

# How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories.

Dunbar, Kevin

Janet E. Davidson & Robert J. Sternberg (Eds), *The nature of insight* (1995).  
Cambridge, MA, US: The MIT Press, pp. 365-395.

## 1. Introduction

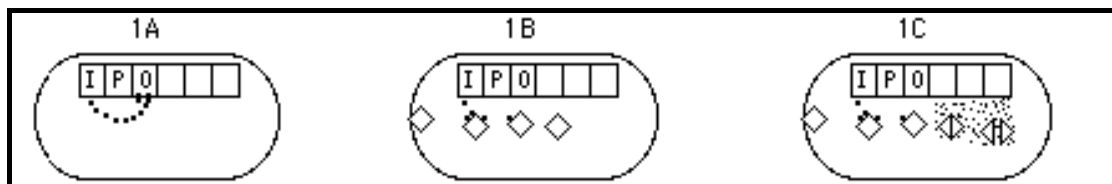
- ▶ 科学者はどのように考え、推論しているのか？
- ▶ 科学的推論や発見に含まれる心的プロセスとは何か？

### ◇ 2つのアプローチ

- ▶ “*In Vitro*” research
  - 現実の科学場面と類似した課題を行わせる
- ▶ “*In Vivo*” research
  - 科学者が実際に研究をしているところを調べる

## 2. *In Vitro* Research: Simulating the Discovery of Genetic Control

- ▶ Jacques Monod and François Jacob の発見を利用
  - 他の遺伝子の活動を抑制する遺伝子の存在の発見
- ▶ 2つの遺伝子 I, O がベータガラクトシターゼを生成する遺伝子の活性化をコントロール
  - ラクトース（ひし形）が存在しないとき (Figure 1A)
    - ・ I が生成した阻害物質が O と結合
    - ・ O が  $\beta$ -gal 生成遺伝子を抑制



**Figure 1.** The cycle of inhibitory regulation of genes in *E. coli*. In Figure 1A the *E. coli* is in an inhibited state: The I gene sends an Inhibitor to the O gene, and the inhibitor binds to the O gene, this blocks production of beta-gal from the three beta-gal producing genes (the three unlabeled genes). In Figure 1B, lactose (diamonds) enters the *E. coli*. The inhibitor binds to the lactose and not the O gene. In Figure 1C, the beta-gal producing genes are no longer inhibited and the beta genes produce beta-gal (small dots). The beta-gal cleaves the lactose into glucose which can then be utilized as an energy source. When all the lactose has been used up the inhibitor binds to the O gene and the beta-gal genes are inhibited from producing beta-gal as in Figure 1A.

- ラクトース（ひし形）が存在するとき（Figure 1B, C）
  - ・ I が生成した阻害物質がラクトースと結合
  - ・ O は抑制しない
  - ・  $\beta$ -gal 生成遺伝子が  $\beta$ -gal を生成
- 全てのラクトースを利用すると再び抑制が起こる
- ▶ Jacques Monod and François Jacob は遺伝子の活性化の切り替えにより制御されると考えていた
  - 多くの実験を経て、制御メカニズムが抑制であることを発見した
  
- ◇ Jacques Monod and François Jacob の研究に基づいて課題をデザイン
  - ▶ 遺伝子構造に関する仮説の生成，テストが可能
  - ▶ 事前に活性化の知識を与える
    - 初めに活性化の仮説をたてる
  
- ◇ 研究 1
  - ▶ 初めに活性化の仮説をたてる
    - 仮説を支持する証拠が得られない
  - ▶ 2つの方略
    - 現在の活性化の仮説を使い続ける
      - ・ この方略を使い正しい構造にたどり着いた参加者はいない
    - 支持しない証拠を説明するという新しいゴールを作る
      - ・ 新しい仮説を生成することができた
  - ▶ 結論
    - 参加者は初めの仮説を支持する証拠を見つけることを目標とした
    - この目標は他のゴール（予期しない発見を説明するなど）の設定を阻害する
  
- ◇ 研究 2
  - ▶ 1つの遺伝子を活性化因子，他の 2つを阻害因子と設定する
  - ▶ 2倍の参加者が阻害について考案し，より多くの参加者が正しい結論にたどり着いた
    - 1つめの目標である活性化仮説を支持する証拠を見つける
    - その後，支持しない証拠を説明するという目標をたてる

☆ まとめ

- ▶ 現在のゴールが支持しない証拠の利用法に影響する
  - 初めのゴールを保つ → 発見しない
  - 支持しない証拠を説明するという新しいゴールをたてる → 発見

### 3. *In Vivo* Research: Real World Study of Scientists Reasoning

☆ 問題点

- ▶ 社会的文脈（グループ）の欠如
- ▶ “現実の” 科学的問題ではない
- ▶ 参加者が科学者ではない
- ▶ 時間が短い

☆ これまでのアプローチ

- ▶ 歴史的データの利用
  - 間接的
  - 選択的なアクセス
- ▶ インタビュー
  - 回顧報告 = 信頼性が低い
  - 発見のきっかけは意識されない
- ▶ 時系列的社会的アプローチ
  - エスノメソドロジー，インタビュー
  - 認知過程に注目していない
- ▶ これまでの研究のまとめ
  - 多くの認知的なヒューリスティックが科学的推論を形作る
- ▶ 問題点
  - 現実の科学者の日々の研究を直接的に調べていない

### 4. How Scientists Really Think

☆ 6つのゴール

1. 科学者は実験の提案，仮説の生成，結果の評価にどのような推論ヒューリスティックを利用するかを調べる
2. 科学者がどのように現在の研究プロジェクトの知識を表現するかを調べる

3. 概念の変化や洞察がどのような認知過程により起こるかを調べる
4. 科学者のグループが実験や仮説を作るために使用する認知メカニズムを見つける
5. 科学的仕事の社会的文脈が一般に知られている間違っただヒューリスティックに反対に作用するかどうかを見つける
6. 社会的文脈において何らかのメカニズムが概念変化に影響するか、するならばどのようなメカニズムかを見つける

## 5. Method

### 5.1 SELECTION OF LABORATORIES

- ▶ 5つの基準に基づき6つの研究所を選出
  1. 出版の質
  2. 研究のタイプ
  3. 過去に科学のコミュニティで重要とされる発見があった
  4. サイズが異なる
  5. 指導者の研究経験が異なる
  
- ▶ 2つの側面から4つの研究所を選出
  1. 発生生物学か病原体の研究所である
  2. 細胞レベルか分子レベルに焦点を当てている

Table 1: Research areas of the four laboratories investigated

	Cell biology	Molecular
Developmental	Lab A	Lab B
Pathogens	Lab B & C	Lab D

#### 5.1.1 Laboratory A.

- ▶ 指導者
  - 主任研究員
  - 300以上の出版物
  - 数々の受賞歴
  - 分野を進歩させる非常に重要な発見を行った
- ▶ 22名のポスドク, 5名の大学院生, 4名の技術者
- ▶ 4つのプロジェクトを選出

- うち 2 つは科学的発見につながった
- うち 1 つは発見の瞬間をテープに収めた

#### 5.1.2 Laboratory B.

- ▶ 指導者
  - 主任研究員
  - 分子生物学において多くの重要な発見をした
  - 数多くの出版物
  - 多くの著名な研究者を輩出
- ▶ 3名のポスドク, 5名の大学院生, 1名の技術者
- ▶ 1つのプロジェクトを選出
  - あまり進展しなかった

#### 5.1.3 Laboratory C.

- ▶ 指導者
  - 准教授
  - DNA と RNA について多くの重要な発見をした
  - 60 以上の出版物
  - RNA に関する仕事は影響が大きい
- ▶ 4名のポスドク, 2名の大学院生, 1名の技術者
- ▶ 4つのプロジェクトを選出
  - 全てが大きく進展した

#### 5.1.4 Laboratory D.

- ▶ 指導者
  - 助教
  - ウイルスのメカニズムの分野で既に有名
  - 多くの広く参照されるテクニックを開発
  - HIV の研究に多くの革新をもたらした
- ▶ 4名のポスドク, 6名の大学院生, 2名の技術者
- ▶ 3つのプロジェクトを選出
  - HIV の活動の重要な部分の新しいモデルへと向かっている

## 5.2. SELECTION OF RESEARCH PROJECTS FOR INVESTIGATION

- ▶ プロジェクト選出の基準
  - 教授（指導者）へのインタビュー
  - プロジェクトが始まりたてか，始まる場所である

## 5.3. DATA COLLECTION PROCEDURE

☆ データは pre-present-post からなる

- ▶ Pre
  - Extensive initial interview
    - ・ 理論，仮説，予測，実験結果，現在の知識，対立理論，研究所の他の研究プロジェクトとの関係，研究の問題点
  - プレゼンの1, 2日前に発表者へインタビュー
    1. 何の研究をしたか
    2. なぜその実験を行ったか
    3. 研究のリサーチクエスチョン，ゴール，実験デザイン，予測，なぜ他の実験ではないのか
    4. 結果はどうだったか，実験中の問題点
    5. 実験の結果は何を示すと思うか
    6. 研究プロジェクトは次にどのような方向へ進む予定か
- ▶ Present
  - ミーティングを録画，録音
- ▶ Post
  - プレゼンの1, 2日後に pre と同じ6つの質問を実施
- ▶ 8ヶ月間実施
  - 少なくとも3回のミーティング，インタビューを実施

## 5.4. DATA ANALYSIS

### 5.4.1 Transcription.

### 5.4.2 Coding.

- ▶ Brutlag, Galper, and Milis (1991), Dunbar (1993), Klahr and Dunbar (1988), Stein (1992), Ericsson and Simon (1984) に基づきコーディング

## 6. Overall Results

- ▶ 全研究所，プロジェクトで類似した結果
  - 科学者はネガティブな証拠を仮説の棄却に多く利用する
  - 概念変化には近い類推が利用される
  - 問題点の強調には遠い類推が利用される
  - 社会的文脈は大きな問題表象の変化をもたらし，推論のバイアスを緩和する

## 7. Mechanisms Underlying Conceptual Change and Insight

- ▶ 概念変化や洞察の要因
  - 仮説と一致しない実験結果
  - 類推の結果
  - 予期しない発見

### 7.1. INCONSISTENT RESULTS AND CONCEPTUAL CHANGE

- ▶ 仮説と一致しない結果により速やかに仮説が棄却される
- ▶ 仮説における特定の特徴の変更に利用される
  - 最小の変化 = generalization, specialization heuristics
- ▶ 全く新しい仮説を考える
  - 個人では滅多に起こらないがラボミーティングでは起こる
    - ・ 他の科学者が不一致に注目する
    - ・ 別の仮説の提案をする
    - ・ 科学者に新しい仮説を考えさせる
- ▶ 証拠が扱われる方法は経験により異なる
  - 経験を積むと falsification bias を示す

### 7.2. ANALOGY AND CONCEPTUAL CHANGE

◇ 類推は知識や概念の変化の重要な要因となる

- ▶ Local Analogies
  - 同じドメイン（今までの他の実験）からの類推
- ▶ Regional Analogies
  - 類似したドメインにおけるシステムの関係性全体をマッピング
- ▶ Long-Distance Analogies
  - 遠いドメインの概念をマッピング

### 7.2.1 Local Analogies.

- ▶ 研究者が行っている実験に問題があったときやうまく行かなかったときに使用される
- ▶ 成功した過去の実験と比較し違いを検討する
  - 複雑ではなく、余り注目されてもいないが、研究を進める主なメカニズム
- ▶ 全ミーティングで何回も見られる

### 7.2.2 Regional Analogies.

- ▶ 同じ上位カテゴリに属する異なるドメインの関係性をマッピング
  - 多くはないが、時々観察される
- ▶ 科学者が理論を精密化し、新しい実験の計画をたてているときに起こる
  - モデルがなければ、他のドメインとのマッピングができないため

### 7.2.3 Long Distance Analogies.

- ▶ あまり起こらない
- ▶ 目的
  - 研究の特徴を強調する為に利用される
  - 新しいメンバーに教える為に利用される
- ▶ 役割
  - 他のメンバーにポイントをよく理解させる
  - 概念変化や洞察を起こすものではない

## 7.3. ANALOGY USE AND SOCIAL STRUCTURE

- ▶ 1つの研究所では類推が起こらなかった
- ▶ 類推の欠如は概念変化に決定的か？
  - 遺伝子の理解の大きな進展は見られなかった
  - 異なる方略を使用した
    - ・ 実験変数を操作する
  - いくつかの問題は解決されずそのままであった
- ▶ なぜその研究所では類推が起こらなかったのか？
  - 研究所のメンバーの構成
    - ・ 構成員の背景が類似していた



- ・ 知識が一様なため類推につながる情報を提案できない
- ▶ 成果のある類推には様々な知識を持った構成員が必要

#### 7.4. ANALOGY USE AND EXPERTISE

##### ◇ 熟達化の影響

- ▶ エキスパート
  - 自由に使える知識が多い
  - 経験が少ない人とは異なる方法で知識を構造化，表象化している
  - 深い構造的特徴がよりわかっている
- 類推を行いやすく，その質も良い

#### 7.5. SOCIAL CONTEXT AND CONCEPTUAL CHANGE

- ▶ 科学者のグループがお互いの知識表象を変化させるメカニズムとは？
- ▶ 5つの状況において概念変化が起こるのか
  1. 科学者に自分の仕事を異なる概念レベルやゴールから考えさせる質問
  2. 科学者が演繹，因果，帰納推論を求められたとき
  3. 研究者が理論やデータのある側面のより詳細を求められたとき
  4. 研究者の理論やデータが他の研究メンバーにより試される時
  5. 異なるタイプの人々からの質問

##### ◇ 現在のデータからの答え

- ▶ 研究を異なるレベルから考えさせる質問
- ▶ 予想外の結果が現れたとき
  - 研究者がそれがエラーではないと考える
  - 他のメンバーが研究者の解釈に意義を申し立てる
- ▶ 推論の連鎖を引き起こす質問
  - 実験に問題があり，類推がうまくいかなかったとき
    - ・ 他のメンバーによる問題の原因を演繹させる質問
- ▶ グループによる問題解決
  - 問題のある特徴に関するメンバーの改善や解決，変化が他のメンバーやグループのインプットとなる
  - 発表者は解決を取り込み，概念の枠組みに統合する
  - 繰り返して問題の新しい局面へ突入する

## 7.6. ON SERENDIPITY

- ▶ 予期しない結果を追求することは大きな発見につながる
  - 科学者はしばしば驚くべき結果によりもたらされた発見は serendipity のおかげであると述べる
- ▶ Serendipity と呼ばれるものは注意深い実験と計画の結果である
  - Lab A の指導者は最も重要な方略は予期しない結果を追求することであると語った
- ▶ 統制条件において予期しない結果が現れる
  - 統制条件の主な目的は実験の効果を確かにすることである
  - 統制条件を選択する方法, 結果を解釈する方法が科学的発見や洞察の理解に重要である
    - ・ 望んだ実験結果を得るために十分な仮説やメカニズムを考える
    - ・ 予期しない結果に出くわしたとき, 考えていたメカニズムが既にあるため概念の構造の変化や棄却が起こる

## 7.7. RISK!

- ▶ 科学者は研究のリスクを評価する
  - リスクが高い
    - ・ うまく行く可能性が低い
    - ・ 重要な発見が見込める
  - リスクが低い
    - ・ うまく行く可能性が高い
    - ・ あまり重要な発見ではない
- ▶ 組み合わせて行うことが必要

## 7.8. HOW TO MAKE A DISCOVERY

### ☆ 発見に重要なヒューリスティック

- ▶ 研究グループのメンバーの研究背景が重なっており, かつ, 異なっているべきである
  - グループ問題解決や類推を促進する
- ▶ 類推は研究に問題が起こったときに行われるべきである
  - 特に科学者は local, regional analogies を行うべき

- ▶ リスクの高いプロジェクト，低いプロジェクトを組み合わせるよう促すべきである
- ▶ 予期しない結果に注意する
  - 新しい仮説や研究プログラムの作成に利用する
- ▶ 重なる研究プロジェクトやメンバーを小さなグループにわけることによりメンバーに研究の交流や議論の機会を与える

## 8. Conclusion

### ◇ *In Vitro* アプローチ

- ▶ 推論の一部を取り出したり，メカニズムを解明することが可能
  - 科学的推論を理解するためには参加者のもつゴールが重要

### ◇ *In Vivo* アプローチ

- ▶ 現実世界の推論について調べられる
  - 推論は利用され方，推論のはたす概念変化への役割
  - 社会的な文脈における概念変化のメカニズム
- ▶ 現実世界では研究室における結果と同様の結果が観察されたり，メカニズムの新しい範囲が明らかにされた
- ▶ *In Vitro*, *In Vivo* の 2 つのアプローチが必要である

- ▶ 一部の例
- ▶ Coding of the scientists' representation of their research over time.
  - Brutlag のスキーマに基づきコーディング
  - 分子生物学の知識や実験の特性のリスト
    - ・ 特に DNA 代謝について
  - 細胞生物学に付いては別のコーディングスキーマを利用
- ▶ Coding of group interactions.
  - 談話分析, 概念変化のコーディングを利用
    - ・ 話者間のインタラクションをコーディング
  - 社会的インタラクションは概念編かを起こすか?
  - 話者の表象を変化させるか?
  - 話者の意図
- ▶ Coding the scientists' cognitive operations.
  - 標準的なプロトコル分析のテクニックを利用
    - ・ 課題分析
    - ・ 現在の知識状況, ゴール状況, オペレーション
    - ・ オペレーションに基づきデータをコード化
  - 科学者がどのようにオペレーションを利用しているか?