

# 物理の概念的理解を指向した 問題索引付けの枠組みに基づく説明生成器の構築と評価

Implementation and evaluation of explanation generator

based on 'semantics of constraints' for conceptual understanding of physics

下坂 涉哉<sup>1</sup> 堀口 知也<sup>1,2</sup>

Shoya Shimosaka<sup>1</sup>, Tomoya Horiguchi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学海事科学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Maritime Science, Kobe University

**Abstract:** One of the important objectives of science learning is to cultivate the ability to create appropriate models of various phenomena and behaviors, which we call conceptual understanding of the domain. In order to support students to reach conceptual understanding, it is important to understand why the principle was applicable to a given situation, how facts necessary to apply the principle are guided. For that support, we will implement an explanation generator of the physical model derivation process using 'semantics of constraints' and evaluate its capability.

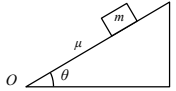
## 1. 研究の背景

科学学習の重要な目標の一つは、様々な現象や振る舞いについての適切なモデルを作る能力を養うことである。ここではその能力を領域の概念的理解と呼ぶ。

通常、科学学習においては問題演習がよく用いられる。しかし、それだけでは領域の概念的理解に到達できず、適用すべきモデルが分からなかったり誤ったモデルを適用してしまったりすることがある[1,2]。この原因としては、問題の見た目から読み取れる表面的特徴にとらわれ、問題の構造的特徴を導出することができないことが挙げられる[3,4,5]。

学習者が領域の概念的理解に到達し、問題を解くためには、問題の表面的特徴から構造的特徴を推論し、構造的特徴に適切な原理・法則を適用して必要なモデルを作成していく能力を習得しなければならない。ここで、問題の表面的特徴とは斜面、バネ、円運動、自由落下などといった見かけ上の特徴のことをいい、構造的特徴とは、成立しうる物理的条件や適用すべき物理原理のことをいう。図1のような問題では、図から「斜面上の物体を考える」という表面的特徴を得られ、問題文から与えられる構造的特徴によって「力のつり合い」という適用すべき原理が導かれる。

**問題a**  
質量 $m$ の物体を傾斜角 $\theta$ の粗い斜面上に置いて斜面下向きに軽く押ししたところ、斜面上を一定速度で下降した。このとき、物体と斜面の間の動摩擦係数 $\mu$ の値はいくらか。ただし、重力加速度の大きさを $g$ とする。



**解答例**  
斜面方向にかかる力は、下向きに $mg\sin\theta$ （重力 $mg$ の分力）、上向きに $\mu mg\cos\theta$ （動摩擦係数 $\mu$ ）。これらがつりあうとき速度一定となるから、  
 $mg\sin\theta = \mu mg\cos\theta$   
 $\therefore \mu = \sin\theta/\cos\theta$

**必要な物理概念・原理**  
力のつり合い（運動）  
重力  
力の合成・分解  
垂直抗力  
動摩擦係数  
【終速度】

図1 物理学の問題の例

さらに、学習者が領域の概念的理解へ到達することを支援するためには、所与の状況に対して、なぜその原理・法則を適用できたのか、そして、その原理を適用するために必要な事実はどのように導かれたのかを説明する必要がある。従来の問題の解法の説明では、そのような側面に焦点をあてられることは少なく、教師によって暗黙的に行われてきた。焦点の当てられなかった理由として、このような知識は暗黙的であり、体系化することは容易ではないこと、様々な問題の特徴づけしておくための一般的な枠組みが存在しないことが挙げられる。

本研究では、制約の意味論[6]と呼ばれる問題索引づけの枠組みを利用し、高校物理の問題の概念的理解を指向したモデル導出過程の説明生成器を実装し、その能力を検証する。この枠組みにおいて、モデルの導出とは所与の状況から適用すべき原理・法則を決定し、その原理・法則を適用するために必要な他の事実を所与の状況から導き出す過程のことである。これらの所与の事実、適用すべき原理・法則、それを適用するのに必要な事実、及びそれらの関係の集合をモデルと呼ぶ。このように、問題のモデルを索引づけておくことで、表面的特徴からどのように構造的特徴を導出できたかを説明できる。また、問題の差異を計算機で自動的に検出することが可能になる。

## 2. 制約の意味論[6]

物理の問題解決過程において、作成されるモデルを構成する制約を物理現象制約、モデル化仮定制約、境界条件成約の3つに大別する。

物理の問題は通常、具体的な物理系とその境界条件、およびその系のどのような振る舞いに注目するかを指定した質問で構成されている。問題が与えられると、質問の解答を得るために適切な原理・法則を所与の状況から導出し、決定する。そのとき、原理・法則によって生じた制約を物理現象制約と呼ぶ。

モデルを作成する際、問題に応じて種々のモデル化仮定が設定される。モデル化仮定とは、モデル化の際に考慮すべき構造や振る舞いの範囲、注目すべき物理現象など、モデル化の対象を規定するものであり、具体化された物理現象制約が有効であるための条件である。原理・法則の適用条件は幾つかのモデル化仮定の組を用いて記述できる。よって、物理現象制約には必ず、その成立条件を表すモデル化仮定制約が対応づけられる。

境界条件制約はモデルが対象とする系の外部からの影響を定める制約で、対象系の振る舞いは物理現象制約と境界条件制約をあわせて用いることで計算される。モデルからは計算できない、またはする必要のない影響を所与とすることはモデルの境界、すなわち何がモデルの対象、または対象外かを規定することを意味するため、境界条件制約もまた、必ず対応するモデル化仮定を持つ。

物理現象制約、境界条件制約、モデル化仮定制約を合わせたものをモデルと呼ぶ。通常、モデルとして明記されるのは前二者であり、モデル化仮定が明示されることは少ない。しかし、上述の通り、モデル化仮定は前二者が成立する根拠を与える制約であり、モデル化仮定が変化すればそれらも質的に変化

する。すなわち、モデルを正しく作成するためには、モデル化仮定を含めた制約の各々につき、なぜその仮定や条件を設定するのか、それはどのような役割を果たしているのか、などを理解することが不可欠である。多くの場合、それは一部の学習者によって暗黙的に獲得される知識であるが、これを明示的に整理することにより、概念的理解の支援機能を設計するための基盤とする。図2に、モデル化仮定制約を構造的側面および機能的側面から分類したものを示す。

制約の意味論に基づくモデル記述においては、物理原理・法則の各々を、モデル化仮定制約の組を適用条件、物理現象制約をその帰結とする「モデル片」と呼ばれる知識単位を用いて記述する。すなわち、対象系のモデルは、適用されたモデル片の組が与える物理現象制約の集合、それらの適用条件であるモデル化仮定制約の集合、および所与の境界条件制約の集合から構成される。原理・法則自体を表すモデル片を「モデル片クラス」例化されたそれを「モデル片」と呼ぶ。モデルの導出過程は、所与の条件をモデル化仮定制約および境界条件制約として明示したもののから、モデル片を適用して物理現象制約を次々に導出していく手順を記述したものとなる。

図3にモデル記述の例を示す。所与の状況に対して各々の原理・法則がどのように適用されたのかが明示されていることがわかる。制約の意味論を用いることにより、対象系の構造や考慮すべき物理現象からその背後にあるモデル化仮定を列挙することが容易になるため、暗黙の仮定や各々の計算の物理的意味を系統的に記述することが可能となる。ただし後述するように、実際にはより具体的な系の状況とモデル化仮定とを結びつける記述テンプレートを用意することが必要である。現在、そのようなパターンのライブラリを構築中である。また、類似の状況を対象とするモデル片クラスにおいて、互いに排他的なモデル化仮定、物理現象制約をそれぞれ適用条件、帰結として持つもの同士を排他的なモデル片クラスと呼び、これらをグループ化しておくことにより、モデル同士の比較が容易に行えるようになる。

先行研究において、制約の意味論に基づいた説明が概念的理解を大きく促進することがすでに検証されている。

Subclasses of MAC (structural)				
MAC	SubClasses	SubSubClasses	Definition	Examples
MAC	Physical Structure Constraint (PSC)	Physical Object Constraint (PO)	specifies what kind of objects in a physical system are considered	-consider two blocks in contact as they are or as one -consider two parallel-connected springs/resistors as they are or a compound one
		Physical Attribute Constraint (PA)	specifies what kind of relations/attributes of objects in a physical system are considered	-consider a block's net-force or its electric resistance -consider the friction between two objects in contact or not
	Operating Range Constraint (ORC)	Physical Range Constraint (PR)	specifies the range (state space) within which the model is valid by using physical attributes	-a model of two blocks' motion where one pulls another thru a string assumes the string is taut -a model of a constant resistance assumes its current & voltage are within the proportional range
		Conceptual Range Constraint (CR)	specifies the range (state space) within which the model is valid by using conceptual attributes	-a model of a block (b) descending an slope (p) by gravity from the gravitational field (g) assumes their positional relations are in(b, g), on(b, p)

図 2 a モデル化仮定制約の階層 (構造的観点)

Subclasses of MAC (functional)				
MAC	SubClasses	SubSubClasses	Definition	Examples
MAC	Process Consideration Constraint (PCC)	Process-Selection Constraint (PS)	specifies what kind of processes in a physical system are considered/ignored	-Consider <i>irrel-friction</i> (b, p) PA -ignore the change of form/mass of objects which collided PO -consider the heat exchange between two objects ( $T_1 > T_2$ ) PR
		Out-Sourcing Constraint (OS)	ignores a physical process by putting it out of the system and regarding its effect as a boundary condition	-an outer tank which supplies water infinitely PR -an outer power supply which always supplies 5V PR -initial velocity $v(0) = v_0$ PR
		Black-Boxing Constraint (BB)	ignores a physical process by putting it in a black box and regarding its effect as a boundary condition	-consider two parallel-connected springs/resistors as they are or a compound one PO -consider two blocks in contact moving with internal force as one PO/CR
	Physical World Constraint (PWC)	maintains the fundamental law of the physical world		-rigid objects never overlap CR -mass $> 0$ , $\mu > 0$ , $0 \leq e \leq 1$ PR - $g = 9.8(\text{m/s}^2)$ , gas constant = $8.31(\text{J/K}\cdot\text{mol})$ PR
Process Simplifying Constraint (PFC)	substitutes the simplified process for a complicated (original) process		-consider the range within which a resistance's voltage & current are proportional PR -consider the behavior of a pendulum with small amplitude as simple harmonic oscillation PR	

図 2 b モデル化仮定制約の階層 (機能的観点)

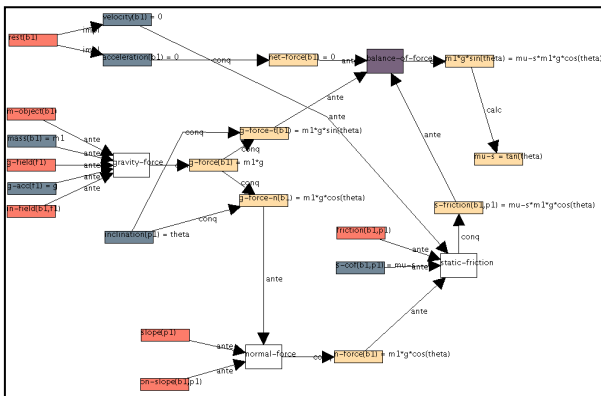


図 3 問題 1 a のモデル導出過程

### 3. 説明生成器の実装

まず初めに、初等教育で扱われる程度の物理の問題の解法をモデル化しておく。ここで言うモデルとは、問題文によって与えられた事実、例えば「物体を静かに置く」、それから得られる他の事実、例えば「物体の初速度 = 0」、原理・法則 (MF:Model Fragment と呼ばれる) のノードをリンクによってつなぎ、モデル導出過程および解法を記述したものである (図 1)。モデルのノードの内、問題を解く上で中心的な原理となる大域的物理現象制約のノードを DMF (Dominant Model Fragment) とする。

次に、モデルを読み込み、説明を生成するアルゴリズムを説明する。DMF は複数の事実のノードからリンクがつながっていてそのノードを前提条件として成立している。その条件のうち、所与の事実の集合を C1、DMF 以外の原理 (MF) によって導出された事実の集合を C2 とする。ここで C1 は DMF が問題を解くための中心原理であることを示唆しており、C2 は DMF を用いるために導出する必要がある他の事実であり、それを説明に表示する。次に、C2 の導出過程を説明する。集合 C2 のそれぞれの事実を F、F を導出している原理・法則を MF' とする。MF' の前提条件についても DMF と同じように所与の事実の集合、他の原理によって導出された事実の集合に分類しそれぞれ C1', C2' とする。ここで F は C1', C2' に原理 MF' を適用して導出されたことを説明する。

その後 C2' の各事実の導出過程について同様に説明を繰り返す。C2' が空集合であった場合は C2 に含まれる他の F の導出過程を同様にして説明する。

図 3 に、図 2 のモデルから生成された説明の例を示す。中心原理とその決定要因、原理の適用に必要な事実とその導出方法が逐一説明されている。

○ 以下の事実より、この問題は原理「力のつり合い」を用いて解きます。

- 「b1に作用する合力は0である」は以下の事実から直ちに導出されます。
- 「b1に作用する合力は0である」は以下の事実から直ちに導出されます。
- 「b1の加速度は0である」は以下の事実から直ちに導出されます。
- 「b1は静止している」は所与の事実です。

○ 原理「力のつり合い」を用いるには、さらに以下の事実が必要である。

- b1に作用する重力の斜面並行方向の成分は  $m_1 g \sin(\theta)$  である
- b1と斜面p1の間の静止摩擦力は  $\mu \cdot s \cdot m_1 g \cos(\theta)$  である
- b1に作用する重力の斜面並行方向の成分は  $m_1 g \sin(\theta)$  である」は以下の事実から直ちに導出されます。
- 「b1に作用する重力は  $m_1 g$  である」は原理「重力の法則」から導出されます。
- 原理「重力の法則」は以下の条件によって適用可能になりました。
- 「物体b1について考える」は所与の事実です。
- 「物体b1の質量は  $m_1$  である」は所与の事実です。
- 「重力場f1を考える」は所与の事実です。
- 「重力場f1の重力加速度は  $g$  である」は所与の事実です。
- 「b1は重力場f1の中にある」は所与の事実です。
- 「斜面p1の水平面に対する角度は  $\theta$  である」は所与の事実です。
- 「b1と斜面p1の間の静止摩擦力は  $\mu \cdot s \cdot m_1 g \cos(\theta)$  である」は原理「静止摩擦力の法則」から導出されます。
- 原理「静止摩擦力の法則」は以下の条件によって適用可能になりました。
- 「b1とp1の間には摩擦が働く」は所与の事実です。
- 「b1と斜面p1の間の静止摩擦係数は  $\mu \cdot s$  である」は所与の事実です。

図 4 生成器の説明の例 (一部抜粋)

## 4. 検証実験

### 4.1 実験計画

#### 4.1.1 目的

本実験の目的は、説明生成器が出力する説明が概念的理解の観点から人間が妥当と考える説明とどの程度一致するかを調べることである。

#### 4.1.2 道具

**説明生成器** 本研究で実装した説明生成器。制約の意味論の枠組みに基づき、与えられたモデルファイルから概念的理解を促進する説明を出力する。

**モデルファイル** 問題を解くためのモデル導出過程を制約の意味論の枠組みに基づいて記述したもの。高校力学の標準的な問題集から20問(いずれも1つの中心原理を適用して解ける問題)を選び、各々のモデルファイルは、MAT と呼ばれるモデル編集システム(本研究室で開発)を用いて実験者が作成した。

**評価用紙** モデルファイルが対象とする20問の問題(問題文と図)、および各々について説明生成器が作成した説明を印刷したもの。

#### 4.1.3 手順

二名の評定者(いずれも対象となる問題をすべて解く能力を有し、かつ事前に「概念的理解」について十分な説明を受けている)に評価用紙を渡し、次の2つの観点から説明生成器が作成した説明の評価を行ってもらった。はじめは個別に評価し、その後評価を比較して、不一致点があれば合議によって解消した。

##### (1) 適用すべき中心原理の決定の妥当性

説明生成器による説明において、適用すべき中心原理を決定するのに必要な事実と考えられる事実がすべて挙げられているかどうかを評定させた。評定者の考えるそのような事実をすべて列挙して貰った上で、説明生成器による説明において中心原理を決定する根拠としてあげられている事実(中心原理の適用条件のうち所与の事実、または所与の事実から物理原理を適用することなしに直接導かれた事実)と比較して貰い、その妥当性(一致・不一致)を評定して貰った。

なお、今回の実験では、説明生成器による説明の自然言語としての不自然さは評価の対象外とし、問題解決に必要な事実が正しく構造化されて記述されているかのみを評価の対象とすることを、評定者に周知した。

##### (2) 中心原理の適用の仕方の妥当性

説明生成器による説明において、中心原理を適用するのに必要な事実がすべて挙げられているかどうかを評定させた。評定者の考えるそのような事実をすべて列挙して貰った上で、説明生成器による説明において中心原理の適用に必要なものとしてあげられている事実(中心原理の前提条件から(1)の事実を除いたもの)と比較して貰い、その妥当性(一致・不一致)を評定して貰った。

(1) のときと同様に自然言語としての不自然さは評価の対象外とした。

### 4.2 実験結果・考察

#### (1) 適用すべき中心原理の決定の妥当性

20問中15問の問題については、必要な事実を挙げられていて妥当であると判断された。妥当であると判断されなかった5問はすべて中心原理「エネルギー保存の法則」を適用して問題を解くものだった。

これは、中心原理「エネルギー保存の法則」を適用する際の判断基準に関して、モデル作成者、および二人の評定者の見解が異なっていたためであり、説明生成器よりもむしろモデル作成上の問題であると言える。二人の評定者の合議の結果、「求める位置もしくは速度を与えられると力学的エネルギーの初期値と最終値がわかること」「仕事が働いていないこと」の2点が判断基準とされた。よって以降「エネルギー保存の法則」を適用して解く問題のモデルを作成するときは上記の2点を判断基準とすることとしたが、将来の運用を通して、さらにこの基準の妥当性を検証・洗練していく必要がある。その上で、モデル作成時に中心原理を選択するとその判断基準のテンプレートが自動的に表示されるなど、モデル作成者を支援する機能を MAT に加えることが考えられる。

#### (2) 中心原理の適用の仕方の妥当性

20問中17問の問題については、必要な事実を挙げられていて妥当であると判断された。妥当であると判断されなかった3問の内、2問はモデル作成時のミスであった。

それらは共に、滑車につながれた二物体を考える問題で、二物体それぞれに働く重力を一つのモデル片にまとめてしまったために、重力の法則の説明を表示するときに重複して説明を表示してしまった。このようなモデルのミスは、MAT においてモデル作成作業がすべて作成者に任されているために発生したと考えることもできる。今後、MAT でのモデル作

成を支援してくれる機能(例えば、1つの重力の法則のモデル片に、特筆することなく2つ以上の物体の要素を用いることがあれば警告する)が備わればモデル作成のミスは減るであろう。

妥当であるとされなかったもう1問の問題は、中心原理を適用するのに必要な条件がモデル上では記述されているのに説明に表示されないという、説明生成器のプログラム上の原因不明のバグである。直ちに原因を解明し、修正する必要がある。

### (3) その他指摘を受けた点

今回「重力の法則」のモデル片の適用条件の1つとして「重力場 f1 について考える」という条件を用いたが、解答説明に表示する必要がないという指摘を受けた。エネルギー保存の法則を用いる問題において「運動エネルギー」= 0、「位置エネルギー」= 0 などの表示はいらぬという指摘も受けた。また、エネルギー保存の法則を用いる問題で、ある物体の位置エネルギーの初期値と最終値を記述するときと同じ重力の法則について二度説明を表示して説明が冗長であると指摘を受けた。

これらの指摘はすべて、解答説明において冗長な情報が多すぎて見にくくなることについての指摘である。モデルファイルにおいては、モデル作成に必要な情報を逐一記述しているが、解答説明においては冗長であり見にくくなってしまふことがある。適宜、解答説明において不要(人間にとって自明)であると判断された情報は表示を省略する機能を、例えば情報省略のためのルールベースを構築するなどによって実現する必要がある。

また、別解の存在する問題について、別解も表示するよう指摘された。1つの問題に2つ以上の解法が存在するときは複数のモデルファイルを用意し別解も表示できるようにすることが望ましい。

## 6. おわりに

本研究では、物理の概念的理解を指向した説明生成器を構築し、生成された説明を二名の評定者に評価してもらい実験を実施した。その結果、高校力学の標準的な問題20問中、適用すべき原理の決定要因に関しては15問、原理の適用の仕方については17問において、妥当な説明であると評価された。このことから、本説明生成器は一定の有用性を持つものと考えられる。また、指摘された問題点の多くはモデルの不備(記述された決定要因の適切性、モデル記述上のミス等)であった。説明生成器による説明の妥当性は、モデル記述に本質的に依存するため、妥当なモデル記述を行うための枠組みが不可欠である。本研究では、モデルにおける制約の汎用的

記述の枠組みである「制約の意味論(SOC)」を用いたが、個々の領域におけるモデルを適切に記述するためには、領域毎のより精緻な枠組みが必要であることが示唆された。今後、そのような枠組みを領域毎に開発した上で、それをモデル編集用システムに組み込み、モデル記述を詳細に支援する機能を実現することにより、本研究で開発した説明生成器の有用性はさらに高まるものと期待される。

また、説明生成器を実際に教育の現場で用いる場合には、言語の自然さも重要な課題であると言えよう。冗長性の軽減などの方法を検討し、この問題についても改善していく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は科研費、基盤研究(B)(課題番号17H01839)の助成による。

## 参考文献

- [1] Bransford, J.D., Brown, A.L. and Cocking, R.R. (Eds.): How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School, National Academy Press (2000).
- [2] VanLehn, K. and van de Sande, B.: Acquiring conceptual expertise from modeling: The case of elementary physics, In Ericsson, K. A. (Ed.) The Development of Professional Performance: Toward Measurement of Expert Performance and Design of Optimal Learning Environments (Cambridge University Press), pp. 356-378 (2009).
- [3] Chi, M.T.H., Feltovich, P.J. and Glaser, R.: Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices, Cognitive Science, 5, pp.121-152 (1981).
- [4] Larkin, J.H.: The role of problem representation in physics, In Gentner, D. and Stevens, A.L. (Eds.) Mental models, Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates (1983).
- [5] Larkin, J.H.: Understanding, problem representations, and skills in physics, In Chipman, S.F., Segel, J.W. and Glaser, R. (Eds.) Thinking and learning skills, Vol.2: Research and open questions, Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates (1985).
- [6] Horiguchi, T, Toumoto, T, & Hirashima, T.: A framework of generating explanation for conceptual understanding based on “semantics of constraints,” Research and Practice in Technology Enhanced Learning, 10:2, (2015).