

Sakai 上のプログラミング教育支援システム

A learning support system for programming using Sakai

藤井聡一郎^{*1}, 小芦勇介^{*1}, 山田悠^{*1}, 山下美穂^{*1}, 玉木久夫^{*1}

^{*1} 明治大学

あらまし：明治大学工学部情報科学科では，2009 年度からプログラミングの実習に Sakai を利用し独自に開発したプログラミング教育用システムを使用している．このシステムは，Sakai 上で複数のコンポーネントが連携して動作することで一つのシステムを構成している．本報告では，開発したシステムの特長や，システムを構成する個々のコンポーネントについて紹介する．

キーワード：e-Learning，Programming，Algorithmic feedback，オープンソース CMS，Sakai

1 はじめに

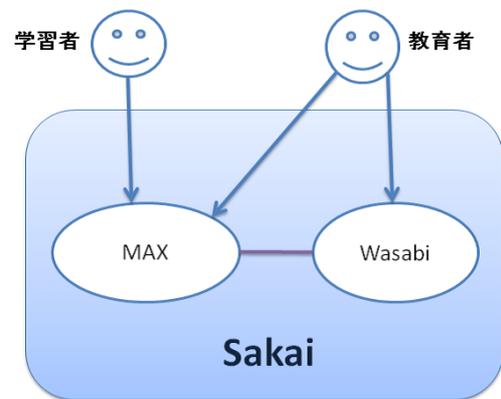
明治大学工学部情報科学科では，2005 年度から C 言語の実習に独自に開発した MAX/C という e-ラーニングシステムを利用している．2009 年度には MAX/C と Sakai の統合を行い，Sakai の持つ機能を利用することが可能となった．また，同年度の実習では Sakai と統合をしたこのシステムを運用し，そこで得られたユーザのフィードバックをもとに更なる改良を進めている．明治大学計算理論研究室では MAX/C の他にも Sakai を利用したプログラミング教育支援システムの開発を進めており，それらについても紹介する．

2 システムの概要

MAX/C は C 言語の教育支援を目的としたシステムである．MAX/C の持つ主な機能は，C 言語を学習するための問題の提供と，教育者向けの学習状況や問題を管理する機能である．MAX/C を Sakai と統合する際に Wasabi と MAX という二つのコンポーネントに分離した．Wasabi はプログラミング教育用問題を提供するシステムで，問題の出題，回答チェック，間違えに応じたフィードバックの生成などの機能を持つ．MAX は Wasabi の提供する問題を利用して学習コースを作成し管理するためのシステムで，学習者の提出状況の確認や，学習者間または学習者と教育者の間のコミュニケーションをサポートするような機能を持つ．システム全体は Sakai を利用して構築されており，Wasabi と MAX が Sakai 上で連携して動作する形態となっている（図 1）．

システムを構築するプラットフォームとして Sakai を導入したことにより，Sakai の持つ多くの機能が利用できるようになった．また，新たな機能の追加も Sakai のプラッ

図 1 システムの連携



トフォームを用いることで容易に行えるようになった．この特長を用いて，Java 用の学習支援システム MAX/Java や，学習者の C 言語に対する理解度をモデル化してそれをもとに問題を推薦する MILES というシステムの開発を進めている．これらのシステムも今回構築したシステムの一部として Sakai 上で連携して動作する構成となっている．

3 Wasabi

3.1 概要

Wasabi はプログラミング教育用問題を提供するシステムであり，本研究で構築したシステムを構成するコンポーネントの一つで，Sakai の機能として実装されている．このシステムは旧 MAX/C の問題提供部分を抽出したもので，問題提供部分を分離したことにより，MAX/C 以外の他のシステムでも問題を共有できるようになり，問題資源の再利用性が高まった．

3.2 問題の提供

Wasabi の提供する問題には，選択肢の中から正しいものを選ぶ選択問題，C 言語のプログラム片の実行順序をト

レースさせ、その動作内容を記述させるトレース問題、C言語のプログラムを提出させてサーバ側でチェックするプログラム問題の3つがある。プログラム問題では、提出されたソースコードに対する静的チェックと実際にプログラムを実行させて出力を検査する動的チェックが可能である。

図2は、7のべき乗の表を出力するプログラムを作成させるプログラム問題の画面である。

図2 プログラム問題の画面

べき乗の表

問題

7の乗を $i = 0$ から $i = 5$ まで示す表を作成するプログラムを書いてください。出力は

```
7^0 = 1
7^1 = 7
7^2 = 49
```

の要領で、5乗まで続きます。答えを自分で計算してしまうのではなく、次の要領で、プログラムに計算させるようにしてください。

- (1)変数 p に1を代入する。
- (2) $7^0 = 1$ に続けて p の値を出力して改行する。
- (3) p の値を7倍する。
- (4) $7^1 = 7$ に続けて p の値を出力して改行する。
- (5) p の値を7倍する。
- (6) $7^2 = 49$ に続けて p の値を出力して改行する。

以下、これを7の5乗の出力を行うまで、繰り返す。

printfの呼び出しを6回書くことになります。

提出

ファイルができたら、「参照」ボタンを使ってそのファイルを選び、「upload」ボタンを使って提出してください。

Input file name: 選択されていません

提出には少し時間がかかる場合があります。あわてずに提出確認の画面になるまで待ってください。

3.3 問題の管理

Wasabiの特長は、問題管理のしやすさを重視している点である。旧MAX/Cの提供するプログラム問題には、静的チェックと動的チェックを行うものがあったが、この形式の問題はきめ細やかなチェックが可能な反面、問題の作成に手間がかかる。Wasabiでは問題の作りやすさとチェックのきめ細やかさを両立させるため、問題作成者のニーズに合うような問題形式を複数用意している。旧MAX/Cの提供する形式の問題はきめ細かいチェックが可能だが問題作成に手間がかかってしまうものだったが、チェックは簡易的なもので済ませるかわりに問題作成が容易にできる形式のものなどを新たに用意し、問題作成者が自分のニーズに合った形式の問題を使用することにより問題作成の負担を軽減できるようになっている。

実際にWasabiの提供している問題形式をいくつか紹介する。

● MAX/C Problem

MAX/C Problemは提出されたC言語のソースファイルに対して静的チェックと動的チェックを行うプログラム問題の形式である。動的チェックではチェック用のロジックを記述したプログラムを用いて回答チェックを行うため、複雑なチェックが可能となっている。提出プログラムの実行には独自に開発したイン

タープリターを用いることにより、実行時の詳細な情報を得ることができる。

問題を作成する際には静的解析に用いるパターンを記述したxmlファイルと、動的チェックのためのロジックを記述したJavaのクラスファイルが必要となる。細かいチェックが可能な反面、問題作成の敷居が高い形式である。

● Simple Problem

Simple Problemは入力とそれに対する答えが一対一に対応するような問題のためのプログラム問題の形式で、問題作成の際には回答チェックに使用するためのテストデータを記述したxmlファイルが必要となる。この形式では回答チェック用のプログラムが不要なため問題の作成が容易に行えるが、入力に対する答えが一意に定まらないような複雑な問題のチェックは不可能という欠点がある。問題の作りやすさを重視した形式である。

● Simple Drill Problem

Simple Drill Problemは与えられた選択肢から正解を選択する選択問題のための形式である。問題作成には回答の入力フォームを記述したhtmlファイルと正解の選択肢のリストを記述したxmlファイルを用意する。

● CTrace Drill Problem

CTrace Drill ProblemはC言語のプログラム片の実行順序をトレースさせるトレース問題の形式である。トレース問題には、プログラムの出力する行を入力させる問題とプログラムの実行時に起こった代入の内容を入力させる問題の2種類があり、後者はさらに代入された値のみを入力させるものと、代入の対象となる変数名と代入された値の対を入力させるものに分かれる。問題内容は乱数により自動生成され、同じ問題でも反復学習が可能となっている。

問題作成にはトレースするプログラム片を記述したJavaのチェック用クラスを用意する。それを元に問題内容の生成と回答チェックが自動で行われるようになっている。

図3はfor文を使って総和を求めるプログラムをトレースする問題の画面である。

ここで紹介した形式以外にもJava用の問題が用意されている。詳しくはMAX/Javaで紹介する。

3.4 他システムとの連携

Wasabiでは上記のように複数の形式の問題を提供しているが、これらを扱うための問題のインターフェースは統一されている。これによりWasabiを利用するシステムは問題の形式の違いを意識せず、異なる形式の問題を同じよ

図 3 トレース問題の画面

総和(トレース)

問題

繰り返しを用いて数の総和を求めるパターンです。
次のようなプログラム片を考えます。

```

{
  sum = 0;
  for (i = m; i <= n; i = i + 1)
    sum = sum + i * i;
}
    
```

変数の値が

m n

である状態から、このプログラム片を実行したときに起きる 代入のすべてを順番に記入してください。欄は必要なだけ使い、あまった欄は空欄のままにしてください。

第1回の代入 代入対象の変数:	<input type="text"/>	代入される値:	<input type="text"/>
第2回の代入 代入対象の変数:	<input type="text"/>	代入される値:	<input type="text"/>
第3回の代入 代入対象の変数:	<input type="text"/>	代入される値:	<input type="text"/>
第4回の代入 代入対象の変数:	<input type="text"/>	代入される値:	<input type="text"/>
第5回の代入 代入対象の変数:	<input type="text"/>	代入される値:	<input type="text"/>
第6回の代入 代入対象の変数:	<input type="text"/>	代入される値:	<input type="text"/>

うに扱えるようになっていいる。また、新たな形式の問題を追加する際にも、このインターフェースに従って実装すれば Wasabi を使うシステム側で新たな形式の問題に対応するための修正を加える必要はない。

Wasabi は他システムと連携して使用されることを想定している。Sakai の機能間での API を介した連携方法の他にも Web サービスとして Sakai 外のシステムと連携する方法が用意されており、幅広いシステムとの連携が可能となっている。

4 MAX

4.1 概要

MAX は学習コースの管理やユーザ間のコミュニケーションのサポートを行うためのシステムで、Wasabi と同様に本研究で構築したシステムを構成するコンポーネントの一つで、Sakai の機能として実装されている。

このシステムは MAX/C のコース管理部分を抽出したもので、Wasabi とともに利用することによりコース管理機能を持った C 言語学習システムを構築することが可能である。

4.2 システムの機能

MAX の持つ機能には、問題の階層化や提出データの記録などのコース管理機能や、ユーザ間のコミュニケーションをサポートする機能がある。

図 4 は Wasabi の提供する問題を階層化して表示している画面である。学習者はここから学習したい分野の問題を選ぶ。

図 5 は実習室の学生の進捗状況を色分けして表示している画面である。教員はこの画面を元につまづいている学生

図 4 問題の階層化画面

に対して積極的に指導を行うことができる。

図 5 進捗状況の可視化

5 MAX/Java

5.1 概要

MAX/Java は、プログラミング言語 Java によるオブジェクト指向の学習を目的とした、web 上で動作する学習システムである。MAX/C と同様に Sakai 上で稼働可能であり、Wasabi に用意されている問題管理の機能を利用している。

5.2 ユーザとシステムの役割

システムを利用する学生は、ブラウザから Sakai にログインし、MAX/Java にアクセスする。与えられた課題の問題文を閲覧し、題意に沿ったプログラムの作成を行い、自分のコンピュータ上でコンパイル、実行、動作が正しいことを確認する。プログラムが完成したら、課題が表示されていたページに用意されているフォームからファイルを提出する。プログラムが正しいか、つまり題意に沿っているかどうかについては、すぐにフィードバックとしてメッセージが表示される。メッセージは、以下の 4 通りが基本の形として用意されている。

- 「完了です。」
- 「コンパイルエラーです。(以下コンパイルメッセー

ジ)」

- 「タイムアウトしました。」
- 「テストに失敗しました。(以下テスト実行時の例外メッセージ)」

これらの他にも、問題ごとに細かいフィードバックを作成することが可能となっている。

教員は、問題を作成するにあたって、問題文とテストクラスを作成する必要がある。問題文は HTML 形式で記述すれば、あらかじめ用意されている問題表示ページの中へ埋め込まれる。テストクラスは、システムが学生から提出されたプログラムの正しさを確認する際に用いられるものである。このテストクラスの作成方法は 2 通りある。1 つは JUnit を用いたクラスを作成する方法、もう 1 つはこちらで用意した `OutputTest` インタフェースを実装する方法である。テストクラスの作成方法に関わらず、テストは JUnit に用意された機能で行われる。この機能を利用するにあたって指定するテストクラス群に、学生が提出したプログラムのクラスと、教員が作成したテストクラスを含ませればよい。

5.3 問題モデル

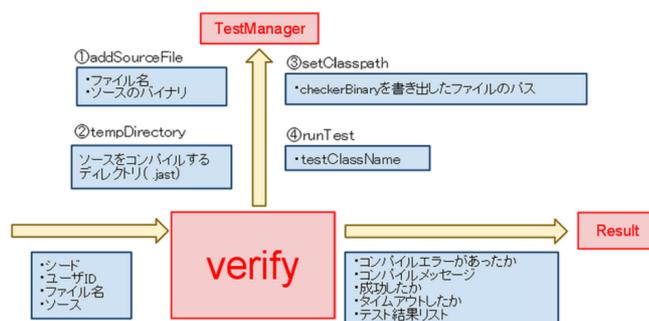
問題は、`MaxJavaProblem` クラスというモデルとして扱われる。`MAX/C` などのモデルと同じく、`ProgramProblem` インタフェースを実装しているため、`Wasabi` はこれらのさまざまな問題形式に対して同様な管理、処理を行うことができる。例えば `Wasabi` に用意されている、問題の登録や削除、カテゴリ管理などの機能をそのまま利用することができる。

このクラスは問題ごとに用意されており、保持している情報は、問題のタイトル、問題文、テストクラスのバイナリが主である。また、`verify` メソッドを持っており、学生から提出されたプログラムを受け取って結果を返すという処理は、このメソッドで行われる。これについても、ブラウザ上で見ることのできるフィードバックは他の問題形式と同様な表記方法が可能となる。

5.4 テスト

テストの処理では、今回の `MAX/Java` の構築を想定して作られたテストツールである、`JAST`[2] の一部を流用した。テストは、まずモデル内の `verify` メソッドが `TestManager` クラスを呼び出し、提出されたプログラムやコンパイルを行うディレクトリなどを指定する。そして `TestManager` は、提出されたプログラムをコンパイルし、まずコンパイルエラーがないかどうかを確認する。コンパイルが正しく実行されたら、JUnit に用意された機能を用いてテストを実行する。このとき、テストにクラスファイルを複数含ませることができるのだが、ここで提出されたプログラムのクラスファイルと、問題作成時に用意されたテストクラス

図 6 テストの流れ



を含ませることによって、教員が指定した方法でのテストが提出されたプログラムに対して行われる。

テストの流れを図 6 に示す。

テストクラスの作成方法として先に挙げた 2 つの方法のうち、こちらで用意した `OutputTest` インタフェースを実装する方法は、単純な入出力のみのテストを行う際に選択する。このインタフェースでは、複数の入力データを配列で返すメソッド、何回目のテストでどのような出力が期待されるか、また出力が期待どおりでなかった場合にどのようなフィードバックのメッセージを返すか、などの入出力の整合を行うメソッドを主に実装する。JUnit を用いたものは、提出プログラムを実行するだけでなく、特定のメソッドの呼び出しなどでもできるため、テスト方法をより細かく指定することができる。

5.5 ユーザインタフェース

`MAX/Java` を利用するにあたって、学生は問題の閲覧とその解答としてのプログラムを提出する必要があり、教員は問題を作成する必要がある。そのため、`Sakai` で推奨されており、現在 `MAX/C` でも用いられているフレームワーク `Wicket` を用いて、ユーザインタフェースの部分をウェブページとして作成した。

教員のための、問題編集ページでは、必要な情報をフォームに入力し、問題の新規登録を行う。既に登録されている問題を編集する場合は、フォームにその問題の情報が表示されるので、必要な箇所に変更を加えて保存する。この際、問題文やテストクラスの `jar` ファイルなどを保持したモデルを生成し、データベースに保存を行うなどの処理は、`Wasabi` が問題管理の処理として行っている。

学生のための、問題閲覧ページでは、問題文とプログラム提出用のフォームを表示する。これにおいても、問題文など問題に関する情報のデータベースからの取得は、`Wasabi` が問題管理の処理として行っている。問題編集、問題閲覧ともに記述は `MAX/C` など他の問題形式とほぼ同様だが、`Java` では提出するファイルが複数存在する場合が多い。

図 7 提出したソースファイルの確認画面

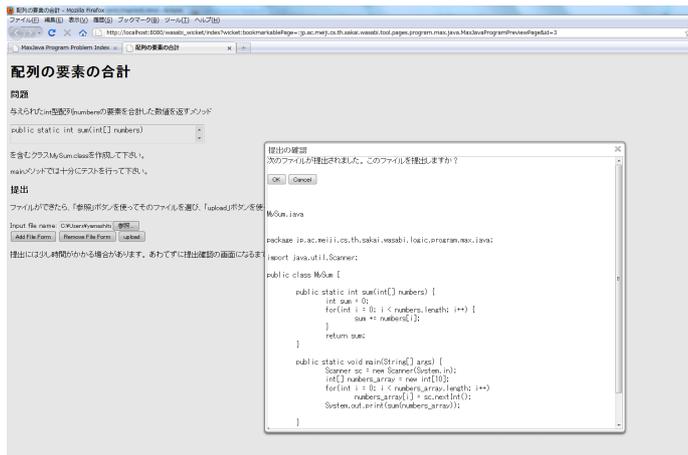
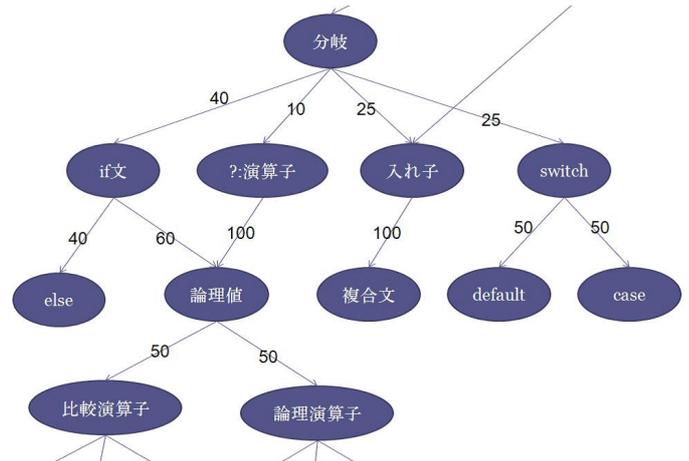


図 8 理解度モデルの例



よって複数のファイルを提出するために、ファイルの提出フォームの数を増減させるボタンを用意した。学生は、提出するファイルの数に応じてフォームの数を決め、それからファイルを提出する。

フォームから送信すると、図 7 のように提出したソースファイルの内容が表示される。ファイル内容を確認し「OK」を押すと、システム側でテストが実行され、メッセージがフィードバックとして表示される。

6 MILES

6.1 概要

MILES とは C 言語学習を支援するためのシステムである。利用者の C 言語に対する理解度をモデル化して、それをもとに解かせる問題を動的に決定するという特徴を持つ。常に利用者のレベルに見合った問題が提供されることになるので、現行の MAX を使った学習より学習効率が向上すると期待できる。MILES の問題管理には Wasabi を利用しているため、MAX が利用している問題をそのまま利用できるほか、独自に問題を追加することができる。

6.2 実現方法

以上の特徴を持つ MILES というシステムをどのように構築しようとしているか、理解度モデルと推薦エンジンについて述べる。

6.2.1 理解度モデル

理解度モデルは、重み付きの有向無閉路グラフで表現される。グラフのノードは成績要素と呼ばれる。成績要素とは、構文 (if, for など) や、それらを抽象化したもの (分岐, 繰り返しなど) から成り、C 言語学習に必要と思われる要素を主観的に抽出したものである。そして、ノード同士の関連を表すのが有向辺でその重みは関連の強さを表す。各ノードのバリューとしてその成績要素の得点を持たせる。例えば、プログラムの「分岐」という知識に着目したとき

図 8 のような理解度モデルが考えられる。

6.2.2 推薦エンジン

推薦エンジンとは、利用者へ推薦する問題を決定するものである。決定に利用されるデータは主に、理解度モデルと付与データである。付与データとは、MILES が Wasabi で管理されている各問題に対して独自に持っているデータで、

1. その問題を解く際に必要と思われる成績要素の点数の上限, 下限 (ノルマ)
2. その問題を解くことで理解できると思われる成績要素の得点 (ポイント)

の 2 つからなる。付与データが無い問題は、MILES の推薦対象とすることができない。推薦のアルゴリズムには色々なものが考えられる。現段階では、ノルマに設定されている各成績要素に対して、利用者の理解度モデルのバリューがノルマの中におさまっている、または近いものを推薦するようにしている。具体例を挙げる。成績要素の得点の上限が 10000 点だと仮定する。「整数値の入力を 1 つ受け取り、それが 50 より大きいかわ小さいかもしくは等しいかを判定するプログラムを書け」という問題に対して付与データは図 9 のように作られたとする。

まず、得点データとして「if 文」という成績要素に対して 2000 点をつけている。これは、この問題を解いた利用者は「if 文」の基本的な使い方ができている、と付与データ作成者が考えたためである。次にノルマデータを見てみる。付与データ作成者は「if 文」について全く知らない、もしくはとても苦手としている利用者に対してこの問題が相応しいと考えたため、0 点 ~ 1800 点という範囲をつけている。「scanf()」に対しては 4000 点 ~ 10000 点という範囲をつけている。これは、利用者は scanf 関数がある程度は使えるという前提を置きたいと付与データ作成者が考えたため

図9 問題付与データの例

Problem Data Problem ID: 1	
成績要素	Point
If文	2000
成績要素	Norma
If文	0 ~ 1800
scanf()	4000 ~ 10000

ある。まとめると、この問題は、scanf 関数がある程度使える知識を持ったうえで、if 文の初心者もしくは if 文を苦手としているような人物に対して推薦がなされることになる。

これ以外の推薦アルゴリズムを考え、実装していくのが今後の課題である。

6.2.3 理解度モデルの更新方法

理解度モデルは問題を解くと更新される。この更新方法は様々な方法が考えられる。現在は、解いた問題の付与データのポイントに設定されている各成績要素の得点に、理解度モデルの得点を近付けるようにする方法をとっている。また、それと共に、関連のある成績要素の得点も更新される。

6.2.4 MILES のデータ編集ツール edit_miles

MILES の各種データを設定するための edit_miles という編集用ツールがある。edit_miles は、MILES の編集用に作られたツールであり、前述した成績要素の編集、理解度モデルの編集、付与データの編集ができるようになっている。

6.2.5 MILES の現状

現在 MILES は、付与データを揃えれば、稼働可能な状態となっている。実際に来年度では、MAX/C に付随する形として稼働をし、実験データを集めていこうと考えている。MILES と学生側からのアプローチとして、MAX/C との違いは勿論問題の選択の部分である。MILES では、「新しい推薦問題を取得」というボタンを用意した。学生はこのボタンを押すことで、そのときのモデルにあった問題を MILES 側で推薦し、学生へと提供することにしている。また、そこからの学生へのアプローチは MAX/C と同じである。推薦された問題の中から学生が自分で問題を選び出し、Wasabi 用意されている問題のページへと進む。そこで、学生は問題に合ったプログラムを作成、コンパイル、テストをし、回答ができたならプログラムソースを提出する流れとなっている。このときの回答チェックの結果によって、MILES 側で理解度モデルを更新する。

7 おわりに

本報告では、独自に開発した Sakai を利用したプログラミング教育支援システムの紹介をした。システムの構築には Sakai を利用し、複数のシステムが Sakai 上で連携するという構成をとっている。システムの構築に Sakai を利用することで、新たな機能の追加が容易に行えるようになり、その特長を用いてシステムに新たな機能の追加を行った。

システムを構成するコンポーネントは、プログラミング教育用の問題の提供と管理を行うためのシステム Wasabi、学習状況の閲覧や学習コースの管理を行うためのシステム MAX、Java 学習用システム MAX/Java、利用者の理解度モデルに基づき問題を推薦する MILES である。これらのシステムが Sakai 上で協調して動作し、一つのシステムを構築している。

参考文献

- [1] 藤井聡一郎, 大久保和則, 玉木久夫. MAX/C on Sakai - A Web-based C-Programming Course. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Supported Education*, pp. 196-201, 2010.
- [2] 大久保和則. プログラミング教育用 Web アプリケーション構築基盤の開発. Master's thesis, 明治大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻情報科学系, 2009 年度.