

科学基礎論学会大会シンポジウム
「シミュレーション科学の哲学」

シミュレーションの認識論に何が できるか

伊勢田哲治
京都大学

iseda213@gmail.com

1

目的

- シミュレーションについて科学哲学で行われている議論のいくつか(とりわけNorton and Suppe 2001)を紹介
- 気候モデルの評価への適用
- 他のタイプのモデルへの適用
- シミュレーションの認識論の拡張の可能性を考える

2

シミュレーションの認識論

- コンピュータ・シミュレーションを研究対象とする科学哲学の研究は20世紀の間もないわけではなかったが、本格的に論文の数が増え始めるのは21世紀になってから。
- コンピュータ・シミュレーションの哲学と言ってもいろいろな切り口からの研究が可能だが、ここでは知識の生産という問題と何らかの形で結びついている研究に話を限定する。

3

シミュレーションの認識論

- シミュレーションの認識論における典型的な問題設定:
 - シミュレーションは何か新しい哲学的問題を生むのか
 - シミュレーションは実験と何が違うのか
 - シミュレーションは科学的知識を生むのか
 - シミュレーションの信頼性はどのように評価されるべきなのか
- コンピュータ・シミュレーションに話を限る。

4

いくつかの立場

- シミュレーションには何も新しい点はない(Frigg and Reise 2008)
 - シミュレーションは人間が完全に理解できない計算をするという意味で新しい認識論的問題(Humphreys 2009)
- シミュレーションは実験の一種だが、物質的な介入ではない(非物質的ないし数学的介入)(Morgan 2003)
 - シミュレーションも十分物質的であり、シミュレーションそのものは実験ではないにせよ、シミュレーションを使った研究は実験になりうる (Parker 2009)
- シミュレーションは発見的ツールであり世界についての知識を産まない(Oreskes et al 1994)
 - シミュレーションは一定の条件下で実験と同様に知識を生む(Norton and Suppe 2001)

5

Norton and Suppe 2001

- 本提題ではとりわけ代表的なシミュレーションの認識論としてNorton and Suppe “Why atmospheric modeling is good science” の議論を紹介。
- 気候科学を事例として、シミュレーションが通常の実験と本質的に変わらないことを論じている。(Oreskesらの懐疑的な議論への反論)

6

Norton and Suppe

- 議論の概要(1)
 - シミュレーションに限らず、科学の至る所でモデルが使われる
 - 生データはモデル化され model of data となることで解釈が可能となるが、その際にデータの足りない部分を仮定で補うことは多い。
 - 直接観測できない対象を測定する際には、その対象との間に写像関係を持つ探針(probe)モデルが使われる。ここでも必要があればモデルに構造を与えるため仮定が補われる。
 - いずれの場合も偽なる仮定を補うことでかえって実際の効果が浮き彫りにされることがある。逆問題(inverse problem)を解く際などにこうした手法が有効。

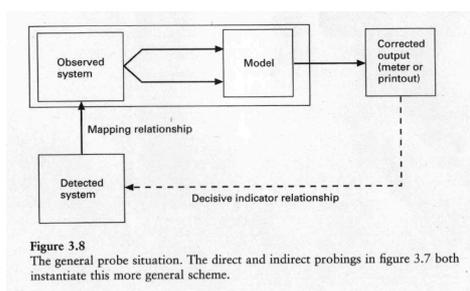
7

Norton and Suppe

- 議論の概要(2)
 - シミュレーションモデルは基礎モデル(base model)、集約モデル(lumped model)、プログラムされたコンピュータ(programmed computer)の3つからなる。
 - 対象を抽象化したものとしての基礎モデルと、コンピュータに適した解像度まで集約して実装されるものとしてのかたまりモデルの間には写像関係が成立。この写像の善し悪しがシミュレーションの善し悪しをきめる。
 - 写像関係を作るには校正(calibration)が必要だが、これは一般の測定機器も同じ。
 - シミュレーションの各モデルの関係は探針を使った測定の際の各モデルの関係と同型的。

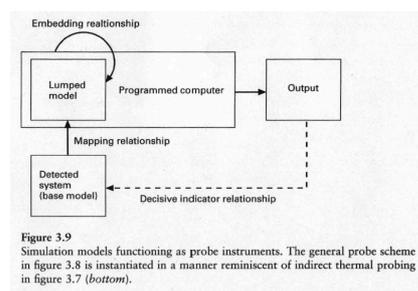
8

探針モデルによる測定の概念図



Norton and Suppe 2001より

シミュレーションモデルの概念図



Norton and Suppe 2001より

10

Norton and Suppe

- 議論の概要(3)
 - モデルにおいてはソフトな仮定、根拠のない仮定、理想化された仮定、偽と知られている仮定などが使われるのがいつものことになっている。たとえば大気が離散的な層からなるという仮定は明確に偽だがリーズナブル。
 - 偽なる仮定に由来する人工的効果(artifacts)をうまく避けるように主張を仕立てる(tailor)ことによって信頼性のある主張ができる
 - 逆問題の解は仮定を使っても一意に決まらないことが多い。その場合でも可能な解の空間の全体で共有される頑健な結果(robust result)が得られることはある。感受性分析(sensitivity analysis)が必要。

11

気候モデルの評価

- Norton and Suppeは気候科学を事例としているが、この論文の後2007年にIPCCの第四次評価報告書(AR4)が出るなど、気候科学も進展している。
- AR4のうちモデルの信頼性の評価に関する部分をNorton and Suppeの分析と比較し、気候科学者たち自身が気候シミュレーションをどういう存在としてとらえているかを考える。

12

IPCC第四次評価報告書

- AR4 は三巻本で出版されている。
- ここで検討するのはそのうちのClimate Change 2007: The Physical Science Basis の第8章。

13

AOGCM

- 気候変動の予測に主に用いられるのが大気海洋大循環モデル(atmosphere ocean general circulation model, AOGCM)。大気の循環のモデルと海洋の循環のモデルを結合したという意味で結合モデル(coupled model)とも呼ばれる
- AR4では23個のAOGCMが主な分析に利用された。

14

AOGCMの概念図(NOAA)

http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/modeling_schematic.html

アメリカ海洋大気庁(NOAA)のシミュレーション用コンピュータ

http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/GFDL_HPCC.html

AOGCMのリスト(一部)

Solomon et al 2007より

気候変動予測

・1990年の第一次報告書以来モデルはどんどん複雑になっているが、将来にわたる温暖化を予測する点は一貫している。
 ・二酸化炭素などの排出を2000年の状況で抑制することで予測は大幅に変化する。

18

報告書における確実さの表現

- 第三次評価報告書あたりから、シミュレーションで得られた結論の確実さについて、かなり厳密な言葉遣いを行うようになってきている。
- 「確信の度合」と「確率」を分け、それぞれを確信や確率の大きさに応じてvery high confidence~very low confidence、virtually certain~exceptionally unlikely と表現するように指示。
- たとえば現在進行している温暖化が人為的であるという判断についてはvery likelyという表現が使われており、リストと比較すると「90%以上の確率」を意味していることがわかる。(なぜか確信ではない)

19

モデルのヒエラルキー

- 気候科学ではAOGCMのようなリアルさを追求したモデルだけではなく、わざと単純化したモデルも使われる。
- モデルのヒエラルキー(hierarchy of models)と呼ばれる(Held 2005)
- EMICs (earth system models with intermediate complexity) と呼ばれる比較的単純なモデル、大気を一次元・二次元におとしこんだモデルなど。
- こうしたモデルは長期的なシミュレーションを効率よく行うために用いられる他、AOGCMで何が起きているかを理解するためにも用いられる。

20

気候モデルに特有の問題

- 気候モデルは精度が求められる(質的な面だけでなく、量的にも、どの程度温暖化が進むかといった問題に答えられることが求められる)。出した答えの影響力が大きい。
- グリッドは非常に細かくなってきたが、気候に影響をあたえる重要なプロセスはグリッドよりも小さいサイズで起きる。→パラメータ化が不可欠
- 繰り返して実験することが不可能なばかりか、過去に同規模の温暖化ガスの放出が行われたことはなく、過去からの類推は難しい。

21

気候モデルの評価

- 主な評価手法(Solomon 2007のほかLloyd 2010なども参照)
 - シミュレーションに使われる物理的なプロセスのチェック
 - 過去や現在の気候を再現する能力の評価(気温、降水量、放射量、風、海水温度、海流、海氷などさまざまな変数のチェック)
 - 天気予報への応用
 - モデル間比較の標準化と比較データの公開(一般の研究者によるチェック)

22

気温の再現度による評価

1900年以來の気温変化とモデルの予想の合致

モデルの予測と実際の平均気温との差を色で表現。赤みがあったところが差が大きい。南極付近にシステムティックな誤差があることが分かる。

23

評価の結果

- 物理的なプロセスについては flux adjustment(流量調整?) と呼ばれる人為的な調整が近年のモデルで使われなくなったこと、海洋のモデルがも同様に非常にリアリスティックになってきたことなどが肯定的に評価される。
- 一日の気温の変化の幅や降水量などについてもかなり正確に再現できる。(これはそうしたものを使ってパラメーターを校正しているので当然のようではあるが、物理的に根拠のある自然な値の範囲内で実現している点は重要。)
- 23のモデルの値がばらつく理由も分析。主に雲の扱い方が差を引き起こしている。複雑系であるためにある程度のばらつきは残らざるをえないという点も言及あり。

24

Norton and Suppeとの比較(1)

- かなり大きなセルを使って、その中のプロセスをパラメータ化しているのはシミュレーションにおける「集約化」(lumping)のよい例
- 過去や現在のデータを使ってパラメータの校正を行い、ベースモデルとの写像関係の正確さを入念にチェックしているのは、まさにNorton and Suppeの分析のとおり。

25

Norton and Suppeとの比較(2)

- 少しずつ仮定の異なる23のモデルを比較検討し、共通の性質を取り出すというやり方もまた、仮定による人工的效果を注意深く避けようとしていると解釈できる。
- 気候モデルの共通項を取り出すという推論を「頑健性」を使った推論として捉える議論はLloyd 2010などが行なっている。こうした文脈に適切な頑健性の概念についてはWeisberg 2006などで分析されている
- ただし、気候学者はモデル間のばらつきを単純に集積して誤差分布として扱う傾向があるが、そう単純にとらえてよいかどうかについてはParker 2010などの批判もある。

26

Norton and Suppeとの比較(3)

- モデルをヒエラルキー化し、わざと現実から離れたモデルを使うのも、一応Norton and Suppeの視点で理解できなくはない。集約化の一種。
- ただし、より正確な写像関係にあるモデルがすでに得られているのにわざわざ単純なモデルを作って現象の理解をしようとするというのはNorton and Suppeのモデルからは少し推測しにくい。

27

他のタイプのシミュレーションへの一般化

- 気候科学はNorton and Suppeがそもそも事例として扱っていた分野であり、時期が少しずれるとはいえおおむね齟齬がないのはある意味当然。
- では、他のタイプのシミュレーション(特にagent based modeling ABM)もこうした枠組みで違和感なく分析できるだろうか。

28

ABM (agent based modeling)

- Bonabeau 2002にそってABMの特徴をまとめる
 - 自律的に決定を行う存在(エージェント)の集合としてあるシステムをモデル化
 - エージェントは異種混合的でもよい
 - 決定は条件的(if then)でもよい。他のエージェントの行動や状態、自他の過去の状態や行動の記憶を利用してもよい。
 - 決定の内容は次のステップにおいてそのエージェントの行動や状態

29

他のタイプのシミュレーション

- 哲学者もシミュレーションにさまざまなタイプ・目的があることは認識している。(Keller 2003)
- ABMのはしりとされるシェリングの分居モデルや人工生命についてはある程度認識論的な議論も行われている(Weisberg 2012)
- Weisbergは「一般化されたモデル」(分居モデルはここに含まれる)「仮説的なモデル」(不可能な状況を想像する思考実験など)「ターゲットのないモデル」(人工生命など)を区別

30

シェリングの分居モデル

- 分居(segregation)は人種ごとにわかれて住むことを指す。
- 1969年と71年の論文などでトーマス・シェリング(Schelling)によって導入されたのが分居モデル(崩壊モデルtipping modelとも呼ばれる)
- 全体的な分居政策がなくとも、自分と同種の隣人がいる場所の方を好むという選好があれば分居が発生することをABMで示す。(同種の隣人が半分以下になったエージェントが移動するといったルールを採用)

31

シェリングの分居モデル

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/run.cgi?Segregation.734.460>

32

シェリングの分居モデル

33

ライフ・ゲーム

- 1970年にコンウェイが考案したセル・オートマトンのシミュレーション。(自分の論文ではなくマーチン・ガードナーの紹介記事で発表されている。Gard)
- すべてのマスが「生」か「死」のステータスを与えられ、隣接する8つのマスのうちに何個の「生」のマスがあるかで次のステップのそのマスの生死が決まる(1か4以上で死亡、2、3で生存、3のときは死のマスからも生へ変更)

34

ライフゲーム(game of life)

http://www.michael-hogg.co.uk/game_of_life.php

気候モデルとの比較

- これらのシミュレーションも何らかの基礎モデルに対する集約モデルとみなせないことはない(ライフ・ゲームの方はかなり難しいが)
- しかし、仮にそのように捉えることが出来る場合でも、これらのモデルの意義をそこに限定してしまうと、かえってフェアとはいえない。
- 対象にしばられないある種の抽象的な構造を見出したところにこそこれらのシミュレーションの面白さがある
- 分居モデルのように、対象の集約化という役割と一般性のある抽象的な構造の発見という役割は同じモデルが同時に行うこともありうる。

36

一般化にむけて

- 写像の信頼性などに重点があるシミュレーションの認識論は、こうしたシミュレーションにもあてはめようと思えば、他の評価基準と組み合わせるなどの形で一般化する必要があるだろう。
- 抽象的な構造を明らかにするタイプのシミュレーションの認識論的役割を評価するための軸は今のところ哲学的な議論の中では提案されていない。
- しかも、目をひろげると、シミュレーションの目的や形態はさらに多様。一般化の道は遠い。

37

シミュレーションのさまざまな目的

- Axelrodはシミュレーションのさまざまな用法を列挙している(Axelrod 1997)
 - 予測(経済予測)
 - タスクの遂行(医療診断、最適化)
 - トレーニング(フライトシミュレータ)
 - 娯楽(TVゲーム)
 - 教育(シムシティの教育利用)
 - 証明(ライフゲーム:単純なルールから複雑な振る舞いが結果することの証明)
 - 発見(重要な関係や原理の発見、分居モデル)

38

シミュレーションのさまざまな目的

- シミュレーション全体を相手にした「シミュレーションの哲学」を展開するには、タスクの遂行・トレーニング・教育・娯楽まで含めた全体を統一的に扱える図式が必要だろう(特に、同一のシミュレーションがさまざまな目的で使われるということを考えれば)
- しかし、「認識論」に話を限定するとしても、Axelrodの言う予測・証明・発見といった認識論的な役割(Axelrodのリストにはないが説明、解釈、理解なども含めて)についてはある程度統一的な扱いが求められそう(シェリングのモデルはそのいくつもの役割を同時に果たしている)

39

方向性の示唆

- シミュレーション(から得られた結果)の認識論的良さを多面的に評価するとするとこんな感じになる?
 - 予測(・説明) ---- 写像関係+人為効果のよりわけ(+結果の頑健性?)
 - (説明・)解釈・理解 ---- 最低限の写像関係+最低限の人為効果のよりわけ+人間の認知能力との適合性+理論的関心
 - 証明・発見 ---- 証明・計算過程の妥当性(頑健性?) +理論的関心(+発見の内容次第では写像関係+人為効果のよりわけ)

40

結論

- Norton and Suppeなどのシミュレーションの認識論的分析は確かにシミュレーションの一つの典型的な用法をとらえている
- しかしシミュレーションというものの多目的性(しかも場合によって同じシミュレーションが異なる目的に使われたりする)を踏まえると、実験との等価性ばかり強調するのはかえって評価軸としてかたよっている
- したがって目的に応じて多様な評価基準でシミュレーションを見るようなより広い枠組みの中に位置づけなおさないとイケない。

41

References(1)

- Axelrod, R. (1997) "Advancing the art of simulation in the social sciences" in R. Conte et al eds. *Simulating Social Phenomena*. Springer. 21-40.
- Bonabeau, E. (2002) "Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems" *PNAS* 99, 7280-7287.
- Frigg, R. and Reiss, J. (2008) "The philosophy of simulation: hot new issue or same old stew?" *Synthese* 169, 593-613.
- Gardner, M. (1970) "Mathematical games" *Scientific American* 223,120-123
- Held, I.M. (2005) "The gap between simulation and understanding in climate modeling" *Bulletin of American Meteorological Society* 80 1609-1614.
- Humphreys, P. (2009) "The philosophical novelty of computer simulation models" *Synthese* 169, 615-626.
- IPCC (2005) "Guidance notes for lead authors of the IPCC fourth assessment report on addressing uncertainties"
- Keller, E.F. (2003) "Models, simulation and "computer experiments"" in Radder 2003, 198-215.
- Lloyd, E.A. (2010) "Confirmation and robustness of climate models" *Philosophy of Science* 77, 971-984.
- Morgan, M.S. (2003) "Experiments without material intervention: model experiments, virtual experiments, and virtually experiments" in Radder 2003, 216-235.

42

References(2)

- Norton, S.D. and Suppe, F. (2001) "Why atmospheric modeling is good science" in C.A. Miller and P.N. Edwards eds. *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and environmental Governance*. The MIT Press.
- Parker, W.S. (2009) "Does matter really matter? computer simulations, experiments and materiality" *Synthese* 169, 483-496.
- Parker W.S. (2010) "Whose probabilities? Predicting climate change with ensemble of models" *Philosophy of Science* 77, 985-997.
- Radder, H. ed. (2003) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. University of Pittsburgh Press.
- Schelling, T.C. (1969) "Models of segregation" *American Economic Review* 59, 488-493
- Schelling, T.C. (1971) "Dynamic models of segregation" *Journal of Mathematical Sociology* 1 143-186.
- Solomon, S. et al. (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Weisberg, M.(2006) "Robustness analysis" *Philosophy of Science* 73, 730-742.
- Weisberg, M. (2012) *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*

43