

## 教育システムにおける学習者の前提知識に依存した自動授業設計

Automated Instructional Design depending on Trainee's Prerequisites  
in Educational System

澤 田 憲 之

**要 約** コンピュータを利用した教育システム (CAI: Computer Assisted Instruction) で使用する教材 (コンテンツ) を作成する場合には, 上流工程で行う教材構造分析・目標行動分析が重要である。コンテンツの品質はこの工程の出来如何によって左右される。授業設計および教材作成に関する手法は古くから研究されており, そのひとつに ISM 教材構造化法がある。そこでは目標行動を多数の要素行動に細分化し, 要素間の関連を明らかにして, すべての要素行動を構造的・系統的に配列し, ISM 教材グラフとして視覚的に表現される。

当社の教育システム“ユニシス VirtualCampus”でも, 教材作成を行う際, 学習すべき項目を明確にし, 項目間を“前提行動および目標行動”から関連づけた学習項目のネットワークとして表現する。教材を構成する学習項目の教授=学習順序はこの学習項目ネットワークを探索することによって決定されるため, 教材作成者は, 教授=学習順序を考慮して教材を作成する必要はなく, 開発時の負荷を軽減することができる。また, 学習項目ネットワークを利用することにより, 学習者の前提知識レベルに応じた授業設計を可能にした。

**Abstract** In a process of creating teaching materials (contents) used for CAI (Computer Assisted Instruction) the contents structural analysis or target action analysis in upstream are significant. The qualities of contents depends on the creating process strictly. There are many research studies of the instructional design or creating contents. ISM (Interpretive Structural Modeling) teaching material structural method is one of these methods. In this method, a target action is decomposed into many elementary actions, and the relationship between these elements is defined in structural or systematic manner as ISM teaching material graphs.

In 'VirtualCampus', a product of Nihon Unisys Ltd., leaning items are defined based on premise actions and target actions and represented as a network.

Studies orders are generated by traversing in network automatically, teaching material authors do not worry about that order. As a result, not only loads of creating teaching materials is reduced, but also automated instructional design for each trainee is realized.

### 1. はじめに

PCの高機能化・低価格化とインターネットをはじめとする情報ネットワークの普及によって, 最近では企業内研修でも, 集合研修を中心とした教育形態ばかりではなく, ネットワークとPCを利用したオンデマンドな個別学習の利用も注目を浴びている<sup>[1]</sup>.

それにともないCAI (Computer Assisted Instruction), CBT (Computer Based Training), WBT (Web Based Training)などと総称される教育システムも, 機能が充実してきており, 多くの教育現場で活用されている<sup>[2]</sup>.

インストラクタによる集合教育とは異なり、このような PC を利用した個別学習環境では、学習成果は利用するコンテンツの品質に依存する。したがって、コンテンツを作成するツールである教材作成システムの機能が、教育システムを利用する上で重要となる。当社ではコンピュータ・ネットワークを利用した遠隔教育システム“ユニシス VirtualCampus”を開発し、1999 年 12 月より社内への導入を開始した。1998 年 8 月には商品としての販売も開始し、多くのお客様に導入していただいている。社内では、情報技術関連のコンテンツを中心に利用しているが、筆者等が習得すべき技術領域は拡大する一方であり、作成されたコンテンツは短期間で陳腐化してしまうことも多く、その開発の生産性ならびに作成されたコンテンツの保守性も重要となる。このような課題に対応するために、VirtualCampus の教材作成システムでは学習項目および学習項目間の関連を定義し、教材要素を部品化して学習項目単位に管理する方式を採用して生産性や保守性向上への工夫を行なった。また学習項目ネットワークにおいて、項目間の関連の意味を制限することで、学習順序決定の自動化ならびに効率的な前提知識の診断方法を実現することができた。

本稿では、はじめに学習項目ネットワークを構築するうえで参考にした ISM 教材構造化法について触れるとともに、学習項目ネットワークを作成する手順について紹介し、次に、学習順序を自動決定する仕組みや効率的な診断を行なう仕組みについて述べる。

## 2. 教材の作成プロセス

コンテンツの作成過程はおおまかに説明すると、上流工程におけるシナリオ作成と、下流工程における教材コンポーネントの作成に分けられる。教育コンテンツにおけるシナリオ作成とは、そのコンテンツで学習する内容(単元)を細かい要素(学習目標)に洗い出し、要素相互間における構造的関係を明らかにして、教材を組織的に配列していくことである。教材コンポーネント(利用者が学習を進めていくうえで必要になってくる解説やテスト問題など)は、シナリオが決定した後から作成することになる。多くの教材作成システムでは、教材コンポーネントの作成機能に傾注して、シナリオ作成を支援する機能についてはシステム上で実装できていないケースが少なくない。教育コンテンツを作成する場合においては、シナリオ作成が最も難しく、試行錯誤の支援をすることが極めて重要である。

VirtualCampus の教材作成システムでは、シナリオ作成を支援する機能を提供しており、そこでは、教材構造分析や目標行動分析の結果から得られる要素(学習目標)と要素相互間の構造的関係をネットワーク構造で表現する。これを「学習項目ネットワーク」と呼ぶ。

構造に意味を持たせた学習項目ネットワークを利用すると、コンテンツに含まれる要素(学習目標)の学習順序を、自動的に基礎性・応用性の高いもの<sup>[3]</sup>から順に設定したり、学習者の知識レベル(前提知識)を効率的に診断し、各学習者ごとの授業設計を自動的に行うことが可能となる。

### 3. 学習項目ネットワークの作成方法

#### 3.1 ISM 教材構造化法

ISM 教材構造化法とは教材作成における上流工程に関する手法の一つであり、社会システム工学 (Social System Engineering) において開発されたシステムの構造モデリング (Structure Modeling) 法の一つである ISM (Interpretive Structural Modeling) 法の手続きに非常に類似している。授業設計や学習プログラムの設計に際して行なう教材構造分析や目標行動分析において、目標行動を多数の要素行動 (下位目標) に細分化して要素間の関連づけを行なったのち、すべての要素行動を構造的・系統的に配列し、要素行動の関連構造を決定することを目的とした基本手続きである<sup>[4]</sup>。

ISM 教材構造化法による教材構造分析や目標行動分析の流れについて説明すると、おおよそ以下の通りとなる (図 1)。

- ① 教材を構成する要素を抽出 (要素を細分化) する。
- ② まずは系統別に局所から要素間の関連づけ (上下関係, 因果関係, 前後関係など方向性をもった関連づけ) を行なう。
- ③ それを全体に広げ, 全要素間の関連構造をネットワーク状の有向 (方向性) グラフとして視覚的に判読しやすい階層構造図に描く。
- ④ 描いたネットワーク図を見て要素間の関連づけの部分的な修正や追加を行なう。場合によっては要素の細分化を見直す。そして再び階層構造図を描く。

この過程を繰り返して行なうことで、ISM 教材構造化法では全ての要素間の関連構造を構造的・系統的に配列できるように決定していく。

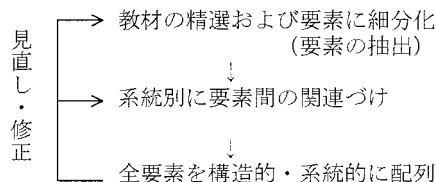


図 1 ISM 教材構造化法における分析作業の流れ

#### 3.2 VirtualCampus における学習項目ネットワークの作成

VirtualCampus の教材作成システムにおいて教材構造分析や目標行動分析を行ない、学習項目ネットワークを作成する場合には、基本的に ISM 教材構造化法の流れに沿って作業を進めていく。ただし、VirtualCampus の教材作成システムでは「要素の細分化 (抽出)」および「要素間の関連づけ」の過程で、次に説明する論理的観点から分析をおこなう点が ISM 教材構造化法とは異なっている。

ISM 教材構造化法では、要素間の部分的・断片的な関係を整理して、全要素間の関連図として具象化するため、要素間の関係には「前提 目標関連」、「因果関連」、「構成関連 (part of)」、「順序関連」など、さまざまな関連が成り立つ。

これに対し、VirtualCampus の教材作成システムでは、ある目標を達成 (学習) するためには、その前提として何が達成 (学習) されていなければならないかという「前提 目標」の関連に限定して要素を抽出 (細分化) し、要素間の関連づけを行な

っていく。

それでは、VirtualCampus の教材作成システムにおいて、学習項目ネットワークを作成していく様子を、「分数の足し算」に関する内容領域を例にあげて、具体的に述べる。

### 1) 教材を構成する要素の抽出（要素の細分化）

分数の足し算を行う場合には、まず通分を行って足し合わせる分数の分母をそろえなければならない。そして分母がそろったところで分子（整数）同士の足し算を行っていくことになる。したがって「分数の足し算ができる」ためには、「分数の通分ができる」ことと「整数の足し算ができる」ことの二つの要素が「分数の足し算ができる」という目標の下位目標として必要であることがわかる。

また、通分を行うためには、分数を約分することの意味がわからなければならないため、「分数を約分できる」という要素が「分数の通分ができる」ための下位目標としてさらに必要となってくる。

この結果、図 2 に示すように四つの要素が抽出できる。

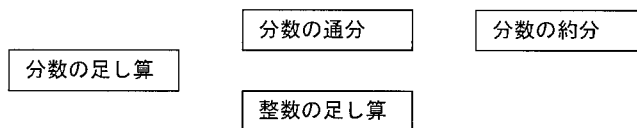


図 2 学習項目ネットワークの作成（要素の抽出）

### 2) 要素間の関連づけ

前述の通り、VirtualCampus の教材作成システムでは、ある二つの要素間において、一方の要素が他方の要素に対して、その下位目標であるという関連（前提目標関連）を成り立たせ、この関連を学習項目ネットワークでは矢印を使って表現する。

矢印は関連づけられる二つの目標の間で結び、その向きは、下位目標（前提目標）から上位目標に向ける。したがって「要素の抽出」過程で得られた関連から矢印を作成していくと図 3 に示すような学習項目ネットワークが構成される。

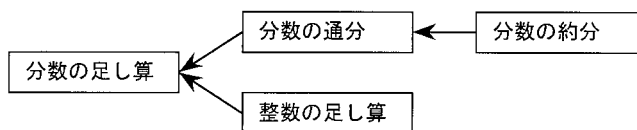


図 3 学習項目ネットワークの作成（要素間の関連づけ）

### 3) 視覚的に判読しやすいネットワーク図（階層構造図）を描く

この例では階層構造が単純であるため、学習項目ネットワークをわかりやすく描き直す必要はないが、多数の学習目標が複雑に関連し合っている場合には、目標間の関連付けを変更することなく、目標の位置を移動させることで、よりわか

りやすい学習項目ネットワークに描き直していく。

- 4) ネットワーク図(階層構造図)を見て要素間の関連づけの修正や追加を行なう  
できあがった学習項目ネットワークを見ながら、必要に応じて学習目標間の関連づけの修正や追加を行なう。

#### 4. 学習項目ネットワークにおける学習順序の決定について

VirtualCampus の学習項目ネットワークにおいては、ある関連づけられた二つの目標間で、一方の目標が他方の下位目標であるという関係が成り立っているため、学習を行なう際には、より下位の目標から前提 目標の関連をたどって上位の目標を学習していけばよい。ここでは学習項目ネットワークに含まれる学習目標の学習順序をシステムで自動的に決定する仕組みについて説明する。

##### 4.1 学習順序の設定アルゴリズム

学習順序の設定アルゴリズムを擬似プログラムコードで表すと、およそ図4のように記述できる。

```

※「最長パス」は学習目標を要素にもつ列型の全域変数
method 学習順序の設定 ()
  ・学習項目ネットワークの最上位の目標から最も深い階層に位置する目標までの
    パス(階層経路)を探し「最長パス」に設定する。
  ・while 最長のパスが残っている do
    ・現在の学習項目ネットワークで「最長パス」を探す
    ・「学習番号づけ」を行う
  end
end

method 学習番号づけ ()
  ・「最長パス」の最下位に位置する目標を対象にする
  ・while 「最長パス」で対象中の目標に番号づけされていない下位目標がない
    and 「最長パス」に目標が残っている do
    ・対象中の目標に学習番号を設定する
    ・学習番号を設定した目標を「最長パス」から除き、対象を上位目標に移す
  end
end

```

図4 学習項目ネットワークを利用した学習順序の設定アルゴリズム

学習を行なう場合には、より基礎性の高い、つまり、学習項目ネットワークにおいては最も階層が深い(階層経路が長い)目標から学習を開始していく必要がある。学習の開始となる目標が見つければ、あとは関連づけ(矢印)にしたがって基礎性・応用性を考慮しながら学習を進めていけばよい。

自動的に学習順序を構成するためには、最初に学習目標ネットワークの中で最上位の目標(学習のゴールとなる目標)から最も下位に位置する目標までのパス(階層経路)を検索して「最長パス」を求め、「最長パス」の最下位に位置する目標について、次の規則にしたがい再帰的に学習順序を設定していく。

「最長パス」の最下位の目標が、学習番号が決まっていない下位目標をもっていなければ1オリジンで学習番号を設定し「最長パス」から除き、学習順序の設定対象をその上位の目標(その時点における「最長パス」の最下位の目標)に移す。

「最長パス」の最下位の目標が、学習番号が未設定の下位目標をもっている場合には、その下位目標が含まれる経路について、学習番号が未設定でさらに深い階層に位置する下位目標がないかを検索し、その中で見つかった最も深いパスをあらためて「最長パス」に設定し、上述の処理(学習番号を設定して「最長パス」から除く)を行う。

#### 4.2 学習順序の設定(具体例)

上述のアルゴリズムにしたがって学習順序を設定する様子を、図5に示す学習項目ネットワークを使って具体的に述べる。

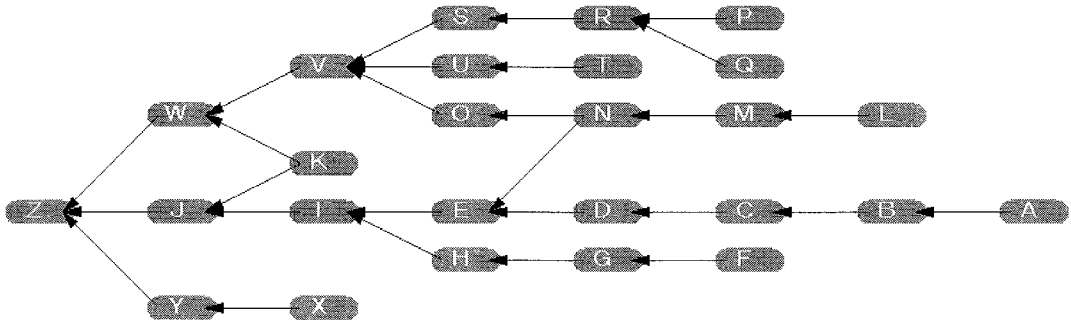


図5 学習項目ネットワーク

図5の学習項目ネットワークにおいて最上位の目標(学習のゴールとなる目標)Zから最下位の目標AまでのパスZ J I E D C B Aを「最長パス」に設定する。「最長パス」の最下位に位置する目標Aは学習番号が決まっていない下位目標をもたないので、学習番号を1に設定し、「最長パス」から除く。「最長パス」はZ J I E D C Bとなり、順位づけの対象は目標Bになる。Bも学習番号が決まっていない下位目標をもたないので、学習番号を2に設定し、「最長パス」から除く。以下、同様にしてDまでこれを繰り返す、A 1番、B 2番、C 3番、D 4番という学習番号を設定する。

ここまでの過程で、現在、「最長パス」はZ J I Eとなっているが、次に順位づけの対象になるEは、まだ学習番号が決まっていない下位目標(N)をもっている。よって、Nを含む経路を検索して見つかった最も深いパスZ J I E N M Lをあらたに「最長パス」に設定する。学習順序の設定対象を「最長パス」の最下位の目標Lに移し、先ほどと同様にして、学習番号が決まっていない下位目標をもつIが順位づけの対象になるまで番号づけを行ない、L 5番、M 6番、N 7番、E 8番という学習番号を設定する。

なお、途中Nの番号づけを行なう際には、以下の点について考慮する。

「最長パス」をさかのぼって番号づけする過程で、番号づけした目標の上位目標で「最長パス」に含まれていない目標(この場合には目標O)が見つかった場合、この目標は現在の「最長パス」の経路(この場合にはZ J ...)の番号づけが終わり、次の経路を検索する際に優先的に番号づけを行うこととする。

ふたたび「最長パス」の最下位の目標(I)に注目する。Iは学習番号の決まってい

ない下位目標 H をもつため、H を含む経路を検索して見つかった最も深いパス Z J I H G F をあらたな「最長パス」とし、J にさかのぼるまで、F 9 番、G 10 番、H 11 番、I 12 番という学習番号を設定する。

「最長パス」は Z J となり、J は学習番号の決まっていない下位目標をもつため、あらたな「最長パス」は Z J K となり、Z にさかのぼるまで、K 13 番、J 14 番という学習番号を設定する。

現在、「最長パス」は Z である。Z は学習番号の決まっていない下位目標を複数もっているが、先述の通り目標 O が優先されるため、あらたな「最長パス」には Z から O までのパス Z W V O を設定し、O 15 番という学習番号を設定する。

以降、同様にして、ここまで説明してきた規則性にしがって番号づけを行なうと、最終的に図 6 に示すような学習番号を設定できる。

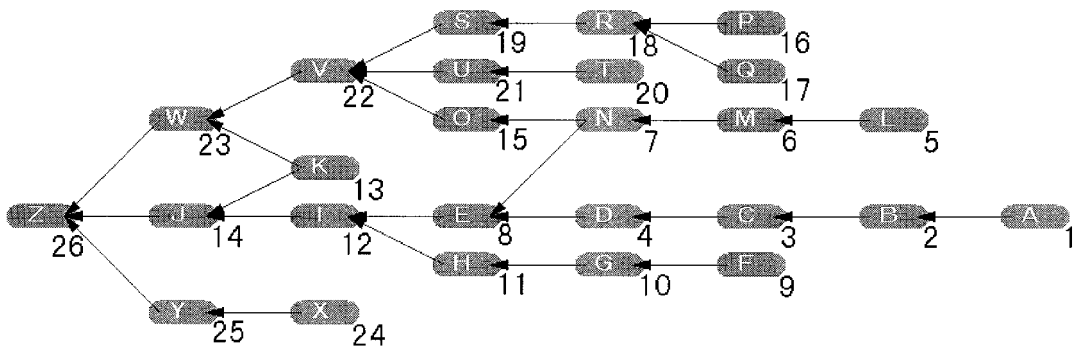


図 6 学習項目ネットワークにおける学習順序の設定結果

## 5. 学習項目ネットワークを利用した効率的な診断アルゴリズム

### 5.1 診断時における基本的な考え方

VirtualCampus の学習項目ネットワークでは、ある関連づけられた二つの目標間で前提 目標の関連が成り立っているため、任意の目標に対する前提知識の診断や学習後の理解度診断を行なう場合、次のような規約を導き出すことができる。

**【診断状況設定における規約】**

- その目標の内容が理解できている場合には、それよりも下位の目標で学習する内容については既に理解できているものとみなす。(みなし到達)
- その目標の内容が理解できていない場合には、それよりも上位の目標で学習する内容について理解することはできないものとみなす。(みなし未到達)

この規約にもとづいてコンテンツ全体に対する前提知識の診断や学習後の理解度診断を行なう場合には、学習項目ネットワークに含まれるすべての学習目標についてテストを行なう必要はなく、効率的に診断を進めていくことが可能となる。

### 5.2 学習項目ネットワークにおける診断対象目標の探索アルゴリズム

図 7 に示す学習項目ネットワークを使い、前提知識の診断を進めて行く手順につい

て述べる .

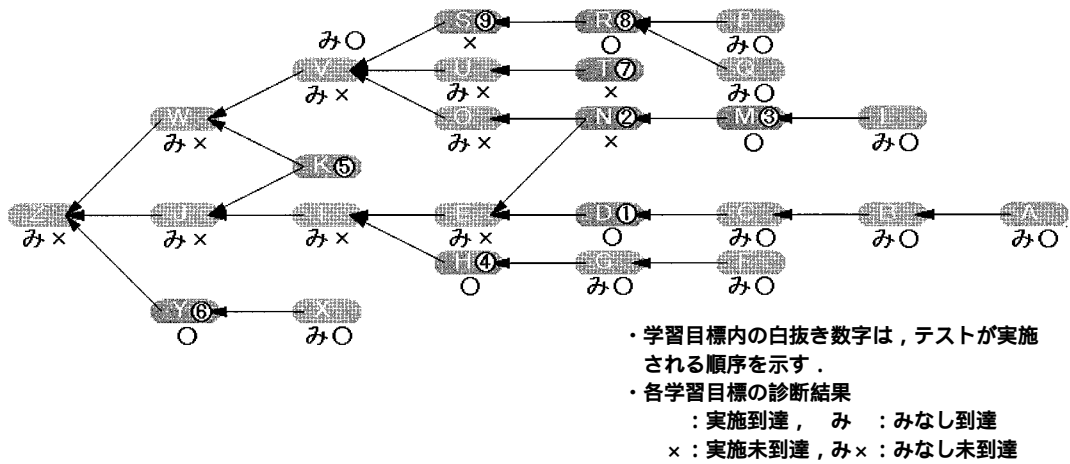


図 7 学習項目ネットワークを利用した効率的な診断結果

前提知識の診断を開始する場合には、最上位の目標（学習のゴールとなる目標）Z から最も階層の深いパス Z J I E D C B A を診断用パスに設定し、診断用パスの中間に位置する目標からテストを実施する。したがって、この場合には目標 D のテストを 1 番目に実施する。

目標 D のテストを実施した結果、ここでは「到達」であったと想定する。「到達」の場合には目標 D の診断結果を“実施到達”に設定し、D の下位に位置するすべての目標（C, B, A）については前述の規約にもとづき、診断結果を“みなし到達”に設定し、「到達」と診断された目標（診断結果が“実施到達”または“みなし未到達”に設定された目標）は診断用パスから取り除く（診断用パスは Z J I E）。

テストの結果が「到達」と判定された場合には、次にテストを行なう目標を上位方向に検索する。D の上位目標（= 診断用パスの再下位目標）E には未診断の下位目標があるので、その中から任意の目標（この場合には N）を選択し、診断用パスに追加（診断用パス = Z J I E N）してテストを実施する。

目標 N のテストを実施した結果、今度は「未到達」であったと想定する。「未到達」の場合には目標 N の診断結果を“実施未到達”に設定し、N に直結するすべての上位目標（E, I, J, Z, O, V, W）については規約にもとづき、診断結果を“みなし未到達”に設定する。

テストの結果が「未到達」と判定された場合には、次にテストを行なう目標を下位方向に検索する。N の下位目標には未診断の目標 M があるので、M を診断用パスに追加し（診断用パス = Z J I E N M）、テストを実施する。

目標 M のテストを実施した結果「到達」であったと想定する。先述の「到達」ケースと同様に、M の診断結果に“実施到達”を設定し、M の下位に位置するすべての目標（L）の診断結果を“みなし到達”に設定し、「到達」と診断された目標は診断用パスから取り除く（診断用パス = Z J I E N）。

次にテストを実施する目標を検索するため、未診断の下位目標をもつ目標が見つか



るまで診断用パスをさかのぼり、診断用パスを短くしていく。したがってこの場合には未診断の下位目標 H をもつ目標 I が見つかるまで診断用パスを短くし、見つかった未診断の下位目標 H を診断用パスに追加する (診断用パス = Z J I H)。

目標 H のテストを実施した結果「到達」であったと想定する。これまでと同様の処理を行なう (H : “実施到達”, G : “みなし到達”, F : “みなし到達”, 診断用パス = Z J I)。

このようにして診断用パスをさかのぼり、未診断の目標がなくなるまで同様の処理を繰り返すと、最終的に図 7 に示すような結果が得られる。図 7 の結果からは、学習項目ネットワークに含まれるすべての学習目標 26 個のうち、実際にテストを実施した学習目標の数は 9 個であることがわかる。

この例からもわかるように、診断アルゴリズムを用いると、学習項目ネットワークの構造や学習者の知識レベルによって、テストを実施する学習目標の個数は変動するにしても、診断を行う場合においてすべての学習目標についてテストを実施する必要はなく、効率的に診断を進めることが可能になる。

## 6. 学習項目ネットワークの利用効果

集合研修では実現することが難しい「学習者個々の知識レベル (能力) に応じた授業設計をもととして学習を進めていくこと」がコンピュータを利用した個別学習では実現可能である。コンピュータを利用した個別学習において重要なことは、どのようにして「個人」を対象に学習を行なうための学習環境を提供していくかという点にある。

VirtualCampus の学習システムでは学習項目ネットワークを利用して学習順序を自動的に決定し、診断アルゴリズムにもとづいて行った前提知識の診断結果をふまえることで、学習者の理解度に応じて、学習が必要と思われる目標だけを抽出して、理想的な順序で学習を進めていく機能を提供している。すなわち、個々の学習者の知識レベルに応じた、システムによる自動授業設計を実現している。

教育システムが企業において利用される場合には、業務を行なう中で学習のために確保できる時間が限られているため、学習効果を短期間で得られることが要求される。学習項目ネットワークを利用してシステムによる自動授業設計を行い、効率的な学習を支援することは、この要求を満たすために必要十分な機能であるといっても過言ではない。

限られた時間の中で学習を行う際には、学習者は進行計画を立ながら学習を進めていく。この場合、自分の進捗状況がコンテンツ全体の中でどの程度進んでいるのかを的確に把握することが必要である。学習項目ネットワークはテキストでいえば目次に相当し、そのコンテンツで学ぶ内容を一覧できるうえ、学習目標が達成状況に応じて色をかえて表示されているので、進捗状況を一目で確認することができる。

また、学習項目ネットワークを利用すると、ある目標について学習を行う場合、その内容がコンテンツ全体を通して学ぶべき内容の中でどのように位置付けられているものなのかを、ネットワーク構造から視覚的に読み取ることができ、学習者は目的を意識しながら学習を進めていくことができるようになる。

次に、教材作成の観点から学習項目ネットワークを利用する効果について考える。

コンテンツは常にメンテナンスされる可能性を持っている．つまり，いったん完成したコンテンツであっても，それを利用（学習）していくうちには，状況に応じて内容を適宜変更していかなければならないケースも出てくる．その場合，新しく目標を追加するときや，内容が陳腐化して必要なくなった目標を削除するときに，学習順序が静的データとして保存されているようなコンテンツ（あるいはそのようなコンテンツを生成する教材作成システム）であれば，学習順序の整合性を保つために多くの負荷がかかってしまうことが多い．

学習項目ネットワークを利用すると，学習順序の設定アルゴリズムにしたがって，コンピュータが自動的に学習順序を設定することが可能になる．VirtualCampusでは学習システムで学習順序が動的に設定されるため，教材作成システムでは，学習順序を静的データとしてコンテンツに含める必要がなく，結果として，学習順序をフレキシブルに変更できるなど，コンテンツのメンテナンスにかかる負荷を軽減することを可能にしている．実際には図8に示すようなインタフェースを利用して学習項目ネットワークを作成・改編していく．

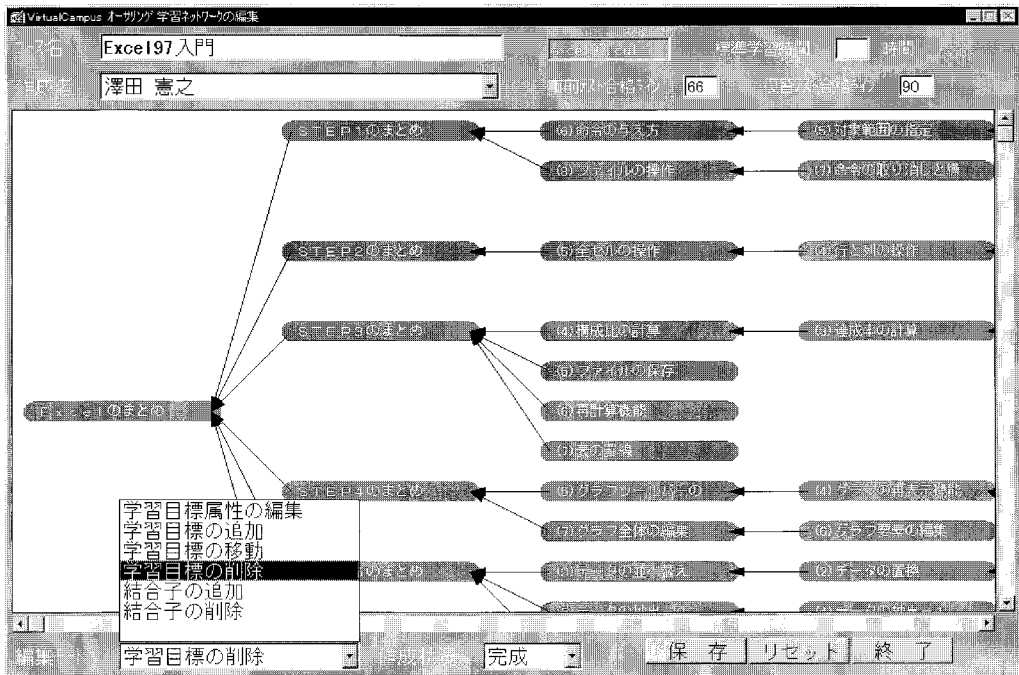


図8 教材作成システムにおける学習項目ネットワークの編集画面

この実現のためには，解説やテスト問題などの教材コンポーネントがオブジェクト指向にもとづいて学習目標単位に部品化され，管理されてる工夫が必要であった．

## 7. おわりに

ISM教材構造化法を参考にして，関連構造に意味をもたせた学習項目ネットワークを利用することで，学習者の知識レベルに応じた授業設計を可能にする仕組みにつ

いて述べた。これは、学習項目ネットワークの考え方（関連構造図の捕らえ方）に着目し、教育システムに求められている機能を実現した結果であると言える。

しかし、現状の学習項目ネットワークでは、二つの目標間に関連づけられた関係が、一方の目標の前提（下位）目標であるという目標行動分析結果にしか対応できていない。扱う内容領域によっては、必ずしもこの関連（前提 目標関連）だけで目標行動分析や教材構造分析が行なえるわけではなく、学習項目ネットワークを構築することが困難なケースも出てくるのが想定される。学習順序の設定アルゴリズムや、効率的な診断アルゴリズムも、前提 目標関連が成り立っていないければその機能を果たすことはできない。

目標行動分析や教材構造分析においては、二つの目標間に前提 目標関連以外にも、因果関連、構成関連（part of）、実現関連（is a）など、さまざまな関連が成立する場合も多く、今後はこれらの関連にも対応することのできる仕組みを考えていく必要がある。

- 
- 参考文献** [ 1 ] NTT フェニックス・プロジェクトアンケート結果, 1999.  
[ 2 ] 玉置亮太, 教育支援システムの新動向, 日経コンピュータ, no. 450, pp. 104 ~ 106, 1998.  
[ 3 ] 沼野一男, 授業の設計入門, pp. 101 ~ 122, 国土社, 1987.  
[ 4 ] 佐藤隆博, 授業設計と評価のデータ処理技法, pp. 18 ~ 46, 明治図書, 1980.

**執筆者紹介** 澤田 憲之 (Noriyuki Sawada)  
1968年生。1992年広島大学学校教育学部卒業。同年日本ユニシス(株)入社。教育システムの開発・保守に従事し、現在総合教育部企画開発室に所属。