The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ITSにおける知識伝達の高度化を指向した説明機能の実現
Author(s)	柏原, 昭博
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3087964
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

ITSにおける知識伝達の高度化を指向した説明機能の実現

1992年1月

柏　原　　昭　博

ITSにおける知識伝達の高度化を指向した説明機能の実現

1992年1月

柏　原　　昭　博

内容梗概

本論文は、筆者が大阪大学大学院基礎工学研究科（物理系専攻情報工学分野）後期課程在学中に行った、ITS (Intelligent Tutoring System) における知識伝達の高度化を指向した説明機能の実現に関する研究の成果をまとめたものであり、次の５章をもって構成されている。

第１章においては、本研究の目的および意義について述べ、本研究により得られた諸成果を概説している。特に、人間の教師が学生に対する知識伝達の際にみせる高度な振舞い（教育行動）を生成可能とする計算機上の機構を開発することが、ITS における重要な研究課題であることを指摘している。本研究では、一般的な教育行動として説明を取り上げ、この課題に対する検討を行っている。

第２章においては、教師による説明を用いた知識伝達に関する考察を通して、説明を行う高度な機構を構築する方法について述べている。この中で、教育目的・教育方法・学生の理解状態の三つの要素を考慮して説明を使い分ける機能が重要であることを指摘している。また、この機能を実現するための手法として、知識伝達に用いる個々の説明を生成するシステム EXSEL(EXplanation Structure modEL) と、教育目的などの要素を考慮しながらEXSEL を運用して説明を使い分ける枠組みとなる LEIEC(Learning Environment based on Intelligent Explanation Capability) を提案し、これらを設計・開発する方法について述べている。EXSEL では、説明の情報源となる説明構造という概念を導入し、説明構造の生成および利用の二つのフェーズから説明の生成機構を捉えている。また、LEIEC では、教育目的に応じて学生の理解状態を考慮しながら教育方法による知識伝達を実行し、その実行過程でEXSEL を運用するといった枠組みを有している。EXSEL・LEIEC は、計算機上で説明を行う機構を概念的に捉えたモデルとして位置づけることができる。これらのモデルは、計算機に実装されている EXSEL/I および LEIEC/I と呼ばれるシステムとして具体化されている。

第3章においては、EXSELに基づき設計・開発を行ったEXSEL/Iについて述べている。EXSEL/Iは、電気回路などの対象の理解に必要となる知識の伝達を目的とした説明を生成するものであり、説明構造に対する具体的な表現方法および説明構造を生成・利用する機構を実現している。これらの機構から、使い分けに用いる個々の説明を生成するための機能が得られている。

第4章においては、EXSEL/Iを運用する枠組みとなるLEIEC/Iについて述べている。LEIEC/Iは、電気回路の理解を支援するシステムであり、学生の理解を誘導する、あるいは回路に対する質問に応答するといった教育方法による知識伝達の過程でEXSEL/Iを運用する機構を有している。この機構から、学生に対して適切に説明を使い分ける機能が得られている。このようなLEIEC/Iの構築によって、提案したEXSEL・LEIECの枠組みが説明機能を高度化する手法として有用であることが示されている。

第5章においては、本研究で得られた成果をまとめ、今後残された課題について述べている。

関連発表論文

A. 学会誌掲載論文

1. 柏原昭博, 平島宗, 中村祐一, 豊田順一 : "対象の理解支援を目的とするITSにおける説明機能の高度化に関する検討 - 説明機能のためのモデル: EXSEL の提案 - ", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-II, No.11, pp.1583-1595 (1991).

2. 柏原昭博, 西川智彦, 平嶋宗, 豊田順一 : "説明による対象理解支援のための学習環境について", 電子情報通信学会論文誌, Vol.75-A, No.2 (1992掲載予定).

本論文と関連発表論文の対応は、各章の初めに脚注として示す。

B. シンポジウム・研究会・全国大会

1. 柏原昭博, 平島宗, 中村祐一, 豊田順一 : "対象理解を必要とする問題解決過程のモデル化", 情報処理学会第39回全国大会論文集 1D-5, pp.375-376 (1989).

2. 柏原昭博, 平島宗,中村祐一,豊田順一 : "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」シンポジウム論文集, pp.83-92 (1989).

3. 柏原昭博, 平島宗, 中村祐一, 豊田順一 : "ITS を指向した説明機能のための対象理解モデル", 人工知能学会研究会資料 SIG-KBS-9001, pp.51-58 (1990).

4. 柏原昭博, 西川智彦, 平島宗, 豊田順一 : "ITS を指向した対象理解モデルとその実現", 人工知能学会第4 回全国大会論文集, pp.715-718 (1990).

5. 西川智彦, 柏原昭博, 平島宗, 豊田順一 : "対象理解モデルを用いた教育戦略とその実現", 人工知能学会第4 回全国大会論文集, pp.719-722 (1990).

6. 柏原昭博, 西川智彦, 平島宗, 豊田順一 : "対象理解支援モデル EXSEL に基づく教育戦略と学生モデル", 情報処理学会コンピュータと教育研究会報告 90-CE-13-4 (1990).

7．柏原昭博, 西川智彦, 平島宗, 豊田順一 : "対象理解を支援するための ITS における対話戦略について", 電子情報通信学会技術研究報告 ET-90-89, pp.13-20 (1990).

8．西川智彦, 柏原昭博, 平島宗, 豊田順一 : "説明構造モデル EXSEL に基づく対象理解支援のための ITS の設計・開発", 人工知能学会研究会資料 SIG-HICG-9003, pp.53-62 (1991).

9．柏原昭博, 西川智彦, 桐生健一, 平島宗, 豊田順一 : "説明による教育的支援の高度化に関する検討 - 対象理解支援システム LEIEC/I の開発 - ", 電子情報通信学会技術研究報告 ET91-18, pp.9-16 (1991).

１０．桐生健一, 柏原昭博, 平島宗, 豊田順一 : "対象理解支援システム LEIEC/I における対象の提示順序について", 人工知能学会第 5 回全国大会論文集, pp.845-848 (1991).

１１．柏原昭博, 桐生健一, 平嶋宗, 豊田順一 : "ITS を指向した論理回路の設計・理解のモデル化について - 設計・理解問題の定式化と問題解決 - ", 教育工学関連学協会連合第 3 回全国大会論文集, pp.291-292 (1991).

その他の論文

C. 学会誌掲載論文

1. 山本米雄, 柏原昭博 : "多分岐平衡木 ML-tree における一括削除方式", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J72-D-I, No.2, pp.140-143 (1989).

2. 山本米雄, 柏原昭博, 川岸圭介, 塚本信宏 : "個人用データベース構築ツール TRIAS の開発", 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.6, pp.734-742 (1989).

3. 山本米雄, 柏原昭博 : "知識取り込み型CAI システム: KACEの試作", CAI 学会誌, Vol.6, No.2, pp.12-20 (1989).

4. 山本米雄, 柏原昭博 : "CAI における学習知識取り込みの一提案", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J72-A, No.7, pp.1139-1142 (1989).

5. 山本米雄, 柏原昭博 : "知識定着を目的とした開放型 CAI のモデル化", 電子情報通信学会論文誌, J72-D-II, No.8, pp.1459-1471 (1989).

6. Yano, Y., Kashihara, A., McMichael, W. : "Stabilizing Learner Knowledge in Open Structured CAI ", International Journal of Man-Machine Studies (in press).

7. 平嶋宗, 河野隆宏, 柏原昭博, 豊田順一 : "算数の文章題を対象とした問題演習支援機能の実現", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-A, No.2 (1992 掲載予定).

D. 国際会議発表論文

1. Yamamoto, Y., Kashihara, A. : "Modeling of Open Structured CAI for the Student Knowledge", TIMS XXIX Conference of Osaka '89, pp.1-22 (1989).

目次

第１章　序論　1

第２章　知識伝達のための説明機能　7

2.1　緒言 7

2.2　説明を用いた知識伝達に関する考察 8

2.3　説明機構の枠組み 10

2.4　説明機構の設計・開発手順 14

2.5　結言 15

第３章　EXSEL/I の設計・開発　17

3.1　緒言 17

3.2　教育目的の整理 18

3.2.1　対象理解を表現するための概念 18

3.2.2　対象理解の定式化 20

3.2.3　対象理解の分類 20

3.3　説明の分類 30

3.3.1　抽象 - 具体関係に基づく説明 ACE 30

3.3.2　機能に基づく説明 FBE 30

3.3.3　全体 - 部分関係に基づく説明 WPE 31

3.3.4　既知の対象に基づく説明 CBE 31

3.4　説明構造生成・利用機構の設計・開発方針 32

3.5 説明構造表現 35
3.6 説明構造生成機構 38
3.6.1 基本構造 38
3.6.2 ACE、FBE の説明構造 39
3.6.3 WPE の説明構造 40
3.6.4 CBE の説明構造 42
3.7 説明構造利用機構 44
3.7.1 ACE のための利用 44
3.7.2 FBE のための利用 45
3.7.3 WPE のための利用 46
3.7.4 CBE のための利用 46
3.8 検討 48
3.8.1 領域知識の記述方法 48
3.8.2 従来の教育システムとの比較 49
3.9 結言 50

第 4 章 LEIEC/I の設計・開発 51
4.1 緒言 51
4.2 LEIEC/I の構成 52
4.2.1 領域知識ベース 53
4.2.2 学生モデル 54
4.3 理解誘導部 55
4.3.1 基本方針 55
4.3.2 理解誘導の枠組み 56
4.3.3 理解ゴールの設定過程 58
4.3.4 誘導プランの生成過程 58
4.3.5 対象モデルの生成誘導過程 61

4.3.6 誘導例 63
4.4 質問応答部 65
4.4.1 基本方針 65
4.4.2 質問応答の枠組み 66
4.4.3 質問の分類 67
4.4.4 質問の認識過程 70
4.4.5 応答の生成過程 75
4.4.6 理解誘導における質問処理 76
4.5 考察 77
4.6 結言 78

第5章 結論 79

謝辞 83

参考文献 85

図目次

図 2.1　三要素を考慮した説明の使い分け 11
図 2.2　説明機構の枠組み 12

図 3.1　電気回路に対する説明 18
図 3.2　視点の変更方法 21
図 3.3　広義の対象理解と対象モデルの関係 22
図 3.4　機能の変化による対象モデルの変化 24
図 3.5　視点のグレインサイズの変化による対象モデルの変化 25
図 3.6　類似な対象を用いた説明 27
図 3.7　一般化された対象を用いた説明 27
図 3.8　既知の対象による対象モデルの生成 28
図 3.9　説明の整理 33
図 3.10　EXSEL/Iの構成 34
図 3.11　説明構造生成のための要求仕様 35
図 3.12　説明構造利用のための要求仕様 35
図 3.13　構造フレームと機能フレーム 36
図 3.14　ACE、 FBEのための説明構造 39
図 3.15　WPEのための説明構造 41
図 3.16　CBE-aのための説明構造 43

図 4.1　LEIEC/Iのシステム構成 52
図 4.2　対象フレームの例 53
図 4.3　理解誘導の対象となる電気回路の例 54
図 4.4　理解誘導の枠組み 56
図 4.5　理解誘導方法 60
図 4.6　抽象 - 具体関係に基づく誘導のための誘導木 63
図 4.7　理解誘導例 64
図 4.8　質問応答の枠組み 66
図 4.9　学生の質問例 68
図 4.10　質問応答の対象となる電気回路の例 68
図 4.11　質問の表現方法 70

表目次

表 3.1　電気回路を題材とした場合の入出力属性の因果的関係 37

表 4.1　理解ゴールと誘導に用いる説明タイプの関係 57
表 4.2　理解ゴールと説明構造生成要求との関係 62
表 4.3　理解ゴールと説明構造利用要求との関係 62
表 4.4　LEIEC/I において取り扱い可能な質問の分類.....65
表 4.5　質問タイプと説明構造利用の要求仕様 75

第1章

序論

人工知能の発展に伴い、設計や診断などの高度な情報処理を人間と計算機との共同作業によって行う環境が急速に注目されつつある。このような作業環境では、人間 - 計算機間における円滑な情報伝達が必要不可欠であり、これを実現することが人工知能の中心的な課題となっている[Rasmussen 86],[Hancock 89]。本論文で取り上げる ITS (Intelligent Tutoring System) に関する研究も、円滑な情報伝達を教育の文脈において実現することを目標としており、人間と計算機との関わり合いを検討する上で特に有望な研究領域とされている [Wenger 87]。

計算機を利用して教育を行うシステムでは、人間の教師が学生に対する教育支援の過程でみせる振舞い（教育行動）を計算機上で実現することを目標としている。その実現方法によって、教育システムは CAI (Computer Assited Instruction) と ITS に分類することができる。CAI では、教師の表面的な教育行動に着目してシステムの構築が行われる。しかしながら、教育行動に至る教師の思考過程を考慮しないため、個々の学生に応じて高度に教育行動を変更することができないといった欠点がある。一方、ITS では、このような欠点を解消するために、教師の思考過程をシステムの構築に反映させるといったアプローチがとられる。

ITS に関する研究の歴史は古く、1970年代に開発されたSCHOLAR にまで遡ることができる[Carbonell 70]。SCHOLAR は、地理を対象領域として、学生の多様

な質問に対して適切に応答する機能を実現している。また、Clancy は MYCIN [Clancy 83] と呼ばれる医療診断エキスパートシステムを利用して病状の診断法などを教授する GUIDON[Clancy 87] を開発している。Clancy の一連の研究[Clancy 86] は、知識工学の成果を取り入れた ITS の代表例としてみることができる。また、知識伝達といった新しい視点から ITS を見直したものに Wenger の文献 [Wenger 87] がある。Wenger は、これまでの ITS における要素技術を認知的な側面から捉え直しており、できるだけ人間に近い形で計算機上に知識を表現することが円滑な知識伝達に重要であることを指摘している。

知識伝達の観点からいえば、ITS の研究では、人間の教師が行う知識伝達をいくつかの側面からモデル化し、それらのモデルを計算機上に実装することが試みられているということができる [Sleeman 82],[岡本 87],[平島 90] 。特に、知識工学や認知科学の成果を積極的に取り入れることによって、モデルの高度化が指向されている。これまでの成果としては、領域知識モデル、学生モデル、教授モデル、の大きく三つのモデルが得られている。領域知識モデルは、伝達すべき知識を表現するモデルである。学生モデルは、学生の理解状態を表現するモデルであり、適切な知識伝達のために特に重視されている [岡本 88],[竹内 87] 。教授モデルは、教示や質問応答などの、知識を伝達する技法を表現するモデルである。ITS では、これらのモデルを統合的に利用して教育行動を高度に生成することが最終的な目標とされる。しかしながら、現状では個々のモデルにおける表現能力を洗練することに研究の中心が置かれている場合が多い。例えば、学生の理解状態についてより深く認識することが知識伝達の高度化に要求される。これに呼応して、学生モデルの研究ではより詳細に学生の理解状態を表現する方法が探求されている[VanLehn 90]。一方、これらのモデルを利用した教育行動の生成に関しては、十分な検討が行われる段階に至っていない。すなわち、各モデルの高度化が教育行動の高度化に直接反映されていない。しかしながら、教育行動は ITS が学生に対して直接働きかける動作そのものである。そのため、教育行動の質が

ITS の利用価値を決定する重要な基準になるとみなすことができる。したがって、各モデルを洗練するばかりでなく、教育行動を適切に生成する機構の構築が今後ますます必要になると考えられる。本研究では、このような観点から、知識伝達の高度化を指向した教育行動の生成について検討する。

教育行動の一般的なものとして、①説明、②質問、③ヒント、などを列挙することができる [大槻 88] 。本研究では、様々な教育システムでよく用いられているものとして説明を取り上げる。説明には、様々な形態がある。例えば、領域知識を提示する、学生の誤りを指摘する、シミュレーションを実行する、などはある知識を伝達するための説明と捉えることができる。人間の教師は、これらの説明を学生に対して適切に与えて効果的な知識伝達を行う能力を有する。特に、同じ知識を伝達する場合でも様々な説明を用いることができ、さらに学生の理解状態などを考慮してこれらの説明を適切に使い分けることができる。このような能力は、教育行動の高度な生成に最も重要なものであると考えられる。しかしながら、従来の教育システムでは個々の説明を生成する機能は有していても、説明を使い分ける機能を持たない場合が多い。そこで、筆者は説明の使い分けを ITS において実現する説明機能に関する研究を行った。これまでの説明機能に関する研究 [Schank 86],[Suthers 88] は、説明の内容に関するものと説明の方法に関するものに分けることができる。本研究では説明の内容に関して検討する。したがって、特に断らない限り説明といった場合は説明の内容を指すものとする。

説明機能を ITS で実現するアプローチとして筆者は、まず人間の教師による説明について考察を行い、説明を使い分ける基準として教育目的、教育方法、学生の理解状態、の三つを抽出した。次に、これらの基準を考慮して説明を行う機構を二つに分けて捉えた。すなわち、知識伝達に用いる個々の説明を生成可能とする機構と、それを用いて説明を使い分ける機構である。本研究では、前者の機構を EXSEL(EXplanation Structure modEL) 、後者を LEIEC(Learning Environment based on Intelligent Explanation Capability) として区別している。

EXSELは、教育目的などの三要素をLEIECから得られる情報と捉え、これらの要素に応じた適切な説明を学生に提示するといった枠組みを有する。具体的にいえば、教育目的に応じて知識伝達に用いることができる説明の範囲を規定し、さらに教育方法・学生の理解状態に応じて規定した範囲の中から適切な説明を選択する。EXSELでは、規定した範囲内にある個々の説明に含まれる情報に対して共通の情報源となる説明構造という概念を導入しており、(a) 教育目的に応じた説明構造の生成、(b) 教育方法・学生の理解状態に応じた説明構造の利用、の二つのフェーズから説明の生成機構を捉えている。

LEIECでは、知識の伝達に際して教育目的を設定し、それを達成するために学生の理解状態を考慮しながら教育方法による知識伝達を実行する。この実行過程においてEXSELを運用し、学生に対して提示する説明を使い分ける。このようなEXSEL・LEIECは、説明機能を計算機上で実現するための概念的なモデルとして捉えることができる。

次に、EXSEL・LEIECを計算機に実装するため、電気回路などの対象に対する理解支援を題材としてEXSEL/IおよびLEIEC/Iと呼ばれるシステムの設計・開発を行った。まず、対象の理解に必要となる知識の獲得を教育目的として、これを対象モデルおよび視点の概念を用いて四つのタイプに細分化し、それぞれの教育目的を達成するために必要となる説明を詳細に分類した。EXSEL/Iは、このように分類した説明の説明構造を生成・利用するための機構を有しており、一つの回路に対して31種類もの説明を生成することができる。次に、教育方法として理解誘導と質問応答を取り上げ、教育目的ごとに理解誘導を行う方法、学生の質問を適切に認識して応答（説明）を生成する方法を整備した。これらの各方法では、学生の理解状態を考慮しながら説明の使い分けが行われる。学生の理解状態は、学生が知識を有しているかどうかを表すオーバレイモデルと呼ばれる手法によって表現している。LEIEC/Iは、このような教育方法による説明の使い分けをEXSEL/Iの運用によって行う機構を有している。EXSEL/IおよびLEIEC/Iにおけ

る理解誘導の部分については、SUN microsystems 社 SPARC station2 の Kyoto Common Lisp 上に実装されており、それらの動作を確認している。本論文では、これらの研究成果について述べる。

以下、第2章では、人間の教師による説明を用いた知識伝達に関して考察を行う。次に、説明機能を実現する手法として EXSEL およびそれを運用する枠組みである LEIEC を提案し、これらを設計・開発する方法について述べる。

第3章では、EXSEL に基づいて設計・開発した EXSEL/I について述べる。まず、対象の理解についての分析を通して行った教育目的の整理と、それに基づく説明の分類について述べる。次に、これらの説明に対する説明構造を生成・利用する機構について述べる。これらの機構によって、EXSEL/I は対象の理解を扱った従来の教育システムよりも幅広い説明を生成可能にしている。

第4章では、 EXSEL/I を運用する枠組みとなる LEIEC/I について述べる。まず、理解誘導・質問応答を実行する機構における EXSEL/I の運用方法について述べる。次に、これらの機構によって EXSEL/I から得られる様々な説明を使い分けていることを示す。

最後に、第5章において本研究を総括する。

第２章
知識伝達のための説明機能

２.１ 緒言

一般に、説明とは、その内容と方法の二つを含めた意味を持つ。本研究では、説明の内容に着目して説明機能を検討している。したがって、特に断らない限り説明といった場合は、説明の内容を指すものとする。

ある知識を伝達するために用いることができる説明は、一つではなく様々なものがある。これらの説明を学生に対して適切に提示する機能が知識伝達の高度化に重要となる。しかしながら、従来の教育システムでは、個々の説明を生成する機能を有していても、様々な説明を学生に合わせて使い分ける機能を持たない場合が多い。そこで、本章ではこのような説明の使い分けを行う機構としてEXSELおよびLEIECを提案し、これらを設計・開発する方法について述べる。EXSEL・LEIECは、学生に説明を提示する上で教育目的・教育方法・学生の理解状態といった三つの情報を考慮しているため、従来の教育システムよりも適切な説明の使い分けを可能とする枠組みになっている。

2.2 説明を用いた知識伝達に関する考察

一般に、人間と人間あるいは計算機と人間との対話における説明の役割は、相手に対して意味のある情報を伝達することである。人間は、伝達しようとする情報そのものを説明とするだけではなく、対話の文脈や相手の知識レベルおよび要求水準などを考慮して、適切に説明を変えることができる。教育の文脈における情報伝達では、教師から学生へ伝達される情報とは対象領域に関する知識である。教師は、同じ知識を伝達する場合でも様々な説明を用いることができ、さらに種々の要素を考慮してこれらの説明を使い分けることができる。このような能力によって、個々の学生に応じた適切な説明を可能としている。本研究では、説明の使い分けの際に考慮される要素として①教育目的、②教育方法、③学生の理解状態、を取り上げて、説明を用いた知識伝達について考察する。

まず、これらの三要素を考慮した知識伝達の概要は、ほぼ次のようなものとなる。すなわち、ある知識を伝達する場合、まず教育目的が設定される。そして、その目的を達成するために教育方法による知識伝達が実行され、この実行過程において学生の理解状態が考慮される。以下では、このことを踏まえて各要素を個々に考慮したときの説明の使い分けについて考察する。

[教育目的を考慮した場合]

教育目的とは、人間の教師あるいは教育システムによって行われる知識伝達の目的となるものであり、様々な抽象度で表現される。抽象度の高いものとしては、知識の獲得、知識の修正などがある。また、抽象度の低いものとしては、扱う対象領域に依存した目的がある。例えば、初等代数学の領域では足し算、引き算などの概念や手続きの獲得、またはそれらに対する誤概念の修正といったものが教育目的となる。

知識を伝達する際にどのような教育目的のもとで行われるかによって、学生に与えられる説明は異なったものとなる。例えば、足し算の手続きを伝達する場面

において、知識の獲得を目的としている場合は足し算のいくつかの例や一般的な足し算の手続きの説明が行われる。一方、足し算の手続きに関して学生の有する誤った知識の修正を目的としている場合には、自己修正を促すために学生が犯した誤りの説明がなされる。これらの説明は、ともに足し算の正しい手続きの伝達を図るための教育行動である。このように、伝達すべき知識が同じでも教育目的が変化すれば、用いられる説明の内容は大きく異なったものになる。これは、知識の伝達に用いることができる説明の範囲が教育目的によって限定されることを示唆していると考えられる。

［教育方法を考慮した場合］

教育方法は、教育目的を達成するために行われる知識伝達の方法を表すものであり、教師（あるいは教育システム）主導によるものと学生主導によるものに分類することができる。前者は、さらに教示などの直接的な指導と誘導などの間接的な指導に分けることができる。後者では、対話のインタフェイスの形態によって異なった側面を見せるが、基本的には学生が教師（教育システム）に対して行う問い合せに対して説明するといった質問応答が中心となる。

ある知識の伝達を同じ教育目的のもとで行う場合でも、教育方法によって提示される説明は異なる。例えば、ある電気回路に電流がどれくらい流れるかを理解するのに必要な知識を獲得させる場面で、学生の理解を誘導する場合には抵抗などの構成要素やオームの法則などの原理、および構成要素間の関係などの説明がある順序にしたがってなされる。一方、同じ場面で質問応答を行う場合には、学生からの問い合せに対する説明だけがなされる。このように、教育方法が異なれば用いられる説明は異なったものとなるが、教育目的を考慮した場合と違い、説明の内容は同様なものである。しかしながら、説明の提示順序や説明の内容に対する焦点の当て方などに差異が現れる。

[学生の理解状態を考慮した場合]

学生の理解状態は、知識の有無あるいは知識の正誤によって表現することができる。このような学生の理解状態を考慮した説明の使い分けは、知識伝達の効果を高める上で特に重要である。

ある教育目的の達成を同じ教育方法のもとで行う場合でも、学生の理解状態に応じて提示される説明は異なる。例えば、知識の獲得を教育目的として教示を行う場面では、予備知識を多く持っている学生には簡単な説明を与え、あまり持っていない学生には詳しい説明を与えるといったことが見受けられる。このように、学生の理解状態によって用いられる説明は異なったものとなるが、説明の内容は同様なものである。しかしながら、説明の詳細度などに差異が現れる。

以上の考察から、三つの要素を考慮した説明の使い分けは、

「同じ知識を伝達する場合でも様々な説明を利用することができるが、教育目的によって利用可能な説明の範囲が決まり、その範囲の中から教育方法および学生の理解状態に応じて提示される説明が選択される。」

のようにまとめることができる。このようにして学生に提示する説明を決定することによって、知識伝達の高度化を図ることができる。

2.3 説明機構の枠組み

説明の使い分けを行うためには、(1) 教育目的に応じて説明の範囲を限定、(2) 教育方法および学生の理解状態に応じて限定された範囲から提示する説明を選択、の二つのタスクが必要となる。これらのタスクを形式的に表現するために、説明構造という概念を導入している。説明構造とは、限定された範囲内にある個々の説明に含まれる情報に対して、共通の情報源となるものである。この概念

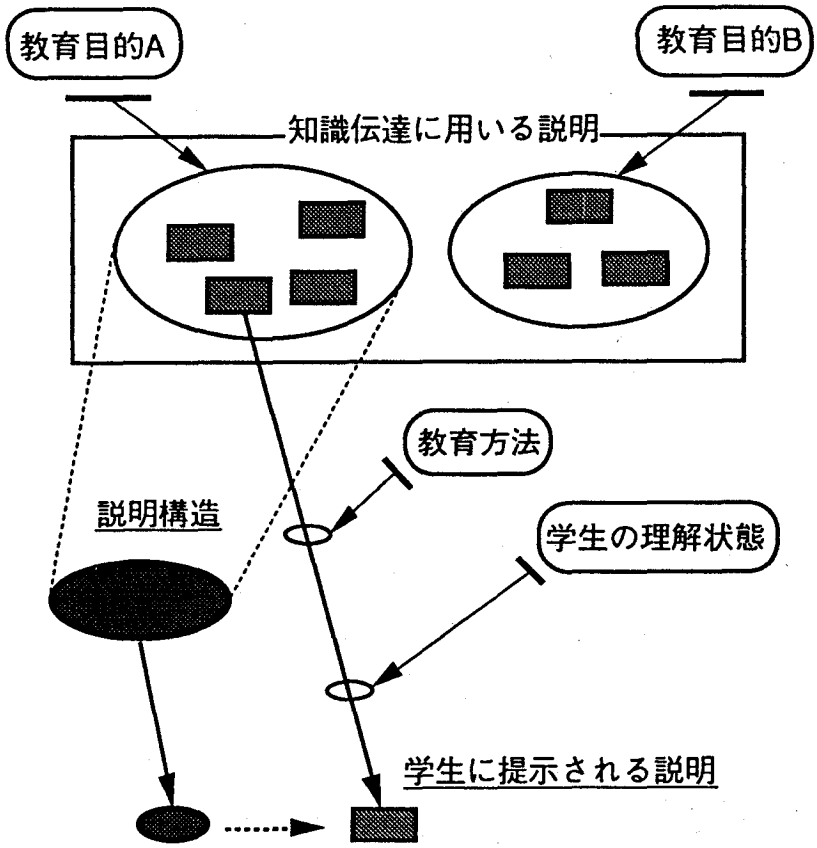


図 2.1　三要素を考慮した説明の使い分け

を用いると図2.1に示すように、知識伝達に用いる説明の範囲を限定することは説明構造を生成することに対応し、その範囲から説明を選んで提示することは説明構造を利用することに対応する。ここでいう説明構造の利用とは、生成した説明構造から学生に提示すべき説明に必要な情報を取り出すことを意味する。このように、説明の使い分けは教育目的・教育方法・学生の理解状態の三要素を考慮して、説明構造を生成・利用することとして捉えることができる。

本研究では、このような説明の使い分けを行う説明機構を図2.2で示すように

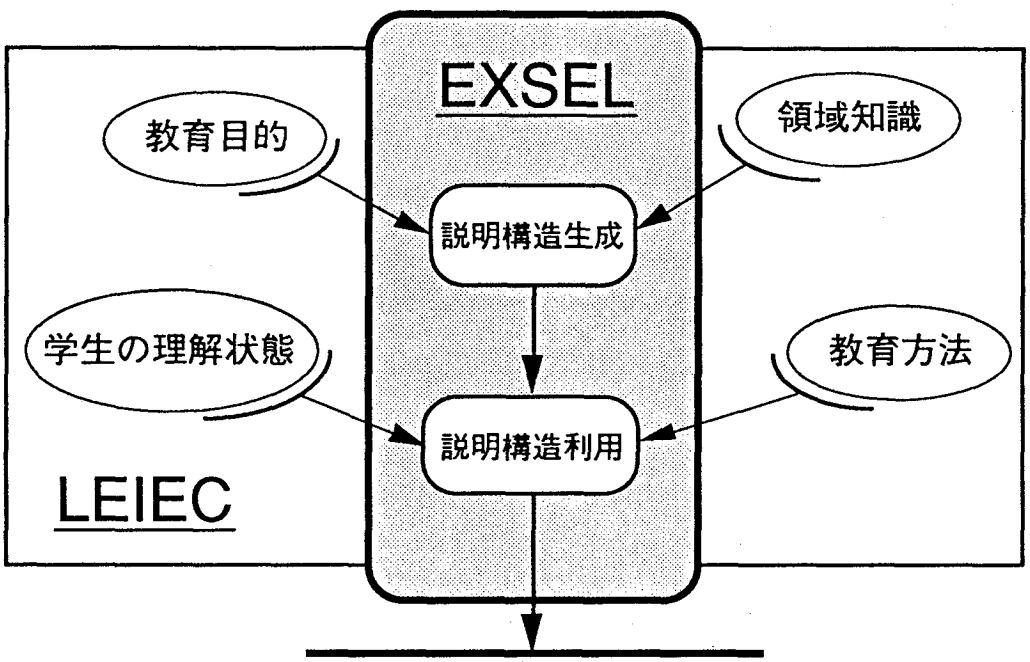


図 2.2 説明機構の枠組み

EXSEL と LEIEC の二つの部分に分けて捉えている。EXSEL は、使い分けに用いる個々の説明を生成する機構である。この機構では、LEIEC から得られる教育目的に関する情報によって説明構造の生成を行うタスクと、教育方法および学生の理解状態に関する情報に基づいて説明構造の利用を行うタスクが実行される。

LEIEC は、EXSEL を運用して説明を使い分ける機構である。この機構では、教育目的を達成するために、教育方法による知識伝達を実行するタスクが行われる。このタスクでは、説明を使い分けるために EXSEL を運用することが中心的な処理となる。EXSEL の運用タスクは、知識伝達の過程で設定された教育目的に応じて説明構造の生成を要求するものと、教育方法・学生の理解状態を考慮して学生に提示すべき説明を要求するものに分けることができる。これらのタスクは、それぞれ EXSEL における説明構造の生成および利用タスクを起動するトリガーとなる。

以上のような枠組みによって生成された説明は、最終的にインタフェイスを通して学生に与えられるが、説明の性質に応じて文字、図表、音声などのインタフェイスを適切に選択すれば、さらに説明の効果を高めることができる。例えば、物体をある高さから投げてどのように落下するかを説明する場合、文字で説明するよりも落下の軌跡を図によって示すほうが適切な効果が得られる。説明の性質は、(1) 手続き的と宣言的、(2) 抽象的と具体的、などの様々な観点から分類することができる [Suthers 88] 。このような性質を意識したインタフェイスの選択は、説明方法の使い分けに関するものである。EXSEL では、現在のところインタフェイスの選択を行うタスクを考慮していないが、効果的な知識伝達といった観点からこのタスクは重要である。

従来の教育システムを説明構造生成の観点から考察すると、CAI システムではあらかじめ用意された領域知識の獲得を目的として、知識そのものを説明する場合が多い。このような場合領域知識が説明構造となり、説明すべき領域知識を検索することが説明構造の生成タスクに相当する。また、学生モデルの生成に重点を置く ITS では、知識の修正を教育目的として学生の入力から学生モデルの表現を作り上げ、それを用いて学生の誤りを説明している。このような場合、学生モデルの表現が説明構造となり、学生モデルの生成が説明構造の生成タスクに相当する。

また、従来の教育システムを説明の使い分けの観点から考察すると、教育目的に応じて説明構造を生成する機構は実現されているが、説明構造の利用を行う場面では学生の理解状態しか考慮されていない場合が多い。そのため、従来のシステムは説明を適切に使い分ける可能性を有しているが、十分にその可能性を引き出すまでに至っていない。これは、何を基準に説明構造の利用を行うのかについての検討が十分になされていないことが原因であると考えられる。LEIEC は、教育方法および学生の理解状態の二つの基準に基づいて説明構造の利用を行うものであり、従来よりも適切に説明を提示することができる枠組みとなっている。

2.4 説明機構の設計・開発手順

以上のようなEXSEL・LEIECを計算機上に設計・開発することによって、従来よりも高度な説明機能を実現することができる。そこで、以下では、ある領域を対象としてEXSELおよびLEIECを設計・開発する手順について述べる。

まず、知識の伝達に用いることができる様々な説明を分類して、使い分ける説明の範囲を明確にしなければならない。これを行うためには、対象領域での教育目的を整理し、各教育目的を達成するために用いる説明を分類するといった方法が考えられる。このような説明の分類は、説明機構から得られる教育行動の生成能力に大きな影響を与える。例えば、質問応答を行う場合、同じ質問に対しても応答に用いる説明が詳細に分類されていれば、それだけきめ細かく説明を使い分けることができる。したがって、説明の分類を詳細に行うことが、使い分けを指向した説明機構の設計・開発において特に重要であるといえる。

次に、分類した各説明に含まれる情報を考えることによって説明構造を明らかにする。そして、説明構造に対する計算機上の具体的な記述を与え、その記述を教育目的に応じて生成する機構を開発する。また、分類した各説明に必要な情報を説明構造から取り出し、学生に提示する機構を開発する。ここまでの手順によって、EXSELを構築することができる。

次に、教育目的ごとに、それを達成するための具体的な教育方法および学生モデルの表現方法を設定する。そして、説明の使い分けを行う方法を整理し、これに基づいてEXSELを運用する機構を開発する。これらによって、LEIECを構築することができる。

以上の手順からも分かるように、EXSELとLEIECの設計・開発では、教育目的およびそれに基づいて分類された説明を共有するものの、EXSELは運用のされ方を考慮せず設計・開発することができる。したがって、教育目的が同じであれば、異なる教育方法や学生モデルに対して、同じEXSELを利用することができる。この点が、説明機構をEXSELとLEIECとに区別して捉えていることの利点となっている。

2.5 結言

本章では、教育の文脈における説明を用いた知識伝達について考察し、説明機構の概念的なモデルとして、EXSEL およびLEIEC を提案した。従来の教育システムを考えると、学生の理解状態だけを考慮して説明を行っている場合が多い。これは、教育目的や教育方法をかなり限定しており、特に学生の誤りを説明することに重点が置かれているためである。一方、EXSEL・LEIEC では、①教育目的、②教育方法、③学生の理解状態、の三つの要素に基づいて説明の使い分けを考慮している。そのため、従来の教育システムよりも柔軟に教育行動を生成する機能を提供することができる枠組みとなっている。

次に、具体的な領域においてEXSEL ・LEIEC を設計・開発する手順について述べた。この中で、特に教育目的の整理に基づく説明の分類をどの程度まで詳細に行うかによって、説明機構から得られる教育行動の柔軟性が決まることを述べた。

筆者は、EXSEL・LEIEC を計算機に実装するため、説明が特に有力な知識伝達手段となる題材として電気回路などの対象の理解を取り上げて EXSEL/I および LEIEC/I を設計・開発した。EXSEL/I では、対象の理解についての分析を通して、理解支援に必要な説明を詳細に分類しており、それらの説明に対する説明構造の生成および利用を行う機構を実現している。LEIEC/I は、電気回路の理解を支援するシステムであり、理解誘導、質問応答の二つの教育方法のもとで学生の理解状態を考慮しながら EXSEL/I を運用して説明の使い分けを行う。以下、3 章では EXSEL/I の設計・開発について述べ、4 章では LEIEC/I の設計・開発について述べる。

第３章

EXSEL/I の設計・開発

３.１ 緒言

説明を使い分けながら知識伝達を行うためには、まず教育目的の整理に基づいて使い分けに用いる様々な説明を分類することが必要となる。さらに、分類した説明を生成可能とする計算機上の機構を構築することが必要となる。本章で述べる EXSEL/I では、電気回路などの構造・振舞い・機能といった三つの抽象レベルで表現することができる対象を題材として取り上げ、このような対象の理解に必要な知識の獲得を教育目的として説明を分類している。特に、対象モデルおよび視点という概念を用いて対象の理解について定式化・分類を行うことによって、説明を詳細に分類している。また、これらの説明に対する説明構造を計算機上で表現する方法および説明構造を生成・利用する機構を実現している。これらの機構によって、EXSEL/I は対象の理解を支援する従来の教育システムに比べて幅広い説明の生成を可能にしている。

関連発表論文 A-1、B-1、B-2、B-3、B-4

3.2 教育目的の整理

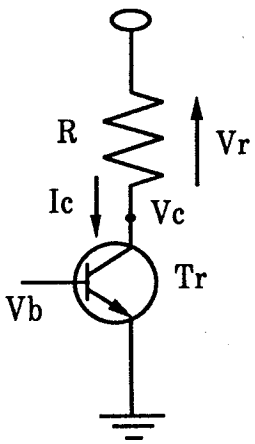
本節では、教育目的を分類するために行った、対象モデルおよび視点の概念による対象の理解に関する定式化および分類について述べる。

3.2.1 対象理解を表現するための概念

以下では、対象理解を表現する上で重要な概念となる対象モデルと視点について述べる。

[対象モデル]

電気回路などの対象は、一般に構造、振舞い、機能（目的）の三つの抽象レベルで説明することができる [deKleer 84] 。例えば、図 3.1 の電気回路に対する各抽象レベルの説明を (E1)、(E2)、(E3) に示す。これらの各抽象レベルは相互に関連している。構造は、対象を構成する具体的な道具立てを表す。機能は、対象が何のためのものであるのかといった目的を表す。振舞いは、機能を達成するために構造上で何をするのかといった構造の持つ物理的な特性を表す。本研究では、各抽象レベルの表現を説明の観点から以下のように定義する。すなわち、構造は



(E1) 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R が接続され、エミッタは接地されている。R はTr のコレクタに接続されている。

(E2) 電圧Vb が増加すると電圧Vr が増加する 。（電圧増幅の機能から捉えた場合）（Tr, R をひとまとまりの構造として捉えた場合）

(E3) この回路は、入力を電圧Vb 、出力を電圧Vr とする電圧増幅の機能を持つ。

(E4) 電圧Vb がある一定以上（以下）になると電圧Vcがある一定以下（以上）になる。（電圧反転の機能から捉えた場合）

(E5) 電圧Vb が増加すると電流Ic が増加し、電流Ic の増加により電圧Vr が増加する。（Tr, R をそれぞれ部分的な構造として捉えた場合）

図 3.1 電気回路に対する説明

対象を構成している部分的な構造とそれらの結合関係により表現する。また、振舞いは構造上における電圧、電流などの属性のうち、入出力となる属性とそれらの因果的関係により表現する。さらに、機能は入出力属性およびそれらの因果的関係に対する目的を表す概念により表現する。機能は、図 3.1 (E3) の Vb、Vr のように、構造に依存した入出力属性を用いて説明されるが、本来機能は特定の構造に依存するものではない。そこで、機能の表現での入出力属性は構造に依存しないものとして表現する。対象に対してこのように定義した構造、振舞い、機能の三項組を対象モデルと呼ぶ。

EXSEL/I で扱う対象とは、以上のように定義した三つの抽象レベルで説明することができるものである。本章で述べる対象理解の定式化・分類、説明の整理は、このような対象に対して適用可能である。

［視点］

電気回路のような対象を扱う QUEST[White 86],[White 90] などの従来の ITS では、振舞いを捉えることが対象の理解であると考えている場合が多い。しかしながら、対象を理解することが必要な状況を与える設計や故障診断などの問題では、振舞いだけでなく、構造、機能を捉え、さらに三つの抽象レベルを関係づける重要性が指摘されている [Rasmussen 86]。例えば、故障診断では構造が正しく機能を果たしているかを振舞いによって判断することが行われる。また、ある機能を果たす対象を設計する場合その機能を具体化するためにトランジスタなどの物理的な道具立てを選んで構造を形成し、さらに構造が正しく機能を果たすかを振舞いによって判断することが行われる。つまり、各抽象レベルの関係を把握することが求められる。抽象レベル間の関係づけでは、構造、機能から振舞いを導かなければならない場合が多い。これは、構造、機能は他の抽象レベルと独立して捉えることができるが、振舞いは構造、機能を決めなければ捉えることができないためである。つまり、構造、機能が知識源となって振舞いが捉えられる。ま

た、三つの抽象レベルの関係づけの観点からいえば、振舞いは構造と機能を関係づける重要な役割を果たすものである。従来から振舞いが中心的に扱われているのは、このような振舞いの役割が大きな要因になっていると考えられる。本研究では、振舞いを捉えるための構造、機能の二項組を視点と呼ぶ。

3.2.2 対象理解の定式化

三つの抽象レベルの関係づけは、視点から振舞いを取り出すこと、すなわち視点に基づいて対象から対象モデルを取り出すことであると考えることができる。このような対象モデルの取り出しを対象モデルの生成と呼ぶ。本研究では、視点に基づく対象モデルの生成を対象理解と定式化している。このような定式化は、一般的な対象理解を表すものではないが、教育的な観点から妥当である。すなわち、設計などの問題では三つの抽象レベルを関係づけて対象を把握することが求められるため、以上のように定式化して教育支援を行うことには十分意義がある。

3.2.3 対象理解の分類

一般に、一つの電気回路に対する対象理解は一意に決まらない。すなわち、一つの回路は様々な視点から捉えることができ、視点が異なるとその回路から得られる対象モデルは異なったものとなる。例えば、図 3.1の電気回路は入力 Vb を出力 Vr として電圧増幅する機能と、入力 Vb を出力 Vc として電圧反転する機能の二つの機能から捉えることができる。また、Tr、R をひとまとまりの構造として、あるいはTr、R をそれぞれ部分的な構造として捉えることができる。振舞いについては、どの視点から対象を捉えるかによって異なった見方がなされる。例えば、図 3.1 における (E2)、(E4)、(E5) のような見方ができる。

一つの対象に対する理解は、大きく二つに分類することができる。一つは視点を固定して対象から対象モデルを生成するものであり、もう一つは同じ対象に対

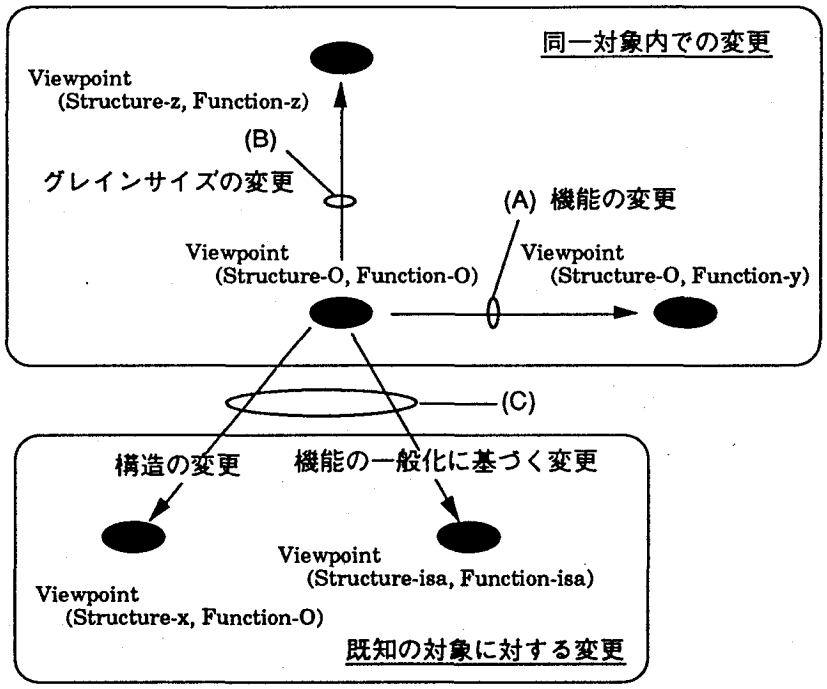


図 3.2　視点の変更方法

して様々に視点を変更し、さらにそれぞれの視点から対象モデルを生成するものである。前者を狭義の対象理解、後者を広義の対象理解と呼ぶ。広義の対象理解におけるある視点からの対象モデルの生成は、狭義の対象理解である。すなわち、広義の対象理解はいくつかの狭義の対象理解を含む。また、広義の対象理解にはそれに含まれる個々の狭義の対象理解だけではなく、それらの視点・対象モデル間の関係も含まれる。

広義の対象理解は、さらに図3.2に示すように視点の変更方法により三種類に分類することができる。図中の(A)は、視点を構成する構造を固定したまま機能だけを変更する場合であり、これによる対象理解を「機能の変更による対象理解」と呼ぶ。(B)は、視点を構成する構造、機能についての表現の詳細度を変更する場合であり、これによる対象理解を「グレインサイズの変更による対象理解」と呼ぶ。(A)・(B)は、同一の対象内での変更となる。(C)は、視点を構成す

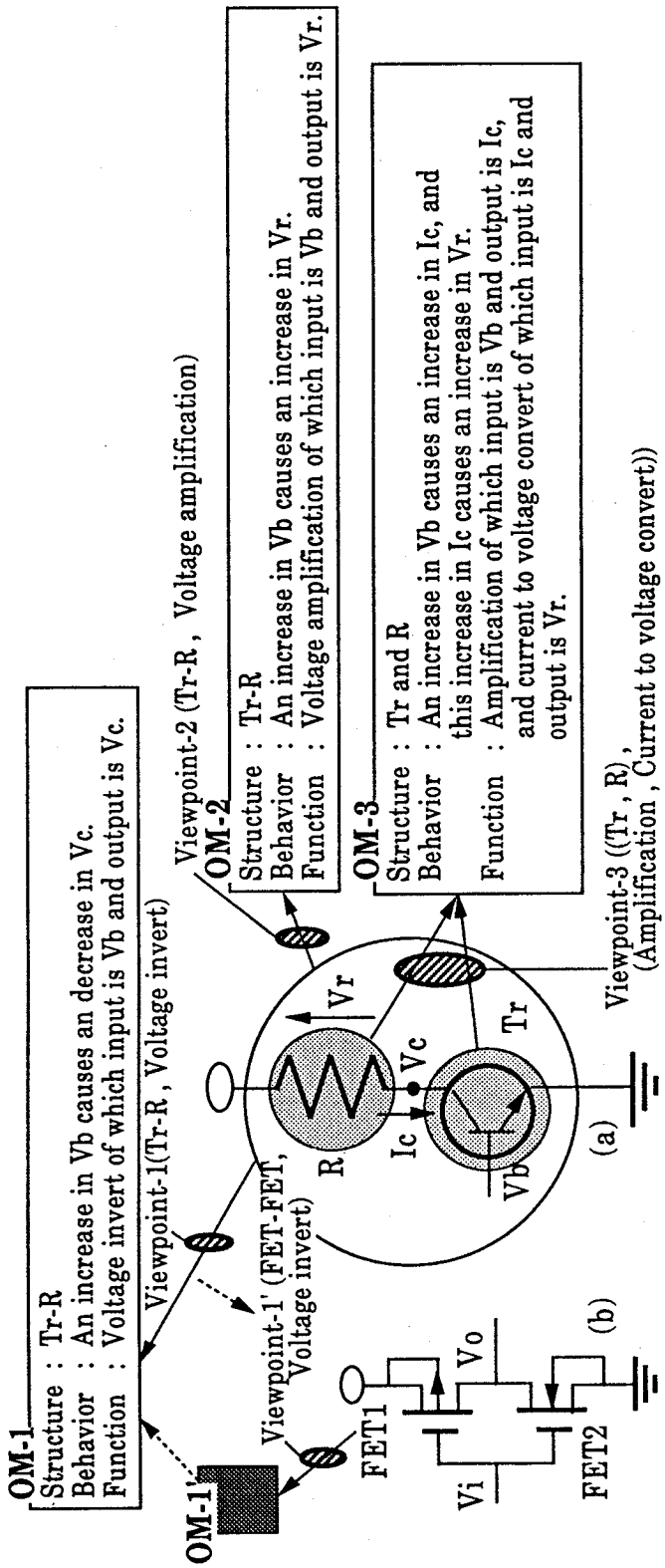


図 3.3 広義の対象理解と対象モデルの関係

る機能を固定したまま構造を変化させるものと、機能、構造をis-a関係にある別の機能、構造に変更するものであり、これによる対象理解を「既知の対象による対象理解」と呼ぶ。

例えば、図3.3(a)の電気回路におけるTrとRをひとまとまりの構造(Tr-R)として捉えたまま、異なる機能ごとの各視点(Viewpoint-1,2)から対象モデル(OM-1,OM-2)を生成することが「機能の変更による対象理解」である。また、構造、機能を全体として捉えたり(Viewpoint-2)、部分的な構造、機能に分解して捉える(Viewpoint-3)といった詳細度の異なるいくつかの視点から対象モデル(OM-2,OM-3)を生成することが「グレインサイズの変更による対象理解」である。また、図3.3において回路(a)に対する視点(Viewpoint-1)を、回路(a)と機能的に関係のある既知の回路(b)に対する視点(Viewpoint-1')に変更し、さらに変更した視点から得られる対象モデル(OM-1')を対応づけることによって間接的に回路(a)の対象モデル(OM-1)を生成することが「既知の対象による対象理解」である[1]。

以下では、これらの対象理解における、視点に基づく対象モデルの生成、視点の変更による対象モデルの変化について考察する。この考察を行う一つの手段として、振舞いの説明が考えられる。これは、振舞いの説明が視点の変化や視点に基づく対象モデルの生成を反映していると考えられるためである[佐伯85]。

[狭義の対象理解]

狭義の対象理解では、対象モデルを生成するために構造、機能の知識から振舞いを導くことが必要である。振舞いを導く場合、構造上のいくつかの属性のうち入出力となる属性を選択し、それらの因果的関係を捉える必要がある。このような入出力属性の選択と因果的関係は、視点を構成する機能によって規定される。例えば、図3.1の電気回路の構造を電圧増幅の機能から捉えると入力はVb、出

[1]例では、機能を固定したまま構造を変化させる場合の既知の対象による対象理解を表している。

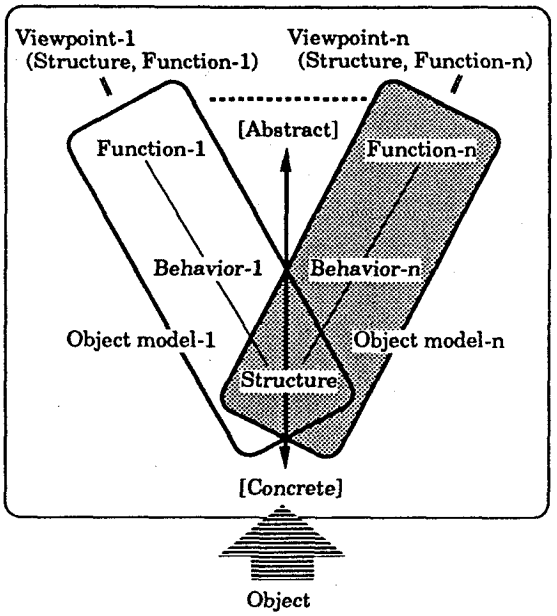


図 3.4 機能の変化による対象モデルの変化

力は Vr が選択され、さらに因果的関係は増幅の概念から「入力が増加すれば出力が増加する」となる。したがって、狭義の対象理解を行うためには、構造上のいくつかの属性から、機能に基づき入出力属性とそれらの因果的関係を捉えて振舞いを導く必要がある。

[広義の対象理解]

・機能の変更による対象理解

視点のうち機能だけを変更すると、振舞いの説明が変化する。これは、入出力属性の選択と因果的関係が、機能によって変化するためである。例えば、図 3.1 の電気回路を電圧増幅の機能から捉えると、振舞いの説明は (E2) になる。一方、電圧反転の機能から捉えると、入力は Vb、出力は Vc が選択され、さらに因果的関係は反転の概念から「入力がある一定以上（以下）になれば出力がある一定

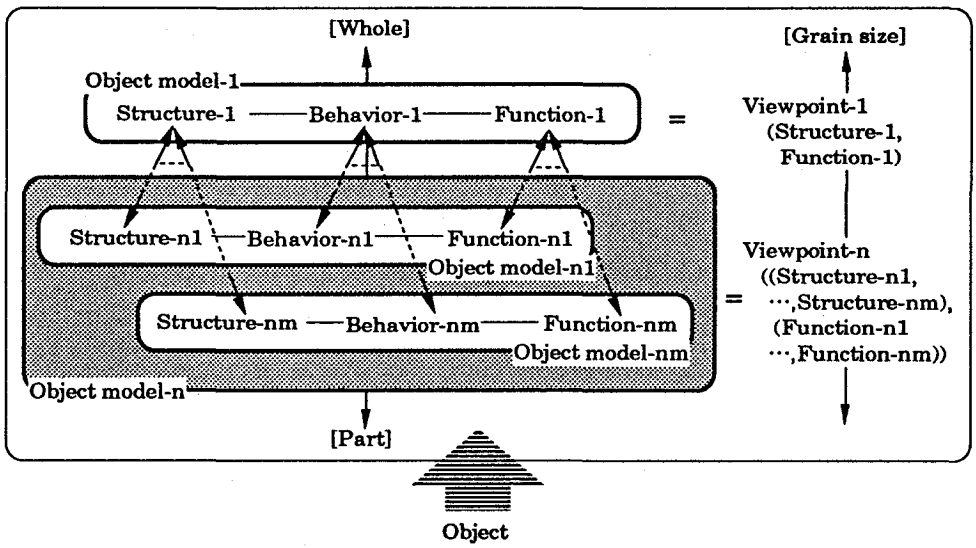


図 3.5　視点のグレインサイズの変化による対象モデルの変化

以下（以上）になる」となり、振舞いの説明は (E4) になる。これらの説明は、視点のうち構造が固定でも機能を変更すると、生成される対象モデルが変化することを反映している。図 3.4 に、機能の変更による対象理解によって得られるいくつかの対象モデルの関係を示す。

・グレインサイズの変更による対象理解

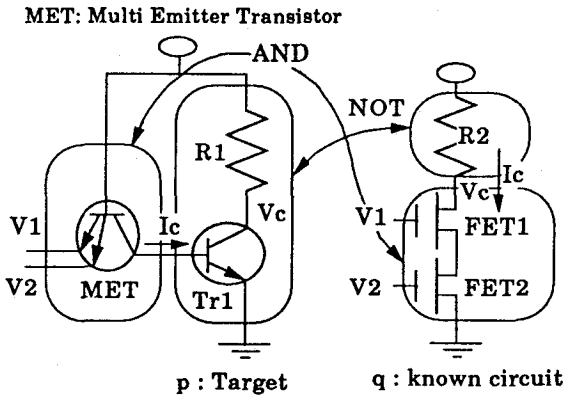
視点を構成する機能、構造のグレインサイズを変更すると、説明される振舞いの詳細度が変化する。グレインサイズとは、全体の機能、構造に対する部分的な機能、構造の大きさである。例えば、図 3.1 の電気回路を電圧増幅の機能から捉えて、さらに Tr、R をひとまとまりの構造として捉えると振舞いの説明は (E2) となる。一方、回路の機能を増幅と電流電圧変換の二つの部分的な機能からなるものとして捉え、構造を Tr、R の二つの部分的な構造からなるものとして捉えると振舞いの説明は (E5) となる。これらの説明から、視点のグレインサイズが小

さくなるほど、得られる振舞いの詳細度が高くなるといえる。これは、視点のグレインサイズを変更すると得られる対象モデルの詳細度が変化することを反映している。図 3.5 に、この対象理解によって得られるいくつかの対象モデルを示す。図3.5からも分るように、あるグレインサイズでの対象全体に対する対象モデル(Object model-n)は部分的な各対象モデル(Object model-n1…Object model-nm)の集成(aggregation)として表現することができる。また、一つの対象に対する構造、振舞い、機能は、part-of 階層構造を構成すると見なすことができる。

・既知の対象による対象理解

ある視点に基づき対象から対象モデルを生成する場合、その対象と関係のある既知の対象の対象モデルを対応づけて行うことができる。本論文では、機能に基づく対応づけを考え、既知の対象として類似な対象と一般化された対象を取り上げる。図 3.6 (a) の p、q の電気回路は、ともに電圧値を論理値と考えて入力電圧の NAND をとる機能を有する。このように、機能が同一で構造が異なる対象を類似な対象と呼ぶ。また、図 3.7 (a) の s、g の電気回路は、s がバイアス付加による電圧増幅の機能を持ち、g が s の機能を一般化した電圧増幅の機能を持つ。さらに、各機能の差異が R1 として構造上に現れている。このように、機能が一般化され、機能の差が構造上の差として明示的に現れる対象を一般化された対象と呼ぶ。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。一般化の関係にある二つの対象の各抽象レベル間の関係は、一般化された対象が部分となる part-of の関係にある。

類似な対象を用いて理解すべき対象を説明する場合、個々の対象に共通の機能によって構造、振舞いの対応づけが行われる。例えば、図 3.6 (b) に対応づけの説明を示す。このような説明は、図 3.8 (a) に示すような対象モデルの生成を反映していると考えられる。まず、理解すべき対象に対して設定された視点(Viewpoint-p) のうち機能を固定したまま構造だけを既知の対象の構造 (Structure-q) に

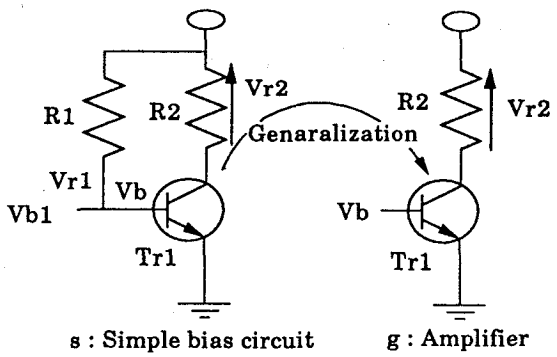


(a)

p の回路と類似な回路として電圧値のNAND をとる機能を持つ q の回路を考えることができる。NAND 機能はAND, NOT の 2 つの機能から構成される。各回路の対応関係は、AND の機能を有する q のFET1, FET2 からなる構造が p のMET に対応し、NOT の機能を有する q のR2 が p のR1, Tr1 からなる構造に対応する。……

(b)

図 3.6　類似な対象を用いた説明

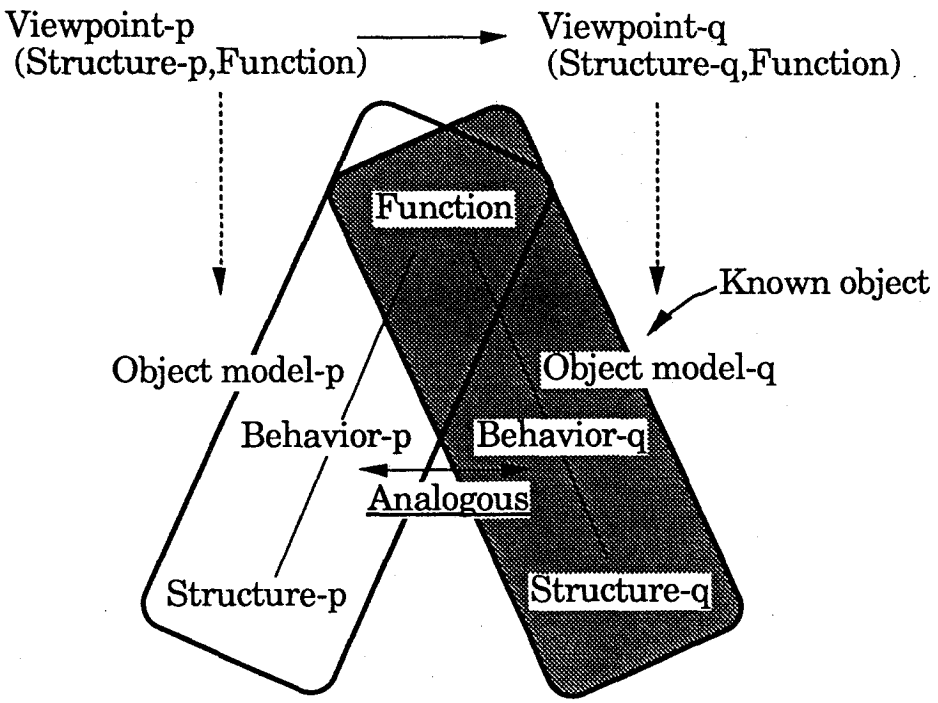


(a)

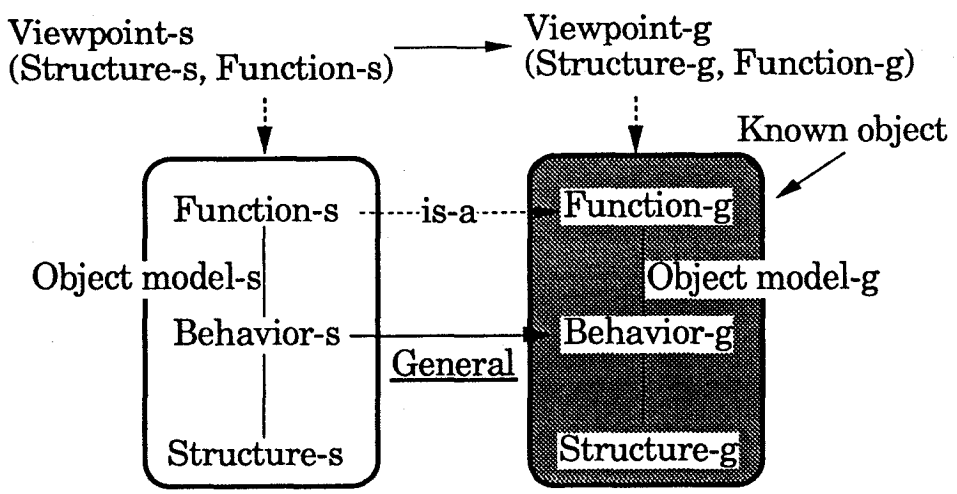
s の回路を一般化した回路としてVb をVr2 として電圧増幅する機能を持つ g の回路を考えることができる。s のTr1, R2 からなる構造は、g と同様の機能を持ち、Vb が増加するとVr2 が増加する。s, g の構造の差はR1 である。R1 は、Vb1 にバイアス電圧を付加するために、Vccから電圧Vr1 を生成する。s は、Vb1 にバイアス電圧Vr1 を付加したVb をVr2 として電圧増幅する機能を持つ。……

(b)

図 3.7　一般化された対象を用いた説明



(a) Generation by using an analogous object



(b) Generation by using a generalized object

図 3.8 既知の対象による対象モデルの生成

変更し、変更した視点 (Viewpoint-q) から対象モデル (Object model-q) が生成される。そして、機能に基づき、既知の対象の構造と振舞い (Behavior-q) の入出力属性、因果的関係を理解すべき対象に対応づけることによって、対象モデル (Object model-p) が生成される。このような対応づけは、いくつかのグレインサイズで考えることができるが、サイズの小さい部分では対応づけができない場合がある。これは、類似な対象でも、構造の part-of 階層構造の構成が異なるためである。このような場合でも、サイズの大きい部分での対応づけによる対象モデルの生成を扱うことができる。

一般化された対象を用いて理解すべき対象を説明する場合、is-a 関係にある二つの機能によって、各対象の構造、振舞いの対応づけが行われる。例えば図 3.7 (b) に対応づけの説明を示す。このような説明は、図 3.8 (b) に示すような対象モデルの生成を反映している。まず、理解すべき対象に対して設定された視点 (Viewpoint-s) を、機能の is-a 関係により一般化された機能 (Function-g)、構造 (Structure-g) に変更し、その視点 (Viewpoint-g) から既知の対象に対する対象モデル (Object model-g) が生成される。生成された対象モデルは、理解すべき対象に対する部分的な対象モデルになっている。この対象モデルを理解すべき対象に対応づけ、二つの対象の差異部分に対する部分的な対象モデルを考えることにより、理解すべき対象全体に対する対象モデル (Object model-s) が生成される。

EXSEL/I では、一つの対象に対する理解を、以上のように狭義の対象理解と三種類に分類した広義の対象理解の合わせて四種類に分類し、それぞれの理解に必要な知識の獲得を教育目的としている。

3.3 説明の分類

一つの対象に対する対象理解に必要な知識の獲得を支援するための説明は、各対象理解ごとに四つのタイプに整理される。これらを説明タイプと呼ぶ。ここでいう支援とは、視点に基づいて対象から対象モデルを生成する場合に対するものであり、設計などの実際の問題に対して対象モデルを生成する場合までは考慮していない。本節では、各説明タイプを考察することによって、説明タイプごとの説明構造を明らかにする。

3.3.1 抽象 - 具体関係に基づく説明 ACE

狭義の対象理解を支援するためには、視点を与える構造、機能の説明が不可欠である。さらに、どの構造をどの機能から捉えた場合の振舞いであるのかといった構造、振舞い、機能を関連づけた説明が必要である。本研究では、これらの三つの抽象レベルの関係を抽象 - 具体関係と呼び、各抽象レベルと抽象レベル間を関連づけた説明を抽象 - 具体関係に基づく説明、ACE (Abstract-Concrete relation based Explanation) と呼ぶ。このような ACE を行うためには、視点から得られる対象モデルが説明構造として必要となる。

3.3.2 機能に基づく説明 FBE

機能の変更による対象理解の支援において、視点の変更を支援するためには、一つの構造が持つ複数の機能についての説明が必要である。また、ある機能を決めてからの対象モデルの生成支援には、その機能と構造、振舞いを関連づける ACE が必要である。本研究では、一つの構造の持つ複数の機能の説明と各機能ごとの ACE を、機能に基づく説明、FBE (Function Based Explanation) と呼ぶ。FBE は、設計などの様々な問題における対象の理解能力の向上を支援する上で有効である。例えば、設計問題においてある構造がどのような機能を果たせるかを判断

するために機能を様々に変更し、それぞれの機能から振舞いを捉えるといった場面における理解能力の向上を支援することができる。FBE を行うためには、図3.4に示すような一つの構造を複数の機能から捉えた場合に得られる複数個の対象モデルが説明構造として必要となる。

3.3.3 全体 - 部分関係に基づく説明 WPE

グレインサイズの変更による対象理解の支援において、視点の変更を支援するためには、構造、機能を部分的な構造、機能に分解したり、部分的な構造、機能を集成するといった異なるグレインサイズを関係づける説明が必要である。また、あるグレインサイズでの視点に基づく対象モデルの生成支援には、そのサイズでの ACE が必要である。本研究では、異なるグレインサイズの関係を全体 - 部分関係と呼び、グレインサイズの異なる構造、振舞い、機能を関係づける説明と各サイズでの ACE を、全体 - 部分関係に基づく説明、WPE (Whole-Part relation based Explanation) と呼ぶ。WPE は、例えば故障診断において、大きなグレインサイズから順にサイズを細かくし、さらに各サイズで振舞いを捉えて故障を診断するといった場面における、対象の理解能力の向上を支援する上で有効な説明である[Bylander 85]。WPE を行うためには、図3.5に示すようないくつかのグレインサイズでの対象モデルとサイズの異なる対象モデルの関係づけを表現したものが説明構造として必要である。

3.3.4 既知の対象に基づく説明 CBE

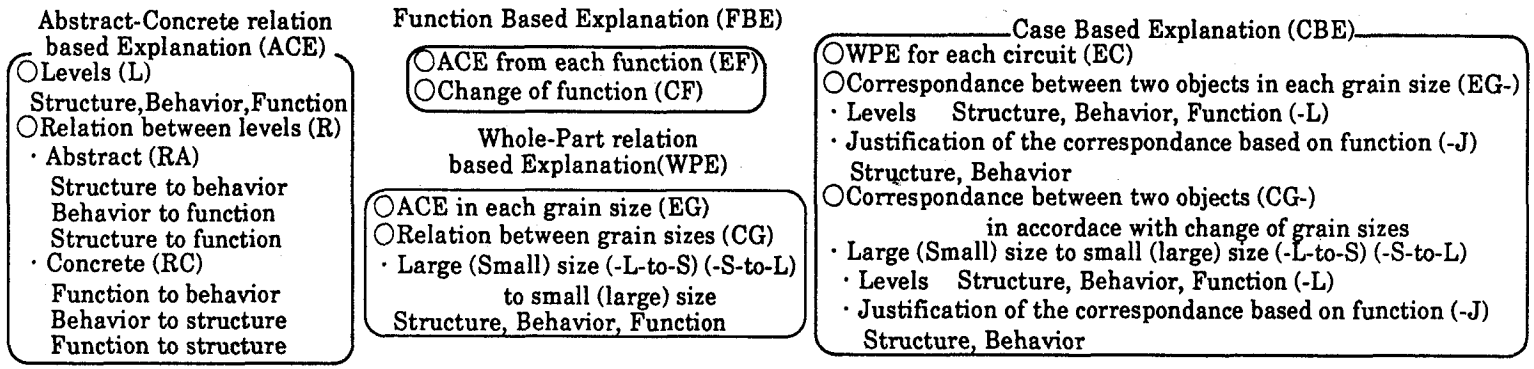
既知の対象による対象理解の支援において、視点の変更を支援するためには、各対象の機能の関係とそれに基づいて対応づけられる既知の対象の構造を説明する必要がある。また、変更した視点による間接的な対象モデルの生成支援には、機能に基づき各対象の構造、振舞いを対応づける説明が必要である。本研究で

は、各グレインサイズにおける既知の対象と説明すべき対象に対する各視点の関係や機能に基づく各対象の構造、振舞いの対応関係の説明、ならびに各対象におけるグレインサイズの変更の対応関係に関する説明を、既知の対象に基づく説明、CBE (Case Based Explanation) と呼ぶ。特に、類似な対象による CBE を CBE-a (CBE-analogy)、一般化された対象による CBE を CBE-g (CBE-generalization) とする。CBE は、例えば設計問題で設計対象の構造が、ある機能を実現できるかを判断するとき、類似な対象を用いて設計対象の振舞いを捉えたり、また構造の複雑な対象における故障を診断するとき一般化された対象を用いて複雑な対象の振舞いを概略的に捉えるといった場面における、対象の理解能力の向上を支援する上で有効な説明である。CBE を行うためには、説明すべき対象と既知の対象の対象モデルをいくつかのグレインサイズで対応づけたものが説明構造として必要である。

説明タイプをまとめると、図 3.9(a) のようになる。また、図 3.9 (b) に各説明タイプの例を示す。各説明タイプは、さらに細分化されたいくつかの説明を含んでいる。細分化された個々の説明を説明プリミティブと呼ぶ。一つの対象に対する説明プリミティブは、合計 31 種類になっている。各対象理解に対する支援には、対応する説明タイプに含まれる説明プリミティブが用いられる。これは、一つの教育目的の達成に複数の説明を用いることができることを意味している。

3.4 説明構造生成・利用機構の設計・開発方針

EXSEL/I は、図 3.9(a) に示す説明に対する説明構造を計算機上で表現する方法を提供し、さらに LEIEC からの要求に合わせて説明構造を生成、利用する枠組みを実現している。図 3.10 に EXSEL/I の構成を示す。



(a) Explanation types

(b-1) この回路を電圧増幅の機能から捉えると、電圧Vb が増加すると電圧Vr が増加する。
（図 3.1 に対するACE：機能から振舞い）

(b-2) この回路は電圧増幅の機能の他に、入力を電圧 Vb、出力を電圧 Vc とする電圧反転の機能から捉えることができる。（図 3.1 に対するFBE：機能の変更）

(b-3) ”電圧Vb が増加すると電圧Vr が増加する”は、電圧Vb が増加すると電流Ic が増加し、電流Ic の増加により電圧Vr が増加することを意味する。（図 3.1 に対するWPE：振舞いに関するグレインサイズの縮小）

(b-4) ”AND の機能により，回路p のMET は回路q の二つのMOS-FET に対応する。
（図 3.6 に対するCBE：特定のグレインサイズにおける構造の対応関係に対する機能からの妥当性）

(b) Examples of explanation types

図 3.9　説明の整理

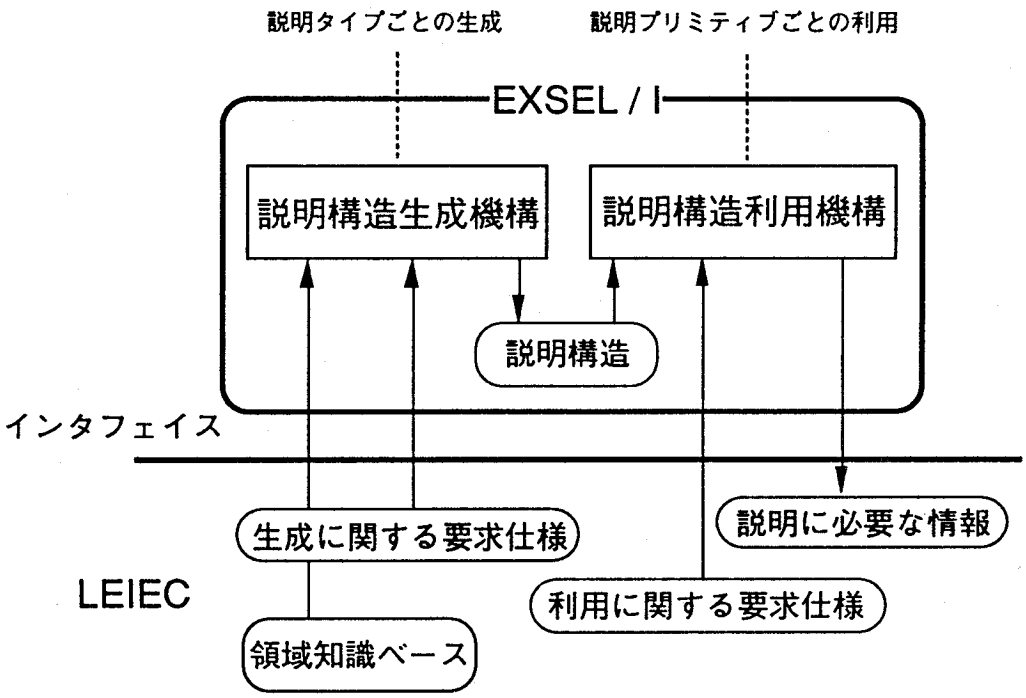


図 3.10 EXSEL/Iの構成

説明構造生成機構では、LEIEC から指定された教育目的に応じて、その教育目的の達成に用いられる説明タイプに対する説明構造を領域知識を用いて生成する。図 3.11(a) に LEIEC から与えられる説明構造の生成に関する要求仕様を示す。この仕様には、どの教育目的を達成するための、どの視点から（あるいはどの既知の対象を対応づけて）の説明であるかが記述される。教育目的には、分類した対象理解のいずれかが指定される。具体的には、それを達成するための説明タイプが記述される。

説明構造利用機構では、LEIEC から要求された説明プリミティブに必要な情報を、生成されている説明構造から抽出する。図 3.12(a) に LEIEC から与えられる説明構造の利用に関する要求仕様を示す。この仕様には、どの機能（グレインサイズまたは対象）からの説明プリミティブかが記述される。

(a) (教育目的［説明タイプ］　視点　既知の対象)

(b) ([ace or fbe]
((Structure-Unit1 … Structure-Unitn)
((Function-Unita1 … Function-Unitan)
……
(Function-Unitm1 … Function-Unitmn)))
nil)

(c) (wpe (Structure-Unit Function-Unit) nil)

(d) ([cbe-a or cbe-g] (Structure-Unit Function-Unit)
Known-Structure-Unit)

図 3.11　説明構造生成のための要求仕様

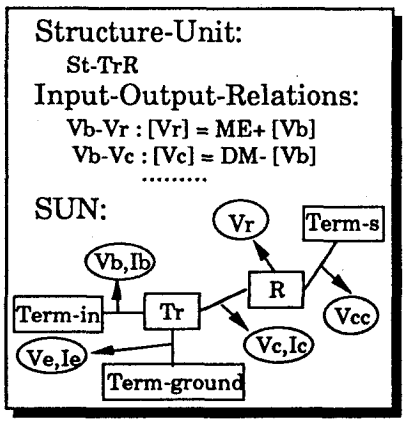
(a)	(説明プリミティブ	機能	グレインサイズ	対象)
(b)	(ACE-primitive	nil	nil	nil)
(c)	(FBE-primitive	Function-Unit	Size	nil)
(d)	(WPE-primitive	nil	Size	nil)
(e)	(CBE-primitive	nil	Size	Structure-Unit)

図 3.12　説明構造利用のための要求仕様

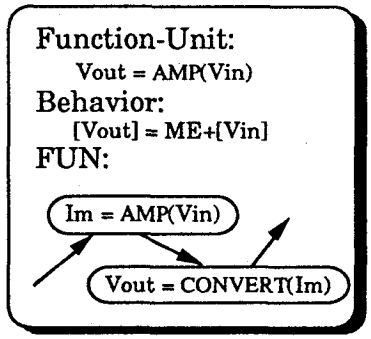
3.5 説明構造表現

EXSEL/I では、構造フレーム、機能フレームを記述言語として説明構造を表現している。構造フレームは構造とその構造上での振舞いを表現し、機能フレームは機能と機能に対応する振舞いを表現する。

構造フレームは、構造単位、構造における入出力属性の対とそれらの因果的関係、構造単位ネットワーク（Structure Unit Network, SUN と略す）から構成される。図 3.13 (a1)、(a2) に図 3.1 の電気回路に対する構造フレームとその具体的な表現法を示す。構造単位は、構造フレームが表現する構造の名前を表す記号であ



(a1) Structure frame



(b1) Function frame

```
((Structure-Unit  St-TrR)
 (I-O-Relations ((Vb Vr ME+)
                 (Vb Vc DM-)
                  ......... ))
 (SUN (Tr (Term-in  (Vb Ib))
          (Term-ground  (Ve Ie))
          (R         (Vc Ic)))
      (R  (Tr (Vc Ic))
          (Term-s    (Vcc))
          (R  (Vr)))))
```

(a2) Representation by LISP

```
((Function-unit
          (Vin Vout AMP))
 (Behavior
          (Vin Vout  ME+))
 (FUN ( (Vin Im AMP)
        (Im Vout CONVERT))))
```

(b2) Representation by LISP

図 3.13 構造フレームと機能フレーム

る。入出力属性の対とそれらの因果的関係は、構造上における振舞いを表す。構造フレーム内では、構造上で可能な入出力属性の対を全て列挙している。電気回路を題材とした場合の入出力属性の因果的関係は、定性推論で用いられる、量子化された量の間の定性的な関係 [溝口 89] を示す記号により表現することができる。このような表現は、ある時間的な区間における振舞いの持続的な状態を表している。表3.1 に、電気回路に対して扱っている因果的関係を表す記号とその意味を示す。SUN は構造単位を構成する一つ小さなグレインサイズでの構造単位とそれらの結合関係を表すネットワークである。ノードは構造単位を表し、アークが結合関係を表す[2]。ノード、アークが持つ属性リンクは、ノードまたはノード

[2]図中の Term は回路の端子を表す特別なノードである。

表 3.1　電気回路を題材とした場合の入出力属性の因果的関係

記号	記号の意味
M+ [-]	入力が増加すると出力が比例的に増加［減少］する
ME+ [-]	入力が増加すると出力が 2 次関数的に増加［減少］する
ML+ [-]	入力が増加すると出力が無理関数的に増加［減少］する
DM+	入力がある一定以上（以下）になると出力がある一定以上（以下）になる
DMA+	全ての入力がある一定以上のときに限り出力がある一定以上になる
DMO+	いずれかの入力がある一定以上のときに出力がある一定以上になる
DM-	入力がある一定以上（以下）になると出力がある一定以下（以上）になる
DMA-	いずれかの入力がある一定以下のときに出力がある一定以上になる
DMO-	全ての入力がある一定以下のときに限り出力がある一定以上になる

間に存在する構造上の電圧、電流などの属性を表す。

機能フレームは、機能単位、機能に対する振舞い、機能単位ネットワーク（Function Unit Network,FUNと略す）から構成される。図 3.13 (b1)、(b2) に電圧増幅の機能を表す機能フレームとその具体的な表現法を示す。機能単位は、機能フレームが表現する機能であり、入出力属性とそれらの因果的関係に対する目的を表す概念からなる関数として表現される。機能に対する振舞いは、構造フレームでの振舞いと同様に表現される。機能単位、振舞いの入出力属性は、構造に依存しない一般的な表現で記述している。FUN は機能単位を構成する一つ小さなグレインサイズでの機能単位とそれらの結合関係を表すネットワークである。ノードが機能単位を表し、アークが結合関係を表す。アークの方向は、各機能単位における入出力属性の伝搬方向を表す。

また、EXSEL/I では類似な対象、一般化された対象の関係を機能単位、構造単位を用いて表現している。類似な対象の関係は、一つの機能単位に対してその機能単位を実現するいくつかの構造単位をリンクして表現される。また、一般化さ

れた対象の関係はis-a関係にある機能単位をis-aリンクで結合し、各機能単位にそれを実現する構造単位をリンクして表現される。

EXSEL/Iでは、以上の枠組みにより説明構造生成に必要な知識を表現する知識ベースを構成している。構造・機能フレームは、知識ベースにクラスとして用意されており、EXSEL/Iはこれらのクラスのインスタンスを用いて説明構造を生成する。

3.6 説明構造生成機構

説明構造生成機構では、あらかじめ用意された知識ベースから要求仕様に応じて必要な知識を選び出して説明構造を生成する枠組みを実現している。

以下では、各説明に対する説明構造の記述、生成に必要な要求仕様、ならびに生成方法について述べる。

3.6.1 基本構造

説明構造を記述する基本的な単位は、構造フレームとそれに対応する機能フレームを、構造フレームから抽出した振舞いによって結びつけたものである。このような単位を基本構造と呼ぶ。基本構造は、それに含まれる構造単位と機能単位が示す構造、機能を視点として得られる対象モデルの生成を支援するときに用いる説明構造を表す。ACE、FBE、WPE、CBEの説明構造は、基本構造の組み合わせとして表現される。EXSEL/Iは、機能フレーム中の振舞いに基づき構造フレームから入出力属性の対とそれらの因果的関係を抽出し、各フレームを対応づけて基本構造を生成する。

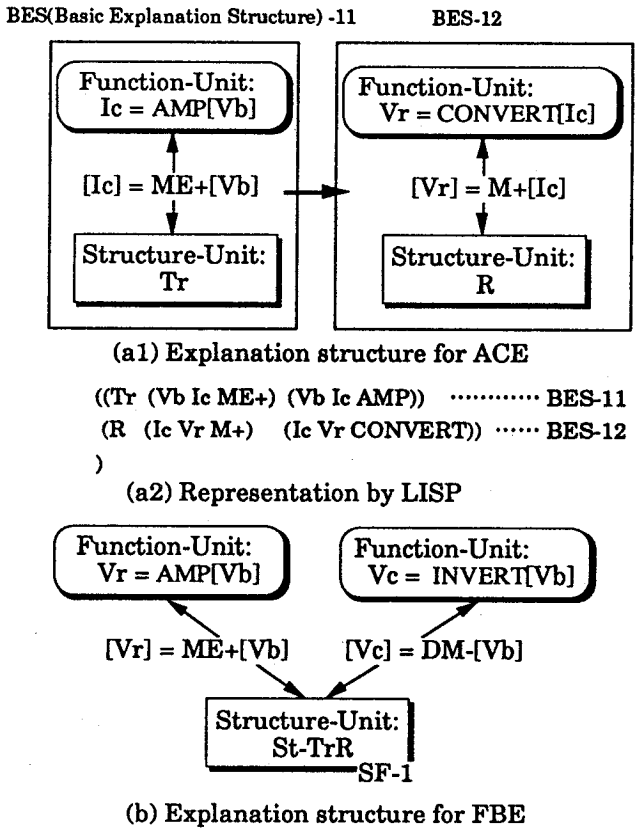


図 3.14　ACE、FBE のための説明構造

3.6.2 ACE 、FBE の説明構造

［説明構造の記述］EXSEL/I では、あるグレインサイズでの部分的な各構造に対する各基本構造を部分的な各機能のつながりに基づき結合することによってACEの説明構造を表現している。また、一つの部分的な構造群に対する複数の機能群から得られる複数個の ACE の説明構造により FBE の説明構造を表現している。図 3.14 (a1)、(a2) [3]は図 3.1 の電気回路を Tr、R の二つの部分的な構造から構成されていると捉えた場合の ACE の説明構造とその具体的な表現法である。ま

[3]図 3.14、図 3.15、図 3.16 では、構造フレームの Input-Output-Relations、SUN、機能フレームのBehavior、FUN、を省略している。説明構造を構成する構造フレーム・機能フレームは、構造単位・機能単位をインデックスとして参照される。

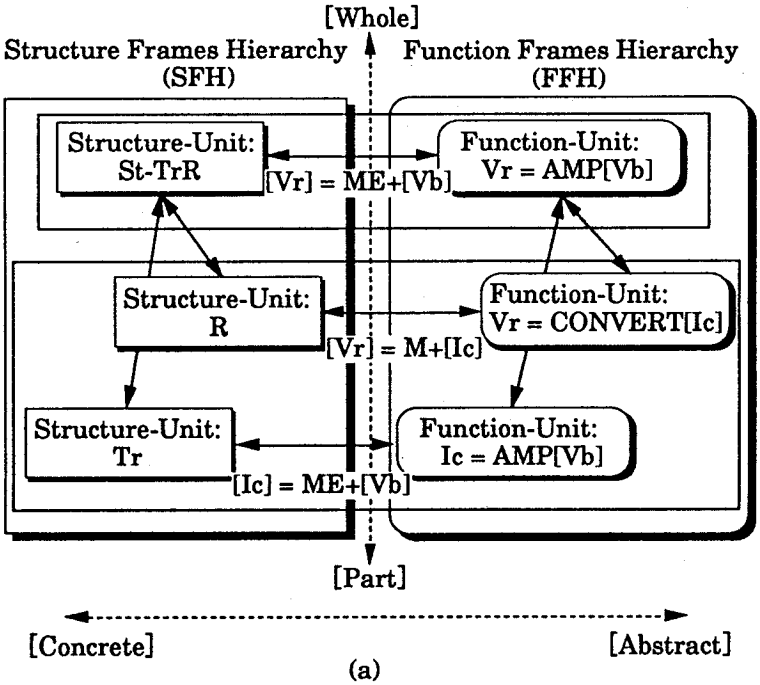
た、(b) は図 3.1 の電気回路を電圧増幅、電圧反転の機能から捉えた場合の FBE の説明構造である。このような説明構造により、ACE 、FBE が可能となる。例えば、図 3.14 (a1) から「Trでは Vb が増加すると Ic が増加し、R では Ic が増加すると Vr が増加する。」、(b) から図 3.9 (b-2) などの説明が可能である。

［要求仕様］図 3.11(b) に ACE 、FBE の説明構造を生成するための要求仕様を示す。要求仕様における第2引数の第1要素は、要求されたグレインサイズでの部分的な構造群を表す。部分的な各構造の記述は、構造単位と同一の形式である。第2引数の第2要素は、要求された部分的な構造群に対する部分的な機能群を表す。機能群の記述は、FUN と同一の形式であるが、入出力属性は構造に依存したものとなる。FBE を要求する場合は、複数個の機能群を記述する。例えば、図 3.14 (a1)、(b) の説明構造の要求仕様は、それぞれ (ace ((Tr R) (((Vb Ic AMP) (Ic Vr CONVERT)))) nil)、(fbe ((St-TrR) (((Vb Vr AMP)) ((Vb Vc INVERT)))) nil) となる。

［説明構造の生成機構］要求仕様における第2引数の部分的な各構造、各機能をそれぞれインデックスとして知識ベースから対応する構造フレーム、機能フレームを選択し、それぞれのインスタンスを生成する。そして、生成した各機能フレーム中の入出力属性を要求仕様の入出力属性で置換する。次に、各構造フレーム、各機能フレームを総当り的に対応づけ、各基本構造を生成する。さらに、生成した各基本構造を振舞いにおける入出力属性の因果的つながりに基づき結合することによって、ACE の説明構造を生成する。FBE の説明構造は、以上の処理を機能群ごとに繰り返すことによって得られる。

3.6.3 WPE の説明構造

［説明構造の記述］EXSEL/I では、最大のグレインサイズからそれぞれ ACE の説明構造を表現し、異なるサイズでの構造・機能フレームをリンクすることによって WPE の説明構造を表現している。グレインサイズ間のリンクは、より大



(a)

((St-TrR (Vb Vr ME+) (Vb Vr AMP))
(Tr (Vb Ic ME+) (Vb Ic AMP)) (R (Ic Vr M+) (Ic Vr CONVERT)))

(b)

図 3.15 WPEのための説明構造

きいサイズにおける構造フレーム、機能フレームのSUN、FUNによって表現される。このように、WPEの説明構造は構造フレーム、機能フレーム、さらに振舞いのpart-of階層構造として捉えることができる。図3.15(a)、(b)に図3.1の電気回路を電圧増幅の機能から捉えた場合のWPEの説明構造とその具体的な表現法を示す。このような説明構造によって、WPEが可能となる。例えば、図3.15から「Vbにより Icを増幅する機能と増幅されたIcをVrに変換する機能は、VbをVrとして電圧増幅する機能を構成する。」や図3.9(b-3)などの説明が可能である。

［要求仕様］図 3.11(c) に WPE の説明構造を生成するための要求仕様を示す。要求仕様における第2引数の第1、2要素は、それぞれ要求された対象に対する最大のグレインサイズでの構造、機能を表す。例えば、図 3.15 の説明構造のための要求仕様は、(wpe (St-TrR (Vb Vr AMP)) nil) となる。

［説明構造の生成機構］要求仕様の第2引数の構造、機能をインデックスとして知識ベースから対応する構造フレーム、機能フレームを選択してインスタンスを生成する。そして、3.6.2 と同様に最大のグレインサイズでの ACE の説明構造を生成する。さらに、最大のサイズの構造フレーム、機能フレームにおけるSUN、FUN から構造単位群、機能単位群を取り出す。そして、取り出した構造単位群、機能単位群を ACE の説明構造に対する要求仕様と考えて、一つ小さいグレインサイズでの ACE の説明構造を生成する。以下、SUN が構造フレームに存在しなくなるまでトップダウン的に各サイズにおける ACE の説明構造の生成を繰り返す。

3.6.4 CBE の説明構造

［説明構造の記述］EXSEL/I では、各対象の WPE の説明構造を対応づけ可能なグレインサイズまで対応づけることにより、CBE-a の説明構造を表現している。また、一般化の関係にある二つの対象が全体 - 部分関係にあることから、CBE-g の説明構造は説明すべき対象に対する WPE の説明構造として表現している。CBE-g の説明構造の記述、生成法は、WPE と同様であるため本論文では省略する。図 3.16 に、図 3.6 の二つの電気回路に対する CBE-a の説明構造を示す。このような説明構造によって CBE-a が可能となる。例えば図 3.16 から図 3.9 (b-4) に示す説明が可能である。

［要求仕様］図 3.11(d) に CBE の説明構造を生成するための要求仕様を示す。要求仕様の第2引数は、WPE の説明構造を生成するための要求仕様と同様である。第3引数は、対応づける既知の対象に対する最大のグレインサイズでの構造

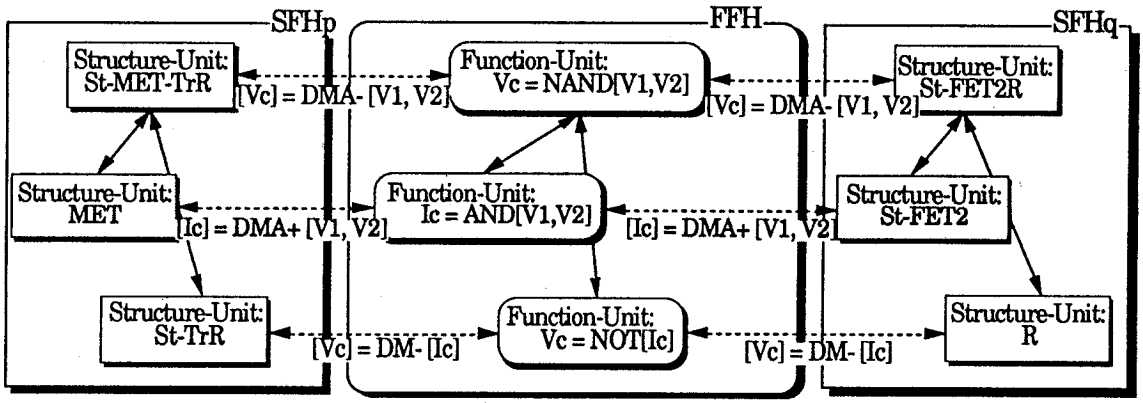


図 3.16　CBE-aのための説明構造

を表す。指定されない場合は、EXSEL/I が知識ベースから第２引数で指定された構造と類似、または一般化の関係にある構造を選択する。例えば、図 3.16 の説明構造のための要求仕様は、(cbe-a (St-MET-TrR ((V1 V2) Vc NAND)) St-FET2R) となる。

［説明構造の生成機構］第１引数が cbe-a の場合、類似な構造と要求された機能から3.6.3 での方法で類似な対象のための WPE の説明構造を生成する。次に、生成した説明構造のうち機能フレームの階層構造に対して、第２引数で指定された構造に対応する構造フレームをトップダウン的に対応づける。対応づけは、両方の構造フレームの階層構造が対応づくグレインサイズまで行い、対応づけができない部分は取り除く。図 3.16 では、St-FET2、((V1 V2) Ic AND) より小さいサイズの部分が取り除かれている。EXSEL/I では、このように CBE-a の説明構造を生成するため、二つの対象の説明構造を個々に生成するよりも効率的な生成を実現している。

3.7 説明構造利用機構

説明構造利用機構では、説明構造生成機構で生成された説明構造から、要求された説明プリミティブに必要な情報を抽出する。以下では、各説明タイプごとの説明構造の利用方法について述べる。

3.7.1 ACE のための利用

［要求仕様］図3.12(b) に ACE を得るための要求仕様を示す。要求仕様には、第1引数の説明プリミティブだけが指定される。説明プリミティブは、図3.9 に示すように各説明プリミティブを表す記号によって記述される。例えば、(Structure nil nil nil) は構造に関する説明を要求する仕様となる。

［説明構造の利用］ACE の生成に必要となる操作には、(1) 抽象レベルの抽出、(2) 抽象レベル間の抽出、がある。

・抽象レベルの抽出

要求仕様の説明プリミティブで指定された抽象レベルの表現を説明構造から抽出する。抽象レベルが構造の場合は、説明構造を構成するすべての構造フレームから構造単位を取り出す。機能の場合は、すべての機能フレームから機能単位を取り出す。振舞いの場合は、構造フレーム、機能フレームをつないでいるすべての振舞いの表現を取り出す。機能、振舞いの取り出しの順序は、入出力属性の因果的つながりに基づく。

・抽象レベル間の抽出

説明プリミティブで指定された二つの抽象レベルを説明構造から取り出す。取り出す順序は、説明プリミティブに依存する。例えば、要求された説明プリミ

ティブがFunction-to-Behavior である場合機能単位を取り出し、次に振舞いの表現を取り出す。出力は、これらを要素とするリストによって表現される。

3.7.2 FBE のための利用

［要求仕様］図 3.12(c) に FBE を得るための要求仕様を示す。要求仕様の第 2 引数には機能が指定される。機能は、機能単位と同一の記述形式である。第 3 引数には、説明すべきグレインサイズが指定される。グレインサイズは数値で表現され、最大のサイズを 0 としてサイズが小さくなるほど数値が大きくなる。例えば、図 3.14(b) の説明構造から図 3.9(b-2) の説明を得るときの要求仕様は、(Change-of-Function (Vb Vr AMP) 0 nil) となる。

［説明構造の利用］FBE の生成に必要となる操作には、(1) 要求された機能からの ACE の生成、(2) 機能の抽出、がある。(1) については、要求仕様で指定された機能を視点とする説明構造に着目すれば、3.7.1 と同様の方法で必要な情報を取り出すことができる。このとき、説明プリミティブには FBE と ACE の二つの説明プリミティブが記述される。以下では、(2) についてのみ説明する。

・機能の抽出

説明構造を構成する各機能フレームから機能単位を取り出す。取り出す順序は、要求仕様で指定された機能に対する機能単位を取り出し、次にその他の機能フレームから機能単位を取り出す。出力は、各機能単位を要素とするリストで表現される。

3.7.3 WPE のための利用

［要求仕様］図 3.12(d) に WPE を得るための要求仕様を示す。要求仕様の第3引数にはグレインサイズが指定される。例えば、図3.15の説明構造から図3.9(b-3) の説明を得るときの要求仕様は、(LargeSize-to-SmallSize-Behavior nil 0 nil) となる。

［説明構造の利用］WPE の生成に必要となる操作には、(1) 特定のグレインサイズにおけるACE の生成、(2) 異なるグレインサイズ間の抽出、がある。(1) については、要求されたグレインサイズにおける説明構造に着目すれば、3.7.1 と同様の方法で必要な情報を得ることができる。このとき、要求仕様における説明プリミティブには、WPE と ACE の二つの説明プリミティブが指定される。以下では、(2) についてのみ説明する。

・異なるグレインサイズ間の抽出

要求仕様で指定されたグレインサイズを基準にして、関係づけるサイズを求める。すなわち、説明プリミティブが“グレインサイズ拡大”である場合基準のサイズより一つ大きいサイズを、“グレインサイズ縮小”である場合は基準のサイズより一つ小さいサイズを関係づけのサイズとする。次に、この二つのサイズにおいて説明プリミティブで指定された抽象レベルを 3.7.1 と同様の方法で取り出す。取り出す順序に関しては、サイズ拡大の場合は大きいサイズから、縮小の場合は小さいサイズから行う。出力は、取り出された抽象レベルの表現を要素とするリストにより表現される。

3.7.4 CBE のための利用

［要求仕様］図 3.12(e) に CBE を得るための要求仕様を示す。要求仕様の第4引数には CBE の説明構造を構成しているいずれかの対象が指定される。この対象

は、構造単位と同様の形式で記述される。例えば、図3.16の説明構造から図3.9 (b-4) の説明を得るときの要求仕様は、(EG-J[4]-S nil 1 nil) となる。

［説明構造の利用］CBEの生成に必要となる操作には、(1) 各対象ごとのWPEの生成、(2) 特定のグレインサイズでの対応関係の抽出、(3) グレインサイズ変更の対応関係の抽出、がある。(1) については、要求仕様で指定された対象に対するWPEの説明構造に着目すれば、3.7.3と同様の方法で必要な情報を得ることができる。以下では、(2)、(3) について説明する。

・特定のグレインサイズでの対応関係の抽出

要求仕様で指定されたグレインサイズにおける抽象レベルを、各対象の説明構造から3.7.1と同様の方法で取り出し、取り出した対象ごとの抽象レベル表現を要素とするリストを出力する。説明プリミティブがEG-Jである場合は、これらの処理の他に対応づけを保証している機能フレームの機能単位を説明構造から取り出す。

・グレインサイズ変更の対応関係の抽出

要求仕様で指定されたグレインサイズを基準として変更しようとするサイズを3.7.3と同様の方法で求める。次に、説明プリミティブが指定する抽象レベルを各対象ごとに3.7.3と同様の方法で取り出す。要求仕様の説明プリミティブがCG-J[5]である場合、これらの操作の他に、サイズ変更の対応関係を保証している各サイズにおける機能フレームの機能単位を取り出す。

---

[4] EG-J-(S) は、図3.9(a) CBEでの、特定のグレインサイズにおける抽象レベル（構造）の対応関係に対する機能からの妥当性の説明を表す。

[5] CG-Jは、図3.9 (a) CBEでの、グレインサイズ変更の対応関係に対する機能からの妥当性の説明を表す。

3.8 検討

EXSEL/I では、現在のところ五つの電気回路について構造フレーム・機能フレームを実際計算機上に記述して、これらの回路に対する説明の生成を確認しているが、回路に関する情報をこれらのフレームの形式で記述すればどのような回路に対する説明でも生成することができる。しかしながら、構造・機能フレームをどのように記述するかが重要な問題となる。そこで、本節ではこのような記述方法について検討する。また、説明構造の質および生成方法といった観点から、説明によって対象の理解を支援する従来の教育システムと EXSEL/I を比較し、EXSEL/I の位置づけを行う。

3.8.1 領域知識の記述方法

EXSEL/I を構築するためには、説明に必要な領域知識を構造・機能フレームの形式であらかじめ用意する必要がある。一般に、一つの対象は様々な視点から捉えることができ、また様々な既知の対象を対応づけることができる。しかしながら、教育的な観点からすれば可能な全ての説明を行うことは必ずしも必要ではない。したがって、EXSEL/I を構築する場合、対象に関して教育的に必要な説明を分析して、それに基づき構造・機能フレームを記述すればよいことになる。

構造・機能フレームを記述する上では、具体的な題材に応じて、基本的な入出力属性や因果的関係および機能を表す概念を準備する必要がある。また、構造フレームの振舞い・SUN が機能フレームの機能単位・FUN に依存して決まるため、機能フレームを設定して、それに合わせて構造フレームを記述する必要がある。しかしながら、このような記述は、一般に困難な作業である。例えば、以前定義した構造フレームをある部品として利用する場合、その部品の果たす機能に対して構造フレームが対応するかどうかを確認するために、構造フレームの振舞いを調べる必要がある。このような領域知識作成ツールの開発は、EXSEL/I の構

築を容易にする上で必要である。このツールの開発は、今後の課題である。

3.8.2 従来の教育システムとの比較

QUEST、STEAMER [Hollan 84] に代表される従来の教育システムでは、対象を理解する能力の向上や、対象の操作手続きの獲得を主たる教育目的として、説明を用いた教育支援が行われている。特に、定性的な理解に対する支援が重視されているため、定性的な説明が中心的に用いられている。このようなシステムにおける説明機能の多くは、定性推論などによる振舞いのシミュレーションを基盤としたものである。このような説明機能では、対象の操作の試行錯誤に対して振舞いの説明が可能であるため、学生にとって未知である対象がどのように振舞うかを教育する場合非常に有効となる。つまり、振舞いに関する知識の獲得や対象の操作手続きの獲得を支援する場合に有効となる。この場合、説明構造生成は定性推論によって行われ、推論結果が説明構造となる。一方、EXSEL/I では、従来のように振舞いのシミュレーションを実行する機能を持たないが、図3.9 に示すような一つの対象を様々な視点から捉えた場合の説明が可能となる。このような説明は、振舞いについての知識を既に獲得している学生に対して、その知識を視点に基づいて解釈させる教育に有効である。

次に、説明構造生成能力の観点から比較すると、EXSEL/I は定性推論のように領域に依存しない一般的な能力を追求せず、対象に依存した知識を用いて説明構造を生成している。しかしながら、定性推論をベースとした従来の教育システムでも、推論の結果いくつかの振舞いの候補があげられるなどの問題 [溝口 89] を解消するため、対象領域に依存したヒューリステックを導入している。つまり、教育的な立場からみれば、一般的な説明構造生成能力は必ずしも必要でないと考えられる。また、EXSEL/I が生成した説明構造から必要な情報を取り出して説明を生成する場合図表や自然言語文などの様々なインタフェイスを用いることによって、視点に基づく様々な形態の説明を生成することができる。例えば、図を

用いれば振舞いを視覚的に説明することもできる。すなわち、EXSEL/I は一つの対象に対して多種多様な説明を生成可能とするシステムとなっている。

以上のことを踏まえると、教育支援に用いることを前提とした場合、EXSEL/I は十分有用な説明機構であるといえる。

3.9 結言

本章では、構造・振舞い・機能の三つの抽象レベルで捉えることができる対象の理解支援を取りあげて、EXSEL/I の設計・開発について述べた。EXSEL/I は、(a) 視点および対象モデルによる対象理解の定式化と分類、(b) 対象理解の分類に基づく説明の整理、(c) 整理した説明の説明構造を生成・利用する機構の開発、によって使い分けに用いる個々の説明を生成する機能を実現している。特に、(a)・(b) を詳細に行うことによって、一つの対象に対して幅広い説明の生成を可能にしている。EXSEL/I は、SUN microsystems 社 SPARC station2 の Kyoto Common Lisp 上で稼働している。プログラムサイズは、約 3500 行となっている。

EXSEL/I から得られる説明の使い分けを行うためには、さらに EXSEL/I を運用し、学生に適切な説明を提示する機構が必要である。4 章では、このような機構として設計・開発を行った LEIEC/I について述べる。

第4章

LEIEC/I の設計・開発

4.1 緒言

説明を用いて効果的な知識伝達を行うためには、教育方法および学生の理解状態を考慮しながら適切に説明を使い分ける機構が不可欠となる。本章では、3章で述べた EXSEL/I から得られる説明を使い分ける機構を持った LEIEC/I について述べる。

LEIEC/I では、電気回路に対する広義の対象理解に必要な知識の獲得を教育目的としており、理解誘導および質問応答といった二つの教育方法のもとで、説明の使い分けを行う。理解誘導では、広義の対象理解ごとに誘導方法を整理しており、誘導木と呼ばれる手法を用いて説明タイプごとの使い分けを実現している。また、質問応答では、教育状況や学生の理解状態に関する情報を用いて学生からの質問を適切に解釈することによって、応答に用いる説明の使い分けを可能としている。特に、EXSEL/I から得られる説明が幅広いものであるため、LEIEC/I では一つの電気回路に対して変化に富んだ説明の使い分けが可能になっている。このような機能は、従来の教育システムにはないものであるが、教育行動の高度化にとって重要である。

関連発表論文　A-2, B-5, B-6, B-7, B-8, B-9, B-10, B-11

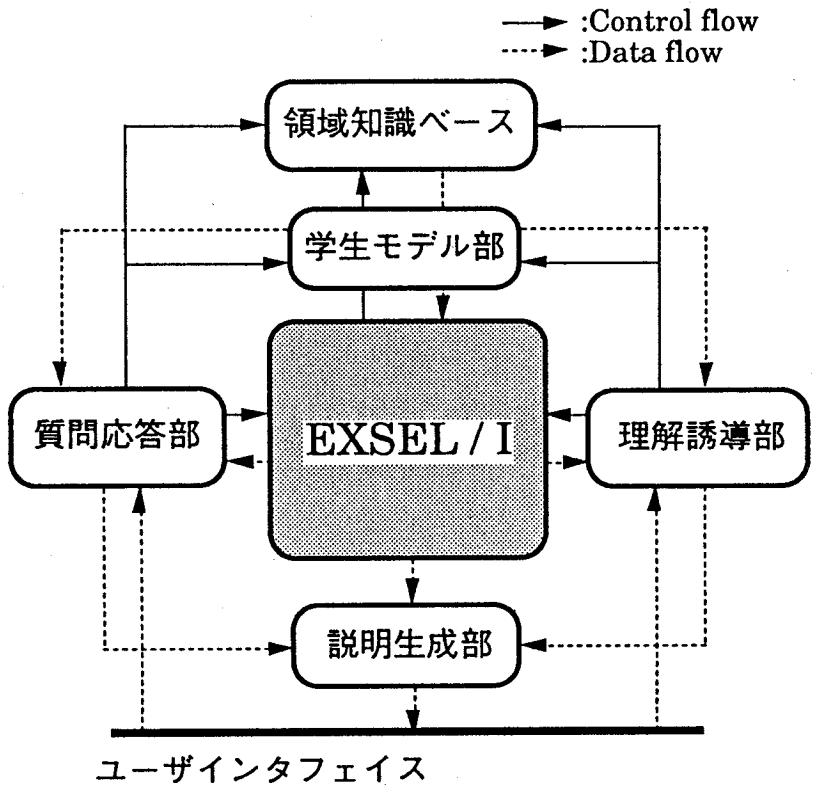


図 4.1 LEIEC/I のシステム構成

4.2 LEIEC/I の構成

図 4.1 に LEIEC/I の構成図を示す。EXSEL/I は、理解誘導部・質問応答部からの要求に応じて説明構造の生成および利用を行う。理解誘導部は、EXSEL/I を運用して学生の理解誘導に用いる説明を使い分けるモジュールである。質問応答部は、学生の質問に応じて EXSEL/I を運用し、応答のための説明を使い分けるモジュールである。学生モデル部は、理解誘導・質問応答に必要な学生の情報を提供・更新するモジュールである。領域知識ベースは、EXSEL/I が説明構造の生成に用いる知識（構造・機能フレーム）の他に、教育すべき電気回路に対する視点を記述している。説明生成部では、EXSEL/I から得られる説明構造の利用結果か

```
Object name: St-TrR
 Viewpoint-f : (St-TrR  (Vb Vc NOT))
               (St-TrR  (Vb Vr AMP))
 Viewpoint-g :
   for (St-TrR  (Vb Vc NOT))
       ((Tr  R)  ((Vb Ic SWITCH) (Ic Vc INVERT)))
   for (St-TrR  (Vb Vr AMP))
       ((Tr  R)  ((Vb Ic AMP) (Ic Vr CONVERT)))
 Viewpoint-k :
   for (St-TrR  (Vb Vc NOT))
       Analogy : St-FET-R, St-FET-FET   General : nil
   for (St-TrR  (Vb Vr AMP))
       Analogy : St-FET-R   General : nil
```

図 4.2　対象フレームの例

らテンプレートを用いた自然言語文による説明の生成を行う。LEIEC/I は、これらのモジュールによって説明の使い分けを行うが、現在のところ理解誘導部・質問応答部を教育状況に応じて適切に切り替える機能を有しておらず、理解誘導・質問応答を個々に行う機能を備えている。

LEIEC/I では、3 章で三つに分類した広義の対象理解に必要となる知識の獲得を教育目的としており、電気回路に関する電圧などの基本的な概念およびオームの法則などの原理・原則的な知識を既に獲得している学生を教育対象としている。言い換えると、EXSEL/I から得られる説明を理解できる程度の学生を想定している。

以下では、理解誘導部・質問応答部から利用される領域知識ベースおよび学生モデル部について述べる。

4.2.1 領域知識ベース

LEIEC/I では、電気回路に対する視点を領域知識として取り出している。領域知識は、ある回路に対する広義の対象理解の誘導をどういった視点の順序で行うのか、あるいは学生の質問がどの対象モデルに対して行われたものかを判断するときに用いられる。この知識は、対象フレームとして表現される。一つの対象フレームは、一つの回路に対するいくつかの視点を表現している。図 4.2 に図 4.3

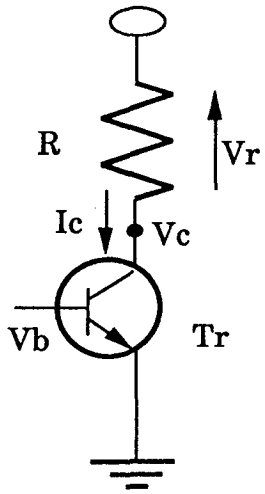


図 4.3 理解誘導の対象となる電気回路の例

の電気回路に対する対象フレームを示す。Viewpoint-f、g、k は、それぞれ機能の変更による対象理解、グレインサイズの変更による対象理解に必要な視点、および既知の回路（類似な対象、一般化された対象）を表している。また、各対象フレームには対応する電気回路図がリンクづけされている。

4.2.2 学生モデル

学生モデルは、対象フレームに対するオーバレイモデルであり、対象フレーム内の各視点に対して、学生による視点の設定可能性（Set Probability, SPと略す。）、視点からの対象モデル生成可能性（Generation Probability, GPと略す。）、の二つを表している。各可能性に対しては、unknown、true、false の三値が割り当てられる。unknown、true、false は、学生による視点の設定および対象モデルの生成について、それぞれ判断することができない状態、可能である状態、可能でない状態を表している。学生モデルの初期値は、対象フレームにおけるすべての視点に対して unknown となっている。学生モデル部は、理解誘導・

質問応答の過程を通して、これらの初期値を更新していく。

また、理解誘導部・質問応答部から参照された視点の SP・GP が unknown である場合、学生モデル部はその視点の記述に基づき、①視点における構造単位の数を指定して回路の構造を部分的な構造に分けさせる（ただし、個数が二つ以上のときに質問を行う。）、②部分的な構造ごとに入出力属性を与えて機能を答えさせる、といった質問を学生に与えて視点に対する理解状態（true か false）を診断する。例えば、診断すべき視点が (St-TrR (Vb Vc NOT)) である場合には、構造単位が一つ（St-TrR）であるため①での質問は省略し、学生に対して入出力属性が Vb、Vc であることを与えて機能を質問する。

4.3 理解誘導部

LEIEC/I は、一つの電気回路に対して、三つの広義の対象理解を誘導する枠組みを提供している。

4.3.1 基本方針

LEIEC/I の教育目的は、広義の対象理解に必要な知識を獲得させることにある。このような広義の対象理解を行うためには、それに含まれる個々の狭義の対象理解だけでなく、狭義の対象理解間の関係についての知識が重要となる。したがって、広義の対象理解を誘導する上では、個々の視点から得られる対象モデルの生成を誘導するだけでなく、各対象モデルを関係づけることが必要となる。特に、広義の対象理解のうち学生が生成できる対象モデルを用いて、学生が生成できない対象モデルに対する理解誘導を行うことが教育的に有効であると考えられる。LEIEC/I では、このような考え方に基づき、三つに分類した広義の対象理解を誘導する。

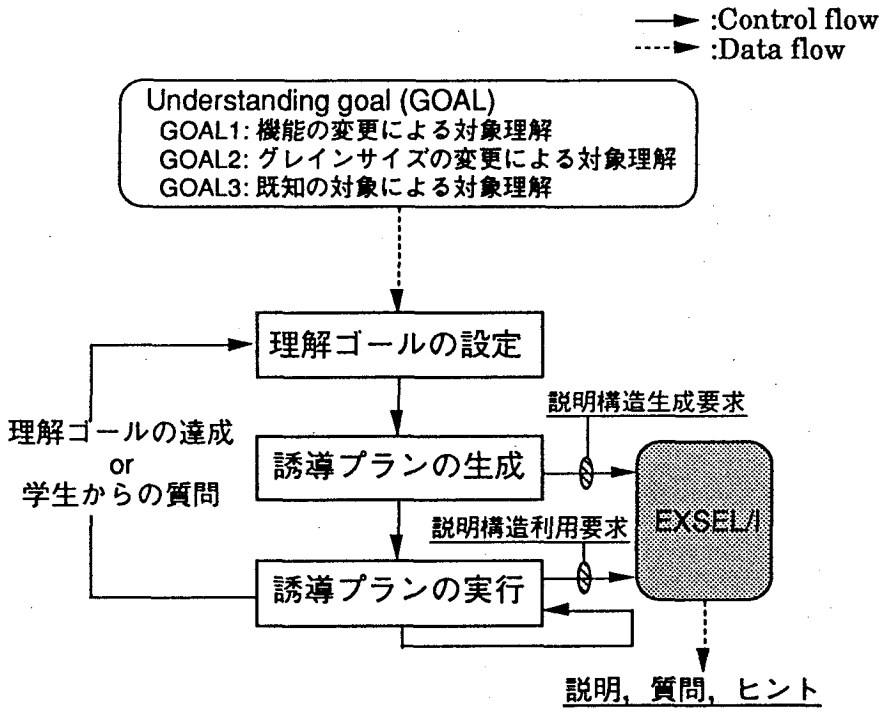


図 4.4 理解誘導の枠組み

4.3.2 理解誘導の枠組み

理解誘導は、図4.4に示すように三つの処理過程を通して行われる。まず、理解ゴールの設定過程では、教育すべき電気回路に対して三つに分類した広義の対象理解のうち、一つを教育目的（これを理解ゴールと呼び、GOAL と略す。図4.4 には GOAL1～3 と広義の対象理解との対応も示している。）として設定する。設定された理解ゴールの達成は、その理解ゴールに含まれる狭義の対象理解ごとの、対象モデルの生成誘導を繰り返すことによって行われる。誘導プランの生成過程では、学生の理解状態に応じてこのような誘導の繰り返しをどのように行うのかを計画する。誘導の繰り返しの仕方を記述したものを誘導プランと呼ぶ。対象モデルの生成誘導過程では、誘導プランに基づき、学生に対して説明や質問・ヒントを与えて対象モデルの生成誘導を繰り返す。また、誘導過程におい

表 4.1　理解ゴールと誘導に用いる説明タイプの関係

理解ゴール	誘導に用いる説明タイプ
GOAL1	ACE
GOAL2	WPE
GOAL3	CBE

て学生から質問を受けた場合、単に質問応答部を起動して応答するだけではなく質問に応じた理解誘導を行うといった教育行動を可能にしている。対象モデルの生成誘導過程が終了すると、別の広義の対象理解が理解ゴールとして設定される。

LEIEC/I では、表 4.1 に示すように設定される理解ゴールに応じて誘導に用いる説明タイプが異なる。そのため、理解ゴールが変われば、EXSEL/I の説明構造生成機構に対して要求仕様を与えて新たに説明構造を生成する必要がある。これは、誘導プランの生成過程で行われる。また、ある理解ゴールにおける誘導では、説明タイプに含まれるいくつかの説明プリミティブが使い分けられる。これらの説明は、EXSEL/I の説明構造利用機構に対して要求仕様を与えることによって得ることができる。これは、対象モデルの生成誘導過程で行われる。

以上の枠組みからも分かるように、理解誘導部では理解ゴールによって使い分けられる説明の範囲が規定される。すなわち、理解ゴールが設定されれば、表 4.1 の理解ゴール・説明タイプの関係から誘導に用いる説明タイプ内の説明プリミティブが使い分けの対象として設定される。

以下では、理解誘導の各過程について述べる。

4.3.3 理解ゴールの設定過程

理解ゴールの設定方法には、(a) GOAL1 から一つずつ順に理解ゴールを設定する、(b) 学生の質問に応じて動的に理解ゴールを設定する、の二つの方法がある。通常は(a) によって理解ゴールが設定される。(b) については、4.4.6 で述べる。

4.3.4 誘導プランの生成過程

誘導プランの生成過程では、電気回路に対して理解支援すべき広義の対象理解に対する①視点の選択、②誘導方法の設定、③説明構造の生成、の三つの処理を行い、理解ゴールに応じた誘導プランを生成する。誘導プランには、理解支援すべきいくつかの視点とその設定・変更順序、各視点に対する誘導方法が記述される。視点の設定・変更順序は、基本的に対象フレームに記述されている順となる。誘導に用いられる説明構造は EXSEL/I 内に保持される。以下では、各処理について述べる。

[視点の選択]

視点の選択では、教育すべき電気回路の対象フレームから理解ゴールに応じて理解支援すべき視点を選択する。このとき、その対象フレームに対応する学生モデルにおいて、対象モデル生成が不可（GP の値が false）であるような視点を選択する。ただし、理解ゴールが GOAL3 の場合、GP が true である Viewpoint-k の視点を選択する。これは、学生が理解可能な既知の回路を用いなければ GOAL3 を誘導できないためである。

[誘導方法の設定]

誘導の対象となる対象モデルは、理解ゴールによって異なる。理解ゴールが GOAL1 の場合、教育すべき電気回路の最大のグレインサイズにおける構造に対

する複数の対象モデルが誘導対象となる。また、GOAL2の場合、回路をある視点から捉えたときのいくつかのグレインサイズにおける対象モデルが誘導対象となる。GOAL3では、学生が既知の回路に対して理解可能なグレインサイズにおける、教育すべき回路の対象モデルが誘導対象となる。これらの対象モデルを生成誘導する方法には、①抽象 - 具体関係に基づく誘導、②全体 - 部分関係に基づく誘導、③既知の回路を用いた誘導、の三つがある。

・抽象 - 具体関係に基づく誘導

理解ゴールがGOAL1のときに用いられる誘導方法であり、図4.5(a)に示すように一つの構造に対して理解支援すべき視点の機能から捉えた場合の対象モデルの生成を、その構造に対して学生が生成可能である別の対象モデルの機能から関係づけて誘導する。この関係づけには、機能の変更の説明が必要となる。さらに、理解支援すべき対象モデルの生成を誘導する場合、学生が既知である抽象レベルから順に各抽象レベルを関連づけることが教育的に有効であると考えられる。そこで、その視点に対するSPの値がtrue（false）である場合、機能が学生にとって既知（未知）であるため、機能（構造）から構造（機能）の方向へ関連づけて誘導する。この誘導を具体化（抽象化）による誘導と呼ぶ。ここでの関連づけには、各抽象レベルや抽象レベル間の関係の説明が必要となる。

・全体 - 部分関係に基づく誘導

理解ゴールがGOAL2のときに用いられる誘導方法であり、図4.5(b)に示すように理解支援すべき視点のグレインサイズにおける対象モデルの生成を、学生が生成可能なサイズにおける対象モデルから関係づけて誘導する。学生の生成可能なサイズが理解支援すべき視点のサイズより大きい（小さい）場合、大きい（小さい）サイズから関係づけるといったグレインサイズ縮小（拡大）による誘導を行う。ここでの関係づけには、サイズが異なる対象モデル間における視点および

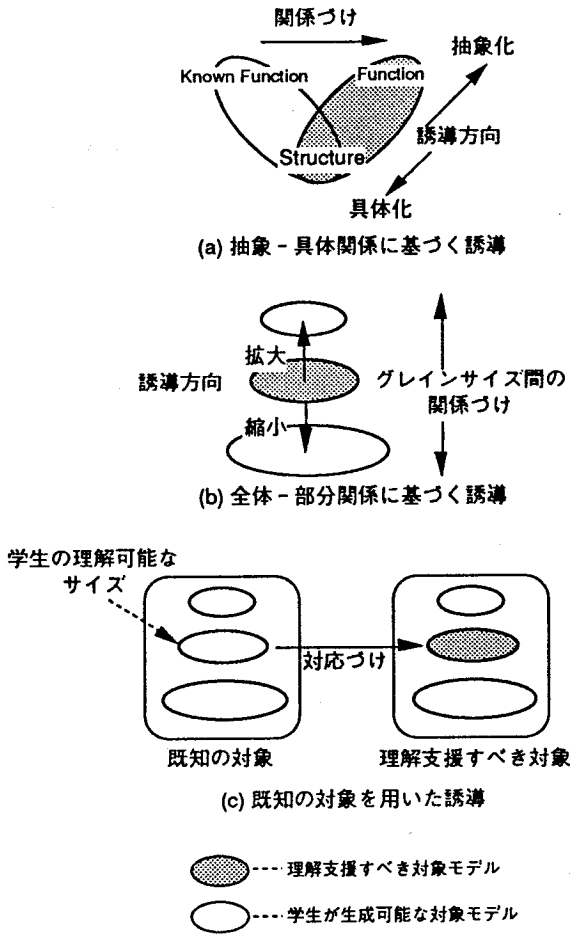


図 4.5 理解誘導方法

振舞いの関係の説明が必要となる。

・既知の回路を用いた誘導

理解ゴールがGOAL3のときに用いられる誘導方法であり、図4.5(c)に示すように学生が既知である回路に対して対象モデルを生成できるグレインサイズにおいて、理解支援すべき対象モデルの生成を既知の回路から対応づけて誘導する。

ここでの対応づけには、各回路の対象モデル間における視点および振舞いの対応関係の説明が必要となる。

誘導方法の設定処理では、［視点の選択］で選択された視点ごとに、学生の理解状態に応じて以上の具体的な誘導方法を設定する。このとき、理解ゴールがGOAL1の場合教育すべき電気回路の構造に対して学生が生成可能な対象モデルが誘導時の関係づけに必要となる。このために、教育すべき回路に対応する学生モデルからGPの値がtrueである（または視点の設定・変更順序からtrueになることが期待できる）視点の機能（誘導用機能）を求める。また、GOAL2の場合、学生が生成可能なグレインサイズでの対象モデルが必要となる。このために、理解支援すべき視点のグレインサイズに最も隣接し、かつGPの値がtrueである（またはtrueになることが期待できる）視点のサイズ（誘導用視点）を求める。また、GOAL3の場合、既知の回路に対して学生が生成可能なグレインサイズでの対象モデルが必要となるため、既知の回路に対応する学生モデルからGPがtrueである視点のサイズ（対応づけ用視点）を求める。誘導プランには、このような誘導用機能・視点、対応づけ用視点も記述される。

［説明構造の生成］

説明構造の生成処理では、設定された誘導方法による誘導に必要な説明のための説明構造を得るために、説明構造生成の要求仕様を生成する。説明構造には、誘導用機能・視点、対応づけ用視点を用いた誘導に必要な情報も含まれている。表4.2に、理解ゴールと説明構造生成の要求仕様との関係を示す。

4.3.5 対象モデルの生成誘導過程

対象モデルの生成誘導過程では、誘導プランにおける視点ごとに設定された誘導方法による誘導を実行する。誘導の実行過程は、誘導木と呼ぶ木構造によって

表 4.2 理解ゴールと説明構造生成要求との関係

理解ゴール	プランに含まれる対象モデル／説明構造生成の要求仕様
GOAL1	最大のサイズの構造に対する複数の対象モデル (fbe (SU (FU1 …… FUn) nil))
GOAL2	ある視点から捉えた複数のサイズでの対象モデル (wpe (SU FU nil))
GOAL3	対応づけ可能なサイズでの各対象の対象モデル (cbe (SU FU Known-SU))

（注）SU,FU:最大のグレインサイズでの Structure-Unit,Function-Unit

表 4.3 理解ゴールと説明構造利用要求との関係

理解ゴール	説明構造利用の要求仕様
GOAL1	(FBE-primitive FU 0 nil)
GOAL2	(WPE-primitive nil Size nil)
GOAL3	(CBE-primitive 0 nil Known-SU)

表現される。一例として、図4.6に抽象 - 具体関係に基づく誘導のための誘導木を示す。各誘導方法は、それぞれの誘導木を持つ。誘導は、誘導木の根から葉の方向に行われ、システムからの質問に対する学生の応答に応じて分岐し、各節において説明・質問・ヒントの提示が行われる。LEIEC/Iでは、このような誘導木によって4.3.4で生成された説明構造から得られるいくつかの説明を使い分けている。説明・質問・ヒントの提示に必要な情報は、説明構造利用の要求仕様を作成し、さらにEXSEL/Iの説明構造利用機構に要求することによって得ている。EXSEL/Iは、この仕様に応じて4.3.4で生成された説明構造から必要な情報を取り出す。表4.3に理解ゴールと説明構造利用の要求仕様との関係を示す。

理解誘導部は、対象モデルの生成誘導を終えるたびに、学生モデル部に対して誘導の対象となった視点のSP・GPの値をtrueに更新するように要求する。このような更新は、「学生はシステムの与えた説明を理解できた」という仮定に基

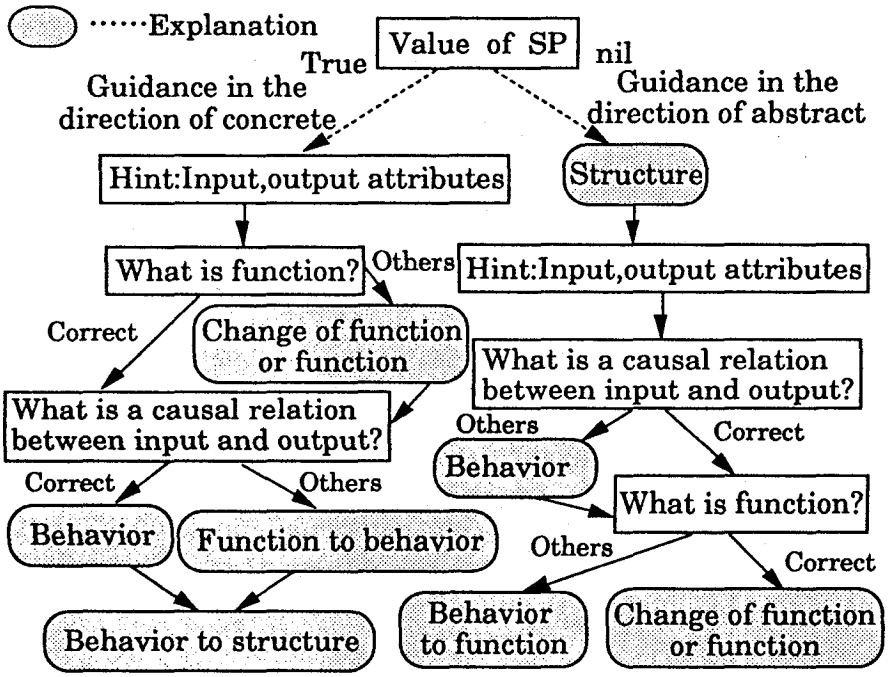


図 4.6　抽象 - 具体関係に基づく誘導のための誘導木

づいている。LEIEC/I は、教育すべき電気回路に対応する学生モデル内のすべての視点に対して GP の値が true となった時点で、その回路に対する理解誘導を終了する。

4.3.6 誘導例

GOAL1 のもとで図 4.3 の電気回路に対して行っている誘導例、誘導に用いられた説明構造、誘導プランおよび誘導プランの生成に用いられた学生モデルを図 4.7(a)、(b)、(c)、(d) に示す。学生モデルでの視点 f1、f2 に対する SP の値がそれぞれ true、false になっているため、誘導プランでは f1、f2 に対してそれぞれ

1:シ＞入力をVb 出力をVc とすると(a) の機能は何でしょうか？
2:学＞電圧反転
3:シ＞正解です．Vb とVc との因果関係はどうなりますか？
4:学＞Vb がある一定以上になるとVc が一定以下になる
5:シ＞正解です．……
6:学＞Tr の振舞いはどうなりますか？
7:シ＞Vb をVc として電圧反転する機能は二つの部分的な機能
からなります．その二つの機能は何でしょうか？
……
10:シ＞(a) は入力をVb 出力をVr とすると
因果関係はどうなりますか？
11:学＞わかりません
12:シ＞Vb が増加するとVr が増加します．機能は何でしょうか？
13:学＞増幅
14:シ＞正解です．このように(a) はVb をVc として電圧反転する
機能以外にVb をVr として電圧増幅する機能を持ちます．

(a) A dialogue

Plan-GOAL1:
((St-TrR (Vb Vc NOT)) GM1_concrete nil)
((St-TrR (Vb Vr AMP)) GM1_abstract <u>(Vb Vc NOT)</u>)

(b) Guidance plan used the dialogue

(St-TrR ((Vb Vc DM-) (Vb Vc NOT)) …<1>
((Vb Vr ME+) (Vb Vr AMP)) …<2>)

(c) Explanation structure

Student model for St-TrR
Viewpoint-f:f1 ((St-TrR (Vb Vc NOT)) (SP=true GP=false))
f2 ((St-TrR (Vb Vr AMP)) (SP=false GP=false))

(d) A student model.

図 4.7 理解誘導例

具体化による誘導、抽象化による誘導が設定されている。また、f2 に対しては下線部に示す誘導用機能が設定されている。図 4.7(a) の 1～5 では、説明構造の <1> の部分を用いて、f1 に対する誘導が行われている。10～14 では、GOAL1 のもとで、<2> の部分を用いて f2 に対する誘導が行われている。14 では、図 4.7(b) の下線部に示す誘導用機能を用いて学生が生成可能な対象モデルとの関係づけが行われている。

表 4.4　LEIEC/I において取り扱い可能な質問の分類

質問の型	意　味
AC-question	ACE で取り扱える質問
AC-level	構造、振舞い、機能の要求
AC-abstract	レベルに対する抽象化の要求
AC-concrete	レベルに対する具体化の要求
FB-question	FBE で取り扱える質問
FB-others	視点を与える他の機能の要求
WP-question	WPE で取り扱える質問
WP-decomposition	グレインサイズ縮小の要求
WP-aggregation	グレインサイズ拡大の要求
CB-question	CBE で取り扱える質問
CB-analogy	類似な回路の対応関係の要求
CB-generalization	回路の一般化の要求
CB-specification	回路の特殊化の要求
CB-justification	対応関係の正当性の要求

4.4 質問応答部

4.4.1 基本方針

学生からの同じ質問に対しても適切に応答を使い分ける機能は、ITS における双方主導対話を実現するために必要不可欠なものである[大槻 88]。このような質問応答機能を評価する基準としては、(1) 取り扱える質問の範囲、(2) 質問認識の質、の二つを挙げることができる。扱える質問の範囲が広くかつ適切な質問認識が可能なものほど、高度な機能を実現しているということができる。

(1) における質問の範囲は、システムの有する説明能力に制約される。LEIEC/I では、EXSEL/I から得られる幅広い説明によって、広範囲の質問を取り扱うことができる。表 4.4 に LEIEC/I で取り扱うことができる学生の質問を示す。した

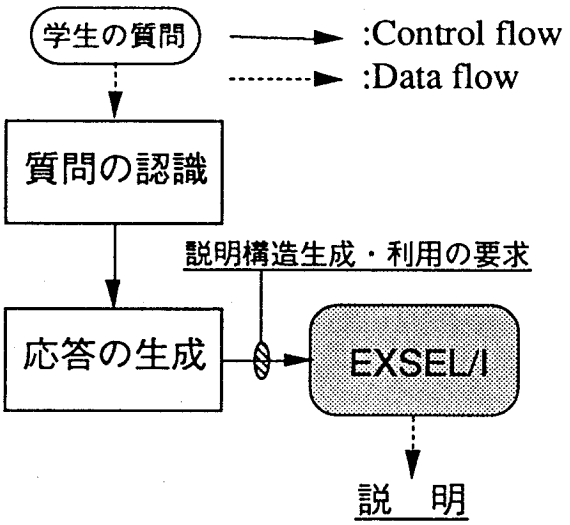


図 4.8 質問応答の枠組み

がって、質問認識を適切に行う機構を開発することによって、LEIEC/Iにおいて高度な質問応答機能を実現することができる。

適切な質問認識を行う機構を設計・開発するためには、単に学生からの入力だけではなく学生の理解状態や教育状況までも考慮して、適切に認識することが求められる。また、システムの持つ教育目的の達成を意識して認識を行い、応答を生成することが要求される。LEIEC/Iでは、これらの要求を満たすように質問応答の機構を設計・開発している。

4.4.2 質問応答の枠組み

学生の質問に対する応答は、図4.8に示すように質問の認識、応答の生成の二つの処理過程を通して行われる。学生の質問は、メニュー形式であらかじめ用意された語句を組み合わて入力される。質問の認識過程では、まず学生の入力に対して簡単なテンプレートマッチングの処理を施す。次に、学生の質問が分類したどの質問に属するかを、教育状況や学生モデルを用いて適切に認識する。教育状

況とは、LEIEC/I が現在教育支援を行っている電気回路、現在の理解ゴール・誘導プラン、現在着目している視点・対象モデル・抽象レベル、現在の回路に対して LEIEC/I が行った説明（応答）の履歴、といったデータ群である。

次に、LEIEC/I では分類した質問に対してどのタイプの説明で応答するのかをあらかじめ整理している。応答の生成過程では、この整理に基づき、認識した質問に対する応答を EXSEL/I に対して要求する。

以上のように、LEIEC/I では学生の質問が分類したどの質問に対応するのかを適切に認識することによって、応答に用いる説明の使い分けを行っている。以下では、質問の分類および各処理過程について述べる。

4.4.3 質問の分類

LEIEC/I では、EXSEL/I から得られる説明タイプごとに取り扱い可能となる質問を表 4.4 のように AC-question 、FB-question 、WP-question 、CB-question 、の四つの質問タイプに分類している。各質問タイプは、さらにいくつかの質問（質問プリミティブと呼ぶ。）に細分化されている。一般に、ITS で扱う質問は what、why、how の三つの型に分けることができる。このうち、LEIEC/I において扱うことができる質問は what 型および why 型に属する。図 4.9 に図 4.10(a) の回路に対する各質問タイプの例を示す。

[AC-question]

AC-question とは、ACE で応答可能な学生の質問である。AC-level は、電気回路に対して、それぞれの抽象レベルが何であるのかといった質問である。例えば、図 4.9(Q1) は機能についてのAC-levelである。AC-abstract は、なぜその構造が用いられているのか、なぜその振舞いになるのかといった構造、振舞いに対して抽象化を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q2) は構造についての AC-abstract である。AC-concrete とは、機能、振舞いが具体的にどんな物理的手段で実

AC-question の例

(Q1) 回路(a) の機能は何ですか。

(Q2) なぜ回路(a) を用いるのですか。

(Q3) 電圧増幅の機能はどの構造で実現されますか。

FB-question の例

(Q4) 回路(a) は電圧増幅の機能以外にどんな機能を持ちますか。

WP-question の例

(Q5) Vb が増加すると Vr が増加するのはなぜですか。

(Q6) Vb が増加すると Ic が増加し、Ic が増加すると Vr が増加するのは、結局どういうことですか。

CB-question の例

(Q7) 回路(a) の Tr は 回路(b) のどの部分に対応しますか。

(Q8) なぜ 回路(a) の Tr は 回路(b) におけるFET2 に対応しますか。

図 4.9 学生の質問例

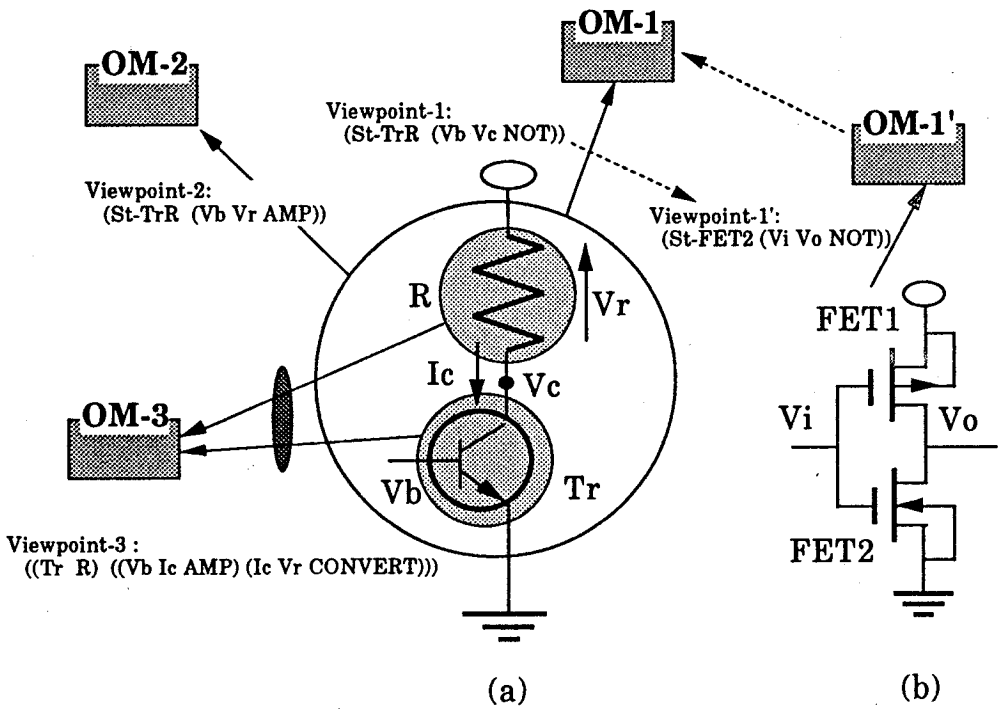


図 4.10 質問応答の対象となる電気回路の例

現されるかといった機能、振舞いに対する具体化を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q3) は機能についての AC-concrete である。

[FB-question]

FB-question とは、FBE で応答可能な学生の質問である。FB-others は、電気回路に対して別の視点を与える機能を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q4) がある。

[WP-question]

WP-question とは、WPE で応答可能な学生の質問である。WP-decomposition は、あるグレインサイズでの構造、振舞い、機能が、どのように構成されているのかといった抽象レベルに対してより詳細な説明を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q5) は振舞いについての WP-decomposition である。WP-aggregation は、あるグレインサイズでの構造、振舞い、機能が結局どのようになるのかといった各抽象レベルに対するよりまとまった説明を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q6) は振舞いについての WP-aggregation である。

[CB-question]

CB-question とは、CBE で応答可能な学生の質問である。CB-analogy は、類似な対象間の構造、振舞いの対応関係を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q7) は構造についての CB-analogy である。CB-generalization は、与えられた対象に対して各抽象レベルの一般化を要求する質問である。CB-specification は、CB-generalization とは逆に各抽象レベルの特殊化を要求する質問である。CB-justification は、構造、振舞いがなぜ対応するのかといった機能から捉えた対応関係の妥当性を要求する質問である。例えば、図 4.9(Q8) は構造の対応関係についての CB-justification である。

（タイプ［why or what］ 抽象レベル 質問対象［構造］ 要求項目）

(a) 学生の質問表現

1. 抽象レベル
2. 抽象レベルの変更（抽象化，具体化）
3. 機能の変更
4. グレインサイズの変更（縮小、拡大）
5. 対象間の対応関係

(b) 要求項目の種類

（Q-Level Q-View Q-Requirement A-View Q-Primitives）

(c) 質問リスト

図 4.11 質問の表現方法

4.4.4 質問の認識過程

質問の認識過程では、まず学生の入力に対してテンプレート処理を施し、図4.11(a)に示す情報を抽出する。抽出された質問表現中のwhatまたはwhyは、必ず学生の入力から抽出される。その他の要素については、抽出されない場合もある。また、要求項目には図4.11(b)に示すようなものがある。例えば、図4.9(Q3)の質問から、(what 機能 nil 具体化[structure])が抽出される。質問の認識過程では、このような学生の質問表現や教育状況・学生モデルの情報を用いて、図4.11(c)に示すようなリスト（質問リストと呼ぶ。）の各要素の同定を行う。質問リストの抽象レベル（Q-Level）および要求項目（Q-Requirement）は、どの抽象レベルに対して何を要求する質問であるかを表す。また、学生の質問は電気回路から得られるいずれかの対象モデルに対して行われるものであると考えることができる。この対象モデルのことをQ-Modelと呼ぶ。さらに、Q-Modelにおける視点を学生の視点（Q-View）と呼ぶ。A-Model(A-View)は、質問に対する応答に必要となる説明がどの対象モデル（A-Modelの視点）に関するものであるかを表す。最後の要素である質問プリミティブ（Q-Primitives）は、認識の結果を表し、

単一の質問プリミティブで表現される場合もあれば、複数の質問プリミティブによって表現される場合もある。前者の場合を単一的な質問、後者を複合的な質問と呼ぶ。

質問の認識では、質問リストの先頭から各要素の同定が行われる。以下では、各要素の同定方法について述べる。

[Q-Level の同定]

学生の入力から抽象レベルが抽出された場合は、それを Q-Level とする。抽象レベルが抽出されない場合は、教育状況での説明の履歴における最新の説明内容から同定する。例えば、LEIEC/I が「Vb が増加すると Vr が増加する。」と説明した後に「なぜですか？」（入力は、(why nil nil nil) と表現される。）という入力がなされた場合は、振舞いが Q-Level として同定される。説明履歴に情報がない場合は、学生に対してどの抽象レベルに対して問い合わせているのかを質問し、Q-Level の同定を行う。

[Q-Viewの同定]

学生の入力から質問対象が抽出された場合は、その構造に対する視点を Q-View とする。このとき、Q-View を構成する機能は、入力された構造と教育状況における現在の視点に基づき同定する。例えば、図 4.10(a) の回路に対して教育状況における現在の視点が Viewpoint-2 であり、学生からの質問が「Tr の機能は何ですか？」の場合（入力は (what function Tr nil) で表現される。）、Q-View の構造は Tr であり機能は Viewpoint-2 のグレインサイズを Tr の詳細度に合わせた Viewpoint-3 の (Vb Ic AMP) となる。また、学生の入力から質問対象が抽出されない場合は、教育状況における現在の対象の構造を質問対象として、同様に Q-View を同定する。

[Q-Requirementの同定]

学生の入力から要求項目が抽出された場合は、それをQ-Requirementとする。例えば、LEIEC/Iが図4.10(a)の回路におけるTrの振舞いを説明した後、「その振舞いは、どの部分のものですか？」という質問の場合は、抽象レベルの具体化（振舞いから構造）がQ-Requirementとして同定される。また、学生の入力から要求項目が抽出されない場合は、以下のように同定を行う。

学生の入力がwhat型である場合は、学生に対して何を要求しているのかを質問する。また、学生の入力がwhy型である場合は要求項目として「機能からの妥当性」を要求している場合と「グレインサイズ変更による妥当性」を要求している場合の二つの解釈が可能である。例えば、図4.10(a)の回路に対して「Vbが増加するとVrが増加する。」とLEIEC/Iが説明した後、「なぜですか？」という質問に対して「この回路は電圧増幅の機能を持つからです。」、あるいは「Vbが増加するとIcが増加し、Icの増加によりVrが増加するからです。」の二つの応答を行うことができる。前者は「機能からの妥当性」として質問を解釈した場合であり、後者は「グレインサイズ変更による妥当性」として解釈した場合である。このような解釈を適切に行うことは、学生に与えるべき応答を使い分ける上で重要である。質問応答部では、Q-Viewに対する学生の理解状態によってどちらに解釈するのかを決定する。決定の手順は、まずQ-Viewに対するSPの値を調べ、falseの場合（機能についての知識を持たない場合）は「機能からの妥当性」を要求しているものと解釈する。trueである場合は、「グレインサイズ変更の妥当性」を要求しているものと解釈する。この場合、サイズ縮小か拡大のどちらの要求かを判断する必要がある。このためにQ-Viewと隣接するグレインサイズの視点に対するSPの値を調べ、SPの値がfalseであるサイズに対する変更と考える。調べた視点のSPの値がすべてtrueである場合は、デフォルトとして「機能からの妥当性」の要求と解釈する。このような解釈のための処理は、できるだけQ-Modelの対象理解を優先して支援するといった考え方に基づいている。

［A-View の同定］

まず、Q-Requirement から応答に用いる対象モデル（A-Model）を決める。Q-Requirement が抽象レベルの変更である場合は、Q-Model と A-Model は同一であり、それ以外の場合は異なったものとなる。例えば、図 4.10(a) の回路において Q-Model が OM-2 であり Q-Requirement がグレインサイズ縮小である場合、A-Model は OM-3 となる。A-Model が決まればその対象モデルの視点を A-View とする。

［Q-Primitives の同定］

Q-Primitives は、これまでに決定した Q-Level・Q-View・Q-Requirement・A-View から一意に同定することができる。例えば、図 4.10(a) の回路に対して「Vb が増加すると Vr が増加する。」と LEIEC/I が説明した後、「なぜですか？」という学生の質問に、

Q-Level	:	behavior
Q-View	:	(St-TrR (Vb Vr AMP))
Q-Requirement	:	グレインサイズの縮小
A-View	:	((Tr R) ((Vb Ic AMP) (Ic Vr CONVERT)))

とした場合、質問プリミティブは WP-decomposition(behavior) と同定される。このように学生の質問を単一的な質問と認識する以外にも、質問応答部では対象モデルの生成支援といった観点から学生の質問を複合的な質問として認識し、教育的に有益な応答の生成を可能としている。例えば、図 4.10(a) の回路を Viewpoint-2 から捉えて「Vb を Vr として電圧増幅する機能を持つ。」の説明を行った後に、「Tr の振舞いはどうなりますか？」といった質問がなされた場合を考える。この質問に対して作られる質問リストが、

(behavior (Tr (Vb Ic AMP)) 抽象レベル
((Tr R) ((Vb Ic AMP) (Ic Vr CONVERT))) nil)

となった場合、質問プリミティブを単一的な質問、AC-what と捉えて「Vb の増加にともない Ic が増加する」と応答することができる。しかしながら、教育状況を考慮して、LEIEC/I が現在着目している対象モデル（OM-2）に対する機能から振舞いの AC-concrete 、および OM-2 と OM-3 を関係づける WP-decomposition とが複合されたものであると捉えて、「この機能に対する振舞いは、Vb が増加すると Vr が増加する。これは、“Vb の増加にともない Ic が増加し、Ic の増加により Vr が増加する”ことを意味する。したがって、Tr では Vb の増加にともない Ic が増加する。」と応答し、OM-2 の生成を支援することが文脈上望ましい場合がある。質問応答部では、次のような条件を満たす場合にこのような複合的な質問であると認識している。

「Q-Model ≠ A-Model
かつ Q-Level ≠ P-Level
かつ Q-Level[Q-Model] の理解状態[1] = false」

ここで、P-Level は教育状況における現在の抽象レベルを表し、Q-Level[Q-Model] は Q-Model の Q-Level を表す。この条件を満たす質問に対しては、単に A-Model における説明を生成するだけでなく、Q-Model に対する対象理解を支援するような説明（Q-Level の説明）も同時に生成する。説明の提示順序は、Q-Level の説明、Q-Model と A-Model を関係づける説明、A-Model における説明の順とする。このような応答は、Q-Model に対する対象理解を優先して支援するといった考え

[1] Q-Level が構造・機能の場合は SP の値によって判断し、振舞いの場合は GP の値によって判断する。

表 4.5　質問タイプと説明構造利用の要求仕様

質問タイプ	説明構造生成の要求仕様			
AC-question	(ACE-primitive	nil	nil	nil)
FB-question	(　CF	Function(A-View)	Size(P-View)	nil)
WP-question	(　CG	nil	Size(P-View)	nil)
CB-question	(CBE-primitive	nil	Size(P-View)	nil)

（注）Function (A-view)：A-View を構成する機能
Size (A-View)　：A-Viewのグレインサイズ
P-View　：教育状況における現在の視点

方に基づいている。

4.4.5 応答の生成過程

応答の生成過程では、あらかじめ整理された質問プリミティブとそれに応答するための説明の関係に基づき、質問認識の結果を用いて説明構造利用の要求仕様を生成する。質問プリミティブと説明構造利用の要求仕様との関係を表4.5に示す。このとき、教育状況を参照して応答に必要な説明構造が EXSEL/I において存在しない場合は、質問リストの A-View と質問プリミティブに基づき説明構造生成の要求仕様を生成して、EXSEL/I に対して要求する。また、学生の質問が複合的な質問であると認識されている場合は、質問プリミティブごとに応答を生成する処理を繰り返し、順に提示する。

次に、質問応答部は応答に用いた説明に応じて学生の理解状態の更新を学生モデル部に要求する。すなわち、視点を構成する構造、機能の説明を行った場合は、その視点に対する SP の値を true に、かつその視点からの振舞いの説明を行った場合には GP の値を true に更新する。

4.4.6 理解誘導における質問処理

理解誘導の過程で学生から質問が行われた場合、4.4.4 で述べた質問の認識処理で得られた A-View に対する学生の理解状態に基づき質問に対する処理を変更している。つまり、A-View に対する GP の値が true である場合は、学生に確認させる意味で質問に対する応答だけを行い、false の場合は以下に示す質問に応じた理解誘導を行う。

学生の質問は、A-View が(1) 理解誘導における現在の視点と同一である、(2) 現在の視点でなく理解ゴールに含まれる、(3) 現在の理解ゴールに含まれない、の三つの場合に分けられる。これらの場合に対してそれぞれ、(1') 応答を保留して誘導を続ける、(2') A-View に相当する誘導プラン内の視点に対する誘導を実行する、(3') A-View が含まれる広義の対象理解を理解ゴールとして設定する、といった処理を行う。ただし、(3') では A-View だけが誘導プランに設定される。(2')、(3') を行った後は、再び元の理解誘導を続ける。(1')〜(3') の処理は、質問応答部が教育状況を参照して学生の質問が(1)〜(3) のどの場合に属するかを決めることによって使い分けられる。

例えば、図 4.7(a) の理解誘導において、1〜5 では GOAL1 のもとで誘導が行われているが、6 での質問は

(behavior (Tr (Vb Ic SWITCH)) 抽象レベル
((Tr R) ((Vb Ic SWITCH) (Ic Vr CONVERT))) WP-decomposition)

といった質問リストとして認識されている。このとき、A-View は、GOAL1 に含まれない。そのため、7 からその視点に応じた理解ゴールとして GOAL2 を設定して誘導が行われている。

以上のように、LEIEC/I では教育状況や学生の理解状態に基づいて質問応答を行っているため、定性推論などによるシミュレーションを基盤として対象の理解支援を行う従来の教育システムよりきめの細かな質問応答が可能となっている。

4.5 考察

本章では、説明の使い分けの観点から、対象の理解支援を行う従来の教育システムにおける説明機能について考察する。

STEAMER [Hollan 84] に代表される従来のITS では、対象の操作手続きや対象に関する基本的な知識の獲得を教育目的としており、対象を操作するための仮想的な実験環境を提供して学生の操作に対する実験結果をシミュレーションなどによって説明する。しかしながら、提示される説明の種類が対象の動作だけといった単一的なものであり、また学生の理解にとって最も適切であるとシステムが判断して説明を提示できる機能を有していない場合が多い。これは、対象に対する理解について漠然と捉えているためであり、また説明を使い分けなくてもよい実験環境を提供すればかなりの教育効果が期待できることを前提としているためである [大槻 88] 。しかし、教育行動をより高度に生成するためには、従来のシステムでも教育目的の詳細な分析による説明の整理を通して、積極的に説明を使い分ける機能を有することが必要であると考えられる。LEIEC/I では、教育方法および学生の理解状態を考慮しながら EXSEL/I を運用することによって、このような説明の使い分けを可能にしている。

4.6 結言

本章では、説明の使い分けを可能とするLEIEC/Iについて述べた。LEIEC/Iでは、EXSEL/Iから得られる電気回路に関する説明を使い分けながら理解誘導および質問応答を行う。理解誘導では、教育目的ごとに整理された誘導方法に基づいて、学生の理解状態を考慮しながら説明を使い分けている。また、質問応答では、教育状況や学生の理解状態に応じて学生の質問を適切に認識することによって、応答に用いる説明の使い分けを可能にしている。特に、EXSEL/Iでは回路に関する説明を十分に整理しているため、LEIEC/Iではきめ細かな説明の使い分けが可能になっている。このような能力は、従来の教育システムで実現されていないものである。現在LEIEC/Iの理解誘導における抽象 - 具体関係に基づく誘導の部分が、SUN microsystems社SPARC station2のKyoto Common Lisp上で稼働している。プログラムサイズは、約1500行である。

第5章

結論

本章では、本研究によって得られた成果を総括し、今後の課題について検討する。

第2章では、人間の教師が行う説明を用いた知識伝達について検討し、説明機構のモデル EXSEL と LEIEC を提案した。これらのモデルの特徴は、同じ知識の伝達において用いることができる様々な説明を、①教育目的、②教育方法、③学生の理解状態、の三つの要素を考慮して適切に使い分ける点にある。このうち、EXSEL は使い分けに用いる個々の説明を生成するために、説明構造の生成および利用を行う。また、LEIEC は教育方法による知識伝達を実行し、その実行過程で学生の理解状態に応じて EXSEL を運用しながら説明の使い分けを行う。このような説明の使い分けは、従来の教育システムにおいて検討されていないものであるが、ITS が高度に教育行動を生成する上で重要な機能であると考えられる。次に、EXSEL・LEIEC を具体的な領域に応用して設計・開発する方法について述べた。この中で、教育目的の整理に基づいて知識伝達に用いる説明を詳細に分類することが説明機能の高度化に大きな影響を与えることを指摘した。

第3章では、EXSEL に基づき設計・開発した EXSEL/I について述べた。EXSEL/I では、電気回路などの対象の理解に必要な知識の獲得を教育目的として、(1) 教育目的の整理、(2) 説明の分類、(3) 説明構造の表現方法の提供、(4) 説

明構造の生成・利用機構の開発、を行った。特に、(1)・(2)では対象モデルおよび視点の概念による対象理解の定式化・分類を通して、詳細に説明を分類した。その結果、EXSEL/Iでは従来の対象理解を扱うITSよりも幅広い説明を生成可能にしている。

第4章では、EXSEL/Iを運用するLEIEC/Iを設計・開発し、EXSEL/Iから得られる説明をどの程度使い分けることができるかを示した。LEIEC/Iでは、電気回路の理解に必要な知識の伝達を行うための機能として、理解誘導機能・質問応答機能を有する。理解誘導機能では、教育目的ごとに誘導方法を用意し、誘導木と呼ばれる手法によって説明の使い分けを行っている。また、質問応答機能では、学生から入力された質問を学生モデルおよび教育状況の情報を用いて適切に認識し、認識した結果に基づいて説明を学生に提示している。これらの機能によって、EXSEL/I から得られる様々な説明の使い分けを可能にしている。これらのEXSEL/I・LEIEC/Iの構築によって、提案したEXSEL・LEIECの枠組みが説明機能の高度化を図る上で有用な手法であることが示されている。

今後の研究課題は、(a) EXSEL・LEIEC の洗練、(b) EXSEL/I・LEIEC/I の拡張、の二つを挙げることができる。まず、EXSEL・LEIECの洗練には、汎用化と学生の理解状態遷移の追従がある。EXSEL・LEIECは、高度な説明機能を実現するための方針を与えるモデルであり、その一つとしてEXSEL/I・LEIEC/Iが実現されている。しかしながら、EXSEL/I・LEIEC/Iを対象理解支援以外の領域へ拡張することは困難となっている。これは、EXSEL・LEIEC が概念的なモデルとなっていることに原因がある。EXSEL・LEIECを汎用的に利用可能な説明機構とするためには、説明を使い分ける基準となる教育目的などの要素をさらに詳細に分析して汎用性のある部分を取り出し、それに基づきEXSELにおける説明構造生成・利用の各フェーズおよび LEIEC における EXSEL の運用機構を洗練しなければならない。このような汎用性の追求は、高度な教育行動を目指すITSの設計・開発に大きく貢献する。

また、説明を用いて知識伝達を行う場合、単に説明だけを提示するだけではなく、提示した説明がどの程度学生に効果を与えたのかといった、説明の効果を観測する機構が不可欠である。LEIEC/I では、学生は提示された説明を理解することができると仮定していた。しかしながら、必ずしも理解できるとは限らないため、説明を与えることによって遷移する学生の理解状態をある時点ごとに観測し、その結果を説明の使い分けに反映させる必要がある。このような観測およびそれに基づく説明の使い分けを行う機構の開発では、EXSEL の運用を行う要素として学生の理解状態の遷移を明示的に考慮する必要がある。

以上の他にも、第2章で指摘したように説明の性質に応じてインタフェイスを選択するタスクを EXSEL ・LEIEC に取り入れることや EXSEL・LEIEC を他の領域に応用することが考えられる。

また、EXSEL/I・LEIEC/I の拡張としては、教育目的の追加と理解誘導部・質問応答部の運用を挙げることができる。EXSEL/I・LEIEC/I では、現在のところ知識の獲得を教育目的として説明の使い分けを可能としているが、知識の修正までも考慮すれば取り扱う説明の範囲がさらに広がり、それによって教育行動をよりきめ細かく生成することができると考えられる。また、現在のところ LEIEC/I では理解誘導部と質問応答部を適切に運用する方法については議論していない。しかしながら、教育状況に応じて各部を切り替えることによって、さらに高度な説明の使い分けを実現することができる。これらの拡張は、EXSEL・LEIEC に基づく説明機構の設計・開発の有用性を示す上で必要である。

謝辞

本研究の全般にわたり終始懇切なる御指導を賜りました大阪大学産業科学研究所 豊田順一教授に心から深謝いたします。

本研究に関して貴重な御教示を頂きました大阪大学産業科学研究所 北橋忠宏教授、ならびに本研究を通して有益な御助言を頂きました大阪大学産業科学研究所 溝口理一郎教授に心から感謝いたします。また、本研究に関して貴重な御教示を頂きました情報工学科 首藤勝教授に心から感謝いたします。

大学院後期課程において御指導を賜りました情報工学科 嵩忠雄教授、菊野享教授、都倉信樹教授、鳥居宏次教授、柏原敏伸教授、宮原秀夫教授、欅田栄一教授、橋本昭洋教授、谷口健一教授、谷内田正彦教授、脇田壽教授、ならびに医学部 田村進一教授、教養部 藤井護教授に厚く御礼申し上げます。

大学院修士課程ならびに本研究の遂行にあたり多大な御援助、御指導を頂きました徳島大学工学部知能情報工学科 矢野米雄教授に厚く感謝申し上げます。

研究全般にわたり、有益な御討論、御助言を頂いた大阪大学産業科学研究所 平嶋宗助手、池田満助手ならびに日本IBM 東京基礎研究所 中村祐一博士に感謝いたします。

本研究に直接携わって頂いた豊田研究室 西川智彦氏、桐生健一氏、岸本公孝氏、左右田東虎氏、ならびに御討論を頂いた大阪大学産業科学研究所 山田誠二講師、曽我真人氏をはじめとする豊田研究室関係者各位、産研ITSグループ関係者各位に感謝いたします。

さらに、本論文の作成に御協力を頂いた関西大学工学部 松田憲幸氏、山口繁樹氏、豊田研究室 永井隆弘氏ならびに種々の面でお世話になりました向井佐江子嬢に感謝します。

最後に、終始あたかかく見守り励ましてくれた両親に感謝申し上げます。

参考文献

[大槻 88] 大槻説乎，山本米雄，: "知的 CAI のパラダイムと実現環境", 情報処理学会誌, Vol.29, No.11, pp.1255-1265 (1988).

[岡本 87] 岡本敏雄: "知的 CAI のための教授世界知識の表現とその推論方法", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J70-D, No.12, pp.2658-2667 (1987).

[岡本 88] 岡本敏雄,松田昇 : "幾何論証の学習世界における知的CAI の構成について", 情報処理学会論文誌, Vol.29, No.3, pp.311-324 (1988).

[佐伯 85] 佐伯胖編: "理解とは何か", 東京大学出版会 (1985).

[竹内 87] 竹内章，大槻説乎: "摂動法による学習者モデル形成と教授知識について", 情報処理学会論文誌, Vol.28, No.1, pp.54-63 (1987)

[平島 90] 平島宗，河野隆宏，柏原昭博，溝口理一郎，豊田順一:"教育タスクの分析とそれに基づく ITS の設計 - 問題理解支援システム - ", 第 3 回人工知能学会全国大会論文集, pp.711-714 (1990).

[溝口 89] 溝口文雄，古川康一，安西祐一郎 共編 : "定性推論", 共立出版 (1989).

[Bylander 85] Bylander, T., Chandrasekaran, B. : "Understanding Behavior Using Consolidation", Proc.IJCAI-85, pp.450-454 (1985).

[Carbonell 70] Carbonell, J.R.: "AI in CAI: An Artificial Intelligence Approach to Cpmputer-Assisted Instruction", IEEE Trans., Vol. MMS-11, No.4, pp. 190-202 (1970).

[Clancy 83] Clancy, W.J.: "The Epistemology of a Rule-Based Expert System: A Framework for Explanation", Artificial Intelligence, Vol.20, No.3, pp.215-252 (1983).

[Clancy 86] Clancy, W.J.: "From GUIDON to NEOMYCIN and HERACLES in Twenty Short Lessons": ONR Final Report 1979-1985, AI Magazine, Vol.7, No.3, pp. 40-60 (1986).

[Clancy 87] Clancy, W.J.: "Knowledge-based Tutoring: The GUIDON Program", MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1987).

[deKleer 84] deKleer, J. : "How Circuit Work", Aritificial Intelligence, Vol.24, pp.205-280 (1984).

[Hancock 89] Hancock, P.A., Chignell, M.H.:"Intelligent Interfaces: Theory, Research and Design", Elsevier Science (1989).

[Hollan 84] Hollan, J.D., Hutchins,E.L., Weitzman,L.M. : "STEAMER:an interactive,inspectable,simulation-based training system", AI Magazine, Vol.5, No.2, pp.15-27 (1984)

[Rasmussen 86] Rasmussen, J. : "Information Processing and Human-Machine Interaction:An Approach To Cognitive Engineering", Elsevier Science (1986).

[Suthers 88] Suthers, D.D.: "Providing multiple views for explanation", Proc. AAAI-88 Workshop on Explanation, pp.12-15 (1988).

[Schank 86] Schank, R. : "Explanation Patterns: Underatanding Mechanically and Creatively", Lawrence Erlbaum Associates, Publishers (1986)

[Sleeman 82] Sleeman, D.H., Brown, J.S.(eds.) : "Intelligent Tutoring Systems", Academic Press (1982).

[VanLehn 90] VanLehn, K.:"Mind Bugs: The origins of procedural misconceptions", Cambridge, MA: MIT Press (1990).

[Wenger 87] Wenger, E : "Artificial Intelligence and Tutoring Systems", Morgan Kaufmann (1987).

[White 86] White,B.Y., Frederiksen, J.R. : "Intelligent Tutoring Systems Based upon Qualitative Model Evolutions", Proc.AAAI-86, pp.313-319 (1986).

[White 90] White, B.Y., Frederiksen, J.R. : "Causal Model Progression as a Foundation for Intelligent Learning Environments", Aritificial Intelligence, Vol.42, pp.99-157 (1990).