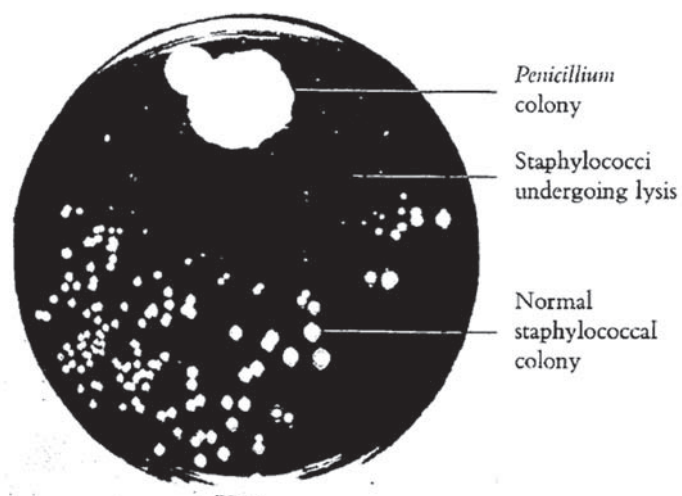
しかし、フレミングは、奇妙な現象を食欲に集めるコレクターであり、自分が見つけた現象に意気盛んであった。

彼は、奇妙な青黴を少しとって、試験管の液体培地で二次培養した。また、この日彼の研究室に来た人は、誰もが、この奇妙な培地を見せられた。その中には、フレミング研究室真下にいた黴の研究者のラ・トーシュ⁵⁸もいた。また、フレミングは雑談を求めて「大部屋実験室」に行くときにも、この培地を持って、様々な人に見せて回った。しかし、彼のこの奇行には誰も特別の関心を示さなかった。誰もこの現象の意義に気が付かなかった。以前のリゾチームの“トリック”と非常によく似ていたこともその一因であった。しかし、フレミングがこの無反応に落胆しなかったことは明らかで、彼は、この培地を写真に撮り、ホルマリン蒸気にさらして細菌と青黴を殺し、固定して長く保存できるようにした。後にこれは、大英博物館に保存されることになった。

⁵⁷ Hare (1970, p. 54) による記録と当年のカレンダーから、9月3日(月)の朝だと推定される。

⁵⁸ セント・メアリーズ病院は、先述したように予防接種を重要な収入源としていた。従って、予防接種によって生じるアレルギー対策は重要な研究テーマであった。そこで、アレルギー対策のために各種アレルギーの研究を行っていて、黴の専門家が在籍していた。

図 4-8 フレミングがプライスに示した培養器

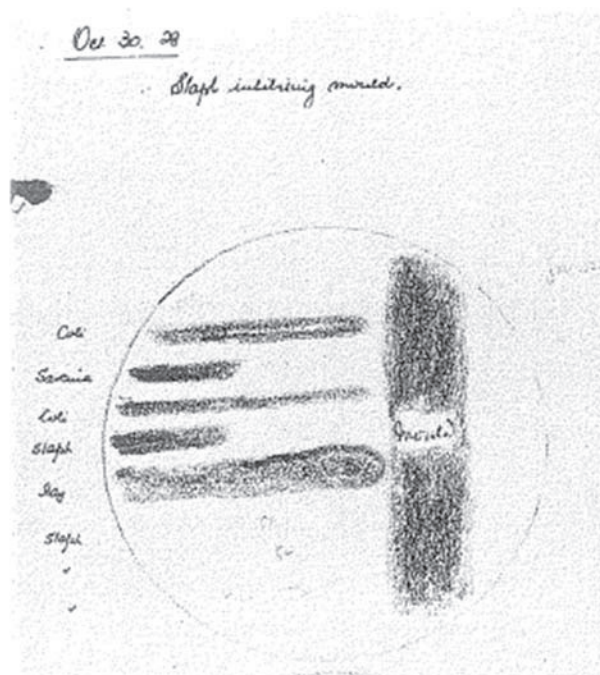


上部のペニシリウムコロニーに対して、正常ブドウ球菌（staphylococcal）コロニーが繁殖しているが、ペニシリウムコロニーの近くで溶菌（lysis）している。

資料：ALEXANDER FLEMING（1945, p. 84）

フレミングの実験ノートにこの現象に関する記録が現れるのは1928年10月30日付けで、約2か月の空白がある。

図 4-9 フレミングの実験ノートの描画



資料：Gwyn Macfarlane（1984, between pages 144 and 145）

この記録によれば、リゾチームの時と同様の方法で、青黴から発生する液体物質と何種類かの病原菌との相互作用（抗生作用）に関する実験結果が示されている。青黴の発育した付近の培地表面ではブドウ球菌（Staph）と Sarcinae（八連球菌属と思われる）の発育は黴から 3 センチのところまでとどまっており、coli（大腸菌であることはほぼ間違えない）と Hay（不明）は全く発育を妨げられていない。

この後ノートには、1929 年 3 月まで 48 頁にわたってこの黴についての実験が述べられている。これらの実験の筋道はかなりはっきりしている。はじめに「黴の汁」の確保のため、黴の最適な培養方法（培地、温度、日数等）を探っている。次にリゾチームの研究で開発した「溝堀法」を用いて、「黴の汁」で殺される細菌の一覧表を作成した。病原菌のレンサ球菌、ブドウ球菌、肺炎球菌、淋菌、髄膜炎菌、ジフテリア菌はすべて強く阻止された。一方、チフス菌、パラチフス菌、大腸菌群には効き目がなかった。

また、1928 年 11 月の終わりには、フレミングは白血球の食細胞とその食細（細菌）能力に「黴の汁」が何の副作用も及ぼさないことを「スライド・セル」⁵⁹の中で確かめた。Gwyn Macfarlane（1984, p.122）は、「第一次世界大戦中から 12 年以上も化学殺菌剤およびそれが効果よりも害を与えやすい事を研究してきたフレミングは、ここに生体の細胞には害がなく細菌には十分に致死的に働く天然の殺菌剤があると感じただろう」と推測している。

他方、フレミングは化学殺菌剤に比べて、黴の汁が極めて遅行性であること、血清が共存すると殺菌作用をもたないこと等の問題点も認知した。それでも、フレミングは研究の努力を緩めず、ラ・トーシュに黴の同定を依頼し、彼はこれをペニシリウム属であり、ペニシリウム・ルブルムに最も似ていると⁶⁰した。そしてフレミングは、この黴の汁、活性成分をペニシリンと呼ぶことにし、1929 年 2 月からこの名称を使用した。

また、フレミングはこの排出液を一定程度精製し、人体の外傷に適用、あるいは

⁵⁹ フレミングが考案した、当時としては、画期的に微量の試料で殺菌力・毒性を調べられる方法。

⁶⁰ 後にこれは誤りであり、ペニシリウム・ノターツムであることが明らかとなった。

動物実験、人体への少量服用により、重篤な副作用等のないことを確認した。しかし、フレミング及びセント・メアリーズ全般に、化学の知識が乏しかった。周囲にも化学専門家や組織がなく、またフレミングの抗生作用発見を評価する専門機関がなかったこと等⁶¹から、結局ペニシリンは大量培養・精製には到らず、すぐには実用化されなかった。

図 4-10 フレミングの実験机



フレミングの実験机は、整理されているが、物にあふれている。特に培養器がうず高く積まれている。

資料：[http://www.theguardian.com/healthcare-network/2012/](http://www.theguardian.com/healthcare-network/2012/sep/03/in-praise-of-anecdotal-evidence)

sep/03/in-praise-of-anecdotal-evidence (2014 年 9 月 4 日取得)

なお、フレミングがペニシリンの発見に成功した要因のひとつとして、彼が極めて“欲張り”で、簡単には廃棄・整理しない実験者だったとの逸話、証言が残っている。リゾチーム発見時にフレミングの下で実験をしていたアリソンは、次のように言っている⁶² (Gwyn Macfarlane (1984), p. 99)。「…実験台の上が 40 から 50 個に達する平面培地であふれんばかりになるまで、2 週間から 3 週間もほったらかしのままでした。そして捨てるのは、またひとつずつ何か変わったことが起こってい

⁶¹ ペニシリンが、感染症治療目的に使われなかったもうひとつのフレミングの事情として、予防接種製造の責任者でもあったフレミングが、そのための細菌培養の雑菌混入の防止のためにペニシリンを大変有効に使ったということが考えられる。即ち、極めて有用な利用法があったためそれで満足し、大幅に困難な目的のための利用促進が滞ったという可能性である。

⁶² 1974 年のアルスター医学会での講演。当時アリソン博士は著名な細菌学者となっていた。

ないか、あるいは興味あることが生じていないかどうかを調べてからです。・・・もしフレミングが私のように潔癖であったならば、決してリゾチームとペニシリンを発見することはできなかったでしょう。」

これが、フレミングがペニシリン発見の偶然を呼び込みそれを見落とさなかった大きな要因であると考えられる。それでは、そんなフレミングでさえ、なぜプライスが帰任し研究室を訪問する前に、一旦ペニシリンの作用した培養器を廃棄したのであろうか。これは、この実験が抗生作用の探知を目的とした実験ではなく、かつ、ブドウ球菌の変異株を求めていたため、変異株の特徴である黄色変性に第一に注目していたからだと思われる。しかしプライスの訪問により、その培養器を再観察し、その鋭敏な観察力でこの世紀のイノベーションを成し遂げる最重要契機を得たのである。ぎりぎり、極めて微妙な状況がこうしたセレンディピティによるイノベーションの成否の分水嶺となっていることを示している。

3) 青黴によるブドウ球菌の繁殖抑制という偶然の稀少さ

「偶然青黴が培養器に混入し、人体に有害な病原菌の繁殖を抑制し、鋭敏な観察者がそれを発見する」と表現すると、この偶然とのその発見は、それほど稀少、めずらしいことではないと聞こえるかも知れない。しかし、一連のこの現象・営為を詳しく見ると、奇跡とも呼びたくなる、稀少な現象の重なりなのである。それらの主要因を列举し説明しよう。

①フレミングが培養しようしていた病原菌がブドウ球菌、しかも変異株であった

②セント・メアリーズ病院が予防接種を重要業務・収入源とする病院であった

③1928年夏（7月～8月）にかけてのロンドンの気温変化が最初はやや冷夏であり、後半一般的な夏の気温となった

まず、①ブドウ球菌のしかも変異株の培養実験であり、その変異株は、常温における変異で生じることから、フレミングはその培養器を恒温槽から取り出して放置、観察した。このことには二つの意義がある。第一に蓋をして恒温槽で培養するのみの実験であれば、フレミングは、しばしばその蓋をあけ変異株を探しての観察を行わなかったはずである。即ち、青黴が混入する可能性は非常に低かったのである。第二に、時々蓋をあけて観察したとしても、恒温槽の温度条件におくことを原

則とすれば万が一青黴が混入したとしても、それが繁殖することはなかった。なぜならば、この青黴は、ブドウ球菌の繁殖に適する温度、つまり人体の体温程度⁶³では、繁殖できず、より低温で繁殖する性質を有しているからである。

加えて、②により予防接種によるアレルギー対策がセント・メアリーズ病院の重要な課題であり、アレルギーの解決に向けて種々のアレルゲン研究が必要であった。その研究のひとつとして黴の専門研究者がフレミングの研究室の近傍（階下の同位置とされる）にいたのである。この青黴は、後の同定が困難であったほど稀少な変異黴であった。従って、近傍で黴の研究者が様々な黴を多量に培養していなければ、この黴が、恐らく建物内を飛来⁶⁴して、フレミングの培養実験に混入することは、ありえなかったのである。

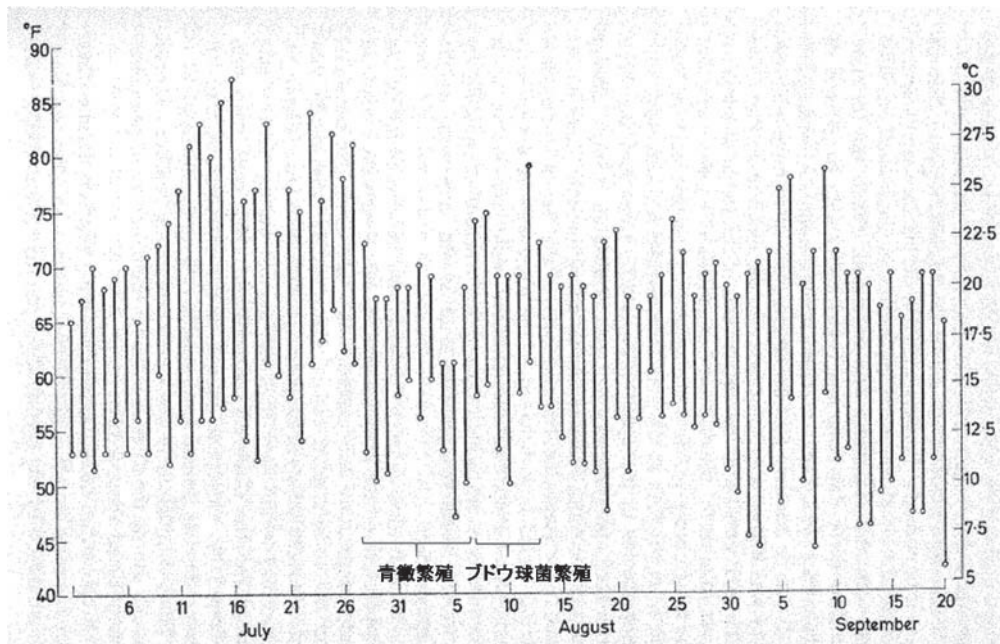
さらに、③は、その温度変化の順番も含め重要な意味を有する。後に解析され判明することであるが、ペニシリンの作用は、厳密には生きている菌の殺菌ではない。ペニシリンは、ブドウ球菌らの属する真正細菌が細胞分裂し増殖する際の細胞壁の構成物質の合成を阻害⁶⁵する。つまり、厳密に言えば、ペニシリンは殺菌するのではなく、細胞分裂を阻害するのである。従って、もし人体温度に近い温度でブドウ球菌の細胞分裂が起こった後に、やや低温状態になったならば、青黴による“溶菌状態・透明化”が観察されることはないのである。すなわち、この夏実際に起こったことは、恒温槽でブドウ球菌が一定程度増殖しそのコロニーが形成された後に、恒温槽外に出された後、混入した青黴が室温状態（比較的冷夏）で繁殖し、それがペニシリンと呼ばれる成分・液体を排出し、今度はやや暑い夏となり、ブドウ球菌が繁殖・分裂しようとした際にその分裂の際の細胞壁の生成が阻害され、それが溶菌されているように観察されたのである。

⁶³ これが、ブドウ球菌が人体に有害なひとつの理由であり、また、この青黴との抗生作用が自然にはなかなか観察され得なかった理由でもあろう。

⁶⁴ これが、フレミングの研究室の窓を通じて往来から飛来したものではないだろうと推定されることについては、Hare (1970, p. 81) の研究に詳しい。

⁶⁵ これらペニシリンの作用機構は、1950年代後半に報告されたパークとストロミンジャーの研究による (Gwyn Macfarlane (1984), p. 246)。

図 4-11 1928 年ロンドンの気温推移（最高 - 最低気温）



フレミングが夏季休暇に入った前後の 7 月 26 日から 8 月 5 日ころまでが青黴の繁殖に適し、その後ブドウ球菌の繁殖に適する温度となっている。

資料：Hare (1970, p. 77)

以上のように極めて稀少な重なりである偶然が生起し、しかも、フレミングは、一旦その培養器を廃棄しかかったが、完全に廃棄される前に訪問者があり、フレミングが培養器を再観察したことによってペニシリンの存在が発見されたのだ。

(3) ペニシリンの再発見と実用化への道

上述の数奇な経緯により発見されたペニシリンとその有用な抗生作用であるが、この稀代のイノベーションが実用化の端緒につくまでには、1939 年のフロリーとチェインによる「抗生作用による殺菌剤の開発」という目的設定と、そのための抗生作用に関する論文の網羅的調査を待たなければならなかった。彼らはその網羅的調査により「フレミングによるペニシリンの発見」の業績を発見、つまりペニシリンを再発見した。

フロリーらが、この目的を持つに到った動機のひとつが、フロリーが自身の胃粘膜の障害から、リゾチームに関心を持ったことである。また、フロリーらがペニシリンに有望性を感じたのも、リゾチーム以来のフレミングの抗生作用研究の確かさ、内容の意義と手法の洗練を認識したからである。

ここでも、様々な巡りあわせが、ペニシリンの再発見への道を拓いたのである。

彼らの再発見により、1940 年代前半から半ばにかけて、英米の研究機関、研究者の共同研究によって、人類最初の抗生物質が実用化、工業化され、それは、第二次世界大戦の帰趨を決する大きな要因ともなった。

その結果、ペニシリンの発見と実用化の功績によりフレミング、フロリー、チェインに 1945 年のノーベル医学・生理学賞が授与された。

4. アリセプト^{66, 67}

(1) アルツハイマー型認知症とコリン仮説

アリセプト（化合物名：塩酸ドネベジル）は、アルツハイマー型認知症のほぼ最初の治療薬として上市された日本発の画期的な医薬品である。当時エーザイの筑波研究所に所属した杉本八郎らのチームによって1983年に探索研究が開始され、1997年に米国で最初に発売された。当初から高い期待を寄せられ、未だにアルツハイマー型認知症に決定的治療薬がない中で、根治薬ではないが、進行を遅らせて、QOL (Quality of Life) の観点からは大きな意義を担う医薬品として、貴重な役割を果たしてきた。アルツハイマー型認知症は1907年、はじめて症例を報告したドイツの精神医学者アルツハイマー(1864～1915年)の名をとったものである。同病に決定的治療薬がないひとつの理由はその原因が確定できていないからである。最近では、脳にたまる「アミロイドβ蛋白質」という物質が脳神経を窒息させてしまうのではないかと、という原因説が有力⁶⁸であるが、確定には到っていない。

杉本（2010, 奥付）は、1942年生まれ、1961年にエーザイに入社し、1969年中央大学理工学部化学工学科を卒業し、アリセプトの探索研究開始前に、既にデタンドール（塩酸ブナゾシン、降圧剤）の上市に成功した中堅研究員であった。

表 4-1 創薬研究に関わる機能（セクション）

| 機能 | 業務内容 |
|----------|--------------------------------|
| 合成 | 新薬のもとになる化合物を合成。 |
| 評価（薬理評価） | 合成が作り出した化合物が、実際に薬として効くかどうかを判定。 |
| 代謝（体内動態） | 化合物が人体内で安定して吸収されるかどうかのデータを収集。 |
| 分析 | 化合物の物質としての構造的適性についての評価。 |
| 安全性 | 化合物の毒性判定。 |

資料：小野（2004, p. 247）の一部を筆者が変更

杉本は、筑波研究所の第一部の第2室に所属していた。第一部の部長は後に社長と

⁶⁶ 本節の参考資料は、特に断りのない限り、小野善生（2004）。

⁶⁷ 西野（2002）は、杉本が高脂血症、脳血管障害薬の開発を通じて知見を高めていたピペラジン系誘導体（後述）からの「ねじれ」として、本創薬事例を説明している。本研究の見方とは“鏡像関係”の視点による説明であると理解している。

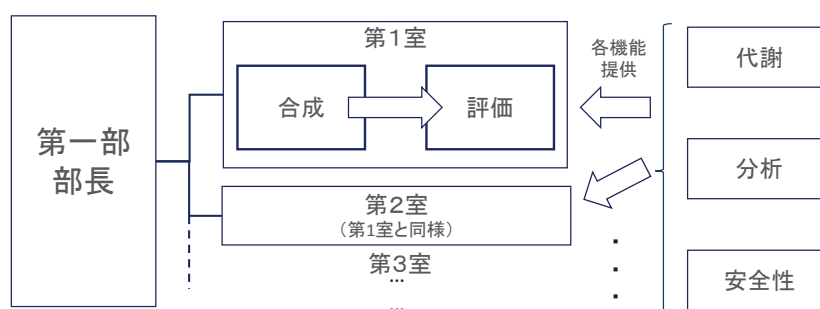
⁶⁸ 『ブリタニカ国際大百科事典 電子辞書対応版』。

なる内藤晴夫であった。1982 年に設立された筑波研究所では内藤の下に多数の新人が採用され、さながら不夜城のように研究が行われていたという。

第一部内は、感染症、消化器等、疾病または部位別に研究室の分担が定まっていて、第2室は、脳神経の担当となっていた。創薬研究を機能別にみると、「合成」、「評価（薬理評価）」、「代謝（体内動態）」、「分析」、「安全性」という5つの機能を担うセクションが存在する。

各研究室には、「合成」と「評価」のセクションがそれぞれ存在し、他の3つのセクション（代謝、分析、安全性）は各研究室発の一定程度以上に有望な合成物に対して、それぞれの研究室へのサービス・評価を行う共通部門として、研究室外にセクション単位でまとまって存在していた。

図 4-12 エーザイ筑波研究所の組織体制



資料：小野（2004, p. 247）の一部を筆者が変更

一般に（少なくとも当時）製薬開発は機能別（表 4-1 のセクション毎）に組織化されることが原則であり、本研究所のように機能の一部（合成と評価）についてでも、それをアウトプット指向（この場合には疾病または部位別）で一体化している組織形態は一般的ではなかった⁶⁹。この一般的でない組織形態が、アリセプトの創薬成功のひとつの、決定的ではないにしても促進要因になった可能性がある。一方、この組織形態がアリセプトの創薬成功を阻害する側面を有していたとも言えるが、この側面は杉本の行動・試行様式によって相当克服されたと考えられる（これらについては、

⁶⁹ 1990 年代前半、筆者らがコンサルタントとしてある伝統的強力製薬企業にこうしたアウトプット指向の改組を提案したが、強い違和感を示された。

後述)。

杉本はデタンドールの上市成功で、一目おかれていたが、その後の研究テーマでは挫折が続いていた。アリセプトの研究の前には、PHP という血管拡張作用を求めた化合物の研究を行って、失敗していた。これをテーマとしたのは、杉本の母親が脳血管障害性の認知症となり亡くなっていたことから、杉本が脳血管障害に強いこだわりがあったからである。

アリセプトの探索研究開始時に、杉本らが依拠した「コリン仮説」の内容は次の通りである。脳内には脳神経細胞が張り巡らされ、神経細胞間の情報伝達は神経伝達物質に担われる。アルツハイマー型認知症の患者の脳内では、神経伝達物質のひとつで記憶に関係するアセチルコリンが減少している。従って、このアセチルコリンを増加させることによって治療、症状の改善が期待できる。

いかにして、アセチルコリンの減少を抑制するかについては、次の通りである。アセチルコリン等は必要に応じ、その分解酵素（この場合はアセチルコリンエステラーゼ、AChE）の関与により分解されるが、この働きを阻害すれば、アセチルコリンの減少が抑えられる。具体的には、有効・無害なアセチルコリンエステラーゼ阻害物質を探索、合成することが目標となる。それが見出されれば、アセチルコリンエステラーゼの作用を低下させ、アセチルコリンの分解が抑制され、それが減少し過ぎないこととなる。

なお、当時、アルツハイマー型認知症の原因解明のレベルは今よりもはるかに低く、対応策としては複数の仮説があった。その仮説の中でも、そもそも根本治療でなく対処療法であること、当時アセチルコリンエステラーゼ阻害作用が見出されていたタクリン、フィゾスチグミンは副作用が強いこと等からコリン仮説は有力説ではなかった。しかし、他にも特段の有力説はなかった。

（２）コリン仮説の採用とタクリン誘導体での失敗

しかし、前述の状況の中、母親の認知症経験もあり、認知症治療薬の開発に強い意欲を有した杉本は、コリン仮説に基づいた創薬に着手した。これは、杉本のかつての同僚であり、友人でもあった杉山国重研究員（当時探索企画室所属）が持ちかけた基本アイデアに基づいたものであった。本格的に探索研究プロジェクトが立ち上がる

前年、1982年に杉本と新人研究員 巢組広幸の2名のみでのスタートであった。

この研究開始には反対意見も多かったという。その内容は次の通りである（宮田, 1999, p. 159）。そもそも脳の生理的老化現象である認知症に薬などあり得ないという“常識論”や「コリン仮説は過去のセオリー」とする見解。これは、世界的にアルツハイマー型認知症の研究が活況となり、根本的治療に繋がると考えられる「老人班」や「神経原線維変化」等が研究対象となってきたこと等を背景とする。これには「コリン仮説だけで治療（根治）できるものはない」という今日からみでの正論も含まれる。

それでも杉本がコリン仮説に基づいた研究を開始したのは、わずかとは言え、現実にはタクリン、フィゾスチグミン等のアセチルコリンエステラーゼ阻害薬が患者に効いたという事実（学会報告）だけに立脚してだったという。しかし、杉本は、なんとか治療薬を開発したいとの強い目的意識からこの研究を開始した。

また、アセチルコリン受容体は全身にあるので、もし、目的の医薬が開発できたとしても、それは全身への副作用が避けられないだろうとの薬理研究者達からの指摘もあった（杉本, 2010, p. 19）。しかし杉本は、「私は合成化学者であることが幸いしたのか、そんなリスクを十分考慮することができなかった（から研究を開始した）」という。

研究開始後、巢組はタクリンをシード⁷⁰化合物として 50～60 程度の化合物、タクリン誘導体を合成したという。しかし、元のタクリンの毒性が強く、副作用の点から、どうしても望ましい化合物が合成できなかった。こうして、1983 年、アルツハイマー型認知症治療薬の研究は中止寸前の状況に到った。

（3）実験・評価範囲の拡大による偶然の結果の取り込み

この窮地を救ったのは、アルツハイマー型認知症治療とは全く別目的の、タクリンをシード化合物として誘導されたのではない物質、開発名[C35-808]という化合物である。C35-808 は、元々杉本が持っていた別テーマ、高脂血症の治療薬として種々合成していた化合物のひとつである。杉本（2007, p2）は、降圧剤のデタンドールの上市に成功して以来、その成功からピペラジンやホモピペラジンを活性のモイエティ

⁷⁰ 医薬品開発における化合物合成の出発点となる物質。

ー⁷¹として、いくつかのプロジェクトを走らせていた。そのひとつが、高脂血症のテーマであった。中止された脳血管障害の治療薬⁷²も、杉本がデタンドールの開発以来関心を持ち続けていたフェニルピペラジン誘導体であった。

杉本（2010, p12）らは、フェニルピペラジン誘導体を多数合成していたが、当時いくら合成しても薬理系の研究員が興味をもたない場合は全く評価してもらえなかったので、合成物を台湾のバンブラ研究所⁷³に毎月送って、50 数項目にわたるブラインド・スクリーニング⁷⁴を依頼していた。つまり、杉本らは、目的（アルツハイマー型認知症治療、アセチルコリンエステラーゼ阻害作用）に合致したタクリンをシード化合物とした誘導体のみをアルツハイマー型認知症治療薬としての評価対象としたのではなかった。端緒は全く異なるが、種々の薬効があるとの感触を得てその性質に詳しくなっていた、タクリンとは別系統のフェニルピペラジンの誘導体へと実験・評価範囲を拡大していた。こうした杉本ら合成研究者の取り組みの事実は、周囲の薬理研究者にも浸透して行ったと思われる⁷⁵。

こうした取り組みが進められているなか、C35-808 のアルツハイマー型認知症治療薬としての可能性が、二つの情報源から発せられた。ひとつは、先のブラインド・スクリーニングの結果であり、C35-808 にアセチルコリンエステラーゼ阻害作用がみられるという報告である（桑島, 2006, p. 45）。もうひとつは、高脂血症薬開発の評価に携わる薬理系研究員からの「C35-808 をラットに投与すると振戦（しんせん、不随意のふるえ）が観察される、cholinergic⁷⁶な作用ではないか」という報告である（梅田, 2002, p. 94; 杉本, 2007, p. 2）。

この二つが「C35-808 にアルツハイマー型認知症治療薬としての可能性があるのではないか」との情報源となり得たのは、いずれも、予め、実験・評価範囲（着眼範囲）

⁷¹ moiety : 部分（『ランダムハウス英和大辞典（第2版）』小学館）。

⁷² フェニルピペラジン系化合物の副作用から本研究は中断されたが、杉本は少量で効く他の薬効があれば、副作用は問題にならない可能性があるとしてシンプルに考えていた。

⁷³ 後にブリオン研究所に変わる。

⁷⁴ 評価者が評価対象を知らないで、いくつかの作用の存否等を確認する評価。

⁷⁵ 合成研究者が、薬理研究者が興味を示さない化合物の中にも、有望な化合物が含まれている可能性を考えていることを示す行動であり、薬理研究者に対する一種の提案、対抗の表明とも考えられる。

⁷⁶ 「コリン作用性」のという意味。全身でコリンが増えすぎて、神経伝達が過活性になるので、ふるえが生じると考えられる。

を拡大して、「アルツハイマー型認知症治療薬として有望な化合物の偶然の合成結果を取り込む準備」をしていたから、あるいは、半ば自然にそうになっていたからだと考えられる。

第一のブラインド・スクリーニングは、意図的な実験・評価範囲の拡大である。元々アルツハイマー型認知症とは関係のない研究に端を発するフェニルピペラジンの誘導体を、アルツハイマー型認知症治療薬としての実験・評価範囲においていた。具体的にはアセチルコリンエステラーゼ阻害作用をブラインド・スクリーニング項目 52 の内のひとつとして設定していたのである。

第二の「C35-808 をラットに投与した際の振戦」が着眼され報告された状況については、その実験・評価の本来の目的、経緯等に関する直接的、詳細な情報を確認することはできないが、次のような状況であったと推定できる。まず、その実験・評価の目的は、アルツハイマー型認知症治療薬の探索（評価）に焦点をあてたものではなかったこと。なぜならば、「偶然、ほかの研究テーマの化合物のスクリーニングの中から、C35-808 が興味深い作用を示すことが見出された」と記されている（梅田、同前）からである。杉本（同前）も「セレンディピティの風が吹いたのです」と記している。

以上から、高脂血症薬の候補の評価担当者であった中村隆晴（同前；杉本, 2010, p. 20）が、フェニルピペラジンの誘導体を多数合成（実験）し、評価している中で、ラットに投与し、本来の目的である高脂血症に対する作用を評価した際に、このふるえに気が付いたのだらうと考えられる。そして、彼が、これに気が付いた前提として、高脂血症の薬理研究員（評価担当者）である中村⁷⁷も、杉本の近傍に所属していて、同研究室でアルツハイマー型認知症治療薬を実験・評価していることを、少なくとも相当程度意識していたと推定できる。

これには、当時のエーザイ筑波研究所が、前述した、アウトプット思考で疾病あるいは部位別に合成と薬理の研究者を一体としていた、あるいはしようとしていた組織形態がプラスに作用した側面と考えられる。また、杉本（2010, p. 124）が合成のリーダーとして、研究室外の分析・代謝・安全性担当セクションとも自ら研究内容に関する極めて密なコミュニケーションをとるタイプであったこともプラスに作用した

⁷⁷ 彼が、アルツハイマー型認知症治療薬の評価も担当していたと考えられる記述はない。

と考えられる。研究室外とも自らの研究テーマや合成物、評価について密に共有していた杉本は、当然にして研究室内やその近傍の薬理担当者とは、担当テーマが異なっていたとしても密に情報共有していたと考えられる。従って、中村は、自らの担当テーマではないものの、アルツハイマー型認知症治療薬の合成とその評価に相当の目的意識、少なくとも潜在的な目的意識を有していたと思われる。もし、そうでなければ、C35-808 を投与されたラットの振戦は、見逃されていた、あるいは注意を惹いたとしてもアセチルコリンに関連する現象かも知れないとは気付かれなかった可能性が高い。

一方、この組織体制には、その室が担当するアウトプットに直接・当面関係しない化合物から手を離すことがデメリットになるという可能性もある。しかし、この場合は杉本がマイ・ライブラリー（後述）という考え方で、自分が勘所を有する化合物に対し、組織の公式の役割分担を超えて関心を持ち続け、関与し続けていたことでそれがデメリットとはならなかった。

以上をまとめると、杉本らが C35-808 にアセチルコリンエステラーゼ阻害作用を発見したのは、全くの想定外ではなく、執拗な試行錯誤を踏まえて、意図的に実験・評価範囲を変更・設定していたからである。しかし、そこに実際にアセチルコリンエステラーゼ阻害作用が存在し発見し得たのは、構造と機能の相関に関する完全に理論的な演繹の結果ではなく、偶然の作用があったとすることができる。さらに言えば、アセチルコリンエステラーゼ阻害作用が思いがけない身近、全く別目的で合成し、評価していたフェニルピペラジンの誘導体に存在していた、とすることができる。

（４）実用新薬の開発

こうして、ほぼ中止寸前となっていたアルツハイマー型認知症治療薬の探索は、1984 年 4 月、新たに見出された[C35-808]をシード化合物として再開された。しかしこの化合物のアセチルコリンエステラーゼ阻害作用は大変弱く、これを強化するために、合成実験、評価が多数繰り返された。そして、1986 年杉本が「最強の活性を持つ化合物」と自賛した化合物[11D189]の合成に成功した。これは極めて完成品に近いと思われたが、いよいよ臨床実験に入ろうとする寸前、ビーグル犬を用いた実験で、生体利用率が悪い（腸での分解が著しい）ことが明らかとなったのである（梅

田, 2002, p. 112)。11D189 はこのままでは使えないことが分かった。薬効を十分に発揮する前に分解され、対外に排出されてしまうのである。11D189 以外に、既に 300 種類を超える化合物が合成され、評価されたが、すべてがアルツハイマー型認知症の治療薬にはなり得ないことが判明していた。再びプロジェクトは危機を迎え、1986 年 3 月第一部第 2 研究室長であった山津清寛（やまづ きよみ）は、研究の中断を決意した。

これに対して杉本は、継続を強く主張し、激論が交わされたという。杉本らが継続を強く主張した裏付けは次の二点である。第一に、タクリンやフィゾスチグミンとは、全く異なる斬新な構造の化合物 11D189 を得ていたことである。第二に、ピペラジン系の化合物の構造と活性（機能）の関係：構造機能相関が相当読めるところまで来ていたことである。これは、杉本らが 11D189 を得るまでに、類似物質の構造と活性の関係に関して相当の知識・経験を蓄積していたこと、このころ CADD (Computer Aided Drug Design) の技術が進歩し、実際に 11D189 からの開発に関してもこれが応用できそうだったことによる。

1986 年 6 月、研究所長となっていた内藤晴夫は、本研究の継続を決断した。目指すところは、生体利用率の改善に絞られていた。

この改善に特に関与したのが、構造解析の専門家である川上善之と合成化学を学んで博士号を取得して同年 4 月にエーザイに入社し、杉本の部下として配属された合成研究者の飯村洋一である。

川上が CADD も用いて、求める構造を提案する。飯村らがそれを求めて合成にチャレンジする、それに成功すれば活性を評価するということの繰り返しであった。評価結果を分析してさらに次なる構造が提案される。そして、1986 年 12 月 16 日、飯村は川上の提案に基づき狙いを定めた化合物を合成した。そして、飯村はこの最終化合物、及び念のため、その寸前の合成物（中間体）の活性測定も評価班（薬理研究者）に依頼した。

その後の解析の結果、その中間体が、アセチルコリンエステラーゼ阻害作用、生体内利用率の点から、極めて高い評価結果を得た。この中間体が今日のアリセプト（塩酸ドネペジル）である。

こうして、同年6月のプロジェクト再開から半年余りで、世界ではじめての実用に適するアルツハイマー型認知症の治療薬⁷⁸を得た。

その後、1987年3月、社内に「アリセプト」テーマが登録され（開発を行うにあたっての全社レベルでの承認）、臨床実験が進み、1996年11月米国食品医薬局（FDA: Food and Drug Administration）より承認を受け、1997年2月米国で発売、1999年10月に厚生省より承認を受け、同年11月日本での発売が開始された。

2013年度（2014年3月期）に到り、アリセプトの物質特許切れ（2009年）を乗り越えてもなお、エーザイ（2014, p. 32）の同期売上高5,700億円の16.4%、940億円の売上を稼ぐブロックバスター⁷⁹となったのである。

（5）実験・評価範囲の拡大と杉本の「マイ・ライブラリー志向」

以上みたように、アリセプトの開発におけるセレンディピティの意義、偶然への対応として、当初の実験・評価範囲にこだわらず、適宜、「実験・評価範囲を変更・拡大して、予め偶然の結果を極力取り込む備えをしていた」という点に本事例の特徴がみられる。具体的にはランダム・スクリーニングの活用である。この背景には、医薬品開発において不確実性が高いこと、換言すれば、その分野に横たわる自然の摂理の複雑さ多様さに対して、人知が極めて乏しいことがあげられよう。具体的には、ある活性・機能を求める構造に関し、化合物の構造と活性・機能の相関関係に関する知識、予測能力が不十分であるということである。杉本らはそのことを十分に意識したが故に創薬研究の出発点とした物質（タクリン）にこだわらず、全く別系統の研究対象であった化合物（フェニルピペラジン）の誘導体をもアルツハイマー型認知症治療薬（アセチルコリンエステラーゼ阻害作用）の実験、薬理評価対象としたのだと考えられる。

この創薬における不確実性とそれに対応した実験・評価範囲の拡大について、杉本の考えが示されているので、セレンディピティを活かす方法の参考として確認しておこう。

第一に杉本（2010, p. 126）は、開発研究段階でのバックアップ化合物の必要性を指

⁷⁸ 正確には、先述した通り、根治薬ではなく、症状緩和、進行を遅らせる薬効。

⁷⁹ Blockbuster：医薬用語で、年間売上高が10億ドルを超える医薬品（『経済・ビジネス基本用語 4000 語辞典』日本経済新聞出版社）。

摘している。はじめに、探索研究段階では対象化合物を変更する、引き返すことは、まだ資源をそれほど導入していなから容易であるという。しかし、開発研究段階に入ると相当の研究資源を投入し、3～5 年の期間もかけているから、狙い通りの結果が出ない場合にはプロジェクトが終結してしまうことが多いという。この時にバックアップ化合物があれば、化合物をそれに交換してプロジェクトを続けることが可能であるとする。新薬の研究においては、化合物が絞り込まれても、油断せず、バックアップ研究はしなければならないと提言する。

第二に杉本（同前, p. 152）は、化合物の「マイ・ライブラリー」の構築を強く推奨している。アリセプト開発以前に降圧剤（成功）、脳血管障害治療薬（失敗）のいずれにおいても、杉本は合成化学者として多数のフェニルピペラジン誘導体を合成し、その薬理評価を受けていた。そして、①自分の意思で（化合物にこだわり）研究するテーマであるからこそ骨身をおしماずどんなことでも頑張るってやれること、②自分が合成した化合物には多くの可能性があることを知り、それを活かすべきだと提案している。この自分の合成した（杉本のこの場合 400 種程度）を「マイ・ライブラリー」として持つべきであるという。そして、この提案時点（2010 年）までのブロックバスターと言われる新薬はこうしたやり方、つまりロー・テクノロジーで成功した新薬だと指摘する。コンビトナリアル・ケミストリー⁸⁰やハイスループット・スクリーニング⁸¹の組合せによるハイテク手法ではないというのだ。

つまり、杉本の考えは、人知の及ばぬ不確実性の高い領域で、偶然の機会をとらえるためにランダム・サンプリング等の網羅的実験・探索、実験・評価範囲の拡大を行うが、その場合には、実験・評価範囲の広げ方に適切な方針・基準が必要だということである。実験・評価範囲の広げ方ー逆に絞り方が重要という考えである。そのために、マイ・ライブラリー、自分ならではの詳しい化合物群を持つべきだという考え方である。

⁸⁰ コンピューターやデータベースを用いて、多種類の原料物質を同時に組合せ、ペプチドや有機物など化合物を一度に数多く合成する技術（『ブリタニカ国際大百科事典 電子辞書対応版』）。

⁸¹ 膨大な種類の化合物から構成される化合物ライブラリーの中から、自動化されたロボットなどを用いて、創薬ターゲットに対して活性を持つ化合物を選別する技術（㈱ファルマデザイン、用語集、<http://www.pharmadesign.co.jp/ja/k.html>, 2014 年 8 月 17 日取得）。

こうした方法のことを、杉本（2010, p. 151）は規模、パワーに依存しない（できない）戦い方、「桶狭間の創薬」として提唱している。杉本は、海外の巨大規模企業に対して「相対的に資源量が少ない」国内製薬会社の戦略として提言している。しかし、医薬分野のように自然の摂理の複雑多様さに対して人知が余りに及ばぬ（資源不足な）領域では、相対的に資源に余裕がある巨大規模企業にも十分に妥当する可能性もあるだろう。

第5章 意図せざる「実験代行」を核心とするプロセスモデル構築

本章以下の二章において、セレンディピティのモデル化を試みる。セレンディピティの核心は何であり、セレンディピティにおいて偶然と必然がいかに相互作用するのかという本研究の問題意識、リサーチクエスチョンに対する解答をモデル化によって示すためである。はじめに本章において、セレンディピティのプロセスのモデル化を行う。続いて、次章において、プロセスモデルに基づく分析により、セレンディピティのプロセスにおいて、セレンディピティを特に駆動する要因は何であるかを検討・抽出して、それによって、セレンディピティの類型化モデルの構築を行う。

1. プロセスモデル検討の枠組み

事例研究におけるセレンディピティのプロセス「偶然と必然の作用の連鎖」の検討、及びセレンディピティのプロセスにおける因果連鎖の理論的考察に基づいて、「セレンディピティによるイノベーションのプロセスモデルを検討するための出発点」を次のように考える。

図 5-1 プロセスモデル検討の出発点



資料：筆者作成

セレンディピティにおいては、その定義「偶然が重要な契機となり、その結果に着目し価値のあるものを見つけること」から、「偶然」の存在が必須である。しかし、偶然に着目するためには、まず偶然に遭遇することが必要である。そのためには、何らかの必然（意図的営為）が必要である。孤立した系の中で何の活動もしなければ、偶然に遭遇することはない。つまり、セレンディピティにおいては、偶然に先行してなされる必然が存在する。本研究では、これを事前必然と呼ぶ。加えて、偶然に遭遇しても遭遇に気が付かない、あるいは気が付いてもそれを放置すれば、「価値のあるものを見つける」ことはできない。つまり偶然に対する作用として何らかの必然が必須である。本研究で

は、これを事後必然と呼ぶ。

事例研究にも見たように、事前必然の質が高いこと一つまり本質的であり、独創的である場合において、多くの価値の高い⁸²イノベーションが起こっている。

また、偶然の事後の必然活動、事後必然活動が十分になされなければ、偶然と遭遇してもセレンディピティが成就するとは限らない。

以上の考察から、セレンディピティのプロセスモデルの構築は、事前必然、偶然、事後必然の内容・作用とその関係・相互作用と意義を明らかにすることである。以下、そのための検討を行う。

2. 偶然：意図せざる⁸³「実験代行」ステージ

はじめにセレンディピティの成立に欠くことのできない偶然について、その内容と作用を検討しよう。セレンディピティのプロセスにおいて、偶然は、一体「どこ」で「何」に「いかなる」作用して、「何」を生んでいるのか。

結論を述べれば、偶然は、意図せざる「実験代行」の作用を果たし、それによりセレンディピティの可能性が生起する。偶然は、突然、意図や依頼によらず、人為に代わり実験を実行する。それは、偶然がなければ得られない実験結果を人知に与え、そこには、その結果に到る「人知の知らない因果関係と実験条件」が潜在している。

意図せざる実験代行の作用を明確に捉えるために、それが無い場合、つまり意図せざる実験代行が関与しないイノベーションのプロセスモデル、理念形を考えよう。それとの対比を考えることにより、意図せざる実験代行が関与するイノベーション-セレンディピティのプロセスの特徴、本質を明らかにできると考える。

(1) 意図せざる実験代行の関与しないイノベーションのプロセスモデル

意図せざる実験代行の関与しないイノベーションのプロセスとは、意図的なプロセスのみから構成されるイノベーションである。それは、理念的に次のプロセスモデルで考えることができる⁸⁴。

⁸² 価値が高いとは、本研究でのイノベーションの定義に照らして、技術革新の程度が高度、あるいは（and/or）社会生活の改変の程度が（良い意味で）著しいことと考える。

⁸³ 意図的営為がなす「実験」（後述）と対照をなす特徴を強調するため、適宜、「意図せざる実験代行」と記述する。

⁸⁴ 濱崎 和磨；丹羽 清（2007）等を参考とする筆者の考え。

続いて、目的を実現するための方法や理論に関する「仮説構築」がなされる。本研究では、仮説⁸⁵を「起こった現象を合理的に説明する仮定」という意味だけでなく、「目的を実現するための仮の理論」という意味でも用いる。ある目的を実現するためには、こういう方法によって可能なのではないか、という仮説が目的実現のためには「方法の仮説」である。その方法の裏づけとして自然にはこういう摂理、因果関係が存在するのではないか、という仮説が目的実現のための「理論仮説」である。

[illegible]

⁸⁵ ある現象を合理的に説明するため、仮に立てる説。実験・観察などによる検証を通じて、事実と合致すれば定説となる（『大辞泉 第二版』小学館）。

この目的設定と仮説構築が、事前必然における概念操作段階である。

その後、事前必然における「自然への問いかけ」段階が行われる。まず、仮説に則って「実験」が行われる。多くの実験の主たる目的は、仮説通りの結果が得られるか否かの検証である。一般に、合理的な創造は、仮説検証のプロセスとして実現されるからである。なお、従来、実験とは仮説の条件に適する「物理的な実体」を実現して、その結果を観察することであった。しかし、現在では、実験という概念は、シミュレーション、テストプログラミング等を含むより広義な内容となっている。

続いて、実験結果の「評価」に到る。この評価結果が最初に設定した目的通りであれば、イノベーションは成功である。

しかし、ほとんどすべてのイノベーションは、上述のプロセス一回の実行だけでは成就しない。すなわち、評価結果と目的は、簡単には一致しない。

その理由は、①方法や理論の仮説に誤り、不足がある。または、②実験において仮説の求める条件設定を完全には実現できないからである。

この場合、一般的には、イノベーションの成功を目指して、以下のプロセスが起動する。はじめに、「仮説での想定」と評価結果の差異分析がなされる。そして、その差異を少なく、あるいはゼロとするために、仮説の再構築や実験条件の再設定が試みられる。それが実現できれば、新たな実験が実行される。

すなわち、イノベーションのプロセスは、目的設定を出発点として、『仮説構築-実験-評価』が『仮説での想定と評価結果の差異分析』に基づいてブラッシュアップされながら繰り返される「試行錯誤プロセス」である。

この試行錯誤の結果、「最初に設定した目的（仮説での想定）と評価結果の一致」に到れば、成果が得られ、イノベーションは成就する。

イノベーションプロセスの実態は、上記のようなリニアまたは、単純なスパイラル状の試行錯誤だけではない。部分的な往復運動や飛躍を伴うこともある。小さなイノベーションの結果を次の仮説に取り込んで大きなイノベーションが実行される等の再帰的なプロセスを含むこともある。

しかし、イノベーションの原則として、大きくとらえれば、上述した「目的設定がなされ、それを目指した仮説構築が行われ、それが実験され、評価されるという試行

錯誤プロセス」を、イノベーションの基本プロセスと言って良いだろう。

ここで、この試行錯誤プロセスに、偶然が重要な契機となる場合、つまり「セレンディピティによるイノベーション」を考える前に、偶然の果たす役割を後に考えるために、上述のイノベーションプロセスの多くに共通して存在する課題・負担を確認しておこう。第一に、イノベーションを目指して開始されたプロセスの内、上述の試行錯誤を通じて、成功に到る成功確率は相当低い、ということである。千三つ (0.3%) という言葉があるが、例えば、特に不確実性が高いとされる製薬分野において、日本で薬の候補として研究をはじめた化合物が新薬として世に出る成功確率は、2万9,699分の1 (0.0034%) である⁸⁶ (日本製薬工業協会／広報委員会(2014), p. 46)。

第二に、イノベーションが成功する場合においても、そこに到る資源投入量は、膨大である場合が多いことである。日本の製薬分野の場合では、新有効成分含有医薬品の開発期間は、平均 65.8 か月 (2012 年承認薬、同前, p. 47) である。また、日本の医薬品産業の研究開発費は、1 兆 3,061 億円、対売上高比 11.81% の負担となっている (2012 年度、総務省「科学技術研究調査報告」(2013 年 12 月 18 日))。

つまり、イノベーションのプロセスにおける「仮説構築-実験-評価」の試行錯誤には大きな困難が存在し、多大な負担が必要となるのである。

(2) 意図せざる実験代行の関与するモデル

前述した意図せざる実験代行の関与しない「意図的なプロセスのみから構成される」イノベーションに対して、意図せざる実験代行が関与する、つまりセレンディピティによるイノベーションのみが持つ本質的な違いは何であろうか。

セレンディピティは「偶然が重要な契機となり、その結果に着目して価値のあるものを見つけること」(定義) であるが、偶然がいかなる役割を果たして、価値のあるものを見つけることが可能になるのだろうか。

本研究におけるここまでの事例研究によれば、偶然が生起するのは、イノベーションの試行錯誤プロセスにおける実験段階である。セレンディピティのプロセスの理

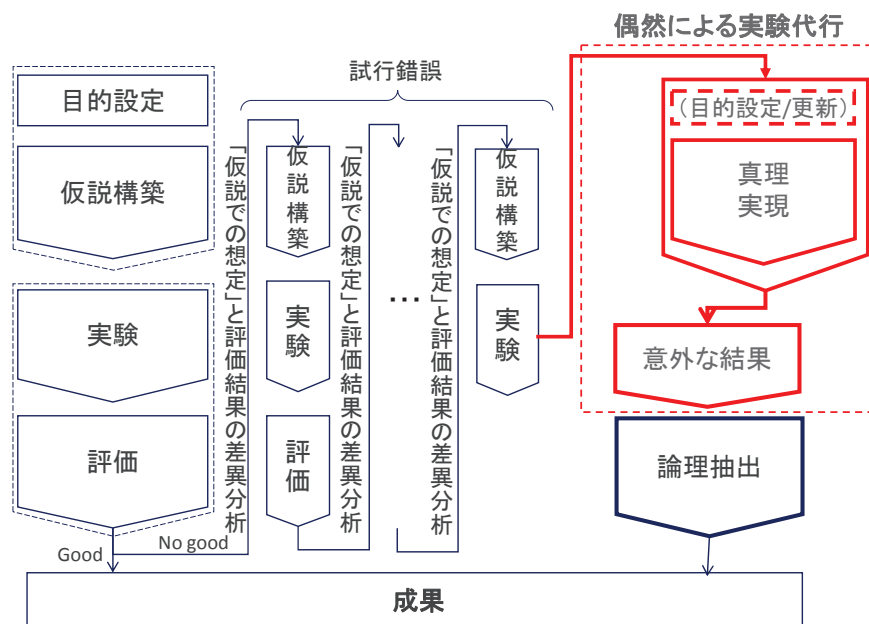
⁸⁶ この確率は、本研究でのイノベーションの定義「社会生活を大きく改変すること」で絞り込んでいないので、それよりは相当高いと想像される。また、この確率にはセレンディピティが関与する場合が含まれる。それを除く確率を把握することは不可能である。いずれにしても相当の低確率である。

論的考察からも、「偶然が関与する」という意味があるのは実験段階に絞って考えて良いと思われる⁸⁷。つまり、偶然が、実験段階で、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。

意外な結果が、有用な結果でない場合も多い。それが有用でないと確認されれば、その実験結果は、意図しなかった（誤った）条件に基づく「誤り、失敗、あるいは、ノイズの混入等」として廃棄される。意外な結果が、実は有用な結果である場合にも、それが有用であると認識されなければ、やはり、その実験結果は「誤り、失敗、あるいは、ノイズの混入等」として廃棄される。

意外な結果が、有用な結果であり、それが正しく認識された場合にのみ、偶然を重要な要素、契機とするセレンディピティが成就する。

図 5-3 意図せざる「実験代行」の関与するモデル



資料：筆者作成

⁸⁷ 目的設定、仮説構築に関しても「偶然が関与する」と言える場合があるかも知れない。しかし、それを検討対象とすると、あらゆる意図的営為に対して偶然が関与し得ることを考慮する焦点の定まらない議論となる恐れがある。従って、本研究ではそれを検討対象外とする。また、評価に関して「偶然が関与する」という場合について検討に値することがあるかもしれない。それについては、評価に実験的要素があると考え、実験に関して「偶然が関与する」場合に含めて考えることにする。

以上のプロセスにおいて、偶然はあたかもブラックボックスのような作用をする。すなわち、偶然が作用しなければ、「意図的な試行錯誤を繰り返し、仮説あるいは実験条件の設定をブラッシュアップして、ようやく望ましい実験結果を得る試行錯誤プロセス」を、偶然が作用してあたかもブラックボックスのように、一気に、仮説の内容や実験条件を示すことなしに、実験を実行しその結果を示す。

本研究では、この偶然の一気の作用を、偶然による意図せざる「実験代行」と呼ぶ。偶然が、「人知（我々の既存の知識と仮説）に代わり、未知の条件を設定し、未知の因果関係に基づいて、有用な結果を実現」する様子が、人知による試行錯誤に代わる意図せざる「実験代行」として認識できるからである。

偶然のみが人知による試行錯誤を「実験代行」し得るのは、真理（自然の摂理）に対して人知には限界や誤りがあるからである。人知はその限界や誤りの枠内で仮説を構築し実験を行う。その枠外にある真理に基づいた実験を実行することはできない。しかし、偶然は、「人知によらぬ、意図せざるが故に、人知の限界や誤りを超えて、時には人知と矛盾する条件までもを設定して、実験、真理を実現し得る」のである。人知は、それに限界があると認識していなければ、もちろんその枠外を試すことはない。もし、限界があることを認識していたとしても、限界であるから、具体的にどんな限界や誤りであるかを知ることができない。従って、その限界を正しく超えることは極めて困難である。従って、偶然が超然と人知の限界を超えること、意図せざる「実験代行」に意味があり、その結果が活かされればセレンディピティが成就する。

つまり、偶然による意図せざる「実験代行」の意義は、「人知の限界の突破、人知の盲点の克服による創造」である。

そして、その結果は以下の通り、先に示したイノベーションの課題・負担を克服する。第一に、偶然は、それが作用しなければ、ほぼ成功に到らないイノベーションを成功に導く。つまり、イノベーション成功の確率を高める。第二に、仮に偶然が介在しなくてもいずれ成功するかもしれないイノベーションに関しても、偶然がなければ必要だった試行錯誤に対する投入（人力、時間、費用）を軽減する。

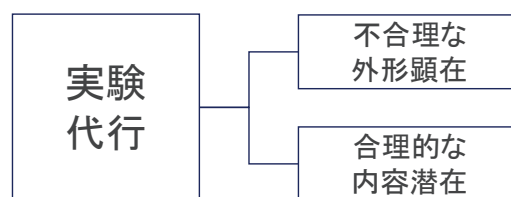
なお、偶然による実験代行には、次の二種類の場合がある。①人為的な「当初の目的の通り」に、その実現のための「実験代行」がなされる場合、②結果として得られ

るものを求めていなかった状況で、「目的設定やその更新と合わせて実験を代行」する場合である。

(3) 意図せざる「実験代行」ステージの二面性（外形と内容）

ここで、偶然による、意図せざる「実験代行」ステージの二面性（外形と内容）を確認しておこう。この二面性故に、セレンディピティ成就の困難さが存在すると同時に、セレンディピティなしにはありえないイノベーションが実現する。

図 5-4 実験代行ステージの二面性（外形と内容）



資料：筆者作成

1) 不合理な外形の顕在

偶然による、意図せざる「実験代行」は、「誤り、失敗、あるいは、ノイズの混入等」、一見、不合理な外形として顕在する。意図的、計画通りに起こったものではないこと、あるいは、他者の営為の失敗等の結果であるから、偶然による実験代行は、意外な結果、しかも不合理な外形として顕在する。それまでの人知が認識し得る因果関係、その前提となる条件設定の結果ではないから、不合理に見える。

また、偶然の結果は「誤り、失敗、あるいは、ノイズの混入等」でイノベーションとならない場合も多いから、実際には、イノベーションとなる貴重な場合においても不合理な外形が認識されるだけで終わることも多い。

つまり、実験代行の結果と人の認識との接点は、不合理な外形である。

この不合理な外形の生成、生起には、いくつかの類型が存在する。

- ①想像してもいなかったこと、その際に目的として考えてもいなかったことが起こること。この場合には、何か価値があることが起こっていることを認識することも相当困難である。典型的には、導電性ポリマーにおけるポリアセチレン薄膜の生成の場合である。

②相当明確な目的意識・仮説を持って求めていたことが、意外な方法によって実現すること。典型的には、トランジスタの場合の電解質の利用による表面準位効果の確認とその克服の場合である。

③相当明確な目的意識・仮説を持って求めていたことが、それを含みそれを超える内容で実現すること。典型的には、7章で述べるエサキダイオードの事例である。半導体のPN接合の逆方向におけるトンネル効果を確認しようとしていた際に、順方向の負性抵抗が生起した。

④明確な目的意識があったが不確実な仮説を持って求めていたことが、仮説の想定に照らせば意外な実験・評価範囲で生起する。典型的には、アリセプトの事例である。求めていた活性が、全く別目的で合成実験を行っていたピペラジン系の化合物に存在した。

上記の類型には、上記にあげた類型の中間的類型、派生的類型も存在する。ペニシリンの場合には、潜在的な目的意識・仮説を持っていたがペニシリンを発見した際の実験の目的はそれとは全く異なっていた。すなわち①と②の中間的類型である。また、7章で述べるネオジム磁石の場合には、相当明確な目的意識・仮説を持って求めていたことが仮説通りの方法で実現するが、その原理は仮説で想定した内容とは異なっていた。つまり②または③の派生的類型と考えることができる。

不合理な外形の意外さは、当事者の偶然に出会う以前の想定・認識と偶然に出会った際の認識の距離と考えることができる。従って、その意外さは客観的⁸⁸なものではなく、当事者ごとに異なった結果となる。それは、当事者が偶然に出会う以前の「仮説の結果に関する考察の深さ」、「専門的認識の深さ」、「分野横断的な認識の広さ」、「様々な可能性に関する想像力」、「偶然の結果を待つ・予想する程度」、および「一般的な当該分野の研究者から見ての偶然の結果の意外さ」等によって決まると考えられる。

2) 合理的な内容（因果関係）の潜在

偶然による、意図せざる「実験代行」は、それまで人知が知らなかった、新しい認識を拓く因果関係とその出発点となる条件を内包する。人知が新しく知る真理が

⁸⁸ 「誰にとっても同じ」の意味に用いる。

含まれている。しかし、それは、明らかに見えるようにあるのではなく、潜在している。人知が知らないものであるから、一般にはその意義はもちろん、多くの場合には意義を有する存在自体が気付かれにくい。すなわち、見えにくい。

しかし、そこに合理的な因果関係、真理が存在しているからこそ、セレンディピティが実現する。偶然の不合理的な、意外な外形が、いかにそれまでの人知の常識を超え、あるいは、違和感を伴うものであろうとも、合理的な因果関係が潜在しているからこそセレンディピティが成就する。

たとえそれが黒焦げたごみのような物質—ポリアセチレン合成実験の並外れた失敗であろうとも（導電性ポリマー）。たとえそれが急速な冷却による結露という実験の“誤り”の結果であろうとも（トランジスタ）。そこに内在する実験条件とその因果関係こそが、真理を示し、セレンディピティによるイノベーションを生む。

合理的な因果関係の実現しにくさの程度を表す指標として「稀少性」を考えることができる。人知を超え、偶然により様々な実現しにくい条件（低確率事象）が成立している場合、それを稀少性が高いと呼ぶことができよう。すなわち、稀少性は、イノベーションに関わる当事者の認識とは独立した、客観的な「生起しにくさ、珍しさ」を表す指標と考えることができる⁸⁹。

以上に考察した、偶然による実験代行の二面性を使ってセレンディピティを表現すれば次の通りとなる。まず、偶然による実験代行が意外な結果を顕示する。すなわち「不合理的な外形」を示す。その外形に惑わされずに、あるいはその外形をこそヒントとして、その「合理的な内容」、因果関係の存在に気が付き、それを利用可能とすること、でき得ればその内容を解析することがセレンディピティの実現、成就である。

3. 事前必然1：「仮説構築」ステージ

本節と次節では、偶然による意図せざる「実験代行」の事前に行う必然活動（意図的営為）の内容と作用の核心は何であるかを考える。その活動内容とセレンディピティ成

⁸⁹ 稀少性の高低と「イノベーションの実現可能性や水準」の間には単純な関係はないと思われる。稀少性が高いので、実現しにくかったイノベーションもあり得るが、一方、稀少性が低い偶然故に内在する価値が長く見過ごされることもあり得よう。

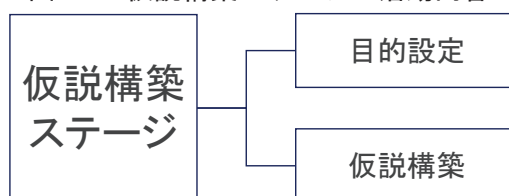
就に及ぼす作用の相違から、事前必然を二段階に分けて考察することが妥当と考える。

第一段階は、前節に示した目的設定と仮説構築であり、仮説構築には目的設定が随伴することから、本研究ではこれを「仮説構築」ステージと呼ぶ。第二段階は、同じく前節に示した実験と評価であり、実験には評価が随伴することから、本研究ではこれを「実験」ステージと呼ぶ。両者の内容と作用の差は以下に詳述するが、ポイントを言えば、「仮説構築」ステージは、比較的抽象度の高い概念操作が中心となり、「実験」ステージは具体的な実験、自然への問いかけが中心となると考えられる。

本節では、「仮説構築」ステージについての内容と作用、及び意義の検討を行う。

(1) 仮説構築ステージの内容と作用

図 5-5 仮説構築ステージの活動内容



資料：筆者作成

トランジスタにおいて偶然の事前に行った意図的営為のポイントを順に示せば、「真空管に代わる安定で小型低消費電力の個体増幅素子を開発するという強固な目的設定」、「電界効果型トランジスタ構造の仮説構築（構想）」と「その実験と評価（失敗）」、左記の実験失敗の原因を解明するための「表面準位仮説の構築」と「それを検証するための実験とその洗練、及びその評価」であった。表面準位仮説の検証実験の最中にセレンディピティに繋がる偶然（結露）が生起した。表面準位仮説を構築し、その検証実験を進めていなければ、結果的に表面準位仮説の検証と克服、延いてはトランジスタの発明に繋がった「結露という偶然」とその発見は起こっていない。素朴だが本質的な「電界効果型トランジスタ構造仮説」、それまでの量子力学、固体物理学の前提を見直す極めて本質的な「表面準位仮説」の両仮説が構築されたからこそ起こり得た偶然である。本質の追究が、本質を解明する偶然を生んだ。

ペニシリンにおいて、偶然の事前に行った意図的営為の核心は、フレミングによる

①リゾチームの抗生作用の発見とその解析・評価方法の考案・洗練、②抗生作用に関

する仮説⁹⁰：「人体に無害でありながら病原菌に対して殺菌効果を発揮する抗生作用が存在する」の構築である。②に関して、フレミングは、仮説として明確に提示したのではないが、少なくとも潜在的にはそれを有していたと言って良い状況であった。この“仮説構築”がなければ、フレミングは、青黴の混入でブドウ球菌コロニーが成長しなくなっている現象に気が付かなかった、あるいは、気が付いても特段に価値があるものだと考えなかった可能性が高い。また、①により、抗生作用の解析・評価方法を獲得していなければ、偶然の結果を迅速、正確に評価することは困難だったであろう。

青黴の混入が起こったのは、フレミングが上記抗生作用の仮説を実証しようとしていた際にはなかった。全く別目的のブドウ球菌変異株の培養を目指した実験の最中であった。つまり、偶然が生起した実験とは独立したさらに事前の活動として、フレミングは抗生作用に関する仮説を抱いていた。

以上に見るように、トランジスタ、ペニシリンのいずれにおいても目的設定と仮説構築は、偶然が生起した実験、評価活動より前になされた活動である。特にペニシリンの場合には、目的設定と仮説構築は、セレンディピティに繋がった実験、評価活動のはるか以前になされている。以上から、「仮説構築」ステージは、実験、評価活動とは独立に別の作用を果たしたことが分かる。

従って、事前必然において、仮説構築を実験とは別個のステージとして捉える意味が存在する。

なお、仮説構築ステージの作用は、同じ事前必然である実験ステージより後にも及ぶ。仮説構築があったからこそ、それを足場にした実験・評価が行われ、偶然による実験代行が生起した（トランジスタ）。あるいは、仮説構築があったからこそ、別目的での実験中に起こった偶然の実験代行結果が発見された（ペニシリン）。

（２）仮説構築ステージの意義

仮説構築ステージは、セレンディピティにおける偶然の実験代行の生起とその捕捉に作用を果たす。仮説構築が偶然の実験代行の生起とその捕捉に果たす意義は、①

⁹⁰ 事例研究で述べた通り、この仮説は、「抗生作用はありふれた現象であり、有用性がないだろう」という当時のほとんどの専門家の認識とは大きく異なるものであった。

その質の高さが良い偶然を生む、②その質の高さにより、良い偶然への気づきを促進することである。

ここで、仮説構築の質の高さとは、それ以前の人知に対して、どれくらい本質的な限界・盲点を対象化して、それを検討・検証するため、目的設定に基づく仮説構築、意図的営為を行っているか、という意味である。この質の高さを、本質的、創造的、独創的と言っても良いだろう。

「良い」偶然というのは、偶然の「程度や水準」のことを言う。つまり、既存の知識からの大きな飛躍、既存の知識の本質的で大きな盲点の発見に貢献する偶然を「良い」偶然という意味で、「良い」と考える。そして、仮説構築の質の高さと、良い偶然の生起、良い偶然への気づきが相関するのである。

トランジスタにおいて、表面準位仮説という、従来の知識の本質的な限界・盲点を突破しようとする本質的、創造的な仮説構築とその検証実験がなされていなければ、その克服に繋がる「偶然の実験代行とその発見」という価値の高い出来事は、起こりようがなかった。こうした仮説構築がなければ、こうした偶然が、それを認識し得る人間の前で起こることはほぼありえない。もし仮説構築がなされないまま、誰かの目の前で半導体の表面が結露していたとしても、それは、何ら新たな発見・認識を生み出さないだろう。

ペニシリンにおいても、フレミングが、当時多くの専門家が軽視/無視していた抗生作用の有効性を仮説化（想定）していなければ、青黴がブドウ球菌を溶菌していたとしても、それに着目し価値のあることだという認識を抱くことは、ほぼ不可能だっただろう。

すなわち、「仮説構築」は偶然がいつどこで起こり、それが良い偶然であるかどうか、そして、それが気付かれるか否かに関して決定的な意味を有し得る。偶然は「実験代行」を果たすが、その偶然がどんな程度や水準で代行するか、そして我々がその実験代行に気が付くかどうか、仮説構築はそれを左右する。

仮説構築のこの意義は、伊丹（1986, pp. 40-42）が、「意味のある偶然の発生確率を高めるために基本的に必要な二条件」のひとつとして「偶然が起きやすいように活動領域を設定する。（中略）もっとも重要な対応策は、本質的なことを狙い活動を多く

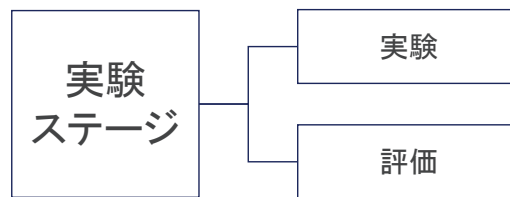
すること」と指摘していることにほぼ符合すると言って良いだろう。伊丹は、その理由を「本質的であればこそ、未知の広がりが見え隠れしており、だからこそその広がりの中から何かが出てくる可能性が高いのである」（傍点筆者）と説明している。ここで言う本質的であることが、本研究での仮説構築の意義であると考えられる。

以上に示した通り、「仮説構築」ステージはセレンディピティの必須条件である偶然による意図せざる「実験代行」の質・水準、捕捉されやすさと相関する。

4. 事前必然2：意図的な⁹¹「実験」ステージ

本節では、事前必然の第二段階である意図的な「実験」ステージについての内容と作用、及び意義の検討を行う。その活動内容は先に示したように実験と評価である。

図 5-6 実験ステージの活動内容



資料：筆者作成

（1）実験ステージの内容と作用

前述したように、トランジスタにおいて、偶然の事前の意図的行為として、「仮説構築」としての電界効果型トランジスタの構想（仮説構築）に続いて、その動作の検証実験が行なわれ、全く仮説通りでないという評価（失敗）を得た。そして、それを踏まえて、新たな「仮説構築」として本質・創造的な表面準位仮説が構築され、その検証実験と評価がなされた。このように、仮説構築に基づいて、それに続いて実験と評価がなされる。これが仮説構築ステージに続く、実験ステージである。そして、実験の最中に、偶然による実験代行が生起する。仮説構築ステージでは実験は行われないので、本研究で考える偶然の実験代行は生起しない。従って、仮説構築ステージのみからではセレンディピティは起らない。実験ステージがあってはじめて実験代行

⁹¹ 実験ステージは、そこで偶然の実験代行が生起するという点で実験代行と密接な関係がある。しかし、意図せざる実験代行に対して、実験は人為そのもの、つまり意図的である点において対照をなす。従って、適宜、「意図的な実験」と記す。

が生起、つまりセレンディピティが起こり得る。

ペニシリンの発見においては、抗生作用の存在の仮説構築から時間をおいて、別個に別目的で、ブドウ球菌変異株の培養実験と観察（評価）という実験がなされた。そして、そこで、偶然の実験代行が起こった。このように、仮説構築ステージと直接的には連続しない実験ステージから生起するセレンディピティが存在する。

加えて、導電性ポリマーの事例のように、仮説構築ステージなしで、実験ステージを起源としてセレンディピティが起こることもある。

なお、トランジスタの場合について示したように、仮説構築ステージと実験ステージは、その順序で単一方向に一回のみ行われるのではなく、実験と評価の結果が次の仮説構築ステージにフィードバックされ、それに基づく次の実験ステージに繋がる往復運動として行われることも多い。

（２）実験ステージの意義

偶然が必然の活動に対して、ほぼ一定の確率で生起するならば⁹²、偶然の生起確率を高めるためには、実験の活動量を増やす必要がある。「犬も歩けば棒に当たる」。いかに良い道筋を歩くか（仮説構築ステージの意義）はもちろん大切だが、偶然が起きるためには、歩行距離、実験量を増やす必要がある。実験量を増やすためには仮説や評価（実験結果）に基づいて、多様で豊富な実験計画を生み出す「実験計画力」が重要である。実験計画力が高ければ、仮説を基にして、評価結果を反映し、適切な実験計画を工夫、繰り返し立案し、意味のある実験量を増やすことができる。

なお、実験の活動量を増やすためには、実験計画力とともに、仮説構築ステージでの仮説構築力も重要となる。実験計画の工夫、繰り返しに行き詰まれば、新たな仮説構築があってはじめて、次の実験計画が可能となるからである⁹³。

トランジスタのイノベーションのプロセスにおいて、表面準位仮説が構築され、結露という決定的偶然が起きるまでの 1 年半ほどの間に、主にブラッテンによる尋常でない回数の実験計画のブラッシュアップ、実験・評価での試行錯誤、及びショックレー、バーディーンによる実験計画の見直しが並行して行われた。ショックレーらが

⁹² まずは、特段に、偶然が起こる確率が変化することを考えない、つまりこの条件が成立するとして考えて良いだろう。

⁹³ 仮説構築と実験計画を区別することが無意味、同時並行の活動となることもあるだろう。

ほぼ毎日のようにミーティングを開き、主にショックレーが彼の提案・工夫⁹⁴を黒板に向かい説明し、他のメンバーがそれに襲いかかって、ずたずたにする日々が続いたという (Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997), 上 p. 267)。こうした提案・工夫につぐ提案・工夫に基づいてブラッテンが様々な実験を繰り返す最中に、かの偶然—急速冷却における半導体表面の結露が起こったのである。

並外れた実験計画の結果として、並外れた実験が実行されたことは、伊丹 (1986, p. 40) が、「意味のある偶然の発生確率を高めるために基本的に必要な二条件」のひとつとして「偶然の起きうる活動への投入努力を大きくする」べきであると指摘していることに符合する。実験には量的意義が存在する。

以上に示した通り、偶然に先行する事前必然について、『仮説構築』ステージが偶然の程度・水準に大きく相関し、実験、評価による『実験』ステージが偶然の生起可能性に特に相関する」とまとめることができる。

5. 事後必然：「論理抽出」ステージ

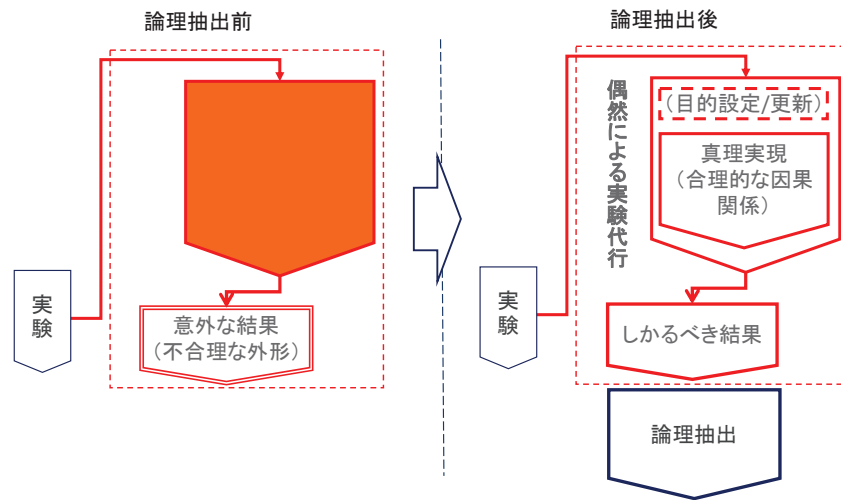
偶然による「実験代行」の事後の必然活動（意図的営為）の内容と作用の核心は何であろうか。

セレンディピティの定義に戻って、事後必然は、偶然の結果に「着目し、価値のあるものを見つけること」である。先に記した偶然による実験代行の二面性に即して言えば、「不合理な外形」に着目して「合理的な内容」の存在を洞察して、その内容を抽出することである。本研究では、偶然の結果に作用する事後必然（意図的営為）を「論理抽出」と呼ぶ。その様子を、論理抽出の前後で表すと図 5-7 の通りである。

論理抽出前には、偶然による実験代行は、ただの意外な結果として見えている。それが論理抽出という事後必然活動を経て、合理的な因果関係に基づく真理実現のしかるべき結果として理解できるのである。すなわち、論理抽出は、偶然による実験代行のブラックボックスに気付き、その内容を明らかにすることである。

⁹⁴ 参考資料において、この経緯は、ショックレーの述懐に基づくところも多い。この間の貢献に関しては、ショックレーが自己の役割を過大に表現している可能性も高い。ショックレーのみでなく、バーディーン、ブラッテン他の種々の提案があったと想像される。

図 5-7 論理抽出が偶然の実験代行に対してなす作用



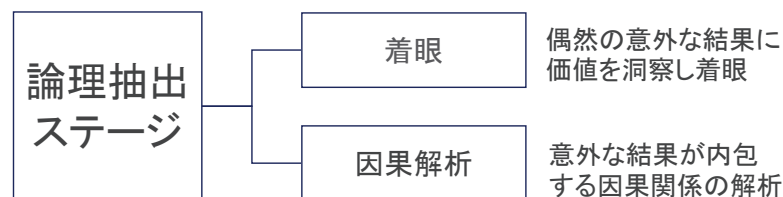
資料：筆者作成

それでは、論理抽出の意図的営為の内容はいかなるものでしょうか。第一に、意外な結果（不合理な外形）に価値があり得ることを洞察し、それに「着眼」することである。これがなければ、不合理な外形は放置、廃棄されて終わることも多い。着眼がなされなければ、セレンディピティが成就することはない。

第二に、合理的な因果関係（真理）を解析すること、すなわち、因果解析である。

以下に、着眼、因果解析について、事例検討の内容も合わせて、その具体的実態を検討しよう。

図 5-8 論理抽出ステージの活動内容



資料：筆者作成

（１）着眼

「意外な結果」を見逃さずに着目する、あるいは予め相当意図的にそれにアンテナ

をはって一着目する準備をしておいて、実際に着目する、これが「着眼」⁹⁵である。トランジスタにおける実験中の結露、ペニシリンにおける青黴の混入、いずれも失敗、誤り、ノイズ、攪乱要因として見逃されても全く不思議ではない。しかし、これを見せず、廃棄しなかったことがセレンディピティによるイノベーションが成功に到った分岐点である。また、アリセプトにおいては、ピペラジン系の合成物に関して、予め、そこに起きる偶然の可能性、つまり偶然にアルツハイマー型認知症治療薬としての活性を持つことも考えて、ランダム・スクリーニングの対象にしていた⁹⁶。これが着眼に繋がった。

この着眼の役割の大きさを最も端的に示しているのが、導電性ポリマーの事例である。この事例では、仮説構築ステージなしに、いきなり実験ステージ、すなわち合成の未経験者による、ポリアセチレン粉末合成が行われた。そこで全くの合成失敗結果としか考えられない真っ黒なゴミ状の物質が合成された。しかし、白川はそれに対して着眼を行った。これは、特段の洞察力、無駄となることを惜しまない探求心と潜在的な目的意識の存在によると考えられる。

「意外な結果」が着眼される理由は、何らかの価値の存在の洞察である。偶然の結果にセレンディピティとしての価値がありそうだとその洞察が着眼に繋がる。あるいは、それが予感、察知されるからこそ着眼がなされる。意外な結果の多くは、「偶然による実験代行」ではなく、失敗、誤り、ノイズ、攪乱、つまり意義を持たないものである。それはセレンディピティによるイノベーションには繋がらない。一部の「意外な結果」のみが「実験代行」と呼ぶべき偶然によるものであり、しかもその価値、意義が正しく把握された場合にのみセレンディピティによるイノベーションに繋がる。

導電性ポリマーにおける“合成の失敗物”の場合には、従来、粉末（非結晶）しか合成できなかったポリアセチレンのなんらかの新しい形態、できれば解析しやすい

⁹⁵ 着目、着眼ともに、分析、処理などをするための拠り所として、ふだん気が付かないような点に目をつける、という意味合いがあるが、「着眼」は、特にそれが強い（『使い方の分かる類語例解辞典』小学館）。

⁹⁶ 実際に偶然から価値を見出すのは、偶然による、意図せざる実験代行の後であるが、そのために実験・評価範囲を設定変更し、やや広範な着眼準備を行っておくことである。

形態（典型的には結晶構造）であることが希求・洞察され、実際にそれが薄膜（結晶）であり、極めて価値の高いものであることが把握された。

ペニシリンにおいては、青黴は、単なる不要な混入物ではなく、病原菌の繁殖を抑制する物資を浸潤することが洞察され、その意義が把握された。

（２）因果解析

偶然による実験代行の「意外な結果」が着眼され、意義が把握された場合、少なくとも事実把握がなされた場合、意外な結果がなぜ生じたかが解析される。これが因果解析である。因果の解析は、それが何であるか（事実把握）を出発点として、それに到る因果を逆方向に探ることからはじまる。加えて、偶然の「実験代行」がどういう実験条件からはじまっていたかの解明の努力も行われる。例えば、触媒の量が、従来の千倍であった、あるいは青黴が混入していたという、実験の内容、“実験条件”の発見・確認である。

さらに、「仮説構築」の仮説内容が重要な解析材料となることを見落としてはならないだろう。つまり、「表面準位仮説を前提として結露が起こればどういう因果が生ずるだろうか（トランジスタ）」、「有効な抗生作用の存在仮説を前提とすれば、青黴の混入でどんな因果が起これるか（ペニシリン）」という思考が因果解析を促進することになる。

なお、この因果解析の深さ、程度には、大きく分けて二段階が存在する。第一の段階が、どういう条件でどういう結果が得られるかの因果解析である。因果連鎖の詳細な内容、背景にある理論は解析されていない段階である。第二の段階は、因果連鎖の詳細な内容と背景にある理論まで解析されている段階である。

第一の段階の因果解析でも、その確度が高ければ、再現可能なものとしてイノベーションが実現（利用）できる。第二の段階の因果解析に到れば、それは、新しい科学知識や法則の発見を基にした、より確かで価値がある、かつ制御可能性の高いイノベーションとなる。不確実性の高い分野、例えば医薬品のような分野では、第一の段階に達することに精一杯で、それでも十分に実用的な価値がある場合も多いと考えられる。

6. まとめとプロセスモデルによる事例研究の確認

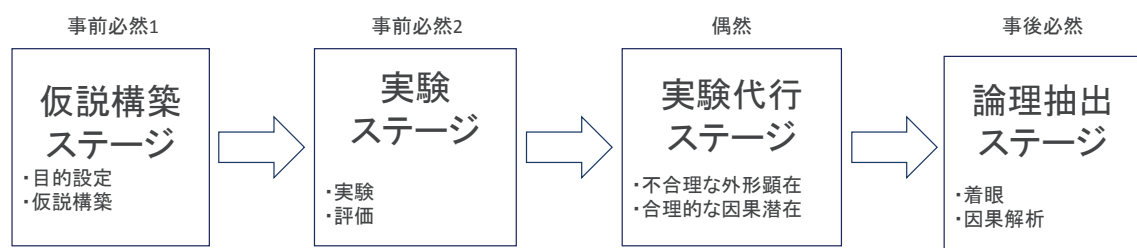
ここで、本章の議論の全体像をまとめ、その枠組みで第4章の事例研究の内容を確認しておこう。

(1) セレンディピティによるイノベーションのプロセスモデルのまとめ

本章の冒頭で、プロセスモデルを「事前必然」→「偶然」→「事後必然」の枠組みで検討することにした。その枠組みにそって本章をまとめると次の通りである。

偶然の前に行われる、事前必然（意図的営為）の第一段階は、偶然の生起の概念的な舞台作りとも言うべき「仮説構築」ステージ、すなわち目的設定と仮説構築活動である。仮説構築活動の「程度・水準」が、生起する偶然-実験代行ステージの本質性・水準やそれへの気付きやすさと相関する。事前必然の第二段階は、偶然の生起の具体的な舞台作りとも言うべき、意図的な「実験」ステージ、すなわち実験と評価活動である。実験ステージは、仮説構築ステージと同じ目的で、仮説構築ステージに連続してなされる場合と別の目的で別の機会になされる場合がある。そして実験量、それを支える実験計画や評価の試行錯誤の程度、さらにその背景にある仮説構築の質・量が偶然の生起可能性と相関する。

図 5-9 意図せざる「実験代行を核心とする」プロセスモデル



資料：筆者作成

続いて、セレンディピティの核心である偶然が生起する。その作用は、意図せざる「実験代行」である。意図せざる実験代行が、「目標設定と仮説構築を前提として『実験』→『評価』を繰り返しながら実現する意図的なイノベーションのプロセス」を一気に代替する。そして、偶然には、人知未到、かつ非意図的営為であるが故の不合理な外形が顕在する。それ故にセレンディピティの機会は見逃されやすい。しかし人知が未だ知らない合理的な因果が潜在する。これを見出し得るかどうかはセレンディ

ピティによるイノベーション成立への分岐点である。

偶然の後に行われる、事後必然（意図的営為）の作用は、偶然が提示した意外な結果からの論理抽出である。その内容は二点ある。①着眼：不合理な外形、意外な結果を見逃さず意外な結果の意義を洞察し着眼する。②因果解析：意外な結果を再現可能として、できればその因果を解明する。

以上、大きく「仮説構築」→意図的な「実験」→意図せざる「実験代行」→「論理抽出」ステージからなるプロセスを通じてセレンディピティが成就する。

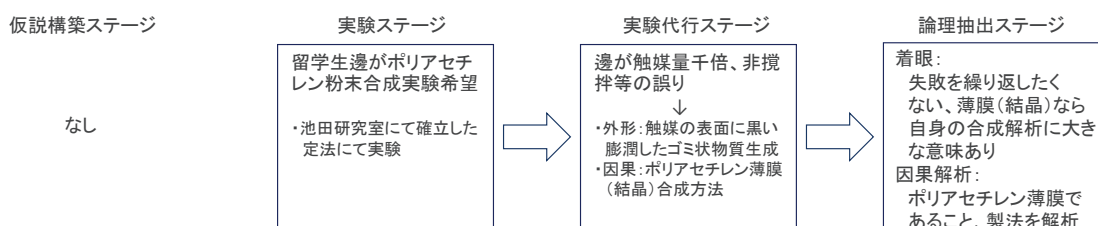
（２）事例研究の確認

第４章の事例研究の内容について、本章でのプロセスモデルでどのように理解・記述できるかを確認しておこう。

１）導電性ポリマー

導電性ポリマーの場合には、結果として起こったセレンディピティを目指した仮説構築ステージはなかった⁹⁷。偶然は、得られたセレンディピティとは別目的の実験ステージで起こった。留学生による触媒量千倍、攪拌不備等の誤りの結果である。意図せざる実験代行の結果、触媒の表面に黒く膨潤したゴミ状物資が生成した。

図 5-10 プロセスモデルによる導電性ポリマー事例の記述



資料：筆者作成

白川は、主に、「同じ失敗を繰り返したくないこと」と「もし薄膜（結晶）なら自らのポリアセチレンの合成過程解析に極めて適した試料が得られるという目的意識」からこれに意義を洞察し着眼したと考えられる。そして、意外な結果がポリア

⁹⁷ 当然だが、これは、白川とその所属組織の偶然以前の思考・行動様式、目的意識、知識蓄積等がセレンディピティに意義がないということではない。

セチレン薄膜（結晶）であると同定し、“失敗実験”の原因を解明し、ポリアセチレン薄膜（結晶）の製法を確立、論理抽出に成功した。

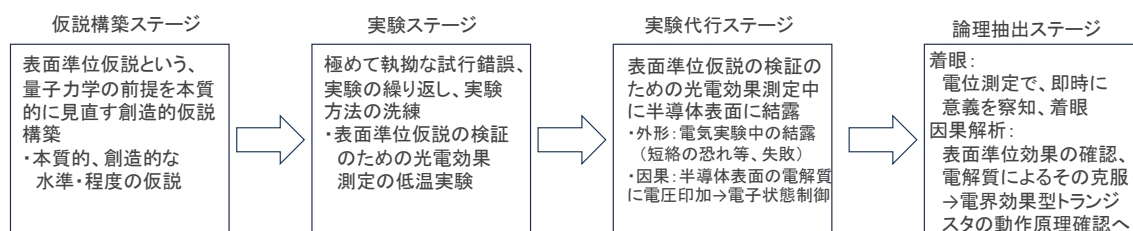
2) トランジスタ

トランジスタにおいては、偶然の起こる程度・水準を決定づける、仮説構築ステージがあった。バーディーンによる表面準位仮説は当時の量子力学が前提とする盲点を本質的に問う本質・創造的仮説であった。

加えて、その検証のための実験ステージ（実験・評価）は、特段の工夫、試行錯誤による執拗・多大な活動で実行された。ブラッテンは、この検証のための実験に一年半余りの時間と工夫を投入した。表面準位仮説の検証中は、バーディーンの提案もあり、ショックレーも含め彼らは一旦半導体による増幅素子の開発という目的を離れて、科学的な解明に専念しようとしていたという。その覚悟での時間と工夫の投入であった。

そして、偶然による意図せざる実験代行は、その表面準位仮説を検証する悪戦苦闘の実験の洗練・繰り返しの結果として起こった。それは、電気実験中には、当然に失敗（短絡等の恐れ）と考えられる装置の急速な冷却による半導体表面の結露として現れた。

図 5-11 プロセスモデルによるトランジスタ事例の記述



資料：筆者作成

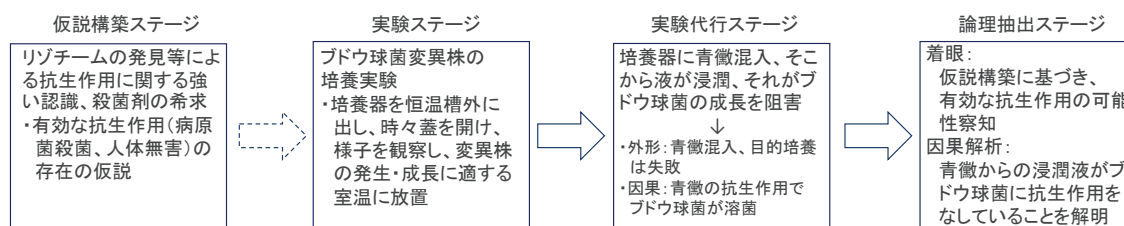
しかし、実験にあたっていたブラッテンらは、結露の影響による実験結果の電流の変化を敏感に察知しこれを見落とさなかった。そして、液体、電解質を通じて半導体表面に電位差を与えることにより、半導体表面の電子状態をコントロール、表面準位効果による電界の遮蔽を克服し得ることを見出した（論理抽出）。その結

果、表面準位効果の影響で、数年に渡って滞っていた電界効果型トランジスタ、半導体増幅素子の動作原理を確認・実証することができた。

3) ペニシリン

ペニシリンにおける仮説構築ステージの中核は、フレミングによる潜在的な「有効な抗生作用の存在仮説」である。彼はペニシリンに先行して発見したリゾチームの抗生作用に関する研究に極めて熱心に取り組んだ。また、第一次世界大戦への従軍等も通じて細菌感染症を克服する強い目的意識を持っていた。そして、細菌に関し、幅広い関心・研究領域を持っていた。それらに基づいて、フレミングは「病原菌に有効で人体に無害な抗生作用の存在」を、少なくとも潜在的には、「仮説として抱いていた」と言って良い。

図 5-12 プロセスモデルによるペニシリン事例の記述



※仮説構築ステージと実験ステージを結ぶ矢印が破線であるのは、連続的でなく、時間をおき、別目的でなされたことを示す。一方、実験代行での偶然、論理抽出の結果は、仮説構築の目的に合致(連続)する内容であった。

資料：筆者作成

そして、フレミングがブドウ球菌変異株の培養実験を行っている際、つまり実験ステージの最中に実験代行が起こった。この実験は先の仮説構築に基づいて抗生作用を発見しようとして行っていたのではなく、別目的、ブドウ球菌の性状に関する確認を目的としていた。フレミングが変異株を求めて、培養器を恒温槽外(室温)に置き、時々蓋をあけ観察した際に青黴が混入した。夏休みの間、実験室に置いていた培養器で青黴が繁殖し、そこからしみ出した成分がその後繁殖しようとしたブドウ球菌の分裂を阻害したのだ。

彼は、夏休みから戻り、青黴からの浸潤液の近傍でブドウ球菌が溶菌しているように見えることに気が付いた。彼は、ブドウ球菌変異株の発生(黄色変性)を主な目的として観察していたので、一旦、これは見落とされ、廃棄される寸前であっ

た。

しかし、少なくとも潜在的に有していた「有効な抗生作用の存在」仮説や「実験から結果を絞り出しつくす」というフレミングの思考・行動様式等により、彼は、偶然の意外な結果に意義を洞察・予感し着眼した。その後、フレミングは、再現実験を行い、青黴からの浸潤液がブドウ球菌に対する溶菌作用を有すること、すなわち抗生作用の確認と再現可能化、つまり論理抽出を行ったのである。

4) アリセプト

アリセプトにおける仮説構築は、コリン仮説の採用である。当時、他に特段の有力仮説はなかったが、本仮説も有力・主流仮説ではなかった。しかし、結局最初アルツハイマー型認知症に有効な医薬品となったのは、この仮説に立脚したアリセプトであった。有力仮説が存在しないこともあって、ほぼ他に当該治療薬を開発する動きのない状況だった。この状況で、杉本らはコリン仮説に基づいて、タクリンをシード化合物とした有用な合成物の発見のため多数の合成を企図した。

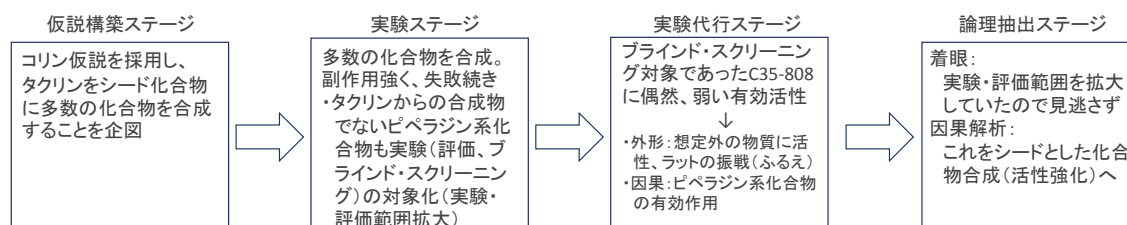
そして、実験ステージ、合成と評価を繰り返した。しかし、当初のシード化合物、タクリンからの合成物は、副作用が強く、ことごとく失敗した。そこで、杉本らは、ピペラジン系の各種化合物をブラインド・スクリーニングの対象とした。つまり実験・評価範囲の拡大を行った。杉本らは他の薬効を求めてピペラジン系化合物の性質を詳しく理解しつつあったので、これも実験対象とする実験・評価範囲の拡大を行ったのである。

偶然による実験代行の結果は、先の経緯でブラインド・スクリーニングの対象としていたピペラジン系の化合物、コード名 C35-808 が弱いながらもコリン仮説に適合、有効だったことである。この場合、その偶然は、ブラインド・スクリーニングでの弱い活性の存在に加え、他目的で投与したラットの振戦（不随意のふるえ）という意外な外形でもその姿を現した。

そして、杉本らは、実験ステージにおいて、実験・評価範囲を拡大した当然の結果として、C35-808 にも着眼し、その活性を測定した。そして、因果解析の結果として、C35-808 にコリン仮説に基づいたアルツハイマー型認知症治療薬としての可能性を見出し、それをシードとした化合物合成を行い、最終的にアリセプトを得た

のである。

図 5-13 プロセスモデルによるアリセプト事例の記述



資料：筆者作成

以上に示したように、第4章の事例研究対象は、本章で示したプロセスモデルでの説明が説得的であり、その特徴をプロセスモデルで捉えられることが確認できた。ここまですで、セレンディピティによるイノベーションのプロセスモデル構築の検討を終え、次章での類型化モデルの構築にうつる。

第6章 駆動要因による類型化モデル構築

本章では、セレンディピティの「駆動要因による類型化モデル」を構築する。そのために、前章で示したセレンディピティのプロセスモデルに基づき、それぞれのセレンディピティにおいて、それを特に駆動するプロセスとその駆動要因を抽出する。

プロセスモデルでの一般的理解に加え、類型化モデルを構築することによって、本研究のモデル体系に、セレンディピティの個別的な理解可能性を加える。一般性と特殊性の両面からの理解によって、セレンディピティの構造理解がより明確になると考える。また、セレンディピティを特に駆動するプロセスと駆動要因に着目することにより、セレンディピティの活用、促進、マネジメントへの示唆を得ることを目指す。

1. 主たる駆動力による類型化

セレンディピティにおいて、どの必然（意図的営為）のステージが他の偶然や必然のステージを駆動し、すなわち影響を与え、あるいはそれ自身が直接的に貢献し、セレンディピティの成就に繋がったか、あるいはセレンディピティの特徴、性質に特に関係したのかについて、プロセスモデルに基づいて検討する。

自明のことであるが、偶然はその定義により、人為によって直接的に制御できない。従って、ここでの検討は、必然がいかなる作用を果たし他の必然・偶然を駆動するのか、あるいは自らセレンディピティの成就に貢献するのかに焦点を当てることになる。偶然は、必然の駆動対象として考察する。

第4章までの事例研究とそこから一般化に基づくプロセスモデルでの論理的考察から、上記の考察のためには、前章で構築した4ステージのプロセスモデルを端的に受け止めることが有効であると思われる。

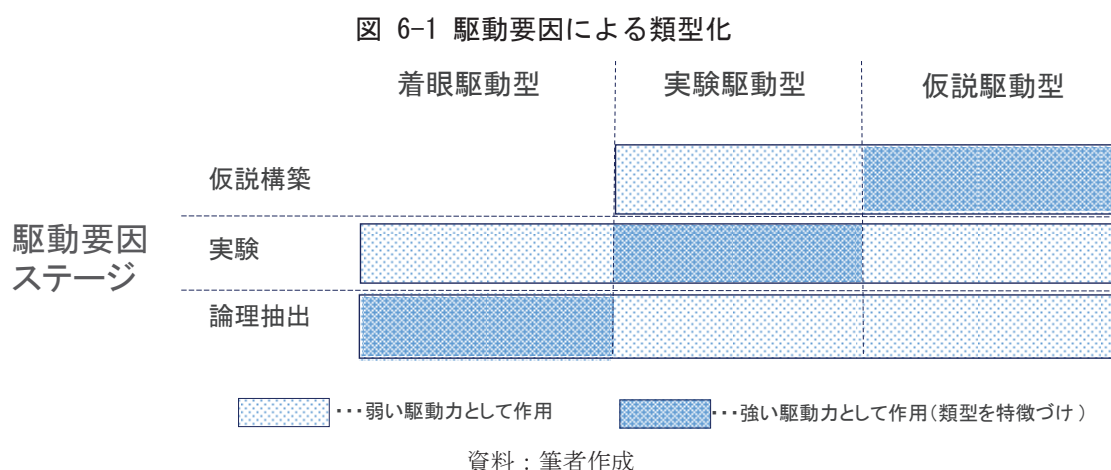
偶然は、我々が直接的に操作できないことから、我々の検討対象は、仮説構築ステージ、実験ステージ、論理抽出ステージの3つの必然のステージである。この3ステージのうち、どのステージがセレンディピティの成就を強く駆動したのかに基づく類型化を考えることができる。結論を先取りして言えば、それは次の3類型となる。

第一の類型は、得られたセレンディピティに直結する仮説構築ステージはなく、得られたセレンディピティとは別の目的で実験ステージが行われ、そこで意図せざる実験代行が生起し、その論理抽出に成功することによって、思ってもいなかったセレンディピ

ティが成就する類型である。この成就の要である論理抽出を強く駆動するのは、突然の偶然の極めて意外な結果への着眼力であると考えられるので、これを「着眼駆動型」と呼ぶ。

第二の類型は、得られたセレンディピティを目的とする仮説構築ステージと実験ステージが実施され、そこに意図せざる実験代行が生起し、論理抽出に成功してセレンディピティが成就する類型の内、実験ステージがその成就を強く駆動する類型である。これを「実験駆動型」と呼ぶ。

第三の類型は、得られたセレンディピティを目的とする仮説構築ステージと実験ステージが行われ、そこに意図せざる実験代行が生起し、論理抽出に成功してセレンディピティが成就する類型の内、仮説構築力がその成就を強く駆動する類型である。これを「仮説駆動型」と呼ぶ。



以下に、第一～三の類型が成就するプロセスを記述し、駆動要因ステージの作用を検討するための準備を行う。

(1) 着眼駆動型

導電性ポリマーが着眼駆動型に該当する。着眼駆動型は、仮説構築ステージはなされず、成就したセレンディピティとは別目的の実験ステージがなされる最中に、突然、「偶然による実験代行」が生起し、「意外な結果」が出現する類型である。この場合、セレンディピティが成就するための強い駆動要因となり得るのは論理抽出ステージのみであり、論理抽出を成功させる強い駆動力となるのは「着眼力」である。何故な

らば、セレンディピティに向けての意図的な営為となるのは、偶然の実験代行の生起後の「論理抽出」ステージのみだからである。

(2) 実験駆動型

アリセプトが実験駆動型に該当する。実験駆動型は、仮説構築ステージに続く、実験ステージにおける実験の執拗さ（実験量と工夫）が強い駆動要因となる類型である。

実験ステージにおいて、実験・評価を繰り返すことで可能となる、実験・評価範囲の妥当な設定により、それがなければ見逃してしまうだろう偶然の実験代行結果に対して着眼をなし、論理抽出に成功し、セレンディピティが成就する。

当初の仮説での想定とは異なる実験・評価範囲の設定によりセレンディピティに成功するこの類型では、当初の仮説、当該分野の研究の不確実性が高い場合が多く、強い実験・評価意図があってはじめて開始された実験とその執拗さが重要な意義を有することが多く、その点からも実験駆動型と呼ぶことが適切である。

なお、実験駆動型においても、セレンディピティの成就には、論理抽出ステージを駆動する着眼力が必要であるが、実験・評価範囲（着眼範囲）は妥当に設定されており、偶然の実験代行の結果自体は、当初から求めているものなので、着眼力は強い駆動力とはならない。

(3) 仮説駆動型

セレンディピティの第三の類型は、「仮説構築」ステージが強い駆動要因となる場合である。この類型内の二つのタイプの内容を記述する。

1) 仮説構築が実験代行を駆動する強い駆動要因となる場合

トランジスタがこのタイプの仮説駆動型に該当する。このタイプでは、仮説構築が実験代行を駆動する強い駆動要因となる。すなわち、仮説構築の本質・創造性故に、それに相関した水準の偶然による実験代行が生起し、その結果から論理抽出することにより本質・創造的なセレンディピティが成就する。

2) 仮説構築が論理抽出を駆動する強い駆動要因となる場合

ペニシリンのがこのタイプの仮説駆動型に該当する。このタイプでは、仮説構築が論理抽出を駆動する強い駆動要因となる。すなわち、何かが存在するという創造的な仮説が伏線のように作用し、偶然の実験代行結果に遭遇した際に、その外形の不合理・意外さにも関わらず、論理抽出に成功し、創造的なセレンディピティが成

就する。

2. 各ステージの駆動作用の詳細検討

セレンディピティの駆動要因となる「仮説構築」、「実験」、「論理抽出」の各ステージにつき、その駆動作用⁹⁹を確認しておこう。強い駆動作用と合わせて弱い駆動作用についても確認する。

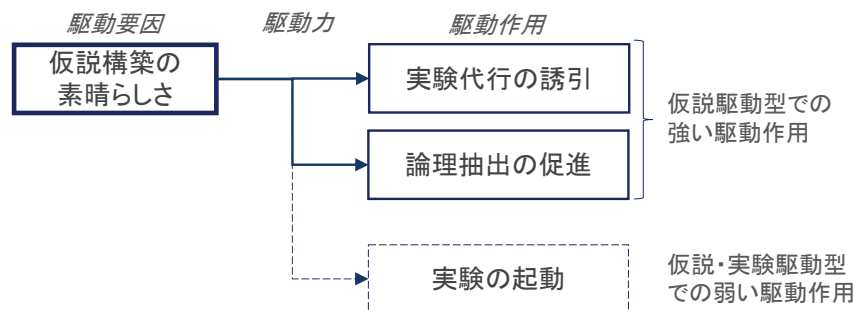
(1) 仮説構築ステージの駆動作用

仮説構築ステージは、セレンディピティ成就への駆動要因として三つの意義を有している。それぞれ駆動力、駆動作用が異なっている。以下にその内容を記述しよう。

1) 仮説構築の素晴らしさによる実験代行の誘引（強い駆動作用）

仮説構築の素晴らしさ、本質・創造性故に、生起する偶然の実験代行が本質的となる作用である。その結果として、成就するセレンディピティも本質・創造的なものとなる。

図 6-2 仮説構築ステージの駆動作用



資料：筆者作成

トランジスタにおいて、電界効果型トランジスタが実現困難である理由の解析において、当時の量子力学、固体物理学そのものの前提、限界を見直す本質的、創造的な表面準位仮説が提案され、その存在の検証のための実験が行われた。それにより、偶然による実験代行の結果、及びその結果と成就するセレンディピティも極めて本質的、創造的なものとなった。これが、仮説構築の素晴らしさによる、相応す

⁹⁹ 以下、駆動作用の性質の違いに応じて、それを、「起動、促進、誘引」と呼ぶ。最も直接的な作用が起動、中間的な作用が促進、間接的な作用が誘引である。

る実験代行の誘引の典型例である。

2) 仮説構築の素晴らしさによる論理抽出の促進（強い駆動作用）

仮説構築の素晴らしさ、本質・独創性故に、偶然の実験代行の意外な結果への着眼、論理抽出に成功する作用である。結局、仮説構築の素晴らしさによって、独創的なセレンディピティが成就する。

もし、本質・独創的な仮説構築がなければ、実験代行の結果は、「不合理で意義がない」として見逃される可能性が高い。しかし、仮説構築によって敷かれた伏線によって、論理抽出が成功する。

ペニシリンの発見において、フレミングは、独創的な仮説を有していると言える状況にあった。有効な抗生作用を潜在的に仮説構築していた。それ故にブドウ球菌の培養器に青黴が混入した状況を、単なる失敗として廃棄しなかった。青黴が有用な抗生作用を発揮してブドウ球菌の発育を阻害していることを発見した¹⁰⁰。

なお、上記1) が作用している場合には、同時に2) も作用すると考えらる。偶然の実験代行を誘引するほどの本質・創造的仮説を有していれば、当然にそれが伏線になり、実験代行結果を発見・解析しやすくなるだろうからである。逆に、トランジスタの事例において、もし、表面準位仮説を有していなければ、半導体表面の結露は、全く注目されない現象だっただろうと考えられる。

3) 仮説構築の素晴らしさによる実験の起動（弱い駆動作用）

仮説構築の素晴らしさ、本質・創造性故に、実験が開始され、実験量が豊かに、工夫が積み重ねられる作用である。

トランジスタにおいて、電界効果型仮説（構想）と表面準位仮説が本質・創造的であるが故に、執拗な実験が試みられた。これが仮説構築の素晴らしさによる実験の起動作用である。

アリセプトにおいて、確度の高い有力仮説がないなかで、わずかながら臨床現場で効果が認められたという情報に基づいて、大胆に独創的にコリン仮説を選択、構

¹⁰⁰ これは、目的意識を有していたということと重なる内容であるが、単に目的意識を有していたのではなく、「目的を実現する具体的な方法を想定していた」ことに意義がある。病原菌の殺菌作用を強く求めていただけではなく、それが抗生作用によって可能になるかも知れないという具体的な方法を洞察していた。

築したことにより、実験が開始されたこともこの作用である。その結果、実験の試行錯誤から偶然の実験代行を経て、世界で最初のアルツハイマー型認知症の治療薬を得た。仮説構築の内容自体は、確度の高いものではなかったが、逆にその状況で、わずかな情報を手掛かりに素朴・大胆に、独創的に仮説を採用したことが、この場合の仮説構築の素晴らしさなのである。この仮説構築がなければ、アリセプトは生まれていない。

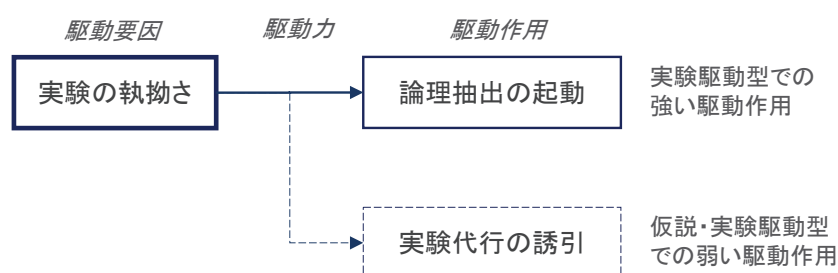
(2) 実験ステージの駆動作用

実験ステージは、セレンディピティ成就への駆動力として、以下に示す通り、二つの意義を有している。

1) 実験の執拗さによる論理抽出の起動（強い駆動作用）

実験と評価の執拗さ、すなわちその量と工夫が、実験・評価の範囲を妥当に設定し、論理抽出の起動を可能とする作用である。

図 6-3 実験ステージの駆動作用



資料：筆者作成

アリセプトの場合が、この典型事例である。執拗な実験・評価の結果、第一に元々の仮説の実験・評価範囲には求める結果が存在しない可能性を認知した。第二に求める結果を発見するための評価の精度、効率を大いに高めた。そこで元々知見を有していたピペラジン系の合成物に実験・評価の範囲を変更した。これは、一定の知識、根拠によるものの完全に理論的に予測し得た結果ではなかった。しかし、新たに設定した実験・評価範囲に、偶然の実験代行結果、求める活性の合成物が存在した。もし、実験・評価範囲の変更・拡大を行っていなければ、この偶然、実験代行結果は、アルツハイマー型認知症の治療目的に対して評価の対象ともされずに終わっただろう。

すなわち、執拗な実験に基づく実験・評価範囲の設定・変更が、偶然の実験代行結果への着眼、論理抽出を起動したのである。

2) 実験の執拗さによる実験代行の誘引（弱い駆動作用）

実験の執拗さ、量と工夫が、偶然の実験代行を誘引する作用である。偶然、実験代行の生起確率は、実験量と工夫に相関すると考えられる。多くの実験、多様な実験が行われるからこそ、そこに様々な想定外の偶然が生起する可能性が高まる。

トランジスタにおいて、表面準位仮説に基づき、それを検証する実験を繰り返し、その方法・精度を高め、実験に工夫を重ね続けて、ついに常温でも表面準位仮説を検証する光電効果の観察が可能となった。その結果を踏まえて、光電効果の温度特性を測定するため低温実験を行う際に、結露という偶然の代行が生じた。この稀少な現象、偶然は、実験の執拗さの賜物であると考えられる¹⁰²。

(3) 論理抽出ステージへの駆動作用

論理抽出とは、偶然の実験代行の意外な結果に対し、その不合理な外形にもかかわらず、それに「着眼」し、「因果解析」を行うことである。

論理抽出ステージへは、大きく二つの駆動要因による駆動作用が存在する。第一の駆動要因が、先に示した仮説構築の素晴らしさと実験の執拗さである。第二の駆動要因は、論理抽出での自律的駆動要因である。

着眼駆動型においては、第二の自律的駆動要因のみが作用する。仮説駆動型と実験駆動型においては、第一と第二の駆動要因が作用する。

1) 第一の駆動要因による駆動作用

i) 仮説構築の素晴らしさによる駆動作用（強い駆動作用）

先に示した通り、仮説構築ステージは、仮説構築の素晴らしさにより論理抽出を促進する。トランジスタ、ペニシリンいずれにおいても、仮説構築の素晴らしさが偶然の実験代行を見逃さぬための着眼力を生み、論理抽出に成功し、セレンディピティが成就した。

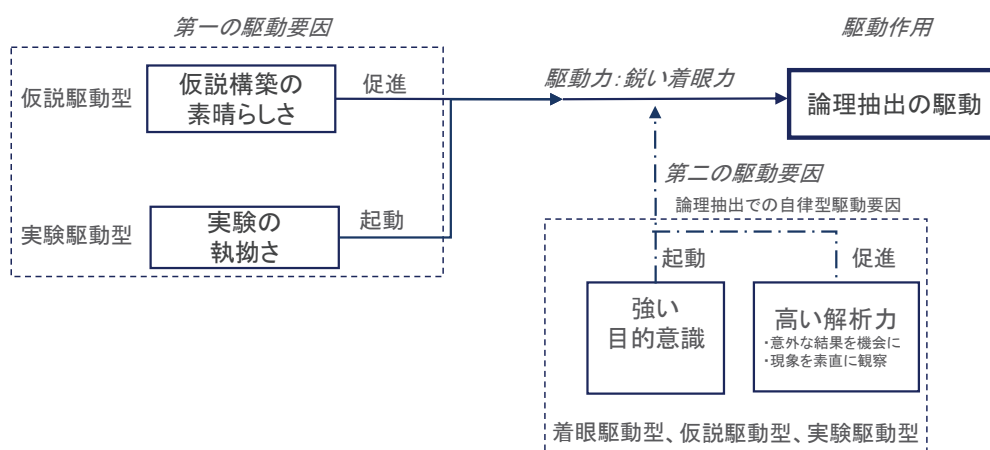
ii) 実験の執拗さによる駆動作用（強い駆動作用）

先に示した通り、実験ステージも、実験の執拗さにより論理抽出を起動する。ア

¹⁰² ここでは、仮説構築と実験ステージの関係を仮説構築に基づく実験という一方向の関係で描写した。実際には、実験を繰り返す中で、その基になる仮説構築にも影響が及ぶ等の双方向の関係がある。

リセプトにおいて、執拗な実験の結果、ピペラジン系の化合物をアセチルコリンエステラーゼ阻害作用の活性評価の範囲に置いたからこそ、偶然にもピペラジン系の化合物にアセチルコリンエステラーゼ阻害作用があることを見逃さず、つまり論理抽出を起動することができた。

図 6-4 論理抽出ステージへの駆動作用



資料：筆者作成

i)、ii)に見たように、論理抽出は、偶然の後の自律的駆動要因のみに駆動されるのではなく、仮説構築と実験、つまり偶然より前の必然によっても駆動されている。ペニシリンにおけるリゾチームの発見・探求の例にあるように、時には、それは偶然の実行代行のはるか以前の必然によって駆動されている。

2) 論理抽出ステージでの自律的駆動作用

論理抽出ステージには、それを自律的に駆動する駆動要因が存在する。それは、強い目的意識と高い解析力である。

i) 強い目的意識

論理抽出ステージを自律・直接的に駆動する、かつセレンディピティにおいて、極めて広範な論理抽出の駆動要因は、強い目的意識である。

トランジスタにおいては、「全米に安定的な電話網を構築するために固体による増幅素子を開発」というケリーによって植えつけられた極めて強い目的意識があった。

ペニシリンにおいても有効な抗生作用という仮説を抱く前提として「人体に無害

で、悲惨な感染症を治療する殺菌剤を開発したい」というフレミングの強い目的意識があった。

全く想定外の偶然からの論理抽出であった導電性ポリマーにおけるポリアセチレン薄膜の発見においても、白川が、ポリアセチレンの合成過程解明のため、解析しやすい構造を求めている。

ii) 高い解析力

高い解析力は、論理抽出を駆動する。高い解析力は、大きく二つの特性を持った解析力から構成される。第一が、意外な結果を機会と考える解析力である。第二は、意外な現象、結果をありのまま素直に深く観察し解明する観察力である。この二つの特性が偶然の実験代行の意外な結果の意義を見落とさず、それに着眼させ論理抽出を促進する。

白川、ブラッテン、フレミングらは意外な結果を機会と考える解析力を有していた。その結果、他の研究者らが見逃す恐れの高い偶然の実験代行に着目した。

一方、白川、ブラッテン、フレミングらは、意外な現象、結果をありのまま深く観察し解明する観察力を有していた。それが意外な結果の意義を認識させ、着眼、論理抽出の成功に繋がった。

以上に示した通り、第一の駆動要因である「仮説構築の素晴らしさ」と「実験の執拗さ」、及び第二の駆動要因（論理抽出での自律的駆動要因）である「強い目的意識」と「高い解析力」から生じる駆動力が、全体として「鋭い着眼力」（図 6-4）を構成し、論理抽出を駆動する。

3. 類型化モデルの事例研究への適用と類型化モデルの吟味

前節までのセレンディピティの類型化モデルの考え方、特に駆動作用の分析に第4章での研究事例を適用し、各事例が類型化モデルにいかにか該当するかの検討・確認を行う。それにより、類型化モデルの意義、妥当性を確認する。

最後に、事例研究の確認も踏まえた上で、類型化モデルの含意の吟味を行う。

(1) 導電性ポリマー

導電性ポリマーのセレンディピティにおいては、仮説構築ステージは存在しな

った。そして、実験ステージは、成就したセレンディピティとは別目的でなされた。従って、本事例では「論理抽出ステージへの駆動作用」について検討する。

留学生邊によるポリアセチレン粉末合成目的でなされた実験で、突然の異変、偶然による実験代行が生起した。従って、白川にとって、それは大変意外な結果であった。ポリアセチレン粉末が合成されるべきところ、溶媒上にゴミのような黒い浮遊物が膨潤していたのである。

この意外な結果を見落とさなかった白川の「鋭い着眼力」が本セレンディピティの駆動力の核心である。第一に白川の「高い解析力」がこの駆動要因である。意外な結果を機会とする考え方、失敗を繰り返さないため原因を探究する考え方がこの解析力の源泉である。

第二に白川の「強い目的意識」もこの駆動要因である。当時白川は、ポリアセチレンの合成過程の研究を主テーマとしており、粉末よりも構造解析に適した試料形態を強く求めていた。従って、意外な結果がもしその形態に関わるものであれば大変望ましいという、潜在的な目的意識を持っていた。

以上のプロセスの確認から、導電性ポリマーの事例は、「強い目的意識」と「高い解析力」を駆動要因とする「鋭い着眼力」による「論理抽出の駆動」作用の成果であり、着眼駆動型の典型事例であると言って良いだろう。

（２）トランジスタ

１）仮説構築ステージの駆動作用

トランジスタにおいては、電界効果型半導体増幅素子の仮説（構想）に加えて、その失敗原因の解析のために構築された表面準位仮説の構築を中心に、極めて本質的、創造的な仮説構築がなされた。その内容と駆動作用を以下に記述する。

第一に「仮説構築の素晴らしさ」がそれに見合った「実験代行を誘引」した。表面準位仮説は、当時の量子力学に基づいた固体物理学の大前提である固体の大きさを無限大と近似する（表面は存在しない）考え方への疑義であり、端的で「本質的な問いかけ」であった。バーディーンは、それまでの前提条件に加えて、実態に合わせて「表面の存在」を考慮した仮説・論理を構築、提案した。

そして、セレンディピティの核心である偶然の実験代行（半導体表面の結露）が

生起したのは、表面準位仮説の検証のためのブラッテンの実験中であった。つまり、トランジスタにおいては、仮説構築における仮説の本質（程度・水準）が生起した偶然の水準・程度に直接影響する決定的な意味を持っていた。表面準位仮説がなければ、当然にその確認のための実験は行われず、本質的、画期的なセレンディピティに繋がる偶然の実験代行は起こりようがなかった。

第二に、「仮説構築の素晴らしさ」は「論理抽出を促進」した。つまり、表面準位仮説が構築されていたからこそ、半導体表面の結露にもかかわらず、それが着眼され、論理抽出が促進された。表面準位仮説の検証中でなければ、半導体表面の結露は、電気実験での短絡に繋がる単なる失敗として無視された、あるいは意識の対象にもならなかっただろう。

第三に、「仮説構築の素晴らしさ」は「実験を起動」した。表面準位仮説という創造・本質的な仮説を出発点にしているからこそ、次項に示す通り、その検証のための執拗な実験が実施され続けた。

2) 実験ステージの駆動作用

トランジスタにおいては、表面準位仮説の検証に特に顕著であるように、仮説構築に基づいて、執拗、多様で大量の実験が実施された。ブラッテンを中心とする表面準位仮説の検証実験は1年半余りに及んだのである。

ブラッテンに加え、バーディーン、ショックレーらが様々な実験計画を考案しては、それを実施し、その結果の多くは失敗に終わった。失敗で淘汰されずに残った計画がブラッシュアップされ実験に付され続けた。その結果として、工夫が込められた大量の実験が実施され、それが偶然の生起に繋がった。この間の実験の失敗に次ぐ失敗、新たな実験計画の立案と実験の試行錯誤のプロセスについて、ショックレーは菊池誠(2006, p59)に次のように語った。彼は、実験計画を立てると（実験に関し新たな工夫をすると）、実験に取りかかる前に、「できると思うか」と仲間や部下を賭けに誘った。彼は常に「できる」方に賭け続け、何年にもわたって負け続けたという。

以上の経緯に見られるように、トランジスタにおいては、「実験の執拗さ」が「実験代行を誘引」した。つまり実験の量と工夫が偶然の生起に繋がったと考えら

れる。

3) 論理抽出ステージへの駆動作用

トランジスタにおいて、偶然の実験代行の不合理な外形は、半導体表面の結露であった。電気実験中の結露であるから、一般的には、短絡等に繋がる、明らかな失敗と見做される。しかし、ブラッテン、ギブニーはこれに着眼し、表面準位効果を克服する意義を把握し、因果を解析した。この論理抽出なしには、セレンディピティは成就し得なかった。すなわち、意外な結果に着目し、それを素直に観察し因果を明らかにする「高い解析力」と固体増幅素子を求める「強い目的意識」による「鋭い着眼力」も「論理抽出を駆動」した。

以上から、トランジスタの事例は、「仮説構築の素晴らしさ」、「実験の執拗さ」、「鋭い着眼力」がそれぞれ作用したセレンディピティであると考えられる。セレンディピティにおける必然（人知・人為）の役割の意義を象徴する事例であるとも言えよう。その中でも、トランジスタのセレンディピティを特段に特徴づける駆動要因は、表面準位仮説という極めて本質・創造的な「仮説構築の素晴らしさ」であり、その水準で偶然が生じ、「実験代行が誘引」されたことに大きな意義があった。その結果として画期的、本質的、創造的なセレンディピティが成就したと考えられる。従って、トランジスタの事例は、仮説駆動型の典型事例と考えられる。

(3) ペニシリン

1) 仮説構築ステージ

ペニシリンの発見に繋がった実験の目的は、ブドウ球菌変異株の培養である。従って、その実験ステージの開始時には、フレミングは、「抗生作用の発見」を目指した仮説構築を行ってはいない。

しかし、「当該実験、偶然の実験代行のはるか前に、フレミングは『ペニシリンの発見に重要な意義を有する』仮説構築を行っていた」と言って良い状況だった。具体的には、フレミングは「有効な抗生作用の存在」を仮説構築していた、またはそう見做して良い状況であった。

なぜならば、フレミングは、①第一次世界大戦の従軍経験等から、「病原菌に有効で人体に無害な殺菌剤」を強く求め続けていた、②リゾチームを発見したことにより

「抗生作用の意義」を強く認識し、それを深く研究し、独自の評価方法も確立していた、③ ①、②の状況を踏まえて、柔軟、自由な思考の持ち主であるフレミングが有効な抗生作用の可能性を否定していたと考えるのは不自然だからである。

なお、フレミングの細菌に関する多様な研究と臨床経験から考えて、彼が細菌や殺菌に関して潜在的に有していた仮説が、「有効な抗生作用の存在」だけであったとは思われない。しかし、彼が多くの可能性、仮説を構築していたであろうからこそ、そのひとつとして、「有効な抗生作用の存在」を考えていたと考えるのは極めて自然だろう。

フレミングが、抗生作用の有効性を想定していたとすれば、これは当時の細菌専門家の中で、相当に異端であり、独創・創造的な意味を有している。なぜならば、当時の専門家における一般的な認識は、「抗生作用はけっして珍しいものではなく、それにもかかわらず、これまでその中に特に有用なものが見出せなかったのだから、抗生作用は（すべてが）、役立たない現象だろう」というものだったと思われるからである。

なぜ、フレミングがこの当時の専門家の常識を超え、抗生作用の有効可能性を見出していたかは必ずしも明らかではない。しかし、それは、リゾチームという抗生作用を自ら発見し、抗生作用に強い関心と可能性を有していたからだけではないだろう。フレミングが固定観念にとらわれることを嫌い、また何事をも自由に、ゲームを楽しむように実行する志向の持ち主だったことにもよるだろう。フレミングの弟のロバートは、ゴルフの際に、フレミングの思いつきのルールで、例えばワンラウンドすべてをパターだけを使ってプレーすることがよくあったと言っている。また、フレミングの上司であるライトは「君は研究をゲームのようにやる」と文句を言ったという（Gwyn Macfarlane (1984) , p.146）。

フレミングはこのようにして「素晴らしい仮説構築」を行っていた。

2) 論理抽出ステージ

ブドウ球菌変異株の培養実験中に、目的である変異株は観察されないにもかかわらず、ブドウ球菌のコロニーの一部が溶菌し、その延長方向に視線を伸ばすと、青黴が繁殖していた。この偶然による実験代行の結果は、本来の目的に照らして、全く期

待外れ、不合理な外形である。青黴の混入によるただの実験の失敗、と考えられてそれが廃棄されても全く不思議はなかった。実際、フレミングもこの培養器を一旦廃棄しかかった¹⁰⁵。一度は、底の方にクレゾールの入ったトレイに積みあげられた培養器の上にそれを置いたのだ。しかし、共同実験者であったプライスの訪問を受け、彼に状況を説明するために改めてその培養器を拾い上げて、そこに潜む実験代行の意義把握のとば口に立った。そして、着眼と意義把握の困難を乗り越えて論理抽出に成功した。

偶然による実験代行の意外な結果にもかかわらず、フレミングはそれに着眼した。

すなわち、「鋭い着眼力」が「論理抽出」を駆動した。この鋭い着眼力の源泉となったのは次の三つの駆動要因であった。

第一に、フレミングが有していた「強い目的意識」である。第一次世界大戦への従軍経験以来、彼は細菌感染の悲惨さを痛感し有効な殺菌剤を求め続けていた。

第二に、「高い解析力」である。特にフレミングは意外な結果に特に注目し、また、現象をありのままに仔細に観察するタイプであった。

第三に、前項に記した「仮説構築の素晴らしさ」である。人体に無害で病原菌に有効な抗生作用が存在する、という異端で独創的な仮説である。この仮説構築の素晴らしさが、特に強く「論理抽出を駆動」したと考えられる。具体的に有効な抗生作用の可能性を抱いていたからそれを見逃さず、その意義を把握し因果解析に到ったのだ。

以上の経緯に鑑みて、ペニシリンの事例は、仮説駆動型の典型事例のひとつと考えられる。

(4) アリセプト

1) 仮説構築ステージ

杉本八郎らのチームは、アルツハイマー型認知症の治療薬の創薬開始にあたって、当時、有用性が疑われていたコリン仮説を採用した。コリン仮説はそれに基づくシード化合物とされていた「タクリン」等の副作用が強いこと等、大きな問題点

¹⁰⁵ この時点では、変異株の発生を示す黄色変性がないことを確認したのみで、溶菌、青黴の混入には気が付いていなかったと想像できる。

を内包していた。しかし、杉本らは若干の効果があつた、という臨床現場からの情報を基にこの仮説を採用して研究を開始した。

コリン仮説の大きな意義は、それが存在していたことと、杉本らがそれを採用・依拠して探索研究をはじめたことにある。それにより、杉本らが実験を開始し、タクリンの誘導体を多数合成し、評価しはじめられたことがこのセレンディピティの端緒となった。当時、アルツハイマー型認知症に関する原因探求は極めて未熟で、そもそも認知症は自然現象であり、治療はあり得ないという意見もあり、治療・対処薬の開発に着手しようとする者がほばいない状態であつた。

また、結果的にも、コリン仮説は半分正しく、半分誤っていた。つまり、コリン仮説が想定した有効物質「タクリン」とその誘導体が実用に適したのではなく、コリン仮説に適してはいたが、タクリンとは全く別のピペラジン系の物質が結局アリセプトという成果として結実したのである。その意味でも、コリン仮説は、内容もさることながら、その存在自体、それを採用したことに意味があつたと評価できる。

すなわち、その内容には、不確実性が伴いながらも、コリン仮説を採用したという「仮説構築の素晴らしさ」が「実験の駆動」という駆動作用を生んだのである。

2) 実験ステージ

杉本八郎らのチームは、タクリンからの誘導物を実験（合成）しては評価を繰り返した。しかし、その結果は、求める薬効がないか不足、または副作用が強いことによる失敗続きだった。杉本らは失敗の度に原因を解析し、あるいは、その解析が困難でもとにかく次の合成を進めた。杉本は、合成研究者に合成数のノルマまで与え、この合成実験の繰り返しを求めたという。

実験における失敗の繰り返しの中で、多数の合成物を評価し続けた結果、評価の精度・効率が高められ、一方、タクリンからの誘導体の限界が強く認識された。そうした中、杉本らは、高脂血症治療薬を目指して並行して研究を継続していたピペラジン系の化合物の可能性に着目し、ランダム・スクリーニングを開始した。そして、その評価項目にコリン仮説に適する薬効の抽出項目を加えた。これが、実験・評価範囲の拡大である。この拡大に到った主な理由は次の4つであると考えられ

る。

第一に、執拗な実験の結果としてのタクリンからの誘導物の行き詰まり。上述したように、実験（合成）と評価の試行錯誤が相当の回数に達しての行き詰まり故に、実験・研究範囲の変更・拡大を発想したと考えられる。第二に、ピペラジン系の多種の誘導体の活性（機能）と構造に関する知識蓄積が進み、彼らがその活性の可能性や必要な構造に関する「見通し」を持ちはじめたことである。第三に、彼らが、コリン仮説の活性に関する評価方法を構築し、その効率、精度を高めていたことである。これにより、彼らは実験・評価範囲を拡大してもそれを適切に評価し得るという目途を得ていたと考えられる。第四に、創薬業界全体の技術、産業レベルの進歩により、ランダム・スクリーニングの外注（この場合は台湾企業）が可能になりはじめたことである。

以上のように、杉本らはこのセレンディピティの強い駆動要因となる「執拗な実験」を実行していた。

3) 論理抽出ステージ

実験・評価範囲の拡大がなければ、ここで起こった偶然の実験代行は極めて意外な出来事である。何故ならば、本来の探索対象とは全く別系統である、高脂血症の治療薬候補のピペラジン系化合物にアセチルコリンエステラーゼ阻害作用があったからである。もし実験・評価範囲の拡大がなければ、「ピペラジン系化合物にアセチルコリンエステラーゼ阻害作用があること」は気付かれにくいことこの上なく、その発見はほぼ不可能だった可能性が高い。しかし、杉本らは意図的に、ピペラジン系の化合物に実験・評価範囲を拡大していた。その結果、偶然の実験代行の結果に着眼、因果を解析するという論理抽出が可能となった。

すなわち、「実験の執拗さ」による実験・評価範囲の拡大が強い駆動要因となり「論理抽出の起動」作用を生んだ。実験の執拗さが偶然の実験代行に着眼し論理抽出を成功させ、セレンディピティが成就したのである。従って、アリセプトの事例を実験駆動型の典型事例と考える。

(5) 事例の類型ごとの駆動要因とその作用に関する評価

以上の4事例に関し、類型に対応して、その駆動要因と駆動作用の検討結果のポイ

ントをまとめよう。

表 6-1 類型ごとの事例の駆動要因・作用

| 駆動要因・駆動作用 | | 着眼駆動型 | 実験駆動型 | 仮説駆動型 サブセット | 仮説駆動型 フルセット |
|--------------|---------|---------|-------|----------------|----------------|
| | | 導電性ポリマー | アリセプト | ペニシリン | トランジスタ |
| 仮説構築 ステージ | 実験の起動 | — | ○ | — | ○ |
| | 実験代行の誘引 | — | — | — | ◎ |
| | 論理抽出の促進 | — | — | ◎ | ○ |
| 実験 ステージ | 実験代行の誘引 | — | ○ | — | ○え |
| | 論理抽出の起動 | — | ◎ | — | — |
| 論理抽出 ステージ | 目的意識 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 解析力 | ◎ | ○ | ○ | ○ |

◎：強い駆動作用

○：弱い駆動作用

資料：筆者作成

着眼駆動型、導電性ポリマーは、仮説構築ステージがなく、成就したセレンディピティとは全く別目的の実験ステージの結果として、極めて唐突に生じた偶然の実験代行、つまり極めて意外性の高い事象を鋭い着眼力で捉えて論理抽出する類型である。ひとえに論理抽出ステージでの目的意識と解析力を駆動要因とする「鋭い着眼力」の駆動作用によって成就している。

実験駆動型、アリセプトは、仮説構築ステージにおいて、不確かではありながらもなんらかの仮説を採用し、実験・評価を開始したことが実験・研究開始の端緒として意味を持った。つまり、仮説構築が実験を起動した。続いて、実験ステージでの執拗な実験により実験・評価範囲を変更したことが、その範囲で起こった偶然の実験代行の発見に決定的に貢献した。つまり、実験による論理抽出の起動が強い駆動作用となってセレンディピティが成就した。

仮説駆動型（サブセット¹⁰⁶）、ペニシリンでは、仮説構築ステージで、「なんらかの有効な抗生作用が存在する」という独創的な仮説を構築した。そして、別目的での実験ステージ中に「ブドウ球菌変異株の培養器への青黴の混入によるブドウ球菌の溶

¹⁰⁶ 仮説駆動型において、トランジスタの類型では、考えられる駆動作用がほぼ全て働くのでフルセット、ペニシリンの類型では、一部の駆動作用が働くのでサブセットと呼ぶ。

菌」という意外性の高い偶然の実験代行が生起した。独創的な仮説構築を伏線として、半ばそれを予想していたが故に見逃さず、論理抽出に成功した事例と考えられる。仮説構築による論理抽出の促進が強い駆動作用となってセレンディピティが成就した。

仮説駆動型（フルセット）、トランジスタでは、仮説構築ステージでの表面準位仮説という優れた仮説の本質・創造性に相関した偶然の実験代行結果を、鋭い着眼力で捉えた事例である。

加えて、仮説構築は、実験の起動と論理抽出の促進の駆動要因ともなっている。さらに、実験ステージでの実験の執拗さが、実験代行を誘引する駆動要因となっている。論理抽出における目的意識、解析力も自律的駆動要因となっている。人知の総和・結晶が偶然を誘い、それを発見したセレンディピティであると言えよう。フルセットと呼ぶゆえんである。

（6）類型化モデルの意義の吟味

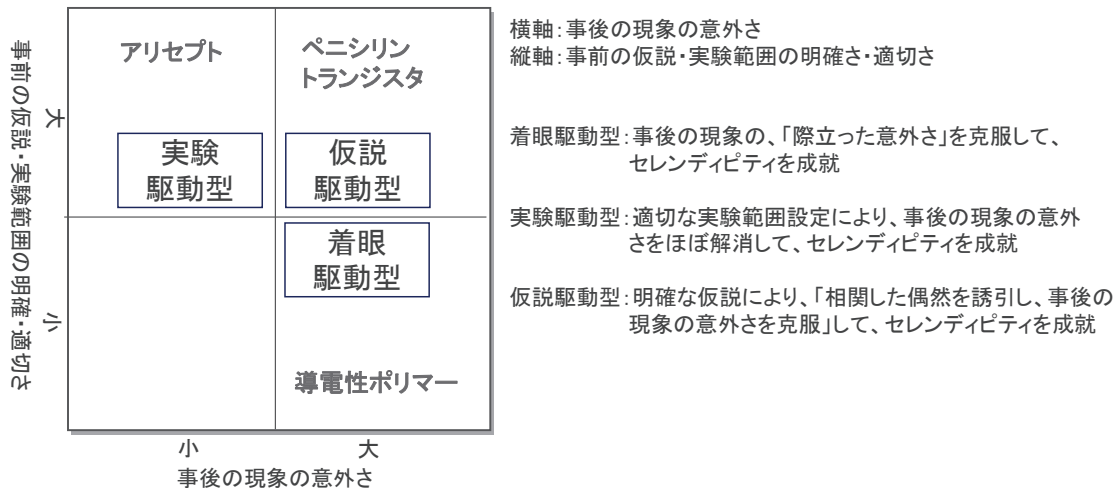
ここで、事前必然の特徴と事後の現象の性質により、セレンディピティの各類型を位置づけ、その意義を吟味しよう。横軸に事後の現象の意外さ、縦軸に事前の仮説・実験範囲の明確・適切さをとり、先に示した各類型を位置づけると図 6-5 のようになる。

着眼駆動型は、事後の現象は極めて意外であるが、事前にセレンディピティの結果を目指した明確な仮説はなく、当然意図的な実験範囲の設定もない。事後の現象の意外さにもかかわらず、それを無視せず着眼し、セレンディピティを成就することから着眼駆動型と呼ぶにふさわしい。

それに対して、実験駆動型は、事前、特に実験範囲の適切さが重要であり、その適切さ故に事後の現象の意外さは相対的に小さい。実験での執拗さ、試行錯誤による適切な実験・評価範囲の設定がセレンディピティ成就の要である。

仮説駆動型は、事前の仮説の適切さを前提に、その仮説の本質・創造性に相関して生じた実験代行の結果、すなわち事後の現象の意外さを、事前の仮説の明確・適切さを梃子にした着眼力で見逃さず把握し切り成就するセレンディピティである。

図 6-5 各類型の位置づけ



資料：筆者作成

先に示した、「偶然の実験代行の不合理な外形の生成、生起の類型¹⁰⁸」に関して述べれば、着眼駆動型でみられる事後の意外な現象は、「想像もしていなかったこと、その際に目的として考えていなかったことが起こる」に該当する。

実験駆動型での事後の意外な現象は、「明確な目的意識があったが不確実な仮説を持って求めていたことが、仮説の想定に照らせば意外な実験・評価範囲で生起する」に該当することが多いだろう。実験の途中で意図的に実験範囲を変更していなければ、極めて意外な場所で、狙ったことが起こっている¹⁰⁹のだ。

仮説駆動型での意外な現象は、典型的には、「相当明確な目的意識・仮説を持って求めていたことが、意外な方法によって実現すること」に該当する。加えて、「同様に求めていたことがそれを含みそれを超えた内容で実現すること」に該当する等、意外な現象の幅には広がりがある。

三つの類型の内、仮説駆動型が最も人為の占める割合の高い、ある意味で努力により意図的に近づきやすい、努力、知力が高い価値を発揮し得るセレンディピティと言えるであろう。

なお、前図における左下の領域は、「事後の現象の意外さ」と「事前の仮説・実験

¹⁰⁸ 第5章2節（3）1）。

¹⁰⁹ 「灯台下暗し」という場合が多いと思われる。何故ならば、一定の知見・関係を持ちつつ盲点だったところであるが故に、そこに実験範囲を変更できるからだ。

範囲の明確・適切さ」が両者ともに相対的に小さい領域であり、本研究でセレンディピティを考える際の対象と考えていない領域¹¹⁰である。ここに該当するイノベーションが存在しないことを主張するものではない。

¹¹⁰ この領域に該当するイノベーションに、偶然（非意図的事象）が全く関与しないことを意味するものでもない。

第7章 セレンディピティモデルの普遍性検討

本章では、前章までに提示したセレンディピティに関するモデルの普遍性についての検討を行う。

新たに、セレンディピティによるイノベーション 14 事例につき、次の点に留意して、本研究でのモデルの普遍性を確認する。

①それがセレンディピティによるイノベーションであること、②第5章で提示した「実験代行を核心とするプロセスモデル」が事例の説明・理解に妥当であること。つまりプロセスモデルが、セレンディピティの因果関係、偶然と必然の相互作用の理解に資すること、③第6章で提示した「駆動要因による類型化モデル」が事例の説明・理解に妥当であり、それにより各々のセレンディピティの駆動要因に焦点を当てることが可能であること。

以下に、着眼駆動型（4 事例）、実験駆動型（4 事例）、仮説駆動型（6 事例）の順に、セレンディピティ事例と考えられる事例を俎上にのせ、それらを本研究のモデルで解釈することが可能かを検討し、本研究の二つのモデルの適合性を確認する。

本来、各セレンディピティ事例のプロセスを分析することによって、はじめてそれを類型化できるが、以下では理解の便宜のために、仮説的に類型分類をした上で、各セレンディピティ事例の検討を進める。結果的に、仮説的な類型分類が妥当であったことが確認できた。

1. 着眼駆動型

（1）MK 磁石¹¹¹

MK磁石は、1931 年、三島徳七（当時東京帝国大学）によって発明された、ニッケル、アルミニウム、コバルト、銅、マンガンを含む磁石鋼である。この磁石鋼は永久磁石史上革命的なもので、現在広く用いられているアルニコ磁石の基本となったものである。それまでの磁石に比べてはるかに廉価であり、発電機、通信機、ラジオ等のスピーカーなど民生・産業機器に広く使われ、その後の技術進歩に大きく貢献した。

三島は、Fe (25~26%) -Ni 合金において、磁気変態点が過熱・冷却によって著しく異なる理由を検討するため、添加元素によって、その変異点を縮める実験に着手した。

¹¹¹小澤（2010）, p. 11. なお、本資料には、発明時期が 1932 年と記されているが、小岩（2004）等から 1931 年である。

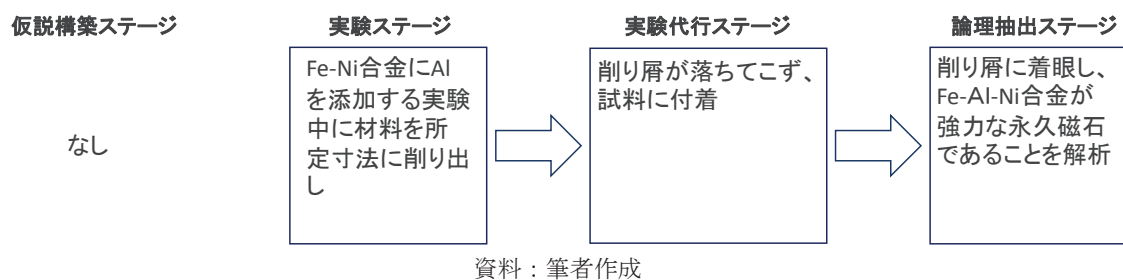
その添加元素としてアルミニウム（Al）を選択し、Al を添加した実験材料（Fe-Al-Ni）を所定寸法に削り出そうとした。その際、削り屑が落ちてこないで試料にくっついていることを「偶然に発見」し、MK磁石を発見した。三島は永久磁石の研究者ではなかったが、「幅広い知識と洞察力」により偶然の実験代行の結果を見過さなかったと言われている。また、三島（1964, p. 244）は、鉄・ニッケルの二元合金において画期的な特性を持つ二つの合金¹¹²が得られていることから、この系統を研究すればさらに変わったものが出てくるのではないかとの目的意識を有していた。

日本の永久磁石開発に弾みをつけたMK磁石は、1931年7月30日¹¹³に特許出願されている。

この事例では、三島は強力な永久磁石を開発するためにAl を添加していたのではない。強力な永久磁石開発のための「仮説構築」¹¹⁴を行ってはいない。

Al 添加した実験材料から削り屑が落ちてこない偶然が、実験中の彼の眼前で突然起こったのである。すなわち、「強力な永久磁石を開発するという目的設定と、そのためにAl を添加した実験を実施する」という偶然の実験代行が、突然起こったのだと理解し得る。

図 7-1MK磁石における偶然と必然の相互作用



しかし、三島は、その突然の実験代行結果に対して着眼し、因果解析をなし遂げた。

即ち、三島の解析能力の高さに支えられた、着眼駆動型のセレンディピティであるこ

¹¹² 温度による膨張係数が極めて小さくメートル原器になったニッケル 36%含有の合金、及び導磁率が高く海底電信の進歩等に大きく貢献したニッケル 78.5%含有のパーマロイ。

¹¹³ 小岩（2004），p. 49。

¹¹⁴ 本章では原則として、文章中では、仮説構築ステージ等の「ステージ」を省略する。図中では省略せずに記載する。

とが理解できる。

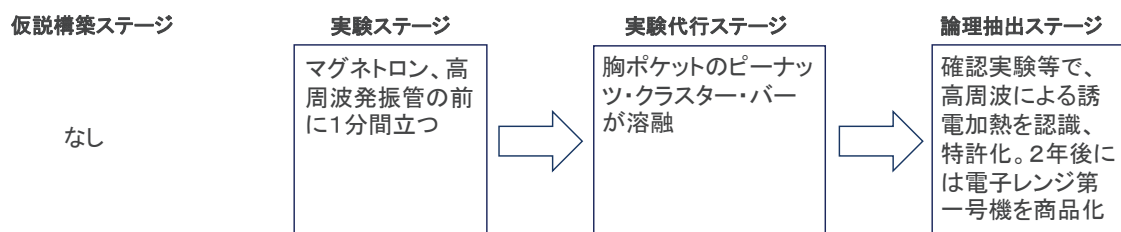
(2) 電子レンジ^{115,116}

米国レイセオン (Raytheon) 社は軍事防衛企業であり、1940 年代にマグネトロン (マイクロ波発振管) を用いたレーダー開発を行っていた。1945 年のある日、レーダー技術開発にあたっていたパーシー・スペンサーが、マイクロ波を発振しているマグネトロンの前に 1 分ほど立っていた。突然、奇妙な感覚に襲われた彼は、(胸) ポケットの中に入れていたピーナッツ・クラスター・バー¹¹⁷が溶けていることに気が付いた。

興味を惹かれた彼は、キャラメル付きのポップコーンをマグネトロンの脇においた。ほどなく、ポップコーンが破裂して床に飛び散った。続いて、彼は、卵をマグネトロンの前に置いた。すると、卵が爆発して飛び散ったという。ここに到って彼は、マイクロ波が従来にない方法で、素早く食品を温めることを見出したのである。

スペンサーと他のレイセオンの技術者は、「マイクロ波による誘電加熱—マイクロ波が分子の運動を誘発し、その結果として発熱する」ことに関する特許を 1946 年に取得、1947 年には、電子レンジの第一号機を開発して発売した。

図 7-2 電子レンジにおける偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

スペンサーは、1894 年 7 月 19 日生まれ、家庭環境に恵まれず、12 歳で見習い工として、工場で働きはじめたが、その後アメリカ海軍に入隊し、無線電信を学び、1920 年にレイセオンに入社していた。彼は大変有能であり、マグネトロン工場で、効率的

¹¹⁵ 堀越、阿部 (2009) , p. 19。

¹¹⁶ Lemelson Center for Study of Invention and Innovation.

¹¹⁷ チョコレート・バーという異説あり (上記 Lemelson Center 資料)。

な生産方法を考案し、日産 17 個を 2,600 個に激増させた。その後、スペンサーは同社の上席副社長にまで昇進し、レイセオンで約 300 の特許を取得し、彼の名前を冠したビルが建てられるに到った。鋭敏な観察眼と創意工夫の人であったことが想像できる。

以上の経過をみれば、スペンサーは、マイクロ波による誘電加熱に関する「仮説構築」を行わないまま、しかし、無意識の実験中に、旺盛な好奇心と鋭敏な感覚と観察力で偶然の実験代行の結果に着眼して意義を把握し、素朴な方法で因果解析をなし、論理抽出を完成したことが分かる。

この事例についても、偶然が「目的設定と仮説構築、実験実施」を代行し、それを見逃さないスペンサーの優れた着眼力によって成し遂げた、着眼駆動型のセレンディピティであることが理解できる。

(3) ピッチ系炭素繊維¹¹⁸

大谷杉郎（当時群馬大学）は、研究室でリグニン¹¹⁹から活性炭をつくる実験中に、リグニンの粉末を空気中で 500℃に昇温して作った炭に「毛が生じている」ことに気が付いた。昇温途中で溶けたリグニンが糸を引き、空気中で酸化されて融解しなくなり細い炭となったと推測し、再現実験でそれを確認した。

更に、リグニンでできるのなら、ピッチ¹²⁰でもできるはずと直感し、当時研究中であった、ポリ塩化ビニルを加熱して得られるピッチを用いて糸を引く実験を行い、1963 年にそれに成功し、特許を取得した。なお、一般的な市販のリグニンであれば溶解しないが、大谷が特別に試作したリグニンを用いたので、溶解して炭に毛が生えたという偶然も作用していた。大谷は、その後、クレハと共同開発を進め、1970 年に、ピッチ系等方性の炭素繊維の生産を本格開始した。当初 10 年ほどは、販路開拓に難渋したが、その後は、軌道にのり、この分野のパイオニアとなった。

この事例についても、大谷は、結果として得られたピッチ炭素繊維を目的とした

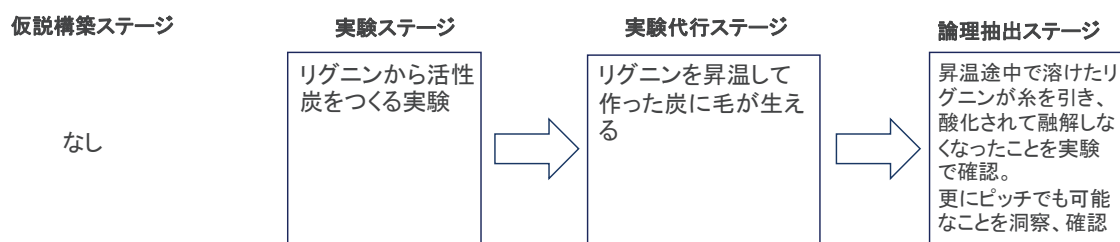
¹¹⁸ 平松（2012）, p. 98。

¹¹⁹ セルロースとともに木材の構成成分。木材に 20～30%含まれている。構造の詳細・全容は明らかではないが、プロピルベンゼン誘導体を構成単位とする高分子化合物（『ブリタニカ国際大百科事典 電子辞書対応版』）。

¹²⁰ コールタール、石油脂肪酸、石炭、木材などの蒸留、乾留、熱分解で生じる粘着性炭質残留物（『ブリタニカ国際大百科事典 電子辞書対応版』）。

「仮説構築」を行ってはいない。実験中、突然、偶然が生じ「目的設定と仮説構築、実験実施」を代行した。そして、大谷が、「リグニンの炭に毛が生えている」という意外な結果、不合理な外形にもかかわらずそれに着眼し、論理抽出に成功した。従って、このピッチ系炭素繊維の発明事例も、解析力に支えられた優れた着眼力による、着眼駆動型のセレンディピティであると考えることができる。

図 7-3 ピッチ系炭素繊維における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

(4) チョクラルスキー法¹²¹

現在半導体材料の精製に広範に用いられているのは、チョコラルスキー（結晶引上げ）法である。自然界に存在する SiO_2 から多く生成されるのは、多結晶（微小な結晶が多数集まっている）であり、半導体素子として利用可能な材料とするためには、これを単一できれいな結晶（単結晶）に精製する必要がある。シリコンの多結晶を再度ドロドロに溶かし、融点よりわずかに高い温度にしておく。これに図 7-4 のように小さなシリコンの種結晶を入れ、回転させながらゆっくりひき上げる。するとこの種結晶にくっついた液体のシリコンが固化しはじめる。引き上げる速度が十分にゆっくりだと、固化したシリコンはつなぎ目のないきれいな単結晶となる。できあがったシリコンの単結晶をインゴット (ingot) と呼ぶが、先端のとがった部分が種結晶で、引き上げるにつれて結晶が大きくなるので、最初の内は円錐形となる。

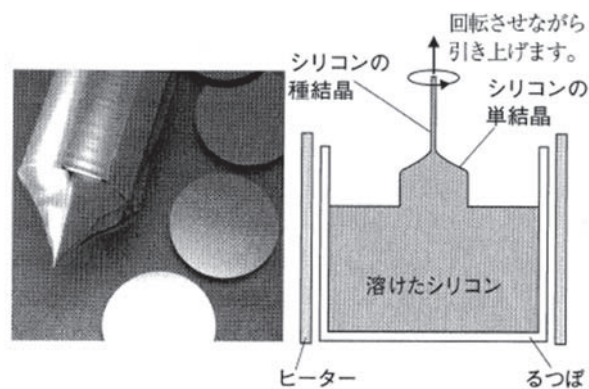
以上は、1947 年ベル研のティールらが半導体（シリコンではなくゲルマニウム）に対してはじめて用いた精製方法であるが、元々は、ポーランド生まれの技術者ヤ

¹²¹ 竹内淳（2007）, p. 25。

ン・チョクラスキー（1885-1953 年）¹²²が、偶然の誤りをきっかけに発明した方法である。

ポーランド生まれで、ベルリンの AEG 社に勤務していたチョクラスキーは、スズをるつぼの中に入れて溶かした後、それが固化する過程を調べていた。その際、チョクラスキーの頭に何かの考えが浮かびノートを取りはじめた。それに気を取らわれたまま、ペンをインク瓶に入れて引き上げたところ、彼は異様な光景を目撃した。なんと、金属製のペン先にスズが引き伸ばされて付いて来ていたのである。チョクラスキーは、インク瓶と見誤って、スズの入ったるつぼの中にペンを入れてしまっていたのである。

図 7-4 チョクラスキー法



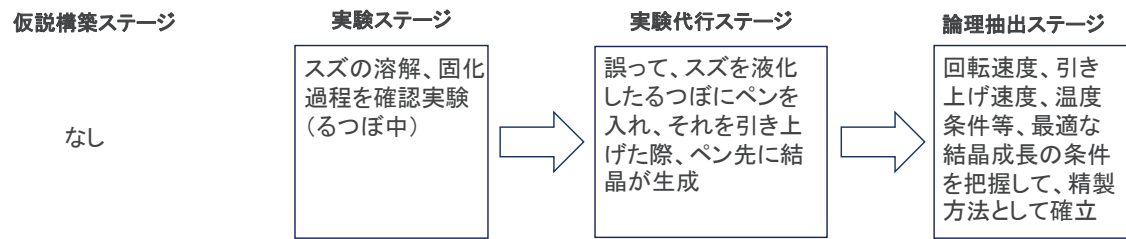
資料：竹内淳（2007）『半導体の原理』（写真提供 信越化学株）

当初予定していたスズの固体化を調べる実験は台無しになったが、彼は、新しい結晶成長の方法を見つけたのだ。彼は、この体験を基に、良好な結晶成長の条件を探り、1916 年にチョクラスキー法を発明した。

今日では、この方法のための引上げ装置は生産効率向上のためにどんどん大型化し、引き上げるシリコンの直径は 30cm(12 インチ)を超えるまでに到っている。そして半導体製造においてなくてはならない方法となっている。

¹²² Helmut Föll, Jan Czochralski の項。

図 7-5 チョクラスキー法における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

この事例でも、チョコラスキーは、得られたイノベーションを目的とした「仮説構築」を行っていない。スズの溶解、固化の実験中、彼の“うっかり”によって、今日でいう結晶引上げ法に相当する偶然の実験代行が生起した。彼は、全く想定していなかったその不合理な外形にもかかわらず、それに着眼して意義を把握し、論理抽出に成功したのである。彼が、この異変に価値を見出した詳細な状況、背景となる知識・認識等についての詳細な情報はないが、彼の目的と偶然の結果の距離、乖離を考えれば、彼の着眼力は特段に優れていたと考えられる。つまり、この事例も着眼駆動型のセレンディピティの事例と考えることが適切である。

2. 実験駆動型

(1) リュープロレリン¹²³

生体は、ホルモンを介した「脳視床下部－下垂体－内分泌器官」回路からなる恒常性維持機能を複数有している。このひとつ、内分泌器官としての性腺（女性：卵巣、男性：精巣）に関する回路は次の通りである。

脳視床下部から LH-RH¹²⁴が放出され、すぐ下にある下垂体に到達すると下垂体からは、LH¹²⁵が放出され血流によって内分泌器官・性腺に到達し、それぞれの器官の機能を維持させる。すると内分泌器官・性腺は、各々特有のホルモンを分泌する。

性腺の場合は、性ステロイドホルモン（女性：エストラジオール、男性：テストステロン）である。この内分泌器官・性腺発のホルモンは血液を介して視床下部に到達し、視床下部特有の物質（この場合 LH-RH）の生産を抑える役割、すなわち負のフィードバック作用を持つ。この閉じた系「脳視床下部－下垂体－内分泌器官」により恒常性が維持される。

これらは、1940 年代末ケンブリッジ大学ハリス博士により仮説として提案され、それぞれの物質の存在を明確にすることを中核的内容として、1970 年代までに、検証と解明が進んだ。

その結果、LH-RH が 10 か所のアミノ酸からなるペプチド¹²⁶であることが明らかになると、世界中で、類似の化学構造を持つ、より強力な活性を持つ物質の誘導体の合成研究競争が始まった。この競争に、武田製薬の藤野雅彦（後に副社長）のチームも参戦した。

そもそも LH-RH は、生体の基本バランスに関わるから、様々な創薬に繋がる可能性があるが、できるだけ強力な活性を持つ誘導体を得られれば、コスト、剤形等の面でメリットが期待されるからである。このことを藤野（2003, p. 152）は、「最初は LH-RH そのものを合成して薬にしようとしたのですか。」という質問に答えて、「そうだ

¹²³ 本項は、特記のない限り、藤野雅彦他（1994）, p. 173 による。

¹²⁴ luteinizing hormone releasing hormone; 黄体形成ホルモン[を]放出[させる]ホルモン（『ランダムハウス英和大辞典（第2版）』小学館を基に[]内筆者補足）。

¹²⁵ luteinizing hormone; 黄体形成ホルモン（同上）。

¹²⁶ 複数のアミノ酸（分子内に-NH₂と-COOHを含む有機化合物）が、ペプチド（-NH₂と-COOHからH₂Oが取れてできる-CONH-）結合によってできた化合物（『大辞泉 第二版』小学館から筆者要約）。

けどそれでは高くつくから活性を強くしたいと思った。それでアミノ酸を1つずつ置き替えるような研究をしていたんだけど…」と語っている。藤野自身が、米国アポット社の研究者数人を含む研究グループを組織し、この研究に参画していた。

藤野らは、LH-RH の 10 か所のアミノ酸の一部を他のアミノ酸に替えた物質を多数合成したが、いずれも活性は全く上がらず無残な結果であった。

しかし、ある偶然を契機に、画期的に活性の高い物質（一般名リュープロレリン）が合成された。

それは、藤野が、若手研究者に、10 番目のアミノ酸に CH_2CH_3 を付加するように指示したときのことである。この若手研究者は入社したてのためか、勘違いして、隣の 9 番目のアミノ酸の CONH に直接 CH_2CH_3 を付加してしまった。この物質の活性を測定したところ（傍点筆者）、LH-RH の 10 倍とそれまでにない高い活性が得られた。しかも、この結果を基にこの部分のアミノ酸の置換を種々行ったが、これより活性が高いものは得られなかった。偶然が、最善の結果を与える「実験代行」を行ったのである。

ここで、注目に値するのは、藤野の記述やその他の情報に、若手研究者の誤りによる明らかに意図外の合成物について、「誤りなので活性の測定を躊躇した」という内容がないことである¹²⁷。第4章のアリセプトの事例でも示したように、医薬品の分野のように構造と活性の間の知識の不確実性が高い場合には、少なくとも潜在的に実験・評価範囲を拡大するのは、ほぼ一般的な判断なのだろう。

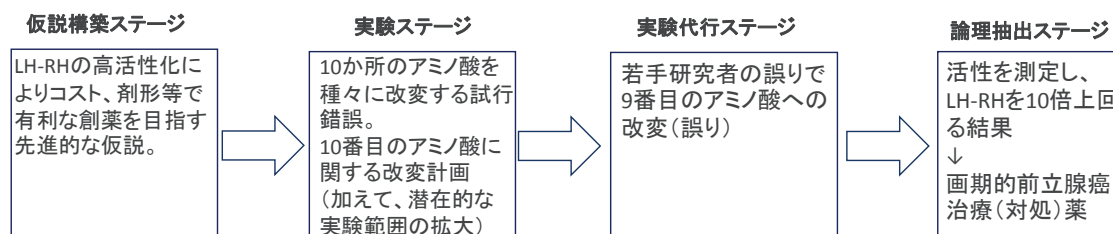
特に、当初の仮説に基づいて様々な合成を繰り返しても目的の活性が得られない場合には、実験・評価範囲が拡大される可能性が高く、合理的でもあり得る。第一に、失敗を繰り返す内に活性の評価技術に関するスピード、コストパフォーマンスが高まるからである。第二に、失敗を通じて、概ねどんな化合物に可能性があるのか、先鋭・合理的な限定は困難でも、一定の範囲に感覚的な絞り込みができる場合があるからである。第三に、他に方法がなくなってくるので低い可能性にも期待する、という状況になるからだろう。

¹²⁷ 他の医薬品開発の状況においても、同様に読み取れる資料が多い。失敗構造はすぐ廃棄するのがほぼ当然といった、不確実性の低い分野、例えば、古典的な機械工学の分野等とは、大きく感覚、判断が異なる。

いずれにしても、この拡大した実験・評価範囲での評価によって、目的の活性が大きく高まった物質が得られた。その後、6 番目のアミノ酸についても一部置換により活性が大幅に上がり、1973 年に合成された化合物がリュープロレリンである。

リュープロレリンの医薬品への応用の具体的研究が開始されると、短期の使用は性腺の機能を高めるが、意外にも長期の使用では逆作用をもつことが分かった。その後この逆作用の機構も明らかになった。結局、リュープロレリンは性腺の機能を弱める治療に有効であることが判明した。その結果、前立腺癌の進行抑制薬として有望であり、それを目指した製薬開発がターゲットとなった。

図 7-6 リュープロレリンにおける偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

そして、リュープロレリンは、医薬品開発のステップを踏み、1985 年に市販¹²⁸されるに到った。1989 年には、患者の QOL の向上に特段に有効な徐放型製剤¹²⁹に改良して発売された（商品名リュープリン）。その後も含め、長く年間 1,000 億円以上の売上を生み続ける前立腺癌の決定的治療薬である。武田製薬の主力商品のひとつとなっている。

この事例では、LH-RH の高活性化という「仮説構築」があり、その実現のための「実験」がなされた。その結果、若手研究者の誤った合成による偶然の実験代行が生じた。しかし、彼らは、半ば当然のように潜在的に実験・評価範囲を拡大したので、その誤った合成物の活性を測定し、価値のある化合物リュープロレリンを得た。

以上から、本事例は実験・評価範囲の適切さが特段の駆動力となった実験駆動型の

¹²⁸ 1 か月徐放型（この期間全般に平均して効く）製剤でない、高頻度の用法を必要とする剤形（商品名「ルブロン」）。

¹²⁹ 経口投与はできないが、月に一度の注射で済むようになった。

セレンディピティであると理解した。

(2) リブリウム¹³⁰

1953 年、ホフマン・ラ・ロシュ社のレオ・スターンバックは、新しい抗不安剤（トランキライザー）の開発を命ぜられた。彼はクラクフ大学にいたころ研究していた化合物（R0 6-690）を基に、4 年間、種々の誘導体を合成し研究を行った。しかし、1957 年 4 月に到った結論は、この化合物群は、求められた鎮静作用を示さないで研究を終え、別のタイプの研究に移ることであった。

そして、研究を終えるための大掃除の最中に、研究員の一人が、2 年前に合成したまま、薬理試験が済んでいない化合物を見つけた。スターンバックは、それを薬理試験して効果がないことが分かれば、皆の関心を他の型の化合物に振り向けられるだろうと、その化合物の薬理試験を行った。

しかし、スターンバックが大変驚いたことに、この見落としていた化合物は強力な鎮静効果を示した。そこで、この化合物を解析したところ、合成の間に思わぬ分子内転移反応が起こり、全く異なった構造になっていたのである。彼らは、これを改良しようとしたが、それはすべて失敗に終わった。ここでも偶然が最善の「実験代行」を行ったのだ。

その後慎重な臨床検査を経て、この「置き忘れの化合物」は 1960 年にリブリウムという商品名で発売され、すぐに成功をおさめた。その後、リブリウムを基に開発された多数の鎮静薬が発売され続けている。しかも、それ以降に鎮静薬の分野で基本的な薬理的進歩はない¹³¹。

この事例は、化合物（R0 6-690）が鎮静効果を有するという仮説を基礎に合成実験を繰り返すという「仮説構築」と「実験」が存在し、それを踏まえて、偶然の実行代行の結果である化合物が、引っ越し片付け時に、廃棄されるべき存在として出現した。スターンバックは、これを廃棄せず、敢えてあきらめをつけるためにそれに着眼し、活性を測定したところ、強力な鎮静効果を見出し創薬に成功した。

実験・評価範囲の拡大¹³²の目的は、あきらめの決着をつけるためであり、それは、

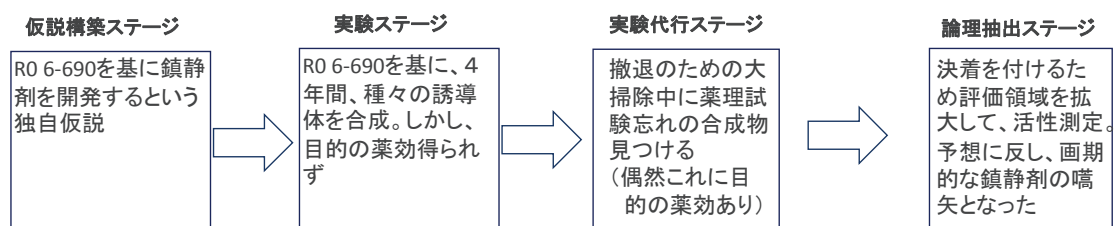
¹³⁰ 本項は、特記のない限り、ロバーツ（1993）, p. 281 による。

¹³¹ ロバーツ（1993）による、1989 年までの評価。

¹³² 元々の実験・評価範囲内ではあるが、一旦撤退（探索中止）を決めたにもかかわらず、薬理

偶然の実験代行による結果に出会った後になされている点から、典型事例と比較して特殊ではあるが、この事例も、実験・評価範囲の意図的拡大による、実験駆動型のセレンディピティであると考えることができる。

図 7-7 リブリウムにおける偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

(3) イミプラミン¹³³

イミプラミンは、スイスの製薬会社ガイギーによって合成された、統合失調症の治療を目指した開発の結果得られた医薬品である。それは、当初の目的である統合失調症には全く効果がなかった。ガイギーでこの開発を担当したローランド・クーン博士は、イミプラミンが統合失調症には全く効果がないことが分かったあと、他の精神疾患に対して薬効のテストを行ってみた。その結果、1957年に、イミプラミンが、もともとの狙いとはほぼ正反対方向の「抗鬱剤」として、素晴らしい成果を出すことを見出した。

これは、構造と活性の相関に関し、構造（化合物）を固定し、当初求めた活性（薬効）以外の活性を求めて実験・評価範囲を拡大（変更）した結果である。先に示した、リユープロレリン、リブリウムの場合とは逆である。それらの場合は、当初求めた活性（薬効）を固定し、当初想定した以外の構造（化合物）に実験・評価範囲を広げている。これらは、いずれも、構造と活性の相関に関する知識が不確実な分野においては、こうした実験・評価範囲の拡大が有効に機能し得ることを示す事例である。

また、結果として得られた目的とは異なるものの、統合失調症の治療薬の探索を意図して、「仮説構築」と「実験」を行ったことがこのセレンディピティの成立要因に

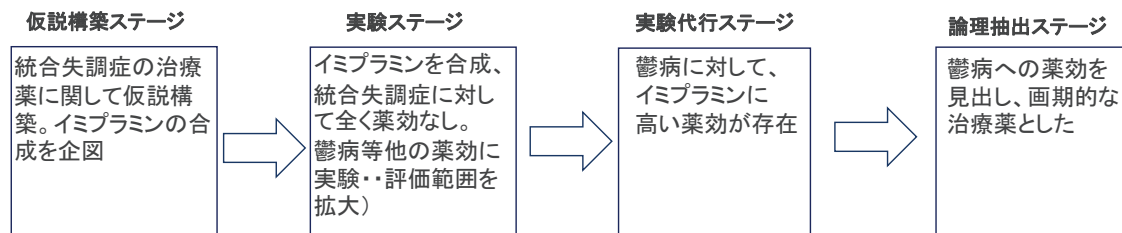
試験を行ったことから、実験・評価範囲の拡大の特殊事例と解釈した。

¹³³ 本項は、特記のない限り、ロバーツ（1993）, p. 280 による。

なっている。

以上から、イミプラミンの事例も実験駆動型のセレンディピティであると考えられる。

図 7-8 イミプラミンにおける偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

なお、この場合、当初の狙いと「正反対」の活性であったため、かえって、結果的に得られた活性を発見しやすかった可能性が推定できる。つまり明らかな逆効果が、それを意味のある効果と認識させる結果を生んだと考えられる。

(4) 垂直磁気記録媒体¹³⁴

岩崎俊一（当時東北大学）は、ハードディスクの研究を進める内、水平磁気記録方式の高密度化には限界があると認識し、1970年代半ばに、垂直磁気記録方式の研究を開始した。高密度化すると、水平磁気記録では媒体（テープ、ディスク等）に記録される同極の磁化同士が隣接して不安定になるため、高密度化に限界がある。それに対し、垂直磁気記録の場合には、隣接した磁化同士が逆極となるため、高密度になるほど安定になると考えられるからである。

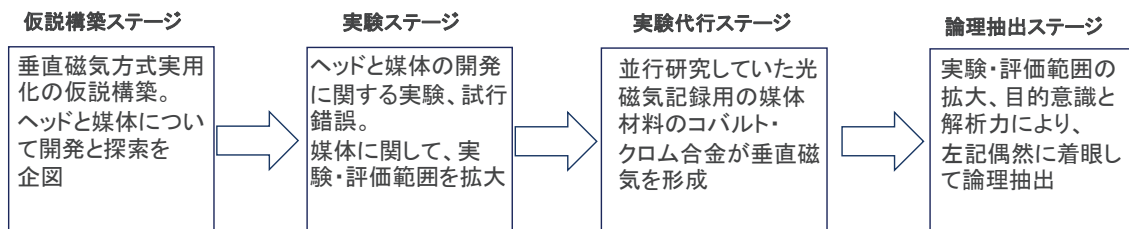
磁気記録には、大きく分けて、ヘッド（書き込み側）と媒体（書き込まれる側）の研究・開発が必要である。岩崎らは、ヘッドに関する研究を進めたが、合わせて媒体に関しても良い方式を探索していた。結局、これにはコバルトにクロムを微量混ぜた薄膜を使うことになった。この発見に、偶然が関与している。

岩崎によれば、コバルトにクロムを混ぜた媒体が「光磁気記録」に適切なのではないかと研究を進めていたところ、それが垂直磁気膜であることがわかってきたのだという。岩崎は、次のように語る。「よく『なんで発見したんだ』といいますが、こ

¹³⁴ 本項は、特記のない限り、岩崎（1994）, p.2 による。

れは偶然でございました。この膜が役に立つ、ということに気が付いたのは、隣で垂直磁気ヘッドの研究をしていたから、水平磁気だけでなく、垂直もあるぞと考えていたからであります。」すなわち、垂直磁気に適した媒体向けの材料を探していた岩崎らは、直接それに向けた研究開発を行おうとしていただけではなく、それを求めて実験・評価範囲を拡大していたのだ。従って、これも実験駆動型セレンディピティであると考えることができよう¹³⁵。コバルトにクロムを混ぜると垂直磁気膜ができたのは、偶然による「実験代行」であるが、予め、それを捕捉すべく実験・評価範囲を拡大していたからである。

図 7-9 垂直磁気記録媒体における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

なお、垂直磁気記録は、1990 年代、水平磁気記録方式の様々な革新、改良による記録密度の向上で、なかなか出番がなかった。しかし、2000 年を過ぎて、水平磁気記録密度の向上が頭打ちになり、2005 年に東芝が垂直磁気ハードディスクを本格採用すると、急速にそのシェアを伸ばし、2010 年に出荷されるほとんどのハードディスクは垂直磁気記録となった¹³⁶。極めて急速な代替が起こり、我々の社会生活の舞台裏を大きく変革している。

¹³⁵ ただしこの事例は、偶然の作用の大きさから考えて、敢えてセレンディピティと呼ぶべきか否かの限界事例であると考ええる。本文にあるように岩崎自身が「偶然」を度々語っていることからセレンディピティについて検討する対象としたが、イノベーション全体での人為、意図的営為と偶然の意義を考えれば、この事例をセレンディピティとしない考え方もあり得よう。

¹³⁶ 七十七銀行 (2010) , p. 12。

3. 仮説駆動型

(1) 高分子質量測定法^{137,138}

島津製作所では、1980 年代初頭、レーザーを用いた質量分析器の開発を企図した。レーザーが広範に実用化されはじめたこと、高分子、特に生体巨大分子の質量を測るニーズが潜在していることを把握したこと等がその動機である。質量分析の方法は種々あるが、レーザーを照射し、測定対象をイオン化・気化し、イオン化された分子の電気量と質量の関係を利用して、飛行距離の差等から分子の質量を測ることができる。この方式を実現するための大きなポイントは、試料（測定対象）の分子を破壊することなく、レーザー照射によってイオン化・気化させることであり、試料に必要以上のエネルギーを与えてしまうと、イオン化・気化する前に、その分子が破壊（フラグメンテーション）してしまう。それを防止するために、試料に何か別のエネルギー吸収体（マトリクス、補助体）を混ぜて、一部のエネルギーをマトリクスに吸収させる。このように、測定対象を破壊することなくイオン化・気化することに、困難とノウハウが存在する。

一般に分子量が大きいほど、イオン化・気化のために強いエネルギーを与える必要があるので、それを破壊せずにイオン化・気化することが困難になる。

1983 年の新入社員 t 耕一を含む 5 人の開発チーム¹³⁹は、1984 年にここまでの研究成果で商品化するべきかどうかを検討した。測定できる最大分子量、感度等の点から、既にドイツで先行発売されている装置の性能を大幅に超えるものではない、という理由により、この段階では商品化せず、更に研究開発を続けることにした。分子量 1 万、そして更なる高感度が商品化の目標であった。特に、分子量 1 万、つまり製薬会社等が開発した薬品の測定のために求めている「生体巨大分子質量の測定」にターゲットを再設定した。

田中は、対象物質のイオン化法を色々と探る担当であった。この頃、マトリクスとしてコバルト超微粒子粉末を使う方法がメンバーの吉田佳一から提案され、それに

¹³⁷ 田中（2003）。

¹³⁸ 筆者による島津製作所 基盤技術研究所 吉田佳一所長へのインタビュー（2014 年 8 月 19 日実施）。

¹³⁹ 全員が、物理、電気の専門家であった。だからこそ化学の専門家からみれば「無謀」な挑戦を行えたのだらうという。

より分子量 3,000 くらいの高分子をイオン化できるかも知れないという感触が得られた。

コバルト超微粒子粉末は、レーザー光をあまり反射せず熱を吸収する。また、粒子と粒子の間に隙間があるため、熱が逃げずにその場が急に高温になるというメリットがある。しかし、実際の実験ではコバルト超微粒子粉末のみでは試料（測定対象分子）とうまく混ざらないので、液体（溶媒）を用いて試料とマトリクスを混ぜ合わせる必要があった。これを保持剤と言う。

田中は、マトリクスと保持剤の様々な組み合わせ、各種濃度、レーザー光の照射時間等、種々の条件を変えながらイオン化の実験を続けた。他のイオン化法でマトリクスとして使われる、グリセリンをマトリクスとすることも試みた。しかし、1985 年初頭、田中の実験は完全に暗礁に乗り上げた。田中は常識ではできないことに取り組んでいる、ということを強く思い知らされて、化学の専門家の言う事を聞いていれば、無駄な時間とお金をかけることはなかった、と痛感したという。しかし、「まだ、研究期間は残されている。何もしなければ前進しない。好きな実験をできる限りやろう」と、のべつ幕なしにいろいろなことを行って試行錯誤を繰り返した。そんな折、1985 年 2 月、田中は決定的なミスを犯した。

田中は、たぶん、ビタミン B₁₂（分子量 1,350）を測定しようとしていた際だと振り返る。溶媒として、アセトンの代わりにマトリクスの候補であるグリセリンをコバルト超微粒子粉末と混ぜてしまった。グリセリンはアセトンと違ってねばねばしているから、すぐに間違えたと分かった。しかし、田中は、コバルト超微粒子粉末を廃棄するのはもったいないので、これも試しに質量を測ってみようと、その失敗作の測定を続けた。と言っても、田中は、全く見通しなく、ただもったいなからこの実験を進めたのではなく、この実験は真空中で行うので、徐々にグリセリンは気化して、なくなってしまうので、いずれデータがとれるだろうと思った¹⁴⁰という。しかも、ただ待っているより早くグリセリンを気化させた方が良くだろうと、レーザーを照射し

¹⁴⁰ 開発チームの一員であった吉田佳一は、筆者のインタビュー時に、この失敗がなくても、いずれグリセリンを保持剤とする実験を意図的に行った可能性もあるとの意見を開示された。まさにしらみつぶしの試行錯誤を田中は行っていたということのようである。

続けたという。しかも「私は関西で言う『いらち』、せっかちなので、一分でも早く結果を見たかったため、グリセリンがかわききらない内から質量スペクトラムを見ていた」という。この4条件、「溶媒を間違える」、「捨てないで使う」、「レーザーを照射し続ける」、「ずっと観察」がそろって何が起こったか。グリセリンが徐々に乾いて、乾ききる前のわずかな時間¹⁴¹（乾ききるまでの1分間程度の内の最後の10分の一くらいの時間）に、ビタミンB₁₂のスペクトラムが極わずかに観察できたのだ。

図 7-6 の上図が、グリセリンが乾ききる少し前までのスペクトラムを表している。右側ほど分子量の大きな分子の存在（飛来）を示している。ほぼ右端の破線スポット中にビタミンB₁₂に直接由来するスペクトラムが観察されている。下図は、グリセリンが乾燥しきった状態でのスペクトラムを示している。もはや、試料ビタミンB₁₂に直接由来するスペクトラムは測定できていない。その代わり、フラグメントイオンのスペクトラム、つまり試料がレーザーによって分解されてしまったことを示すスペクトラムが多数観察される。グリセリンが乾燥しきった状態では、試料の保護が不十分で、試料がイオン化・気化する前に試料がレーザーのエネルギーで分解されるのである。

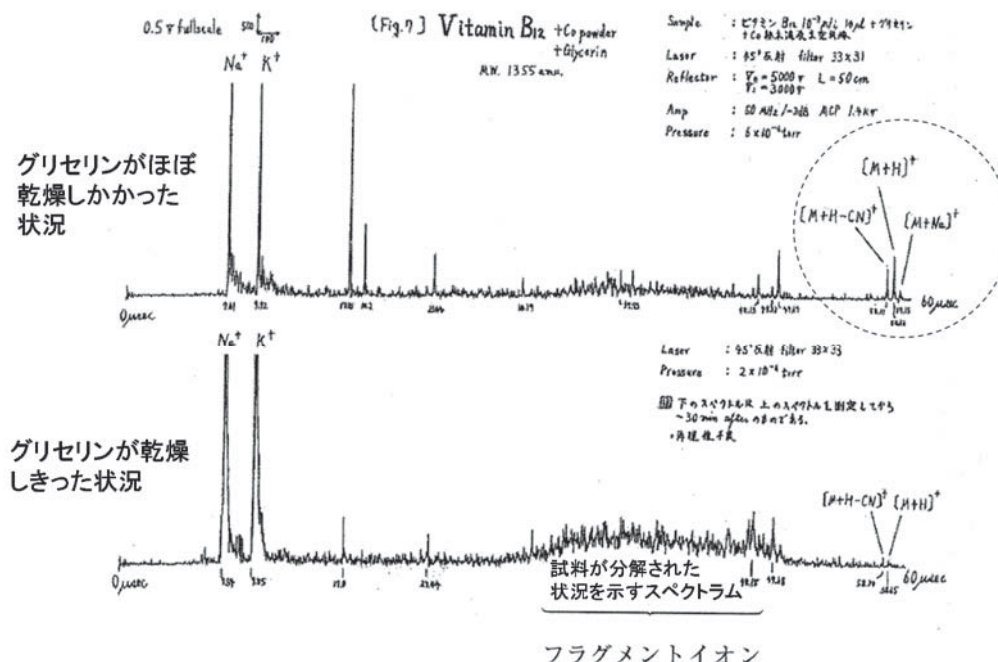
すなわち、田中が、試料が乾ききるまで継続してこの試料を観察し、その間手で、レーザーを（たぶん1秒おき程度に）照射し続けていたからこのスペクトラムを見逃さず、観察できたのだと考えられる。実際には、測定系のノイズ等が混入するため、図 7-6 に示された結果は、時間軸上で積分しノイズが打ち消し合うようにした結果である。おそらく、積分した場合としない場合について、執拗に実験（レーザー照射の繰り返し）と観察を続け、乾ききる寸前の試料において、スペクトラムの存在を察知したのだろう。その田中の観察力は極めて執拗で鋭敏である。愚直なまでの執念と淡々と継続する姿勢に支えられたものだったとも言えよう。

また、そもそもこの実験はレーザーを照射する電子回路、その他測定系の電子回路から混入する多様なノイズが存在するため、事前に田中がそのノイズを極力抑制するために、ほぼ1か月を費やして、実験装置のシールドやアースを取り直した記録が

¹⁴¹ 今日に到るも完全な解明はなされていないが、グリセリンが極僅かに残っている状態が、試料がイオン化・気化するのに最適な条件なのだろうと考えられている。

あるという。大変な根気と探求心である。

図 7-10 田中が観測したスペクトラム



この根気と探求心が、対象スペクトラムの観察結果に到る重要な要因と言って良いと考える。このことを元島津製作所の取締役喜利元貞（2014）は、次のように記している。「（ノイズを低減するためには）理論には乗りにくい改善工事を施さなければならない。それは、信号をオシログラフで眺めながら現物を少しずつ修正する作業なので、経験と推理と苦労を重ねるみじめな仕事なのだ。だが、その結果、装置のノイズが下がるとともに、信号の波形を眺めて、これはノイズだ、これはイオン信号だ、とみただけで区別できる“眼力”が身に付くことになる。この経験がグリセリン添加効果の認識に大きく貢献したのだと私は推察している。」

以上にみたように、この事例では、高分子質量分析を目指して、理論的にしっかりとした「仮説構築」がなされていた。アレニウスの式に基づき、原理的な可能性を仮説化していた。また、「実験」においても、当時貴重な材料であったコバルト超微粒子粉末をマトリクスとして用いる等の優れた工夫がなされていた。加えて、チームメンバーによる執拗な実験が繰り返されていた。事前必然の質・量が高められていたの

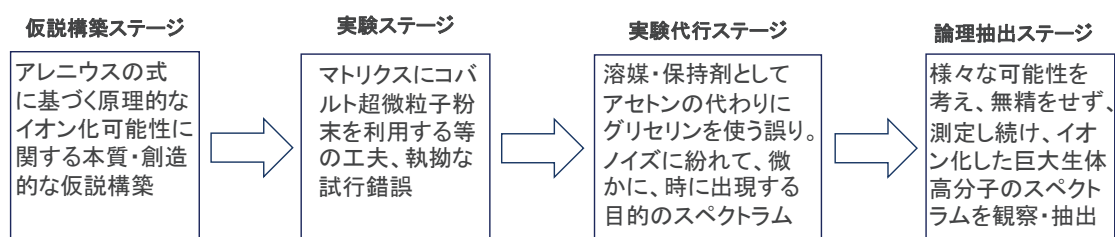
である。

そこに田中の誤りが偶然の実験代行を生んだ。本来マトリクスとして用いる予定であったグリセリンを保持剤として利用した。それは、実験計画に照らして誤りであるが、田中は、グリセリンが蒸発すれば意味のある観察が可能かもしれないという可能性と、コバルト超微粒子粉末を無駄にしたくないという動機等からそれを廃棄しなかった。偶然の結果を、失敗として、すぐに廃棄しなかったのは慧眼である。

その試料の観察を続け、微弱で短時間に消滅する高分子スペクトラムの出現を発見して意義把握をなし、因果を解析¹⁴²した。

今日、コバルト超微粒子粉末とグリセリンをマトリクスとするレーザー照射によるイオン化法は実用に供されていないが、田中らが分子量1万のたんぱく質をイオン化可能としたことがその後の紫外線吸収剤をマトリクスとするレーザーイオン化による質量分析の発展の礎となった。その橋頭堡としての創造的意義に対して、2002年ノーベル化学賞が授与された。

図 7-11 高分子質量測定法における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

以上みたように、この事例では、解析力に支えられた着眼力による論理抽出の駆動作用も見落としてはならないが、何よりも本質・創造的な仮説構築があり、それに基づいて多大な実験がなされたこと、つまり「仮説構築」が決定的、本源的な駆動要因であり、「実験」がそれを支えたと考えられる。従って、これを仮説駆動型の代表的事例ということができると思う。

¹⁴² 島津製作所の開発チームは、安定的に再現可能化して、市販の装置とした。

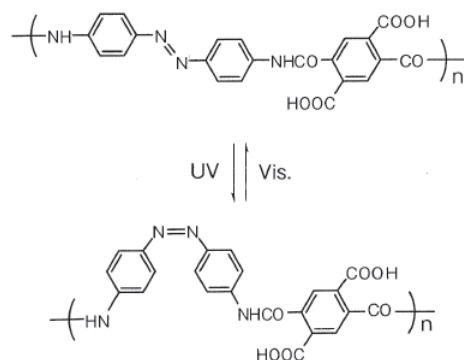
(2) フォトクロミズム¹⁴³

フォトクロミズムとは、一つの分子が光を受けると化学結合を組み換え、電子状態の異なる異性体へ可逆的に変化する現象を言う。多くの場合、光により生成した異性体は不安定で、熱反応により元の異性体に戻る。

両異性体が、ともに安定なフォトクロミック分子を創ることができれば、光情報を二つの異性体という化学情報に変換して蓄える光メモリへの応用が可能になる。また、安定な二つの異性体の物性を光変換することにより、多くの応用分野が拓けると期待されていた。

しかし、この光生成した異性体が熱戻り反応をしないという熱不可逆（安定）性を付与することは容易ではなかった。二つの異性体間の基底状態におけるエネルギー障壁を十分に高くするための理論も実験例もなく、両異性体が十分に安定であり、なおかつ効率よくフォトクロミック反応をする分子を得ることは、1970年代にはほぼ不可能とされていた。

図 7-12 アゾベンゼンを主鎖に含む高分子



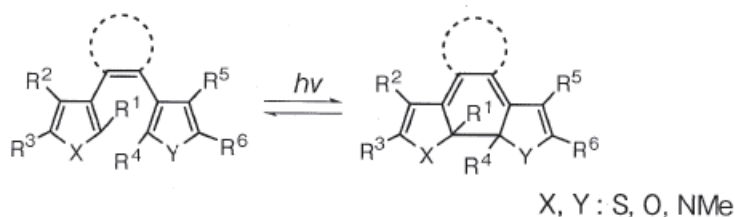
資料：入江正浩（2012, p. 15）

1970年代、入江正浩（当時大阪大学）らは、「光応答性高分子」と称して、光を受けるとその物性を可逆に変える高分子の合成に関する研究を進めていた。アゾベンゼンを主鎖に含む図 7-8 の高分子は、図に示すように紫外線（UV）を照射するとその高分子を収縮させ、可視光線（Vis.）をあてると元の構造に戻る。入江は、この光

¹⁴³ 入江正浩（2012）, p. 13、および筆者による入江正浩教授（立教大学）へのインタビュー（2014年5月26日実施）による。

学異性体の物性の違いをより明確に区別するため、この分子中にある-N=N-結合を-CH=HC-結合に変えることを試みた。そのためのいくつかの合成の障害を乗り越えて、1985年にジアリールエテンの合成に到った¹⁴⁴ (図 7-13 左)。

図 7-13 ジアリールエテンのフォトクロミック反応



資料：同前 (p. 14)

この化合物に紫外線を照射したところ、黄色に着色することが認められた (図 7-13 右)。ここまでは、想定 (仮説) 通りである。そして入江は、この物質は、「可逆で不安定」であるから、室温で数分から長くとも 10 分以内に発色した色は消えると考えていた。類似の化合物の事前の実測結果から 紫外線の照射による発色は数分、長くとも 10 分以内で消えると予想していたのだ。

しかし、これを暗いところにおいておくと、室温状態で 1 日後までも黄色が消えていなかった。入江はこれに驚いた。入江は、この実験の生成物は、これまでと同じように「可逆だが不安定な」物質であろうと想定していたからだ。

実際に合成できた物質は、室温下においても、暗所であれば、退色して紫外線を当てる前の状態に戻らず、黄色のままの「安定」な物質であった。しかも、紫外線ではなく、可視光線をあてると紫外線をあてる前の状態 (無色) に戻る「可逆性」を示した。

この「可逆で安定な」性質は、光メモリ等に用いることのできる「特別な意義」を有しているが、入江はその意義よりも、「何故、自分の予想通りに『可逆だが不安定』でないのか」に強いに関心を持ち、その解析に注力したという。

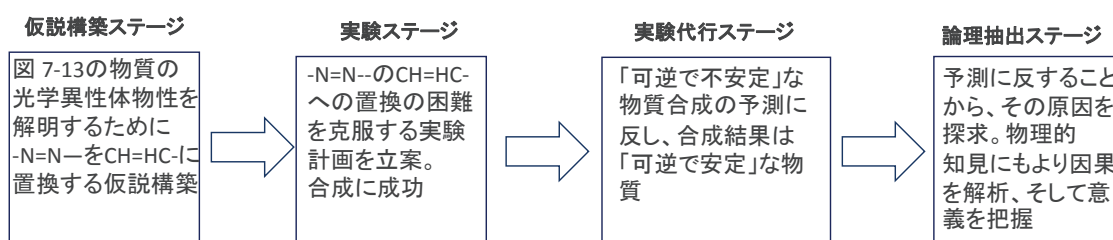
入江は、約 1 年半の時間をかけて、「可逆で安定」である理由が、「両異性体間のエ

¹⁴⁴ この間に、入江の極めて高度な有機化学合成者ならではの直截でユニークな仮説定立及び実験・解析を繰り返すスパイラルな創造性が存在する。合成に関する特段に専門的な内容なので、ここでは省略する。

エネルギー差が小さいから」であることを量子化学計算と数多くの誘導体の合成により明らかにした。この理論化学解析には、入江の研究者としてのキャリアの開始が放射線化学（物理と化学の境界領域）であったこと、共同研究にあたっていた企業に物理系の研究者もいたこと等が幸いしたという。入江と周辺に物理的な素養があったことが、このセレンディピティの成功に大きな意味を持ったのだ。

入江は、こうした経緯を振り返って、「研究者はいくつかの引き出しを持つことが重要」だと考え、それを若手の研究者にも伝えているという。

図 7-14 フォトクロミズムにおける偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

この事例においては、フォトクロミズムに関わる光学異性体の物性を明確にするための置換という本質的な「仮説構築」がなされていた。そして、その置換の困難を克服する「実験」が行われた。そこに、可逆だが不安定であるという仮説の想定を超えた、可逆で安定な物資の合成という偶然の実験代行が生起した。その結果の意外さに、入江はそれを見逃さず、分野横断的な知見を踏まえて、因果解析を完遂した。その結果、可逆で安定、という実用上極めて望ましい価値を得ると同時に、それを可能とする理論を得た。

この事例は、創造的、本質的な仮説の構築による「仮説構築」があればこそそのセレンディピティであり、結果的には仮説が求めていた目的を超えたイノベーションを実現できた事例である。

これを仮説駆動型の一事例、しかも仮説の想定を超える、仮説以上の結果を得た典型事例として理解することができる。

(3) エサキダイオード¹⁴⁵

1957 年 7 月頃、江崎玲於奈はソニーの研究室において、ゼーナー（トンネル）効果に関する実験を行っていた。半導体の PN 接合に一定以上の電圧をかけた場合に、絶縁破壊（ブレイクダウン）が起こり、どっと電流が流れる現象が起こる。ゼーナー効果とは、1934 年に米物理学者のゼーナーが提唱した量子力学的なトンネル効果によって、これを説明する理論である。しかし、当時現実に観察された絶縁破壊は、電子の雪崩現象によるものでトンネル効果とは無縁であった。加えて、1951 年ベル研のショックレーらがある種のゲルマニウム・ダイオードにおいて、ゼーナーの理論に従って絶縁破壊が起こっているらしいという結論を発表した。しかしその後の詳細な研究で、これも誤り¹⁴⁶であることが明らかになった。

江崎が事態の展開に著しく研究心が駆り立てられ、「トンネル電流の観察に使命感さえ抱いた」のはソニーに移る前、神戸工業にいた頃であるという。そして、1956 年、江崎は 31 歳になって、“トンネル効果への道”を求めてソニーに移ったのである。

江崎は、独自の方法で、PN 接合幅をどんどん薄くしていった。すると、予想通り、順方向の電流はほとんど変化しないが、逆方向の耐圧はどんどん低下し、逆方向の方が順方向より電流が流れやすいという、前代未聞のダイオードが誕生した。江崎は、これを逆方向ダイオードと名付けた。ここでは疑いなくゼーナー理論が働き、江崎はついにトンネル効果を測定できたことを確信した。

江崎は、ここまでを“必然”の結果であり、チャンスの女神が姿を現すのはこれからだだったと記している。

逆方向ダイオードを冷下 80℃の槽に入れ、「順方向」に流れるトンネル電流を見ていたところ、何と、かける電圧を上げるほど流れる電流が少なくなる、いわゆる「負性抵抗」を発見したのだ。考えてみれば、トンネル効果の当然の特性ではあるが、研究を計画したときには予想できなかったという。しかも負性抵抗は一般のダイオードと違い、発振・増幅・スイッチングの機能が可能であり、かつトンネル電流である

¹⁴⁵ 江崎玲於奈 (2007) , p. 65.

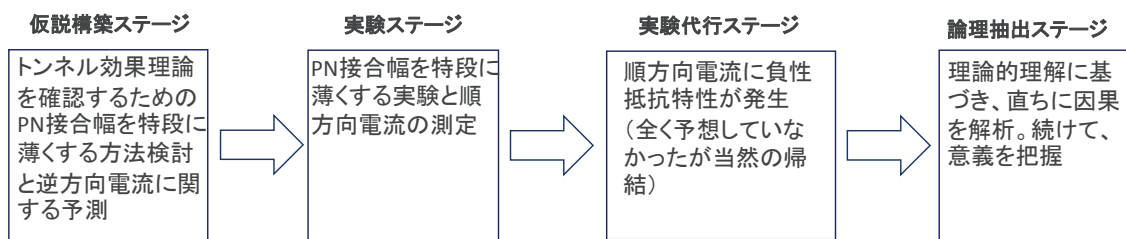
¹⁴⁶ 江崎は、ゼーナーの理論提唱とその傍証の誤りを“創造的失敗 (Creative failure)”、ショックレーらの失敗を“創造的失敗の上塗り”と評している。創造的論理の構築とその検証への挑戦に対する賛辞を強く表したのだろう。

からそれを超高速で行う。応用上、極めて大きな価値があり得るのだ。

江崎はこれを次のように表現する。「これまでのトンネル電流にまつわる“創造的失敗”を、チャンスの女神が“創造的な成功”に変えてくれた。」

江崎は、この成果をすぐに日米の学会誌に発表したが、日本においては、ごく一部を除いてこの意義がすぐには理解されなかったという。江崎は、1958 年ブリュッセルでの固体物理学の国際会議でこの結果を発表した。この会議で基調講演を行ったショックレーが「本会議において、ゼーナー効果に対し、これまでなされた中で最も美しい研究成果が、東京のレオ・エサキによって報告される」と最大の賛辞で紹介した。そして、江崎は 1973 年にこの成果でノーベル物理学賞を受賞した。

図 7-15 エサキダイオードにおける偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

この事例では、江崎はトンネル効果という、量子力学の核心に直結する極めて本質的な「仮説構築」を行っていた。また、それを観察するために PN 接合幅を特段に薄くするための工夫、実験計画に基づく「実験」を行っていた。その結果、想定を超えた偶然による実験代行、逆方向の負性抵抗を観察したのである。これは、想定外、意外な結果ではあるが、江崎はすぐにその意義を把握し、論理抽出に成功した。

この事例は、創造的、本質的な仮説に立脚した「仮説構築」があればこそそのセレンディピティである。また、「順方向の負性抵抗」の発見という、結果的には仮説が求めていた目的（逆方向の特性）を超えたイノベーションが実現できた事例である。

従って、これを仮説駆動型の一事例、しかも仮説の想定に加えて、仮説以上の結果を得た典型事例として理解することができる。

(4) IGZO 液晶の省電力駆動^{147,148}

IGZO とは、Indium（インジウム），Gallium（ガリウム），Zinc（亜鉛），Oxygen（酸素）の頭文字である。従来液晶パネルに使われてきた、アモルファス¹⁴⁹・シリコンをアモルファス・IZGO に置き換えることで、20～50 倍の電子移動速度に達することが、2004 年に発見されていた。現在シャープ等が携帯電話向けに使う CG¹⁵⁰シリコンの方がさらに 5 倍程度の電子移動速度を有するが、IZGO では、在来の液晶に近い設備と設計を用いることができる利点がある。

その後、各社が、IGZO を用いたディスプレイパネルの開発を開始した。シャープは、2008 年に高精細の液晶を目指して開発を開始した。液晶は、液晶の偏光シャッターを薄膜トランジスタ（TFT）で制御することにより光の透過/不透過を制御するが、電子移動速度が速い TFT を用いると、同じ液晶シャッターを制御する TFT を小型化できる。その結果、バックライトからの光の透過率が高くなるので、高精細化が進む。またより光の透過率が高ければ、低電力のバックライトで同じ明るさを得ることができるのでバッテリーの持ちも良くなる。

しかし、シャープの開発陣は開発が本格化した 2009 年頃、当初予測していなかった IGZO の TFT の全く別の特長を発見した。上記の TFT の電子移動速度が高速である点は、TFT の ON 特性に関する特長であるが、IGZO の TFT には OFF 特性、電流を流していない状態にも著しい特長があったのである。

それに気が付いたのは、チームの一員が電源を切って帰宅する際、画面が光り続けているのを偶然発見したことによる。TFT に流す電流を切っても TFT の OFF 特性が良い（漏れ電流が少ない）ので、液晶シャッターの状態が変化しなかったのだ。何故画面が消えないのか最初は分からず、測定ミスも疑った。1 分、2 分ではなく、数時間たっても画面表示が残っている。この観察が新たな IGZO 開発の原点だった。つまり、従来の液晶は、漏れ電流が大きいため、静止画でも、例えば 1 秒間に 60 回 ON/OFF を繰り返さなければ表示状態を維持できなかった¹⁵¹ののだが、IGZO では、静止画であれ

¹⁴⁷ 松尾拓哉（2013）。

¹⁴⁸ ファイル・ウェブ編集部（2012）。

¹⁴⁹ 結晶性をもたない固体物質（『岩波 理化学辞典 第 5 版』岩波書店）。

¹⁵⁰ Continuous Grain.

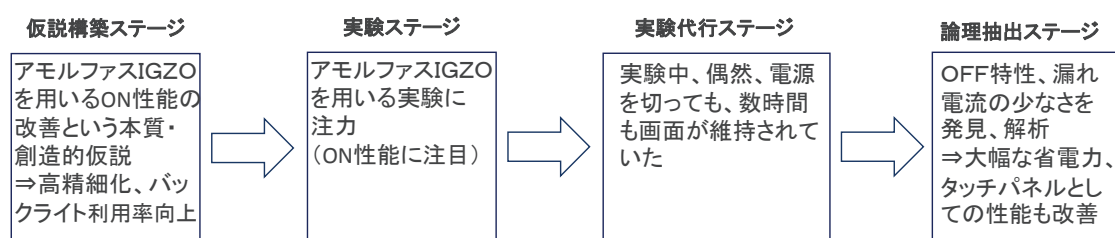
¹⁵¹ 自動車に例えれば、アイドリングによる燃料消費（ただ止まっているために必要なエネル

ば、1 秒に 1 回の ON/OFF 繰り返しでも十分であったのだ。

この OFF 特性の漏れ電流の少なさにより、IGZO では、画期的な低消費電力化、バッテリーの持ちの良さが可能になったのである。もちろん、動画再生時の ON/OFF の最適化等、一定の対応は必要であるが、優れた OFF 特性による省電力化は、研究開始の目標であった高精細化やバックライト電力の削減に劣らず、場合によれば、それ以上の IGZO の特長となっている。

更に、静止画であれば、書き換え回数を減じることができるため、書き換え時のノイズを大幅に低減できることから、タッチパネルの感度・精度も上げることができる。タッチパネルとの整合性という、今後の液晶デバイスにとって極めて有意義な副次的特長を付与することも可能となったのである。

図 7-16 IGZO 液晶における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

この事例では、IGZO 液晶による ON 性能の改善という本質・創造的な「仮説構築」がなされていた。そして、その仮説に基づき「実験」の繰り返しが行われた。その最中に、偶然の実験代行により「OFF 状態の漏れ電流の少なさ」という意外な結果が現れた。研究陣は、この結果を見逃さずに着眼し、意義を把握し論理抽出に成功した。

仮説構築の想定・目的である「ON 状態の電子の高速移動」に「OFF 状態の漏れ電流の少なさ」の発見を加え、結果的にはより広いイノベーションが実現できた事例である。

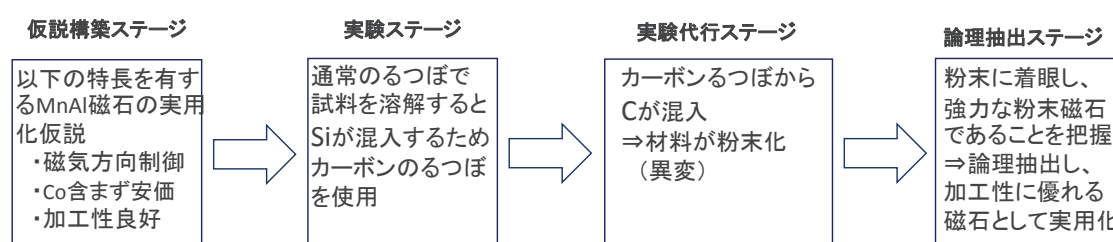
仮説駆動型の一事例、しかも仮説の想定に加えて、仮説以上の結果を得た典型事例として理解することができる。

(5) MnAlC 磁石^{152,153}

1970年に松下電器産業（当時）の久保らのグループは、1960年にフィリップス社が開発した MnAl 磁石を実用化するための研究を行っていた。MnAl 磁石は、磁気の方
向の制御に適する結晶磁気異方性を有する上に、比較的高価な Co(コバルト)を含ま
ず、かつ加工し易い磁石として実用化が期待されていた。久保らは、その研究におい
て、通常のるつぽを用いて溶解していたが、そうするとるつぽの Si（ケイ素）等が
不純物として混入してしまうため、カーボン（C）のるつぽを用いて材料を溶解する
ことにした。

その結果、今度は、るつぽからカーボンが混入して、一晩で材料のインゴット（鑄
塊）が粉末化してしまうという、偶然、想定外の異変が起こった。しかし、この粉末
を調べてみると、これが強力な粉末磁石であることが判明した。この磁石は加工性に
優れるため、現在でも一部用途で用いられている¹⁵⁴。

図 7-17 MnAlC 磁石における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

この事例は、MnAl 磁石を実用化するという「仮説構築」がなされた故の研究開発である。そして「実験」でカーボンのるつぽを使ったことにより、偶然による実験代行、カーボンの混入が生じ、材料の粉末化という意外な結果、不合理な外形が出現した。しかし、担当者達はこれに着眼し、強力な粉末磁石であることを見逃さず、論理抽出を行い、MnAlC 磁石の開発に成功した。

¹⁵² 小澤（2010），p. 11。

¹⁵³ ネオマグ株（2014）

¹⁵⁴ 現在では、一部用途にとどまるため、本研究でのセレンディピティの要件である「社会生活を大きく改変すること」に時限的に該当した事例である。

以上からこの事例は、仮説駆動型のセレンディピティであり、偶然を契機として、目的を達成する方法を獲得した典型事例として理解できる。

(6) ネオジム磁石¹⁵⁵

佐川真人は、富士通の研究所と、転職して入社した住友特殊金属（現日立金属）でネオジム¹⁵⁶磁石の研究開発を継続し、それに成功した。佐川は、元々磁石の専門家ではなく東北大学博士課程では、材料科学の研究者を目指していた。しかし、大学では、研究者としての目的を漠然としか設定できなかったこと等から、なかなか成果が上がらなかった。富士通の研究所では磁性材料の研究という明確な目的を与えられたことから、磁石の研究に没頭するようになった。

富士通に入社して5年目（1976年）に、サマリウム・コバルト¹⁵⁷磁石スイッチの耐久性を改善するプロジェクトを任された際、ふと担当領域外の本質的疑問、「なぜ、コバルトでなければならないのか」との疑問が湧いたという。強い磁石の主成分は、鉄かコバルトである。コバルトは高価で産地の政情等から供給が不安定、一方、鉄は安価で安定供給。ならば鉄とレア・アースの組合せで作れば強力で、廉価な磁石が作れるのではないかと考えた。

当時、この仮説は独創的（非常識な）仮説（アイデア）であった。なぜならば、このころまで、鉄が主成分では、コバルトに比べ、フェライト磁石のような弱い磁石しか作れなかったからである。しかし、佐川は、1978年1月、日本金属学会のシンポジウムで聴いた、東北大学の浜野正昭（当時）の講演から決定的ヒントを得た。浜野は、発表のごく一部で、鉄とレア・アースの組合せが（強力な）磁石にならない理由は「鉄と鉄の原子間距離が近いためである」と説明した。佐川は、「ならばホウ素（B）または炭素（C）など原子半径の小さい元素を加えれば、鉄の原子間距離が過不足なく広がり、強力な磁石が得られるのではないか」との仮説を持った。

佐川は翌日から実験を開始¹⁵⁸し、「鉄と鉄の間にB（またはC）を入れるための種々条件での合金合成、磁性特性の測定、解析」の試行錯誤を繰り返した。そして、1982

¹⁵⁵ 小澤（2010）, p. 11。

¹⁵⁶ ネオジム（Nd 元素番号 60、レア・アース[地球上に偏在、高価・供給不安定]）。

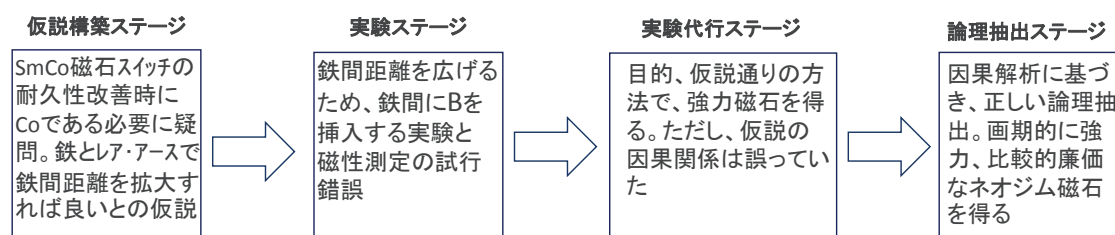
¹⁵⁷ サマリウム（Sm 元素番号 62、レア・アース）、コバルト（Co 同 27、鉄と同じ強磁性体）。

¹⁵⁸ 佐川は、思いついたら、つまりニーズを把握しそれを満たすアイデアを生んだら、すぐに実験する旨を公言している。

年 5 月に本テーマを継続するために住友特殊金属へ転職した。その直後の 6 月、ついに目的の金属構成でかつ磁性体として望ましい合成を実現し、最強の磁性を有するネオジム磁石を作り出すことに成功した。その後は、工業化に向け、50℃以上での性能、つまり耐熱性の改善（ジスプロシウム¹⁵⁹の添加、1983 年）を行った後、生産体制も整え、1985 年に量産を開始し、飛躍的な性能向上とコストの抑制により、需要・生産は順調に立ち上がった。

量産開始とほぼ同じ頃、詳細な構造（Nd₂Fe₁₄B）を解析し、従来全くなかった強力な永久磁石である原理も明らかにしていった。その結果は意外なことに、強力なネオジム磁石となった構造と元々の構造で「鉄と鉄の距離」は、ほとんど変わらず、磁石が強力になったのは、佐川が抱いた仮説の因果が正しかったからではなかった。ネオジム磁石において、ホウ素による鉄の磁氣的性質改善は、ホウ素と鉄の電子の化学的相互作用によることが解明された。佐川の研究開始時の仮説における目的と手段は正しかったのだが、その因果関係は誤っていたのである。しかし、この仮説構築を出発点としたために、佐川は、世界でも最初に R¹⁶⁰-Fe-B の磁石を探索し、極めて粘り強く研究を続けた結果、世界最強の磁石を生み出したのである。

図 7-18 ネオジム磁石における偶然と必然の相互作用



資料：筆者作成

本事例は、「コバルトを用いなくても良いのではないか、鉄とレア・アースの組み合わせで強力な磁石ができるのではないか」との極めて本質的な問いに基づく仮説構築が出発点である。そして、そのためには、「従来よりも鉄間距離を広げれば良いのではないか、具体的にはホウ素や炭素を入れ込めば良いのではないか」という本

¹⁵⁹ ジスプロシウム（Dy 元素番号 66、特段のレア・アース）

¹⁶⁰ R はレア・アースを表わす。

質・創造的な「仮説構築」がなされた。仮説を実現するため「実験」の試行錯誤がなされた。そして、目的通りの結果が得られた。しかし、それは偶然の実験代行の結果だった。その因果は仮説通りではなかった。仮説通りの方法で仮説通りの目的は達したが、その原理は、仮説とは異なっていたという特徴あるセレンディピティである。

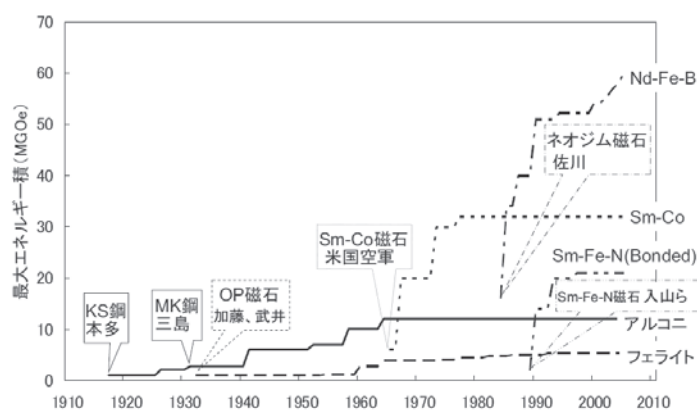
仮説の方法で目的を達しつつも、その原理は誤っていたという例外的態様の仮説駆動型セレンディピティと考えられる。

一部誤っていても、本質・創造的な仮説があったからこそ研究開発が開始でき、セレンディピティが成就したという理解も可能である。

結果的に、このイノベーションの価値はとても大きかった。ネオジム磁石は、それまで最強だったサマリウム・コバルト磁石のほぼ2倍の磁力を持ち、計算上は1グラムで、約1キログラムの鉄を持ち上げることが可能である。

極めて強力な永久磁石であり、比較的廉価という特長により、ネオジム磁石は、HDD（ハードディスクドライブ）やCDプレーヤ等のヘッドのアクチュエータ、医療機器のMRI（磁気共鳴画像装置）から電車・エレベーター・ハイブリッド車の高性能・実用化に応用され、我々の日常生活に欠かせないものとなって、社会に大きな影響を与え続けている。地球環境問題への対応等から、ハイブリッド自動車の増大、各種電動機器の省エネ化、各種発電・回生機器の効率向上、大電力対応が求められる中、日本発の史上最強の永久磁石として、ネオジム磁石の改良が続けられている。今後さらに生産量が大幅に増大すると考えられている。

図 7-19 永久磁石のエネルギー積の年次変化



資料：小澤（2010, p. 11、科学技術動向研究センター作成）

4. モデルの普遍性確認のまとめと事例からの示唆事項

以上の検討から本研究のプロセスモデルと類型化モデルの普遍性確認のまとめを行い、合わせて、本章での多数事例研究から本研究のモデル体系に関して得られた示唆事項を記述する。

(1) 着眼駆動型

MK磁石、電子レンジ、ピッチ系炭素繊維、チョクラルスキー法のいずれも、本研究のプロセスモデルに則り、類型化モデルの着眼駆動型として説明、理解することの妥当性が確認できた。

いずれも、成就したセレンディピティに直結する「仮説構築」はなく、「実験」中に突然、偶然の実験代行が生起している。その全くの想定外の不合理な外形にもかかわらず、それぞれの研究者は、その着眼に成功して意義を把握し、そこからの論理抽出を成し遂げた。

表 7-1 偶然の実験代行結果と解析力の特徴

| | 偶然の実験代行（不合理な外形） | 解析力の特徴 |
|-----------|---|---|
| MK磁石 | (Fe-Al-Ni)を所定寸法に削り出そうとした際、削り屑が落ちず、試料に付着。 | 即時に磁石の可能性を察知する「幅広い知見、洞察力」。鉄・ニッケル系合金から「何か」を得る目的意識。 |
| 電子レンジ | マグネトロンの前にて、ポケットの中のピーナッツ・クラスター・バーが溶ける、奇妙な感覚。 | 直ぐに、ポップコーン、卵で実験。迅速、実践的に意義を確認。 |
| ピッチ系炭素繊維 | リグニン粉末を昇温した炭に「毛が生える」。 | リグニンが酸化、糸状になったと推測。再実験で確認。ピッチでも同様の作用ありと類推・洞察。 |
| チョクラルスキー法 | スズ入りのるつぽからペンを引き上げたら、スズが引き伸ばされて付いて来た。 | 単なる誤りとせず着眼、結晶成長の方法としての意義把握、論理抽出。 |

資料：筆者作成

(2) 実験駆動型

リュープロレリン、リブリウム、イミプラミン、垂直磁気記録媒体のいずれも、本研究のプロセスモデルに則り、かつ類型化モデルの実験駆動型として、説明、理解することの妥当性が確認できた。

いずれも成就したセレンディピティに関連する「仮説構築」があり、しかし「実験」でその実現に苦しみ、不確実性と失敗を踏まえて、実験・評価範囲を拡大している。その上で拡大した実験・評価範囲において、偶然の実験代行結果を捕捉して

論理抽出に成功している。

表 7-2 実験・評価範囲拡大の内容とタイミング

| | 実験・評価範囲拡大の内容 | 実験・評価範囲拡大のタイミング |
|----------|--|--------------------|
| リュープロレリン | 目的を達する物質を探す：目的とする活性を有する物質・化合物の実験・評価範囲を当初仮説の想定より拡大。 | 偶然の結果に遭遇する前：実験段階 |
| リブリウム | 目的を達する物質を探す：目的とする活性を有する物質・化合物の実験・評価範囲を適宜拡大。 | 偶然の結果に遭遇した後：論理抽出段階 |
| イミプラミン | 特定物質の有用な活性を探す：ある物質・化合物の活性の実験・評価範囲を当初仮説の想定より拡大。 | 偶然の結果に遭遇する前：実験段階 |
| 垂直磁気記録媒体 | 目的を達する物質を探す：目的とする特性を有する物質の実験・評価範囲を当初仮説の想定より拡大。 | 偶然の結果に遭遇する前：実験段階 |

資料：筆者作成

なお、実験・評価範囲拡大の内容とそのタイミングについては、セレンディピティ毎に違いが存在する。それを取りまとめた結果を、表 7-2 に示す。

(3) 仮説駆動型

高分子質量測定法、フォトクロミズム、エサキダイオード、IGZO 液晶の省電力駆動、MnAlC 磁石、ネオジム磁石のいずれも、本研究のプロセスモデルに則り、類型化モデルの仮説駆動型として説明、理解することの妥当性が確認できた。

いずれも、成就したセレンディピティに関する「仮説構築」があり、それに基づく「実験」が行われた。そして、仮説構築と実験に相関して、偶然による実験代行が生じた。実験代行の意外な結果、不合理な外形に遭遇した研究者は、その意外さ、不合理さにもかかわらず、その結果に着眼して意義を把握し、そこからの論理抽出に成功した。

この類型では、「仮説構築」での想定内容と成就した「セレンディピティの結果」の間には、偶然が介在することによる乖離がある場合もある。乖離のない場合と合わせて、「仮説構築での想定」と「セレンディピティの結果」の関係を表 7-3 に示す。偶然の実験代行が人知に教える内容には、ここに示す広がりが存在する。

高分子質量測定法と MnAlC 磁石において、仮説構築での想定とセレンディピティの結果には乖離はない。すなわち、これらの事例では、人知が詳細・具体的に想定で

きなかった「具体的実現方法」を偶然が実験代行によって示したものと受け取れる。
これが仮説駆動型セレンディピティの基本形である。

表 7-3 仮説構築での想定とセレンディピティの結果

| | | 仮説構築での想定 | セレンディピティの結果 |
|------|---------------|--|--|
| 乖離なし | 高分子質量測定法 | イオン化のための、マトリクス・保持剤の組み合わせ等の詳細（方法・条件）不明。 | 具体的実現方法獲得：コバルト超微粒子粉末・グリセリン、レーザー照射時間等。 [仮説駆動型の基本形] |
| | MnAlC 磁石 | MnAl 磁石実現の要件不明。 | 具体的実現方法獲得：MnAl にカーボン混合。 [同上] |
| 乖離あり | フォトクロミズム | 可逆だが不安定なフォトクロミック分子の合成。 | 想定を超える結果：可逆で安定なフォトクロミック分子の合成。 |
| | エサキダイオード | PN 接合の逆方向のトンネル効果。 | 想定を含みより広い結果：順方向の負性抵抗も示す。 |
| | IGZO 液晶の省電力駆動 | IGZO による TFT の ON 時の電子の高速移動。 | 想定を含みより広い結果：OFF 時の漏れ電流の少なさも示す。 |
| | ネオジム磁石 | 鉄とレア・アースの組み合わせで、鉄間距離を広げれば強力な磁石になる。そのために、鉄間に B（ホウ素）を入れ込む。 | 未知の理論を獲得：B を入れ込み、強力な磁石を得た。しかしその因果は、鉄間距離ではなく、B と鉄の電子の化学的相互作用であった。 |

資料：筆者作成

それに対して、フォトクロミズム、エサキダイオード、IGZO 液晶、ネオジム磁石では、「想定と結果」に乖離が生じている。

フォトクロミズムでは、「可逆で不安定」なフォトクロミック分子を合成する想定であったが、偶然の実験代行が示した結果は、それを越えた、「可逆で安定」なフォトクロミック分子であった。

エサキダイオードでは、「逆方向のトンネル効果」のみを想定していたが、偶然の実験代行が示した結果はそれにとどまらず、「順方向の負性抵抗」を含んでいた。順方向への拡張は、理論の一般性を示すと同時に、実用的にも高い意味を有していた。

IGZO 液晶では、「TFT の ON 状態の電子の高速移動」を想定していたが、偶然の実験代行が示した結果は、それに加えて、「TFT の OFF 状態の漏れ電流の少なさ」を含んでいた。

以上、フォトクロミズム、エサキダイオード、IGZO 液晶の事例は、仮説構築に対して、その想定・目的を上回る結果を得たセレンディピティである。さらに、ネオジム磁石の場合は、「鉄間距離を広げれば強力な磁石になるから、鉄間にホウ素を挿入する」という仮説に対し、偶然の実験代行結果は、「期待を上回るほどの強力な磁石

の実現」であった。しかも、方法と結果は仮説通りであったが、仮説の論理は誤りで因果関係は異なっていた。つまり、偶然が未知の論理を示したのである。

(4) 本研究のモデルの普遍性に関する結論

以上の通り、本章では、着眼駆動型（4事例）、実験駆動型（4事例）、仮説駆動型（6事例）合わせて14事例に本研究の「実験代行を核心とするプロセスモデル」と「駆動要因による類型化モデル」の適用を試みた。その結果、いずれの事例に関しても、両モデルでの説明が合理的であることが理解できた。加えて、両モデルにより、そのセレンディピティの特徴・性格が把握できることを確認した。つまり、それぞれのセレンディピティにおける偶然と必然の相互作用が合理的に描写でき、かつそのセレンディピティでの核心的な駆動力を明らかにすることができた。

以上から、本章が目的とした、本研究におけるセレンディピティに関する二つのモデルの普遍性が確認できたと考える。

第8章 セレンディピティのマネジメントへの示唆

本章では、前章までの事例研究、プロセスモデル、類型化モデル、普遍性検討の内容に基づき、セレンディピティのマネジメントへの示唆を検討、抽出する。そもそもセレンディピティはマネジメント可能であろうか。セレンディピティは偶然を必須の要素とするから、確定・直接的にそれをマネジメントすることは不可能である。しかし、ここまでの研究結果から、「価値の高いセレンディピティに繋がる偶然が起きやすくなる」ための意図的営為を模索することは可能であると考えられる。偶然を見逃しにくくなるための意図的営為についても同様である。そうした意図的営為を生みやすい個人の思考・行動様式も存在すると考える。さらに個人を超えた、組織レベルにもセレンディピティを起こしやすく、成功しやすくする意図的営為があると思われる。本章において、セレンディピティのマネジメントというのはそういう意味である。

はじめにセレンディピティの駆動類型ごとにそれを成就させる駆動力とその駆動力を生むステージを確認する。その上で、駆動力を生む各々のステージごとに、セレンディピティの成功可能性を高めるマネジメントの条件を考察していく。

1. セレンディピティの駆動類型と駆動力

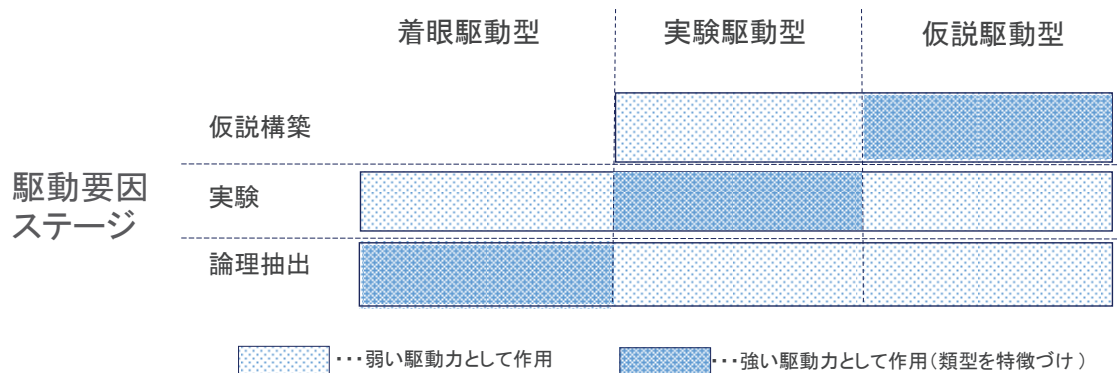
(1) 着眼駆動型

着眼駆動型のセレンディピティのプロセスには、仮説構築ステージが存在しない。達成したイノベーションを目的としない実験ステージ中に、“突然”、偶然の実験代りが生起する。その意外な結果、不合理な外形にもかかわらず、それを無視することなく着眼し、論理抽出することにより、セレンディピティによるイノベーションが成就する。従ってこの類型のセレンディピティの成功確率を高めるには、ひとえに「論理抽出ステージの良いマネジメント」を求めるべきであるということになる。何をいかにすることがその良いマネジメントなのかを明らかにすること、いかに良いマネジメントを企画、実行するかが課題となる。

仮説構築ステージがないことが、「実験ステージより前の研究者の活動がセレンディピティの成就に影響を与えない」ことを意味するのではない。しかし、本研究では、実験ステージより前の活動が直接セレンディピティに影響を与えるのではなく、それらも実験と論理抽出ステージを通じてセレンディピティの成就に影響を与えると

いう枠組みに則って考察を進める。

図 8-1 駆動要因による類型化 (図 6-1 再掲)



資料：筆者作成

(2) 実験駆動型

実験駆動型のセレンディピティにおいては、はじめに仮説構築ステージがあり、それに則った実験ステージがあり、そこで「執拗な実験に基づく実験・評価範囲の変更・拡大」が行われる。その後、変更・拡大した実験・評価範囲において、偶然の実験代行を補足する。このタイプのセレディピティの成功確率を高めるには、第一に実験ステージにおける「実験・評価範囲の変更・拡大」の良いマネジメントが必要である。

第二に、仮説構築ステージにおける本質・創造的な仮説構築の良いマネジメントが必要である。これには、仮説駆動型での仮説構築と共通する内容と固有の内容があるだろう。これについては、必要に応じ、両者の条件・前提の異同を考えながらそのマネジメントの差異・要件を考察する。

第三に、実験駆動型セレンディピティにおける論理抽出ステージの良いマネジメントが必要である。この場合の論理抽出に求められる内容は、着眼駆動型における論理抽出ステージの良いマネジメントに求められる内容と同じところが多いと考える。しかし、着眼駆動型と異なり、予め、「仮説構築ステージと主たる駆動要因となる『実験』ステージ」があるので、論理抽出ステージのあり方に求められる内容、良いマネジメントに関して着眼駆動型とは異なるところもあり得ると考えられ、適宜それを検討する。

(3) 仮説駆動型

仮説駆動型のセレンディピティにおいては、はじめに、仮説構築ステージ¹⁶¹が実行される。その後、実験中に偶然の実験代行が生起する。既に述べて来たように、この「仮説構築ステージ及び実験ステージ」と「偶然による実験代行の質・水準とその生起可能性」には相関関係がある。

従って、この類型のセレンディピティの質・水準と成功確率を高めるためには、第一に仮説構築ステージの良いマネジメントを考える必要がある。第二に実験ステージの良いマネジメントを考える必要がある。そして、それらをいかに企図、実行すべきかを明らかにすることが課題となる。

また、仮説駆動型のセレンディピティにおいても、偶然の実験代行の意外な結果、不合理な外形にもかかわらず、それを無視、廃棄しないことが必要である。着眼からはじまる論理抽出に成功しなければ、セレンディピティは成就しない。従ってこの類型のセレンディピティの成功確率とその質・水準を高めるためには、第三に、論理抽出ステージの良いマネジメントが必要である。この場合の論理抽出に求められる内容は、着眼駆動型における論理抽出の良いマネジメントに求められる内容と同じところが多いと考える。しかし、着眼駆動型と異なり、予め、「主たる駆動要因となる仮説構築ステージと実験ステージがあることから、論理抽出のあり方に求められる内容、良いマネジメントに関して、着眼駆動型とは異なるところもある可能性があり、適宜それを検討する。

以下に、仮説構築、実験、論理抽出ステージの順に、上記で課題とした「良いマネジメント」とは何か、何が求められるかについて考察していく。

2. 仮説構築ステージのマネジメント

(1) 求め続けるに値する本質的な目的を持つ

セレンディピティを目指した、あるいは、その可能性も視野に入れたイノベーションのマネジメントにおいて、仮説構築ステージの出発点となる目的設定はセレンディピティ成就のために極めて重要な意義を有する。従って、その設定には十分な考察、

¹⁶¹ 実験ステージでの試行錯誤からのフィードバックを受けての内容の高度化含む。

検討が必要である。

何故ならば、第一に、偶然の実験代行を見逃さないための着眼の動機となり、そのための種々の活動を広範に駆動するのが、「目的意識を持って何かを探し求め続けていること」だからである。従って、「求め続けるに値する」価値の高い目的、野心的な目的設定が、セレンディピティが成就するための必要条件である。

第二に、セレンディピティが成就するためには、既に述べて来たように、仮説構築・実験・論理抽出ステージにおいて、継続的、執拗な活動が求められるから、研究者、イノベーターを「強く動機づける」、価値の高い、彼・彼女らにふさわしい目的設定が必要である。

第三に、本質・創造的な仮説構築を行うためには、それに値する価値の高い本質的な目的設定が必要である。本質・創造的な目的を持たずには、本質・創造的な仮説構築をなし得ないだろう。

トランジスタの事例は見事に上記の条件を満たしている。ケリーの目的設定は「全米に安定的な電話網を構築し、人々同士が眼前にいるように話ができるようにする。そのために真空管の限界を克服する安定・長寿命、小型、低消費電力の固体増幅素子を開発する」であった。

これは、求める結果自体はもちろんのこと、当時の科学・工学の水準に照らしても価値の高い野心的な目的設定であった。加えて、バーディーン、ショックレーという当時第一級の若手理論物理学者を動機づけ、夢中にさせ、創造的な仮説構築力と解析力を発揮させるに値する目的であった。また、真摯・意欲的な実験物理学者であるブラッテンを動機づけ、執拗な実験計画とその実行を行わせるに値する目的設定であった。

ペニシリンの事例は、細菌感染や殺菌、免疫等の研究の勃興期に、悲惨な感染症に対する対抗策を求めるといふ、時宜を得た、崇高な目的設定が出発点になっていた。

アリセプトの事例は、アルツハイマー型認知症の研究が端緒についたところでありながら、なんとかそれを治療したいという強い使命感、強固な目的設定であった。

以上の他、第7章で検討した事例に関しても、リュープロレリン、垂直磁気記録媒体、高分子質量測定法、フォトクロミズム、ネオジム磁石等において、その目的設定

の意義深さ、目標の高さがセレンディピティ成就の大きな背景、前提条件になっている。

なお、着眼駆動型セレンディピティは、仮説構築ステージがないため、当初にセレンディピティの結果と直結する目的設定はなされていない。しかし、着眼駆動型のセレンディピティにおいても、偶然の実験代行結果との遭遇と前後して、何らかの目的意識が論理抽出ステージに結び付き、それが論理抽出の駆動要因となる。導電性ポリマーの事例において、解析可能なポリアセチレン形態（結晶構造等）を強く求めていた白川の目的意識が“失敗合成物”と遭遇し、それが薄膜（結晶）かも知れないとの洞察を生み、その目的意識が論理抽出ステージの駆動要因になったと考えられる。

（２）本質を問う、前提を見直す創造的仮説を構築する

仮説の本質・創造性が、偶然の実験代行の水準と相関し、それが本質的な価値あるセレンディピティに繋がることを述べた。また、何かの存在を内容とする本質・創造的な仮説構築が偶然の実験代行の意外な結果からの論理抽出を促進することも述べた。

ここで、「構築する仮説が本質・創造的である」ことの意味を、より具体的に考え、上述の内容の理解を深めたい。

本研究の事例から仮説が本質・創造的であるという意味を抽出、列举すると次の通りである。

- ①既存論理の基本的前提の見直し（トランジスタにおける表面準位仮説）
- ②一般論に対する特殊・個別論（ペニシリンにおける有効な抗生作用の存在仮説¹⁶²）
- ③基礎的理論の核心・大前提の対象化（エサキダイオードにおけるトンネル効果¹⁶³）
- ④対象物の基本的特性への着目（IGZO 液晶における半導体の電子移動速度¹⁶⁴）
- ⑤常識に対する根本的疑問（ネオジム磁石における、コバルトの必要性¹⁶⁵）

¹⁶² それまでに観察された多くの抗生作用は、リゾチームの様に病原菌には無効であり、有用ではなかった（一般論）。しかし、フレミングは緻密で柔軟な思考により、抗生作用の生体の組合せによっては、病原菌に有効で、人体に無害な抗生作用もあり得ると考えていたと想像できる（特殊・個別論）。

¹⁶³ トンネル効果は、量子の波動性を直接示す、量子論の核心を直接証明する現象。

¹⁶⁴ 電子の移動速度は半導体の最も基本的な特性のひとつ。

¹⁶⁵ 佐川は、サマリウム・コバルト磁石の耐久性の改善を指示された際に、そもそもこの磁石にはなぜコバルトが必要なのかという基本的疑問を抱き、コバルトを使わず、鉄間距離を

上記のように、本研究で対象とした事例研究での仮説の本質・創造性は、いずれも従来の人知（論理・思考）が、それを当然として、疑う、考える、対象化することを排除していた盲点への着目、問いである。

こうした盲点に着目し問いを発するための思考・行動様式、あるいはマネジメントの考え方を述べれば、「対象とする問題を明確にし、その根本、大前提を問え」ということになるだろう。

そもそも、セレンディピティは、偶然の実験代行により人知の限界を超えることであった。そうであるならば、「当然だからと議論の盲点としていた人知の限界」に関わる仮説構築を行い、それに関する実験を行えば、人知の限界に関わる、それを越える偶然が生起し、それを発見する可能性が高まるのは、当然のことであり、納得がいく。

第5章¹⁶⁶で紹介した伊丹（1986, p. 42, 再掲）の言葉、「本質的であればこそ、未知の広がり¹⁶⁶が隠されており、だからこそその広がりの中から何かが出てくる可能性が高いのである」（筆者傍点）は、この点に関する直接的な指摘である。

（3）不確かな推察によらず、事実に立脚して素朴に仮説を採用する

仮説がないので動けない、これは不確実性の高い研究領域で研究・実験意図を持つ場合にしばしば起こり得る隘路である。しかし、仮に不確実であって探索を開始する、したい場合、自ら構築したものでない仮説を含む既存仮説の中から出発仮説を採用しなければならない。

本研究において、何らかの仮説に基づかなければならない場合の仮説の選択に関する参考事例は、アリセプトの場合である。杉本の「コリン仮説に基づいた研究を開始したのは、わずかとは言え、現実にタクリン、フィゾスチグミン等のアセチルコリンエステラーゼ阻害薬が患者に効いたという事実（学会報告）だけだった」という判断の記述¹⁶⁷がある。観念、論理ではなく、事実に立脚して素朴に、素直・柔軟に判断している。

杉本が事実に立脚して素朴に、素直・柔軟に考える姿勢を示す他の事例として、「高

広げる仮説に到った。

¹⁶⁶ 第5章3（2）。

¹⁶⁷ 第4章4（2）。

血脂症治療薬としては、副作用の点で実用にならなかったピペラジン系の化合物でも、『少量で効く用途があれば実用になるだろう』と考えた」という言葉もある。また、「コリン仮説に基づくアセチルコリンエステラーゼ阻害作用の副作用（全身でのアセチルコリンー神経伝達物質の過剰による振戦）については薬理研究者ではないのでよく分からなかった（ので研究を開始した）」という言葉がある。前者は極めて素朴だが論理的な考え方である。後者は不確実な理論に基づく予想一観念によって否定的、消極的になってはいけない、実際に確かめてみなければならないという指摘である。事実一自然に問わなければ分からないという考え方でもある。

3. 実験ステージのマネジメント

（1）執拗な実験と実験好きの重用

実験の執拗さ、量と工夫により偶然の実験代行の生起可能性が高まる作用については、アリセプト、トランジスタ、高分子質量測定法の事例等から把握できた。実験がその役割を果たすためには、次の諸点が求められるであろう。

第一に、実験を執拗にするに値する目的設定の存在。第二に、執拗な実験が可能となる前提としての本質・創造的な仮説の構築、または仮説の採用。第三に実験担当者が実験好き、実験に高い動機を有していること。第四に執拗な実験を可能にするチームが存在することである。

第三の点に関して、事例研究から次の点を参照することができる。トランジスタの事例において、実験を担当したブラッテンは無類の実験好き、手を動かすことが大好きな人物¹⁶⁸であったという。菊池（2006, p. 81）は、ブラッテンについて次の様に記述している。「ブラッテンは、本当に物理実験が好きで好きでしかたがない、というタイプの人でした。正直な人で、こんなことを言ったことがあります。『バーディーンは偉大だ。私はバーディーンの論文を読んでもわからない所がたくさんあった。でも、私は実験が好きだから、実験だけは自分の責任でできる。時々バーディーンに質問して少しわかるとまた実験の工夫をする、そんなやり方で仕事をし

¹⁶⁸ Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997, 上 p. 42) には、モラン高校時代の手作業の授業に関して「手を使ってなにかをするのは、そしてメカニカルなものを相手にするのは、彼にぴったりだったのである。」との記述がある。

ていた。』

また、高分子質量測定法の開発にあたって、高分子のイオン化の困難で暗礁に乗り上げた田中（2003, p. 138）は、「まだ、研究期間は残されている。何もしなければ前進しない。好きな実験をできる限りやろう」と言った（筆者傍点）。

彼らのような実験好きでなければ、実験計画を執拗に練り直して工夫をこらし、尋常でない実験量をこなすことは不可能であろう。

第四の点に関しても、トランジスタの事例が特段に参考になる。1年半に及んだ表面準位仮説の検証実験の間中、バーディーンがブラッテンを勇気づけ、実験に資するアドバイスを与えていたのだ¹⁶⁹。

なお、実験の量と工夫を求めて、ゲーム的なマネジメントが有効に作用することもあり得るだろう。トランジスタの開発において、種々の実験に際して、ショックレーは自分の新しい工夫が成功するか否かについてしばしば賭けを提案し、自身は成功に賭け、負け続けても賭けをやめなかったという。ショックレーは、アイデアを大量に生み、実験して確かめることを執拗に行った¹⁷⁰。そのためにゲーム的なマネジメントを行なったのだ。

アリセプトの開発において、杉本は、ゲーム的要素を超え、研究者にノルマを課したという。彼は、若い化学者に対して、1週間に化合物を5検体合成する、という（無茶な）指示を出した¹⁷¹。

マネジメント視点からは、こうした方法の良否も論点となる¹⁷²だろう。適宜、今後の研究課題と考えたい。

（2）実験・評価範囲の柔軟な設定とそれを支える評価の感度・効率向上

仮説の不確実性が高く、仮説に基づいた範囲のみを実験・評価範囲とするのでは、成功確率が低い場合には、実験・評価範囲を拡大し、そこで偶然の実験代行結果を待ち受けることが有効な場合がある。この場合のマネジメント上の第一の課題は、実験・評価範囲をどこに広げるか、逆に言えば、広げつつどこに絞るのかということ

¹⁶⁹ Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1981年, 上 p273)。

¹⁷⁰ 菊池 (2006, p. 59)。

¹⁷¹ 杉本 (2010, p. 22)。

¹⁷² Edward L. Deci (1975) の内発的動機づけ理論のみから考えれば逆効果である。

あろう。この絞り込みのために有効なのは「確実ではないが全く不確実でもない知」の活用ではないかと考えられる（これを「アナログ知」と呼ぶ）。

実験・評価範囲を確実な知で確定的に絞り込むことはできないが、どこかに絞り込む必要がある場合に、アナログ知の活用が有効になると考える。アナログ知の例として、アリセプト探索時の杉本のマイ・ライブラリーをあげることができよう。

杉本は、化合物のマイ・ライブラリーを持つことを提唱しているが¹⁷³、これは「確実ではなくても自分が勘所と愛着を持つ（アナログ知を有する）物質群を大切にせよ」という内容である。マイ・ライブラリーを持って養ったアナログ知を基に、実験・評価範囲をピペラジン系の物資に絞り込んだのである。

実験・評価範囲の拡大におけるマネジメント上の第二の課題は、広げた実験・評価範囲に関する評価の感度、効率であろう。アリセプト、杉本の場合には、当初の仮説に基づくタクリン系の物質の大量の評価で、評価の感度、効率が高まっていたことが実験・評価範囲の拡大を可能とした。

なお、評価における感度、効率の向上については、セレンディピティにおけるマネジメント全般の検討課題になると思われる。実験駆動型に限らず、例えば、ペニシリンの事例においても、フレミングがリゾチームの発見・研究を通じて抗生作用に関する評価の感度、効率を高めていたことが、セレンディピティの論理抽出に貢献した。セレンディピティが関与するようなブレークスルーにおいては、その評価方法自体が確立されていないことも多い。上記のアリセプト、ペニシリンの例がその典型である。この場合の評価の洗練と確立は原則的に実験、評価の繰り返しによる学習の効果である。従って、評価の洗練と確立も、実験の量と工夫があつて、はじめて可能となる。

4. 論理抽出ステージのマネジメント

（1）着眼

着眼とは、「意外な結果」を見逃さずに着目する、あるいは、予め相当意図的にそれにアンテナをはって一着目する準備をしておいて、実際に着目することである。

¹⁷³ 第4章4（5）。

1) 着眼の根本動機としての強い目的意識

着眼のためにもっとも広範かつ有効に作用するのは、目的意識であると考えられる。つまり、いかに不合理に見えようと、何らかの意味でそれを探していること、それが一見不合理、無意味、無関係に見える何かに注意を向け、意味を問おうとする強力、広範な動機となる。

本研究の第4章で検討したいずれの事例も、結果的に得たものに対する目的意識が着眼の駆動要因として作用したと考えられる。目的意識が顕在的な場合と潜在的な場合があり、目的と結果的に得られたものとの距離には差異があるものの、いずれの事例においても、何らかの目的意識が存在していた。

導電性ポリマーの事例では、白川は、当時彼が主テーマとしていた「ポリアセチレン薄膜の重合過程」を研究するために、解析しやすいポリアセチレンの構造を強く求めていた。実際に、ポリアセチレン粉末をペレットにして各種解析を行おうとまでしていたのである。つまり、顕在的にポリアセチレン薄膜（結晶）を求めてはいなかったが、少なくとも潜在的には、その上位概念—構造解析に適する（規則的）構造—を求めていたと言って良いだろう。

トランジスタの事例でも、実際に半導体の表面に結露が生じたのは、ブラッテンらが表面準位効果の存在を確認しようとしていた際だが、元々の彼らの活動の目的は半導体による増幅素子であったので、結露経路で半導体の表面に電位を与えることによる電流の変化を求めていたと言って良いだろう。つまり、偶然がもたらした結果は、偶然が起こった際の直接目的ではなかったが、継続的な目的意識として、彼らが求め続けていた内容に直結していた。

ペニシリンにおいても、第一次世界大戦で多数の細菌感染症の死者を診た体験、スペイン風邪（インフルエンザ）流行の体験、リゾチームの発見、細菌研究者としての基本的問題意識から、フレミングは「病原菌に有効で人体に無害な」殺菌剤を強く求めていた。ペニシリンを発見した際の実験の目的は、得られたセレンディピティとは異なったブドウ球菌変異株の培養ではあったが、少なくともフレミングの潜在意識が「病原菌に有効で人体に無害な」殺菌剤を求める目的から離れることはなかったと考えられる。

アリセプトにおいても、実験・評価範囲の拡大まで行ってアルツハイマー型認知症の治療薬、コリン仮説に適する化合物を探していたのだから、強い目的意識が存在していたことは言うまでもない。

第7章の多数事例研究についてみても、仮説構築がある「仮説駆動型」と「実験駆動型」は言うに及ばず、得られた結果に関する仮説構築がない「着眼駆動型」の事例でも、結果に関係したなんらかの目的意識が、少なくとも潜在的にはあったと考えられる事例が多い。

例えば、MK磁石を発見した三島は、永久磁石開発の研究者ではなかったが、金属磁性の研究者ではあったので、強力な永久磁石を求めていなかったとは言えないだろう。また、彼は、既に二つの特徴のある合金が得られていた鉄・ニッケル系の合金からさらに画期的なものが出てくるのではないかと予感、目的意識を有していた。

ピッチ系炭素繊維を発明した大谷が、リグニンの酸化物が炭化して糸状になったことに注目したことの背景には、繊維状の炭素が合成できれば炭素繊維強化材料が実現可能となるという認識を有していたことが考えられる。彼が抱いていたのは「認識」であって「目的」ではないかも知れない。しかし、それが目的に近い作用を果たした可能性は高い。

さらに、チョクラルスキー法を発見した際のチョクラルスキーについても、なんらかの意味で、結晶あるいはその成長に、少なくとも興味を有していた可能性を想像することができる。もちろん、そうでなかった可能性もあるが、そうでなかったとしたら、誤って自分のペン先で、るつぽからスズを引き上げてしまった際に、それが何か意味があることだと考えるのは、かなり困難だっただろう¹⁷⁴。

以上のように、本研究の事例の中で、広い意味で、起こった結果に関係する目的意識を全く持っていなかっただろうと考えられる事例は稀である。マグネトロンの脇で、食物が温められることに気が付いた際のスペンサーは、その可能性を全く考えていなかった可能性が高いと想像するが。

¹⁷⁴ ただし、元々結晶構造に関心を有していたのではないが、実際に結晶を見て、その光沢等から、それに興味をひかれ、この方法の価値を見出した可能性もあると考える。

いずれにせよ、セレンディピティ成就のための論理抽出、特にその出発点となる着眼のマネジメントにおいて、最も広範に妥当することは「求めよ、さらば与えられん」、つまり目的意識の存在だと考えられる。

2) 偶然の意外な結果を機会・チャンスと考える

偶然の実験代行は、意外な結果であり不合理な外形を示す。しかし、セレンディピティに繋がる新たな真理を内包していることがある。

従って、セレンディピティに繋がる着眼のためには、意外さ、不合理な外形を、そこに新たな真理が含まれているかも知れない兆候、ヒントとする思考・行動様式が意味を持つ。つまり、意外な結果、不合理な外形、予想と異なる出来事、いつもと違う事象を見たら、それを無視するのではなく、敢えてそれに着眼するのである。セレンディピティによるイノベーションの成功者は、これに関する多くの言葉を残している（以下の引用に関して筆者傍点）。

白川は、ずばり「予期しない現象に出会ったときこそ、しめたと思え」という（赤木他, 2002, p. 15, 再々掲）。

田中（2003, p. 144）は、偶然を積み重ねて大きな発見をすることができた理由のひとつとして、「いつもと違う現象が起きたときに、それを見逃すことなしに『あ！これは』と、ピンとくるものを感じることができたからだとも言えます」という。

ショックレー（SHOCKLEY（1976）, p. 597）は、ベル研のロビーに書かれていたグラハムベルの「時には踏みならされた道を外れて森の中に踏み込みたまえ。きつと何か前に見たことのないものを見つけるだろう」という言葉を、トランジスタの発見を振り返る論文の冒頭に記している。発見の対象を「何か前に見たことのないもの」と表現している。

フレミングが、最初に青黴がブドウ球菌を溶菌していることに気が付いたときの様子の記述は次の通りである。「突然、…、一枚の培地の様子が違うのに気が付いた。『これはおもしろい』といって目を近づけた」。彼は様子の違いに着眼して、こうつぶやいたのである。また、続けて「フレミングは、鋭い観察者がたいていそうであるように、奇妙な現象を貪欲に集めるコレクターであり…」（Gwyn Macfarlane

(1984) , p. 228) との記述がある。

さて、なぜ、意外であることがチャンスであり得るのか、その論理を確認しておこう。この論理のポイントは、自然の内包する膨大な真理、摂理に対して、我々が知るところが極めてわずかであることである。我々の全く知らない真理は、はじめは、我々に見慣れない違和感を与える姿を示す。これは当然のことである。我々は、知らないことに知らないというだけで違和感を覚えることが多いからである。この論理は、我々が、「意外さをヒントとする思考・行動様式」を持つための動機を与える。

加えて、上述の論理の源泉である我々の無知についても、セレンディピティの成功者達の言葉が多大な示唆を与える。白川 (2012, p. 12, p. 15、再掲)¹⁷⁵は、「自然は分かっているようでまだまだ分からない宝の山だということ」、「自然は解明しつくされたのか」というと、本当はそうではなく、ほんの少し分かっただけです。まだわからないことがどっさりある。分かったことの方が少ない」と語っている。

ショックレー (SHOCKLEY (1976) , p. 598) は、「自分の限界を認めるということが、いかに想像力を刺激するか、・・・それを進歩へのステップとして利用できるのだ」と記している。

ここに一部の専門家が陥る落とし穴がある。専門分野のことを多く知っていることを、自然の摂理の内の多くの割合を知っていることと錯覚する可能性である。他の人より多くを知っていても、自然の摂理を知り尽くしているわけではない。従って、ここに専門家でないことの優位性が存在し得る。

田中は、このことを含み、専門家でないことの良さを「経験や常識にとらわれずに、なんでもやってみようという気持ちを持っていたのも良かったと思います」と記している。

次に、意外さを素直に受け止めることについて考えよう。

3) 偶然の意外な結果をありのまま観察する

意外な結果、不合理な外形であれ何であれ、①現象をありのまま仔細に観察す

¹⁷⁵ 第4章1 (4) 4) 参照。

る、②執拗にくまなく観察する、③実験からの想定外の結果をも含め含意を求めきろうとすることが着眼への有効な思考・行動様式となる。

これらの思考・行動様式が、着眼に有効に作用する理由については、特段の説明は不要だろう。見落としのないように徹底して観察することで、はじめて見出し得るものがあるのだ。

①の典型事例は、導電性ポリマーにおける白川、ペニシリンにおけるフレミング、高分子質量測定における田中の事例である。MK磁石における三島、電子レンジにおけるスペンサー、チョクラルスキー法におけるチョクラルスキー等もそう言って良いだろう。彼らの仔細な観察が発見に繋がった。

②の執拗にくまなく観察することに関して、本研究で筆者が行ったインタビュー¹⁷⁶において、島津製作所の吉田佳一基盤技術研究所長は次のように語った。

「田中氏の発想・活動を、二つの変数を動かして観察する実験に例えるとわかりやすいのではないか。田中氏も多くの人、まず、変数の組合せ四つの実験を試みる。変数Xの最大/最小、変数Yの最大/最小の四つの組合せである。そして、多くの人は、その4点の結果に特段の優位な組み合わせなど意義が見出されない場合には、その二つの変数の組合せにはほぼ意味がないと考えて別の変数の組合せに着目した実験に移ることが多い。しかし、田中氏は、4点の組合せで特段の意味が見出されないと、それをさらに内分した点、外分した点の実験を試みようとする傾向を感じる。」

吉田氏は、その執念ともいえるべき思考・行動様式を「田中氏の“偉い”ところ」と表現された。

この隅々までの、虱潰しの、網羅的観察が有効である理由も、前項「偶然の意外な結果を機会・チャンスと考える」が有効である理由と同様に、「自然の内包する膨大な真理、摂理に対して、我々が知るところが極めてわずかである」という我々の無知・限界の存在である。

③の実験から想定外も含め結果を求めきろうとする思考・行動様式に関しては、フレミングと田中が顕著にその例、特性を示している。フレミングは、研究室の机

¹⁷⁶ 2014年8月19日実施。

にうず高く培養器を積み上げ、そこから得られる結果をすべて吸収しきったと考えるまで培養器を廃棄しなかった。これについては、再度にわたり、フレミングをよく知ったアリソン博士の言葉を記した¹⁷⁷通りである。

また、田中（2003, p. 139）が溶媒としてアセトンの代わりにグリセリンを用いる過ちを犯しても、それを使って実験を継続したひとつの理由として、「コバルト超微粒子粉末をマトリクスとして混ぜ込んである試料を捨てるのがもったいない。念のために実験を続けて測定しよう、結果を得よう」と考えたことはよく知られている。

4) 常に因果、原因を探求する

意外な結果、想定外の結果に着眼するもうひとつの思考・行動様式は、因果関係が理解できない事象に出会ったら、常に因果、原因を解明するという思考・行動様式である。

これは、技術者、研究者が実行すべき基本的な思考・行動様式であるが、因果関係が理解できないあらゆる意外な場合、失敗と思われる場合すべてにおいて、そうすべきなのかどうか等が今後の論点となろう。

(2) 因果解析

偶然の結果に着眼した後、因果解析が進み、論理抽出が成し遂げられると、セレンディピティが成就する。以下に因果解析のマネジメントを検討する。

1) 焦点化された専門的知識と解析能力

因果解析において、第一に必要となるのは、焦点化された専門的知識と専門的解析能力である。着眼の後に、それが確実に何であるか、そこに到る因果を明らかにするためには、一定以上の専門能力や専門的解析能力が必要とされることが多い。

例えば、導電性ポリマーにおいて、失敗生成物を見逃さなかった白川は、ほどなくそれがポリアセチレン薄膜であることを確定したが、それは、透過型/走査型電子顕微鏡による観察や、赤外・紫外スペクトラムの観察等の専門知識、解析能力によるものであった。

アリセプト創薬において、C35-808 がコリン仮説を満足することを迅速に確認し

¹⁷⁷ 第4章3 (2) 2)。

得たのは、それまでの合成・評価の試行錯誤段階を経て、コリン仮説にそってアセチルコリンエステラーゼ阻害作用の専門的評価能力や、関連する専門的探知能力を高めていたからである。C35-808 を投与したラットの振戦（ふるえ）に気が付いて、因果解析に繋がったことは、こうした専門的解析能力が磨き上げられていたことを象徴する出来事である。

江崎玲於奈¹⁷⁸が、エサキダイオードの順方向の負性抵抗を測定し得たのも、温度条件・電圧条件等様々な組み合わせの中でなされた多様な専門的解析の結果である。江崎の焦点化された専門的知識、解析能力のなせる業である。

2) 分野横断的な幅広い知識と解析能力

因果解析において、第二に必要となるのは、分野横断的な幅広い知識と解析能力である。セレンディピティにおける偶然の実験代行の意外な結果は未知の領域に広がることも多い。因果解析はそれを対象とするから、元々の実験領域の専門知識や解析能力だけでは足りないことも多い。

例えば、フォトクロミズムの事例において、入江が元々物理に近い専門領域を出発点とした化学研究者であり、物理に広がる分野横断的な知識、解析能力を有していたことは、生成物質が「可逆で安定」である理由、因果の解析に重要な意義を持った。入江が若手研究者に「研究者はいくつかの引き出しをもつことが重要」と伝えているゆえんである。

また、三島が実験材料（Fe-Al-Ni）を所定寸法に削り出そうとした際にその削り屑が落ちないことからMK磁石の発明に到ったのは、その「幅広い知識と洞察力」によるものと言われている。

逆に、フレミングがペニシリンを発見しその意義を把握していながらも、ペニシリンを迅速に広く医学界に認めさせ、量産化するに到らなかった理由のひとつは、フレミングとセント・メアリーズ病院に、化学に関する分野横断的な知識と能力が不足していたからである。そのために、フレミングがペニシリンを発見してから、フロリーとチェインらによってペニシリンが再発見され、量産化されるまでに 10

¹⁷⁸ LEO ESAKI (1973)。

数年の年月を要した¹⁷⁹のである。

3) 組織・体制・設備の条件整備

因果解析は、上述したように、焦点化された専門的知識・解析能力と分野横断的な幅広い知識と解析能力を合わせた総力戦によって成し遂げられることが多い。つまり、深さと広さの両方が必要なのである。特に、今日のように科学・工学が進歩し、知識量が膨大となり質も高まると、これを一人や少人数で実現することが困難な場合も多い。

従って、専門家同士の連携、協力が可能な組織体制、連携が求められることも多くなる。導電性ポリマーの事例において、最終的に、有機化学（白川）、無機化学（マクダイアミッド）、物理（ヒーガー）の異なる専門家による体制が有効だったと白川が評価している¹⁸⁰のは、その典型事例である。

意義の把握から、因果解析へと解析内容が広がり深まるにつれて、こうした体制が求められることになるのである。トランジスタの事例において、理論物理学者（バーディーン、ショックレー）、実験物理学者（ブラッテン）、物理化学者（ギブニー）、電気研究者（ピアソン）らがチームとして研究にあたっていたことは、特に論理抽出においても功を奏しており、現代におけるセレンディピティによるイノベーション成功のための組織・体制面での嚆矢を示している。

先述したフォトクロミズムの例においても、「可逆で安定である」因果の解析の成功は、入江と物理領域にも高い解析能力を有した企業研究者との共同作業による成果であった。

また、知識の深さと広さを求めると同時に、それを具体化する設備の充実が必要となり、それが論理抽出の重要な支えとなることもある。先述した、白川による「合成されたポリアセチレン薄膜における繊維状の構造の確認」は、透過型/走査型の電子顕微鏡等の観察によるものであった。これが可能であったのは、当時の東京工業大学における白川を取り巻く環境の充実によるものであると言えよう。

5. セレンディピティの可能性を念頭においたマネジメントの例示的素描

¹⁷⁹ 第4章3（3）参照。

¹⁸⁰ 第4章1（3）参照。

本章での検討からの示唆のまとめとして、セレンディピティの可能性を念頭においたイノベーションのマネジメントのあり方を例示的に素描しよう。

前提として、本研究のスコップである「イノベーションでの技術革新段階におけるセレンディピティ」を考察対象とする。プロダクト・イノベーション¹⁸¹に焦点をあて、巨大プロジェクト運営、製造方法の確立、コスト・ミニマム等のマネジメント要素は考えない。

全体の説明は、原則として仮説駆動型セレンディピティのマネジメントを念頭において行う。何故ならば、仮説駆動型セレンディピティは、「仮説構築」、「実験」、「実験代行」、「論理抽出」の全ステージが存在し、かつ仮説構築の本質・創造性に重要な意義がある等、「本研究から得られたセレンディピティのマネジメントへの示唆」を代表して示すのに最も適する類型だからである。実験駆動型・着眼駆動型のセレンディピティについては、仮説駆動型との差異部分について記述する。

（１）仮説構築ステージ：目的設定と仮説構築

１）目的設定

何らかの技術シーズ及び市場ニーズを基にイノベーションを企図することを想定する。まず、シーズやニーズに鑑みて、当事者の意思の結晶化、イノベーションの目的設定を行う。セレンディピティの生起も視野にいれた画期的なイノベーションを目指すにあたって、目的設定は大変重要な意味を有する。本章で先に示した通り、それが重要である理由のポイントをまとめれば次の通りである。

- ①有意義な偶然を見落とさない活動を最も広範に支えるのは、「それを探していること」、つまり目的意識の存在である。
- ②偶然を誘引、発見するための活動の本質・創造性と活動量は、並外れたものであることが望ましく、目的設定はその活動を動機づける。
- ③本質・創造的な仮説がそれに相関する偶然を誘引しその発見を可能にするが、本質・創造的な仮説構築にはそれに値する価値の高い目的設定が必須である。

目的設定に妥協があれば、意図的にセレンディピティに接近することは極めて困難だろう。

¹⁸¹ 既存の技術コンセプトを破壊するようなイノベーション。それをより安く精緻化していくプロセス・イノベーションと大別される（Utterback and Abernathy, 1975）。

これらの条件を極めて見事に体现する目的設定は、トランジスタの発明においてスピリチュアル・ファーザーと呼ばれるマービン・ケリーがショックレーらに与えた「全米に安定的な電話網を構築する。そのために全く新しい原理の増幅素子を開発する」であろう。

2) 仮説構築

仮説構築を試みると、目指しているイノベーションの特徴が明らかになる。

i) 仮説駆動型セレンディピティの可能性

イノベーションを起こそうとする対象領域に対して、比較的確実な理論・知識の立脚点があり、それに基づいて目的達成のための仮説を構築し、仮説検証の実験に着手できる場合がある。トランジスタの事例がこれに該当する。この場合は、幸運に恵まれれば、仮説駆動型のセレンディピティに結実する可能性がある。

この場合は、本質・創造的な仮説を構築し、ブラッシュアップし続けることへの注力が何より重要である。本質・創造的な仮説構築と、遭遇するかもしれない偶然の水準、セレンディピティの結果が相関するからだ。

本質・創造的な仮説構築のためには、「当然であるとして疑う、問うことを排除していた論点、当然の前提として確認、対象化することのなかった論点」に焦点を当てることが有効である。なぜならば、それが人知の限界領域で、セレンディピティは人知の限界領域にかかわるブレークスルーだからである。

この場合、仮説構築に当たる人材には、当該専門分野の深い知識蓄積、かつその限界を認識できるだけの柔軟さ、創造的な思考力が求められる。

ところで、イノベーションを起こそうとする対象領域に対して、比較的確実な理論・知識の立脚点がなく、「何かが存在する」という程度の仮説は持ち得るが、直ちに仮説検証実験に着手することが困難な場合がある。ペニシリンの事例がこれに該当する。この場合には、少しでも仮説の確度を高めつつ、その存在との遭遇を鋭敏に、執拗に待ち続けるということも有効である¹⁸²。この場合には、常識に惑わされずに仮説を保持し続け、潜在意識においてもそれを執拗に探し続けられる

¹⁸² 仮説の確度が高まり、他の条件も整えば、仮説検証実験を開始すべきだろうが、それまでは、ペンディングしつつ、待つ・観察する、ということも有力な手段である。

ような人材が求められる。

ii) 実験駆動型セレンディピティの可能性

イノベーションを起こそうとする対象領域に対して、比較的確実な理論・知識の立脚点がなく、ある程度以上に確かな仮説構築は困難だが、どうしても探索研究、実験を開始したい場合がある。アリセプトの事例がこれに該当する。この場合には、幸運に恵まれれば、実験駆動型のセレンディピティに結実¹⁸³する可能性がある。

この場合には、何らかの仮説採用に基づき研究を開始することが必要となる。不確実な理論・知識に依拠した仮説であるから、そこからの理論的帰結に囚われ過ぎず、事実を素直に見て、素朴に考えて仮説を選択するべきだろう。研究開発の開始に勇気が必要なので、目的意識、探索意欲が強固であり、事実立脚して素直に考え行動する人材が求められる。

(2) 実験ステージ：実験と評価

1) 実験計画と実験

仮説駆動型、実験駆動型、いずれの可能性を想定するとしても、実験の量と質が求められる。量の豊かさは実験計画の豊かさと多様さにより実現し、質の高さは種々の工夫により実現する。

このためには、前提として、先に示した適切な目的設定、本質・創造的な仮説構築が必須であることに加えて「実験担当者が実験好きで実験に高い動機を持っていること」が極めて重要である。導電性ポリマー、トランジスタ、ペニシリン、アリセプト、そして高分子質量測定法等のセレンディピティにおいて、実験好き、“実験の虫”が決定的な役割を果たしている。

しかし、そうした人材にとっても過酷な粘りが求められる。また、仮説構築ステージとの共振による、より良い工夫も必要だ。そのためには、チームワークが大きな支えとなる。バーディーンがブラッテンを励まし続けて、ともに実験計画の工夫にあたったように。

また活動量の増大のために、ゲーム的要素、ノルマ方式を採用するなどの工夫も

¹⁸³ もちろん、相当不確実な理論・知識に基づく仮説の採用からはじめても、仮説構築と実験を続ける内に、仮説駆動型のセレンディピティに結実する可能性もあるだろう。

検討に値しよう。

ここでは、「効率と効果のトレードオフ」がマネジメントの重要な論点になる。白川、ブラッテン、フレミング、杉本、田中らには、効率最優先でないところがあった。彼らには「要領の悪さ」があった。非効率な程度まで実験を継続したとも言えよう。

白川は、助手時代、実験に十分納得が行くまで論文が書けなかった。ブラッテンは、酸化膜が消失してしまったゲルマニウム試料を念のために試すことを厭わなかった。フレミングは極めて要領よく試験に合格するタイプだったが、こと実験に関しては、全ての結果を得尽くすまで、培養器を廃棄しなかった。杉本は失敗しても失敗しても合成を繰り返した。田中は、もったいないからと“失敗”材料を、念のために測定した。彼らは、効率を最優先しなかったが、セレンディピティの大きな成果を得た。すなわち極めて「効果的」な活動を成し遂げた。

2) 実験・評価範囲の変更・拡大

実験駆動型への可能性を想定する場合、実験・評価範囲が特に重要な意味を持つ場合が多い。そのためには、実験と評価に習熟し、評価の感度と効率を向上させることが有効である。そうすれば、より広く、多くを実験・評価できる。

また、実験・評価の試行錯誤の結果、当初の仮説による実験・評価範囲の妥当性に関する判断能力が高まれば、適宜、実験・評価範囲を変更・拡大することができる。それにより偶然の捕捉可能性を高めることができる。

実験・評価範囲の変更・拡大においては、その適切な方法論が課題となる。そのためには、杉本のマイ・ライブラリーが標榜するような、感覚的納得、アナログ知（確実ではないが全く不確実ではない知識）の活用が有効だろう。そのためには、頭だけでなく全身がセンサーとなるまでの、実験・評価への没頭も有効であろう。

(3) 論理抽出ステージ：着眼と因果解析

論理抽出については、着眼駆動型に必要な内容及び「仮説駆動型と実験駆動型」に必要な内容がほぼ一致すると考えられるので、類型によらず包括的に記述¹⁸⁴する。

¹⁸⁴ 仮説駆動型と実験駆動型においては、既にみたように、仮説構築と実験ステージが論理抽出ステージを駆動する可能性がある。その点を考慮に入れても論理抽出ステージのマネジメントに求められる内容には特段の差異はないと考える。

1) 着眼

先述したように、有意義な偶然の結果への着眼のために最も広範に“利く”のは目的意識である。従って、セレンディピティを目指すなら、何かを強く求める研究者である必要がある。マネジメントは、そうした研究者を選ばなければならない。

その上で「想定外、意外、不合理、失敗、誤り、ノイズ」に興味を持ち、それを機会・チャンスだと思う思考様式が大切である。「予期しない、いつもと違う、様子が違う、見たことがない」現象を「しめた、ピンとくる、おもしろい」と感じる研究者である必要がある。マネジメントはそうした研究者を選ばなければならない。

加えて、現象をありのままに、執拗にくまなくみる観察者である必要がある。実験・観察から結果を求めきろうとする意識が役に立つ。“失敗”原因を探求し尽くすことも有効だ。“失敗”実験を続けて観察することが有効な場合もある。

こうして、偶然の実験代行の意外な結果に着眼し、その意義を把握すれば、我々はセレンディピティの傍らにいる。

ここでも、効率と効果のトレードオフがマネジメントの重要な論点になる。いつまで観察するか、どこまで失敗原因を探求するか、どんな場合に失敗実験を継続するか。セレンディピティの成功者達は、非効率な程度まで観察を続けたとも言える。本研究では「セレンディピティのためには、やや不効率な位までが望ましいだろう、先に述べた『アナログ知』がその判断の役に立つだろう」という以上のことが言える結論に到っていない。今後の課題である。

ところで、投入資源が無駄になる可能性があることから、不効率はリスクの一種であると言って良いだろう。そこで、これに関する思考の助けとして、ドラッカー（2008, 中 p. 185）の言葉を参照しよう。「企業活動からリスクをなくそうとすることは無益である。現在の資源を未来の期待に投入することには、必然的にリスクが伴う。」続けて、彼は「マネジメント・サイエンスの主たる目標は、正しい種類のリスクを冒せるようにすることである」と言う。

セレンディピティを念頭においたマネジメントにおいて、明らかな間違いは、

「計画通りでないことを一概に咎め、軌道修復を求める」ことだと考える。「想定外、意外、予期しない、いつも（今まで）と違う、様子が違う、見たことがない」ような現象が起こって計画の軌道から外れかかった研究・開発プロセスを、常に「計画通りでないから」として、元の計画に軌道修復させようとするマネジメントは、セレンディピティの機会を排除する。

2) 因果解析

着眼に続いての因果解析に求められる能力は、概して言えば、幅広い知識と解析能力、及び組織的問題解決力である。

対象分野に焦点化された高い専門的知識と解析能力に加え、分野横断的な幅広い知識と解析能力を持ち、それを発揮する必要がある。あるいは、それが可能な連携関係を築く必要がある。連携関係のためにも、最小限の幅広い知識が必要である。そうでなければ、誰と連携・相談すれば良いのかも分からない、連携しようにもコミュニケーションがとれない。

マネジメントにおいては、組織としての幅広い解析能力、組織的問題解決能力を構築することが課題となる。この点でも、トランジスタの事例におけるベル研でのマービン・ケリーの組織作りは見事である。バーディーン・ショックレー・ブラッテン（理論・実験物理）にギブニー（化学）、ピアソン（電気）を加えたチームであった。

専門が高度化、特化した今日では、組織間連携がマネジメントの重要課題となることもあるだろう。加えて、マネジメントはこうした解析力、組織的問題解決能力を具現化する「装置やインフラ作り」にも注力する必要があるだろう。

ここまでの本研究の結果は、「マネジメントが上記の要件をクリアすることにより、当該研究者・組織が偶然の実験代行に遭遇し、それを捕捉してセレンディピティに成功する可能性が高まる」ことを示している。

6. セレンディピティを念頭においた良いマネジメント¹⁸⁵（まとめ）

以上に示したセレンディピティを念頭においたマネジメントへの示唆をまとめ、それを考える意義を吟味しよう。

セレンディピティを念頭においた良いマネジメントを駆動類型ごとに示すと次の通りである。

表 8-1 セレンディピティを念頭においた良いマネジメント

| | 仮説駆動型 | 実験駆動型 | 着眼駆動型 |
|--------------|---|--|---|
| 仮説構築 ステージ | <ul style="list-style-type: none"> ・求め続けるに値する本質的で<u>価値の高い目標を持つ</u> ・<u>本質を問う、前提を見直す</u> <u>創造的仮説を構築する</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・事実に立脚して素朴に仮説を採用する（不確かな推察を行わない） | — |
| 実験 ステージ | <ul style="list-style-type: none"> ・執拗な実験（量と工夫）の継続 ・実験好きの重用 ・非効率な程度までの実験継続 | <ul style="list-style-type: none"> ・<u>実験・評価範囲の柔軟な設定</u> （それを支える評価の感度・効率向上） | — |
| 論理抽出 ステージ | <ul style="list-style-type: none"> ・仮説に則った着眼と因果解析 ・明確、強固な目的意識を持ち続ける ・非効率な程度までの観察の継続 | <ul style="list-style-type: none"> ・実験・評価範囲に則った着眼・因果解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・意外な結果を機会と捉える ・<u>意外な結果をありのまま観察、解析する</u> ・<u>専門領域と分野横断的な知識と解析能力を高める</u> ・<u>潜在的にでも目的意識を持ち続ける</u> |

※下線は各駆動類型で、強い駆動要因に関わる重要なマネジメント要素を示す。また、枠線のないところは、セルを超えた共通要素であることを示す。

資料：筆者作成

（１）仮説駆動型を念頭においた場合の良いマネジメント

表中に示した結論のポイントを述べれば、次の通りである。

仮説構築ステージでは、求め続けるに値する本質的で価値の高い目標を持ち、本質を問う・前提を見直す創造的仮説を構築する。

実験ステージでは、執拗な実験計画により実験量を確保し、実験の工夫を継続する。これらのために実験好きを重用する。これらは実験駆動型の可能性を念頭においた場合にも共通である。

（２）実験駆動型を念頭においた場合の良いマネジメント

¹⁸⁵ マネジメントが実現すべきイノベーター、イノベーション現場のありようを示す。

仮説構築ステージでは、事実に立脚して素朴に仮説を採用する。不確かな推察をしない。

実験ステージでは、実験・評価範囲を柔軟に設定する。それを可能とする評価の感度・効率向上に努める。

(3) 駆動類型によらず、共通する論理抽出ステージでの良いマネジメント

意外な結果を機会と考え、特にそれに着眼した上で、できるだけありのままその意外な結果を観察し解析する。また、潜在的にでも目的意識を持ち続ける、何かを探し続ける。また、専門領域と分野横断的な知識と解析能力を高めることも必要である。

仮説構築型と実験駆動型では、それぞれ仮説あるいは実験・評価範囲に則った着眼・因果解析を行うことも有用である。加えて、これらの類型では、明確、強固な目的意識を持ち続けることも重要である。

(4) セレンディピティを念頭においた良いマネジメントを考える意義

以上に示した、「セレンディピティを念頭においた」良いマネジメントに対して、「セレンディピティを念頭におかない¹⁸⁶」良いマネジメント、「普通の意味での」良いマネジメントと同じではないかとの意見があり得よう。筆者のこれに対する考えは以下の通りである。

イノベーションに関して極めて良好なマネジメントを実施した良いマネジャー、あるいはそうした環境で活動した研究者からこの意見が生じるのは当然のことだと考える。何故ならば、セレンディピティを念頭においた良いマネジメントは、「普通の意味での良いマネジメントに加えることの差分 $[+\alpha]$ 」であると考えからである。

セレンディピティを念頭においた良いマネジメントが何故「普通の意味での良いマネジメント $[+\alpha]$ 」になるかと言えば、普通の意味での良いマネジメントが十分行われる環境において、実現を目指し成就するイノベーションは、本質・創造的な人知の限界に挑戦するものだろうからである。そして、本質・創造的な人知の限界に挑戦するイノベーションの成功には、本研究で示した非意図的・偶然的な要素が微少なりとも介在するだろうと考える。人知の限界を人知だけで超えることはできないはず

¹⁸⁶ 偶然が重要な契機とは言えない発見・研究、イノベーション。

だからである。

普通の意味での良いマネジメント環境で成就した、人知の限界を超えるイノベーションにおいて、「偶然が重要な契機である」とまでは言えないかもしれない。しかし、それは不可分領域をはさみセレンディピティと地続きなはずである。

従って、普通の意味での良いマネジメントとセレンディピティを念頭においた良いマネジメントの差分が $[\alpha]$ なのは当然である。 $[\alpha]$ は、セレンディピティを特に意識して、どこまで不効率な実験や観察を是とするか、その判断基準をいかに持つべきか等の、偶然と呼ぶべき不確実性を特に意識した際に求められるいくつかの事項・領域に限られるだろう¹⁸⁷。

それでは、普通の意味での良いマネジメントではなく、敢えてセレンディピティを念頭においた良いマネジメントを考え、それを提示する意味は何なのか。それは以下の通りである。

第一に、現在、普通の意味での良いマネジメントの実現が困難になっていると考えるからである。例えば、ステージゲート法での評価項目が、マイルストーンとの整合性を重視する余り、「意外な結果」に着眼する機会を失わせていることがあると考える。こうした現状に、セレンディピティのマネジメントを示すことによって、それと地続きの、「普通の意味での良いマネジメントの極み」の重要性を再認識するきっかけを提供したい。

第二に、人知の限界を大きく超え、そのために偶然が重要な契機になったセレンディピティ、すなわち、不確実性の取り込みを含む創造的なイノベーションを考えることによって、普通の意味での良いマネジメントに求められることを、より明瞭に捉えられると考えるからである。ゴムを極限まで伸ばし、そこで求められることを解析・説明すれば、少し戻したところで求められることがより明らかになるだろうという考え方である。

¹⁸⁷ しかし、第9章7（2）の「今後の研究に関する展望」に示す通り、今後のセレンディピティ研究の進展によっては、 $[\alpha]$ がイノベーション理論と実践の研究において、より大きな意味を持つ可能性があると考ええる。

第9章 結言

本章では、第一章で述べた本研究の動機、リサーチクエスションに即して、本研究全体の結論を記述する。それを踏まえて、本研究の貢献とそれに基づく今後のセレンディピティ研究の可能性について展望する。

1. セレンディピティの存在

セレンディピティは存在すると言って良いだろうか。本研究の定義に従って述べれば¹⁸⁸、「偶然が重要な契機となり、その結果に着目して価値のあるものを見つけること」に該当し、かつ「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」に繋がることが起こっていると言えるだろうか。

本研究全体を通じて、筆者は、「セレンディピティは存在する」と考えるべきであるとの結論を得た。その根拠は第一に、本研究に示した事例である。導電性ポリマー、トランジスタ、ペニシリン、アリセプトはいずれも、「偶然が重要な契機となり、その結果に着目して価値のあるものを見つけること」に該当し、かつ「技術革新の結果として新しい製品を生み出すことによって人間の社会生活を大きく改変している」と言える事例である。第7章で取り上げた14事例も、同じく本研究でのセレンディピティの定義に該当すると言って良いと考える。

セレンディピティが存在することは、事例の存在からだけでなく、理論を根拠としても認められる。その根拠は、「自然の摂理の多様性、奥行き、無限の深さ」に対する「人知」の限界である。分野、時代等による差はあるものの、我々が知るのは、自然の摂理という氷山の、ごく一角というべきである。そして、人知は、自身が何を知らないかを、「それを知った後のように」知ることは不可能である。そこで、「偶然による実験代行」が、人知・人間の意図的営為に代わり、実験を代行し「自然自身の摂理」を示すのである。以上が、人知に限界があり、偶然が実験代行によりその限界を克服することから確認できるセレンディピティの存在理論である。

¹⁸⁸ 第6章3(6)、第8章6(4)に示した通り、本研究でのセレンディピティの定義「偶然が重要な契機となり・・・」は、相対的な概念であり、異なる結論を排除するものではない。それでも敢えてセレンディピティを考える意図は、特に第8章6(4)に示した通りである。

2. セレンディピティにおける偶然と必然

(1) セレンディピティにおける偶然

セレンディピティの存否に続く、本研究の次なる問いが、いかなる偶然が、セレンディピティのプロセスのどこで、どのような作用を果たすかである。これについては、上述したようにセレンディピティの存在そのものの意味、「実験代行」として答えが導かれた。本研究の言葉で語れば、偶然は、「仮説構築」ステージ¹⁸⁹に続く「実験」ステージと呼ぶ意図的営為の段階で起こる。そこで偶然は、実験代行の作用を果たし、自然の摂理を内包する結果を我々に提示する。

(2) セレンディピティにおける必然

偶然の果たす作用に続く、本研究の問いは、いかなる必然（意図的営為）がセレンディピティのプロセスのどこでどのような作用を果たすかである。本研究の結果として、必然が作用するプロセスは大きく2か所あることを示した。ひとつが偶然の生起前であり、もうひとつが偶然の生起後である。

偶然の生起前の必然（事前必然）は、目的設定、仮説構築、実験、評価の4段階をなす。本研究では、目的設定と仮説構築を「仮説構築」ステージ、実験と評価を「実験」ステージと呼び、その内容と作用を把握した。

偶然の生起後の必然（事後必然）は、偶然の実験代行結果に対して着眼し因果を解析し、セレンディピティを成就することである。本研究では、これを「論理抽出」ステージと呼び、その内容と作用を把握した。

以下に、仮説構築、実験、実験代行、論理抽出の各ステージの相互作用を記述する。

(3) セレンディピティにおける偶然と必然の相互作用

1) 「仮説構築」ステージが「実験」ステージに果たす駆動作用

仮説構築がなければ、我々は行動を開始し得ない。すなわち、仮説構築は実験を起動する。加えて、実験がなされることによってはじめて偶然が生起し得るから、仮説構築がなければ、その狙いに即したセレンディピティは起こらない¹⁹⁰。

2) 「仮説構築」ステージが「実験代行」ステージに果たす駆動作用

仮説構築は、偶然による意図せざる実験代行に相関、それを誘引する。仮説構築

¹⁸⁹ ただし、本研究で着眼駆動型と呼ぶ、仮説構築がなく、「突然」偶然が起こる類型も存在する。

¹⁹⁰ 仮説構築がなければ、着眼駆動型のセレンディピティのみが起こりうる。

の「本質・創造性」に応じて「良い偶然」としての実験代行が起こる。仮説構築、特に仮説の本質・創造性とは、「それ以前の人知に対して、本質的な限界・盲点を対象化してそれを検討する」ことである。良い偶然とは、既存の人知からの大きな飛躍、既存の知識の本質的で大きな盲点の補完等に繋がる偶然である。

3)「仮説構築」ステージが「論理抽出」ステージに果たす駆動作用

仮説構築は、実験代行の結果に対する論理抽出を促進する。仮説構築で、ある事象の存在を仮説として有していれば、偶然による意図せざる実験代行の結果としてその事象が生起した際、それを無視せず論理抽出に成功する可能性が高まる。

4)「実験」ステージが「実験代行」ステージに果たす駆動作用

実験は実験代行を誘引する。執拗な実験、すなわち実験量と工夫が偶然による意図せざる実験代行の生起の可能性を高める。乏しい実験量、少ない工夫からは実験代行は生起しにくい。なお、執拗な実験のためには、前提となる仮説構築に本質・創造性が求められる。

5)「実験」ステージが「論理抽出」ステージに果たす駆動作用

実験・評価の結果、それらが基礎としている仮説の限界が認識され、実験・評価範囲が変更・拡大されることがある。これにより、実験代行が、本来なら思いもよらぬ範囲で生起しても、予めそれを実験・評価範囲としていることにより、その着眼、因果解析の可能性が高まる。すなわち、実験が論理抽出を起動する。

6)「論理抽出」ステージが自律的に果たす駆動作用

偶然による意図せざる実験代行の結果は、不合理な外形を示す。従って、論理抽出には困難が伴う。以下の駆動要因が自律的にその困難を克服して、実験代行結果からの論理抽出を可能とする。

i)強い目的意識

論理抽出ステージを自律・直接的に起動する、極めて重要な駆動要因は、強い目的意識である。目的意識には、その具体性に大きな幅がある。何か分からないが何かがあるはずだから見出したいという広さから、これがこの方法で実現できるはずだからそれを見出したいという狭さまでの幅である。いずれにしても、何かを求めていることは、論理抽出に対する極めて一般的な駆動作用を果たす。

ii)高い解析力

論理抽出ステージを自律的に駆動、促進する、第二の重要な駆動要因は高い解析力である。以下の二種類の解析力が駆動作用を果たす。

①偶然の意外な現象、外形を機会と考える解析力

②現象を素直に観察し、現象の内容を解明する解析力

3. セレンディピティのプロセスモデル

ここまで示した通り、「仮説構築」、「実験」、「実験代行」、「論理抽出」の各ステージからなるセレンディピティのプロセスモデルを構築、提案した。

4. セレンディピティの駆動力による類型化と類型化モデル

上述のプロセスモデルに基づいて、セレンディピティに関してそれを特に駆動するステージを分析し、その結果に基づき、駆動力によるセレンディピティの類型化モデルを構築した。その結論は、着眼駆動型、実験駆動型、仮説駆動型の三種類の提案である。

着眼駆動型は、突然の実験代行結果に対して、特に着眼力により、論理抽出が成し遂げられ、セレンディピティが成就する類型である。

実験駆動型は、特に実験・評価範囲を変更・拡大することにより、実験代行の結果を捕捉し、論理抽出を成し遂げてセレンディピティが成就する類型である。

仮説駆動型は、仮説構築の本質・創造性が、特に実験代行、加えて、論理抽出を駆動してセレンディピティが成就する類型である。

5. セレンディピティのプロセスモデル、類型化モデルの普遍性確認

本研究の結果の中核をなすプロセスモデルと類型化モデルについて、14 事例を対象にその普遍性、妥当性を検討した。比較的多数の事例の理解と説明可能性に基づいて両モデルの普遍性、妥当性が確認できた。

6. セレンディピティのマネジメント可能性

上述の本研究全体に立脚して、セレンディピティのマネジメント可能性について検討した。セレンディピティのマネジメントに関して重要な示唆と論点¹⁹¹が得られたと考え

¹⁹¹ 論点の詳細検討は、セレンディピティの構造理解を主眼とする本研究の検討範囲を超えた今後の課題であると考えている。

る。

7. 本研究の主たる貢献と今後の研究に関する展望

(1) 本研究の貢献は、セレンディピティを可視化する枠組みの提示である

本研究の主たる貢献は、セレンディピティの構造を可視化して議論し得る枠組みを提示したことである。

本研究では、セレンディピティ「偶然が重要な契機となり、その結果に着目して価値のあるものを見つけること」について、次の二条件で焦点化した研究スコープにおいて、その構造を可視化する枠組みを構築した。

①イノベーションに結実したセレンディピティを考える。イノベーションとは、「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。

②セレンディピティによって成就したイノベーションにおける技術革新の成立過程¹⁹²に研究対象を絞る。量産化、事業化、普及等の過程を研究対象としない。

(2) 今後の研究に関するミクロ視点、マクロ視点での展望

上述の枠組みを、本研究のスコープよりもミクロ、あるいはマクロな経営対象に適用することにより、新たな研究分野を拓き、有意義な結果を得ることが可能であると考える。

この際に、本研究で提示した可視化の視点は、基本的な方法論としての有効性を保つだろう。本研究が5万分の1の地図であるとするならば、それは5千分の1の地図を読む際の全体像、あるいは同型性を示すものとして有効だろう。逆に50万分の1の地図を読む際の細部構造、あるいは同型性を示すものとして有効だと考える。

1) ミクロな視点でのセレンディピティの研究

本研究は、敢えて対象分野を絞らず、化学、物理、医学・薬学分野を研究対象とした。これは、セレンディピティを構造的に理解するための出発点として、複数分野を対象とした方が、良い見通しが得られると考えたからである。

本研究は、その狙いの結果を得たが、一方、本研究の成果から、分野によりセレンディピティの実態、構造に違いがあることも把握できた。例えば、薬学の分野に

¹⁹² 研究対象を、更にその核心のみに絞っている部分もある。

は実験駆動型のセレンディピティが多く見られた。すなわち、従来、薬学の分野では、比較的確実な理論・知識の立脚点がない状況で研究を開始せざるを得ず、執拗な実験での試行錯誤を踏まえて、実験・評価範囲を適切に設定することが重要だったと考えられる。また、遭遇する実験代行の結果の意外さは、「明確な目的意識を持って求めていたことが仮説の想定範囲に照らせば意外な実験・評価範囲で生じた」という性格を有している。

このように、分野を絞ってセレンディピティの研究を深耕すれば、分野ごとのセレンディピティのより精緻な可視化が可能となろう。それは、その分野の実務への示唆を的確にすると同時に、セレンディピティ研究の理論的レベルを上げることが可能になると考える。

例えば、薬学分野で実験・評価範囲を適切に設定するための「アナログ知¹⁹³」の意義やその獲得方法を研究すれば、実務、理論の両面への貢献を高められよう。

その他、化学、物理、医学等の分野ごとに、その不確実さの程度や態様に応じて、セレンディピティを目指して、「いかなる程度まで冗長とも思える観察・実験を継続するべきか、その判断基準は何か」等についての科学的知見が得られる可能性がある。

2) マクロな視点でのセレンディピティの研究

本研究は、上述したように、セレンディピティによって成就したイノベーションにおける技術革新の成立過程¹⁹⁴に研究対象を絞って行った。しかし、ここで得た可視化の枠組みは、量産化、事業化、普及等の過程、より多数の人間、組織、社会が関わる段階におけるセレンディピティに対しても応用可能であると考ええる。

本研究からも応用対象の候補が見出されている。

例えば、導電性ポリマーは、白川がポリアセチレン薄膜を得てから7年後、偶然、白川がマクダイアミッドと出会うことにより次の段階に進み、ヨウ素ドーピングによる導電性の付与に到った。この偶然を人間系に対する「意図せざる行為代行」と捉えることで、こうした過程におけるセレンディピティを理解することでも

¹⁹³ 第8章3(2)参照。確実ではないが全く不確実でもない知。

¹⁹⁴ 研究対象を、更にその核心のみに絞っている部分もある。

きるだろう。この場合、行為代行の意外な結果を発見する「必然」には、どんな思考・行動様式が求められるのだろうか、あるいはいかなる組織特性がその環境としてふさわしいのだろうか。さらには、いかなる理論（仮説、戦略、戦術）とその実践が、こうした行為代行業を誘引し、その結果を見落とさず発見する駆動要因となるのだろうか。

フレミングがペニシリンを発見してから、11年後、フロリーとチェインが抗生作用による殺菌剤の開発を目的として網羅的な調査を行い、フレミングの研究を発見、ペニシリンを再発見したことから、米英の資本・技術が投下されペニシリンの量産化が実現した。フロリーによる再発見の重要な契機は、彼が胃粘膜を痛めフレミングのリゾチームの研究に強い関心を持ったことであつた。ここにも意図的行為の連続だけではなく、偶然が作用したように思われる。この量産化への過程を、本研究の視点、枠組みを拡張して理解すると、いかなる構造的理解、示唆が得られるだろうか。

また、インテルのメモリ企業からマイクロプロセッサ企業への転換¹⁹⁵の端緒は、戦略・計画的な新規事業化ではなく日本の電卓企業からの依頼への対応であつた。更に、インテルのマイクロプロセッサが圧倒的な標準となったきっかけとしても、インテル自身の仕掛けではなく、IBMによる採用が大きな意味を持ったと言われる¹⁹⁶。こうした企業戦略における非意図的現象、偶然への対応とその帰結を本研究の枠組みの変形・拡張で捉える挑戦の可能性も拓けよう。

（3）セレンディピティに関する構造的理解の枠組みとしての本研究の位置づけ

本研究は、セレンディピティに関する構造的理解の枠組み作りの端緒となるべく実施した。そして、上述したように、本研究で得た枠組みは、よりミクロ視点、あるいはマクロ視点でのセレンディピティ研究への発展可能性を示していると考える。今後、そうした研究の活性化がイノベーション理論と実践の研究の発展に貢献し、本研究がその礎となることができれば、筆者にとっては、望外の喜びである。

¹⁹⁵ インテルの歩み（www.intel.com/content/www/jp/ja/.../history-pdf.htm, 2015年2月16日取得）

¹⁹⁶ 佐野正博『パソコン市場形成期におけるIBMの技術戦略』（www.kisc.meiji.ac.jp/~sano/.../Tech-Strategy-IBM-PC-ver3-02.pdf, 2015年2月16日取得）

参考資料

1 章

- 伊丹敬之 (2009). 『イノベーションを興す』 日本経済新聞出版社.
- 伊丹敬之 (1986). 「イノベーションにおける偶然と必然」 今井賢一 (編著)
『イノベーションと組織』 第二章. 日本経済新聞出版社.
- 沼上幹 (2000). 『行為の経営学』 白桃書房.
- Merton, R.K. (1936). *The Unanticipated Consequences of Purposive Social Action*,
American Sociological Review, Vol. 1, pp.894-904.

3 章

- 伊丹敬之 (1986). 「イノベーションにおける偶然と必然」 今井賢一 (編著)
『イノベーションと組織』 第二章. 日本経済新聞出版社.
- 榊原清則 (2011). 「偶然のイノベーション物語」『一橋ビジネスレビュー』 59 巻 2 号-60
巻 3 号. 東洋経済新報社.
- 澤泉重一 (2002). 『偶然からモノを見つけだす能力 - 「セレンディピティ」の活かし方』
角川書店.
- 丹羽清 (2006). 『技術経営論』 東京大学出版会.
- 宮永博史 (2006). 『成功者の絶対法則 セレンディピティ』 祥伝社.
- Gilbert Shapiro (1986). *A Skeleton in the Darkroom: Stories of Serendipity in
Science* : Harper Collins (新関暢一訳『創造的発見と偶然』 東京化学同人,
1993 年).
- Mark de Rond & Iain Morley (2012). *Serendipity: Fortune and the Prepared Mind
(Darwin College Lectures)* : Cambridge University Press.
- Matt Kingdon (2012). *The Science of Serendipity: How to Unlock the Promise of
Innovation* : Wiley.
- Royston M. Robert (1989). *SERENDIPITY: Accidental Discoveries in Science* :
Stephen Kippur (安藤喬志訳『セレンディピティー思いがけない発見・発明の
ドラマ』 化学同人, 1993 年).

4 章

(1) 導電性ポリマー

- 赤木和夫他編 (2002). 『白川英樹博士と導電性高分子』 化学同人.
- 白川英樹 (2001a). 『化学に魅せられて』 岩波書店.

- 白川英樹 (2001b). 『私の歩んだ道—ノーベル化学賞の発想』 朝日新聞社.
- 白川英樹 (2007). 『Serendipity と創造性』 *neurosonology*20(1) (pp.2-6).
- 白川英樹 (2008). 「学際領域における導電性ポリマーの研究とノーベル化学賞」『応用物理』 第 77 巻第 8 号 (pp.903-909).
- 白川英樹 (2012). 『私の歩んだ道～自然に学ぶ』 慶應義塾大学 理工学部における講演録 (http://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/download.php?koara_id=KO50001001-20120000-0007, 2013 年 8 月 4 日取得)
- Alan G. MacDiarmid (2000). *Biographical*: Nobelprize.org. (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/macdiarmid-facts.html, 2013 年 8 月 4 日取得)
- Hideki Shirakawa (2000). *Nobel Lecture The Discovery of Polyacetylene Film: The Dawning of an Era of Conducting Polymers*: Nobelprize.org. (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/shirakawa-lecture.pdf, 2013 年 8 月 4 日取得)

(2) トランジスタ

- 菊池誠 (1972). 『幸運な失敗 トランジスタの誕生』 日本放送出版協会.
- 菊池誠 (2006). 『若きエンジニアへの手紙』 工学図書.
- 菊池誠 (2007). 「半導体研究 思い出の人びと —キーパーソンが残した研究—」『半導体シニア協会ニューズレター』 No.50.
- 谷光太郎 (2012). 「ベル研究所におけるトランジスタ発明者 3 人の人間像」『山口経済学雑誌』 第 47 巻 1 号 (pp.113-152)
- Joel N. Shurkin (2008). *Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age*: Palgrave Macmillan.
- JOHN BARDEEN (1956). *Nobel Lecture Semiconductor research leading to the point contact transistor*: Nobelprize.org. (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/bardeen-lecture.pdf, 2013 年 9 月 3 日取得) (中村誠太郎他編『ノーベル賞講演 物理学 1956～1958 第 8 巻』講談社, 1980 年).
- John Bardeen, Summit, and Walter H. Brattain et.al, *THREE-ELECTRODE CIRCUIT ELEMENT UTILIZING SEMICONDUCTIVE MATERIALS*: US Patented Oct. 3, 1950 2,524,035
- Lillian Hoddeson et. Al, (2005). *True Genius: The Life And Science Of John Bardeen, The only Winner of Two Nobel Prizes in Physics*: Joseph Henry Pr.
- Michael Riordan, Lillian Hoddeson (1997). *Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age (Sloan Technology Series)*: W W Norton & Co Inc. (鶴岡 雄二・ディーンマツシゲ訳『電子の巨人たち 上・

下』ソフトバンククリエイティブ, 1998 年).

WILLIAM SHOCKLEY (1956). *Nobel Lecture Transistor technology evokes new physics*: Nobelprize.org.

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/shockley-lecture.pdf, 2013 年 9 月 3 日取得) (中村誠太郎他編『ノーベル賞講演 物理学 1956～1958』講談社, 1980 年).

WILLIAM SHOCKLEY (1973). *The Invention of the Transistor-An Example of Creative-Failure Methodology*: National Bureau of Standards Special Publication 388, Proc. of Conf. on the Public Need and the Role of the Inventor (Monterey, Calif.), (pp. 47-89). June 1-14. WILLIAM SHOCKLEY 講演録『トランジスタの歴史と応用研究および科学教育』電気学会雑誌.

WILLIAM SHOCKLEY (1976). *The path to the conception of the junction transistor*: Electron Devices, IEEE Transa, Volume:23 Issue:7. (「接合型トランジスタ発明までの道」『エレクトロニクス・イノベーションズ』日経エレクトロニクス・ブックス, 日経マグローヒル社, 1981 年).

(3) ペニシリン

ALEXANDER FLEMING (1945). *Nobel Lecture Penicillin*, : Nobelprize.org. (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1945/fleming-lecture.pdf, 2013 年 8 月 15 日取得) (川喜田愛郎, ノーベル財団 (1985)『ノーベル賞講演生理学・医学: 1945-1949. 第 7 巻』講談社).

ANDRÉ MAUROIS (1958). *THE LIFE OF Sir Alexander Fleming*: E. P. Dutton. (新庄嘉章・平岡篤頼訳『フレミングの生涯』新潮社, 1959 年).

Gwyn Macfarlane (1984). *Alexander Fleming: The Man and the Myth*, : Harvard University Press (グウィン マクファーレン (著), 北村二郎 (翻訳)『奇跡の薬—ペニシリンとフレミング神話 (二十世紀メモリアル)』平凡社, 1990 年).

Ronald Hare (1970). *Birth of Penicillin and the Disarming of Microbes*: Allen & Unwi

(4) アリセプト

飯村洋一 (2004 年度)『塾員往来』

(http://www.st.keio.ac.jp/ob_relay/ob_0407.html, 2013 年 5 月 22 日取得)

石井正道 (2005).『独創的な商品開発を担う研究者・技術者の研究』Discussion Paper No.38, 科学技術政策研究所.

梅田悦生 (2002).『奇跡の新薬開発プロジェクト』講談社.

エーザイ(株) (2014).『アニュアルレポート 2013』

(<http://www.eisai.co.jp/pdf/annual/pdf2013an.pdf>, 2014 年 8 月 17 日取得)

小野善生 (2004).「エーザイ」『ビジネスケースブック 3』一橋ビジネスレビュー編集部,

東洋経済新報社.

川上義之 (1999). 「構造生物学とドラッグデザイン-Structure-Based Drug Design
を目指して-」『構造生物』 Voi.5 No.2

(<http://www.sbsp.jp/sbsp/Sb/sb52/062.html>, 2013 年 5 月 2 日取得)

京都大学大学院薬学研究科 (2007). 『新しい薬をどう創るか』 講談社.

桑島健一 (2006). 『不確実性のマネジメント-新薬創出の R&D の「解」』 日経 BP 社.

佐藤健太郎 (2011). 『創薬科学入門-薬はどのようにつくられる?』 オーム社.

杉本八郎 (2007 [推定]). 『アルツハイマー病治療薬開発の夢を追って』

(<http://www.rsihata.com/pdf/070108cre2.pdf>, 2013 年 5 月 22 日取得)

杉本八郎 (2010). 『杉本八郎 創薬への途-新薬創薬概論 創薬へ続く 10 の物語』 京都廣
川書店.

西野和美 (2002). 『製品開発における非線形性と市場に蓄積された資源の利用』 一橋大
学 博士論文.

5 章

伊丹敬之 (1986). 「イノベーションにおける偶然と必然」 今井賢一 (編著)

『イノベーションと組織』 第二章. 日本経済新聞出版社.

伊丹敬之 (2009). 『イノベーションを興す』 日本経済新聞出版社.

榊原清則 (2011). 『偶然のイノベーション物語』 一橋大学イノベーション研究センター
(2011-2012) 「一橋ビジネスレビュー」, 59-3 59-4, 60-1, 60-2, 60-3, 60-4,

東洋経済新報社 ←2014. 2.24 追記

澤泉重一 (2002). 『偶然からモノを見つけだす能力 - 「セレンディピティ」の活かし方』
角川書店.

日本製薬工業協会・広報委員会 (2014). 『製薬 DATABOOK 2014』 医薬出版センター.

濱崎和磨・丹羽清 (2007). 『イノベーションのための試行錯誤マネジメントの提案』

「Citation 年次学術大会講演要旨集」 22: p408-411

(<http://hdl.handle.net/10119/7297>)

宮永博史 (2006). 『成功者の絶対法則 セレンディピティ』 祥伝社.

6 章

Royston M. Robert (1989). *SERENDIPITY: Accidental Discoveries in Science*, :

Stephen Kippur (安藤喬志訳『セレンディピティー思いがけない発見・発明のド
ラマ』 化学同人, 1993 年).

7 章

1. 着眼駆動型

(1) MK磁石

小岩昌宏 (2004).『金属学プロムナードーセレンディピティを追ってー』アグネ技術センター.

小澤純夫 (2010).「資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題」『科学技術動向』,2010 年 9 月.

特許庁 (2011).「三島徳七」『十大発明家』.

(<http://www.jpo.go.jp/seido/rekishi/judai.htm>,2014 年 8 月 19 日取得)

三島徳七 (1964).『私の履歴書 (第 20 集)』日本経済出版社.

(2) 電子レンジ

堀越智・阿部雅彦 (2009).「-マイクロ波を用いた化学-環境保全への展開」『色材協会誌』82[2],69-75

Lemelson Center for Study of Invention and Innovation, *Percy Spencer Microwave Inventor*

(http://www.inventionatplay.org/inventors_spe.html#,2014 年 8 月 22 日取得)

(3) ピッチ系炭素繊維

大谷杉郎 (2010).「ピッチ系単層繊維 哲学を持った研究と企業の優秀なキーマンとの出会い」『産学連携ジャーナル』.

(http://sangakukan.jp/journal/journal_contents/2010/02/articles/1002-02-1/1002-02-1_article.html,2014 年 8 月 21 日取得)

平松徹 (2012).『炭素繊維の本』日刊工業新聞社.

(4) チョクラルスキー法

竹内淳 (2007).『半導体の原理』講談社.

Helmut Föll, *Electronic Materials*, University of Kiel; Faculty of Engineering

(http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/,2014 年 8 月 21 日取得)

2. 実験駆動型

(1) リュープロレリン

藤野雅彦他 (1994).「前立腺癌を治す薬ーリュープリン」『今話題のくすりー開発の背景と薬効』日本農芸化学会編,学術出版センター.

藤野雅彦 (2003).「ロングインタビュー 檄!」『日経バイオビジネス』2003 年 8 月号,日経 BP.

(2) リブリウム、(3) イミプラミン

Royston M. Robert (1989). *SERENDIPITY: Accidental Discoveries in Science* :

Stephen Kippur (安藤喬志訳『セレンディピティー思いがけない発見・発明のドラマ』化学同人,1993 年).

(4) 垂直磁気記録媒体

岩崎俊一 (1994).「技術開発の原点」『みやぎ工業技術情報』宮城県産業技術総合センタ

一.

(<http://www.mit.pref.miyagi.jp/jouhoushi/125/125.html>, 2014 年 9 月 6 日取得)

七十七銀行 (2010). 「垂直磁気記録方式と岩崎俊一博士」『七十七ビジネス情報』

2010.10.22, Shun-ichi Iwasaki (2010). *Japan Prize Commemorative Lecture in Japanese*,

(<http://y2u.be/KuP5SQSi9Ow>, 2014 年 8 月 25 日取得)

3. 仮説駆動型

(1) 高分子質量測定法

喜利元貞 (2014). 「TOF-MS 開発、3. 開発研究の美例」『モノを調べるコンピュータの話』

(http://homepage2.nifty.com/kirislab/chap9_sum/newNobel/researchTOFMS.html, 2014 年 8 月 18 日取得)

田中耕一 (2003). 『生涯最高の失敗』朝日新聞出版社.

(2) フォトクロミズム

入江正浩 (2009). 「光に応答する分子 - 平成 21 年 宮中講書始の儀におけるご進講」『学術の動向』, 2009 年 3 月.

入江正浩 (2012). 「2.1 ジアリアルエテンの発見」『フォトクロミズム』高分子学会編, 協立出版.

(3) エサキダイオード

江崎玲於奈 (2007). 『限界への挑戦』日本経済新聞社.

LEO ESAKI (1973). *Nobel Lecture LONG JOURNEY INTO TUNNELING* :

Nobelprize.org(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1973/esaki-lecture.pdf, 2014 年 9 月 28 日取得), (中村誠太郎他編『ノーベル賞講演 物理学 1973~1976 第 12 巻』講談社, 1980 年)

(4) IGZO 液晶の省電力駆動

ファイル・ウェブ編集部 (2012) 『シャープ、IGZO 技術説明会を開催』

(<http://www.phileweb.com/news/d-av/201212/21/32203.html>, 2013 年 6 月 7 日取得)

松尾拓哉 (2013). 『消費電力 5 分の 1 の液晶パネル「IGZO」開発リーダー』

毎日新聞朝刊 2013 年 1 月 5 日 4 面

(5) MnAlC 磁石

小澤純夫 (2010). 「資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題」『科学技術動向』, 2010 年 9 月

ネオマグ(株) (2014). 『永久磁石の歴史と磁気科学の発展』

(http://www.neomag.jp/magnet_history/history_23.php, 2014 年 8 月 25 日取

得)

(6) ネオジム磁石

佐川真人 (2012). 「京都特別講演 世界最強ネオジム磁石、誕生秘話」

(<http://y2u.be/PwKAk2CsfzI>, YouTube 動画, 2014 年 8 月 25 日取得)

佐川真人 (2013). 「「脱レアアース」は無用 最強の磁石さらに強く」『FACTA online』

2013 年 3 月 (<http://facta.co.jp/article/201303014.html>, 2014 年 8 月 25 日取得)

ネオマグ(株) (2014). 『永久磁石の歴史と磁気科学の発展』

(http://www.neomag.jp/magnet_history/history_23.php, 2014 年 8 月 25 日取得)

7 章

James M Utterback and William J Abernathy (1975). *A dynamic model of process and product innovation*, Omega, Vol.3. No.6, pp.639-656

8 章

ドラッカー (2008). 『マネジメント』.ダイヤモンド社.

Edward L. Deci (1975). *Intrinsic Motivation (Perception and Perceptual*

Development): Plenum Pub Corp. (安藤延男・石田梅男訳『内発的動機づけ—実験社会心理学的アプローチ』誠信書房, 1980 年)

なお、本文中での参考文献・資料の引用において、本文の前後関係、用語・表記の統一等のために、用語・表記の変更、また省略等の特記なく行っているところがあります。特に、参考資料で「痴呆症」となっているところは全て「認知症」に、「精神分裂病」は全て「統合失調症」に変更しています。

また、本文中での参考資料の引用ページの記述について、英語が原著のものについては、全て原著のページ数を記しています。

インタビュー (敬称略)

株式会社 島津製作所

2014 年 8 月 19 日 (火) 東京支社 (東京都千代田区)

常務執行役員 基盤技術研究所所長 吉田佳一

立教大学

2014 年 5 月 26 日 (月) 理学部 (東京都豊島区)

未来分子研究センター 入江正弘