

L I S P による C A I ( L I S P - C A I ) の  
開 発 状 況 ( 3 )

最首和雄\*, 横田俊幸\*, 小貫晃義\*, 日下部千春\*, 富樫暹\*\*, 小沼雅樹\*\*\*

\*山形大学、\*\*キャノンソフトウェア(株)、\*\*\* (株)MTEX-Matsumura

あらし 山形大学ではLISPによりCAIシステムを開発し、それによりコースウェアを作り学習指導に利用し、効果的な授業や演習を行っている。このCAIシステムを我々はLISP-CAIと呼んで利用している。1990年度にこのシステムによる新しいコースウェアの開発、このシステムのための新しいLISPインタプリタの開発、市販のIC-LISPを用いたCAIシステムの開発などを行ってきたので、それらについて報告する。

The Progress of Developing CAI System Described in LISP (3)

Kazuo SAISHU\*, Toshiyuki YOKOTA\*, Akiyoshi ONUKI\*, Chiharu KUSAKABE\*  
Susumu TOGASHI\*\*, Masaki KONUMA\*\*\*

\* Yamagata University, \*\* Canon Software Co. LTD., \*\*\* MTEX-Matsumura Co. LTD.

\* 4-3-16 Jonan Yonezawa-shi Yamagata

**Abstract** We report three subjects of our CAI system which is described in LISP. The first is that we have developed two CAI coursewares of experimental instructions using a VTR medium. The second is that we have implemented a LISP interpreter with DOS-extender 286/386 for higher compatibility. In 1985, we have implemented a LISP interpreter in CP/M operating system and CAI system in the LISP. Because the OS is old type, therefore we have implemented a new one. The last is that we also developed the CAI system described in IC-LISP to obtain wide compatibility for many sorts of personal computers..

### 1. はじめに

山形大学ではLISP<sup>(2)・(3)</sup>によりCAIシステムを開発し、それによりコースウェアを作り学習指導に利用し、効果的な授業や演習を行っている。このCAIシステムを我々はLISP-CAI<sup>(4)・(5)・(8)</sup>と呼んで利用している。1990年度に実験指導用の2つのコースウェア(化学工学用、機械工学用)を開発し、実験の前に使用することを開始した。その構成、学習効果などを報告する。このシステムのOSは旧式のCP/Mのため他のユーティリティの使用

が困難である。この問題の解決のためDOSエクステンダ上に新しいLISPインタプリタの開発した。この上へのCAIシステムの移植は今年度行う予定であるが、ここではこのLISPインタプリタについて報告する。また移植性を高める別な試みとして市販のIC-LISPを用いたCAIシステムの開発、コースウェアの作成などを行ってきた。このシステムと従来のシステムの得失について報告する。このCAIシステムの数式解答照合法は非常に広い範囲の数式照合ができる。

## 2. 実験指導用コースウェアについて

工学部での実験指導の各課題で最初に実験の基本的知識を教育するのにVTRを利用したCAI教育が以下の理由で山形大学工学部では都合がよい。

- (1) 実験の基本的知識をCAIにより正確に教えられる。
- (2) VTRの映像、シミュレーションなどの手法を用いて教育できる。

工学部の実験はグループで行う実験なので一部の学生がよく理解して実験を先導し、他の学生はそれを参考に実験を進めるなどの傾向が強い。CAIの質問に各学習者が正しく答えることで、基本的知識を正確に理解させた後に実験を行わせることができる。またVTR映像と組み合わせて説明することで、実験の流れを正確に教えられる。今回は化学工学1課題、機械工学1課題のコースウェアを作り、実験指導に利用した。1課題を1回に受ける学生数が約10人程度なので、1課題の教育にCAIシステムを数台用意すればよく、このような課題はCAI教育の研究にはよい実験対象である。

オーサリング・システムは従来のLISP-

CAIのソフトウェアを用いた。質問における解答は選択方式でなく、数式または専門用語をキーから入力する方式である。数式照合はLISP-CAIの数式照合機能を用いている。この機能は以下のように要約できる。

- (1) 1質問に対して複数個の予想解答を準備できる。
- (2) 数式解答は式と等式を準備できる。
- (3) 予想解答と解答の照合では式を構文解析して等価性を調べるので、柔軟性のある照合ができる。
- (4) 日本語の解答は主にファンクションキーに登録してある語句を組み合わせるが、パソコンの日本語入力機能を用いて解答してもよい。ファンクションキーの内容は質問毎に変化する。

開発した硬さ試験（機械工学実験用）コースウェアの流れ図を図1に示す。

VTRの内容は試験機の構造、測定方法及び測定上の注意点、試料の説明などである。1つの映像が約2分程度で制作した。簡単なハンマーのシミュレーションも加えた。CAIの問題はそれぞれの実験について3題（3～4質問/1題）からなる。

表1はプロセス制御（化学工学実験用）実験

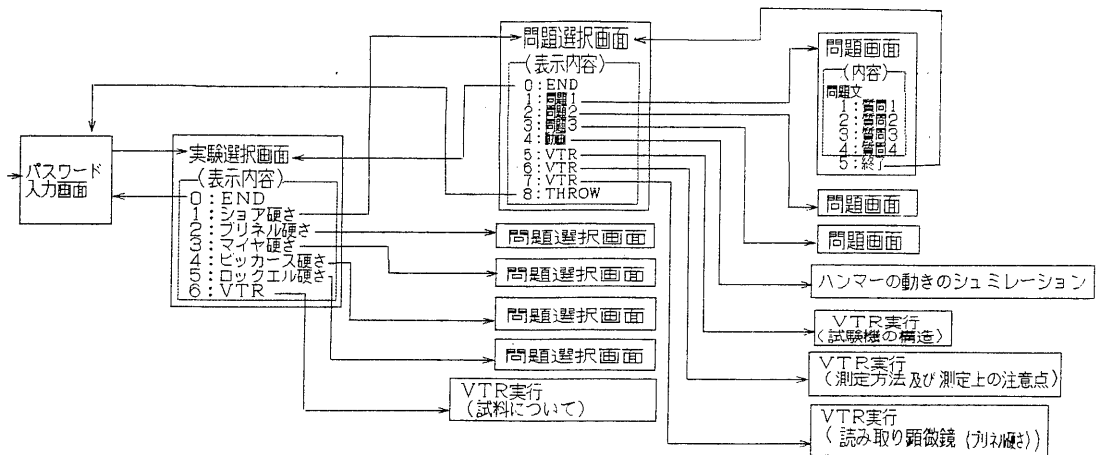


図1. 硬さ試験コースウェアの学習の流れ図

表1. プロセス制御実験コースウェアの学習内容

初期画面選択	温度制御実験についての選択	結果のまとめ方 実験方法の説明 についての選択	まとめ方の説明 (VTR) 1. 予備説明について 2. 実験の分担について (VTR) 3. 実験装置の説明について (VTR) 4. 定常状態の設定について (VTR) 5. 動特性の実験について (VTR) 6. 制御実験の説明について (VTR 2映像) 7. 電圧Eを求めるプログラムについて (4フレーム: 計算式、変数設定プログラム2種)
		理論解析の説明 についての選択	1. 予備説明について 2. 収支式の説明についての選択 (VTR 2映像、問題) 3. 微分方程式の説明についての選択 (VTR 2映像、問題) 4. 例題の説明について (VTR) 5. プログラムの説明について (5フレーム: 変数設定、全体の流れ、計算式、解答1, 2) 6. 制御系の場合について (VTR、問題) 7. 制御系のプログラムについて (5フレーム: 変数設定、全体の流れ、計算式、解答1, 2) 8. おおよその結果について (動特性1, 2、応答1, 2、比較)
	温度制御実験をするにあたっての説明 番号選択の注意 システムの利用法について		

コースウェアである。実験方法の説明、理論解析、結果の整理からなっている。CAIセットは実験室に置いて、実験途中で必要に応じてCAIの説明を見ることができるようになっている。

1990年4月から6月にかけて硬さ試験の実験者30人、プロセス制御の実験者60人が利用した。100分程度のCAI演習を行った後、実験を行った。この時の実験指導ではVTR映像が不良であるなどの完全なコースウェアでなかったが、アンケートの結果では「この形式の説明が分かりやすい」と多くの学生が答えている。今年度は不完全な部分を修正して実験指導に利用している。

### 3. DOSエクステンダ上のLISPの開発

山形大学では数式照合に高機能を持つCAIを1985年にLISPにより開発した。当時はCAI開発に利用できるパソコン用のLISPがなかったので、CP/M-68K上にアセンブラでLISPインタプリタを開発して、その上にCAIシステムを開発して利用してきた<sup>(1)</sup>。このシステムはホスト計算機がcpu68000で、端末がパソコンからなる構成である。最近パソコンの機能も向上しているのので、その上にLISPの開発を行ったので報告する。今年はこの

上に従来開発したCAIシステムの移植を行う予定である。

我々が使用しているのはUTI-LISP<sup>(1)</sup>の言語仕様を満たすLISPである。ただし大文字小文字のアルファベットは区別するLISPである。この機能は数式解答で有用な機能である。MS-DOSでは利用できるセル数が制限されるので、DOSエクステンダを用いて、LISPをC言語で開発した。このLISPはワークステーション上に開発してそれをDOSエクステンダ上に移植したものである。従ってワークステーション上でも動作する。以下のソフトウェアを利用している。

80386CPU用: HIGH C.

386DOS-Extender(Phar Lap社)

80286CPU用: Turbo C.

EXE286(京都マイコン社製DOS-Extender)

CAIで利用する場合、市販のソフトウェアをこの中に組み込んで利用することが多い。386DOS-Extenderでは子プロセス用の領域を1Mバイト以下のメモリ領域にとる必要があるが、それをとった場合処理時間が長くなる。なおEXE386(京都マイコン社製386DOS-Extender)を使用すると、処理時間は長くなるのが欠点である。

LISPの関数 tarai, nqueen について計算時間を表2に示した。LISPで数式照合、辞

書検索などにより解答照合処理をする場合、処理時間の短縮が必要であり386IDOS-ExtenderによるLISPでこの目的が達せられると考えている。なお今後このLISPにCAIでよく使用される関数を組み込む予定である。

表2. テストプログラムの計算時間 (単位: 秒)

	(tarai 840)	(tarai 1050)	(nqueen 6)	(nqueen 8)
①	2	73	1	10
②	11	292	2	42
③	35	950	7	136
④	11	319	3	47
⑤	22	600	4	85
⑥	7	168	2	26

- ①RUN386を使用したシステム (20MHz)
  - ②RUN386を使用し、子プロセス用のメモリを250K<sup>1</sup>を確保したシステム (20MHz)
  - ③EXE286を使用したシステム (10MHz)
  - ④EXE286を使用したシステム (20MHz)
  - ⑤EXE386を使用したシステム (20MHz)
  - ⑥従来のシステム  
(OSはCP/M、CPUは68000、8MHz)
- (注) RUN386はPhar Lap社のDOSエクステンダ、EXE386、EXE286は京都マイクロソフト社製のDOSエクステンダ
- ①②④⑤はPC-9801RA、
  - ③はPC-9801VXを使用。

#### 4. IC-LISP上のCAIシステムと数式照合

##### 4.1 IC-LISP上のCAIシステムの構成

市販のIC-LISP上にCAIシステムを開発したので、ここではそれについて報告する。これはcommon LISPの言語仕様に準拠している。IC-LISPには次のような制限事項がある。(1)文字型がなく、ストリング型の関数が貧弱である。(2)コンソール入出力機能が弱い。(3)他の言語によるカスタマイズができない。このような欠点を補うためにデバイスドライ

を用意し、文字列の処理関数、1文字入力機能、CTRL-Cの検出機能などの補助プログラムを用意した。

このシステムのソフトウェアは以下のように分類できる。

- (1)デバイスドライ  
(LISP処理系の補助プログラム)
  - (2)コースウェア作成ツール  
(C言語のプログラム)
  - (3)学習制御ツール
  - (4)コースウェア用データファイル
  - (5)データ解析ツール
- (3)、(5)はLISPで書かれたプログラムで、C言語で書いた補助関数をDOSコマンドとして呼んで利用している。

##### 4.2 数式照合

複数の予想解答があった場合の処理方法という点から、従来のCAI(旧CAI)とこのCAI(新CAI)の機能を比較すると以下のようになる。

旧CAI:

対象数式 等号などのない式、等式、

アルファベットの大文字小文字を区別

処理方法と特徴 コースウェア作成段階で数式解答の前処理(複数の式の含まれる項により分類)をする。従って予想解答が増加しても、学習中に学習者を待たせる時間の増加は少ないが、コースウェア作成が複雑になる。

新CAI:

対象数式 等号などのない式、関係記号のある式、微分記号の式、アルファベットの大文字小文字を区別しない

処理方法 数式解答の前処理を学習中に行うので、予想解答が増加したり、式が複雑になると、学習中に学習者を待たせる時間の増加が大である。

このように2つの方法はそれぞれ特徴を持った照合方法である。旧CAIの数式照合法については文献(3)で述べた。ここでは今回の照合法について説明する。

この数式表現を表3に示す。<定数>は(分子の整数、分母の正整数)で表す。<記号変数>の<コースウェアで指定された記号変数>とはコースウェアの予想解答の中の変数であ

る。eは自然対数の底、piは円周率、xとtは微分する変数である。〈関数指数〉でnilは定数1即ち〈定数〉の形で(1, 1)と等価である。列举式は複数個の引数を単に列举したもので、「3つあげよ」「5つ以内で答えよ」のような設問に利用することができる。以下に例を示す。

例 2. 5 → (5, 2),  
 $\sqrt{2} \rightarrow ((2, 1) (1, 2))$   
 $X^a \rightarrow (X, a),$   
 $(a+b)^2 \rightarrow (a+b, 2)$

図2にこのCAIで使用する数式の外部表現の一部を示す。

表3. ICLisp-CAIでの数式表現

〈式〉 ::= 〈定数〉 | 〈指数付定数〉 | 〈記号変数〉  
 | 〈指数付記号変数〉 | 〈関数〉 | 〈関係式〉  
 | 〈列举式〉

〈定数〉 ::= (〈整数〉, 〈正の整数〉)

(注) car部が分子、cdr部が分母

〈指数付定数〉 ::= (〈定数〉 〈指数〉)

〈記号変数〉 ::= 〈コースウェアで指定された記号変数〉

| e | pi | x | t | inf

(注) 予想解答が「c\*rho+f」ならc,rho,fがコースウェアで指定された記号変数になる。

piは円周率の記号、infは無限大の記号

x, tは微分する関数の独立変数

〈指数付記号変数〉 ::= (〈記号変数〉 〈指数〉)

〈指数〉 ::= 〈定数〉 | 〈指数付定数〉 | 〈記号変数〉

| 〈指数付記号変数〉 | 〈関数〉

〈関数〉 ::= (〈関数名〉 〈関数指数〉 〈引数の並び〉)

〈関数名〉 ::= \_+ | \_\* | \_sin | \_cos | \_exp

| \_log | \_d/dx | \_d/dt

(注) 演算子 -, /, tan, sqrt, 指数は構文解析時に上記の関数に変換される。

〈関係指数〉 ::= nil | 〈指数〉

(注) nilは定数(1, 1)を表す。

〈引数の並び〉 ::= 〈引数〉 | 〈引数の並び〉 〈引数〉

〈引数〉 ::= 〈定数〉 | 〈指数付定数〉 | 〈記号変数〉

| 〈指数付記号変数〉 | 〈関数〉

〈関係式〉 ::= (〈関係式名〉 nil 〈左辺〉 〈右辺〉)

〈関係式名〉 ::= \_= | \_> | \_< | \_>= | \_<= | \_/=

〈左辺〉及び〈右辺〉 ::= 〈定数〉 | 〈指数付定数〉

| 〈記号変数〉 | 〈指数付記号変数〉 | 〈関数〉

〈列举式〉 ::= ( \_cm nil 〈引数の並び〉 )

このCAIでは式は二度評価の対象となる。

第1回目は外部表現の構文解析と同時に内部表現の生成時であり、第2回目は内部表現から式の展開を行う時である。

以下の規則で式の評価を行う。

- (1)結合則によるカッコ式の除去、
- (2)交換則による引数の並べ替え
- (3)関数の評価、(4)引数や指数の特異値評価
- (5)関数に対する分配則適用

特異値とは関数の適用で引数が1個になったりする場合である。なお因数分解問題の解答照合等、式の展開が無意味な因子には予想解答の評価式にn番目の式であることを式の名前で表現する。即ちn番目の式にはそれ特有な名前が付けてある。+、-、指数演算、初等超越関数、微分演算には限定した展開規則を定めて処理している。その一部を表4に示す。

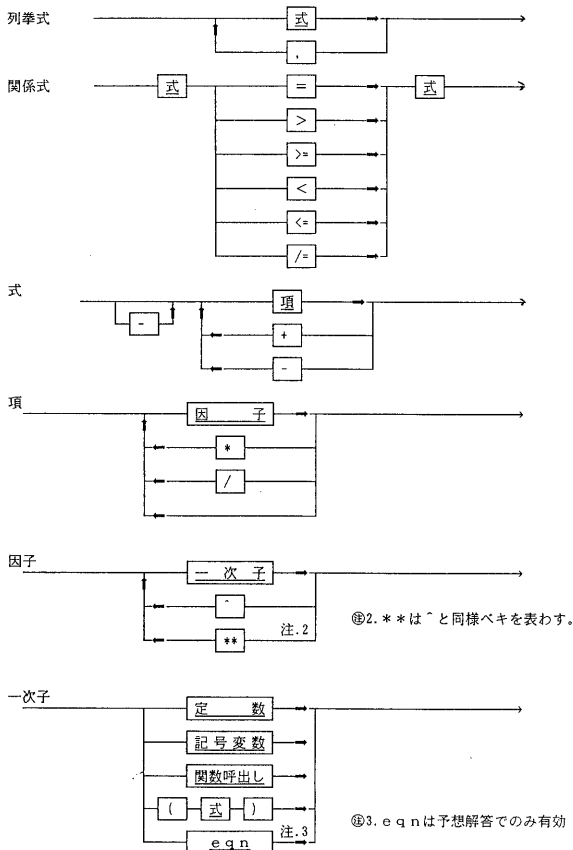


図2. 一部の数式の外部表現

**表4. 関数の一部の適用方法**

(1) sin 関数

$\sin(-\theta)$  なら  $-\sin(\theta)$   
 $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)$  は加法法則で展開  
 $\sin(0)$  は0とする。  
 $\sin(k*\pi)$  で  $k_1 = k \pmod{2}$  として、 $k_1$  が 1/6, 1/4, 1/3, 1/2, ... など 1.5 の値の一つなら対応する定数にする。

(2) log 関数

$(\log(x))^y$  なら  $y*\log(x)$  とする。  
 $\log(1)$  なら 0,  $\log(e)$  なら 1,  
 $\log(\exp(x))$  なら  $x$  とする。  
 $\log(x_1 * x_2 * \dots * x_n)$  なら  $\log(x_i)$  の和とする。その他は変更なし。

(3) 微分 (d/dx と d/dt があるが、d/dx のみを記す)

$d/dx(y)=0$  ( $y$  は  $x$  を含まない式)  
 $d/dx(cx)=c$  ( $c$  は定数)  
 $d/dx(x^y)=y * x^{y-1}$   
 $d/dx(f_1(x)+f_2(x)+\dots+f_n(x))$   
 $=d/dx(f_1(x)) + d/dx(f_2(x)) + \dots + d/dx(f_n(x))$   
 $d/dx(f_1(x)*f_2(x))$   
 $=f_1'(x)*f_2(x) + f_1(x)*f_2'(x)$   
 $d/dx(f(g(x))) = f'(g(x)) * g'(x)$   
 $f, g$  は  $\sin, \cos, \exp, \log, +, -$  のいずれかで、各関数の微分規則が与えられている。

関係式を正規化する処理手順は以下のようである。

- (1) 右辺を左辺に移行して、右辺を 0 にする。
- (2) 左辺が多項式なら、各項の係数に次の値を乗ずる。  
 (分母の最小公倍数) / (分子の最大公約数)
- (3) 左辺そのものが指数を持たず、最初の項が指数を持たず、かつ負の係数を持たば、各項に -1 を乗じ、関係演算記号も対応するもの (< なら >) に置換する。
- (4) 関係演算記号が <= または < のとき、右辺と左辺を交換し関係演算記号を >=, > に置き換える。

**照合時の一致性について**

旧 C A I では解答と予想解答の一致性を両式の比と距離という概念で行った。新 C A I では両式の類似度を算出して一致性を判定した。類似度は以下の点から算出する。

- (1) atom なら atom と対応するか。(2) 関数なら同一の関数であるか。(3) 交換則が成立しない関数は対応する項の類似性。(4) 交換則の成立する関数では各項の照合をする。このとき係数とその他の項に分けて照合する。その他の項が一致するときは係数を比較する。(5) 対応しない関数や項についてはその中の atom の数を求める。

対応する atom の数を  $s$ 、対応しない atom の数を  $n$  とすると、類似度を  $s / (s + n)$  で表した。以下に例を示す。

例: 予想解答が以下の 4 つの場合

- (1)  $a^2 + 2ab + b^2$
- (2)  $a^2 + ab + b^2$
- (3)  $a + ab + b$
- (4)  $a * b$

解答が  $a^2 + 3ab + b^2$  ならば、類似度は (1) に対して 8/10, (2), (3), (4) に対しては各々 8/9, 4/11, 0 である。

**コースウェアでの照合に関する記述**

どのような照合方法を行うかはコースウェアで指定する。照合方法は次の 5 個のパラメータで決める。

- (1) 類似解: 正解でない時は類似度を使用する。
- (2) 関係式正規化: 関係式の時、正規化をして照合を行う。
- (3) 式展開: 構文変換だけで照合をできなければ、展開して照合する。
- (4) 分配則: 式展開で分配則を有効にする。
- (5) 微分: 式展開で微分関数の適用を有効にする。

照合は次のように行われる。

- a. 学習に先だってその質問の全予想解答に対して、構文解析結果と、式展開が指定されていれば式展開の結果を保存する。
- b. 解答の構文解析を行い、照合を行って類似度 1 で照合すれば、照合を終わる。
- c. 類似度  $\approx 1$  で式展開が指定されてないとき、類似解指定なら最大類似度の予想解と照合し、類似解指定がないと照合失敗。
- d. 類似度  $\approx 1$  で式展開が指定されているとき式を展開し、照合する。
- e. d で照合失敗したとき、類似解指定なら最大類似度の予想解と照合し、類似解指定がないと照合失敗

**数式照合の処理時間について**

新 C A I によりプロセス制御用コースウェアを作り、約 40 人の学生に C A I 演習を 2 時間行わせた。このコースウェアは V T R により説明を加えながら学習する方式をとった。このシステムの照合処理時間は「学習に先だって質問の全予想解答を構文解析して、式展開が指定されていれば式展開の結果を保存する」ための処理時間と解答照合時間に分けられる。前者を照

合前処理時間と呼ぶこととする。予想解答では解答式の複雑さと予想解答数が関係する。例えば予想解答を  $Y = (X + 1)^n$  とすると、 $n$  の値が大になると展開して次数の大な多項式になるので、処理時間も大になる。

図3は予想解答数1のときの照合処理時間と  $n$  の関係を表した。この図は照合前処理時間は  $n$  の指数関数で増加し、解答照合時間は  $n$  に比例して大になることを示している。図4は  $n = 2$  の場合の照合処理時間と予想解答数の関係を表した。

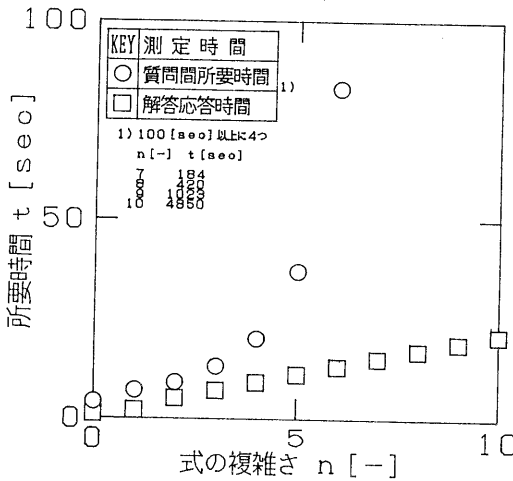


図3. 式の複雑さと計算時間

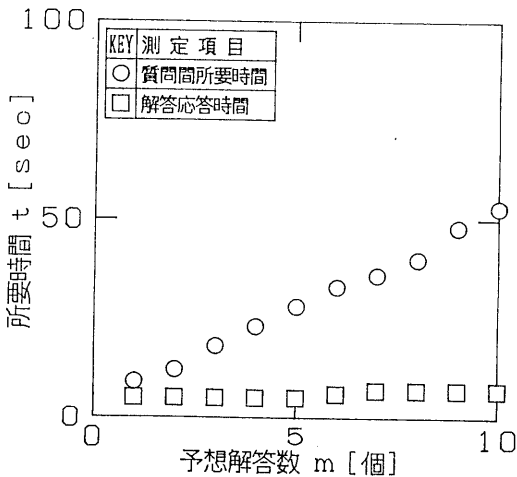


図4. 予想解答数と計算時間

この図は照合前処理時間は予想解答数に比例して増加し、解答照合時間は一定になることを示している。この場合照合が成功する1つの解答を入力しているため解答照合時間が一定になるが解答を変えたり、照合が失敗する解答にしたりとすると照合時間が増加することが予想される。このような問題があり、質問に対して「全予想解答を構文解析して、式展開が指定されていれば式展開の結果を保存する」処理をコースウェア作成の段階で行う必要があると言えた。

### 5. おわりに

山形大学におけるLISPによるCAIシステムでの実験指導用の2つのコースウェア(化学工学用、機械工学用)の開発、その構成、学習効果などを報告した。このシステムの移植性を高めるためDOSエクステンダ上に新しいLISPインタプリタの開発したことを報告した。また移植性を高める別な試みとして市販のIC-LISPを用いたCAIシステムの開発、コースウェアの作成、学習指導での利用などを行ったことを報告した。このCAIシステムの数式解答照合法についてその特徴を報告した。LISP-CAIを利用した学習ソフトとして主にVTRによる映像教材を利用するコースウェア開発などを行っているが、そのビデオ教材の質を高めるなどの別な次元の問題が起きているのが現状である。

この研究での分担は以下のようなものである。研究全体は最首が進めている。コースウェア開発、演習での利用、学習効果の解析などを横田、小貫、日下部が担当した。新しいLISPの開発は小沼が行い、そのパソコンへの移植は最首が行った。IC-LISPによるCAIシステムの開発は富樫が担当した。

なお京都マイコンビスタ製DOS-ExtenderはA\*ブリックト・マイクのソフトであり、供給頂いたことを感謝する。

### 参考文献

- (1) T. Chikayama: Utilisp Manual, Math. Eng. Tech. Report 81-6, Dept of Math. Eng. Univ. of Tokyo, 1981
- (2) 最首、小沼: 知的CAIのためのLispシステムの開発, 山形大学紀要(工学)19, 1986

- (3)最首、津川、横田、日下部：C A Iにおける  
数式解答の照合機能とコースウェア改良にお  
けるその応用，C A I学会誌6,1989
- (4)最首、横田：L I S P - C A Iの利用  
(V T R制御と辞書検索)  
C A I学会第3回C A I講座資料,1989
- (5)最首、横田、日下部：L I S P - C A Iシス  
テムの開発状況，信学技法ET89-99,1989
- (6)最首、横田、小貫：L I S P - C A Iシステ  
ムの開発状況(2)，第15回C A I学会大  
会論文集，1990