

# Study of Scientific Discovery: Complementary Approaches and Convergent Findings

David Klahr and Herbert A. Simon

*Psychological Bulletin*, 1999, 125(5), 524-543

## ★ はじめに

- ▶ 科学的発見の研究には多くの方法がとられているが、すべての方法は発見過程のキーとなる側面に収束する
- ▶ 科学的発見は問題解決の特定の種類である
- ▶ 心理学者たちも科学的思考に注意を向け始めた
- ▶ 4つの科学研究の主なアプローチを調べる
  - 歴史的説明
  - 研究室実験
  - 実際の観察
  - コンピュータモデル

## ★ Why Study Scientific Discovery?

- ▶ 科学的発見を研究する5つの理由（認知科学の視点から）

## ◇ Value

- ▶ 人間の思考は"big question"の1つ
- ▶ 特に科学的思考はその複雑性と生成物から特に興味深い

## ◇ Mythology

- ▶ 科学的発見の表現不可能性の神話的な感じがロマンティックな想像をひきつける
- ▶ 科学的発見の研究の目標
  - 通常の認知過程がどのように人間に特定の定義や、体系的な実験的材料の選択や理論的経済性を可能とするのかを特定する

## ◇ Pressing the Limits

- ▶ 一般的な科学的方略は境界におけるふるまいを探索する
  - 通常の思考過程は創造的な科学的発見を支持する過程にも当てはまるか？
- ▶ Crickの回顧
  - 著名な発見に導いた思考は一般の科学的思考と同じ

## ◇ The Paradox of Children's Thinking and Its Development

- ▶ 子供の思考と科学的思考は似ているということは魅力的であると同時に内的矛盾をはらむ
  - 子供の思考に関する調査は逆の結果を生み出している
- ▶ 更なる定式化と実験的、理論的研究が必要

◇ **Machines in the Scientific Process**

- ▶ 科学に関する研究はより良い科学（科学のエンジニアリング）へ導く
  - ある種のドメインにおける発見を行うプログラム（DENDRAL）
- ▶ エキスパートシステムの概念とデザインは活発で発展的なフィールドである（Valdés-Perez, 1994）

◇ **Conclusion: Why Study Scientific Discovery?**

- ▶ 科学的発見は非常に魅力的
- ▶ そのような研究をどうやって行うのか？

★ **Approach to the Study of Science**

- ▶ 科学の臨床的研究法は5つのカテゴリーに分けられる

◇ **Historical Accounts (e.g. Holmes, 1985)**

- ▶ 科学的知識に主な貢献をした人の認知的、動機的過程を描写する
  - 日記、科学的発行物、自伝、研究ノート、書簡、インタビュー、計画書、メモなどを利用

◇ **Laboratory Studies (e.g. Qin & Simon, 1990)**

- ▶ 実世界の科学における一部を切り出した状況における問題解決過程を観察する
  - 心理学研究室で実験条件と統制条件をデザインし、統計検定を行う
    - ・ 発見を含む抽象的な課題（人工宇宙の物理など…）
- ▶ 研究室実験は単なる仮説テストの道具というより広い役割を果たした
  - 探索的実験＝特定の仮説に基づかない実験
    - ・ 表象の型の提案や新しい仮説の生成を目指す

◇ **Observation of Ongoing Discovery (e.g. Dunbar, 1994)**

- ▶ 最も直接的な方法は科学者を研究すること
- ▶ 毎日重要な活動を記録して心理的構造の中でコード化、解釈
- ▶ きわめて難しく、一番行われていない
  - 科学者の信用と許可が必要
  - 分野についてよく教えられる必要がある
  - 時間がかかる
  - 運が必要（観察中に主要な発見が起こるか）

◇ **Computational Models of Discovery: Artifact and Explanation**

- ▶ 科学的発見の理論はコンピュータモデルに投入されることもある
  - シミュレーションや発見過程の再現
- ▶ モデルの目的は科学者の発見中になされる認知過程におけるキーステップの再現
- ▶ 人間の科学者が行ったのと同じ発見を、同じパスをたどり行うのに十分な認知メカニズムを仮説化する

#### ◇ Sociological Approaches (e.g. Bijker, Hughes, & Pinch, 1987)

- ▶ 発見を政治的, 人類学的, 社会勢力の産物として説明しようとする
  - そのような勢力と実際の科学的実践を動機付けた, 社会心理学的, 精神力動的なものを使い結びつける (各種学問の混合物)
- ▶ 認知過程を荒く捉える傾向がある
- ▶ 極度に脱構築主義的な人により行われる傾向がある
  - 描写説明されるべき科学の範囲に含まれる (今回は詳しく述べない)

#### ★ Assessing the Approaches

- ▶ 研究法の評価基準をまとめて各アプローチを検討

#### ◇ Criteria for Evaluating Research Method

- ▶ **face validity** (表面的妥当性)
  - 測定しようとしているものを測定できているか?
  - 研究が科学や発見から離れるほど表面的妥当性は低くなる
  - 例) Faraday の発見を研究 = 表面的妥当性は高い
- ▶ **construct validity** (構造概念妥当性)
  - 構成概念から予測されるようなことが実際に起こるか
  - 構造概念妥当性は直接的に評価できない
    - ・ 使用されている尺度がどれほどよく根底にある科学的発見についての理論的構造を操作できるかにより評価
- ▶ **temporal span and resolution of data** (データの時間的な期間と解像度)
  - 長いスパンのエピソード → 低い解像度のデータ
    - ・ Faraday : 電磁気実験は数時間でも 10 年分の実験のギャップがある
  - 期間が短い → よりはっきりした解像度のデータ
  - 研究室研究なら 10~100 分しかかからない
    - ・ 被験者の過程が短い期間に記録できる
    - ・ 言語, 行動プロトコルの収集
- ▶ **fruitfulness for discovering new phenomena** (新しい事象の発見における生産性)
  - 科学における主な目標は新しい事象を発見し, 仮説を生成すること
  - 新しい事象を発見することと理論をテストすることの区別はデータ駆動とセオリー駆動の区別に近い (Langley et al., 1987)
  - **experimenter** と **theorist** (Klahr & Dunbar, 1988)
  - 特定のアプローチが発見過程についての新しい事象を明らかにする程度を評価
- ▶ **rigor and precision** (厳密さと精密さ)
  - 正確なデータ (数値) や再現可能なコーディングスキーマによって記録されたイベントレコード

- ・ 発見に関する認知過程の広大な文献
- 複雑なイベントの描写 (正確なコーディングスキーマを超えたソースデータの解釈や要約)
  - ・ Faraday の日記や Darwin のノートの分析
- 質的データは明確で客観的な基準に基づくコード化や分析なしでは予測を立てたり理論をテストできない

▶ **control and factorability of variables** (変数の統制と要因性)

- 実験は特定の変数の効果を取り出すことを目的とする
    - ・ 統制できない変数を最小にする
  - オーソドックスな実験と他の観察的なものそれぞれの役割を見積もり評価する
    - ・ 成功と同様に失敗にも焦点を当てる必要がある
- 研究室研究なら成功と失敗による過程の違いも調べられる

▶ **external validity** (外的妥当性)

- 研究の結果がどれほど広く一般化されるか
- 各研究はケーススタディ
  - ・ 研究を集めて発見の理論ができる

▶ **social and motivational context** (社会的動機的文脈)

- 外的 (社会的) 要因も考えなくてはならない
  - ・ 社会がその発見を受け入れるかなど

◇ **Strengths of Several Methodologies**

表 1 各アプローチのメリットの比較.

Evaluative criteria	Type of approach				
	Historical studies	Laboratory studies		Direct observation	Computational modeling
		Exploratory	Controlled		
Face validity	***	*		***	*
Construct validity	*	*	**	**	**
Temporal span & resolution					
Short & fine-grained	*	***	***	**	***
Long & coarse-grained	***			*	**
New phenomena	***	***	*	***	**
Rigor & precision	*	**	***	**	***
Control & factorability	*	*	***	*	***
External validity	*	*	**	*	**
Social & motivational factors	***			***	*

Note. Each approach is evaluated on the criteria as either very high (\*\*\*), high (\*\*), modest (\*), or poor (no entry).

とても高い(\*\*\*) , 高い(\*\*) , 普通(\*) , 乏しい(星なし)

▶ **Historical studies**

- 表面的妥当性が高い
  - ・ 説明したい現象そのものを調べている
- 時間的解像度はデータのソースによる

- 新しい事象を生成しやすい代わりに外的妥当性が低い
  - ・ 収集されれば一般的な法則も見つかる
- 厳密さと精密さは低い
  - ・ 元のデータは主観的で証明できない
- 社会的動機的要因が高い
  - ・ 認知科学の前からあるので非認知的な変数に向きやすい

▶ **Laboratory studies**

- 表面的妥当性に限界がある
- 研究室実験はセオリー駆動だが時に思いもよらぬ結果が得られる
  - ・ 探索研究の場合には厳密さと精密さを犠牲にして新しい事象の可能性を支持する
- 両タイプともはっきりしたデータを短い期間に生み出す
- 社会的動機的要因は最小限にしようとする

▶ **Direct observation**

- 歴史的データと似た性質を多く持っている
  - ・ 特に表面的妥当性と新しい事象の可能性
- 2つの重要な違い
  - ・ よりはっきりした時間的解像度がある
  - ・ 厳密さと精密さと客観性がある＝科学者自身による回顧がない

▶ **Computational modeling**

- コンピュータモデルを理論を生成し表象しテストするメディアとして評価する（補完するもの）
- 外的妥当性が高い
  - ・ 一つのモデルを使うことは全レンジの発見課題をシミュレートする
- モデルは以下の2つからなる
  - ・ 基本的なメカニズム：全般的な方法がどのくらいのドメインを説明できるか
  - ・ 特定の知識：特定の知識や方法による程度
- コンピュータモデルに特異なのは厳密さ
  - ・ 各ケースの同じ所や異なるところを明らかにする
- 構造概念妥当性はモデル化された課題による
  - ・ 理論的な変数は特定なので構造的妥当性は高い
- 社会的変数を組み込むこともできるが普通はなされない
- 計算スピードの限界があるので長い期間と解像度にはトレードオフの関係がある

◇ **Assessing the Approaches: Summary**

- ▶ 発見過程の研究には唯一のベストの方法があるわけではない

- ▶ いくつかの手法を組み合わせると 1つの手法より進んだ理解が得られる

★ **Scientific Discovery as Problem Solving**

- ▶ 科学的思考は特別なものではない
  - 問題解決の情報処理過程で説明できる
- ▶ 方法論やテクニックや知識などのドメイン固有な方法ではなく、全般的でユニバーサルな問題処理過程（ウィークメソッド）に焦点を当てる

☆ **Problem Solving, Search, and Weak Methods**

- ▶ 問題は初期状態，ゴール，オペレータのセット，制約からなる＝問題空間
  - 問題解決＝初期状態からゴールまでのパスの探索
- ▶ 初期状態，ゴール，オペレータのセット，制約はそれぞれの程度で定義される
  - 定義の度合いは問題空間の要素への親和性や解決者と問題の相互作用による
    - ・ 探索のパターンが変わる
- ▶ 科学的な問題はよく定義されていないが，問題解決の観点から特性づけられる
  - 定義の度合いと認識は知識の量による
- ▶ 問題空間の探索には思慮深く制限された探索が必要
- ▶ 制限された探索法にはストロングメソッドとウィークメソッドがある
  - ウィーク：問題構造の知識は少なくてもいいが，比較的無差別な探索
  - ストロング：少ない探索で解決に至る
- ▶ 5つのウィークメソッド
  - **Generate and test (trial and error)**
    - ・ あるオペレータを適用してゴールに到達するか調べる（同じオペレータもまた使う）
  - **Hill climbing**
    - ・ 最もゴールに近づける方向へ進む
    - ・ 方向とゴールとの距離の情報を **generate and test** から使用
  - **Means-ends analysis**
    - ・ 現在の状況とゴールを比較して違いを描写する
    - ・ 最も重要な違いを減らすオペレータを選択する
    - ・ 適用できるオペレータがない場合にはサブゴールを設定する
  - **Planning**
    - ・ 以下の手順を含む
      - 抽象的な問題空間を作る
      - 抽象的な問題空間に対応する問題を作る
      - 抽象的な問題を解決する
      - 抽象的な問題の解決を使って，元の問題の解決のプランを練る

計画を元の問題空間に戻し実行する

- ・ プランニングは元の問題空間の多くを削除しているため、必ずしも計画が実行できるとは限らない

- **Analogy**

- ・ 新しいターゲットドメインを以前に出会ったベースドメインにマッピングする
- ・ 解決の保障はない
- ・ ウィークメソッドとストロングメソッドの橋渡しとなる

◇ **Problem Solving: Summary**

- ▶ ストロングメソッドは探索のいらない直接的な適応ができる
- ▶ ウィークメソッドは広い文脈に適応できるので特に興味深い
  - 選択的（ヒューリスティック）探索の過程
  - 長期記憶のドメイン固有な情報の貯蔵の傾向
- ▶ 科学的発見の研究のためには
  - 2つの要因をどのように観察するのか
  - どのように実際の研究の文脈を模倣した文脈の中で実験的に喚起させるのかを見つける

★ **Complementarity of Approaches**

- ▶ 補完を有効に使うための強力な方法は同じ科学的発見を 1 つ以上のアプローチで研究すること

◇ **Combining Historical With Laboratory Studies**

- ▶ 遺伝子制御の発見（Jacob & Monod, 1961）
  - ラクトースの結合が制御遺伝子によって制御されるメカニズムの発見
  - 十分な量の歴史的研究がなされたが、認知過程はごく一般的なレベルでしか扱われなかった
  - 認知心理学者はひらめきを特性づけるのみで Monod の 10 年間については描写しなかった
    - ・ 遺伝子制御の発見においては表象の変化が重要な認知過程
  - Dunbar(1993)は認知過程をより深く理解するために課題を作った
    - ・ Monod と Jacob の直面した問題の本質的な要素を取り入れた課題
    - ・ 探索空間の制限と探索の深さを制限
  - 現実の科学的課題の使用により表面的妥当性を増加させた
- ▶ Planck の法則（Max Planck, 1990）
  - 黒体放射理論
    - ・ 新しいデータにあう理論の発見

- 数学者と物理学者にデータのみを見せて関数を考えさせる
    - ・ 8人中5人が3分以下で答えた
    - ・ どのように答えにたどりついたか?→物理と関係なし
  - Planck による発見過程の説明によると方法は異なるが同じくらいシンプル
  - 歴史と実験の補完により, Planck の発見は実験への反応でも物理的性質の使用によるものでもないことがわかる
  - ▶ Balmer の法則
    - 水素の連続的な線スペクトラムの波長に関する単純な数学公式
    - 物理の知識のない幾何学者バルマーが最初の 4 つの線スペクトラムの値を見た時に発見した
    - エンジニアリングの院生にスペクトラムデータを与え, より大きい  $n$  を予測するパターンをよう求めた
      - ・ 週 10~20 時間従事して 6 週間後に発見した=物理的動機や理論なし
  - ▶ Faraday の実験
    - 実験そのものを対象として歴史的研究を行う
      - ・ 研究室実験の描写, 表象過程が解決されるべき問題となる
    - Faraday は実験の解釈が難しかった追試や, 操作と発見の表象, 描写のつじつまの合った方法の発展に 1 週間かかった
    - 実験の問題を理解するために実験を繰り返すことはとても情報に富む (Gooding, 1990)
  - ▶ 歴史的アプローチを課題に利用することにより実験室データの表面的妥当性の低さの問題を解決する
  - ▶ 研究室では時間的解像度の高いレベルで発見の過程について貴重な新しい情報を提供する
- ☆ Combining History With Modeling
- ▶ Hans Krebs の尿素の生体内統合の発見の Holmes (1991) による歴史的研究
  - ▶ 2 つのコンピュータモデルが適応された (KEKADA, CDP)
    - どちらも Krebs と同様の知識からほとんど同じ実験のラインで Krebs により発見された反応経路を発見した
    - シミュレーションは実験が一般的な仮説によって導かれうることを示した
  - ▶ モデルは Holmes が見つけた Krebs の探索におけるあいまいな点を明確にする
  - ▶ KEKADAD は Faraday の発見のいくつかの面もシミュレートした
  - ▶ BACON (Boyle の法則, Kepler の第 3 法則, Ohm の法則則などをシミュレート)
    - 仮説生成に generate-and-test を用いたヒューリスティック探索システム
      - ・ 仮説生成器は結果のフィードバックに敏感
    - ヒューリスティックはデータの意味について何の情報も含まないので, データ駆



### 動的

- データに合う関数を見つけるまで少しの関数しか生成しない
  - ・ 科学の発見，特に新しいフィールドでの発見に光を当てる
- ▶ **STAHL, GLAUBER, DALTON** も含め科学的方法論の欠陥を埋めた
- ▶ モデリングは歴史的研究の観察された事象がどのように実験をガイドするのかという点が不十分であることを補う

### ◇ History, Lab, and Model

- ▶ **Kepler** の第 3 法則
  - 歴史的記録が少なく，ほとんどが **Kepler** 自身によるもの
  - **BACON** が **Kepler** と同じデータを与えられた時
    - ・ 1つか2つ試した後不適切な代替仮説を答えた
    - ・ 2番目の関数は **Kepler** が最初に発表した法則のもの(間違い)だった
  - **Qin & Simon (1990)** 研究室実験
    - ・ **Kepler** のデータを与えて，関数を見つけさせる
    - ・ 14名中4名が **Kepler** の第3法則を見つけた
    - ・ 法則を発見した人のみが **BACON** の用いたものと似たヒューリスティックを用いた
  - 歴史的データの不足状態における実験とモデリングの探索パスの提供

### ◇ Laboratory Studies: Exploratory and Controlled

- ▶ **Dunbar (1988)** の元の実験は統制条件がなかった
  - そののちデザインされた要因実験に…
- ▶ 探索的，統制的な実験を交互に行い興味深い発見を生み出してきた

### ★ Convergent Evidence of Principles of Discovery

- ▶ いくつかのアプローチを使った研究の収束的な証拠について述べる

### ◇ Surprise

- ▶ 仮説が先にあるとは限らず，科学者の直感から引き出されるかもわからない
  - **Curies** のラジウムの発見は純粋な放射能ウランを得るプロジェクトから
  - 処理を進めていくと放射能レベルが純粋なウランのものを越えて驚いた
  - 実験を行い，瀝青（れきせい）ウラン鉱は放射能性が強いラジウムを含む
- ▶ 事象から実験へ＝驚きがつきもの
  - 驚きに直面したときその範囲を解明し，メカニズムを決定するために道をそれる
- ▶ **KEKADA** は驚きという点に直接的に言及する
  - **KEKADA** の理論によれば科学者は予測が破られた時，驚くべき事象を説明しようとする
- ▶ 研究室実験の場合，被験者に事前に仮説を与えることにより驚きを作り出す

- 大人：対立仮説とそれを検証する実験
  - 子供：証拠の無視
  - 科学的思考の発達とは驚くべき結果を受け入れて、更なる事象を探索すること
  - ▶ 歴史的研究, シミュレーションモデル, 研究室実験のすべてが特定の事象に収束する
    - 特定の事象（驚き）から新しい理論が生成, テストされる
    - 観察研究も運が良ければこの収束に寄与する
  - ▶ 仮説は内的構造の生成物と観測されたデータの複合物
- ◇ The Role of Analogy and Recognition
- ▶ 類推は認識（認知）の複雑な形
    - 最初の仮説や実験を形作る方法
- ◇ Multiple Search Spaces
- 仮説と事象の逆数関係＝複数の空間の探索
  - 2つの空間（Klahr & Dunber, 1988）
    - ・ 新しい情報を与える実験操作の探索
    - ・ 操作に対応した振る舞いを説明するルールの探索
  - Simon & Lea(1974)の dual-search の概念を科学的発見に適用
    - ・ 実験空間と仮説空間
  - ▶ 仮説空間の探索
    - 新しい仮説の生成は問題解決の一種
      - ・ より簡潔でユニバーサルな形の知識を説明できる仮説を目指す
    - 仮説がどれほどありうるかを評価し, 確かめる順番, 方法を決める
  - ▶ 実験空間の探索
    - 実験の構築のために問題解決を行う
    - 探索の制限が必要
    - 科学的発見の研究のいくつかのタイプの収束を明らかにする
      - ・ 研究室実験
        - experimenter：可能な操作の探索に焦点を当てる
        - theorist：可能な説明の探索に焦点を当てる
      - ・ 歴史的研究も仮説空間の探索と実験空間の探索から解釈できる
      - ・ どちらの空間の探索が強調されているかによりコンピュータモデルをカテゴリー化できる
        - コンピュータモデル間の補完の出発点になる
  - ▶ 2つ以上の空間
    - マイクロワールドの研究室における被験者の行動の分析はより複雑
      - ・ 4つの空間への拡大

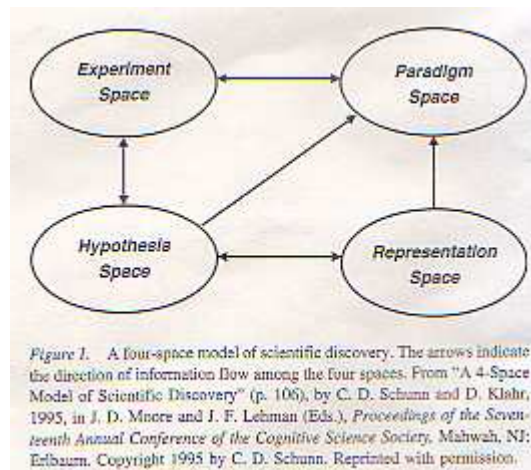


図2 科学的発見の4空間モデル.

- データ表象空間：可能な特徴から表象やデータの抽象化が選択される
  - ・ 事象を表象する効果的で情報の多い方法を探索
  - ・ ヒューリスティック探索が必要
- 実験パラダイム空間：実験のクラス（パラダイム）が選択される
  - ・ 選択されたパラダイムの中でパラメータが設定される
- 発見文脈によるので正しい空間の数はない
- Thagard(1998)は主な3つの空間の探索が重要であることを示した
  - ・ 仮説空間，実験空間，手段（instrumentation）空間
- ▶ 表象空間における探索
  - 表象空間の探索法の一つは類推
    - ・ Bohr は水素原子の量子模型にたどりつくのに太陽系の類推を用いた
    - ・ Faraday は電磁誘導を発見したとき事象の表象の変化を体験した
      - 長い実験の中で観察された事象が実際に見た力線の実験と結びついた
  - 燃焼のフロギストン説から酸素説への移行：標準的な実験の表象の変化が重要な役割を果たす
    - ・ 初期＝固形物の燃焼と燃え残りの観察 熱，炎，煙の観察
    - ・ 新しい手法＝気体の体積と圧力の測定，観察
      - 注意の焦点の移行
  - 表象は類推や事象から引き出されたり，実験から生み出されたりする
- ▶ 方略空間の探索
  - 方略の変化は発見に重要な役割を果たす
    - ・ 新しい科学的手法や手続きの結果であったり，それに導いたりする
    - ・ 遺伝研究では Muller の x 線が変異体の割合を高めるというアイデアで生産性が大きく改善された

- 科学的発見と同様の異なる方略の効果が科学的研究のほかのドメインにもあるに違いない

☆ **Relation Between Science Studies and More General Studies of Creativity and Problem Solving**

- ▶ 科学的発見の理論は問題解決の一般的な理論の特別なケースである
- ▶ 科学的発見は
  - 問題空間のヒューリスティック探索に基づく
  - 探索の統制構造は一般的なメカニズム
  - 認識過程が知識やストロングメソッドを記憶から呼び起こす
- ▶ 問題解決における構造や過程と同様である
- ▶ よく定義されていない問題ほど、既知の解決やドメイン固有の探索ヒューリスティックを呼び起こす力が弱い