

# ITSを指向した説明機能のための対象理解モデル

## An Object Understanding Model for ITS-oriented Explanation

柏原 昭博 平島 宗 中村 祐一† 豊田 順一

Akihiro KASHIHARA Tsukasa HIRASHIMA Yuichi NAKAMURA Jun'ichi TOYODA

大阪大学産業科学研究所 (†現在、日本IBM 東京基礎研究所)

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

(† Currently, Tokyo Research Laboratory, IBM research)

あらまし 電気回路などの対象の理解を高度に支援するための対象理解モデルについて論じる。本モデルでは、対象を理解することを対象を既知の知識に対応づけて説明することであると捉えている。本稿では、このような対象理解の観点から、対象に関する説明、説明過程について認知的に考察することによって、対象理解を支援するためにITSとして具備すべき説明機能を明らかにする。さらに、説明機能を実現するモデルの枠組を与える。

キーワード 知的CAI 対象理解 高等教育 認知科学 定性的理解 CAI

### 1. 序論

ITS (Intelligent Tutoring Systems) の研究目的は、計算機による高度な個別教育システムの実現にある。この目的を達成するためには、対象領域に対する学生の理解を明確に扱うモデルの枠組み、及びその実現法を与える必要がある[1,2]。筆者らは、電気回路を対象として、ITSを指向した対象理解モデルを提案している[3]。従来の電気回路のような対象を扱ったITSでは、オームの法則などを用いた定量的な解析による理解よりも定性的な理解を重視している。特に物理現象の定性的なシミュレーションによって対象の理解を支援することに重点が置かれている。このようなITSの代表例にSTEAMER、QUESTがある。STERMER[4]は、対象の定量的な動作モデルから得られる物理現象をグラフィカルなインタフェースを通して定性的に提示する環境の実現といった観点からの研究である。QUEST[5]は、学生が物理現象を理解するレベルを3段階に分類して、学生のレベルに応じた回路を段階的に与える枠組みを持ち、与えた回路に対する定性的な推論を通して物理現象を提示する。しかしながら、これらのシステムでは、対象をどのように理解すべきかについての理解のモデルが明確に表現されていない。そのため、学生の定性的な理解の行き詰まりに対して有効な教育支援を与えることが困難であるといった欠点がある。筆者らは、このような教育支援のための教育戦略を豊富にするためには、対象をどのように理解するのかといった認知的な考察に基づいた理解のモデルを明確にITSに与えることが必要であると考えている。

本研究では、対象の定性的な理解を教育的に支援するといった観点から、対象理解を明確に表現するモデルを構築することを目的としている。筆者らは、対象を理解することを、理解すべき対象を既知の知識に対応づけて

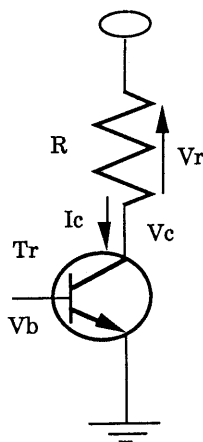
説明することであると捉えている。本稿では、このような対象理解の観点からITSを指向した対象の説明、説明過程について考察することによって対象理解のためのモデルの枠組みを明らかにする。

### 2. 対象理解

ITSにおいて理解支援を扱うためには、理解とは何であり、どのような理解を扱うのかを明確にしなければならない[2]。筆者らは、対象を理解することを、理解すべき対象を既知の知識に対応づけて説明することであると捉えて、説明に必要な領域知識の構造とそれを用いた理解過程のモデル化を行っている[3]。本章では、対象をどのように説明すべきかを認知的な観点から考察し、対象の理解を支援するためにどのような説明を扱う必要があるのかを明確にする。

#### 2.1 抽象—具体関係に基づく対象理解

電気回路などの人間によって設計された対象は、構造、振舞い、機能の3つの相異なるレベルから説明することができる[8]。構造の説明は、抵抗、コンデンサなどの対象を構成する構成要素と構成要素間の結合関係を表現する。振舞いの説明は、構造上での物理現象を表現する。機能の説明は、対象の目的を表現する。さらに構造、振舞い、機能の各レベルは相互に関連しているために、それぞれに関連づけた説明が必要となる。つまり、構造は対象の機能を具体化する実現手段(物理的な道具立て)を表し、振舞いは構造の果たす物理的な特性であって機能を達成するために何を表すのかを表す。機能は構造が何のためのものであるかといった目的を表している。従来の対象理解を扱った教育システムでも、対象の説明を与えることにより対象理解を支援している。しかしながら、対象の説明として定性推論に基づく振舞いの説明が



- (a) 回路はトランジスタTrと抵抗Rから構成される  
Trのコレクタに抵抗Rが接続され、エミッタは接地されている  
抵抗Rは定電圧源とTrのコレクタに接続される
- (b) Trのベース電圧Vbが増加すると抵抗Rの両端の電圧Vrが増加する (機能：電圧増幅)
- (b') Trのベース電圧Vbがある一定以上になると抵抗Rに電圧降下を生じてコレクタ側の電圧Vcが一定以下になる (機能：電圧反転)
- (c) この回路は、入力をTrのベース電圧Vb、出力を抵抗Rの両端の電圧Vrとする電圧増幅の回路である  
この回路は入力をTrのベース電圧Vb、出力をコレクタ電圧Vcとする電圧反転の回路である。

図1 対象に関する構造、振舞い、機能の説明

重点的に扱われていて、構造、機能の説明やそれらに関連づけた説明が暗黙的となっていた。筆者らは、対象理解支援をより高度なものとするためには、振舞いだけではなく、構造、機能、およびそれらに関連づけた説明を明確に扱う必要があると考えている。本研究では、構造、振舞い、機能を関係づける軸として抽象-具体 (Abstract-Specific) 関係の軸を設定する。この軸に基づいて、構造、振舞い、機能とそれらに関連づけた説明をASE (Abstract-Specific relation based Explanation) と呼ぶ。ここでいう抽象とは、生物の分類階層のように単に具体的な情報が除かれるだけではなく、新たに対象の目的に関わる情報が付加されることを意味している。つまり、構造から振舞いのレベルへの抽象化では、構造が機能を達成するために何をするのかについての情報が付加され、振舞いから機能への抽象化は、構造が何のために存在するのかについての情報が付加される。

以下に、対象の説明としてASEが必要であることを議論するために、構造、振舞い、機能の理解について考察する。

### 2.1.1 構造の理解

構造の理解は、説明すべき構造を決めて、構造の構成要素 (プリミティブ) が何であるか、プリミティブがどのように結合しているのかを説明することであると捉える。図1の回路図に対する構造の説明を図1(a)に示す。

構造を説明するためには、構造のプリミティブを決める必要がある。このプリミティブの決定は、機能的に一つのまとまりを構成している部分に着目することによってなされる。つまり、プリミティブは意味のある一つのまとまりであり、その意味が機能を表している。また、プリミティブを構造と見なして、その構成要素をプリミティブとする説明も考えられる。図1(a)は、回路全体の構造に対してTr, Rをプリミティブと見なした説明である。このように、構造を説明するためには、機能に基づいて部分的な構造に着目しプリミティブとみなす必要がある。また、教育的に対象理解を支援するためには、プ

リミティブの持つ機能が教育的に意義のあるものを扱い、プリミティブへの着目に対する妥当性を機能を用いて与えることが必要となる。

### 2.1.2 振舞いの理解

振舞いの理解とは、構造上での物理現象を説明することであると捉える。図1(b)に図1の回路図に対する振舞いの説明を示す。本研究では、物理現象を説明したものを振舞いとして、物理現象と振舞いを分けて考える。

振舞いの説明過程では、構造を決めて、その構造から振舞いを決める必要がある。この過程は、抽象-具体関係に基づいて構造を抽象化する過程である。振舞いの説明は、構造上の物理現象をどのように解釈するのかによって異なったものとなる。例えば、図1の回路図が示す構造に対して(b),(b')の2つの異なった振舞いの説明を行うことができる。物理現象は、構造における電圧、電流などの属性から入力、出力となる属性を選択して、さらに入出力間の因果的な関係を見つめることによって解釈される。特に、解釈は入出力属性をどのように選択するかによって決まる。図1(b)の場合、入力属性Vb、出力属性Vrが選択されているのに対して、(b')では入力属性Vb、出力属性Vcが選択されている。筆者らは、機能とは入力属性、出力属性とそれらの関係を表す概念からなる関数であると考えている[3]。このように機能を捉えると、構造の持つ機能をどのように規定するかによって入出力属性の選択が異なり、振舞いの説明は異なったものとなる。定性推論をベースとした教育システムでも振舞いの説明が可能であるが、構造の持つ機能を固定的に捉えているために振舞いは固定的に説明される。しかしながら、構造の持つ機能は、その構造が用いられる状況 (Context) に応じて変化するものであるため、それに応じて振舞いの説明も異なったものとならなければならない。例えば、図1の回路が増幅回路中で用いられているならば、振舞いの説明は電圧増幅の機能により(b)となり、論理回路中で用いられているならば、振舞いの説明は電圧反転の機能により(b')となる必要がある。このように、振舞いを説

明するためには、機能を規定することによって構造を抽象化する方向を定めて物理現象を解釈する必要がある。また、教育的に対象理解を支援するためには、振舞いの説明に対する妥当性を構造の持つ機能によって与える必要がある。

### 2.1.3 機能の理解

機能の理解とは、対象の目的を説明することであると捉える。例えば、図1の回路に対する機能の説明を(c)に示す。機能を説明する過程では、構造を決め、構造から振舞いを抽出して、または構造から直接に、機能を決める必要がある。この過程は、抽象—具体関係に基づいて構造を抽象化する過程である。このような抽象化の方向は、構造をどのような目的に用いるかに依存する。同一の構造に対して様々な抽象化の方向を考えることができるが、抽象化の方向を規定するためには、構造をどのような目的に用いるかを機能として決める必要がある。従来の対象理解を扱った教育システムでは、構造の持つ機能を固定的に捉えているために、構造の抽象化の方向が固定している。しかしながら、構造が持つ機能は、その構造をどのような目的に用いるかによって動的に決まる。したがって、対象の説明を行うためには、対象をどのような目的に用いるかを決め、対象の機能を規定することが必要不可欠となる。

### 2.2 全体—部分関係に基づく対象理解

対象は、いくつかの部分的な構造（プリミティブ）に分割して説明することができる。対象を分割して説明する場合、説明すべきプリミティブの粒の大きさ（grainsize以下、粒度と呼ぶ）をどのように設定するかが問題となる。一般に、対象を様々なプリミティブの粒度で説明することができる。例えば、図1の回路の場合、TrとRのそれぞれをプリミティブとみなした説明、Tr, Rをひとつのまとまったプリミティブとみなした説明が考えられる。対象がどの粒度で説明されるかは、説明する人間が持つ対象の知識によって決まると考えられる。したがって、学生に対して対象を説明する場合、学生の知識に応じたプリミティブの粒度によって対象を説明することは対象理解を促進する上で有効である。このように、対象理解の支援を行うためには、学生の知識に応じてプリミティブの粒度を決定し、対象を説明する枠組みが必要となる。

また、異なる粒度での説明を相互に関係づけた階層的な対象の説明が考えられる。例えば、図1の場合、回路全体の構造をプリミティブとする説明からTr, Rをプリミティブとする説明へ分解する説明、またはTr, Rをプリミティブとする説明から回路全体をプリミティブとする説明へまとめあげる説明を考えることができる。このような階層的な説明は、学生が持つ対象に関する知識を細分化、チャンキングするために有効であると考えられる。したがって、対象理解を支援するためには、階層的な説明を扱う枠組みが必要である。階層的な説明におけるプリミティブの分解、またはまとめあげは、プリミティブの持つ機能とそれを構成する機能（機能単位と呼ぶ）

間の関係に基づいてなされる。つまり、分解は、機能を構成する機能単位が対応する部分的な構造に対して行われ、まとめあげは各プリミティブの機能を機能単位とする構造に対して行われる。したがって、階層的な説明を行うためには、このような機能—機能単位間の関係に基づく必要がある。従来の教育システム[4]においても、このようなプリミティブの粒度による構造の階層性が扱われているが、これらのシステムでは学生が様々な粒度で対象を探究できる環境の実現を目指すものであって、機能を関係づけた構造の階層性が明確に扱われていない。しかしながら、教育的に対象理解を支援するためには、プリミティブのまとめあげ、分解の妥当性を機能を用いて与えることが必要である。

本研究では、対象のプリミティブの粒度の軸として、全体—部分（Whole-Part）関係の軸を設定する。また、この軸に基づいた説明に関して、指定したプリミティブの粒度での説明、階層的な説明を扱う。

### 2.3 対象理解のモデル化

対象に関する説明を生成することは、対象理解の重要な側面を捉えていると考えられる[6]。本研究では、対象理解支援の高度化を目的として、抽象—具体関係、全体—部分関係の2つの軸[7]に基づく説明、説明過程を認知的な観点からモデル化する。また、筆者らは対象に関する説明を教育的に利用する立場から、教育的に有効な説明、説明過程について扱い、それを可能とするモデルを考える。本モデルについては、次章で詳細に論じる。

## 3. 対象理解モデルの枠組み

筆者らは、以下の3つの説明が教育的に重要であると考えている。本研究では、これら3つの説明を可能とするモデルを対象理解モデルと呼ぶ。

- (1) 抽象—具体関係に基づく説明
- (2) 全体—部分関係に基づく説明
- (3) 既知の対象を用いた説明

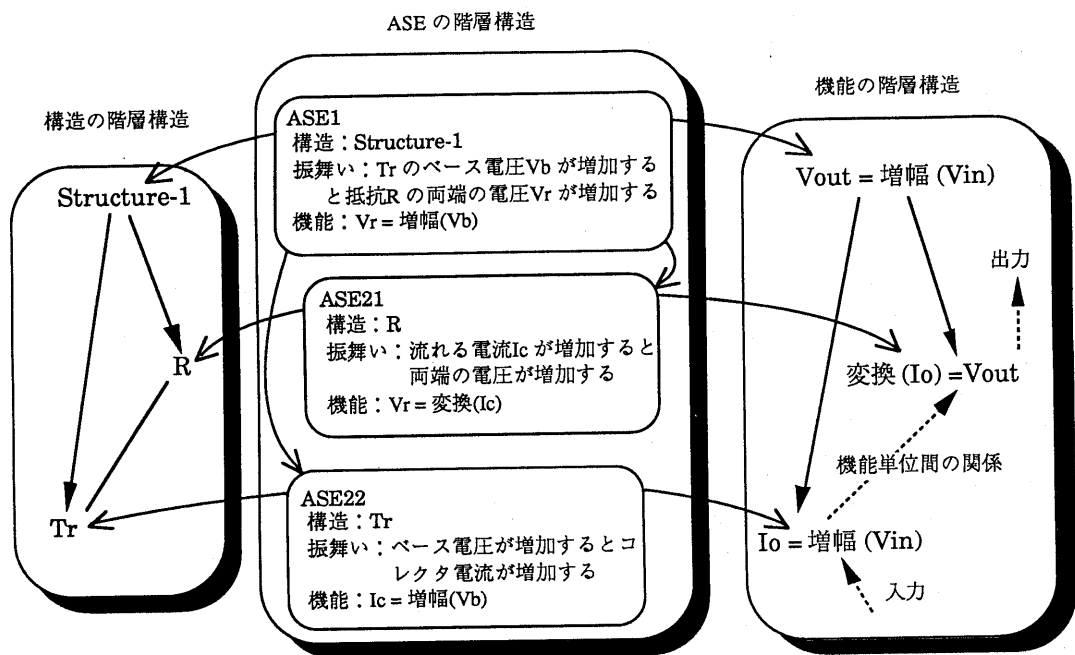
本章では、各説明、説明過程について考察し、説明に必要な領域知識の構造とそれを用いた説明過程をモデル化する。

### 3.1 抽象—具体関係に基づく説明

抽象—具体関係に基づく3レベルを関係づけて説明することは、どのように構造を捉えるか、振舞いをどのように理解するかを困難にしている学生に対して有効であると考えられる。前章で述べたように、ASEは対象の構造、振舞い、機能とそれらの関係を表現する。

ASEを生成するために必要な知識は、(1) 構造とその構造上での振舞い、(2) 機能とその振舞い、の2つに分類することができる。また、説明操作は(a)構造の抽出、(b)振舞いの抽出、(c)機能の抽出、の3つに分類することができる。(a)は、知識(1)を用いて対象から説明すべき構造を決定する操作である。(b)は、知識(1)を用いて構造から振舞いを抽出する操作である。(c)は、知識(1),(2)を用いて機能を決める操作である。

ASEの生成過程には、抽象化による生成過程、具体化



(a) 機能、構造の階層構造とASE の階層構造

- (b) この電圧増幅機能は、電圧を電流として増幅する機能と増幅した電流を電圧に変換する機能からなる。前者の機能はTr、後者の機能はRが果たす。この構造上の振舞いは、TrでのVbが増加するとIcが増加する振舞いとRでのIcが増加するとVrが増加する振舞いからなる。

図2 全体一部分関係に基づく対象の説明

による生成過程の2つが考えられる。前者は、(a)によって対象から構造を抽出し、(b)によって構造から振舞いを決め、(c)によって振舞いに対する機能を決める、または構造から直接(c)によって機能を決める過程である。後者は、対象の機能に基づき(a)によって構造を抽出し、さらに機能に基づき(b)を適用して構造から振舞いを決める過程である。教育的な観点からみれば、抽象化によるASEは、機能の概念を持たない学生に対して構造が持つ機能を伝達し、具体化によるASEは、既に機能の概念を持っている学生に対して機能を実現する構造を伝達する。

以上のように説明過程を捉えと、抽象—具体関係に基づく対象に関する説明は、説明操作(a), (b), (c)をオペレータとして、知識(1), (2)を記述言語とする問題空間として定義することができる。この問題空間を説明空間と呼ぶ。

### 3.2 全体一部分関係に基づく説明

2.2 で述べたように、全体一部分関係の軸に基づいて学生の知識レベルに合致したプリミティブの粒度で対象を説明することは、学生の対象理解を促進する上で有効である。また、プリミティブの粒度を変化させて対象を階層的に説明することは、学生の持つ説明に必要な知識を再構成する上で有効であると考えられる。つまり、

粒度の大きいものから小さいものへの(トップダウン)説明は知識の細分化に有効であり、粒度の小さいものから大きなものへの(ボトムアップ)説明は知識のチャンキングに有効である。

全体一部分関係に基づく説明を生成するために必要となる知識は、(1)構造と構造単位の関係、(2)機能と機能単位の関係、の2つに分類できる。一般に機能は、いくつかの機能(機能単位と呼ぶ)とそれらの関係によって表現される。構造は、機能—機能単位間の関係に基づいて、いくつかの部分的な構造(構造単位と呼ぶ)とそれらの関係によって表現される。このように、対象は機能とそれに対応する構造の2つの階層構造をもつと捉えることができる。対象全体の説明は、階層的に存在する各機能と各構造に対するASEによる階層構造として表現することができる。例えば、図1の回路に対する構造、機能の階層構造とASEの階層構造を図2に示す。本研究では、指定したプリミティブの粒度での説明はプリミティブに対するASEを結合した説明と考える。さらに階層的な説明は機能—機能単位間の関係にあるASE間を関係づける説明と考える。しかしながら、一般には同一の対象に対して全体一部分関係に基づく説明は一意に決まらない。同一の対象の機能、構造に対して異なる機能単位の

関係、構造単位との関係を与えることが可能である。筆者らは教育的な観点から、教育目標に応じて機能、構造の階層構造を決定して対象の説明を扱う立場をとる。

全体-部分関係に基づく説明のために必要な説明操作は、大別して(a) 指定したプリミティブに対するASEの結合、(b) 機能-機能単位間の関係にあるASEの関係づけ、の2つに分類できる。(b) はさらに、(b1)ASEの分解、(b2)ASEのまとめあげ、の2つに分類できる。

指定したプリミティブの粒度での説明の生成過程は、プリミティブを構造とするASEを、(a)を用いて結合する過程として表現することができる。結合は、指定した粒度より大きい粒度での機能を構

成する機能単位間の関係に基づいて行う必要がある。例えば、図2のASE21,ASE22の結合では、上位の電圧増幅機能( $V_{out}$  = 増幅( $V_{in}$ ))を構成する機能単位間の関係によってASE22→ASE21のように結合する。

階層的な説明過程には、トップダウン、ボトムアップの2つの方向がある。トップダウン過程は、階層的に上位レベルのASEを機能-機能単位間の関係に基づいて(b1)により分解する過程として表現することができる。分解は、上位レベルの機能を構成する各機能単位に着目し、それぞれが対応する構造単位を決めることによって行う。トップダウンの説明は、機能から機能単位への分解、機能に基づく構造から構造単位への分解と上位の振舞いから下位の振舞いへの分解の3つを表現する。例えば、図1の回路図に対するトップダウンな説明は、図2(b)のようになる。

ボトムアップな過程は、階層的に下位のレベルのASEを(b2)を用いてまとめあげる過程として表現することができる。まとめあげは、下位レベルのASEでの各構造(各機能)を構造単位(機能単位)とする構造(機能)を決めることによって行う。ボトムアップの説明は、機能単位から機能への、構造単位から構造への、下位の振舞いから上位の振舞いへのまとめあげの3つを表現する。

一般に下位レベルの機能は上位レベルの機能によって一意に決まるが、純粋にボトムアップのみで説明する場合、下位の説明空間での構造の抽象化の方向は一意に決まらず、下位レベルの機能を複数考えることができる。そのため、下位のASEは複数考えることができ、ASEのまとめあげに組合せ的な爆発を生じる。ITSにおいてボトムアップな説明を行うためには、上位機能によって下位の機能を規定する枠組みが必要となる。本モデルでは、予め機能の階層構造を用意して下位の機能を規定する枠組みを考える。

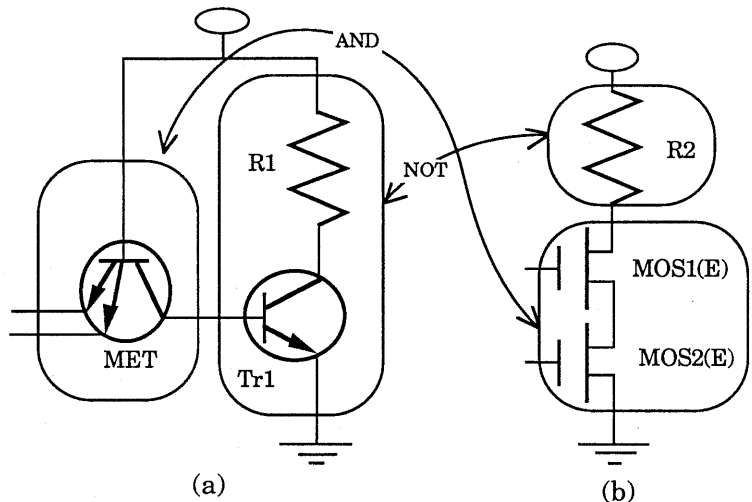


図3 NAND機能に基づく構造の類似性

### 3.3 既知の対象を用いた説明

3.1, 3.2 で述べた説明を可能とする領域知識を用意すれば、類似した対象、一般化された対象を決めることができる。類似な対象とは機能が同一で構造の異なる対象であり、一般化された対象とは機能が一般化された構造を持つ対象である。ここで、機能と一般化された機能の関係を機能のis-a関係と呼ぶ。このis-a関係は、生物の分類階層におけるis-a関係と同様である。

学生に対してある対象を説明するときに、学生にとって既知である類似な対象、一般化された対象を利用することは、学生が持つ説明に必要な知識の構造化を支援する上で有効な手段となる。例えば、図3(b)の回路が既知であって図3(a)の電圧のNAND回路を説明する場合、機能的に類似な対象(b)を対応づけて説明することができる。また、図4(b)の回路が既知であって図4(a)の回路を説明する場合、(a)の機能を一般化した(b)の対象を対応づけて説明することができる。

既知の対象を用いた説明に必要な領域知識は、(1) 機能に基づく構造の類似性、(2) 機能のis-a関係による構造の一般化、である。(1), (2)は、それぞれ図5(a), (b)に示すような知識構造によって表現することができる。

機能の類似性、一般化による対象の説明のために必要な操作は、(a)既知の構造の抽出、(b)各対象の対応づけ、に分けることができる。(a)は、図5に示す知識構造を用いて説明に必要な構造を抽出するためのオペレータである。(b)は、(a)によって抽出した構造を理解対象に対応づけて説明するために必要なオペレータである。本モデルでは、対応づける操作を、既知の対象を用いて理解対象のための説明空間を設定するための操作であると捉える。

構造の類似性を用いた説明過程は、(a)を用いて、理解すべき対象の機能から類似な構造を抽出する過程と、(b)を用いて抽出した構造と理解対象の構造を対応づける過

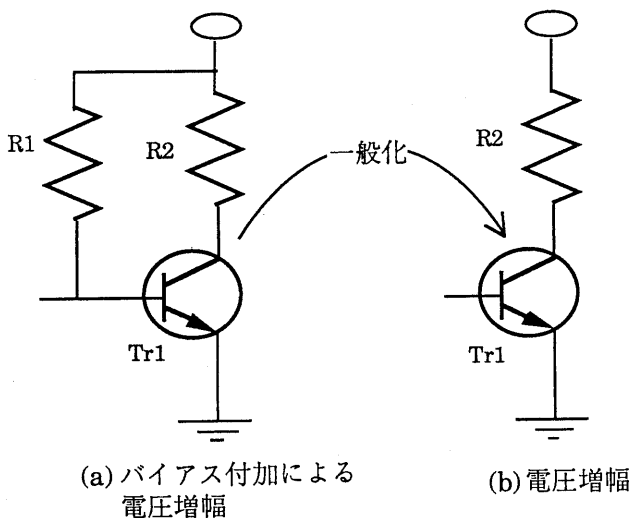


図4 機能のis-a 関係による構造の一般化

程として表現することができる。対応づけでは、機能的に対応する各対象の構造単位を対応づけて、対応の妥当性を機能単位によって与える。

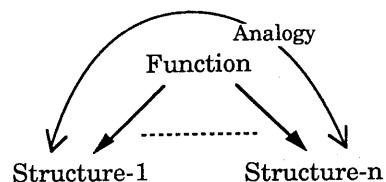
構造の一般化による説明過程は、(a)を用いて理解対象の機能を一般化して、一般化された機能を実現する構造を持つ対象を抽出する過程と、(b)を用いて2つの対象の構造を対応づける過程として表現することができる。対応づけでは、一般化された構造部分を明示して、一般化の妥当性を機能のis-a関係を用いて与える。また、2つの対象の構造における差異を明らかにする。構造の差異を明示することは、理解すべき対象の説明空間を設定するための支援として有効であると考えられる。本稿では、構造の差異から説明を生成する過程については扱わない。

#### 4. 対象理解モデルの具体化

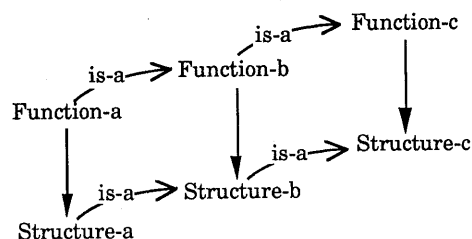
本章では、3章で述べた対象理解モデルを具体的に表現する枠組みについて述べる。

##### 4.1 モデルの枠組み

本モデルでは、3章で述べた対象理解に必要な知識を表現するために、構造フレーム、機能フレームを導入する。構造フレームは、構造単位、入出力属性群と入出力属性間の関係群、構造-構造単位間の関係を表する構造単位ネットワーク (Structure Unit Network, 以下SUNと略す)、から構成される。機能フレームは、機能単位、機能を表する振舞い、機能-機能単位間の関係を表する機能単位ネットワーク (Function Unit Network, 以後FUNと略す) から構成される。図1の回路に対する構造フレーム、機能フレームを図6(a),(b)に示す。



(a) 機能に基づく構造の類似性



(b) 機能のis-a 関係による構造の一般化

図5 機能に基づく構造の類似性、一般化

以上の具体的な枠組みに基づくと、ASEでの構造の理解は、構造フレームの選択であり、振舞いの理解は、選択した構造フレームから入出力属性とそれらの関係を抽出することである。さらに機能の理解は機能フレームの選択である。また、ASEにおける説明操作は、構造フレーム、機能フレーム、振舞いを選択し、それらを関係付けるものである。このように考えると、説明空間は構造フレーム、機能フレームを記述言語、説明操作をオペレータとする問題空間と考えることができる。また、生成されるASEは各フレーム、振舞いを関係づけたものとなる。また、全体-部分関係に基づいた構造、機能の階層構造は構造フレーム、機能フレームによる階層構造として表現することができる。本モデルで扱う電気回路の領域では、対象理解を表現するのに構造フレーム、機能フレームを用いることで必要十分であると考えられる。

#### 4.2 フレームの記法

##### 4.2.1 構造フレーム

構造単位は、構造フレームが表現する構造のラベルである。SUNは、構造単位に対する下位レベルでの構造単位とそれらの関係をネットワークで表現したものである。ネットワークにおける各ノードは構造単位を表現し、ネットワークは構造単位間の関係群は、教育的な説明に必要と考えられる構造上の属性、属性間の関係である。入出力属性間の関係は、ある時間におけるそれらの因果的関係を、定性推論で用いられる量間の関係[8]を用いて表している。このような表現は、ある時間における構造上での振舞いを表現していると考えられる。本研究では、入

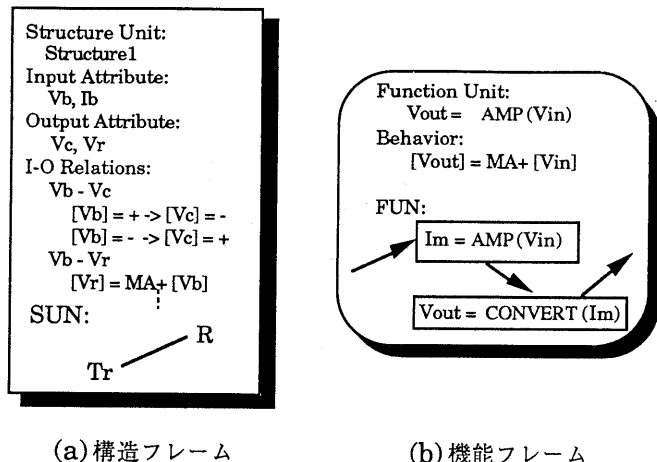


図6 構造フレームと機能フレーム

力属性、出力属性とそれらの因果的関係による記述形式を用いて振舞いの説明を行う。また、本モデルでは教育的に有効であると考えられる物理現象の解釈を振舞いとしてすべて構造に記述しておく。このような記述形式では、物理現象をシミュレートすることはできないが、対象の振舞いの説明の観点からは十分であると考えられる。しかしながら、各入出力属性毎に振舞いの推論規則を記述し、さらに属性の変化の影響を伝搬する制約規則を記述することによって、物理現象の定性シミュレーションを行えるようにモデルを拡張することは可能であると考えられる。

#### 4.2.2 機能フレーム

筆者らは、対象の機能は入力属性、出力属性とそれらの関係を表現する概念からなる関数であると捉えている。そこで、機能フレームの機能を表現する機能単位は、このような関数として表す。入出力属性は、構造に依存しない表現で記述されており、実際の理解の場面で構造フレームにおける属性値によって例化される。振舞いは、機能を表現する関数の挙動を表している。FUNは、機能単位に対する下位レベルでの機能単位とそれらの関係をネットワーク表現したものである。ネットワークにおけるノードは、機能単位を表現し、アークは機能単位間の関係を表す。アークの方向は、機能単位間の属性の伝搬方向を表す。

#### 4.3 構造、機能の階層構造表現

構造、機能の階層構造は、構造フレーム、機能フレームの階層構造によって表現することができる。本モデルでは、階層構造を上位フレームとそのSUN (FUN) における構造単位 (機能単位) を独立した構造単位 (機能単位) とする下位フレームとの間にリンクを張ることによって表現する。

#### 4.4 説明、説明過程の表現

##### 4.4.1 抽象—具体関係に基づく説明

本モデルでは、対象に対して構造フレーム、機能フレ

ームを予め用意しておき、各フレームを用いてASEの生成を行う。抽象化によるASEの生成過程は、構造フレームから入出力属性を選択して振舞いとして抽出し、振舞いに対応する機能フレームを選択して構造上での入出力属性を機能フレームに例化する過程として表現する。具体化によるASEの生成過程は、機能単位に基づき構造フレームから入出力属性を選択して機能フレームに例化し、さらに選択した入出力属性に基づいて構造フレームから振舞いを抽出する過程として表現する。抽象化の過程において、機能フレームを選択するオペレータは、抽出された振舞いをインデックスとして機能フレームにおける振舞いを検索する。具体化の過程において、構造フレームから機能フレームを選択するオペレータは、(構造

単位、機能単位) のリスト形式で記述している。図6の構造フレーム、機能フレームから得られるASEを図7に示す。

##### 4.4.2 全体—部分関係に基づく説明

本モデルでは、全体—部分関係に基づく説明を構造、機能の各フレームによる階層構造から生成する。指定したプリミティブでの説明は、プリミティブに対応する構造フレームでのASEを結合することによって生成する。ASEは、指定した構造フレームより階層的に上位のレベルでの機能フレームにおけるFUN上の機能単位間を結ぶアークの方向に従って結合する。結合の結果得られる説明は、ASEと結合順序を表現するアークによって表現される。

トップダウンによる階層的な説明は、上位のASEでのFUNにおける各機能単位をSUNにおける構造単位に対応づける過程と、上位のASEでの振舞いを下位の構造での振舞いに分解する過程を表現する。ボトムアップによる階層的な説明は、下位のASEでの構造単位、機能単位を上位フレームのSUN, FUNに基づいてまとめあげて上位フレームの構造単位、機能単位と対応づける過程と、下位のASEでの振舞いを上位の構造単位に対する振舞いにまとめあげる過程を表現する。

##### 4.4.3 既知の対象を用いた説明

本モデルの具体的な枠組みに基づく、構造の類似性の知識は一つの機能フレームに対してその機能を有する複数の構造フレームをリンクした知識構造によって表現することができる。また、構造の一般化の知識は、is-a関係にある機能フレームをリンクして、各機能を有する構造フレームをリンクした知識構造によって表現することができる。

類似な構造を用いた説明過程は、類似性のための知識構造から類似な構造を抽出し、さらに機能フレームのFUNにおける機能単位に基づいて各構造フレームでの構造単位を対応付ける過程として表現する。また、一般化され

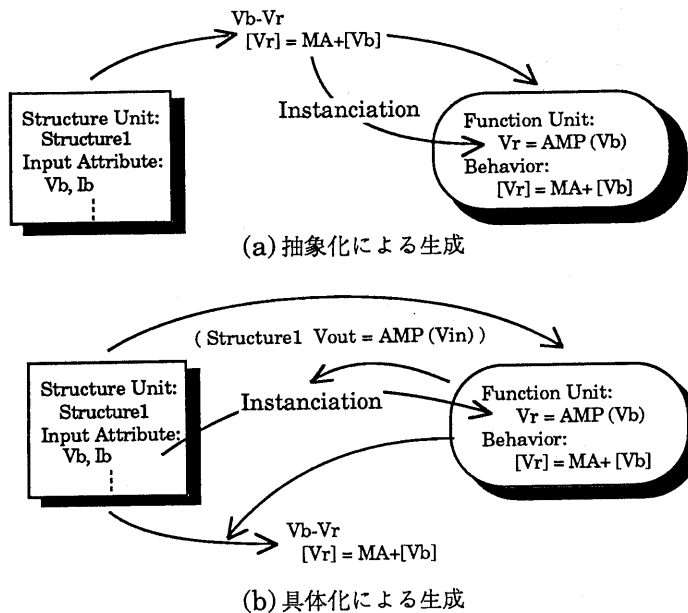


図7 構造フレーム、機能フレームによるASE

た構造を用いた説明過程は、一般化のための知識構造から一般的な機能フレーム、構造フレームを抽出し、各SUN、FUNを対応付ける過程として表現する。構造フレームの一般化の妥当性は、各FUNによって示すことができる。また、機能に基づいた各構造の差異の説明は、各SUN、FUNの差異を抽出することによって可能である。

## 5. 結論

本稿では、対象の定性的な理解を高度に支援するために認知的な考察に基づいた対象理解モデルについて論じた。本モデルでは、対象を理解する過程を対象を説明する過程として捉えて、対象の説明を(1)抽象-具体関係、(2)全体-部分関係、の2つの軸から捉えた。このような対象理解の観点から、本モデルでは、(a)抽象-具体関係に基づく説明、(b) 全体-部分関係に基づく説明、(c) 既知の対象を用いた説明、を実現している。

本研究の特徴は、認知的な観点から対象をどのように説明すべきかについての理解のモデルを提案したことにある。特に、対象を説明するためには機能を明示的に扱う必要があることを議論した点が従来のITSとは異なる特徴となっている。また、本モデルでは、対象の説明に必要な領域知識の構造を機能フレーム、構造フレームによって表現する枠組みを与えている。

今後の課題としては、計算機上での対象理解モデルの実現とそれを用いた教育戦略の構築が挙げられる。また、学生の理解状態に合わせて3つの説明をうまく関連づけるためのモデルの運用法を現在考案中である。

## 謝辞

本原稿の執筆にあたり、ご協力頂いた大阪大学大学院工学研究科応用物理学科（数理工学専攻）、西川智彦氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] Wenger, E: "Artificial Intelligence and Tutoring Systems", Morgan Kaufmann Pub. Inc, p.486 (1987).
- [2] 平島他: "ITSを指向した認知モデルと教育戦略", 情報処理学会「教育におけるコンピュータ利用の新しい方法」シンポジウム, pp.55-64 (1989).
- [3] 柏原他: "対象理解のための問題解決モデルと教育戦略", 情報処理学会「教育におけるコンピュータ利用の新しい方法」シンポジウム, pp.83-92 (1989).
- [4] Hollan J.D. et al.: "STEAMER: An Interactive, Inspectable Simulation-Based Training System", ed. Kearsley G. "Artificial Intelligence and Instruction: Application and Method", Addison-Wesley, pp.88-100 (1987).
- [5] White Y.B and Frederiksen R.J.: "Causal Model Progression as a Foundation for Intelligent Learning Environments", Artificial Intelligence, Vol.42, No.1, pp.99-157 (1990).
- [6] 佐伯他: "理解とは何か", 認知科学選書4, 東京大学出版会, p.186 (1985).
- [7] Rasmussen J.: "Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach To Cognitive Engineering", Elsevier Science Pub. Company, Inc (1986).
- [8] deKleer J.: "How Circuit Work", Artificial Intelligence, Vol.24, pp.205-280 (1984).