

# シミュレーションと実験の関係 —物質性をめぐる議論—

石田 歩\*

The relationship between simulations and experiments:  
Arguments on their materiality

Ayumu ISHIDA

## §1 導入

シミュレーションは現在の科学において重要な研究方法のひとつとなっている。シミュレーションを用いる利点のひとつとして、物理的に介入できない対象について研究を行うことができることが挙げられる。例えば銀河の形成過程とか森林のパターン形成といった実際問題として介入できない対象をシミュレーションモデルとして再現し、そのモデルについて研究を行うことで、対象に関して何らかの知識を得ることができる。このような理由から、現在の科学においてシミュレーションなしでは遂行不可能な研究領域もあるだろう。

シミュレーションが科学における重要な研究方法のひとつとなるにつれて、科学哲学においてもシミュレーションに関心が集まるようになった。90年代後半から2000年代にかけて、シミュレーションの哲学というひとつの領域が形成され、現在に至るまで活発な議論が行われている<sup>1</sup>。本稿では、その中でも特に、シミュレーションと実験の関係について議論している研究群（Fox Keller 2003, Guala 2002 ; 2005, Lenhard 2007, Morgan 2002 ; 2003 ; 2005, Morrison 2009 ; 2015, Norton and Suppe 2001, Parke 2014, Parker 2009, Winsberg 2003 ; 2009a ; 2010 など）から代表的なものを取り上げ、現在の研究状況を紹介する。

---

\* 京都大学文学研究科科学哲学科学史専修、修士課程

<sup>1</sup> 本稿で取り上げるシミュレーションと実験の関係という論点以外にも、いくつかの論点をめぐってシミュレーションに関する哲学的議論が行われている。Winsberg (2009b ; 2015) はシミュレーションの哲学での論点を網羅的にまとめている。

新しく登場したシミュレーションと比べて、実験という研究方法は科学に伝統的なものである。哲学者は、シミュレーションの哲学を展開する際に、シミュレーションと実験を比較し両者の関係を探ることで、シミュレーションという方法、そしてシミュレーション研究から得られる知識について理解しようとしてきた。シミュレーションと実験の関係についての議論の枠組みは、方法論的なものと認識論的なものに分けることができる。すなわち、科学的方法としてのシミュレーションと実験の共通点は何か、両者を重要な点で区別するものはあるか。また、両者がもたらす結果から現実世界について何らかの推論を行うとき、その推論能力に優劣はあるのか。このような論点から、シミュレーションと実験の関係について研究が展開されている。本稿でもこの枠組みに基づいて研究紹介を行う。

本稿は次のような構成である。第 2 節で、そもそもシミュレーションと実験の関係はなぜ問題になるのかという背景を与える (2.1 節)。そして、両者の関係についての方法論的問題と認識論的問題を提示する (2.2 節)。第 3 節と第 4 節で、シミュレーションと実験の関係について哲学者が何を議論してきたかを紹介する。第 3 節で Guala と Morgan を取り上げ、第 4 節では Parker, Weisberg, そして Morrison の議論を見る。第 3 節と第 4 節で登場する哲学者は、シミュレーションと実験の「物質性」をどう評価するかという点で対立している。第 5 節で、紹介した議論の評価と、シミュレーションの哲学 (特に認識論) という領域の展望を述べる。

## §2 シミュレーションと実験

この節では、具体的な議論を見ていく準備段階として、シミュレーションと実験の関係がなぜ問題となるのか、両者の関係を議論する際になにが問題となるのかについて述べる。そして、Winsberg (2015) にしたがって、シミュレーションと実験の関係についての方法論的問題と認識論的問題を提示する。ここで提示した問題は、後に紹介するいくつかの立場の主張を整理する際の枠組みとして機能することになる。

### 2.1 議論の背景

シミュレーションと実験の関係で何が問題となるのか (哲学者が何を問題としてきたか) を確認するために、次の二つの研究活動をモデルケースとして比較してみよう。この二つは両方とも、飛行機の運動をテストするための研究である。

第一の研究は風洞実験である。風洞実験では、飛行機の縮尺模型が風洞内に設置さ

れ、人工的に生み出された空気の流れのなかで模型が運動する。模型に作用する力が測定され、測定結果は飛行機の設計に利用される。第二の研究は、飛行機や空気の流れなどをモデリングし、シミュレーションによって知りたい物理量を計算するような研究である。この研究には風洞装置や模型飛行機はもはや存在せず、結果は全てモニタ上に表示される。近年では、数値シミュレーションによって得られる結果は従来の風洞実験による成果と比較して遜色がないことが分かっている（山本 2002）。

さて、この二つの研究を比べると、「実験」と「シミュレーション」という研究方法のラベルの分類や関係はどうなっているのかという疑問が生じる。風洞実験はその名の通り「実験」と見ていだろう。また第二の研究は典型的な「シミュレーション」である。ところで一般に、シミュレーションを用いた研究は用語の上で「数値シミュレーション」とか「数値実験」と表現されることがある。では「実験」と「シミュレーション」はどういう関係にあるのだろうか。このような科学研究の方法としてのラベルの問題として、次の方法論的問題を提示する。

**方法論的問題：** 科学的方法のラベルとしての「シミュレーション」と「実験」はどのような関係にあるのか。シミュレーションとはどのような特徴を持った研究方法なのか。シミュレーションは伝統的な方法である実験と何が異なるのか、もしくは何が共通しているのか。

方法論的問題は、以下で述べる認識論的問題に関係してくる。すなわち、シミュレーションと実験は共に、結果に基づいて現実世界について何かしらの知識を与えてくれるものであるが、その知識に優劣はあるのかという問題である。例えば第4節で取り上げる哲学者は、シミュレーションが実験と認識論的に同等であり、その根拠としてシミュレーションがある種の実験であるということを主張する。つまり認識論的問題を、科学的方法のラベルの問題と関連付けて議論しているのである。ここで生じた認識論的問題は以下の通りである。

**認識論的問題：** シミュレーションは、伝統的な実験が担ってきた仮説を確証・反証するという役割をどの程度果たせるのか。シミュレーションが実験と同じ役割を（程度の差こそあれ）果たすのであれば、それはどのような理由によっ

さて、上述した方法論的問題と認識論的問題をめぐる二つのテーゼを提示し、第3節以降で具体的な議論を紹介し整理する際の基準点を設置しよう。

## 2.2 議論の枠組み：同一テーゼ，認識論的依存テーゼ

シミュレーションと実験の関係について，両者の共通点は何か，両者を重要な点で区別するものは（あるとしたら）何かという論点や，シミュレーションがもたらす知識は実験で得られる知識より劣っているのか否かといった論点で哲学者は議論を行ってきた．このような議論には，方法論的な主張と認識論的な主張があり，議論の整理をする際にそれらを分けて考える必要がある．Winsberg（2009）は，方法論的な主張を同一テーゼ，認識論的な主張を認識論的依存テーゼと呼んでいる<sup>2</sup>．この二つのテーゼの主張は以下の通りである．

同一テーゼ：コンピュータシミュレーションは文字通り，実験のインスタンスである．

認識論的依存テーゼ：コンピュータシミュレーションが科学的仮説に対する確証や反証を提供するという役割を果たす程度は，シミュレーションが実験の一種であるということができる程度に依存する．

二つのテーゼの内容に説明を与えておく．同一テーゼは，科学的方法の分類ラベルとしてのシミュレーションは実験の下位区分であることを主張するものである．これによると，分類ラベルとしてシミュレーションと実験は排反的なものではなく，シミュレーション研究にも何かしらの実験的性格が含まれていることになる．認識論的依存テーゼの主張は，シミュレーションの結果がある仮説を確認あるいは反証するという役割を果たす程度は，そのシミュレーションがどれくらい実験的性格を持っているかによるということである．仮説の確認・反証は伝統的に実験が担ってきた重要な役割の一つである．依存テーゼによると，シミュレーションが実験的であればあるほどそのシミュレーションが仮説を確認・反証する役割を持つということになる．

以降で紹介する哲学者たちが同一テーゼ，認識論的依存テーゼという用語を使って議論を展開しているわけではないが，その議論の主張内容を整理する枠組みとしてこの二つのテーゼは有用である．本稿では，シミュレーションと実験の関係についての議論を紹介し，二つのテーゼを基準点としてそれらの議論を整理するという形で以下のサーベイを進めていくことにする．

<sup>2</sup> Winsberg（2015）にもこの二つのテーゼについて言及がある．

### §3 物質性：Guala, Morgan

この節では、シミュレーションと実験の関係について、「物質性」という観点から議論を行った Guala (2002 ; [2005] 2013) と Morgan (2002 ; 2003) の内容を紹介する。彼/彼女らの議論を非常にざっくりとまとめると、伝統的な実験を特徴付けているのは、現実のモノに対して操作を行うという「物質性」という性格であり、「物質性」の観点からシミュレーションと実験を区別することができる、というものである。以下でこの議論を具体的に見ていく。

#### 3.1 Guala

まずは Guala (2002 ; [2005] 2013) の議論を見ていこう。Guala は、関心のある現実世界のターゲット系を代表 (stand for) するシミュレーション系あるいは実験系を使用することで、ターゲット系についての知識を得ようとするものだという点で、シミュレーションと実験は共通していると言う (Guala 2005, p. 211)<sup>3</sup>。その上で、それでもシミュレーションと実験は重大な仕方で異なっていると、その違いを次のように述べている。

[シミュレーションと実験の] 差異は、一方では実験とそのターゲット系、他方ではシミュレーションとそのターゲット、それぞれの間に存在する関係の種類に存している。前者の場合には、対応関係は「深く」、「物質的」なレベルで成り立つが、後者においては、類似性はただ抽象的で形式的なレベルでのみ認められるのである。シミュレーションを実施する装置においては、シミュレートされる性質、関係、あるいはプロセスは、異なった（種類の）原因によって生み出される。真正な実験においては、ターゲット系におけるのと同じ物質的原因が作用している。シミュレーションにおいてはそうではなく、（類似性やアナロジーといった）対応関係は純粋に形式的な性質のものなのである<sup>4</sup>。(Guala

<sup>3</sup> 関心のあるターゲット系について理解するためにオブジェクト系（シミュレーションの場合はシミュレーション系、実験の場合は実験系）を使用して研究を行うという点でシミュレーションと実験は共通している、という考えはこれ以降に登場する哲学者で一致している。したがって「ターゲット系」とか「オブジェクト系」といった用語を本稿の中で一貫して使用することとする。しかし、特にオブジェクト系が何から構成されているかという点では哲学者それぞれで意見が異なっているし、またその違いこそが論争の核心でもあるということはこの中で指摘しておく必要があるだろう。

<sup>4</sup> [] は筆者による。強調は原文の通り。訳出は基本的に邦訳にならったが、適宜修正を加えてある。

[2005] 2013, pp. 214–215, 邦訳 pp. 299–300)

Guala は、シミュレーション系と実験系それぞれの、ターゲット系への対応関係のあり方に違いがあるとしている。前者が形式的な関係である一方、後者は物質的なレベルの一致が成り立つと Guala は考える。

ここで、Guala がシミュレーションと言うときにどのようなものを想定しているか述べておこう。Guala は Hartmann (1996) を引用し、その考えを採用している (Guala 2002, p. 62)。Hartmann (1996) によると、シミュレーションとは「あるプロセスを別のプロセスによって真似する」(Hartmann 1996, p. 77) ものである<sup>5</sup>。ここで「プロセス」とは、ある系の状態の時間変化である。この考えに従うと、シミュレーションは必ずしもコンピュータによって行われなくてもよい。このことは Guala 自身も指摘している (Guala 2005, p. 213)。

Guala の主張を具体例に適用してみよう。実験の例として (Guala が精通する) 実験経済学を考える。現実世界の人間の経済現象 (ターゲット系) について理解するために、実験室内の人間の集団 (実験系) に対してターゲット系に類似した状況を提供し、実験室内での人間の経済活動を調べる。このとき、ターゲット系と実験系は同じ物質 (人間) から成っており、同じ物質的原因 (人間の経済活動) が作用する。

続いて、シミュレーションの具体例を見る。Guala (2002) は地質学におけるシミュレーションを紹介している。地層形成の過程を理解するために、地質学者は、層序学の理論に基づいたいくつかの構造方程式を含むコンピュータモデルを使うことがある。ここで地質学者は、「系 A (現実世界の地質構造) をコンピュータモデル B という手段によってシミュレート」(Guala 2002, p. 68) している。このとき、系 A と系 B は同じ物質で構成されているわけではなく、その対応関係は「形式的」である。

ターゲット系とシミュレーション系の「形式的」な関係についてのより詳しい説明は与えられていない。しかし、Guala が用いた地質学の例を見ると、ターゲット系の振る舞いを示す方程式に基づいてシミュレーション系が発展するという意味で、形式的と言っていると考えてよいだろう。ともかく Guala の主張で重要なのは、ターゲット系とシミュレーション系は物質的な一致がない、つまり同じ物質で構成されていない、ということである。

---

<sup>5</sup> シミュレーションという言葉の明確な定義もしくは特徴づけが確定しているとは言えず、またそれ自体大きな論点ではあるが、Hartmann によるシミュレーションの特徴づけは暫定的に受け入れて良いだろう。

また Guala は、良いシミュレーションと良い実験を行うために研究者に必要な知識が異なるとしている (Guala 2005, p.216–217)。良いシミュレーションを行うためには、ターゲット系の構造が既知であり、その構造に（物質的ではなく）形式的に対応したシミュレーション系を得ることが必要である。地質学者は、地層形成の構造についての知識を持っており、それに形式的に対応する構造方程式を含むモデルを用いてシミュレーションを行うことで良いシミュレーションを行うことができる。一方、良い実験を行うためには研究者はターゲット系の構造を完全に把握している必要はないと Guala は考える。実験において、実験系で得られた結果がターゲット系についての知識となることを保証するのは、実験系とターゲット系で（形式的ではなく）物質的なレベルで同じプロセスが生じている、ということである。例えば、実験室内で良い経済実験を行うためには、研究者は現実世界における人間の経済活動がどのようなメカニズムで行われているかを完全に把握している必要はない。そうであっても、実験室内と現実世界で物質的な、つまり同じ人間が経済活動を行っていることが、実験室内で得られた結果から現実世界についての知識を得ることができるということを保証している。

### 3.2 Morgan

続いて、Morgan (2003) の議論を見よう<sup>6</sup>。Morgan も「物質性」という観点からシミュレーションと実験の区別を行なっている。ただ、Morgan の「物質性」は Guala のそれと使い方が異なる。その点に注意しながら以下で Morgan の議論を紹介する。

まず、Morgan (2003) は実験を三種類に区別する。すなわち、理想的ラボ実験、混合実験、数理モデル実験である。まず両極端の理想的ラボ実験と数理モデル実験を簡単に説明する。理想的ラボ実験とは、人工的に設定された環境下で、物質的な系に対してある入力を与え、系に介入し、何らかの出力を得るものである。理想的ラボ実験においては研究者が行う入力・介入・出力がどれも物質的である。これに対し数理モデル実験は、現実世界を表現する数学的モデルに対して入力、介入が行われ、何らかの出力が得られるものである。数理モデル実験においては、入力・介入・出力が全て数学的である。

理想的ラボ実験と数理モデル実験の中間に当たるのが、混合実験である。混合実験はシミュレーションにより実行される (Morgan 2003, p. 225)。つまり、Morgan に

---

<sup>6</sup> Morgan (2002 ; 2005) も見よ。

表 1 Morgan による実験の分類と物質性の程度 (Morgan 2003, table 11.3 を改変)

	理想的ラボ実験	混合実験		数理モデル実験
		ほとんど実験	バーチャル実験	
入力	物質的	準物質的	非物質的	数学的
介入	物質的	非物質的	非物質的	数学的
出力	物質的	非物質的	非物質的	数学的
実行方法	ラボ内での実験	シミュレーション		モデルからの演繹

とってシミュレーションはある種の実験である。混合実験はさらに、ほとんど実験 (virtually experiment) とバーチャル実験 (virtual experiment) の二種類に区分される。この二種類の実験について、それぞれの入力・介入・出力の物質性の程度に注目しながら見ていこう。

Morgan は、コンピュータモデルを用いて骨の強度を調べる二つの実験を紹介している (Morgan 2003, p. 222)。第一の実験は、本物の牛の腰骨を薄くスライスしてその画像をコンピュータに取り込むことで、コンピュータ上に骨を 3D の形で再現した。第二の実験は、骨の構造に関する前提知識をもとに、コンピュータで一から 3D の骨を構築した。両方の場合において、シミュレーションにより実験が実行される。コンピュータ上の骨はある入力を与えられ、研究者がコンピュータ上の骨に介入することで、何らかの出力が得られる。

第一の実験は、Morgan によれば、「ほとんど実験」に分類される。第一の実験における入力は準物質的である。というのも、第一の実験では、本物の骨の断面図をもとにコンピュータ上に骨を再現したのである。一方、介入と出力は非物質的である。コンピュータ上の骨に力を加えるという介入は、コンピュータ上の操作により行われる。介入により得られる出力も、コンピュータ上の骨に対して起こるものである。

第二の実験は、「バーチャル実験」に分類される。第二の実験では、入力・介入・出力のいずれも非物質的である。研究者は骨の構造に関する前提知識から出発するが、コンピュータにより一から骨を構築する。介入と出力は、第一の実験と同じくコンピュータ上で起こるものである。

理想的ラボ実験、ほとんど実験・バーチャル実験、数理モデル実験それぞれの、入力、介入、出力についての物質性の程度をまとめたものが、表 1 である。ほとんど実験とバーチャル実験は共にコンピュータを用いたシミュレーションにより行われる。



これらは実験の一種であり、理想的ラボ実験と同様、研究者によって入力・介入・出力が行われる。混合実験がどれだけ理想的ラボ実験に近いかは、入力・介入・出力についての物質性の程度によると Morgan は考えている。

さらに Morgan は、シミュレーションとラボ実験の認識論的立場の違いについても言及している。さきほどの 3D の骨のバーチャル実験を再び考えよう。バーチャル実験は、骨をコンピュータ上でいちから構成し、コンピュータ上の骨に実験の介入を行うことで得られた結果から、実際の骨について知識を得るという活動であった。これに対応するラボ実験は、現物の骨に対して物理的に介入し、その結果から骨について知識を得るという活動である。どちらの実験でも、得られた結果から現実の骨の構造について推論を行う。この推論の妥当性 (validity) の程度が、バーチャル実験とラボ実験で異なると Morgan は考える。

以下の引用でこれを確認しよう。まず、バーチャル実験の推論の妥当性は次のように評価される。

第二の骨実験は、格子画像を用いた実験であったが、その最初の段階から、特別に構成された、骨構造の表現に依拠していたことを思い出そう。この「表現」関係が、実験のオブジェクトと対象のオブジェクトの間の推論的ギャップを作り出す。ここでギャップというのは、モデルの他のクオリティから独立のものである、というも、実験オブジェクトと対象オブジェクトはもはや同じものから構成されていないからである。(Morgan 2003, p. 230)

つまり、理想化された 3D の骨モデルと現物の骨はもはや同じ物質から構成されていないので、骨モデルのクオリティとは無関係に、骨モデルから現物の骨への推論にはギャップが生じるということである。骨モデルについて得られた結果は「実際の骨の詳細な構造について理解するのに示唆的であるが、その妥当性は限られている」(Morgan 2003, p. 230) と Morgan は言う。

一方、ラボ実験の妥当性については以下のように評価している。

実物 (物質的) 実験は、もし実物が、世界における同種のものの代表物であり、また似たものにとって代表的であるとみなされれば、同種のものや似たものについて推論を行うことが可能になるだろう。(Morgan 2003, pp. 230 – 231)

言い換えると、ラボ実験で扱っている現物の牛の骨がラボ外の牛の骨の代表物 (representative of) であり、また牛に限らない骨一般にとって代表的 (representative for) で

あることが確認されれば、ラボ実験の結果をもとに牛の骨一般や、牛に限らない骨一般について推論を行う妥当性が得られる。

以上から Morgan は、実験オブジェクトと対象オブジェクトの物質性の共有の程度で、前者から後者への推論を適用できる範囲（妥当性）が異なると考えていることがわかる。ただ、モデルのクオリティはそれ自体として様々な方法でテストされると Morgan は考える (Morgan 2003, p. 230)。つまり、確かに 3D の骨モデルが骨一般の代表となることができる範囲は限られているが、モデルのクオリティ自体は、物質性の共有の程度とは独立にテストされるということである。

### 3.3 整理

同一テーゼと認識論的依存テーゼの枠組みで Guala と Morgan の議論を整理する。Guala は同一テーゼを否定する。Guala は、ターゲット系との対応関係に注目した。実験系とターゲット系の対応関係が物質的なレベルで成り立つが、シミュレーション系とターゲット系は形式的なものに過ぎない。また、実験系とターゲット系では同じ物質的原因が作用しているが、シミュレーション系においてはそうではない。そういうわけで Guala の考えでは、シミュレーションでありかつ実験であるような研究はあり得ない<sup>7</sup>。一方、Morgan は同一テーゼを認める。Morgan にとってのシミュレーションは、理想的ラボ実験と数理モデル実験の中間に位置付けられる「ほとんど実験」「バーチャル実験」であり、シミュレーションも実験の一種であると考えている。

また Morgan は、推論の妥当性の程度については認識論的依存テーゼを認めている。つまり、実験で扱うオブジェクトと、その結果から推論を行う先の対象オブジェクトの間の物質的な共有の程度で、推論を行うことが許される範囲が変わる。しかし、モデルのクオリティそれ自体は物質性の共有の程度とは独立の問題として、様々な方法でテストされることになる。

## §4 物質性は問題か？ : Parker, Winsberg, Morrison

第 3 節で見た通り、Guala と Morgan は、実験の特徴である物質性という性格をシミュレーションは持っていないという議論を行った。この議論に対する批判を行って

---

<sup>7</sup> Guala は「シミュレーションの実験」(Guala 2002, p. 71) という言葉を使って、ある研究にシミュレーション的な部分と実験的な部分が両方見られるといった場合を考えている。しかし、これはシミュレーションが実験の一種であるという主張とは違う。

いるのが、Parker (2009) と Winsberg (2003 ; 2009a ; 2010), そして Morrison (2009 ; 2015) である。その主張は Parker (2009) の論文題目 “Does matter really matter?”, 「物質は本当に問題か?」にわかりやすく示されている。Parker は、物質性のあるなしでシミュレーションと実験を区別することはできない、むしろシミュレーション研究にも物質性があるのだと言う。Winsberg も基本的に Parker の主張に賛同するが、シミュレーションの活動的側面に注目し、実験との違いを示そうとしている。Morrison は Parker の議論を踏襲しつつ、シミュレーションと実験におけるモデルの役割に焦点を当てて議論を進めている。以下、これらを詳しく見る。

#### 4.1 Parker

Parker (2009) は、第 3 節で取り上げた Guala (2002 ; 2005) と Morgan (2003) を批判している。その批判は、シミュレーションと実験を区別するのに物質性は本当に問題となるか、というものである。以下で Parker の議論を見ていこう。

Parker はまず、シミュレーションと実験それぞれに作業的な説明を与える。これによると、シミュレーションとは「他の状態の時系列の表現として働くような状態の時系列」(p. 486) である。ここで、ある状態が他の状態を表現するとは、あるエージェント（研究者など）が意図して、ある状態が他の状態を代表しているとみなす、ということである。あるシミュレーション系がターゲット系の良い表現であるのは、研究目的にとって重要であるような仕方では、シミュレーション系がターゲット系と類似しているときである。このシミュレーションの説明は、Hartmann (1996) の「あるプロセスを他のプロセスで真似する」という説明とほぼ違わないと見てよい。

続いて、実験の説明に移ろう。Parker によると、実験とは「ある系の関心のある特徴が介入によってどう変化するかを理解するために、その系に介入することを含んだ探究的活動」(p. 487) である。Guala の実験に関する考えとは違い、ここではターゲット系との関係についての言及はない。確かに、典型的な実験では実験系とターゲット系が物質的な類似性を持つことが期待され、また物質的類似性が実験で得た知識を他の系に外挿する根拠とされることが多い、と Parker は言う。しかし、物質的類似性という観点は、ある研究が実験か否かには関係ないと Parker は考える。

以上の説明によると、シミュレーションと実験の違いは、前者が表現の一種であるのに対し、後者は介入を伴う活動であるということが言える。しかしこの違いは、シミュレーションに当たる研究と実験に当たる研究が排反であることを意味しない、と Parker は言う (p. 487)。つまり、ターゲット系をシミュレートした系に対して介入

を行うような活動を含む研究は、シミュレーションであり実験であるということができる。これは、ある研究がシミュレーションかつ実験であることはないという Guala (2002) の考えを否定したものである。

さて、シミュレーションと実験についての以上のような考えを前提として、Parker はコンピュータを用いたシミュレーション、コンピュータシミュレーションへと議論を進める。Morgan (2003) は、理想的ラボ実験と比較するとコンピュータシミュレーションは、入力・介入・出力が非(準)物質的であると主張したことを前節で見た。Parker は Morgan のこの考えを批判する。

Parker によると、シミュレーションを実行するコンピュータの設定や、プログラムの操作、モニターから得られる情報の分析などの活動を含む「コンピュータシミュレーション研究」は、入力・介入・出力が物質的だと考えることができ、コンピュータシミュレーション研究と理想的ラボ実験を区別することは妥当ではないとする。以下で Parker のこの主張を見ていこう。

コンピュータシミュレーション研究を、現実の物質的な系についての実験として理解することが重要であると Parker は考える。コンピュータシミュレーション研究における実験系は、コンピュータという物質である。研究者は、コンピュータに対してある初期状態を与え(入力)、戦略的にプログラムを書き換え(介入)、スクリーン上に現れる結果を得る(出力)。これらは、実験系をコンピュータと考えると、全て物質的である。そして、実験系から得られた知識から、研究者はターゲット系について何らかの結論を導く。

コンピュータシミュレーション研究においては、[...], 科学者は第一にプログラムされたコンピュータの振る舞いについて学ぶ; その振る舞いから、その様々な特徴があるターゲット系の表現となっているとみなし、彼らはターゲット系について何か関心のあることを推論できると考える。(Parker 2009, p. 489)

このように考えると、Morgan の理想的ラボ実験とコンピュータシミュレーション研究を、物質性の程度により区別することはできない。

さらに、Parker はシミュレーションの推論能力についての議論に進む。Morgan は、実験系と世界が同じ物質により構成されているかどうか推論能力の優劣につながると主張していた。では、コンピュータシミュレーション研究の推論能力は、理想的ラボ実験と比較してどうだろうか。実験系であるコンピュータは世界と違う物質により構成されているが、コンピュータシミュレーション研究は理想的ラボ実験より推論能

力が劣るだろうか。

必ずしもそうではないと Parker は言う。例えば、気象予報を考えてみよう。気象予報は、実際の気象と同じ物質で構成された実験系を用いて実験室内で実験するよりも、気象のふるまいを表現したモデルを用いたコンピュータシミュレーション研究を行う方が、実際の気象についての推論能力に優れている。これは、実験室内で気象を再現することが難しいという実的な問題も一因であるが、何がコンピュータシミュレーション研究をより優れたものにしてしているのだろうか。

そこで Parker が持ち出すのが、「関連する類似性」という考え方である。実験系から世界への推論能力の優劣を決定するものは、物質が共有されているかではなく、関連する類似性が担保されているかどうかである。

物質性に焦点を当てるのは幾分間違っている、なぜならターゲット系についての推論を正当化する際に究極的に関心があるのは物質性ではなく、関連する類似性だからである。推論を正当化するために、科学者は、ターゲット系について答えたいある特定の疑問を考慮した上で、実験系がターゲット系と関連する観点において類似しているという証拠が必要である。(Parker 2009, p. 493)

類似性についてのこれ以上の分析は本稿では行わないが、推論能力の優劣を決定するのは物質性ではないという Parker の主張が重要である。再び気象予報の例を考えてみよう。実際の気象と同じ物質で構成されている実験系を再現する実験室実験より、異なる物質（コンピュータ）からなるシミュレーション系を用いたコンピュータシミュレーション研究が推論能力に関して優れていると言うとき、その理由は、シミュレーションモデルが、関連する点で実際の気象現象の特徴と類似している（例えば、気象現象を表す方程式をモデルが適切に含んでいる）からである、とすることができる<sup>8</sup>。

## 4.2 Winsberg

Winsberg (2009a ; 2010) は以下の点で Parker の主張に賛同する。すなわち、ターゲット系と重要な点で類似するシミュレーション系について介入を行うような研究は、シミュレーションであり実験である。また、シミュレーション研究において、コンピュータは物質的な探求の対象である。その上で、Winsberg はさらに議論を進め、

<sup>8</sup> ある系と他の系の「類似性」という概念は、シミュレーションの哲学あるいは科学におけるモデルについての議論で主要な概念の一つである。Weisberg (2012 ; 2013) が類似性について分析している。Parker (2015) ,Weisberg (2015) なども見よ。

活動としてのシミュレーションの特徴に焦点を当て、シミュレーションと実験を重要な点で区別することを目指した。以下でこの議論を見ていこう。

Winsberg は、「シミュレーション」という用語の使用を二種類に分類する (Winsberg 2010, p. 60)。第一が<sup>8</sup>、表現的なエンティティとしてのシミュレーションである。これを  $simulation_R$  (以後  $S_R$  とする) と Winsberg は呼ぶ。Parker によるシミュレーションの説明は、 $S_R$  を説明したものである。例えば、フライトシミュレータが実際の飛行機操縦のシミュレーションであると言うとき、シミュレータが飛行機操縦の表現となっている、つまり  $S_R$  であることを念頭に置いている。第二が、活動としてのシミュレーションである。これを  $simulation_A$  (以後  $S_A$ ) と呼ぶ。 $S_A$  は、モデルの構築やシミュレーション結果の分析などの一連の研究活動を指す言葉である。この分類を用いると、Parker の主張は次のように言うことができる。すなわち、ある研究が  $S_R$  としての特徴をもち、かつ活動としては実験の特徴を持つことがある。Winsberg はこの主張が妥当であるとしているが、これは同じコインの二つの側面を指摘したに過ぎないと言う (Winsberg 2010, p. 58)。シミュレーションと実験の関係を考えるには二つのコイン、つまり  $S_A$  と実験、の特徴を比較しなくてはいけない。

こうして Winsberg は、 $S_A$  と実験の比較を行うことで、両者を区別しようとする。その際に、オブジェクト (シミュレーション系、実験系) がターゲット系の良い表現となり得るという考えを研究者がどのように正当化するかの違いに焦点を当てるべきだと Winsberg は考える。この観点から、Winsberg は次のように述べる。

シミュレーションを実験から区別するものは、オブジェクトからターゲットへの推論の正当性についての論拠の特徴、そしてその論拠を支える背景知識の特徴である<sup>9</sup>。(Winsberg 2010, p. 63)

オブジェクトからターゲット系への推論の正当性のことを、外的妥当性と Winsberg は呼ぶ。外的妥当性の論拠、論拠を支える背景知識の特徴が、シミュレーションと実験で異なるという主張である。

シミュレーションにおいて、オブジェクトがターゲット系の良い代表となると研究者が考える理由は、彼らが「モデル構築のための原則 principles for model building」(Winsberg 2010, p. 65) に即して、ターゲット系のモデルとして信頼のできるものを用いているからである、と Winsberg は考える。「モデル構築のための原則」

<sup>9</sup> 強調は原文の通り。

とは、モデル構築を行う際に必要な背景知識である。この背景知識は三種類に分類される。第一が、ターゲット系についての理論に基づく知識である。第二が、ターゲット系についての研究者の物理的直観である。第三が、シミュレーションを行う際の計算テクニックである。気象シミュレーションの例を用いてこれらを説明しよう。気象シミュレーションを行うために、研究者は気象モデルを構築する。信頼のおける気象モデルを作るために、三種類の背景知識が必要である。まず、気象現象に関する物理理論に基づく知識が前提となる（第一）。さらに、モデルの振る舞いを見たときに、それが実際の気象現象と明らかにかけ離れていないかという研究者の直観が用いられる（第二）。そして、気象現象を示す方程式の離散化、数値計算の実行、そして離散化により生じた人為的効果を解消するためのチューニング<sup>10</sup>といった計算的技法が必要となる（第三）。

実験において、オブジェクトがターゲット系の良い代表となっていると研究者が考える理由は、オブジェクトがターゲット系と同じタイプの物質から構成されているといった様々な理由が考えられる（Winsberg 2010, p. 64）。また、実験においても、例えば交絡要因を適切にコントロールできているかといった、実験系を適切に構築するための「原則」があると Winsberg は言う。しかし、シミュレーションにおける「原則」は、以下の点で実験におけるそれとは異なる。まず、シミュレーションにおける「原則」は、ターゲット系を適切に表現するための原則である。これに対し実験における「原則」は、オブジェクトを適切に操作するための原則である。さらに、シミュレーションにおいて、「原則」に即した信頼のおけるモデルは、シミュレーション結果の外的妥当性の論拠となる。これに対し実験においては、「原則」に即したオブジェクトの統制は、実験の内的妥当性の論拠となる（Winsberg 2010, p. 66）。

まとめると Winsberg の主張は以下の通りである。シミュレーションにおいて、オブジェクトを適切に構築するための「原則」に即したモデルが得られていることが、外的妥当性の論拠となる。これに必要な背景知識はターゲット系に関するものである。実験においても、オブジェクトを適切に構築する「原則」はあるが、これは実験の内

<sup>10</sup> モデルのチューニング技術は、しばしばパラメタリゼーションと呼ばれる。気象シミュレーションにおけるパラメタリゼーションを紹介しておこう。気象現象を表す方程式は計算のため離散化される。大気はある間隔の格子に分割され、それぞれの格子について物理量が計算されることになる。その際、例えば雲は気象現象の重要な要素であるが、格子のスケールより小さい規模で起こる現象であり、そのままでは雲を表す過程をモデルに組み込むことができない。そこで研究者は、理論的・経験的な背景知識に基づいて、格子に対して雲がもたらす効果相当のものを部品としてモデルに与える。このようなテクニックのことをパラメタリゼーションという。

的妥当性の論拠となるものである。これに必要な背景知識は、オブジェクトに関するものである。

### 4.3 Morrison

Morrison (2009)<sup>11</sup>はシミュレーションと実験でモデルが果たす役割に焦点を当てながら、両者の関係を考察している。シミュレーションと実験を物質性の観点から区別することはできないと考える点で、Parker や Winsberg と意見が一致する。しかし、Parker や Winsberg はコンピュータそれ自体が操作の対象であり物質性を持つものとしたのに対し、Morrison にとっては、コンピュータとプログラムが実験器具であり、シミュレーションモデルが操作の対象として物質性を付与されるものである。その点で、Morrison (2009) は、Parker の議論の延長線上でより詳しくシミュレーションと実験の関係とその物質性について議論を展開したということになる。Morrison の議論の特徴として、測定という観点からシミュレーションの実験的性格を考察していることが挙げられるだろう<sup>12</sup>。

シミュレーションの実験的性格を考えるにあたり、Morrison は「シミュレーション系 simulation system」という概念を導入している。以下の引用でこれを確認しよう。

私が「シミュレーション系」と呼ぶものは、コンピュータ、プログラム、そしてシミュレーションモデルからなるものであり、また我々がモデル物理系(例えば、ターゲット系の数理モデル/表現)の発展を追い、その発展を調査することを可能にするものである。(Morrison 2009, p. 44)

シミュレーションモデルが作られるプロセスは簡単にまとめると以下のようなものである。まず研究者は、ターゲット系の数理モデルを用意する。さらに数理モデルは、コンピュータで扱えるようにするため適切な手法を用いて離散化される。こうしてできた離散的な代数方程式によってシミュレーションモデルは記述されている。シミュレーションモデルをコンピュータに実装することで、モデルに対応するプログラムが構成される。コンピュータ、プログラム、そしてシミュレーションモデルを Morrison はシミュレーション系と呼ぶ。

---

<sup>11</sup> Morrison (2015) も見よ。

<sup>12</sup> シミュレーションと測定という論点については、Parker (2009; 2017) が気候シミュレーションを事例に取り上げて議論している。



Morrison は、シミュレーション系を用いて行われる研究活動を「コンピュータ実験 computer experiment」と特徴付けることができると考える。シミュレーション系について分析を進め、Morrison は以下のように述べる。

物質の属性、つまりモデル化された物理系の属性は、コンピュータ上の離散的表現の限界に従うように、[シミュレーションモデルとして]表現されている。物質は、厳密にいうと、実験者がシミュレーションモデル内に表現できるものであり、そしてコンピュータとプログラムを用いて調査されるものである。コンピュータとプログラムを器具として、そしてシミュレーションモデルを調査対象の物質として分離することで、この違いをはっきりさせることができるだろう<sup>13</sup>。(Morrison 2009, p. 45)

詳しく述べよう。まず、シミュレーション系のうち、コンピュータとプログラムは器具 apparatus であり、ラボ実験における実験器具と同様の働きをする。つまり研究者は、器具を適切にコントロールし、初期条件やパラメータの値を統制することで実験的環境を得ることができる。次に、シミュレーションモデルは調査対象の物質である。モデル化された物理系の持つ属性は、シミュレーションモデルにおいて表現されている。つまり、Morrison にとってコンピュータ実験とは以下のような活動ということになる。すなわち、コンピュータに適した形に離散化されたシミュレーションモデルを、研究者がコンピュータとプログラムの適切なコントロールによる実験的環境下で操作することで、研究者はターゲット系に関する知識を得る。この時、物質性を持つのはシミュレーションモデルである。ここでの物質性とは、ターゲット系の持つ属性がモデルにおいて表現されているという意味である。

Morrison はさらに議論を進め、測定を行うという観点からはシミュレーションと実験に認識論的優劣をつけることができないと主張する。シミュレーションと実験はシミュレーションが単なる「計算」ではなく、伝統的実験と同じように、何らかの量を「測定」できると主張する。

ここで、Morrison による計算と測定の概念とそれらの違いを説明しておこう。測定とは「典型的に、道具を通じた物質世界とのある種の因果的相互作用を含むものである」(Morrison 2009, p. 34)。そして測定は伝統的ラボ実験が行ってきた活動である。一方、計算とは「抽象的推論と、紙と鉛筆もしくはコンピュータを用いた数学的活動

<sup>13</sup> []内は筆者による。

である」(Morrison 2009, p. 34)。コンピュータシミュレーションにおいて、研究者はコンピュータを用いて計算を行っているが、その結果は単なる計算結果ではなく、何らかの値を測定したとみなされることがある。では、シミュレーションが測定を行うと考えることができるのはなぜか。Morrison は測定を行う際にモデルが果たす役割に注目する。

Morrison はまず、典型的なラボ実験、特に何らかの物理量を測定するような実験でモデルが果たす役割について考察している。Morrison は、単振り子を用いた重力加速度測定の実験を具体例として用いる(Morrison 2009, p. 49)。この実験において実験者はまず、振り子のモデル(重さがなく伸長性のない長さ  $l$  のワイヤーに支えられる理論的オブジェクト)を用意するところから実験活動を開始する。実験者は、ニュートンの法則により、ワイヤーの長さ  $l$  と振り子の周期  $T_0$  が分かれば重力加速度  $g$  を導出できることを知っている。すなわち、 $l$  と  $T_0$  を測定することがこの実験のポイントである。

この実験において、物理的オブジェクトすなわち実際の振り子は、実験器具として用いられる。実験者は実験器具としての振り子をコントロールし、実験的環境を得る。その上で  $l$  と  $T_0$  の値を測定し、 $g$  を導出する。しかし、例えば実際の振り子の周期  $T$  から理想的な測定値としての  $T_0$  を得るにはいくつかの補正が必要になる。というのも、理論的オブジェクトとしての振り子と物理的オブジェクトとしての振り子は、いくつかの重要な点で異なっているからである。実際の振り子の周期  $T$  は、求められる確度<sup>14</sup>に応じていくつかの補正を受けることになる<sup>15</sup>。求められる確度が高いほど、強い補正を振り子のモデルに与えてモデルをより実際の振り子に近づけていく必要がある。求められるレベルで正確な測定値  $T$  を得るために、どのような補正を行い、どのように実験器具としての実際の振り子を扱えばいいかを実験者に教えてくれるのが、ターゲット系である振り子のモデルである、と Morrison は言う。より一般に、実験活動において正確な測定値を得るために器具をどう扱えばよいかについての情報を、モデルが教えてくれる。モデルが模範として機能し、実験者がどのように実験器具を扱えばよいかについて教えてくれるのである。(Morrison 2009, pp. 49–50)。

シミュレーション、もしくはコンピュータ実験においてもモデルが同様の働きをす

<sup>14</sup> ここでの確度 (accuracy) とは、推定値が測定する量の真の値に近いことである。確度と区別されているのが精度 (precision) である。精度とは、測定値における測定の不確実性が少ないことである (Morrison 2009, p. 49)。

<sup>15</sup> 例えば、有限振幅補正や空気の影響の補正などが挙げられている (Morrison 2009, p. 49)。

るというのが Morrison の主張である。ターゲット系の数理モデルから、ある値を計算すればある値を導くことができるということを研究者は把握している。数理モデルを離散化したシミュレーションモデル、コンピュータとプログラムによって、研究者は求められる確度において目当ての値を計算する。この時、コンピュータとプログラムそれぞれが適切に動作しているかの判断基準を与えるのが、ターゲット系の数理モデルである。例えば、数理モデルに含まれる方程式に対して十分に近い近似解を得ることができているかという基準で、実験器具としてのコンピュータとプログラムの動作を評価することができる。

上述したシミュレーションと典型的なラボ実験において、ターゲット系のモデルが同様の役割を果たしている。すなわちモデルは、ターゲット系についての理解を実験者に与え、それをもとにどのように実験器具を扱えばよいかということを実験者に教える。この限りにおいて、シミュレーションは単なる計算を行うだけでなく、何らかの量を測定していると考えることができる。そして、測定という観点から見ると、シミュレーションに対してラボ実験に匹敵する認識論的立場を与えることができる、と Morrison は言う<sup>16</sup>。

#### 4.4 整理

Parker と Winsberg, Morrison の主張を整理する。Parker と Winsberg は同一テーゼを認める。Parker によると、ターゲット系を表現したシミュレーション系に対して実験的統制が行われる研究は、シミュレーションであり実験である。Winsberg もこれを認める。すなわち、 $S_R$  は実験の一種である。しかし、 $S_A$  と実験は、外的妥当性に関する論拠とその背景知識の点で区別できると Winsberg は主張する。

Parker と Winsberg は認識論的依存テーゼを否定する。Parker によれば、シミュレーションの推論能力は、それが理想的実験の特徴を満たすかどうかによるものではなく、ターゲット系とシミュレーション系の間で類似性が得られているかどうかであった。Winsberg も、シミュレーションであるか実験であるかがその研究の推論能力を決定するのではないと考える。つまり、ターゲット系に関する背景知識に基づいた信頼のおけるモデルを用いたシミュレーションは、実験よりも推論能力に優れていることがある。

---

<sup>16</sup> 本稿では取り上げなかったが、Norton and Suppe (2001) もモデルに注目してシミュレーションと実験の関係を論じている。

Morrison は同一テーゼを条件付きで認める。Morrison によると、何らかの測定を行う際にターゲット系のモデルが同様の機能を果たすという限りにおいて、シミュレーションは実験の一種である。そのようなシミュレーションは特にコンピュータ実験と言える。また、Morrison は認識論的依存テーゼを条件付きで否定する。測定という観点から見て、シミュレーションと実験においてモデルが同様の働きをするということから、シミュレーションが実験と同等の認識論的立場を持っていると Morrison は考える。

## §5 議論の評価と展望

本稿はシミュレーションの哲学という研究群の中でも、シミュレーションと実験の関係について、それらの「物質性」の観点から考察している議論を紹介した。各節の最後にそれぞれの立場を小節としてまとめた。第 5 節ではこの議論の評価をし、それをふまえた上でシミュレーションの認識論という領域の展望を与えたい。

物質性をめぐる議論の文脈においては、Morgan (2003) を批判した Parker (2009) の主張を一応の解決案とみてよいだろう。シミュレーションに携わる研究者たちは、プログラムをキーボードで打ち込み (入力)、プログラムを書き換えることで変数を操作し (介入)、その結果はディスプレイ上に表示される (出力)。物質的なコンピュータを適切に扱う活動全体を含めたシミュレーション研究は、伝統的なラボ実験と物質性の点で区別することはできない。また、あるシミュレーション研究の認識論的立場は、その研究がシミュレーションであるからという理由で決定されるものではない。

Parker (2009) のこの考えは妥当なものと言える。第 2 節で取り上げた二つの研究を再び考えてみよう。風洞装置も模型飛行機も介さない数値シミュレーションによる研究は、物質的なコンピュータを研究者が適切に扱うことで実行される。研究者はプログラムを書き換えることで変数を操作するという点で、実験的活動を行っている。また数値シミュレーションの結果が評価されるのは、それがコンピュータを用いたシミュレーションであるということとは無関係である。従来の数値風洞による結果との比較や、実際に設計した飛行機の運動のテストなどを経て、シミュレーション結果は徐々に信頼性を獲得していくことになる。

ここまでを踏まえて、シミュレーションの認識論という領域の展望を述べておこう。シミュレーションの認識論の根本的な問いは、シミュレーションによって得られる知識はどのような特徴を持つものか、その信頼性はどのように獲得されるか、というも

のである。本稿で取り上げた物質性をめぐる議論からは、シミュレーションと実験が物質性の観点から認識論的に「区別されない」という結論に至ったが、シミュレーションによる知識が「どのように信頼性を得るのか」ということについては未解決である。

この問題に答えるためには、物質性の概念は一度置いておき、シミュレーションという研究活動で何が行われているかを、伝統的な実験と対等なものとしてより詳細に見ていくことが必要だろう。さらに、一口にシミュレーションと言ってもそこには様々なタイプの研究が含まれることに注意しなければならない。対象とする分野の違い（空気の流れをシミュレートする、鳥の群れの動きをシミュレートするなど）、シミュレーションモデルの種類の違い（微分方程式を解くタイプのもの、エージェントベースモデルなど）、研究目的の違い（予測、理論のテスト、発見法的な使用など）などが挙げられる。また、シミュレーション結果を比較しテストするラボ実験が存在するか否かも、シミュレーションを考察する際に重要な要素となるかもしれない。したがって、扱う範囲をうまく限らないと有用な哲学的議論はできないだろう。哲学者は、個々のケースにおいてシミュレーションの結果がどのような仕方でも信頼性を獲得するかといった視点から、事例に即した議論を展開することが必要である。

## 参考文献

- Fox Keller, Evelyn. 2003. Models, simulation, and 'computer experiments.' In *The Philosophy of Scientific Experimentation*, ed. Hans Radder, pp.198–215. Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press.
- Guala, Francesco. 2002. Models, simulations, and experiments. In *Model-based reasoning: Science, technology values*, eds. Magnani, Lorenzo and Nersessian, Nancy J. pp. 59–74. New York: Kluwer.
- . [2005] 2013 年. 『科学哲学から見た実験経済学』川越敏司訳. 東京: 日本経済評論社. [原著: *The methodology of experimental economics* (Cambridge University Press)]
- Hartmann, Stephan. 1996. The world as a process: Simulations in the natural and social sciences. In *Modelling and simulation in the social sciences from the philosophy of science point of view*, eds. Hegselmann, Rainer, Mueller, Ulrich, and Troitzsch, Klaus G., pp. 77–100. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Lenhard, Johannes. 2007. Computer simulation: The cooperation between experiment-

- ing and modeling. *Philosophy of Science* 74: 176–194.
- Morgan, S. Mary. 2002. Model experiments and models in experiments. In *Model-based reasoning: Science, technology values*, eds. Magnani, Lorenzo and Nersessian, Nancy J. pp. 41–58. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- . 2003. Experiments without material intervention: Model experiments, virtual experiments and virtually experiments. In *The Philosophy of Scientific Experimentation*, ed. Hans Radder, pp. 216–35. Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press.
- . 2005. Experiments versus models: New phenomena, inference and surprise. *Journal of Economic Methodology* 12: 317–329.
- Morrison, Margaret. 2009. Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation. *Philosophical Studies* 143: 33–57.
- . 2015. *Reconstructing reality: Models, mathematics, and simulations*. New York: Oxford University Press.
- Norton, D. Stephen and Suppe, Frederick. 2001. Why atmospheric modeling is good science. In *Changing the atmosphere: Expert knowledge and environmental governance*, eds. Miller, Clark A. and Edwards, Paul N. pp. 67–105. Cambridge: MIT Press.
- Parke, C. Emily. 2014. Experiments, simulations, and epistemic privilege. *Philosophy of Science* 81: 516–536.
- Parker, S. Wendy. 2009. Does matter really matter? Computer simulations, experiments, and materiality. *Synthese* 169: 483–496.
- . 2010. Instrument for what? Digital computers, simulation and scientific practice. *Spontaneous Generations: A Journal for the History and Philosophy of Science* 4: 39–44.
- . 2015. Getting (even more) serious about similarity. *Biology & Philosophy* 30: 267–276.
- . 2017. Computer simulation, measurement, and data assimilation. *British Journal of Philosophy of Science* 68: 273–304.
- Weisberg, Michael. 2012. Getting serious about similarity. *Philosophy of Science* 79: 785–794.
- . [2013] 2017 年. 『科学とモデル』松王政浩訳. 名古屋: 名古屋大学出版会.  
[原著: *Simulation and similarity: Using models to understand the world* (Oxford

- University Press)]
- . 2015. *Biology and Philosophy* symposium on simulation and similarity: Using models to understand the world. *Biology & Philosophy* 30: 299–310.
- Winsberg, Eric. 2003. Simulated experiments: Methodology for a virtual world. *Philosophy of Science* 70: 105–125.
- . 2009a. A tale of two methods. *Synthese* 169: 575–592.
- . 2009b. Computer simulation and the philosophy of science. *Philosophy Compass* 4: 835–845.
- . 2010. *Science in the age of computer simulation*. Chicago: The University of Chicago Press.
- . 2015. Computer simulation in science. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Zalta, Edward N. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/simulations-science/> (2018年1月21日閲覧)
- 山本稀義. 2002年. 「数値風洞」『ながれ』第21巻, 429–436頁.