

Laboratory Replication of Scientific Discovery Processes

Yulin Qin and Herbert A. Simon

Cognitive Science, 1990, 14, 281-312

★ はじめに

- ▶ ケプラーの第3法則
 - 惑星の公転周期の2乗は軌道の半長径の3乗に比例する ($D^2/P^3=C$)
- ▶ 第3法則の発見は探索を導く関連理論がないときのデータの規則性の発見という状況を提供する
- ▶ この種のデータ駆動型の発見は BACON によってシミュレートされた (Langley et al., 1987)
- ▶ 実験の目的
 - 人間のデータ駆動型の発見の過程と BACON による過程の比較
 - ・ ケプラーのデータに直面したとき人は BACON と同じヒューリスティックを使うか?

★ EXPERIMENT 1

◇ Method and Material

- ▶ データ (TABLE1) :
 - 太陽からの平均距離, 水星, 金星, 地球, 火星, 木星の太陽をめぐり公転周期
 - ケプラーのときは正確性にかけていたので, 同一のものではない

TABLE 1
The Data Given to Subjects in Experiment 1
(s=Distance; q=Period of Revolution)

s	q
36	88
67.25	224.7
93	365.3
141.75	687
483.8	4332.1

- ▶ 使用可能なもの: ペン, メモ, 電卓
- ▶ ケプラーの法則だと気付いた被験者はいない
- ◇ Subject
 - ▶ 9名 (TABLE2) 5名は学部生, 院生は物理, エンジニア, 美術史, 教育
 - 全員, 物理, 計算法, 化学の授業をとっている
- ◇ Problem Analysis
 - ▶ BACON は約2分でケプラーの第3法則を見つけた

TABLE 2
Subjects and Their Best Results in Experiment 1
(s=Distance; q=Period of Revolution)

Subject	Situation	Best Results
S1	Sophomore	$s/q=c, s^2/q=c, s^{1.25}=q$
S2	Senior	$\ln q/\ln s=c$
S3	Freshman	$s^3/6.025=q^2$ (correct)
S4	Junior EE	$s^{1.49}=q$ (nearly correct)
S5	Freshman	$88-2*36=16$ ($q_l=ks_l b, l=1,2,3,4$)? $22^2=484$
SY	Grad in Phys.	$q^{2/3}=0.55s$ (correct)
SW	Engineer	$s^2/q=c, s^3/q=c$
SG	Grad in Art History	$q_1/s_1=x_1+y$ $q_2/s_2=x_2+y$ $q_3/s_3=x_3+y$
SJ	Grad in Edu.	$q=2^x*s+b$

- ▶ TABLE3 のいくつかのシンプルなヒューリスティックを利用
- ▶ BACON の基本理念は 2 つの変数がともに増減するときに、その比をテストすること
 - ヒューリスティック 4 : $P/D=C$ を試す→失敗
 - ヒューリスティック 4 : $P/D^2=C$ →失敗
 - ヒューリスティック 5 : $P^2/D^3=C$ →成功

TABLE 3
BACON.1's Rules for Noting Regularities

1. FIND-LAWS

If you want to iterate through the values of independent term I,
and you have iterated through all the values of I,
then try to find laws for the dependent values you have recorded.

2. CONSTANT

If you want to find laws,
and the term D has value V in all data clusters,
then infer that D always has value V.

3. LINEAR

If you want to find laws,
and you have recorded a set of values for the term X,
and you have recorded a set of values for the term Y,
and the values of X and Y are linearly related
with slope M and intercept B,
then infer that a linear relation exists between X and Y
with slope M and intercept B.

4. INCREASING

If you want to find laws,
and you have recorded a set of values for the term X,
and you have recorded a set of values for the term Y
and the absolute values of X increase,
as the absolute values of Y increase,
then consider the ratio of X and Y.

5. DECREASING

If you want to find laws,
and you have recorded a set of values for the term X,
and you have recorded a set of values for the term Y
and the absolute values of X increase,
as the absolute values of Y decrease,
and these values are not linearly related,
then consider the product of X and Y.

- ▶ BACONの等式の適性テストを緩めるとケプラーと同様 $P/D^2=C$ で満足して終了する
- ▶ 他の解決方法
 - s と q の対数をとる $\rightarrow \log q = 3/2 \log s + K, K = (\log C) / 2$
 - ・ BACON のヒューリスティック 3 からすぐに法則を見つける
 - s の 3 乗の平方根をとる $\rightarrow s^{3/2}/q = K1, K1 = C^{1/2}$

☆ Behavior of Subjects

- ▶ 1 年生(S3),物理学の院生(SY),が法則を発見, 電気エンジニアの学部生 (S4) が惜しかった(TABLE2)
- ▶ データ駆動型の科学的発見は不良定義問題の一種
 - ゴールがどこか, 現在の状況とゴールとの距離がわからない
 - ・ e.g. SW: How about $s^{3/2}$?
 - It's too complex.
- ▶ 被験者は 3 つの困難に直面する
 - q と s の関係が非線形であること
 - $q = f(s)$ の形に直すと s の累乗が整数ではない (3/2) こと
 - 一定係数が一貫していないこと
- ▶ 被験者は一連の関数を生成し, データに当てはめテストする
- ▶ 関数のフィッティングの 2 つの動機
 - 正しいと思った関数をフィットさせる (正誤の確認のため)
 - データの状態や傾向についての情報を得るため
- ▶ TABLE4 : 被験者が考えた主なタイプの関数とその数
 - S4 は線形関数に固執, S2 は連続的関数を 7 回も調べる
 - その他の被験者はいろいろな関数を試す
- ▶ 関数タイプは以下のように定義される
 - Linear (直線) : $q/s, q-s, s/C$ のような関数
 - Quadratic (二次) : $s^2, s^2/q, s^2 + bs + c = q$

TABLE 4
Numbers of References to Functions, by Type, in Experiment 1

	Function						Total	Diagram	
	Linear	Sequential	Quadratic	Log	Cubic	Others		Graph	Scatter
S1	3	3	2	3	0	2	13	2	
S2	1	7	1	4			13		0.5
S3	5	1	6		1		13		
S4	7	2.5	1	1		6	17.5		3
SY	3	1.5	1	2	1		8.5		1
SW	2	3.5	1		2		8.5		1
Total	21	18.5	12	10	4	8	73.5	2	5.5

- Logarithmic (対数) : $(\log s) / (\log q)$, $\log(s/q)$
 - Sequential (連続的) : q_i と q_{i+1} の関係や s_i と s_{i+1} の関係
 - Cubic (三次方程式) : s^3/q , s^3/q^2
 - Other (その他) : s^x , $s^{1/2}$, $q^{1/2}$
- ▶ 他の操作 : S3 の計算結果の四捨五入
 - データの傾向の発見を簡単にし, 法則の発見に至った
 - ▶ 多くの被験者は散布図やグラフを利用した
 - ▶ TABLE5 : 各タイプに属する関数に言及した割合
 - ▶ TABLE6 : より詳細な 7 つの関数に言及した割合

☆ 特徴

- ▶ 考えられる量
 - 線形関数 > 連続関数 > 二次関数 > 対数
- ▶ 単純な関数は複雑なものより頻繁に考えられる
 - 7 つの単純な関数が全言及の 52.4% を説明する
 - そのうち 46.8% (18/38.5 言及) が 2 つの線形関数
- ▶ 考えられた関数には個人差が大きい
- ▶ 図は広く用いられる (散布図やグラフ)

TABLE 5
Function References and Percentages of Total in Experiment 1

	Linear	Sequential	Quadratic	Log	Cubic	Others	Total
S1	23	23	15.5	23	0	15.5	100
S2	7.7	53.8	7.7	30.8	0	0	100
S3	38.5	7.7	46.1	0	7.7	0	100
S4	40	14.3	5.7	5.7	0	34.3	100
SY	35.3	17.6	11.8	23.5	11.8	0	100
SW	23.5	41.2	11.8	0	23.5	0	100
Average	28.6	25.2	16.3	13.6	5.4	10.9	100

TABLE 6
References to Seven Functions in Experiment 1

	q/s^x	s^2 or s^2/q^x	$q-s$	s_{i+1}/s_i q_{i+1}/q_i	s^x	$s_{i+1}-s_i$ $q_{i+1}-q_i$	$\ln q / \ln s$	Sum	Total	%
S1	3	2		1	2	1		9	13	69.2
S2	1			1		1	1	4	13	30.8
S3	3	3	1	1				8	13	61.5
S4	3		2	0.5	2		1	8.5	17.5	48.6
SY	2	1	1	0.5			1	5.5	8.5	64.7
SW	1	0	1	0.5		1		4.5	8.5	52.9
Total	13	6	5	4.5	4	3	3	38.5	73.5	52.4

- ▶ これらのデータは被験者間の行動の多様性と類似性を描写するが、なぜある被験者は成功したのかということは説明できない
 - 成功被験者のプロトコルを良く見る
- ▶ 各被験者のプロトコルからなる **problem behavior graph** (Newell & Simon, 1972) に基づき行動を描写
 - **problem behavior graph** の構成は
 - ・ node : 被験者が言及した関数やデータから観察した事実
 - ・ meta-node : 被験者の自身の思考過程へのコメント

☆ Protocol of Subject SY

1. You said don't use logarithm? Ok, try something else.
2. Try a simple function.
3. The simplest one is square, x square.
4. Check if their squares fit or not.
5. $88^{1/2} = 9.38$
6. $(36/4)^2 = 88$
7. $(67.25/4)^2 = 282$
8. The difference (between 282 and 224.7) is big.
9. Again, $(93/4)^2 \dots$
10. No, it's wrong.
11. The difference is too big.
12. The square increases too fast.
13. So, try s^3 and q^2 .
14. $36^3 / 88^2 = \dots$ The easier way (using this calculator) is $88^{3/2} = 19.87$.
15. $88^{2/3} / 36 = 0.54(96)$
16. $224.7^{2/3} / 67.25 = 0.55$
17. $365^{2/3} / 93 = 0.55$
18. $687^{2/3} / 141.75 = 0.55$
19. It looks not bad
20. $4332^{2/3} / 483.8 = 0.55$.
21. It seems that it is this kind of relationship.
22. E: Write it down.
23. S: That is, s cube is in direct ratio to q square.

(Appendix 参照)

- ▶ センテンス 1-6 : SY が探索方向を変えたことに言及 (対数関数から 2 次関数)
 - $(s_1/4)^2 = q_1$ であることを発見 = Node 22
 - Node22 は PBG の 2 箇所割り当てられている
 - ・ Node21 の後ろ : Node21 を試した後方向が変わったことを示す
 - ・ Node8 の後ろ : 再び 2 次関数を探索していることを示す
 - ・ これら 2 つの Node22 の位置をつなぐために
それぞれと調和するラベルがカッコの中に挿入されている

前向き，後ろ向きの矢印が挿入されている

- ▶ センテンス 7-9：SY は $(s_2/4)^2$ と $(s_3/4)^2$ を計算して， q_2 ， q_3 と比較している
 - ▶ センテンス 10-12：比較の結果とデータの傾向の報告
 - ▶ センテンス 13：新しい関数の提案 = meta-node
 - この時点では新しい仮説 $s^3 = cq^2$ を立てたかは不明
 - SY の回顧より使用したヒューリスティックは基本的に BACON のヒューリスティック 5 と同じ
 - ▶ センテンス 14-18：Node26 を形作る…SY は $(q_i)^{2/3}/s_i$ ， $i=1, \dots, 4$ を試した
 - ▶ センテンス 18 (19?)：Node27 を形作る
 - ▶ センテンス 20：Node28 を形作る
 - ▶ センテンス 21：Node29 を形作る
 - Node26 と Node27 で新しい仮説 $q^{2/3} = ks$ を形作った
 - それを Node28 で再び試し，Node29 でルール $s^3 = cq^2$ を確認した
 - ▶ SY のプロトコル全体を要約すると，3つのフェーズに分かれる
 - Understand (Node1-6)：
 - ・ データを読み取り，性質付け，線形ではないが， s と q は単調増加することを観察する
 - Initial search (Node7-15)：
 - ・ 深い探索を行う
 - ・ 散布図を調べた後，二次関数，指数関数，連続関数，対数関数の 4 タイプを選択
 - Search in depth (Node16-29)：
 - ・ 16-21 では $\log q$ の $\log s$ に対する比のパラメータを計算
 - ・ 22-28 では二次関数に戻り，BACON のヒューリスティック 5 の式を q の累乗と s の累乗を関係付けるために当てはめる
- ☆ SY の行動のモデル
- ▶ 一般的なレベルとより詳細なレベルの両方で描写できる
 - ▶ 最も一般的なレベルでは SY の行動は Simon & Lea(1974)により提案されたモデルに当てはまる (Figure1, Figure2 に詳細)
 - 事例空間 (データ) とルール空間 (関数の仮説) の両方を探索
 - 事例空間の情報がルール空間における調べるべき関数を提案
 - 関数の操作が事例空間における新しい情報を提案
 - ▶ このモデルの主な部分はルール空間における 2つの探索の生成物からなっている
 - 関数のタイプとパラメータ

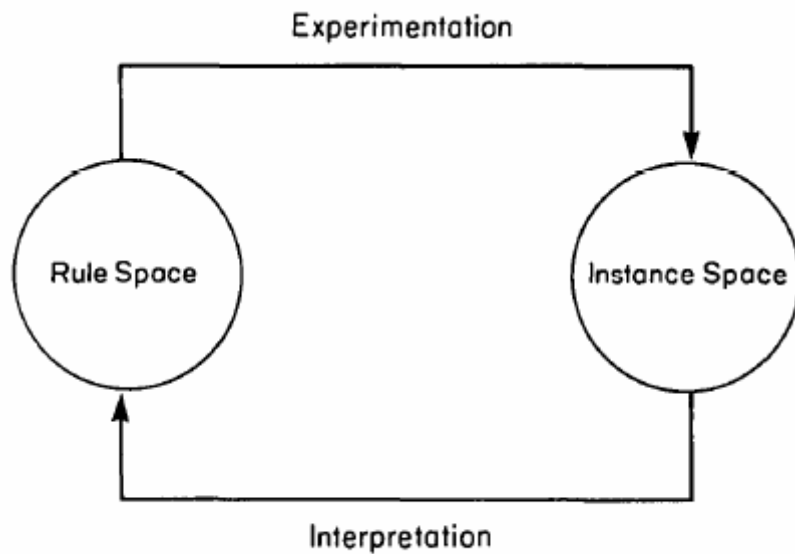


Figure 1. The process of rule induction.

◇ 情報のソース

- ▶ 4つの方法で新しい情報を得る
 - 仮説のチェック
 - 与えられたデータと変換したデータの比較
 - データの形と傾向の比較
 - 図の描写
- ▶ 次の行動を決定する

◇ 図

- ▶ SYは図から s と q の関係は線形ではないが単調に増加することを読み取る
- ▶ 散布図から最もありえる関数は二次関数, 指数関数, 連続関数, 対数関数であることを決める

◇ フィードバック

- ▶ SYの成功の最も重要な点はフィードバックの利用法
- ▶ 二次関数への当てはめから関数が間違っているだけでなく, **constancy** (恒常性) からどのようにそれているか学んだ
 - BACONのヒューリスティック5のような手続きはその場限りのものではなく, **means-ends analysis**の理論的な派生物であることがわかる

◇ 探索の非効率性

- ▶ SYは時々直接的な方法を使うのに失敗した
- ▶ 例) Node18

◇ best-first 探索 (最良優先探索)

- ▶ 選択の基準は明らかではないが, SYはbest-first探索を行っていた

- ① 線形関数 (一番シンプル?)
- ② 対数関数 (一番見込みのある?)
- ③ 2次関数

☆ BACONのようなヒューリスティック

- ▶ 解決の最後のステップ=BACONのヒューリスティック 5
- ▶ 全被験者はヒューリスティック 1, 2を使用する
- ▶ SYはヒューリスティック 3も使用した

☆ Protocol of Subject 3

- ▶ SYと同様のモデルが被験者 3 (S3)にも当てはまるが、いくつかの詳細な過程で違いがある

☆ Breadth-first 探索 (幅優先探索 Figure3)

- ▶ S3のプロトコルはSYより長い
- ▶ 4タイプの関数を考えている：線形関数, $f(q/s)$, 二次関数, 連続的パターン
- ▶ 十分な進歩が得られないと感じたときに次に移る

☆ 抽象化の使用

- ▶ S3の規則性の発見においてデータの抽象化は大きな役割を果たした
- ▶ Step15とStep21で計算結果を抽象化(簡略化)している
→ヒューリスティック 4の使用=問題解決

☆ 関数とデータの操作

- ▶ SY：主に関数空間を探索し、仮説をテストするためにデータを使用
- ▶ S3：主にデータの操作と抽象化を使用し、データの規則性を見つけるために抽象を使用

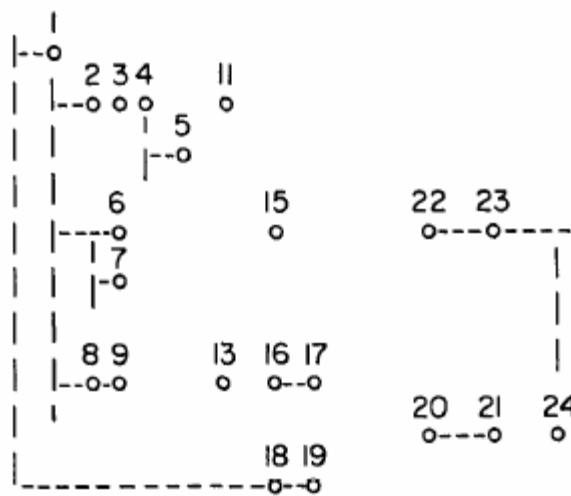


Figure 3.

◇ Unsuccessful Subjects

- ▶ 成功者とそうでない被験者の違い=探索方略とヒューリスティックの使用

◇ 探索の性質

- ▶ 成功していない被験者の性質
 - 関数タイプの空間を広く探索する被験者もいるが、関数のパラメータの探索を体系的に進めない
 - 成功しなかった被験者が関数のフィッティングから得ているのは"yes-no"に過ぎない（次のステップの手がかりを得ない=one-step search）
 - ・ Figure2 の Production5,12 を呼び出すのに失敗し、Production3,13 を頻繁に呼び出す
 - よく調べずに最も簡単な仮説を多く提案し、以前に失敗した仮説を繰り返す
 - ・ 探索をガイドする情報に富んだフィードバックの欠如の反映

◇ ヒューリスティックの使用

- ▶ すべての被験者は BACON のヒューリスティック 1,2,3 を使用した
- ▶ 成功しなかった被験者はヒューリスティック 4,5 を適切に使用しなかった
 - 例) S1 は s/q が減少関数であることに気付き、 s^2/q を試そうとした
 - $\rightarrow s_1^2/q_1$ から s^2/q が"より早く"増加したことを観察すると対数関数に移行
- ▶ 成功しなかった被験者は体系的なヒューリスティックの使用ができなかった
 - 例) SW はヒューリスティック 4 を s, q に適用し、 q/s が増加することに気付いた
 - SWにとってこの結果は q/s が一定ではないということを意味するだけであった
 - ヒューリスティック 4, 5 を使い続けなかった

◇ S1 に特定の性質

- ▶ S1 は $y = s^2$ のグラフを描いた
 - 物理の落下物体の加速における 2 次式に当てはまるかチェックした
- ▶ メンタルレパトリのすべてを試すスタイルは間に合わせ理論 (repair theory) により研究される事象を思い起こさせる (VanLehn & Ball. 1987)

◇ Summary of Experiment 1

- ▶ 9 名の被験者によるケプラーの第 3 法則の再発見
 - 2 名が成功、3 名は法則発見に必要な数学的知識の欠如により失敗
 - 他の 6 名の被験者は全員 Simon & Lea による基本的なモデルにフィットする
- ▶ 全被験者は BACON のようなヒューリスティックを使用した
 - ヒューリスティック 1,2,3 は全員に使用された
 - ヒューリスティック 4 と 5 も使われたが、その程度は同じではなかった

- ▶ 成功した被験者は体系的に前進し,探索のフィードバックから関係のある情報を得る
- ▶ 成功しなかった被験者は体系的ではない
 - フィードバックから体系的にうまくヒューリスティック 4,5 を使用せず, 深い探索ができない

★ EXPERIMENT 2

◇ Method and General Results

- ▶ 指数対数計算のできない電卓を使用
 - それ以外の点は実験 1 と同様
- ▶ 2つの目的
 - 被験者の計算スピードを若干減らす
 - 平方根を計算できない (ルートの表が与えられた)
- ▶ 5人中2人が成功, 3人が失敗

TABLE 7
Subjects and Their Best Results in Experiment 2 (s=Distance; q=Period of Revolution)

Subject	Situation	Best Results
S6	Freshman, Phys.	q^2/s^2
S7	Sophomore, EE/Econ.	$\frac{q^2}{b^2} - \frac{s^2}{a^2} = c$
S8	Sophomore, Chem. Eng.	$s^{3/2}/q=c$ (correct)
S9	Grad, Civil Eng.	$q^2=as^3$ (correct)
S10	Freshman, Math.	s^2/q_5

◇ Behavior of Subjects

- ▶ TABLE8: 5人の被験者の生成,検証した主なタイプの関数と各被験者に考えられた数
- ▶ TABLE9: 各タイプの関数に言及した割合
- ▶ TABLE10: 最も頻繁に考えられ半分以上の言及を説明できる 6つの関数への言及の割合
- ▶ 実験 1 と実験 2 の結果は大體一致している
 - 線形関数をもっとも頻繁に考えられる
 - 単純な関数ほど頻繁に考えられる
 - 考える仮説には個人差が大きい
 - 図は広く使用される
- ▶ 異なる点
 - 被験者ごとの言及数の平均 実験 2(10)<実験 1(12.2)
 - ・ 実験 2 では計算に時間がかかったから
 - 実験 2 では 2次・3次関数への言及が実験 1 よりわずかに多い
 - ・ 指数・対数の計算が大変だから 2次・3次関数を試した

- ▶ TABLE4 と 8, TABLE5 と 9 の違いは大きくない
- ▶ TABLE6 の 4 つの関数は TABLE10 には現れていない(新しい 3 つの関数)
 - s^x と $\ln q/\ln s$ がなくなったのは計算機の変化のせい
- ▶ 他は被験者間の個人差による

TABLE 8
Numbers of References to Functions by Type, in Experiment 2

	Function					Diagram		
	Linear	Sequential	Quadratic	Cubic	Others	Total	Graph	Scatter
S6	8	4	1		2	15		1
S7	2	2	2		1	7	1	1
S8	2		5	3	2	12		
S9	3	1	1	2	1	8		1
S10		3	3	1	1	8		2
Total	15	10	12	6	7	50	1	5

TABLE 9
Function References as Percentages of Total in Experiment 2

	Linear	Sequential	Quadratic	Cubic	Others	Total
S6	53.3	26.7	6.7	0	13.1	100
S7	28.6	28.6	28.6	0	14.2	100
S8	16.7	0	41.6	25	16.7	100
S9	37.5	12.5	12.5	25	12.5	100
S10	0	37.5	37.5	12.5	12.5	100
Average	30	20	24	12	14	100

TABLE 10
References to Seven Functions, in Experiment 2

	q/s	$s_{i+1}-s_i$ $q_{i+1}-q_i$	$s,^2$ or s^2/q	$s^2+bs+c=q$	s^2/q^2	$s,^3$ or s^3/q	Sum	Total	%
S6	4	3	0	0	1	0	8	15	53.3
S7	2	2	0	1	0	0	5	10	50
S8	1	0	2	0	1	3	7	12	58.3
S9	1	0	0	1	0	1	3	6	50
▶ S10	0	1	1	2	0	0	4	7	57.1
Total	8	6	3	4	2	4	27	50	54

☆ The Successful Subjects, S8 and S9

- ▶ S8 と S9 の PBG は実験 1 の SY と S3 にとても似ている
 - 比較的体系的な探索
 - 仮説テストからフィードバックを得る
 - フィードバックを更なる探索に利用
- ▶ S8 は少しの関数しか調べず, データを操作してとても素早く法則を見つけた

- S3 に似ている
- ほとんどの操作は s の関数の計算からなり， q と比較する
- ヒューリスティック 4 を **hill-climbing** 探索と組み合わせて使用し，図の助けなしに解決した
- ▶ S9 は線形と 2 次関数を選択し，散布図を作成した
 - $q = as^3$ を選択しその行動を観察し，ヒューリスティック 5 を用いて解決した

◇ Three Unsuccessful Subjects

- ▶ S6 と S10 は余分な関数を探索して，効果的な情報のフィードバックが得られなかった
- ▶ S7 は体系的な探索を行い，探索のガイドに使えるフィードバックを得ていた
 - 複雑なものを試しすぎた

◇ Summary of Experiment 2

- ▶ 実験 2 で観測された行動は全体的に実験 1 と一致した
 - 対数関数のできない計算機でも 2 人がケプラーの第 3 法則の発見に成功
 - 探索は実験 1 の被験者よりいくらか関数の幅が狭かった
 - S7 の失敗が興味深い
- ▶ 発見の成功にはフィードバックを効果的に利用し体系的な探索が必要だが，それで十分なわけではない

◇ Heuristics

- ▶ 関数タイプとパラメータの探索のために数々のヒューリスティックを用いる

◇ BACON と比較

- ▶ Supervisory Heuristics (監督ヒューリスティック)
 1. 最初に単純な関数を試す
 2. もし単純な関数が機能しなかったら，より複雑なものを試す
 3. 複雑な関数の中でも 1 番単純な関数を試す
 4. もし複雑な関数が機能しなかったらより単純な関数を試す
 5. もし関数が複雑すぎるようだったら，詳細までチェックしない
 6. もしデータの傾向が見つかったら，それを使用することにこだわる
 7. 1 つか 2 つの観察のペアを使い式を憶測し，他のペアでそれをテストする
 - 線形関数，単純な関数がより頻繁に考えられることは上記から説明される
- ▶ Operation Heuristics (操作ヒューリスティック)
 1. BACON のヒューリスティック 4
 2. BACON のヒューリスティック 5
 3. BACON のヒューリスティック 4 と **hill-climbing** の組み合わせ

4. 恒常性を目指すその他のヒューリスティック
 5. 連続的な法則
 6. 分解
 7. 推測
 8. 理論的でなかったり間違ったヒューリスティック
- ▶ 被験者は様々な方略と数々のヒューリスティックを呼び起こす
 - ▶ BACON のヒューリスティックは被験者により頻繁に使用された
 - ▶ ヒューリスティック 4, 5 は BACON と被験者により呼び起こされる方法が異なる
 - BACON はヒューリスティックを再帰的に使用する
 - 被験者は体系的にはヒューリスティックを使用しない
 - ・ 成功した被験者はヒューリスティックを呼び起こした後、いくつか他のヒューリスティックを試す
 - hill-climbing とヒューリスティック 4 を組み合わせる

★ DISCUSSTION AND GENERAL THEORY

- ▶ 14 名の被験者のうち 4 名がデータからケプラーの第 3 法則を発見
 - 1 名は近くまで行き, 9 名は失敗
- ▶ データ駆動型の科学的法則発見は未知の不思議な問題解決過程を必要としない
 - 顕著な発見は問題解決に見られる一般的な過程からなされる
 - ・ データ駆動型の発見は仮説空間と事例空間の探索の交互作用からなる
仮説空間は関数タイプとパラメータの 2 つのレベルからなる
 - 発見の 2 つの過程
 - ・ 問題とデータの理解
 - ・ 探索
 - ベーシックな探索方略は best-first 探索
- ▶ 仮説テストや"succeed-fail"テストのフィードバックを利用する
 - フィードバックの効果的な利用はうまくヒューリスティックを使うための必要条件である
- ▶ 散布図やグラフは関数選択に重要
- ▶ 抽象化などのデータの変形はパラメータの選択に有用
- ▶ 被験者ごとに使用する方略に大きな違いが見られた
 - 方略の違いは成功した被験者とそうでない被験者を区別するのに十分である
- ▶ いくつかの必要条件
 - ドメインの基礎的な知識の処理
 - 良い探索方略の適用
 - 適切で体系的なヒューリスティックの使用

- 関数, パラメータの両レベルの探索
- ▶ BACON プログラムとの比較
 - BACON は線形関数と比率の探索のみでケプラーの第 3 法則を発見する
 - BACON のヒューリスティック 1, 2, 3 はほぼ全被験者に使用された
 - 成功した被験者はヒューリスティック 4, 5 に似た手続きをうまく使っていた

★ SCIENTIFIC DISCOVERY IN HISTORY

- ▶ 実験の目的
 - データ駆動型の発見課題における人間の問題解決の特性を明らかにする
 - 実験が実際の歴史的な事例について何を明らかにするか調べる
 - ▶ 本実験は 2 つの実験に基づく
 - 8 名中 5 名がプランクの法則を 2 分未満で発見した
 - 化学エンジニアリングの院生がバルマーの公式を約 60 時間で発見した
 - ・ バルマーと同様で本実験と同じ種類の探索を行った
 - ▶ ケプラーの *Epitome of Copernican Astromy, Harmonies of the World* を調べた
 - データ, 特に Brahe から引き継いだデータに注意を向けていた
 - それらのデータをコペルニクスの地動説に組み込んだ
- ⇒ケプラーはデータ駆動型の発見者
- 現象の描写だけでは満足しなかった
 - なぜそのようになるのか知ろうとした
- ▶ ケプラーの第 3 法則の発見におけるデータと理論の役割は？
 - ケプラーは惑星の距離と周期の関係を発案したわけではない
 - ケプラーによるデータは一部に過ぎない
 - 科学的発見の本当の問題はデータの法則を見つけることではなく, 問題を定義し, 関係するデータを見つけることだという議論がある
 - ・ それらのことはケプラーの主な貢献ではない
 - ・ ケプラーの貢献は天体の配置 (ジオメトリー) を明らかにする形にデータを変えて, ニュートンの慣性と重力の基礎を作った
 - ・ 第 3 法則発見後, 原因を探した
- ▶ 当時のスタイルでは因果の説明は大きな関心ごとではなかった
 - ケプラーのこの点への姿勢は彼の"原因"とデータが一致しない他の問題の扱いから明らか
 - 仮説にデータがあわなかったとき, 仮説もデータも棄却せずに, 追加的な因果を探した
 - データの規則性がはじめにあり, 因果はそれに合わせて形作られる
- ▶ ケプラーがデータから第 3 法則を見つけたといえる理由

- 2つの惑星の周期と距離の比率がとても大きいことを発見し二次法則"quadratic law"にたどり着いた
- 被験者と同様に満足し、周期は軌道の長さを太陽の推進力の強さで割った比率と等しいという仮説でサポートしようとした
- 二次法則の経験的な正しさでは満足できなくなり、正しい法則を発見

★ CONCLUSION

- ▶ 科学は漸進的で累積的な過程
 - どの1つだけのステップも"真の発見"ではない
- ▶ 科学者は新しい事象とデータを生成し、データを記述する新しい法則、その法則を説明する新しい概念やメカニズムを発見する
 - その全てが科学的発見の累積的な過程を作る漸進的なステップ
- ▶ 本研究ではその一部であるデータ駆動型の発見が他の問題解決の過程と同様の方法でなされることを発見

Productions for Finding a Law

1. The goal is to find a law;
There is a hypothesis;
—
Test the hypothesis.
2. The goal is to find a law;
There is a hypothesis;
The result of testing is "Success";
—
The hypothesis is the law to be found
Halt.
3. The goal is to find a law;
There is a hypothesis;
The result of testing is "Failure";
—
Set the hypothesis as a used-hypothesis.
4. The goal is to find a law;
There is no hypothesis;
—
Set subgoal: build a hypothesis.
5. The goal is to find a law;
There is no hypothesis;
There is a used-hypothesis;
—
Set subgoal: analyze the used-hypothesis,
find the trend of the data,
build a hypothesis.

Productions for Building a Hypothesis

6. The goal is to build a hypothesis;
—
Try to find the trend of the data.
7. The goal is to build a hypothesis;
There is a trend;
—
Form a hypothesis.
8. The goal is to build a hypothesis;
There is a trend;
—
Select a function type.
9. The goal is to build a hypothesis;
There is a function type;
—
Check the function type.
10. The goal is to build a hypothesis;
There is a function type;
The result of checking the function type is "Failure";
—
Delete the function type.
11. The goal is to build a hypothesis;
There is a function type;
There is a trend;
—
Select a set of parameters, form a hypothesis.
12. The goal is to build a hypothesis;
There is a function type;
There is a used-hypothesis;
There is a set of parameters;
—
Change the parameters, form a hypothesis.
13. The goal is to build a hypothesis;
There is a trend;
—
Select a function (including the parameters),
form a hypothesis.

Productions for Finding a Trend

14. Try to find the trend of the data;
—
Draw a diagram, analyze the diagram,
set the trend of the data.
15. Try to find the trend of the data;
—
Transform the data, set the trend of the data.

Figure 2. The production system of the detailed model.

Appendix

The problem Behavior Graphs of Subjects S₁ and S₃ Subject S₁

