

計算機アーキテクチャ教育用ビジュアルシミュレータの組み込みメール機能

今井 慈 郎[†] 金子 敬 一^{††} 中川 正 樹^{††}

本論文は、計算機アーキテクチャ教育用のビジュアルシミュレータ VisuSim への組み込みメール機能の開発とその効果について述べる。VisuSim は、Java で記述された計算機シミュレータであり、アセンブリ言語プログラムのシミュレーション機能、ノイマン型計算機の内部構造や動作の可視化機能、学習支援機能および組み込みメール機能 (VisuSim メール) を有する。VisuSim メールは、学習者が指導者に質問とともに自身の VisuSim における任意の実行中間状態を送信することを可能にする。指導者は、VisuSim メールを使用することで、無関係なメールに煩わされることなく、学習者からの質問に対して、自身の VisuSim 上に学習者の VisuSim の実行中間状態を再現して、質問に答えることができる。学習環境に適切な情報伝達手段を統合することで、指導者と学習者は学習状況の具体的な情報を共有でき、質問の意図を的確に理解し、適切なアドバイスが可能となる。VisuSim および VisuSim メールを実際の「計算機アーキテクチャ」の授業で利用した結果、VisuSim メールを利用した場合としなかった場合で成績に有意差が認められた。

A Built-in E-mail Function of a Visual Simulator for Computer Architecture Education

YOSHIRO IMAI,[†] KEIICHI KANEKO^{††} and MASAKI NAKAGAWA^{††}

This paper presents development and effect of a built-in e-mail function in a visual simulator (VisuSim) for computer architecture education. VisuSim written in Java has a function of simulating an assembly language program, a function of visually showing internal states and execution of a von Neumann type computer, yet another function of on-line help and the built-in e-mail function named VisuSim Mail. VisuSim Mail enables a learner to attach a snapshot of VisuSim's execution to his/her question and send it to a teacher. The teacher can answer the question after restoring the VisuSim's snapshot sent from the learner without being annoyed by other irrelevant e-mails. By combining the appropriate communication medium to the learning system, the learner and the teacher are able to share the concrete information on the learner's state and the teacher can advise the learner with appropriate suggestions after understanding the exact intention of the question. We employed VisuSim Mail with VisuSim for a real Computer Architecture course and confirmed significant difference between the scores by those who utilized VisuSim Mail and the scores by others.

1. はじめに

近年、重要性を増した IT 教育において、計算機内部の理解が深まることで、計算機に関する応用能力が向上する。情報系の高等教育では、計算機の機能を把握するうえでノイマン型計算機の特徴や構造、内部動作などを理解することは重要である。これは、計算機アーキテクチャ教育に課せられた大きなミッションとなっている。計算機の構造や内部動作を具体的に理解

させるため、シミュレータを導入して計算機教育の効果をあげようという試みはこれまでいくつかあった。計算機アーキテクチャ教育の分野に限っても、複数の研究がなされている^{1)~5),(7),(9),(12)}。

計算機教育に限らず、e-Learning を導入することで、時間や場所によらない学習環境を確保できる^{2),(10),(12)}。一方、学習効果を高めるためには、適切な指導が不可欠となる。そのためには、学習者と指導者の間に有効な情報伝達手段の確保が必要となる。対面教育の重要性を認め、e-Learning と組み合わせるブレンディッドラーニング (Blended Learning)⁸⁾ という手法が注目されているのも、このような理由からであろう。同様に、e-Learning でも、学習者と指導者の間に有効な情

[†] 香川大学

Kagawa University

^{††} 東京農工大学

Tokyo University of Agriculture and Technology

報伝達手段があれば、学習効果を向上させることができる。

一般に、メール機能を利用すれば、非同期に学習者と指導者間で情報を伝達でき、両者が時間的、空間的に離れていても情報を交換できる。計算機アーキテクチャ教育用の e-Learning においても、この点に着目し、メール機能などを活用する研究がなされている^{2),6)}。しかし、通常のメールを利用するだけでは、指導者に、学習者の状況を正確に伝えることが難しく、両者間で状況認識に差異を生じ、情報を共有することが困難となる。

シミュレータなど e-Learning に利用される学習環境に、専用のメール機能を組み込むことで、学習環境と情報伝達手段とを統合する方式が考えられる。その利点は次のように要約できる。まず、学習環境と情報伝達手段が統合されているので、学習者は自身の状況を簡単に、指導者に送信できるという利点がある。その結果、質問が詳細かつ具体的になり、指導者に、学習者の質問の意図を明確に伝えることができる。一方、指導者は、学習者からの質問だけを受信できるという利点がある。たとえば、学習環境と統合されたメール機能であれば、メールを受信した指導者側で、質問の内容を基に、学習者の状況をかなり正確に再現でき、的確な答えやアドバイスを同様のメール機能を使用して返信することが可能となる。

本論文では、学習環境として計算機シミュレータを取り上げ、専用のメール機能を組み込み、実際の講義に適用して、その効果を論じる。

視覚化に基づく計算機教育用シミュレータの先行事例として、ED9900¹⁾、MARIE⁵⁾、キャッシュシミュレータ¹²⁾、ED21⁹⁾、SimulNet²⁾ などがある。このうち前の4つのシミュレータは、通信機能を持たない。一方、SimulNet は、メール (SimulNet Mail Tool)、掲示板 (SimulNet Bulletin Board)、およびチャット (SimulNet Multi-talk) といった3つの通信機能を提供している点では、本研究よりも進んでいる。しかしながら、SimulNet は、メールにプログラムコードや内部実行状態を追記して送受信できる機能は持たない。このため、本研究の目的である容易に他者の状況を再現できる通信手段を提供することを達成することはできない。また、SimulNet を紹介している文献²⁾でもメールを活用した情報交換は、他の掲示板やチャットよりも利用頻度が高い、と結論づけられていたことから、本研究においてメール機能を優先したことの正しさを裏付けていると考える。

以下、2章では、計算機シミュレータである Visu-

Sim^{7),13)} について紹介する。3章では、VisuSim のメール機能 (VisuSim メール) について詳述する。4章では、VisuSim メールを備えた VisuSim による計算機アーキテクチャ教育の実際とその効果について示す。最後に、5章では、まとめと今後の課題について述べる。

2. 計算機シミュレータ VisuSim

本章では、計算機アーキテクチャ教育を支援するために開発した計算機シミュレータである VisuSim について述べる。VisuSim の命令セットは大別すると、停止などの制御命令群、分岐命令群、算術論理演算命令群、メモリデータ転送命令群およびスタック制御命令群からなる。これらの命令群を使用することで、条件分岐、多重ループ処理、サブルーチン呼び出しなどのアセンブリ言語プログラムを記述することができる。VisuSim は Java で実装しているため、Windows/Linux 上の Java スタンドアローンアプリケーション (以下 Java アプリケーションと略記) としても、Web ブラウザ上の Java アプレットとしても動作し、ほとんどすべてのユーザ環境で稼働させることができる^{7),13)}。以下、VisuSim の GUI と可視化機能を示し、次に、自学自習型教材として必要となるオンラインのヘルプ機能やプログラムの参照機能について述べる。

2.1 VisuSim の可視化機能

図1に VisuSim の GUI を示す。これは、制御画面であると同時に、VisuSim 内部の構造や動作を可視化する。このウィンドウ内の、初期化、プログラムのロード、ステップ実行、連続実行などの制御ボタン

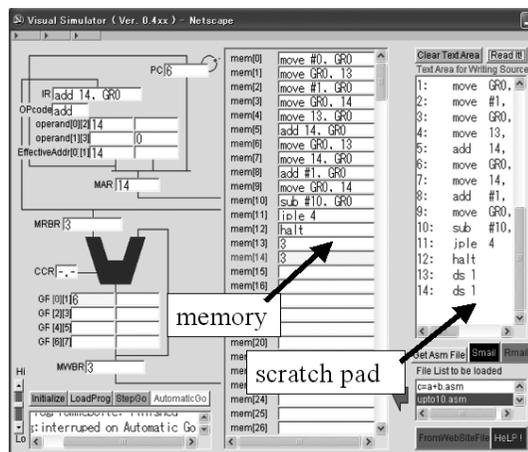


図1 計算機シミュレータ VisuSim の GUI

Fig.1 GUI of a computer simulator VisuSim.

をクリックすることで、レジスタトランスフェレレベルの内部動作を表示する。たとえば、命令サイクルごとに、プログラムカウンタや汎用レジスタが動作する様子や、命令レジスタやメモリレジスタなどの内部レジスタが更新される様子を視覚的に表示する。

2.2 ヘルプ機能とプログラム参照機能

VisuSim は、自学自習に有用なオンラインのヘルプ機能やプログラム参照機能を提供する。学習者にとって、VisuSim の命令セット、その利用法などの情報を提供する機能がヘルプ機能である。学習者によってウィンドウ内のヘルプボタンをクリックされると、VisuSim は、ダウンロード元の Web サーバに対し、HTTP ベースの照会要求を送信し、情報を取得し、オンラインヘルプメッセージウィンドウ上に表示する。

一方、プログラム参照機能は、あらかじめ指導者によって用意された教材プログラムから、1つを選んでダウンロードする機能である。ヘルプ機能と同様、Web サーバにアクセスし、参照すべきプログラムファイルを取得する。これにより、学習者はプログラムをゼロから作らなくても、参照すべきプログラムを簡単に入手でき、また、指導者は学習者の進度に応じて、参照可能なプログラム群をあらかじめ選別して用意することもできる。

手順は、次のとおりである。まず、選択可能な教材プログラムのリストを確認し、ダウンロードしたいプログラム名を指定する。次に、ダウンロード先として、メモリかスクラッチパッドかを指定する(図1を参照)。スクラッチパッドにおいては、学習者はコメントも含めてプログラムの内容を確認することができる。そして、プログラムを実行するためには、スクラッチパッドからメモリに転送する。その後、VisuSim により、ステップ実行あるいは連続実行させることができる。学習者が自身で作成したプログラムを VisuSim に実行させる場合も、スクラッチパッドにプログラムを書き込み、メモリに転送して実行させる。

3. VisuSim のメール機能

本章では、初期 VisuSim の問題を述べ、必要な機能を明確化する。次に、機能追加のプロセスに触れつつ、VisuSim の改良について、VisuSim メール追加実装を中心に詳述する。

3.1 VisuSim メールの必要性

2章で述べたオンラインのヘルプ機能やプログラムの参照機能を活用することで、自学自習形式の計算機アーキテクチャ教材として利用できると期待して、VisuSim の提供を開始した。しかし、実際に使用する

ことで、問題点が明らかになり、機能追加が避けられない状況となった。問題点は、次の2つの事例に代表される。すなわち、VisuSim を使用した学習者となる学生から寄せられた典型的な意見と、学生を指導した教師からの要求である。

● 学習者からの意見

学習者は集団で VisuSim を使用している学生の一人ひとりである。演習中なので、教師や TA が教室内にいて指導してくれる。しかし、自身のデバッグ状況を正確に伝える手段がないので、どこに問題があるかを教師や TA などの指導者に説明できず、集団という状況なので、ついつい質問も億劫になり、理解できないまま、独力での問題解決を諦めてしまう。結局、友人のプログラムを真似てレポートとして提出した。指導者に、自身の陥っている状況を正確に伝え、それに即したアドバイスが得られれば、苦手意識も払拭できたのと思うと残念でならなかった。

● 指導者からの要求

VisuSim を使用する演習では、教師として、学生の理解をいかに把握するかが重要になる。同時に、どうすれば適切な指導ができるかについても工夫が必要となる。たとえば、ある状況で迷路に陥っている学生に、その状況に即した例題や解決方法などの情報を伝えること、情報伝達自体も迅速であること、学習者のやる気を育てるためのやりとりができること、などは学習効果の成否を左右するため、情報伝達手段は不可欠の要素となる。

紹介した事例はいずれも、学習者が指導者に、あるいは指導者が個別の学習者に情報を伝達できれば便利であること、逆に適当な伝達手段がないと学習効果が著しく損なわれる事例となっており、適切な情報伝達機能の提供は不可欠であるという結論に集約される。すなわち、情報伝達機能として、検討すべきは、情報を伝達することは、通常的手段、すなわち通常のメール機能などで十分か否か、もし特殊な機能が必要なら、どのような情報を伝達したいか、伝達は誰から誰への情報伝達か、である。指導者にとって、学習者が、課題をどのように解いているかの情報を入手できれば、学生一人ひとりの理解状況を把握することも可能となる。そのうえで、学習者ごとに、課題を少しずつ修正して与えることもできる。

情報共有の手法としては、メール機能以外にも WWW による掲示板の活用なども有効である。情報共有を実現するうえで、両者を比較すると、前者は VisuSim 自体への機能追加で実現でき、後者はサーバ

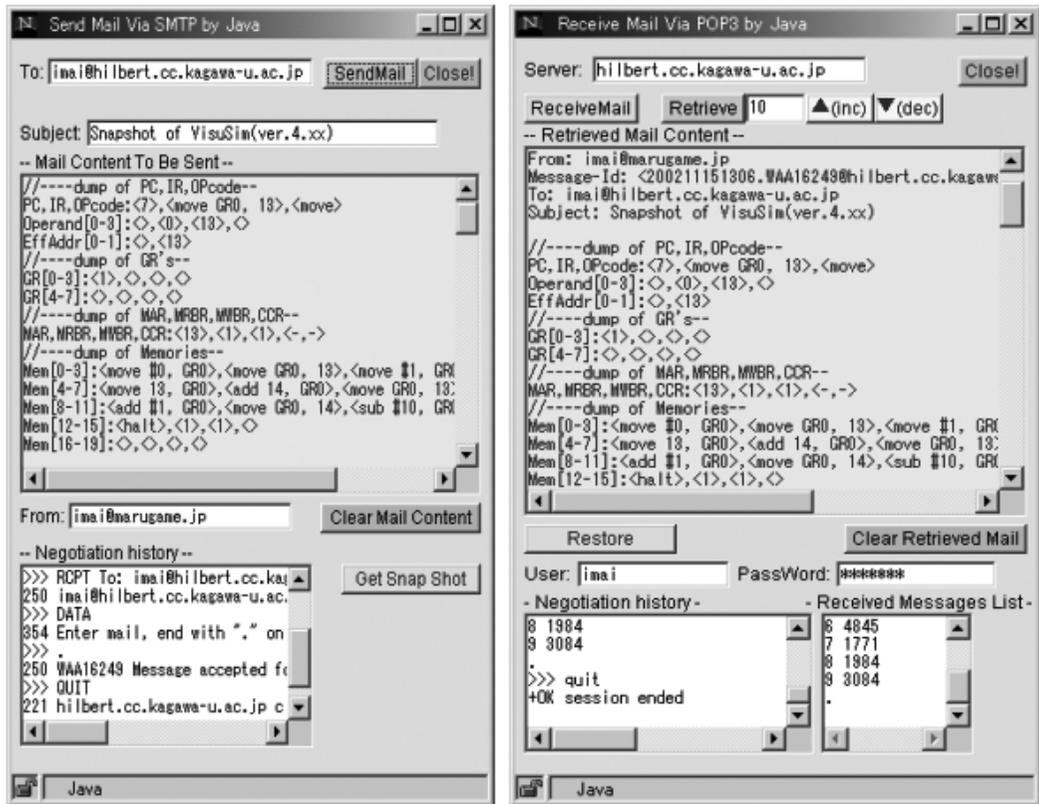


図 2 VisuSim メールの SMTP クライアント (左側) と POP3 クライアント (右側)

Fig. 2 SMTP-client (left-hand side) and POP3-client (right-hand side) of VisuSim Mail.

側への機能追加なども考慮する必要がある。また、前者は基本的に 1 対 1 通信による情報共有であり、後者は多対多型の情報共有と考えられる。このような考察の結果、結局、自学自習形式の計算機アーキテクチャ教材である VisuSim 自体に、情報共有のための専用機能があれば学習効果が高まるという結論に至る。

3.2 VisuSim メールの実現

VisuSim にメール機能を組み込み、学習者と指導者間で、的確な情報伝達ができるよう、VisuSim のバージョンアップを行った。具体的には、次に述べる 2 つのクライアント機能を Java で記述し、メールハンドラとして実装し、VisuSim のメール機能として組み込む。これを VisuSim メールと名づけた。VisuSim に起動ボタンを追加して、クリックするだけで、クライアントを別ウィンドウとして呼び出せる仕組みとした。また、VisuSim が有するシミュレータの内部データを外部参照可能な共有メモリとし、シミュレータを一時停止すれば、VisuSim メールからも読み書きが可能となるよう変更した。

VisuSim メールを構成する 2 つのクライアント (図 2

を参照) の概要は以下のとおりである。

- SMTP クライアント:

VisuSim メールのモジュールの 1 つとして VisuSim メールに組み込まれ、メール送信機能を担当する。指定された SMTP サーバに対し、SMTP プロトコルに従ってメールを送信する。送信先アドレス、メール題目および送信元のユーザ名を記述するフィールドを有し、メール本文フィールドには、直接文章を記載することも、後述するスナップショットを付記することも可能である。Java アプレットとして起動された場合、アプレットの制約上、ダウンロードマシンである Web サーバを指定されたときのみ、メール送信が可能となる。

- POP3 クライアント:

SMTP クライアントと同様に、VisuSim に組み込まれ、メール受信機能を担当する。サーバフィールドで指定された POP3 サーバから、POP3 プロトコルに従ってメールを受信する。受信されたメールはメール本文フィールドに表示される。Java アプレットとして起動された場合、POP3 サーバ

として、ダウンロードマシンを指定されたときのみ、POP3 プロトコルに従って、ユーザ名およびパスワードを記述するフィールドに入力された情報を使用してユーザ認証後、サーバから受信メールの内容を取得する。そのため、ダウンロードマシンである Web サーバ上にユーザ登録をしておく必要がある。

たとえば、SMTP クライアントでメール送信する際に、特殊なタグをメールヘッダとして追加し、POP3 クライアントでは受信の際に、当該タグを認識することで VisuSim メールであることを動的に確認することもできる。この結果、POP3 クライアントで VisuSim メール以外のメールを誤って読むことも防止可能となる。そして、専用メール機能である点を活かして、より柔軟な情報交換を実現する専用サービスを組み込むことで、VisuSim の教材としての利用価値を向上させることもできる。すなわち、以下に示す 2 つの専用サービスを SMTP クライアントおよび POP3 クライアントに組み込むことで、VisuSim を利用する学習者と指導者間において、手軽で便利な情報交換機能を提供することが可能となる。

- 学習者や指導者は VisuSim メール SMTP クライアントを利用してメールを送信するとき、簡単な操作、すなわち「スナップショット」ボタンをクリックするだけで、送信メール本文に、VisuSim の任意時点での中間実行状態（スナップショット）を保存することができる。具体的には、図 2 左側に示すように、VisuSim が有する内部状態が、すべて読み取られ、スナップショットとしてメール本文フィールドに文字列として追記される。これらはプログラムカウンタ、命令レジスタ、OP（命令）コードあるいは汎用レジスタなどのデータであり、内部状態を再現する場合に使用される。一方、文字情報である特徴を活かし、必要に応じてその内容を編集してから、メール送信することも可能である。また、テキスト化した内部状態を一度、ファイル保存し、改めてメール本文に貼り付けることで、過去の状況を送信側で再現しながら、質問メールを作成することもできる。この専用メール機能を用いることで、学習者はデバッグ中のプログラムおよびその実行時の VisuSim の中間実行状態を指導者に情報伝達することができる。
- 学習者や指導者は VisuSim メール POP3 クライアントを利用して、中間実行状態が付記されたメールを受信することができる。簡単な操作、すなわち「リストア」ボタンをクリックするだけで、

その中間実行状態に含まれるプログラムや実行時のレジスタの値などを、受信側の VisuSim にリストアすることができる。図 2 右側に示すように、メール本文フィールドに届いた送信者側のスナップショットとして、VisuSim の内部状態が記述され、条件コードレジスタやスタックポインタの値、あるいはメモリアドレスレジスタなどの内部レジスタの値も含まれる。これらをリストアし、受信者側の VisuSim で正確に再現することで、たとえば、内部レジスタなどの値を確認しながらメールを送信した学習者の問題点を効率良く推測することが可能となる。

このように、VisuSim メールを使用して、質問事項などのメール本文に追加する形で、演習や課題などで作成しているプログラムのレジスタやメモリの値を含む中間実行状態をやりとりすることができる。

3.3 VisuSim メールを用いた質疑応答手順

図 3 は、学習者である学生から、指導者である教師への質問と、教師から学生への応答という一般的なケースを想定した中間実行状態の情報伝達手順を示している。具体的な手順は以下のとおりである。

- (1) VisuSim を用いて、プログラム課題に挑戦している学生が、ある問題で迷路に入り、VisuSim メール SMTP クライアントを起動し、VisuSim の中間実行状態を付けて、教師に送信し、助言を要請する。
- (2) 教師は、VisuSim メールを用いて、質問があるかどうかを確認し、ある学生から、中間実行状態付の質問メールが届いているのを発見する。
- (3) POP3 クライアントのリストア機能を用いて、受信した質問メールから VisuSim の中間実行状態を教師自身の VisuSim 上で再現し、問題点を的確に把握する。
- (4) その後は、図 3 とは逆の経路で、教師が自身の VisuSim 上で SMTP クライアントを起動して、アドバイスや迷路を脱出する答えの一部などの情報を当該学生にメール送信する。
- (5) 教師と同様の手順で、学生も教師からの返信メールを自身のタイミングで読み、迷路脱出の有効なヒントを得ることができる。

上で示した学習者と指導者間の情報伝達手順は、非同期ながら学習者が理解するまで繰り返すことができる。非同期であるため、指導者側の負担も低減され、質問者である学習者自身も時間を気にせず、気軽にメールで質問できる。

VisuSim メールの利用方法は、質問のやりとり以外

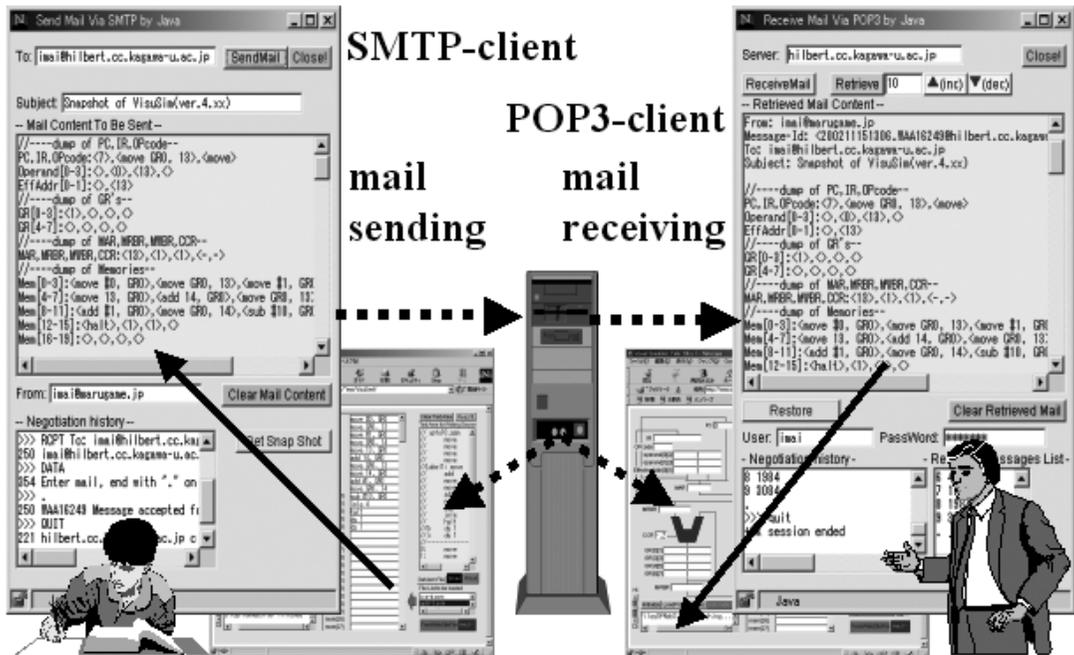


図 3 VisuSim メールによる教師・学生間の中間実行状態のやりとり

Fig. 3 Exchange of a VisuSim's snapshot between a student and a teacher by VisuSim Mail.

にも考えられる．たとえば，指導者が複数の学習者に特定の例題をいっせいにメール送信することが可能となる．同様に，指導者が，中間実行状態として，一部が虫食いとなっているプログラムを，個別の学習者に与え，その穴埋め問題を解かせる形式の演習課題の提示も可能になる．ただし，初期状態から到達できない状態を与えないように注意する必要がある．あるいは，特定の学習者に与えた課題の答えを，結果の記述だけでなく，中間実行状態を付記した回答という形式で受け取り，課題が解けているかどうかをその場で判断することにも使える．専用のメール機能を学習環境に組み込むことで，質問などの情報伝達や，いっせいメール送信による情報共有など，様々な利用形態を検討することができる．学習環境と情報伝達機能が統合されるだけでなく，専門教育において視覚化支援と並んで重要となる個別対応教育支援¹¹⁾を実現することが可能となる．具体的には，情報伝達や情報共有の手段を用いて，指導者が個々の学習者の理解度を分析し，その状況に応じた問題提示や情報提供も可能となる．

3.4 VisuSim メールのサーバ指定方式

一般のメール機能を使用しても，簡単な情報伝達はできる．しかし，DNSに登録されたメールサーバを使用することが前提となる．VisuSim メールは VisuSim 利用に特化した専用機能を有し，以下のような利用環

境でも効果を発揮するように設計している．DNS 登録時に発生する事務的手続きを省略したい場合や，学内のみの利用を前提とする場合など，メールアドレスの記述では，ドメイン名を記述するより，IP アドレスベースのアドレスを記述する方が便利な場合も多い．

そこで，VisuSim メールでは，ドメイン名だけでなく，IP アドレスによるメールアドレス記述を許すため，次のような実装方式をとる．すなわち，VisuSim メールでは，メールを送信する場合，SMTP クライアントにおける送信先のアドレス記述として，ドメイン名を用いる「ユーザ名@ドメイン名」などの表記の代わりに，「ユーザ名@#192.168.1.10」のように IP アドレスを明示した記述を許す．アドレスの文字列中に「@#」の文字列表記を検出すると，直接「#」以下の IP アドレスを読み取り，DNS レゾルバを呼び出さず，IP アドレスで指定された当該メールサーバ（SMTP サーバ）に対して，SMTP プロトコルに基づくネゴシエーションを開始し，送信メールをデータ転送する．

次に，メールを受信する場合，POP3 クライアントが，メールを読み出す対象サーバ（POP3 サーバ）を指定するとき，「ドメイン名」を表記する代わりに，「#192.168.1.10」のように IP アドレスを明示した記述を許す．サーバアドレス表示の先頭に「#」を

検出すると、直接 '#' 以下の IP アドレスを読み取り、DNS レゾルバを呼び出さず、当該メールサーバ (POP3 サーバ) に対し、POP3 プロトコルに基づくネゴシエーションを行う。すなわち、ユーザ認証後、メール本文を順次、読み出して表示する。

VisuSim メールがこのようなサーバ指定方式を採用したことで、DNS に登録していないサーバを、VisuSim を使用した演習などで時限的に活用することができる。また、プライベートアドレス空間内に VisuSim メール利用のネットワーク環境を実現することで、学習者と指導者間の質疑応答に専念でき、スパムメールに代表される無関係なメールに邪魔されないという副次的な効果が期待できる。

4. VisuSim メールの評価

本章では、まず、VisuSim メールの導入効果について説明する。次に、VisuSim を用いた計算機アーキテクチャ教育の実際を紹介し、学習者から提出されたレポートの評価と VisuSim メール利用との関係について解析する。さらに、適用事例に基づいて VisuSim メールの効果について考察する。

4.1 VisuSim メールの導入効果

プログラミング教育においては、指導者がソースコード (あるいはその一部) を学習者に伝えることで、学習効果を高めることができるケースは少なくない。一方、アーキテクチャ教育におけるアセンブリ言語プログラミングは、プログラミングという側面と、計算機の内部動作や内部構造を理解するという側面がある。各種レジスタの値に着目したり、メモリの読み書きに注目したりするなど、計算機の内部状態を題材として扱うことで、後者の側面における学習効果を高めることが可能となる。VisuSim メールでは、学習者と指導者間で、中間実行状態を相互に交換することで、これまでできなかった、具体的なアーキテクチャ教育が可能となった。以下に具体例を示す。

- 学習者から指導者へ：

配列操作やスタックの振舞いをアーキテクチャレベルで理解するために、学習者は VisuSim の内部状態とともに、特定のレジスタの値やメモリの内容を指導者に送る。指導者は、受け取ったスナップショット (中間実行状態) をもとに、学習者の状況を再現し、一般論としてではなく、学習者の特定の事例を用いて、データの処理順序の違いを説明する。

- 指導者から学習者へ：

たとえば、二重ループ型処理において、制御変数

の値と条件分岐との関係に注目させるため、指導者が、分岐する直前のスナップショット (条件コードレジスタなども含まれる) とともに、着目すべきレジスタを指示したメールを学習者に送付し、問題解決のヒントを具体的に示す。学習者は、問題の答えではなく、着眼点を示されることで、問題へ能動的に取り組む。また、実行状態を示されることで、内部動作 (状態の変化を含む) への理解を深めることになる。

VisuSim メールが提供するスナップショット付きメールの導入効果を以下のようにまとめることができる。これまでの VisuSim では、計算機内部の構造や動作の可視化に主眼がおかれ、指導者が学習者に計算機の内部状態の変化などを具体的に示すことはできても、学習者がどこでつまづいているかを把握する手段は貧弱だった。しかし、スナップショット付きの VisuSim メール導入により、中間実行状態を含む情報交換が可能となり、上記の問題点が改善された。VisuSim メール導入効果として、学習者と指導者がシミュレータ VisuSim の内部状態を同じ目線で確認・議論する手段を提供し、非同期ではあるが、相互に相手の着目している内部状態 (各種レジスタやメモリの振舞い) に関する情報を共有できるようになった。VisuSim メールが提供するスナップショット付きメールは計算機内部の構造や動作を理解させることを目的とするアーキテクチャ教育において特に有効であると考えられる。

4.2 VisuSim の使用例

計算機アーキテクチャの教育では、ノイマン型計算機の理解を基礎とし、布線論理とマイクロプログラミング、パイプライン制御、スーパーパイプライン・スーパースケラ・VLIW というプロセッサアーキテクチャ教育を行う。そのため、ノイマン型計算機の基礎を効率良く学習できる教材の利用が望ましい。この点を考慮し、VisuSim には視覚化機能を持たせ、教授型教材としても、自学自習型教材としても利用できる設計方針を採用した。

したがって、VisuSim の使用例として、以下に示す教授型利用と自学自習型利用の 2 つがある。

- 指導者が、VisuSim をデモ表示用教材として利用し、表示画面をプロジェクタに出力し、大型スクリーンに投影させながら、学習者にノイマン型計算機の内部構造や動作を理解させる講義を行う (Java アプリケーションとしての使用例)。
- 学習者がレポート課題や少人数演習 (20 名程度) などで VisuSim を使用する場合、Web サーバから自身のブラウザ上に VisuSim をダウンロード

して、起動することになる (Java アプレットとしての使用例)。

教授型利用において VisuSim メールを活用することで、授業の中で学習者から寄せられた解答例を他の学習者に表示し、特定の工夫や誤りやすい点を指摘することが可能となる。しかし、その効果を定量的に調査していないため本論文では VisuSim メールの評価としては言及しない。一方、自学自習型利用における VisuSim メールの活用については次で詳細に述べる。

4.3 VisuSim メールの評価実験

VisuSim メールの効果を論じるため、自学自習型利用の評価実験として、計算機アーキテクチャ教育における課題演習 (2006 年度実施分) を利用し、学習者となる学生のレポート評価と VisuSim メールの利用との関係を調べた。

実際に課した課題は、次の 4 つである。

R1 最大値・最小値を求める計算で、条件分岐命令を用いる課題。

R2 インデックスレジスタを用いない繰返し計算で等差数列の総和を求める課題。

R3 インデックスレジスタを用いた繰返し計算で配列を昇順・降順にソートする課題。

R4 引数付きサブルーチン呼び出しを用いた計算課題。

各課題 (R1~R4) は、ある処理アルゴリズムをノイマン型計算機で実現するには、どのような命令セットが必要になるか (命令セット設計)、アドレッシングやスタック機構が必要か (処理効率向上へのアーキテクチャ支援) などを具体的に理解させる目的を持つ。

1 週間間隔で 21 名の学習者 (S1~S21) に上記の課題を提示し、順次レポートを回収してその理解度を各 25 点満点で評価した。表 1 に、21 名の学習者が提出したレポートに関する評価結果を示す。R1 から R4 までの各課題に対し、学習者ごとに、5 点きざみで、そのレポートを評価している。また、4 つのレポートの成績順 (合計値の昇順) で学習者をソートしている。

表 1 の M1 から M4 までの数値は、それぞれ R1 から R4 までの各レポートを提出した学習者が、レポート提出までに、VisuSim メールを使用して、指導者にメールで質問をした回数を示している。各課題ごとに、メールでの質問回数を示すのは、VisuSim メールの効果とレポートの評価との関係を調べるためである。口頭での質問は、表 1 にはカウントしていない。

また、メール機能を必ず使用するようには指導していないため、メールでの質問がない学習者もあり、表では 0 と表記している。一方、括弧表記の数値は、学

表 1 課題 (R1~R4) に対する学習者 (S1~S21) の評点およびメール使用回数

Table 1 Scores on assignments (R1-R4) and the number of mails by VisuSim Mail.

	R1	R2	R3	R4	M1	M2	M3	M4
S1	5	0	0	0	0	0	0	0
S2	5	5	5	5	0	0	0	0
S3	5	10	5	5	0	0	0	0
S4	5	5	10	5	0	1(1)	1	1
S5	10	10	10	10	0	0	0	0
S6	15	10	10	10	1	0	0	0
S7	10	10	15	15	0	0	2(1)	1
S8	15	15	20	15	0	0	1(1)	0
S9	20	15	15	15	0	0	0	0
S10	20	15	20	15	0	0	1	1
S11	5	25	20	20	0	2(2)	1(1)	1(1)
S12	5	20	20	25	0	1(1)	1(1)	1
S13	10	25	25	20	0	2(2)	1(1)	0
S14	20	20	20	20	0	0	0	0
S15	10	20	25	25	0	1(1)	1(1)	1
S16	10	25	25	25	0	2(2)	1(1)	1(1)
S17	20	25	20	20	0	2(1)	1(1)	0
S18	20	20	25	20	0	0	1	0
S19	25	20	25	25	0	1(1)	1(1)	1(1)
S20	25	25	25	25	0	1(1)	1	0
S21	25	25	25	25	0	0	0	1
total mail numbers					1	13(12)	14(9)	9(3)

習者が VisuSim メールで質問した際に、中間実行状態を付記してメール送信を行った回数である。中間実行状態の付記がなければ、括弧表記もしていない。

学習者 S1~S3, S5, S9 および S14 は一度も VisuSim メールを使用していない。そこで、VisuSim メールの効果をより正確に調べるため、他の 15 名の学習者が提出したレポート 60 本を対象として、その効果を調べた。すなわち、メールを使用して質問などを行った後に提出されたレポート 32 本の評価 (平均点: $\mu_1 = 20.6$) と、メールを使用しなかったときのレポート 28 本の評価 (平均点: $\mu_0 = 15.9$) とに有意な差があるかどうかを、 t 検定を用いて確認した。

具体的には、帰無仮説 H_0 として「メールを使用後に提出されたレポートの評価 (平均点: μ_1) は、メールを使用せず提出されたレポートの評価 (平均点: μ_0) に対して、有意な差がない」を仮定し、検定統計量 $T = \sqrt{n_1}(\mu_1 - \mu_0)/\sigma_1 = 4.70$ を得る。ここに、 n_1 は、メールを使用後に提出されたレポート本数であり、 $n_1 = 32$ である。また、標本標準偏差 σ_1 は、 $\sigma_1 = 5.69$ である。 t 分布表より、 $t_{0.005}(32-1) = 2.74$ であるので、有意水準 0.5% で仮説 H_0 は棄却される。よって、VisuSim メールを使用後に提出されたレポートの評価 (平均点) は、使用せず提出されたレポートの評価 (平均点) に対して十分な有意差があり、Visu-

Simメールの使用に効果があったと認められる。また、レポートが1件しか提出されなかった課題R1を除いて統計処理した場合もまったく同じ結論となった。

一方、メールで質問などを行った後に提出されたレポート32本について、VisuSimメールの特徴であるVisuSimの中間実行状態をスナップショットとして付記できるメール送受信機能の効果を調べた。以下、表記を簡便にするため、VisuSimの中間実行状態を付記したメールをスナップショットメールと略記する。質問メールとして、スナップショットメールを使用した後に提出されたレポート21本の評価(平均点: $\mu_3 = 21.7$)とメール機能を使用しただけでスナップショットメールを使用しないで提出されたレポート11本の評価(平均点: $\mu_2 = 18.6$)に有意差があるかどうか、上記と同様に、 t 検定を用いて確認した。

すなわち、帰無仮説 H_1 「スナップショットメールでの質問後に提出された21本のレポートの評価(平均点: μ_3)は、スナップショットメールを使用しないで提出された残り11本のレポートの評価(平均点: μ_2)に対して、有意な差がない」を仮定し、検定統計量 $T = \sqrt{n_3}(\mu_3 - \mu_2)/\sigma_3 = 2.95$ を得る。ここに、 n_3 は、スナップショットメール使用後に提出されたレポート本数であり、 $n_3 = 21$ である。また、標本標準偏差 σ_3 は、 $\sigma_3 = 4.71$ である。 t 分布表より、 $t_{0.005}(21 - 1) = 2.85$ であるので、有意水準0.5%で仮説 H_1 は棄却される。よって、スナップショットメールを質問に使用した後に提出されたレポートの評価(平均点)は、メール機能を使用しただけで、スナップショットメールを使用しないで提出されたレポートの評価(平均点)に対して十分な有意差があり、VisuSimの中間実行状態を付記したメールの使用は効果があったと認められる。

4.4 VisuSimメールの使用事例に関する考察

VisuSimメールを使用した学習者と使用しなかった学習者の典型的なコメントから、VisuSimのメール機能がどのように受け取られていたかについて考察し、その効果と問題点を具体的に紹介する。

VisuSimメールを使用した学習者のコメントからは「初めて質問事項をメールで、しかも組み込みメールで簡単に行えたのが便利でした。特に、分からなくなったプログラムのスナップショットを送信して、レジスタの意味やその使い方まで返信メールで教えてもらったときには感激しました」、「分からない箇所をメールで質問できたのは良かった。僕自身がどうすれば良いか分からなくなっていたので、サンプルを受信して、読み上げて(注: リストア機能を使用して)実行

できたときには結構、便利だと思った」などと肯定的に評価している記述が読み取れた。

一方、使用しなかった学習者も6名おり、「先生がデモしてくれたときには、なんとなく分かったと思ったが、計算機アーキテクチャに興味がわかかなかったので、シミュレータを使いこなしたいとも思わなかった。結果として、メールで質問したいとも思わなかった」、「友達に相談すると、詳しく説明してくれたので、ある程度理解できた。メールで質問するより簡単だったので、あえてメール機能は使用しなかった」などの否定的な印象をレポートに記載していた。

先に紹介したように、質問のメール中に、中間実行状態を付記して、学習者の状況を送信することで、正確に質問の意図が指導者に伝わり、適切な指導を受けたと喜んでいる学生の評価はVisuSimメールの効果を端的に表している。指導者が、受信した質問メールから、送信した学習者の理解状況を読み取り、サンプルプログラムを作成して返信する。返信メールを受け取った学生がリストア機能を活用して自身のVisuSim上で再現・確認したという事例があった。反面、指導者側から見れば、質問してほしいような学習者であるにもかかわらず、ほとんどVisuSimメールを使用しなかった者がいたという事実も課題として明らかになった。

5. おわりに

本論文では、計算機アーキテクチャ教育用ビジュアルシミュレータVisuSimの組み込みメール機能について詳述し、その機能を活用することで得られる教育効果について、レポートの評価を用いて検証した。

VisuSimメール機能を利用すれば、学習者側のVisuSimの任意の中間実行状態を指導者側に的確に情報伝達でき、質問やアドバイスを交換できることを実例で示し、実際の講義で使用した結果、学習者からの質問を指導者が的確に読み取れることの利点を確認した。

t 検定を用いて確認した結果、メール機能を使用し質問を行った後のレポートの評価(平均点)は、使用しなかったときのレポートの評価(平均点)に対し、有意な差があり、VisuSimメールの使用が効果的であったと認められた。また、中間実行状態を付記したメール(スナップショットメール)の使用も同じく効果的であったと認められた。

今後は、メール機能を利用しない学生に、レポート評価の良くない者が多いという事実をふまえ、VisuSimメールの積極的利用を促す指導上の工夫も必要となる。また、学習者同士での情報交換にVisuSimメールを

利用し、学習者が相互に指導しあうタイプの協調学習の実践と評価も今後の課題とする。

謝辞 京都大学大学院情報学研究科長富田眞治教授には、計算機アーキテクチャ教育、システム開発への示唆と支援をいただいた。編集委員、査読委員各位には本論文への貴重な助言をいただいた。記して感謝の意を表す。本研究は文部科学省特別教育研究経費共生情報工学研究推進経費の一部補助による。

参 考 文 献

- 1) 山口菊子, 佐藤泰助, 辻 政昭, 小谷善行, 中川正樹: 高等学校「情報」教科向け Web/Java 教材「ED9900」の開発, 第 60 回情報処理学会全国大会論文集(4), pp.375-376 (Mar. 2000).
- 2) Llamas, M., Anido, L. and Fernandez, M.J.: Simulators over the Network, *IEEE Trans. Educ.*, Vol.44, No.2, p.212, CD-ROM folder 09 (May 2001).
- 3) Yehezkel, C., Yurcik, W., Pearson, M. and Armstrong, D.: Three Simulator Tools for Teaching Computer Architecture: Little Man Computer, and RTLsim, *ACM Journal of Educational Resources in Computing*, Vol.1, No.4, pp.60-80 (Dec. 2001).
- 4) Moure, J.C., Rexachs, D.I. and Luque, E.: The KScalar Simulator, *ACM Journal of Educational Resources in Computing*, Vol.2, No.1, pp.73-116 (Mar. 2002).
- 5) Null, L. and Lobur, J.: MarieSim: The MARIE Computer Simulator, *ACM Journal of Educational Resources in Computing*, Vol.3, No.2, Article #1, 29 pages (June 2003).
- 6) Chen, P.M.: An Automated Feedback System for Computer Organization Projects, *IEEE Trans. Educ.*, Vol.47, No.2, pp.232-240 (May 2004).
- 7) Imai, Y., Tomita, S., Niimi, H. and Kitamura, T.: Web-based Computer Visual Simulator, *Technology Enhanced Learning (18th IFIP World Computer Congress)*, pp.111-120 (Aug. 2004).
- 8) Bershin, J.: *The Blended Learning Book: Best Practices, Proven Methodologies, and Lessons Learned*, John Wiley & Sons (2004). 赤堀侃司(監訳): プレディクトドラーニングの戦略—eラーニングを活用した人材育成, 東京電機大学出版局(2006).
- 9) 三浦義之, 金子敬一, 中川正樹: 教育用計算機システムシミュレータ ED21 の設計と評価, メディア教育研究, Vol.1, No.1, pp.115-122 (Dec. 2004).
- 10) Humar, I., Sinigoj, A.R., Bester, J. and Hagler, M.O.: Integrated Component Web-based Interactive Learning Systems for Engineering, *IEEE Trans. Educ.*, Vol.48, No.4, pp.664-675 (Nov. 2005).
- 11) Liu, H.I. and Yang, M.N.: QoL Guaranteed Adaptation and Personalization in E-Learning Systems, *IEEE Trans. Educ.*, Vol.48, No.4, pp.676-687 (Nov. 2005).
- 12) Grigoriadou, M., Kanidis, E. and Gogoulou, A.: A Web-based Educational Environment for Teaching the Computer Cache Memory, *IEEE Trans. Educ.*, Vol.49, No.1, pp.147-156 (Feb. 2006).
- 13) Imai, Y., Kaneko, K. and Nakagawa, M.: Application of a Visual Computer Simulator into Collaborative Learning, *Journal of Computing and Information Technology (CIT)*, Vol.14, No.4, pp.267-273 (Dec. 2006).

(平成 18 年 11 月 29 日受付)

(平成 19 年 5 月 9 日採録)

今井 慈郎 (正会員)



1955 年生。1980 年京都大学工学部情報工学科卒業。読間電波工業高等専門学校助手, 同助教授, 香川大学経済学部助教授, 工学部助教授を経て, 現在, 同大総合情報基盤セン

ター准教授。専門情報教育における e-Learning の研究等に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

金子 敬一 (正会員)



1962 年生。1985 年東京大学工学部計数工学科卒業。1987 年同大学大学院工学系研究科情報工学修士課程修了。同大学計数工学科助手, 千葉大学情報工学科講師を経て, 現在,

東京農工大学大学院共生科学技術研究院准教授。博士(工学)。並列分散計算, 部分計算, 耐故障計算, 関数プログラミング, マルチメディア教育等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM, IEEE 各会員。



中川 正樹 (正会員)

1954年生．1977年東京大学理学部物理学科卒業．1979年同大学大学院理学系研究科修士課程修了．同大学院在学中，英国 Essex 大学留学 (M. Sc. with distinction in Computer Studies)．1979年東京農工大学数理情報工学科助手，現在，同大学院共生科学技術研究院教授．理学博士．手書きインタフェース，手書きパターン認識，教育の情報化等の研究に従事．
