

経済最適化問題を例とする 数学 Web 教材自動作成システム

白田 由香利*

近年の大学教育における Web 教材利用の拡大は顕著であるが、他方、その Web 教材作成の
手間及び専門知識の習得に時間が掛かり、教育現場の問題となっている。我々は、XML、
XSLT などのセマンティック Web の技術を用いて教材の自動生成をはかり、この問題を解決
しようと考え、e-Math システム EBL バージョンを開発している。本システムの特長は、教師
が最低限の、文章題に関するメタレベル記述を記載し、それをシステムに入力すると、自動的
に XML ファイルが生成され、指定の XSLT を通して Web ブラウザ上に教材が表示される点
である。一般に数学教材の Web 化は、数式の生成表示が困難なため、他の Web 教材に比較し
て困難と言える。その問題を解決するため、本システムでは数式処理システム Maple 及び、
数式表現生成システム Equation Server を利用している。これらの機能により、教師は数学の細
かい計算及び、その数式表現の Web 化に伴う煩雑な作業から解放され、さらに、コンピュ
ータ知識がない教師でも仮想キャラクタを用いた学生との会話機能をもつ Web 教材が自動生成
可能となった。本論文では、学生の視点からの本システム利用方法、及び、教師の視点からの
教材作成方法を説明した後、本システムの構成と機能を概説する。また、本研究のロードマッ
プと関連研究についても言及する。

キーワード：セマンティック Web，XML，XSLT，Web 教材，自動生成，知識ベース，
数式処理，経済最適化問題

Web-Based Mathematical Learning Material Automatic Generation System for Economical Optimization Problems

Yukari Shirota

* 学習院大学 経済学部 経営学科，東京都豊島区目白 1 の 5 の 1 .

Department of Management, Faculty of Economics, Gakushuin University, 1-5-1 Mejiro, Toshima-ku, Tokyo 171-
8588, Japan.

E-mail: yukari.shirota@gakushuin.ac.jp

Today, an increasing number of universities use distance learning systems by using World Wide Web. However, there exists a cost problem for teachers to develop learning materials. It takes a lot of time, practice, and devotion for teachers. To solve the problem, we have developed an automatic generation system which is called e-Math EBL version. The system automatically generates mathematical learning materials using the Semantic Web technologies such as XML and XSLT. The teacher has to only to write the minimum information of the target problem as a meta-level description file. The system then executes the remaining material generation transactions, which includes generation and displaying XML files through XSLT stylesheets. In general, it is more difficult to develop mathematical Web contents. The reasons are (1) it takes a lot of time to represent mathematical expressions, and (2) it is difficult to display the mathematical expressions on Web browsers. To solve the problem, our system has used a mathematical software Maple and a mathematical presentation system named Equation Server. As our system invokes these systems as sub modules, any teacher can develop his/her own mathematical Web-based learning materials without other person's help. Then the teacher would be released from tedious XML programming work to devote his/her energies to more creative work. In this paper, how to learn on the generated learning materials from a student's viewpoint and how to create the learning materials from a teacher's viewpoint are explained. Then the system architecture and functions are described. In addition, we will explain this research road map and the current status, and related work to implement our research goals.

Keyword: Semantic Web, XML, XSLT, Web-based learning materials, automatic generation, knowledge base, mathematical symbolic processing, economical optimization problem

1 . はじめに

近年の大学教育における Web 教材利用の拡大は顕著であるが、他方、教師にとってその教材作成の手間及び専門知識の習得に時間が掛かり過ぎる点が教育現場の問題となっている。我々はこの問題解決のため、XML^{1,2}、XSLT³などのセマンティック Web⁴の技術を用いて教材の自動生成をはかる、e-Math システム EBL バージョンを開発している^{5,6,7}。本 EBL システムの特長は、教師が最低限の、文章題に関するメタレベルデータを記載し、それをシステムに入力すると、自動的に XML ファイルが生成され、指定の XSLT を通して Web ブラウザ上に教材が表示される点である。従来から RDF⁸や XLT⁹のセマンティック Web の技術を用いて教材を自動生成する研究はあるが、本システムでは、仮想キャラクタによる会話機能も XSLT 上のプログラミング機能として予め定義してあること、及び、数学の公式や経済の概念・知識などを予め知識ベースに格納し、その公式を組み合わせて、ゴールである関係性を推論させること、及び、数式処理システムは、Web 上の数式表現 (MathML やイメージファイル) を生成する機能を実現したことが挙げられる。これらの機能により、教師は数学の細かい計算及び、その数式表現の Web 化に伴う煩雑な作業から解放される。また仮想キャラクタ機能をもつ Web コンテンツの作成は、多大なコンピュータ知識を必要とするため一般に難しいが、本 EBL システムでは、こうしたコンピュータ知識をもたない教師でも仮想キャラクタを用い

た学生との会話機能を自動生成可能とした。

本 EBL システムの基盤システムである e-Math システムは 2001 年から、またその拡張版である本 EBL システムは 2003 年 10 月より学内限定で Web 公開してあり、学生が利用可能となっている¹⁰。教材内容は、著者が担当する経営数学 1 及び 2 の内容に準じており、その補助教材として学生に活用されている。

本論文では、次節で、学生の視点からの本システム利用方法、及び、教師の視点からの教材作成方法を説明した後、第 3 節で本システムの構成と機能を概説する。第 4 節では本システムの研究のロードマップと現在の状況、及びその実現のための関連研究について言及する。

2 . e-Math EBL バージョン Interaction Agent の仕様

本節では e-Math システム EBL バージョンの仕様を学生及び教材作成する教師の視点から解説する。本論文では、本システムをそのメインプロセスの名前を取って Interaction Agent と以後呼ぶこととする。Interaction Agent の扱う数学問題は、経済最適化問題である。

2.1 生成された Web 教材の利用法

まず、学生の視点から自動生成された Web 教材の利用方法について述べる。Interaction Agent は Web 教材を自動生成することを特長とするが、生成された Web 教材を利用する学生にとっては、普通教師が手でプログラミングした Web 教材の利用と差異はない。Interaction Agent では、最適化問題 1 問につき、4 枚の Web ページを生成する (図 1 ~ 4 参照)。Web ページ上には仮想キャラクタの教師が表示され、仮想教師は学生に質問したり解法の説明などを行う。学生は、画面右下の OK ボタンを押すことで次の画面に進める。

図 1 で示した最適化問題は経済数学における典型的な問題である利潤最大化問題である¹¹。この問題では、収入 (revenue) R 、及び生産コスト (cost) C を表わす 2 式が与えられており、利潤 (profit) を最大化する生産量 (quantity) Q の値を聞いている*。そのため、学生はの関係式 (Q) をまず求める必要がある。仮想教師のガイダンスにあるように、そのためには、関係式 $\text{Profit} = R - C$ を知識として持っている必要がある。一般に最適化問題の解法のために必要となる関係式は複数である。

次に複数の関係式及び、問題として与えられた式を解くことにより、ターゲットとなる利潤を生産量 Q の関数として表現する (図 2 参照)。この計算はシステム内部では数式処理システム Maple によって実行されている。この計算過程が理解できなかった学生を支援する機能として図 2 の画面にある "More Detail" ボタンが用意してある。このボタンを押すことで Maple が計算した結果及び途中の計算プロセスを画面に表示できる (図 2 の右側のウィンドウを参照のこと)。

以後の解法手続きは、数学の一般的手法である最大値発見手法に従う。つまり利潤の式を生産量 Q で一階微分して、極値を求める。これを示した画面が図 3 である。その後、極値のうち最大値となるものがあるか判別する。これに対応する画面が図 4 である。図 3 に示すように、微分の詳細過程を示すため "More Detail" ボタンが生成される。また図 4 では、グラフを表示し、

* 本システムでは、メタレベル記述ファイルに π と書くと、Web 表示ではギリシャ文字の π に変換される。

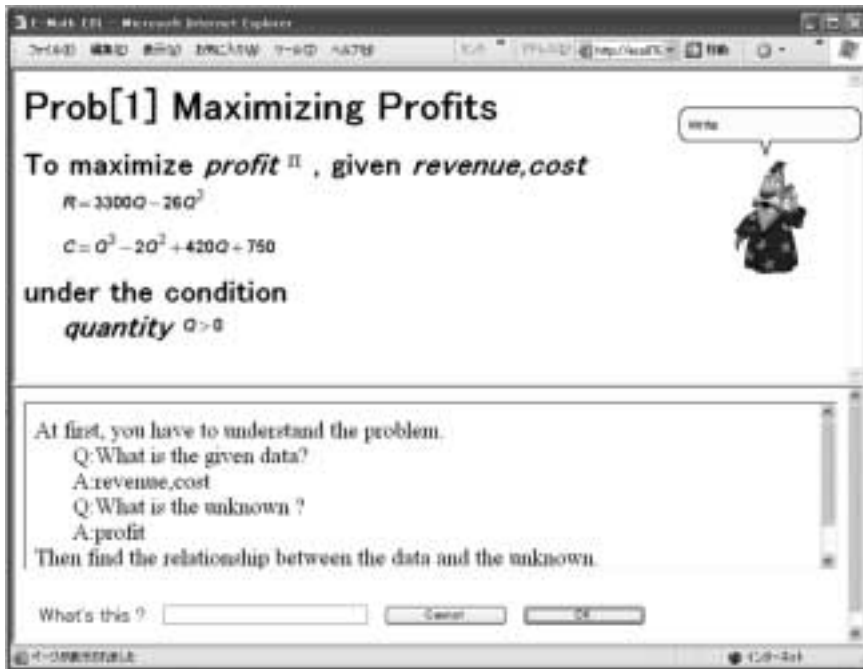


図 1 : 最適化問題教材の 1 ページ目の例



図 2 : 最適化問題教材の 2 ページ目の例



図 3 : 最適化問題教材の 3 ページ目の例

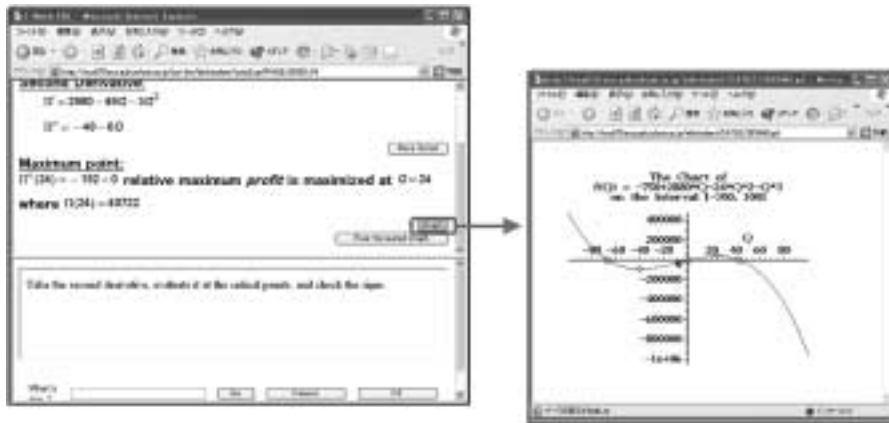


図 4 : 最適化問題教材の 4 ページ目の例

グラフ上でその最大値をマークしてある。グラフは"Graph"ボタンを押すことで表示される。このステップバイステップな微分計算過程, 及びグラフは Maple を使って作成した。

2.2 Web 教材の作成法

次に上述したような最適化問題の Web 教材を作成する方法を教師の視点に立って説明する。

教師は図 5 に示すメタレベル記述ファイルを作成し, Intearctive Agent システムに入力する。教師の作業はこのファイルを書くだけである。残りの XML ファイル作成などの作業はシステムが自動的に行ってくれる。



図 5 : メタレベル記述ファイルの例

メタレベル記述ファイルは問題定義及びその解法を指定するための最低限の情報である。こうした数学問題を定義する方式は数学問題一般に適用可能である。

- (1) 与えられたデータと条件は何か。(属性 data で定義し, given で指定)
- (2) 未知データは何か。(属性 unknown で指定)
- (3) 与えられたデータと未知データの間の関係は何か。(属性 relationship で定義)
- (4) 解法プランはどのようなものか。(属性 find で指定)

属性 data の値は以下の四つ組である。

(名称, シンボル, 数式, 条件式)

関係式が複数ある複雑な問題例を以下に示す。

(Given1) 1 個当たりの平均費用関数 $AC = AC(Q)$

(Given2) 価格 P と取引量 (生産量) Q の関係を表わす需要関数 $f(P, Q) = 0$

(Relationship1) 利潤 = 収入 - 費用, $\pi = R - C$ 。

(Relationship2) 収入 = 価格 \times 取引量 $R = P \times Q$ 。

(Relationship3) 平均費用 = 費用 \div 取引量 $AC = C \div Q$ 。

この問題は、平均費用関数式と需要関数が与えられた時の利潤を最大化する問題である。この問題では、解法に必要な関係式が上記のように 3 つ存在する。これらは問題中には提示されず、学生が経済知識として知っていることを前提としている。こうした複雑な問題も Interaction Agent は記述可能である。

現在の Interaction Agent は問題対象を最適化問題一般としている。よって対象は経済学だけでなく、高校数学で勉強する図形に関する最大化問題なども記述可能である。図形に関する最

最適化問題では、問題の文章だけでは理解が難しいことがあるので、メタレベル記述ファイルの仕様を図 6 のように拡張した。図 6 に示す最適化問題は、球に内接する円錐を最大化する問題である。属性 figure に表示したい図のファイル名を記載することにより、それに対応する"Figure"ボタンが追加生成される。我々は Interaction Agent の最適化問題記述能力を試すために、世界的に広く使われてきた数学のテキスト 3 冊^{12,13,14} に載っている最適化問題 50 題を記述し実際に Web 教材を自動生成した。この結果、問題なく Web 教材が自動生成できることが確認できた。

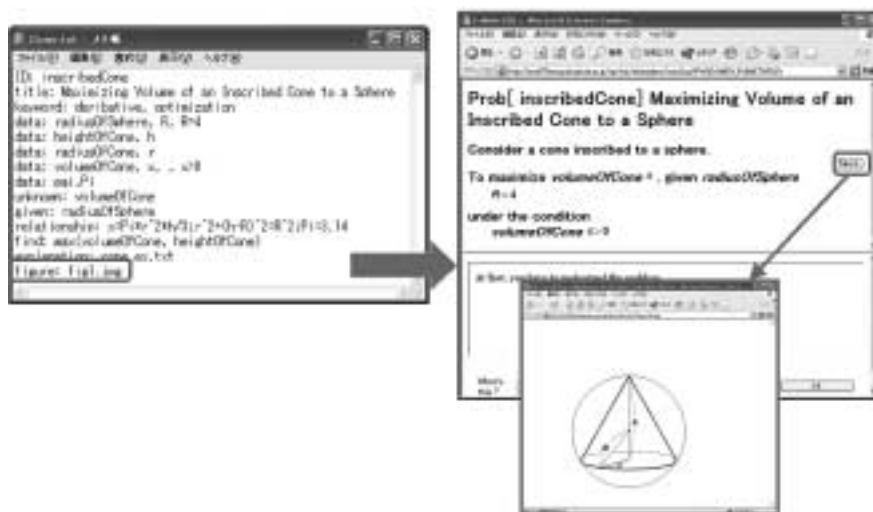


図 6 : 問題説明に図を挿入する場合のメタレベル記述ファイル

一般に教師が数学問題を作成する場合、数式の係数を学生が解き易いように調整する手間が大きい。実際に Web 教材化する場合、内容及び表示レイアウトなどを含めて調整し完成されるまでには多大な人的コストを必要とする。しかし Interaction Agent を使うことにより、それらの煩雑な作業が自動化されるので、教師は Web 教材アプリケーション作成が容易に行えるようになる。

3 . Interaction Agent システム概要

本節では我々の開発した Interaction Agent システムの構成及び機能について説明する。本システムは、学生が問題を選択すると、対応するメタレベル記述ファイルが選択され、それを入力として教材が逐次動的に生成され、Web ブラウザ上に表示される。本 e-Math システムの最終ゴールは、学生に対する仮想教師のきめ細やかな自然なガイダンスを実現することである。そのため学生の反応に応じて教師側の対応を動的に変化させる必要がある。そのための、学生からの入力を受け取り、動的に教材を生成する EBL システムのメインプロセスを Interaction Agent と呼ぶ。Interaction Agent の内部フローを図 7 に示した。

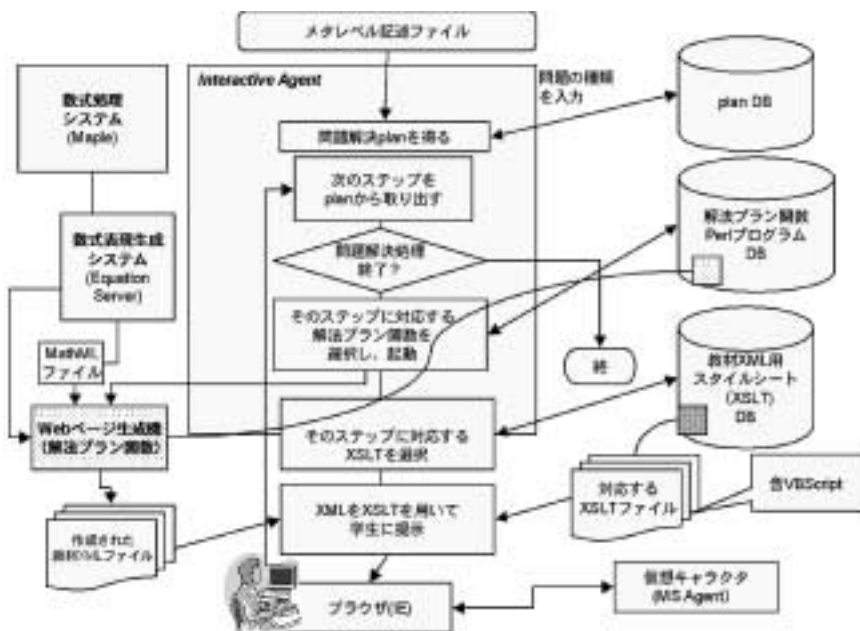


図7： Interaction Agent システムの内部フロー

我々の開発した Interaction Agent は入力されたメタレベル記述ファイルのみから、対応する XML ファイルその他の関連ファイルを自動生成する。その際に、以下のサブモジュールを必要に応じて呼び出す。

- (1) 推論エンジン (Prolog インタプリタ)
- (2) 数式処理システム (Maple¹⁵)
- (3) 数式表現生成システム (Equation Server¹⁶)
- (4) Web ページ生成機。

まず推論エンジンであるが、これは知識ベースに予め経済学関係式や数学の公式などの知識を蓄積しておき、それらの知識を知的に処理して問題解決のために利用するためのものである。現バージョンの Interaction Agent では直接、教師が問題解決に必要な関係式を、そのメタレベル記述ファイルに記載するようになっている。しかし次期バージョンでは、これらの関係式は知識ベースにルールとして格納し、Prolog を使って推論し求めたい式を導出させる予定である。現在、関係式を一般的なルールとしてどのようなスキーマで格納すべきか、関係式に関連するデータの効率的検索実現のためのメタデータ付加の方式などを検討している。

次に数式処理システムについて説明する。数式処理システムは、人間に代わって与えられた連立方程式や微積分などの数式を記号的に解くアプリケーションソフトウェアである。またグラフ描画機能や計算経過のステップバイステップ表現の作成機能などももっている。図7に示すように Interaction Agent プロセスは必要に応じて数式処理システム Maple を呼び出し、その計算結果のファイルを XML ファイルから参照している。第2節の仕様の説明にあった "More Detail" ボタンや "Graph" ボタンは、この計算結果ファイルを表示するものである。

次に数式表現生成システムを説明する。数式を Web ブラウザ上に表示することは従来、容易ではなかった。しかし近年の MathML などの技術の発達により数式を Web 表示する技術が成熟してきた¹⁷。Interactive Agent システムでは、MathML を含む各種数式表現形式ファイルを生成するため、Equation Server と呼ばれる市販のツールを用いている。Equation Server が生成した数式イメージファイルは、XML に埋め込む形で Web 上に数式を表示する。例えば、図 8 の上から 2 番目の XML ファイルの中に “” という XML タグが在るが、このタグ値として Equation Server が生成したイメージファイル名が埋め込まれている。

残る最後のサブモジュールが、Web ページ生成機である。この Web ページ生成機は Perl で我々が開発したモジュールである。図 7 を使って自動生成の流れを説明する。まずメタレベル記述ファイルが入力されると、その find 属性値 (例: max) を見て、問題の種類を判別しそれに対応する問題解決プランを得る。現在用意してある問題解決プランは、最大値を求める最適化問題、及び、最小値を求める最適化問題の 2 つである。将来、例えば、ラグランジェの未定乗数法用の Web 教材を自動生成させたい場合、ラグランジェの未定乗数法の解法プランをデータベースに登録する。

最適化問題の解法プランは、ターゲットの数式を関係式を用いて書き表し、それを一般的な数学の極値問題の解法手続きにより解く、というステップを踏む。これを問題に対して具体化したものが自動生成された個々の Web 教材のページである。最適化問題は同じ解法プランをもっているため、それを 4 個のステップに分割し 4 ページの Web で表現することとした。Iteration Agent は、各 Web ページを作成するため、それに対応する解法プラン関数 (Perl プログラム) を解法プラン関数データベース (DB) から検索し、Web ページ生成機の実行するという手順を繰り返す。この解法プラン関数には、解法のための (A) 数学的手法アルゴリズム、及び、(B) その解法過程に対応する XML タグの生成手法 (具体的にはそれを print 文で書き表す) の 2 種類が記載されている。

将来的にはこうした問題解決プランも知識として知識ベースに登録したい。現在は解法プラン関数の中に、数学的手法アルゴリズムとその XML によるプレゼンテーション生成法、の 2 種類の異なる知識が混在しているが、これを分化して、数学的手法アルゴリズムは知識ベースのルールとして登録、他方、XML によるプレゼンテーション生成法は Perl ライブラリとして整備したいと考えている。

Web 上でのプレゼンテーション方式は、予め XML のタグとして定義してある。例えば仮想キャラクタの喋りに対応する XML のタグとして「質問」、「回答」、の 2 種類のタグ “<Q>”, “<A>” が定義してあり、XML タグ値の台詞を喋るようになっている。これらのプレゼンテーション方式を Web 上でどのように具体化するかについては、XSLT スタイルシートで定義する。よって XSLT シートを変更することで、その具体的表現方法は容易に変更可能である。この XSLT スタイルシートは予め作成して、スタイルシート DB に格納してある。本 Iteration Agent システムにおいては、Microsoft Agent¹⁸ による仮想キャラクタが使用されている。Microsoft Agent の制御は VBScript プログラムによって行うが、この制御用プログラムを我々のシステムでは、XSLT スタイルシートに埋め込んである。よって、XSLT スタイルシートを変えることにより、この仮想キャラクタ自体を変更したり、どのような動作で喋るか等を変更することが可能である。

結果として、図 8 に示すような XML ファイル、数式処理システム及び数式表現生成システ

(2) Web 教材の個人化：各学生の進捗度に合わせた Web 教材の個人化を図る。

(3) 人間教師が行うような質の高い対話及びガイダンスの実現：学生の能力を伸ばす良質な対話機構をシミュレートし、仮想キャラクタ上に実現する。

現在の状況は、(1)の自動生成機能について、対象を最適化問題とした上で本機能を実現したところである。(2)及び(3)はこれからの実現目標である。(1)の自動生成機能に対しても改良すべき点は多々あり、現在、学生からのアンケート結果を元に改良法を検討している。特に問題となっている点は、「複数の関係式から求める一つの式を計算する過程が、機械的で人間にとって分かりにくい」ということである。普通人間が式の変換を順次行う様子を、システムでもシミュレートしてほしいという要望である。現在の仕様では、与えられた式及び関係式を連立方程式として一気に解いて、求める式を計算している。しかし、この方法では人間の行うようなステップバイステップな、式の変換過程は生成できない。現在、我々はこの式変換過程生成を推論エンジンによってどのように実現するか、検討している。

次に目標(2)の個人化についての e-Math システムの状況を述べる。我々は e-Math システムに学習トランザクションデータベースを付加し、学生の学習履歴をすべて記録している。e-Math の学習履歴分析モジュールでは、履歴情報をデータマイニングなどの手法により解析し、次に提示すべき教材を自動選択可能である。この際、学生が間違った原因や状況を仮想教師が解説する機能をもつ^{19,20}。この目標実現に関連した既存研究は多々ある²¹。特にハイパーメディアシステムの分野に Adaptive Hypermedia (略して AH) 分野があり、ユーザモデルを適応することでユーザに適合した Web コンテンツの見え方を変更する手法が研究されている。そこでは各種のユーザモデルや関連コンテンツを情報検索する技法が提案されている^{22,23,24,25,26,27,28}。また、教育を対象とする AH システムとして、複数の教師による作成及び編集を想定した協調的な教材開発システムも盛んに研究されている^{29,30,31}。上述した3つの目標のうち、最も研究が進んでいる分野と言えよう。

上述した3つの研究目標のうち最も実現が難しいものが(3)の教師ガイダンスの実現である。現在、我々は人工知能分野の機械学習方式による本目標の実現可能性を検討している。以上が我々の e-Math システムに関する研究の状況である。

次に目標(1)Web 教材の自動生成の関連研究について述べる。我々の Interaction Agent は、最適化問題についての Web 教材アプリケーションを、知識ベースとセマンティック Web 技術を用いることで自動生成することができた。現在こうした WWW 上のアプリケーション作成においてセマンティック Web 技術が広く使われるようになってきている。これにより、コンテンツにメタデータを付加することにより内容の意味をプログラムに理解させ、高度な意思決定処理を実現することが可能となる。これを支えるメタデータ標準として Dublin Core³², XML, RDF がある。

特に世界中で教材交換を行う場合、その互換性を保持するためメタデータ標準化は重要である。Web 教材に対するメタデータとしては、IEEE Learning Technology Standards Committee (LTSC) が Dublin Core の拡張として定義している "Learning Objects Metadata Standard" (LOM)³³, SCORM (Sharable Content Object Reference Model)³⁴, IMS (Instructional Management Systems)³⁵ などがある。SCORM は e-Learning 技術標準化団体 ADL (Advanced Distributed Learning Initiative) が、e-Learning のプラットフォームと教材コンテンツの標準規格として開発している。SCORM では、LOM メタデータを付与し、教材の再利用を高めようとしている。最新版は

SCORM Version 1.3 ドラフトであり，日本語訳は ALIC/先進学習基盤協議会の Web サイトから入手可能である³⁶。

こうした教材メタデータに基づき，RDF あるいは XSLT などの技術を使って Web 教材を自動生成する研究は多い^{37,38,39}。XSLT を用いて数学用 Web 教材を作成するシステムとしては WME40 がある。しかしこれら既存の研究では，XML ファイルに書かれたメタデータ値をそのまま利用しているものが殆どである。我々の Interaction Agent は，メタレベル記述ファイルという最低限必要な情報から，知識ベース上の公式や関係式を使い，数式や説明文などの情報を自動生成する点が新しいと言える。Interaction Agent では，自動生成されたこれらの情報が XML ファイル上に埋め込まれるが，この XML ファイルを書く作業もプログラムが人間に代わって行っている。上述した WME という数学用 Web コンテンツ自動生成システムと我々の Interaction Agent を比較すると，以下のように言える。

(1)WME は Web 化する際に XSLT 技術を用いて教師の手間を軽減するのみで，問題解決のプランを生成するなどの機能はない，及び

(2)教師がどのように対話して支援するかなど，教師の台詞の自動生成を含む対話的教材の作成機能はない。

5. まとめ

本論文では，XML，XSLT などのセマンティック Web の技術を用いて教材の自動生成をはかる e-Math Interaction Agent システムについて説明した。本システムの特長は，教師が最低限の，文章題に関するメタレベル記述を記載し，それをシステムに入力すると，自動的に XML ファイルが生成され，指定の XSLT を通して Web ブラウザ上に教材が表示される点である。一般に数学教材の Web 化は，数式の生成表示が困難なため，他の Web 教材に比較して困難と言える。その問題を解決するため，本システムでは数式処理システム Maple 及び，数式表現生成システム Equation Server を利用している。これらの機能により，教師は数学の細かい計算及び，その数式表現の Web 化に伴う煩雑な作業から解放され，さらに，コンピュータ知識がない教師でも仮想キャラクタを用いた学生との会話機能をもつ Web 教材が自動生成可能となった。本論文では，学生の視点からの本システム利用方法，及び，教師の視点からの教材作成方法を説明した後，本システムの構成と機能を概説した。本 e-Math システムの研究には 3 つの目標があるが，本論文で述べた内容は，その 1 つ目の目標である自動生成機能について，対象を最適化数学問題に限定して実現したものに過ぎない。今後の課題は多く，本研究は発展する。今後とも学生の学習を効果的に支援するシステム機能の実現を研究していきたい。

謝辞 本研究の一部は，平成 15 年度科研費基盤研究(C)(2)「マルチメディア教育支援システム eMath における教育用データベースの構築」(課題番号：15606014，代表：白田由香利)，及び，平成 14 年度(財)放送文化基金研究「マルチメディア教育支援システム e-Math における対話エージェントの試作」による。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1 W3C: XML, <http://www.w3c.org/TR/xmlschema-2/>.
- 2 Michael C. Daconta, Leo J. Obrst, Kevin T. Smith, and Leo Joseph Obrst: The Semantic Web: A Guide to the Future of Xml, Web Services, and Knowledge Management, John Wiley & Sons Inc, 2003.
- 3 W3C: XSL Transformations (XSLT) Version 1.0, W3C Recommendation 16 November 1999, <http://www.w3.org/TR/xslt>.
- 4 Thomas Passin: Semantic Web: A Field Guide, Independent Pub Group, 2003.
- 5 Yukari Shirota: "Applying XML and XSLT Techniques to Personalized Distance Learning System for Business Mathematical Education," Proc. of The International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2004), Fukuoka, Kyushu, Japan, March 29 - 31, 2004 (in printing).
- 6 Yukari Shirota: "Knowledge-Based Automation of Web-Based Learning Materials Using Semantic Web Technologies," Proc. of The Second International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing (C5), Kyoto, Japan, January 29-30, 2004 (in printing).
- 7 Yukari Shirota: "A Metadata Framework for Generating Web-Based Learning Materials," Proc. of The 2004 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2004) Workshops, Tokyo, January 26 - 30, 2004, pp.249-254.
- 8 Resource Description Framework: <http://www.w3c.org/RDF/>.
- 9 W3C: XSL Transformations (XSLT) Version 1.0, W3C Recommendation 16 November 1999, <http://www.w3.org/TR/xslt>.
- 10 Yukari Shirota: "Educational Interactive Functions of the Multimedia E-Learning System E-Math and its Database-Centered Construction Methods," Gakushuin Economics Papers, Vol.40, No. 4, Jan. 2004, pp.347-362.
- 11 Edward T. Dowling: Mathematical Methods for Business and Economics, McGRAW-HILL, 1993.
- 12 D. Downing: CALCULUS, The Easy Way ('Third Edition'), Barron's Educational Series, 1996.
- 13 D. Ebner: MATH WORD PROBLEMS, The Easy Way, Barron's Educational Series, 2002.
- 14 B. L. Bleau: Forgotten Calculus ('Third Edition'), Barron's Educational Series, 2002.
- 15 Maplesoft: Maple, <http://www.maplesoft.com/>.
- 16 Design Science: WebEQ, <http://www.dessci.com/en/products/webeq/>.
- 17 Pavi Sandhu: The MathML Handbook, Charles River Media, Inc., Hingham, Massachusetts, 2003.
- 18 Microsoft Corporation: Microsoft Agent, <http://www.microsoft.com/msagent/default.htm>.
- 19 白田由香利: 「経営数学用 Web 教材システム e-Math における対話エージェントによる教材選択および提示機能」, 日本経営数学会誌, Vol.25, No.2, pp.141-150, 2003 年 11 月。
- 20 白田由香利: 「学習履歴データベースにおけるデータマイニング関連ルールに関する考察」, 夏のデータベースワークショップ 2003 (DBWS2003) (第 131 回情報処理学会 データベースシステム研究会), 2003-DBS-131, 2003 年 7 月 16 日 ~ 18 日, 網走, pp.1-8。
- 21 Ruimin Shen, Peng Han, Fan Yang, Qiang Yang, and Joshua Zhexue Huang: "An Open Framework for Smart and Personalized Distance Learning", J. Fong et al. (Eds.): ICWL 2002, LNCS

- 2436, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 19-30, 2002.
- 22 Nicola Henze and Wolfgang Nejdl: "Knowledge Modeling for Open Adaptive Hypermedia," Proc. of the 2nd International Conf. on Adaptive Hypermedia and Adaptive Web-Based System (AH 2002), Malaga, Spain, May 2002.
 - 23 Kenneth M. Anderson and Susanne A. Sherba: "Using open hypermedia to support information integration," Proc. of OHS7 - the 7th International Workshop on Open Hypermedia Systems, held in conjunction with Hypertext 2001, Denmark, 2001.
 - 24 Peter Brusilovsky: "Methods and techniques of adaptive hypermedia," User Modeling and User Adapted Interaction, 6 (2/3), pp.87-129, 1996.
 - 25 Leslie Carr, Sean Bechhofer, Carole Goble and Wendy Hall: "Conceptual linking: Ontology-based open hypermedia," Proc. of the 10th International World wide Web Conference, Hongkong, May 2001.
 - 26 Kaj Gronbaek and Randall H. Trigg: From Web to Workplace: Designing Open Hypermedia System, MIT Press, 1999.
 - 27 Nicola Henze and Wolfgang Nejdl: "Extensible adaptive hypermedia courseware: Integrating different courses and web material," Proc. of the International Conf. on Adaptive Hypermedia and Intelligent Web-Based Systems (AH2000), Trento, Italy, 2000.
 - 28 Nicola Henze and Wolfgang Nejdl: "Adaptation in open corpus hypermedia," IJAIED Special Issue on Adaptive and Intelligent Web-Based Systems, 12, 2001.
 - 29 Tobias Kunze, Jan Brase and Wolfgang Nejdl: "Editing Learning Object Metadata: Schema Driven Input of RDF Metadata with the OLR3-Editor," Proc. of Semantic Authoring, Annotation & Knowledge Markup Workshop (SAAKM 2002) at 15th European Conf. on Artificial Intelligence, Lyon, France, July 2002.
 - 30 Changato Qu and Wolfgang Nejdl: "Towards Open Standards: the Evolution of an XML/JSP/WebDAV Based Collaborative Courseware Generating System," Proc. of the 1st International Conference on Web-based Learning, Kowloon, Hongkong, China, Aug. 2002.
 - 31 Heidrun Allert, Hadhami Dhraief, Tobias Kunze, Wolfgang Nejdl and Christoph Richter: "Instruction Models and Scenarios for an Open Learning Repository - Instructional Design and Metadata," Proc. of E-Learn 2002: World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, & Higher Education (formerly the WebNet Conference). Montreal, Canada, October 2002.
 - 32 Dublin Core Metadata Initiative (DCMI), <http://dublincore.org/>.
 - 33 Learning Technology Standards Committee of the IEEE: Draft Standard for Learning Objects Metadata IEEE P1484.12.1/D6.4.12, June 2002.
 - 34 Advanced Distributed Learning: SCORM, <http://www.adlnet.org>.
 - 35 IMS Global Learning Consortium, <http://www.imsglobal.org/>.
 - 36 ALIC/先進学習基盤協議会: ADL SCORM Version 1.3 アプリケーションプロファイル, <http://www.alic.gr.jp/>.
 - 37 Matthias Jarke: "Metadata and Personalized On-Line Learning," Proc. of The Twelfth International World Wide Web Conference, W3C, 20-24 May 2003, Budapest, Hungary.
 - 38 Johann Gamper, Judith Knapp: "A Data Model and its Implementation for a Language Learning

- System,” Proc. of The Twelfth International World Wide Web Conference, W3C, 20-24 May 2003, Budapest, Hungary.
- 39 Mohammed A. Razek, Claude Frasson, and Marc Kaltenbach: “A Context-Based Information Agent for Supporting Intelligent Distance Learning Environments,” Proc. of The Twelfth International World Wide Web Conference, W3C, 20-24 May 2003, Budapest, Hungary.
- 40 Paul S. Wang, Norbert Kajler, Yi Zhou, Xiao Zou: “WME: towards a web for mathematics education,” Proc. of ISSAC 2003, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 258-265, August 3-6, 2003.