

# モデリング学習環境におけるフィードバック設計の枠組み

## A framework of designing feedback in model-building environments

堀口 知也<sup>\*1</sup>  
Horiguchi, Tomoya

平嶋 宗<sup>\*2</sup>  
Hirashima Tsukasa

<sup>\*1</sup> 神戸大学大学院海事科学研究科<sup>\*2</sup> 広島大学大学院工学研究科

**Abstract.** For understanding science, it is a promising method for students to build models of a domain. Several model-building environments have been developed to support students in articulating models and refining them through experience and reflection. Students can externalize their ideas and receive feedback as the behavior of their models. However, these systems provide no assistance in interpreting the (unexpected) behavior and correcting the errors included in their models. In this paper, we discuss how the framework of EBS (Error-based Simulation) we previously proposed can be applied to address this problem. We first indicate that it is indispensable to consider what kind of constraint(s) an erroneous model violates for interpreting its unexpected behavior. We then classify the constraints that constitute the models of physical systems and discuss the semantics of them. Finally, we outline the framework for assisting teachers in designing error-adaptive feedback in model-building environments.

### 1. はじめに

科学学習の重要な目的の1つは、様々な現象の背後にある構造—対象系の振る舞いを支配する機構や法則・原理—を理解することである。そのため、学習者は屢々、対象系の振る舞いを予測／説明できるモデルを作成することを要する課題を与えられ、既有的な様々な概念を組み合わせてこれを試みる。このとき、次のことが問題となる。すなわち、学習者によるモデルやその作成過程は屢々明示されず、彼等がどのような(誤った)仮説を持つかを同定することは一般に難しい。このため、彼等の誤った予測／説明に対しては、単に対象系の正しい振る舞いやその説明を提示し、自身でモデル(及びその基となる仮説)を修正することを期待することが多い。また、誤ったモデルが偶々正しい振る舞いを予測できるような場合、そのモデルを棄却させることは極めて困難である。

このような問題に対しては、学習者にモデルを表現するための言語を与えて、これを明示させることが有効である。作成されたモデルの振る舞いが計算可能となるよう、形式化された言語であることが望ましい。数学的表現が最も良く用いられるが、学習者の素朴な考えやモデルの成立条件を表現し難い／数値的な計算結果を解釈し難いなど、対象系の概念的側面を捉えることに不向きである。一方、定性推論[Weld 1990]の提供する表現プリミティブは、計算結果の曖昧性がときに問題となるものの、対象系の概念的側面(例えば因果律)を捉えるのに適している。近年、これらにグラフィカルなインターフェースを付加した幾つかの汎用モデリング環境が開発され、初・中等教育や技術者教育などにおいて有効性が実証されている[Biswas 2001, Bredeweg, 2009, Forbus 2004]。

しかし、学習者が(誤った仮説に基づき)誤ったモデルを作成したとき、これらのシステムが提供できるフィードバックは必ずしも十分でない。これらは(可能な場合に)誤ったモデルの振る舞いをシミュレートするのみであり、それを観察して誤りに気づき修正することは、学習者又は教師に任されている。このような学習を積極的に支援するためには、誤ったモデルやその振る舞いがどのような制約に違反しているかを、システムが明示的に把握

することが必要である。

我々は、学習者の誤った仮説に基づいて対象系の振る舞いをシミュレートする Error-based Simulation (EBS) の枠組みを提案し、それが大きな学習効果を持つことを実証してきた[Hirashima 1998, 2009; Horiguchi 2005, 2007; 堀口 2008; 今井 2008]。同枠組みでは、誤ったモデルやその振る舞いが持つ制約違反を(定性的に)診断して学習効果を見積もった上で、シミュレーションや正しい振る舞いととの差異に関する説明を提示する。本稿では、これまでに開発された EBS の諸技術を汎用モデリング環境へ適用することによってどのようなフィードバックが実現できるか、またそのための技術的な問題及びその解決法について述べる。

### 2. 解決すべき課題

従来のモデリング環境の多くは、モデルを表現するための形式言語の厳密な文法を持ち、システムによる支援は主として、それに従う(計算可能な)モデルを作成するためのガイドという形で行われる。しかし、シミュレーションの結果に関するフィードバック—モデルの振る舞いと予想とのずれやその意味の説明—は通常与えられない。また、計算不可能な(すべての制約を満たす振る舞いが存在しない)モデルが作成された場合、学習者はシミュレーション結果自体を受け取ることができない。

一般に、学習者が対象系の振る舞いを説明するために誤ったモデルを作成したとき、次の三つの場合が考えられる。

#### 2.1 モデルが計算不可能となる場合

誤ったモデルに含まれるすべての制約を満たす振る舞いが存在せず、シミュレーションを生成できないことがある。そのモデルが文法的には正しいとき、従来のシステムでは学習者に有効な支援を行うことができない。例えば、図1は生態系における種の個体数と死滅率の関係を、Garp3[Bredeweg, 2009]によってモデル化したものである。同モデルにおいて、個体数の初期値を0とすると(死滅率が正のため)非負となる次状態は存在せず、Garp3の定性シミュレータは単にその旨を通知する。

EBSの枠組みではこのような場合、モデルが計算可能となるよう制約の幾つかを緩和してシミュレーションを生成する[Horiguchi 2006, 2008; 堀口 2006]。このとき、モデルの振る舞

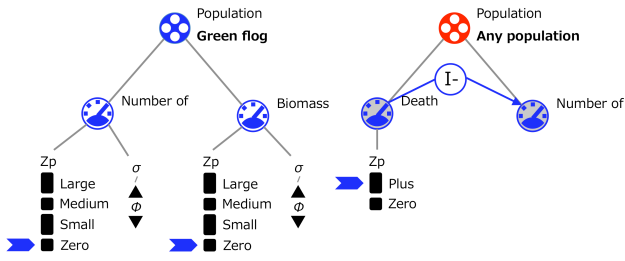


図1 モデルが計算不可能となる例

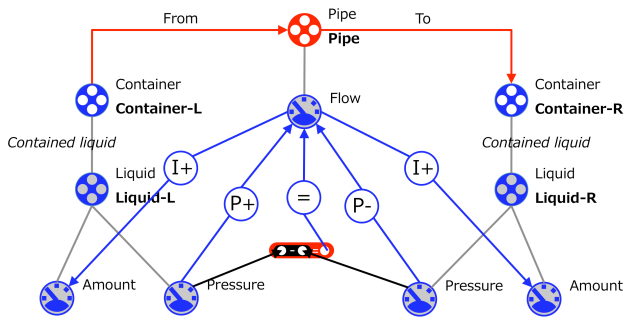


図2 モデルが予想と異なる振る舞いをする例

いがその誤りを顕在化・焦点化するものとなるよう、ヒューリスティクスを用いて緩和すべき制約を選択する。例えば、図1のモデルでは、個体数と死滅率の関係、個体数の量空間制約(非負)などが緩和の対象となる。ここで、後者を緩和すると、個体数が負の数となる「受け入れ難い」現象が生起し、モデルの誤りが顕在化される。又、前者を残すことにより、死滅率は個体数と比例すべきことが焦点化され得る。

通常モデリング環境が持たないこのような機能を実現するためには、学習者によって入力され得る様々な制約の意味論を整理し、それらをシステムが陽に扱えるようにすることが必要である。

## 2.2 モデルが予想と異なる振る舞いをする場合

従来のシステムは誤ったモデルの振る舞いをシミュレートするのみであり、それが予想/正しい振る舞いとどのように異なり、その差異が何を意味するかを説明する機能を持たない。例えば、図2は二つの容器の水位とそれらの底部を連結するパイプを流れる流量の関係のモデルである。誤りにより、両容器の水位が共に上昇するという現象が生起する。これは正しい振る舞い(片方の水位が上がりもう片方のそれが下がる)と定性的な差異を持つと共に、両容器中の水の総量が保存されないという「受け入れ難い」現象となっているが、Garp3 はこれを明示的に把握することができない。

EBS の枠組みではこのような場合、誤ったモデルの振る舞いを正しいモデルのそれと定性的に比較し、シミュレーションの学習効果に関する見積もりを行う。その際、それらの差異が対象世界においてどのような制約に違反しているか(単に「予想と異なる」ものから「物理的にあり得ない」ものまで)を判断しなければならない。従って、予め対象世界における様々な制約の意味論を整理しておく必要がある。これらの制約はモデルに含まれて(2.1 の場合のように)それを計算不可能にするものではないが、必要に応じて参照されるべきものである。

## 2.3 モデルが偶々予想通りの振る舞いをする場合

誤ったモデルが、偶々正しいモデルと同様の振る舞いをする可能性がある。例えば、図3は粗い斜面上に置かれた物体の運動

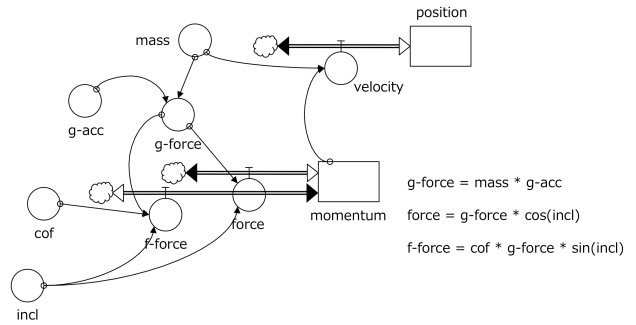


図3 モデルが偶々予想通りの振る舞いをする例

の定量的モデルである。これは誤りを含むが、生起する現象—物体が斜面上に沿って下降する—は正しいモデルのそれと定性的な差異を持たず、誤りが十分に顕在化されない。このような振る舞いを観察して誤りに気づき修正することは、学習者にとって困難である。

EBS の枠組みではこのような場合、所与の状況を構成するパラメータのいずれかを、モデル自体が変わらないと期待される範囲内で変化させ、誤ったモデルと正しいモデルの振る舞いの間に定性的な差異を生じさせることを試みる。例えば、図3のモデルでは、斜面の傾きを増加させることにより、誤ったモデルでは物体の加速度が減少するが正しいモデルでは増加するという差異が生じる。さらに、斜面の傾きを 0 にすると、誤ったモデルでは物体が運動するが正しいモデルでは静止するという、より顕著な差異が生じる。

ここで注意すべきことは、パラメータを変化させる際、状況の定性的な変化を生じるか否かを考慮することである。状況が定性的に変化しない場合(前者の場合)、誤ったモデルと正しいモデルの振る舞いの差異は学習者を誤りの修正へと動機づける。しかし、状況の定性的な変化を伴う場合(後者の場合)、パラメータ変化後のモデルは変化前のそれと「対象とする状況(すなわちモデル自体)が異なる」として学習者に受け入れられ難いことが、筆者らのこれまでの調査により判明している。一方、状況の定性的な差異を伴わずには、誤ったモデルと正しいモデルの振る舞いの間に定性的な差異が生じない場合や、状況の定性的な差異を伴う方が振る舞いの定性的な差異がより大きくなる場合があり、状況/パラメータを変化させる際にはその学習効果を慎重に見積もる必要がある。そのためには、モデル化の対象となる系の「状況」を定性的に記述するための語彙を整理しなければならない。

## 3. フィードバック設計のための制約の整理

### 3.1 モデルの生成とモデル化仮定

ここでは物理系を対象とし、そのモデルを作成するプロセスを次のように仮定する。問題が与えられると、まず、対象系の物理的構造と、その振る舞いを考えるべき空間的・時間的及び動作範囲を決定する。これらをモデル化仮定と呼ぶ。これに対して領域理論を適用し、物理現象によって系内の物理属性間に生じる制約を同定する。これを物理現象制約と呼ぶ。対象系の振る舞いを計算するためには、これに系外からの影響を示す制約を加える必要がある。これを境界条件制約と呼ぶ。境界条件制約は、対象系の空間的・時間的境界における幾つかの属性の値を与える。

筆者らは、モデル化仮定を物理構造制約、空間・時間範囲制約、動作範囲制約に分類している[Horiguchi 2009]。モデル

化仮定は対象系の「状況」を定性的に記述したものであり、各パラメータの変化をモデル化仮定の変化と対応付けておくことで、その変化前後の状況変化を定性的に捉えることができる。

一般に、物理現象制約及び境界条件制約には1つ以上のモデル化仮定が対応し、その有効範囲や前提とする対象系の構造及び状態が規定される。そこで、モデル化仮定を視点として用いて、物理現象制約及び境界条件制約を幾つかのカテゴリに分類する。

### 3.2 物理現象制約

#### (1) 空間的範囲による分類

対象系を構成する1つの部品の持つ属性(間)に生じる物理現象制約を局所的現象制約と呼ぶ。また、複数の部品及びそれらの接続関係の属性間に生じる物理現象制約を大域的現象制約と呼ぶ。

#### (2) 時間的範囲による分類

一般に、物理系は1つの境界条件から出発して時間的に発展し、内的発展(系に含まれる変量の時間微分や時間遅れにより自ら変化すること)または外的駆動力(入力)による動的変化、内的または外的要因による不連続変化(系の構造変化や入力の不連続変化などによる)および平衡状態(系の動的変化が止まった状態の持続)を繰り返す。これらのうち1つまたは時間的に隣接する複数の時間範囲/時点を対象とした物理現象制約がしばしば用いられ、具体的には以下のようなものがある。

動的変化制約は、系が動的変化を行っている時間範囲において成立する制約であり、微分的制約と積分的制約とに分けられる。前者は、動的変化の駆動因とそれを生じる影響との関係を規定するものであり、例えば、運動体における加速度と力の関係式(運動方程式)がこれにあたる。後者は、前者の積分的効果(時間変数が陽に現れる)を規定するものであり、例えば、運動体における時間と変位/速度の関係式がこれにあたる。

平衡状態制約は、系が平衡状態にある時間範囲(認知的には1時点)において成立する制約であり、動的変化の駆動因を生じ得る影響同士の釣り合いまたは相殺関係を規定する。例えば、静止体や終速度に達した落下体における力の釣り合いの式、電気回路における電圧平衡式、および水位平衡の式などがこれにあたる。

不連続変化制約は、系が不連続変化を行う時点において成立する制約であり、不連続変化前/後における(同一)属性の値の変化を規定する。例えば、2つの物体の衝突前後における相対速度の関係式(反発係数の式)がこれにあたる。

物理量保存制約は、ある物理属性が保存量である(系の時間的发展に関わらず一定値をとる)ことから、任意の2時点における(その保存量を構成する)物理属性の値の間に成立する制約である。2時点間の時間的发展の過程は考慮されず、また、その物理属性に関して系外との入出力がある場合は、その総量(積分量)が制約に含まれる。例えば、異なる温度の2物体が接触したときの熱平衡に到るまでの熱量授受の式、静止体を移動させたときの仕事量の式、および運動量/エネルギー保存の式などがこれにあたる。

### 3.3 境界条件制約

#### (1) 空間的範囲による分類

対象系を構成する1つの部品の持つ属性に加える境界条件制約を局所的境界制約と呼ぶ。また、複数の部品及びそれらの

接続関係の属性に加える境界条件制約を大域的境界制約と呼ぶ。

#### (2) 時間的範囲による分類

一般に、境界条件は物理系の振る舞いにおける1時点に対して加えられるが、対象となる属性が時不変と仮定されている場合、その制約は一定の時間的範囲において持続する。問題解決で必要となるすべてのモデルの時間範囲制約の全域にわたって持続する境界条件制約を不変境界制約と呼ぶ(それが1つの属性を対象とするとき、その属性を不変属性という)。1つのモデルの時間範囲制約において持続する境界条件制約を構造境界制約と呼ぶ(同じく、構造属性という)。時間的に持続しない境界条件制約を時変境界制約と呼ぶ(同じく、時変属性という)。

例えば、力学系が不連続変化を繰り返しながら振る舞う場合でも、ある運動体の質量が一定であれば、その値を与える境界条件は不変境界制約(不変属性)である。また、衝突によって質量が変化すれば、衝突前/後の運動のモデルにおいて、それは構造境界制約(構造属性)である。さらに、ある運動体の加速度運動のモデルにおいて、その初速度を与える境界条件は時変境界制約(時変属性)である。

### 3.4 制約違反の評価

対象系のモデルを作成する際、そのすべてのモデル化仮定、物理現象制約及び境界条件制約を表現する必要はない。通常、所与の状況から求めるべき振る舞いを計算するのに必要な制約のみが、明示的に記述される。モデルが誤りを含む場合、明示的・暗黙的な制約の内幾つかに対する違反が起こるが、システムがそれを説明するためには、すべての制約が予め記述されていなければならない。これらは個々の対象系において具体的に記述する必要があるものの、上記の分類は少なくともそのガイドラインとして機能すると考えている。

本節では、上記の制約の各カテゴリについて、それが違反されたときにどのような「受け入れ難い」現象が生起するかを考察し、シミュレーションのために制約を処理する際のヒューリスティクスとして整理することを試みる。

まず、物理構造制約は計算の前提となる物理的存在物の属性を規定するものであるため、振る舞いを計算した結果これらに違反することはあり得ない。また、その削除は制約を過度に緩和するため、通常は計算不可能時の緩和対象とはなり得ない。さらに、その変更は状況の大きな変化を意味するため、状況/パラメータ変化の対象としては不適切である。

空間・時間及び動作範囲制約は、対象系の振る舞いを考えるべき空間・時間及び動作範囲を規定するが、モデル中に陽に表現されていないとき、計算された振る舞いがこれらに違反することがある。このとき、物理法則の適用対象/条件が存在/不成立となる、属性値が物理的意味を失う等の「受け入れ難い」現象が生起する。よって、計算不可能時には有力な緩和対象となるが、状況の大きな変化を伴うため、状況/パラメータ変化の対象としては不適切である。

動的変化及び平衡状態制約に関する直観的理解は(影響の代数的和的働きも含め)比較的初期から発達するため、これらに違反する振る舞いは「あり得ない」現象として認知され得る。ただし、定量的関係の理解に到っていない初学者に対しては、定性的な差異を提示する必要がある。また、特に微分的動的変化制約及び平衡状態制約に関しては、力学・機械系においては基本回路方程式( $\sum$  横断変数 = 0)、流体・電気系においては

カットセット方程式 ( $\Sigma$  通過変数 = 0) への違反が、計算不可能時の有力な緩和対象となる[Horiguchi 2006, 2008; 堀口 2006].

不連続変化においては、どのような現象が起こるかが直観的に予測し難いため、これに違反する振る舞いは「あり得ない」現象として認知され難く、緩和対象としても一般に不適切である。ただし、これを緩和することで他の重大な制約違反が起こることがあり、その場合はこの限りでない。

直観的な「保存」概念は発達の初期段階から生じるものであり、物理量保存制約に違反する振る舞いは「あり得ない」現象として認知され得る。よって、計算不可能時の有力な緩和対象となる。

不変及び構造境界制約は、振る舞いを計算する際には「定数」として規定されるため、その結果がこれらに違反することはあり得ない。しかし、計算不可能時の緩和対象となった場合、定数であるべき属性が変化するという「受け入れ難い」現象として認知され得る。特に、それが領域の基本的な物理定数を表すものである場合、その制約違反は重大なものとして認知される。また、境界条件制約を定性的変化(すなわちモデル化仮定(空間・時間及び動作範囲制約)の変更)を伴わない範囲で(定量的に)変化させることは、誤ったモデルと正しいモデルの振る舞いの間に定性的な差異を生じさせる上で有効である。

#### 4. おわりに

本稿では、EBS の枠組みを汎用モデリング環境へ適用することによってどのようなフィードバックが実現できるか、またそのための技術的な問題及びその解決法について述べた。ここで与えた制約の整理は、個々の対象系のモデルに含まれる制約を具体的に記述する際のガイドラインとして機能する。これに基づいて導出されたヒューリスティクスは、(制約に違反する)モデルの振る舞いの診断及びフィードバック設計を自動化するために用いられるものではないが、教師がそれを行うための支援システムを実現するための基礎となると考えている。すなわち、今後、次のような機能を持つ支援システムを設計・開発することを目指す。①所与の問題に対して、対象系のモデルに含まれるすべての明示的・暗黙的制約を記述すること—これは一般の教師にとって困難である—を支援する。②誤ったモデルがどのような制約に違反するかを枚挙し、各々がどのような物理的意味を持つかを助言する。これらを参照しながら、教師はそのモデルに適したフィードバックを設計(制約処理、誤りの焦点化とその説明等)する。

#### 参考文献

[Biswas 2001] Biswas, G., Schwartz, D., Bransford, J.: Technology Support for Complex Problem Solving - From SAD Environments to AI, in Forbus, K.D. and Feltovich, P.J. (Eds), Smart Machines in Education (AAAI Press), pp.72-97 (2001).

[Bredeweg 2009] Bredeweg, B., Linnebank, F., Bouwer, A. and Liem, J.: Garp3 — Workbench for qualitative modelling and simulation, *Ecological Informatics*, 4(5-6), pp.263-281 (2009).

[Forbus 2004] Forbus, K.D., Carney, K., Sherin, B. and Ureel, L.: Qualitative modeling for middle-school students. *Proc. of QR2004* (2004).

[Hirashima 1998] Hirashima, T., Horiguchi, T., Kashihara, A. and Toyoda, J.: Error-Based Simulation for Error-Visualization and Its Management, *Int. J. of Artificial Intelligence in Education*, 9(1-2), pp.17-31 (1998).

[Hirashima 2009] Hirashima, T., Imai, I., Horiguchi, T. and Toumoto, T.: Error-Based Simulation to Promote Awareness of Errors in Elementary Mechanics and Its Evaluation, *Proc. of AIED2009*, pp.409-416 (2009).

[Horiguchi 2005] Horiguchi, T., Hirashima, T. and Okamoto, M.: Conceptual Changes in Learning Mechanics by Error-based Simulation, *Proc. of ICCE2005*, pp.138-145 (2005).

[Horiguchi 2006] Horiguchi, T. and Hirashima, T.: Robust Simulator: A Method of Simulating Learners' Erroneous Equations for Making Error-based Simulation, *Proc. of ITS2006*, pp.655-665 (2006).

[堀口 2006] 堀口知也, 平嶋宗: 学習支援を指向した誤り可視化のためのロボストシミュレータ, *人工知能学会論文誌*, 21(6), pp.514-525 (2006).

[Horiguchi 2007] Horiguchi, T., Imai, I., Toumoto, T. and Hirashima, T.: A Classroom Practice of Error-based Simulation as Counterexample to Students' Misunderstanding of Mechanics, *Proc. of ICCE2007*, pp.519-526 (2007).

[Horiguchi 2008] Horiguchi, T. and Hirashima, T.: Domain-Independent Error-Based Simulation for Error-Awareness and Its Preliminary Evaluation, *Proc. of PRICAI 2008*, pp.951-958 (2008).

[堀口 2008] 堀口知也, 今井功, 東本崇仁, 平嶋宗: Error-based Simulation を用いた中学理科の授業実践 —ニュートンの第三法則を事例として—, *日本教育工学会論文誌*, 32(Suppl.), pp.113-116 (2008).

[Horiguchi 2009] Horiguchi and Hirashima: Intelligent Authoring of 'Graph of Microworlds' for Adaptive Learning with Microworlds based on Compositional Modeling, *Proc. of AIED2009*, pp.207-214 (2009).

[今井 2008] 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗: 中学理科における Error-based Simulation を用いた授業実践「ニュートンに挑戦」プロジェクト-, *教育システム情報学会誌*, 25(2), pp.194-203 (2008).

[Weld 1990] Weld, D.S. and de Kleer, J.: Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufmann (1990).