

How Do Scientists Respond to Anomalies? Different Strategies Used in Basic and Applied Science

Susan Bell Trickett, J. Gregory Trafton, Christian D. Schunn

Topics in Cognitive Science (2009), 1, 711–729

1. Introduction

◇ Anomaly

- ▶ 予測と異なる現象, 異質な現象
- ▶ 科学的な進歩を助ける
 - Kuhn, 1970; Kulkarni & Simon, 1988; Dunbar, 1995

◇ 今までの研究では科学的発見における役割が調べられてきた

- ▶ 2つのタイプの科学
- ▶ Basic science
 - 一般的で論理的な科学理解の発展, 修正, 進歩を目標とする
 - ・ 深いプロセスの理解に努める
 - Anomaly の役割 発見の機会を与える
 - 先行研究 (Trickett & Trafton, 2007; Christensen & Schunn, 2009)
 - ・ Anomaly により不確定さのある期間へ入る
 - ・ Conceptual simulation やその他の方略の使用へ
- ▶ Applied science
 - 意思決定をサポートするための特定の状況におけるモデルの構築を目標とする
 - ・ 問題の実践的な解決を求める
 - Anomaly の役割 決断の妨害
- ▶ Basic と applied science において anomaly は異なる扱いを受けるのか?

1.2. Conceptual simulations

◇ 何が起こるかを見るため, 状況を思い浮かべて, 心的に結果を展開すること

- ▶ 3つのフェーズからなる”what if” reasoning の形をとる (Table 1)
 - システムの表象を形成する
 - シミュレーションを走らせる (run) ために表象を心的に調整する

Table 1

Examples of conceptual simulation (CS) from astronomy and spatial transformations (ST) (in italics) from meteorology

Utterances	Code	Explanation
Look at the little sort of, er, sort of intrusion of the velocity field here...What can it mean?		Scientist looks at image of velocity contours
<i>In a perfect sort of spider diagram</i> 完全なスパイダーダイアグラムでは	CS	Scientist is <i>not</i> looking at a spider diagram. This is a reference to new representation (spider diagram)
<i>if you looked at the velocity contours without any sort of streaming motions, no, what I'm trying to</i> もし, streaming motion がなかったら streaming motion	CS continued	Reference to transforming representation (mentally removing existing streaming motions)
<i>you'd probably expect these lines here</i> [gestures] to go all the way across, you know, the この線は円を横切ることが予測される	CS continued	Reference to result (sees what happens)
so that would lead me to believe, based on this pattern		Looks at upper air map
based on the location of these guys here <i>we're going to have good southwesterly flow over these parts</i> location on map] South Carolina のこの辺に南西の風があつて	ST	Looks at upper air map Looks at different map; mentally adds southwesterly flow inferred from upper air map, not marked on current map
<i>more of a maritime influence here</i> [points] 海洋の影響がもっとあつて	ST	Mentally adds area of maritime influence (not marked on map)
<i>this is going to be high here</i> [points] ここはもっと高くなる	ST	Mentally adds high (not marked on map)

(Trickett & Trafton, 2007)

・ Run の 2 つの特徴

仮想的

異なる表象を構築する

- run における仮説的条件の妥当性に関する推論を引き出すために最終的な表象が心的に調べられる

◇ 特徴

▶ Cost

- 認知的負荷が大きい
- ドメイン知識が必要とされる
- 結果が不完全で不正確 (Forbus, 1997)

▶ Benefit

- 曖昧さを許す (Forbus, 1997)
- 手軽

- ▶ これらの特徴は特に **basic science** と関連する
 - 表象の操作 = 論理的フレームワークにおける現象の理解
 - 操作の結果の検討は原因の推論を可能にする
 - シミュレーションをすること自体が理論とデータの間関係を明確にすることを必要とする
 - 不確定さが存在するときに適している
- ▶ **Anomaly** の後には **basic scientist** は **conceptual simulation** を利用するだろう
- ▶ **Applied science** を行う人はあまり使用しないだろう
 - 曖昧さを減らすという目的が達成されない
- ▶ 科学者は心的に不確定さを含む情報を視覚的に変化させる (Trickett, Trafton, Saner, & Schunn, 2007)

1.2. Spatial transformations

- ◇ 心的な状態や位置を他の状態や位置へ変化させる (Table 1)
 - Shepard & Metzler, 1971; Bogacz & Trafton, 2005; Hegarty, 1992; St. John, Cowen, Smallman, & Oonk, 2001; Kosslyn, Sukel, & Bly, 1999; Trafton, Trickett, & Mintz, 2005
- ▶ **Applied science** では **spatial transformation** がより使用されるだろう
 - より完全なデータを描くことにより, 問題が解決できる
- ◇ **Conceptual simulation** と **spatial transform** は何が違うのか?
 - ▶ **Spatial transformation**
 - ユニット単位で短い
 - 表面的な操作
 - ▶ **Conceptual simulation**
 - 複雑で連続的な手続き
 - 完全に新しい心的表象を作り, 実行する
 - 結果の検討も含む
 - **Spatial transformation** を一部に含む場合もあるがそれだけでは成り立たない
- ◇ 2種類の **spatial transformation**
 - ▶ **Pure** - 新しいメンタルイメージを作成する

- ▶ Comparison - 2つのイメージを比較する
 - Conceptual simulation と pure spatial transformation の両方においてイメージの比較が行われる
 - ・ Basic と applied の両方で使用される

☆ 仮説

- ▶ 両グループで comparison spatial transformation が使用される
- ▶ Basic scientist の方が conceptual simulation をより使用する
- ▶ Applied science practitioner の方が pure spatial transformation をより使用する

2. Study 1

2.1. Method

☆ Dunbar の in vivo methodology の利用 (Dunbar, 1995, 1997)

- ▶ 日々の課題を行っている科学者の言葉を観察, 記録
- ▶ Basic science
 - 天文学, 計算流体力学
 - 4つのセッション
 - 3名のエキスパート
 - 10年以上の経験がある
 - 課題
 - ・ 銀河に関する電波望遠鏡のデータの分析
 - ・ 潜水艦の動きのモデルのコンピュータシミュレーションデータの分析
 - ・ レーザーペレットの実験データの分析
- ▶ Applied science 気象学
 - 5つのセッション
 - 5名のエキスパート
 - 海軍の気象予報士
 - 10年以上の経験がある
 - 課題
 - ・ 部分的, または, 長期の局所天気予報
- ▶ ビデオで記録

Table 2
Coding of phenomena as anomalous or expected in basic science

Criterion	Code	Example
Explicit	Anomalous	What's <i>that funky thing</i> <i>That's odd</i>
Domain	Expected	You can see that <i>all the HI</i> is concentrated in the ring knowledge
Association	Anomalous	You see <i>similar kinds of intrusions</i> along here
Contrast	Expected	That's odd...As opposed to <i>these things</i> , which are just the lower contours down here
Question	Anomalous	I still wonder why <i>we don't see any HI up here</i> in this sort of northern ring segment?

Table 3
Coding of phenomena as anomalous or expected in meteorology (indication of anomaly in italics)

Utterance	Anomaly
The old watch had put 35 to 40 saying that it would sustain off of the coast of Greenland <i>I don't see that</i>	Discrepancy between previous data (old watch) and current data
But I guess the ETA kinda has some moisture there too, so <i>but not quite as much</i> <i>Hmm, and then the GFS has, has much less</i>	Discrepancy between models Discrepancy between models
Umm, looks like there's gonna be some precip coming through a little later in the week like couple days through like 42 hr so maybe there will be some precip in the forecast <i>unlike what I thought before</i>	Discrepancy between model and forecaster's expectation

- ▶ 文字に起こして，分割

2.1.1. Coding scheme

2.1.1.1. Inter-rater reliability

- ▶ 2名のコーダー

2.1.1.2. Anomalies

◇ Basic science (Table 2)

- ▶ 5つの基準で anomaly と考えられたかを分類
 - 科学者が **anomalous** または予測通りと発言した場合それに従う
 - 言及がない場合，ドメイン知識により判断

- 既に **anomaly** とされている他の事象と関連づけられている
 - 既に予想通りとされている事象と対比的であるか
 - 特徴や事象に疑問を持つか
- ▶ 一致率 $\text{Kappa} = 0.77$

◇ Applied science (Table 3)

- ▶ データに乖離がある場合
- ▶ 2つのモデルが不一致，モデルが学者の予測に一致しない

2.1.1.3. Conceptual simulations

◇ Anomaly に付随する全ての発話を分類

- ▶ Trickett and Trafton (2007) に基づく **conceptual simulation** の分類
- ▶ 複数の発話にまたがる 3 ステップの流れ
 - システムやメカニズムの新しい表象への言及
 - 仮説的な方法での表象の変化への言及

Table 4
Coding of spatial transformations as “comparison” or “pure”

Utterance	Code
Yeah, OK, so they have precip coming in 48 hr from now	
Let me try to go back to GFS and see what they have	
Well, OK, <i>they don't differ</i>	Comparison (two model maps of precipitation compared)
They have a little bit at 54 even a little bit	
<i>and they have that storm passing further to the south</i>	Comparison (two model maps)
You also have a 12 max 14, winds are not supporting that	
<i>The next chart has it moving down further to the south</i>	Pure (adds representation of high sea area to current chart, but places it further south as second chart suggests)
Here's the low and here's the warm front see it right here	
<i>it comes around, comes around, comes around</i>	Pure (mentally adds movement to static representation)
<i>it comes around here</i>	Pure (mentally adds movement to static representation)
<i>see it dips like that</i>	Pure (mentally adds movement to static representation)
that's exactly what that thing's doing	
You can see the high	
<i>See how it's going here</i>	Pure (mentally adds movement to static representation)
<i>And the front's back in here</i>	Pure (mentally adds front to map it is not represented)

- 変化の結果への言及
- ▶ 一致率 $\kappa = 0.75$

2.1.1.4. Spatial transformations

- ▶ Trafton et al. (2006) に基づく spatial transformation の分類 (Table 4)
 - 参加者が空間的なものを心的に他の状態や場所へ変化させる
 - Pure 1つのイメージ内での心的操作 (他のイメージへの言及がない)
 - Comparison 2つのイメージの比較を含む

2.2. Results

- ▶ 発話数
 - Basic science 1449 / applied science 2202
- ▶ Anomaly 数
 - Basic science 17 / applied science 25
- ▶ Anomaly の前の 10 の発話
- ▶ 1 要因分析
 - 全ての方略で basic と applied の間に有意な差はない ($F_s < 1$)
- ▶ 混合要因 ANOVA
 - Anomaly の前と後 \times basic と applied
- ▶ Conceptual simulation (Fig. 1A)
 - Anomaly の前 $<$ 後 ($F(1, 7) = 25.88, p < .01$)
 - Basic scientists $>$ applied science practitioners ($F(1, 7) = 8.43, p < .05$)
 - 交互作用 ($F(1, 7) = 18.53, p < .01$)
- ▶ Pure spatial transformations (Fig. 1B)
 - Anomaly の前 $<$ 後 ($F(1, 7) = 9.82, p < .05$)
 - タイプの違いなし ($F(1, 8) = 2.7, p = .14$)
 - 交互作用なし ($F(1, 7) = 3.07, p = .12$)
- ▶ Comparison spatial transformations (Fig. 1C)
 - 有意差無し ($F < 1$)
- ▶ Comparison spatial transformation は anomaly とは関連しない
- ▶ Basic と applied science のエキスパートがどのように anomaly を扱うかには手続き的な違いがある

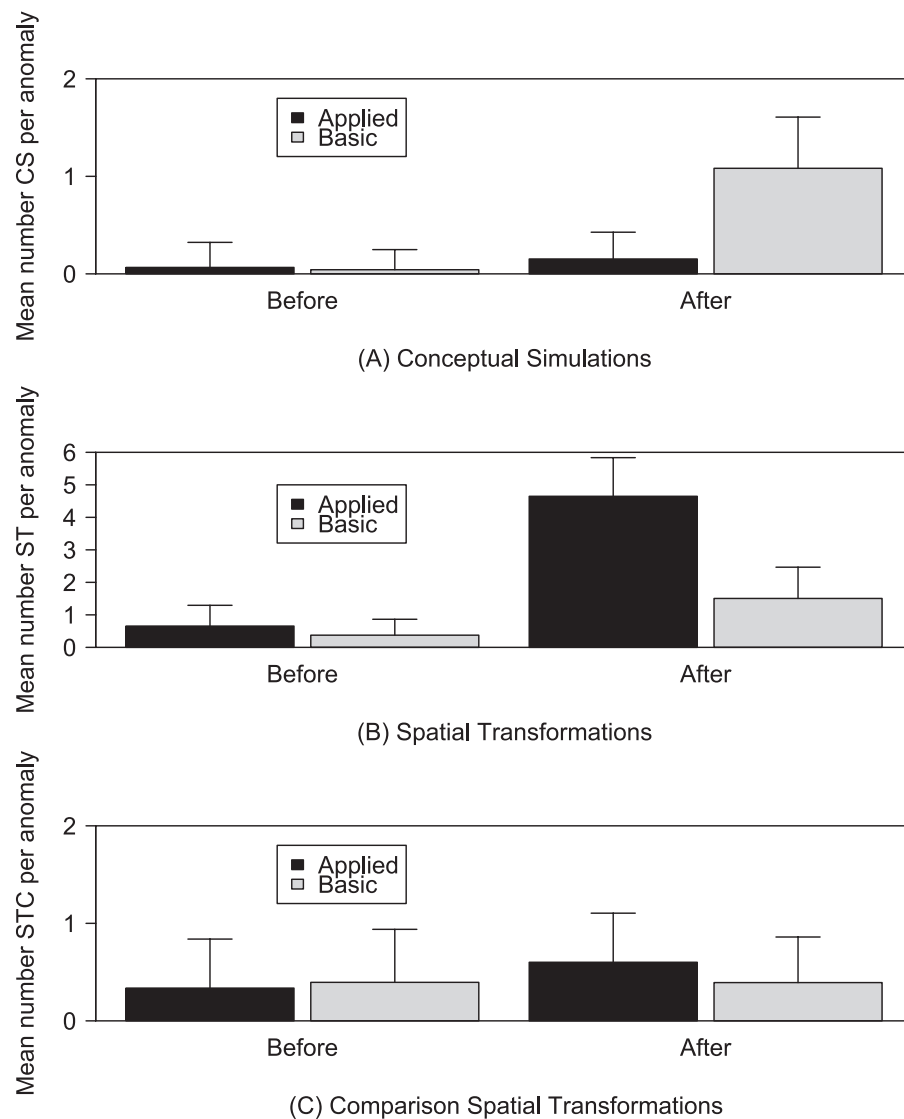


Fig. 1. Mean number (with standard error bars) of conceptual simulations, spatial transformations, and comparison spatial transformations before and after each anomaly for applied and basic science.

- ▶ Anomaly の前
 - どちらの科学者も全ての方略を同じくらい使わない
- ▶ Anomaly の後
 - Basic science conceptual simulation の使用
 - Applied science pure spatial transformation の使用 (強い傾向が見られる)
 - Comparison spatial transformation の使用は同じくらい少ない
- ▶ Conceptual simulation の例 (Table 5)
 - コンピュータモデルの結果が実験と一致しなかった

Table 5

Example of conceptual simulation (CS) used to resolve anomaly in basic science (CS in italics)

Utterances	Coding	Explanation
<i>It is conceivably possible that this curve is floating around all over the place, and what they're showing is an average</i> (scientist is looking at a graphical representation [a curve] that represents the turbulence)	CS	Reference to new representation (this curve)
<i>so if this thing is really floating around that much, just up and down, and I'm at the extreme end, and if I average all of this stuff,</i>	CS continued	Reference to transforming representation
<i>then I may actually still get the curve right</i>	CS continued	Reference to result (sees what happens)

Table 6

Example of conceptual simulation (CS) used to resolve anomaly in basic science (CS in italics)

Utterances Scientist 1	Coding	Explanation
OK, OK, one of the things that show up in at least the preliminary models that I did run are this thing sort of breaks apart and this thing sort of goes...		
so you have a separation of the ring into a, an outer arm and another arm		
<i>so this could be actually be a completely different sort of kinematic population</i>	CS	Reference to new representation (a completely different sort of kinematic population)
<i>This could actually, this, these stars could be bending inward</i>	CS contd	Reference to transforming representation
<i>While these stars are bending outward</i>	CS contd	Reference to transforming representation
<i>So you actually have a separation of the two like that</i>	CS contd	Reference to result
That's where the blob could really be coming from		Conclusion regarding anomaly

- 実験データに問題があるという仮説の提案「実験データは平均である」
- **Conceptual simulation** を行う「モデルのデータを平均したらどうか？」
- 結果を比較したがデータとは合わない

▶ 別の例 (Table 6)

- **Anonymous blob** を理解しようとしている
- 前に使ったモデルを思い出す
- 現在のデータに合わせて変化させる
- 結果を観察する

Table 7

Example of applied science practitioner using spatial transformations (ST) (in italics) to resolve anomaly

Utterance	Code	Explanation
They really want to drive some warm air in there I just can't buy that	Anomaly	Discrepancy between model data and forecaster's expectation
What did I do for the 5th? 82 I'm gonna stay with 82 there even though the thickness now shows it's in here <i>the front is back in here somewhere</i> <i>you've got warm moist air</i> <i>you've got the high over here that's off Bermuda</i> <i>and you got this one in here...</i> ...so the temperature, the max temperature's going to be pushed down	ST ST ST ST	Mentally adds front to map (not represented) Mentally adds weather feature (not represented) Mentally adds high pressure (not represented) Mentally adds weather feature (not represented) Resolves anomaly: justifies forecasting lower temperature than model predicts

- ▶ ある可能性を正しいとして、心的に展開して結果を得る
 - 可能性のある説明と関連付けてデータを考えることができる

- ▶ Spatial transformation の例 (Table 7)
 - 気象学者はモデルのデータが適切でないと思える気温の増加を示していることに気づいた
 - 気象図に必要なと思える表象、情報を心的に加えていく
 - 情報を読み解き、anomaly を解決

- ☆ 2つのグループの科学者で違いが観測された
 - ▶ 原因はわからない 科学者のタイプ or 課題の内容
 - ▶ 方略がどのように課題に影響されるかについての2つの考え方
 - 仮説とデータの乖離は conceptual simulation により解決されやすく、2つのデータの乖離は spatial transformation により解決されやすい
 - ・ 十分なデータがない
 - 方略使用の熟達
 - ・ もし、課題により方略が引き出されるならどのような解決者も同じ課題に同じ方法で臨むだろう
 - ・ より高いレベルのスキルと知識が必要とされる課題解決に特に役立つ方法がある可能性がある

3. Study 2

- ▶ エキスパートとノービスの方略の比較
 - 同様の課題を行う必要がある
 - ・ 気象学に限定する
 - ・ エキスパートと同様の課題
- ▶ ノービスの方が少ない **pure spatial transformation** を行うだろう
 - スキルと知識が必要となるため
- ▶ ノービスの方がより多い **comparison spatial transformation** を行うだろう
 - 比較に必要な知識は持っている

- ▶ 10名の気象学の学部生
 - 天気予報の経験は1から2年
 - 授業, 日常的に天気予報, 大会にも参加
 - 研究1の結果と比較
 - 3日間の天気予報をする

4. Results

- ▶ 2340の発話
- ▶ 23の anomaly
 - 最低でも1つは気づく
- ▶ Anomaly 前の各方略の使用
 - Conceptual simulation にのみわずかな違いがある ($F(1, 13) = 2.16, p = .17$)
 - Pure ($F < 1$)と comparison spatial transformation ($F(1, 13) = 2.88, p = .11$) に違いはない

- ▶ 混合要因 ANOVA
- ▶ Conceptual simulation (Fig. 2A)
 - Anomaly の前 < 後 ($F(1, 13) = 3.89, p = .07$)
 - エキスパート > ノービス ($F(1, 13) = 6.48, p < .05$)
 - 交互作用 ($F(1, 13) = 6.48, p < .05$)
- ▶ Conceptual simulation はこのドメインに関連する方略ではない
 - ノービスは conceptual simulation を全く使用しなかった
 - エキスパートもわずかにしか使用しなかった

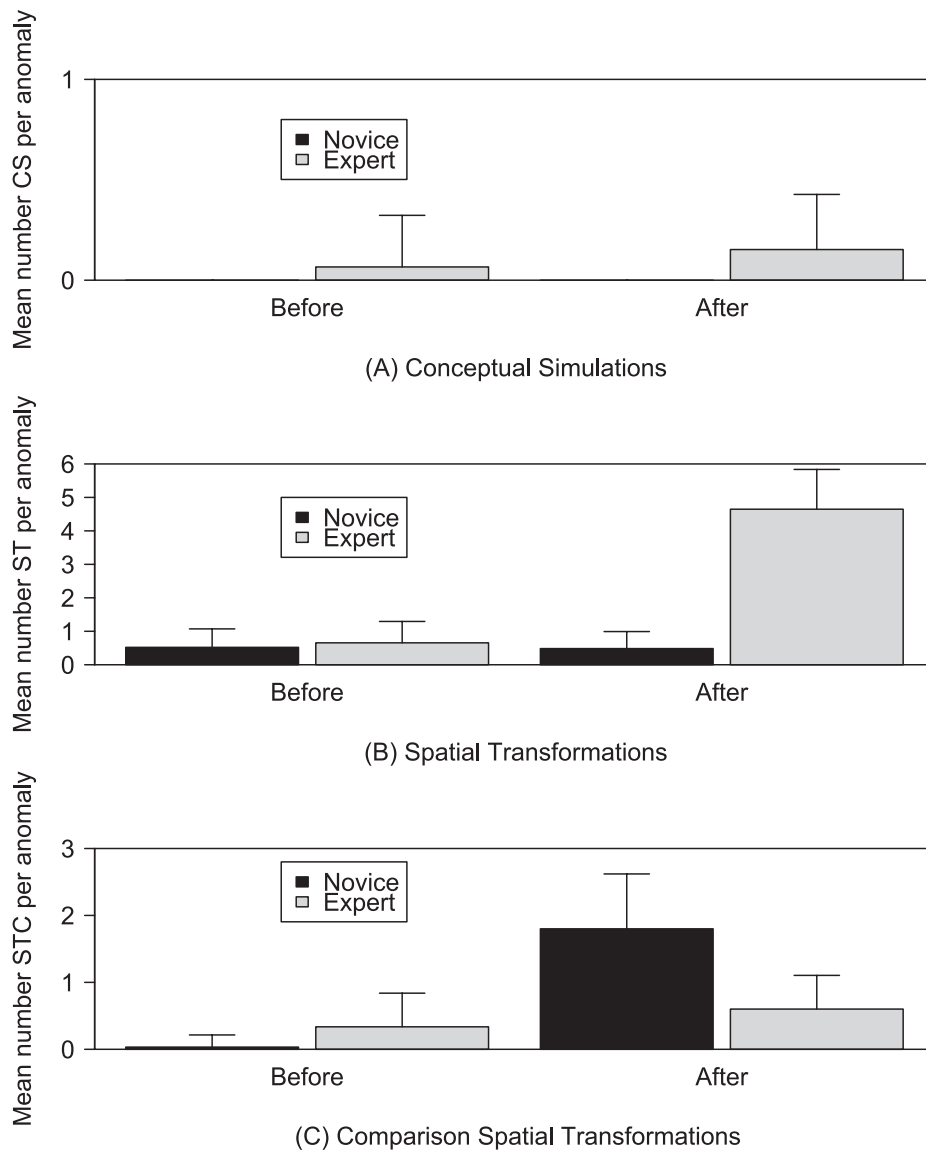


Fig. 2. Mean number (with standard error bars) of conceptual simulations, spatial transformations, and comparison spatial transformations before and after each anomaly for expert and novice applied science practitioners.

- ▶ Conceptual simulation が使用されるとしたら、それはエキスパートの方略である
- ▶ Pure spatial transformation (Fig. 2B)
 - Anomaly の前 < 後 ($F(1, 13) = 17.35, p < .01$)
 - エキスパート > ノービス ($F(1, 13) = 10.54, p < .01$)
 - 交互作用 ($F(1, 13) = 17.99, p < .01$)
- ▶ Anomaly の後にエキスパートのほうが pure spatial transformation を使用する
- ▶ このドメインの anomaly の扱いにおけるエキスパートの重要な方略である

- ▶ Comparison spatial transformation (Fig. 2C)
 - Anomaly の前 < 後 (傾向 $F(1, 13) = 4.06, p = .06$)
 - エキスパート \approx ノービス ($F < 1$)
 - 交互作用なし ($F(1, 13) = 2.22, p = .16$)
- ▶ グラフに示されるように, ノービスは anomaly の後 comparison spatial transformation をより使用する傾向がある

- ▶ Anomaly に直面したとき
 - エキスパートはより pure spatial transformation を使用する
 - ノービスはより comparison spatial transformation を使用する
- ▶ ノービスは anomaly を検出できる
 - Anomaly を解決しようとするより, その特徴を抽出することに集中する
- ▶ ノービスは矛盾するモデルのどちらがより適切かを判断する能力に欠けている

5. General discussion

☆ 異なるタイプの科学者による 3 つの方略の anomaly の検討における役割を調べた

- ▶ Basic scientist Conceptual simulation の使用
- ▶ Applied science practitioner Pure spatial transformation の使用
- ▶ ノービス
 - Pure spatial transformation の能力に欠ける
 - Comparison spatial transformation の使用
- ▶ 研究 1 の結果が観察されるには熟達が必要
- ▶ ノービスはデータの表象化そのものに集中したと考えられる
 - データを超えた分析ができなかった

☆ 理由

- ▶ 課題の目標の違いにより適切な方略が異なる
- ▶ Anomaly のタイプが異なる
 - 気象学における anomaly はドメインの基礎的な事象の理解を脅かさない
 - Basic science における anomaly は論理の理解にフィットしない
- ▶ 現在の課題によって方略が決まる
 - Applied science においても conceptual simulation が使用されることがある
 - Basic science においても spatial transformation が使用された

- 解決すべき anomaly
 - ・ 表層レベルの場合 **spatial transformation** が使用される
 - ・ 理論とデータにより深い矛盾がある場合 **conceptual simulation** が使用される
- 現在の課題はドメインと関連する
- ▶ **Basic science** における創造的な性質
 - **Conceptual simulation** は創造的なエンジニアにより使用される
 - 気象学や **applied science** では問題解決がルーティンになる
 - **Spatial transformation** は個人のモデルをよりグローバルなモデルにフィットさせるのに使用される
- ☆ 科学のタイプによって方略が異なる
 - ▶ **Conceptual simulation** は創造的問題解決の顕著な特徴となる