

コンピュータ利用による 数学教育学における基本的な研究課題 —— インターラクティブという観点からの考察 ——

愛知教育大学 飯 島 康 之

0. はじめに

数学の教材研究をより広くより深く行う際、現在でさえ、コンピュータは一定の役割を果たしている。今後もその傾向は高くなると言っていいたい。しかし、一方において、コンピュータを使った教材として目にするものの中に、かえって教育的には不適切と思えるものが少なくないのも現状である。工場の FA 化や事務処理の OA 化と違って、教育の場合には、コンピュータ利用が人間にどのような影響を及ぼすのかをより深く分析しなければならないが、そのような蓄積がまだ不足しているからである。

そこで本稿では、コンピュータ利用が数学教育の実践及び研究にとってどのような基本的な研究課題を与えるのかを明らかにすることを目的とする。そのため、まずコンピュータの導入はどういう問題を我々に投げかけているのかという問題状況の分析を行い、次にインターラクティブという観点から、コンピュータ利用に関して重視しなければならないことについて考察する。そして教材研究という視点から考えたときにはどのような取り組みが可能かを段階的に検討するとともに、そこで数学的探究の分析と研究がどのように必要とされるかを明らかにする。

1. 問題状況の分析

1.1 コンピュータの利用によって「数学する」こと自体が大きく変わる

我々は、どうして数学教育の中でのコンピュータ利用の可能性を考えようとしているのだろうか。最も大きな要因は、「それによって『数学する』こと自体が大きく変わるからだ」ということではないだろうか。まず、このことの分析から始めたい。なお、ここで考えるべき『数学』としては、生徒自身が行う数学と、職業的数学者が行う数学という二つの種類のものを考える方が妥当だろう。そこで、両者について検討しよう。

日常生活の中での数学あるいは数的処理を考えると、電卓の登場は大きな影響があった。しかし、学校数学においても、また数学者の世界においても、電卓の登場はそれほど根本的な影響は及ぼしてこなかった。そういう観点から考えると、コンピュータの登場もせいぜい電卓のときとあまり変わらない、つまり本質的な影響は及ぼさないという見方もあるかもしれない。しかし、現実には、コンピュータが数学に及ぼす影響は電卓の時の比ではないように思える。この点を詳

しく考察してみよう。

四則演算程度を考える場合、電卓という道具の登場は大きかった。そして、少なくとも、社会の中での「計算」の多くは、手計算やソロバンあるいは機械的計算機から電卓に置き換えられた。しかし、数学者にとっての数学的活動にも、また生徒達の数学的活動にも、それほど大きな影響は及ぼしてこなかった。まず、数学者の数学的活動の場合について、その理由を検討し、コンピュータの場合との差異について考察しよう。

電卓は、社会の中での経済的活動の場面や自然科学、社会科学等の場面での計算では不可欠のものとなったが、数学的研究の中で使う人はあまり多くなかった。四則あるいは特定の関数の値を計算してくれるという代替機能は数学者の活動をそれほど支援してくれなかった。経済的活動や自然科学、社会科学のように現実のデータ、いわゆるダーティな数を扱う人にとっては、その計算そのものの煩雑さがとても大きな問題だったと言える。しかも多くの場合、正確さと同時に迅速さが要求される。たとえば、そこで使われている計算は、現在の経済活動の中での意思決定のためのデータの収集としての計算である。速く結果が得られれば、それだけ次の行動を速く決定することができ、他者との競争に有利になる。余程の熟練者でない限り、電卓の方がソロバンよりも速くて正確であり、電卓に代わるのは当然のことだった。

しかし、数学者にとっては、そのようなダーティな数を扱う場面はずっと少ない。自分が考えている現象について調べるための計算であるから、最も適切な場合を見つけ、計算することが大切である。そして、計算手続きなどを考える部分に、数学的思考の働く部分がかなりある。手でも計算できるような適切な事例を自分なりにうまく絞り、それについてじっくり考える方が、むやみに計算することよりもずっと適している。

また計算をするといっても、四則や特定の関数の値を組み合わせただけのもので得られるようなものではない場合の方が多い。具体的な四則計算等の結果を電卓が与えてくれるとはいっても、計算全体の流れを管理するのは自分自身でなければならないし、それでは計算全体に対してそれほど大きな改善を与えてくれるとは言えないのだ。

例えば、線形代数の中から二次曲線の概形を求めるための計算をする場面を考えてみよう。大雑把に次のような手続きを経ることになる。

- (1) 二次形式を作り、対称行列表現をする。
- (2) 対称行列の固有値を求める。
- (3) 固有ベクトルを求める。
- (4) 対称行列を対角化する。
- (5) 原点の移動によって x と y の一次の項を消去する。

このような一連の手続きを実行するに当たって、四則や特定の関数の値を容易に求めることができたからといって、あまり事態は改善されない。わざわざ電卓を使おうとは思わない基本的な理由がそこにある。

しかし、コンピュータの場合には、このような一連の手続きそのものをプログラムとして表現

することによって、計算手続き全体を実行させることができる。不適切な結果が出てくるかどうかを観察しながら、その手続きを管理すること、改良することができる。しかも、そこでの思考の流れは、数学者自身が日頃考えている思考の流れとそれほど変わらない意識のままで扱うことができる。プログラムと言っても、言語そのものを扱う場合に限らない。現在でも、様々なアプリケーションが開発されているが、言語の構造あるいはコンピュータの仕組みを意識しなくても、自らが日頃扱っている数学的対象そのものをオブジェクトとして提供し、日頃の思考の流れの延長線上での対話的処理が可能なソフトがある。自分の思考のスタイルを妨害されることなく、ボトルネックの部分を解消してくれるような環境があれば、それを利用するのが自然なのだ。

ここでいう、「改善される」という意味は、ただ単に時間の短縮を意味するだけではない。たとえば、二次曲線の場合ならば、パラメーターを変えるのに伴って曲線自体がどのように変化するかを観察することはとても自然な課題となる。また、何点を指定すれば二次曲線は決まるのか、そしてその中の一点を動かしたときに、二次曲線はどのように変化するかを観察することも自然な課題となる。このような課題は、コンピュータなしでも考える課題だが、手で計算する場合には、それに要する労力と時間を考えると、結局かなり意志の強い人でなければやらないだろう。その労力を軽減されることによって、今までよりも多くの人が、その課題に「取り組んでみようか」と思える可能性がある点が重要なのである。実際に操作してみた結果、リアルタイムにその結果が表示される。その結果の正しさを証明すること自体は別の課題なのだが、どのようなことが成立するのか、あるいは成立しないのか、どのようなことならば証明を課題として考えても価値がありそうか、というようなことについて検討することが可能になってくる。

このように、職業的な数学者にとって「数学する」ことを変えてくれるがゆえに、数学者は必要に応じてコンピュータを使う数学者は増えつつある。特に、コンピュータの使用の有無が数学的作業にとって決定的な影響をもたらすような分野では、それなしに新しい研究成果を得ることが難しいような状況にさえなっている。このような状況について、渡辺公夫氏は次のように述べている。

「写真機の普及によって絵かきと画家が分かれ、画家本来の仕事が明らかになったように、コンピュータが使われだして、数学の本来の姿、数学者の本来の仕事がより明確になったとみることできる。人はそれを数学は変わったというかもしれないが、むしろ枝葉末節が切り落とされ、より本質的な部分が現れてきたと言えるであろう。」(渡辺公夫, 数学セミナー1994.1, p.30)

さて、このような状況は、数学者のみにとっての問題だろうか。先程と同様に、まず電卓、そしてコンピュータとの関わりについて検討しよう。

日常生活では、買い物の合計など、四則演算の正確かつ迅速な実行のために電卓は使われている。しかし、四則計算の練習をする場面で電卓を使うように指導する先生はおそらくいないだろう。というのは、そこでは四則計算に関する技能を伸ばそうという意図があるからである。あるいは、四則演算に係わる計算法則等を意識化する中で、数に関する理解等を深めることを想定しているからだ。ボタンを押すことによって答えそのものは出てくるが、それによって学習場面と

しては失うものの方が多いから、四則計算の練習の場面で電卓を使う場面は非常に少ない。

逆に、そのような理解や練習を前提としていないような場面では電卓が使われている。例えば、二次関数の曲線を点をプロットしながら求める場面とか、統計的な数値を求めるような場合である。ただ、そのような場面が、学校数学全体の中で占めている割合はまだとても小さいため、結果として、電卓の登場は学校数学にあまり大きな影響は及ぼしていないのが現実なのである。(ただ、そのことは、電卓の登場は数学にとって意味がないということをそのまま意味するものではない。電卓をうまく使う場面がまだあまり見つからないということに他ならない。)

以上のことから示唆されることは、次の2点であろう。

(1) 答えを安易に与えてくれる機器として使う使い方の場合、むしろ教育目標を阻害する危険性が高い。

(2) 教育目標の実現あるいは、生徒の数学的活動そのものを改善してくれるかどうか、コンピュータ利用の基本的な判断基準となる。

特に、(2) に対して、どのような答えを見出しうるのかがコンピュータ利用にとって重要なのである。このことについては、次の項目で詳しく検討することにした。

1.2 学習環境の設計・実装が可能であり、複製が容易に作れる

コンピュータを教育的観点から考察する場合、電卓などの道具あるいは一般に各種の教具と比較したときの大きな特徴は、「コンピュータの場合、かなり複雑なものであっても、学習環境の設計・実装が可能であり、その複製が容易に作れる」という点である。この点は、これまでの教具研究と大きく異なる。

まず、計算等の道具として考えた場合に、電卓やソロバンとの違いについて考察しよう。前述の(2)の項目に関連して考察するならば、電卓の設計は基本的に所与のもの、変更不可能なものであって、その使い方を考えることしかできないが、コンピュータの場合には、教育目標の実現の度合いを評価しながら、その環境自体の設計を変更していくことが可能な点にある。また、すでに述べたように、これらは主として計算を正確・迅速に行うことが主たる目的であった。それを使いこなして、より大きな問題解決に行えるためには、技能に習熟することが不可欠であったし、またそのような道具は、日常生活等の中では重要だったが、数学研究の中ではほとんど重要でないため、それらを使うことによって可能になる活動の分析等も行われてこなかった。

次に、教具研究あるいは環境の研究という観点から考察してみよう。これまで、数学教育の中では、教具・教材の研究がなされてきた。そして、多くの成果を収めてきているし、有能な教師は必ずといっていいほど、教具の工夫をしている。教具の研究は、数学教育にとって、かなり本質的な活動の一部である。ソフトの開発を、このような教具の研究の延長線上に考えた場合、これまでの教具・教材の研究での方法論のほとんどを利用することができる。いわゆるモノを使った教具・教材の研究と比較した場合、次の点な相違点が挙げられる。

(+1) モノを使った教具の場合、設計は自由に行えるのだが、あまり複雑なものはいできない。

これに対してコンピュータの場合には、かなり複雑なものでも設計・実装が可能である。

- (-1) モノを使った教具の開発は非常に手軽だが、ソフトの開発をするためには専門的な知識と技能が必要である。
- (-2) ソフトの開発には、多大な時間と労力が必要である。
- (+2) モノを使った教具の場合、設計と製作はまったく別の事柄であり、製作には個々の経費が必要になる。これに対して、コンピュータの場合には、設計と実装はかなり緊密な関係にあり、一度実装されたものの複製はほとんど経費なしに可能である。

一見、(+2) はあまり意味がないように思えるかもしれない。しかし、複製が容易だということとは、次のことを示唆する。

- (+3) コンピュータのソフトの場合には、一度開発されたものは、原理的にはすべての人が共有可能である。そして、全く同一の環境を提供することが可能である。
- (-3) コンピュータのソフトの利用に際して、それを利用可能なハードが必要である。そのような機器の有無が環境の利用可能性の有無に影響する点は、新しい問題を生む。

この中で、最後の(-3)の問題点は、単に数学教育研究の範囲だけで解消できるものではない。公教育の中での環境の整備の問題、家庭の中での学習環境の整備の問題でもある。またソフト開発上の指針として、数学教育の観点から考察可能なものもあるが、むしろソフト・ハードの両面に係わる経済的な課題の方が大きい。

本稿の中では、数学教育研究に係わるような問題点、特に、生徒の数学的探究を行う環境として、これまでのどのような部分を改善しうるのか、そしてそれを研究していくための方法論等について考察する点に限定して考えていくことにする。

2. 基本的な視点としての「インターラクティブ」

2.0 検討のための基本的な視点としての「インターラクティブ」

上記の二つの点から示唆されるように、コンピュータを使うというのは、これまでの数学的活動や教育研究と比較して、大きな相違点がある。それを集約する言葉の一つが、「インターラクティブ (interactive, 対話的とか相互作用的ななどと訳されることもある。)」であろう。そこで、本節では、この「インターラクティブ」というのはどういう場面において、どういう意味において重要なのかを検討することとしたい。

2.1 数学的活動そのものがインターラクティブ

第一の点は、1.1で考察したように、数学的活動そのものが変わるという点である。特に、これまで煩雑な計算等に割かれていた時間等が、思考の時間として使えるようになると、今まで考えていたよりもより広く、より深く数学的思考を広げることができる。渡辺氏の表現を借りれば、「数学者本来の仕事がより明確になった」ということであり、学校数学に関して言えば、数学的思考に係わる部分により焦点を当てられるということだろう。しかし、この部分が変更されて

くると、与えられた知識・技能をできるだけ能率的に学習するというときの学習とは根本的に異なってくる。ある意味では、コンピュータに任せられるのはどの部分かを検討し、人間がしなければならない部分はどこなのかをしっかりと検討することが必要になる。それは一体何なのか。コンピュータを使って、これまでの結果とは違ったものを導ける場合を検討してみると、インターラクティブな数学的活動に注目することが必要になる。それを段階を追いながら具体的に述べることにしよう。

2.1.1 決まりきった問題を解決する手段としてコンピュータを使うことの不毛性

数学にコンピュータをどのように使うかと漠然と考えたときに思いつくのは、「手でやると大変だったあの計算をやらせてみよう」というようなことである。そのこと自体にももちろん意味はある。だが、それしかさせないというのはいかに不毛なのである。

私自身が経験した具体例から述べることにしよう。

問題1： $\sqrt{2}$ をできるだけ高い精度で求めよう。

という問題があった。この問題は中学校3年で扱うが、そこで扱っている開平のアルゴリズムは、手計算ではせいぜい数桁しかできない。だが、コンピュータなら数十あるいは数百桁まで計算できるようになる。もちろん、数百桁まで計算可能にするためには、(UBASIC なら簡単だが)通常の言語では少し工夫がいる。そのような工夫を行ったという満足感もあつてのことだろうが、数百桁まで求めた $\sqrt{2}$ を見て、私自身は満足していた。

大学でのある授業で、学生にそのプログラムを実行させてみた。自分なりの満足感の記憶が私自身にはあるから、きっと学生も喜ぶだろうと思っていた。「へえっ」と彼らは喜んでくれた。しかし、続くものがない。思惑とかなり違ってきた。

だが、それを観察している学生の立場から考えてみれば、それは当たり前のことなのである。結局、彼らの目から見てみると、 $\sqrt{2}$ を詳しく計算してくれるブラックボックスがそこにあるというだけのことだ。手で計算するのは大変だし、電卓なら8桁程度だから、なるほどコンピュータはもう少しましだと思うかもしれないが、要するに、ただそれだけのことである。「だからなんなの」と言いたくもなるはずだ。教官が嬉々として紹介しているから、まあ聞いておいてあげましょう、という程度のところだろう。

コンピュータ利用において、こういうことはよくある。四則演算の練習を電卓で行ってしまうことの不毛性と同じなのだ。そういう不毛性を乗り越えることができないのなら、使わない方がましなのである。つまり、私自身が、プログラミングをしながら感じた喜びを、「プログラミング」という課題のときに感じるように残しておく方が妥当なのであって、数学の時間に行うべきことではないのである。

では、そのような不毛性を乗り越えるためには、どうしたらいいのだろうか。そして、不毛でないようにするためには、教育的には、何をどう研究したらいいのだろうか。その一つの答えは、「探究を探究する」ことなのである。つまり、コンピュータを使いながら、もう少しましな探究が行えたというのはどういうときかを分析し、そのような探究の一部として、学習過程を設計

しなおす必要があるのだ。

そのような目で分析したとき、一般的にはどのような活動が指摘できるのかを以下で考察してみることにする。

2.1.2 得られた結果から考察すること

一つは、計算結果として得られたものを単なる「成果」として眺めるだけではなく、それを一つの実験結果、そして仮説設定のためのデータとして扱うということだ。たとえば、 $\sqrt{2}$ について考えるなら、その数百桁の数字の並びを眺めることから何か発見することができるなら、それまでにはできなかった活動が展開することになる。そうでなければ、正確に計算するという程度で止まることになる。

私自身は、その場で、「循環していないことを観察してみよう」という程度の指摘しかできなかった。だが、このことは見れば分かることだから、あまり深い発問とは言えない。もう少し深い探究が可能な問いを用意すること、あるいは用意できるような問題に精選していくことが重要なのである。

似ている例であっても、もう少し深い追究が可能と思われるものを挙げてみよう。それは、分数の小数展開である。プログラム自体は、次のことをしてくれるとしよう。

入力： n/m の形の分数

出力： $0.***$ の形の小数（任意桁数）

n 、 m としていろいろな数値を入力させてみる。すると、気づくことがいろいろとあるはずだ。たとえば、

1. どんな分数でもどこかで循環している。
2. ほとんどの分数は無限小数になる。つまり、分母の約数に 2, 5 以外のものがあると無限になってしまう。
3. n 、 m によっては、すぐに循環節から始まるものもあれば、そうでないものもある。
4. m の大きさと循環節の長さに何らかの関係がありそうだ。

程度のことはすぐに思いつくであろう。そして、次にどんな数を調べてみるといいだろうかという気持ちに進展していくはずである。あるいは、教師の側からの発問として、

「できるだけ長い循環節を持つ分数を見つけられるのは誰だろう」

などというものも考えられるかもしれない。それらのデータを観察した結果として、「どんな分数も有限の循環節を持つ」ということを扱うだけでなく、様々な副次的な問題を考察することができるのである。

2.1.3 問題状況から問題を発見すること

ここで重要なのは、これらの問題は教師によって与えられるのではなく、生徒が問題状況の中から発見できるということだ。つまり、コンピュータを道具として使うときに、それが意味ある事例かどうかの判断基準として、

「コンピュータなしには発見できなかったような問題を発見できたか」

「コンピュータなしのときには教師から与えていた問題を、生徒自身が発見できるような問題状況を構成することができたか」

というような基準を挙げることができる。

もちろん、このような「問題状況から問題を発見すること」というのは、決して新しい教育目標ではない。有能の教師は日頃の授業の中で十分に取り入れていることである。特に、学年が低くなればなるほど、児童・生徒主導で授業を構成する必要がある。教師から押しつけたような問題では、いい授業をすることはできない。

また、中学校などでも、そのような問題を発見する活動を前提にして教科書を記述している部分さえある。例えば、次のような例を挙げることができる。

「四角形 $ABCD$ の4辺 AB , BC , CD , DA の中点を、それぞれ P , Q , R , S とすると、四角形 $PQRS$ はどんな四角形になるか。」(啓林館, 中2, p.165)

コンピュータ利用にとって重要なのは、このような活動が可能な領域をさらに拡大できるということと、このような活動をさらに深めることができるということである。そして逆に言えば、このような活動と結びつくことによって、コンピュータによる計算という無味乾燥なものが、能動的で人間的な活動のための道具としていきいきと使うことができるようになるという点である。

2.1.4 Situational な判断の重要性和多様性

さて、前節では、問題を発見するという活動について述べたが、この活動は与える問題状況によって大きく変化する。もちろん、提示する問題文によっても変化するし、使う道具によっても変化する。また、一緒に議論している仲間からの発言によっても変化するし、アドバイスによっても大きく変化する。そこから何を問題として感じるかは、その状況に依存した判断によって大きく左右される。数学科での指導と言うと、決まりきった公式をどう記憶するか、効率よく使うかという面などの方が目立つかもしれないが、このような問題発見という活動に注目すると、むしろ、Situational な判断の重要性和多様性が大きな鍵を握っているのである。そして、ほとんど同じ問題であっても、インターフェイスによって次に判断することが大きく左右されたりするのである。

しかも、コンピュータを道具として使うということは、生徒の思いつきを実行し、検証するための手段が強力になっていることを意味するため、思いつきがいいかどうかは今までよりも一層顕著に現れてしまうことになる。そして、同じ問題場面であっても、今まで以上に多様な考えが出てくる可能性がある。そのため、そのことを考慮した教材研究や授業設計をしておかないと、生徒が何を考えているかを把握しないまま授業を行うことになってしまうのである。

2.2 教授=学習過程がインタラクティブ

生徒が行うべき数学的活動はインタラクティブなものであるべきだという前提に立ち、そのようなインタラクティブな活動を実現するような授業を設計・実施してみると、当然のことだが、教授=学習過程そのものが非常にインタラクティブになっていることに気づく。あるいは

は、インターラクティブな授業にすると、コンピュータを使っていることの良さを大きく引き出せる。このことも、いくつかの側面から考察できるので、以下で順次考察していくことにする。

2.2.1 生徒の思いつきをうまく生かす

つまり、生徒の気づきはいずれも Situational なものである。その生徒の中で単なる思いつきとして終わってしまうのが普通である。しかし、集団の中で、その思いつきを評価され、それを実行してみたり、またそれに関連することを他の生徒から指摘されたりする中で、単なる思いつきではなく、それを育てることによって何らかの発見に結びつけることも可能なのだ。通常、授業論として語られるときの「臨機応変」というような事柄が、コンピュータがリアルタイムで結果を返してくれるという特徴とうまく結びつく可能性がそこにある。そして、このような経験を繰り返していくと、必ずしも長い時間コンピュータを操作させる必要はないことが明らかになってくる。一方的にコンピュータに作業をさせたり、一方的にコンピュータからデータを提示されるというようなことはあまり意味がない。コンピュータで調べるときに、どのように調べるといいだろうか、得られた結果をどのように評価するか、そこから気づくことはないか、そのような議論がかなり重要なのである。

2.2.2 データを収集しながら、自分の行動をコントロールすること

Situational なものが重要になると言っても、思いついたことを思いつくままに作業をするのでは、数学的活動は決して深まらない。むしろ、Situational な思いつきや目の前で時々刻々変化する現象に対して、自分の数学的活動全体の中でそれをどう位置づけるかを評価し、自分の行動そのものをどうコントロールするかが重要になってくる。

しかし、次節でも指摘するように、そのコントロールを生徒の主体性にどこまで任せて自由な作業をさせるかというのはなかなか難しい問題である。

2.2.3 どんな行動を取るべきか等に関する議論をさせることが重要

生徒にコンピュータを使う時間を十分に保証しようという授業の中で、うまくコンピュータが生かされていない授業の中に、生徒がただ闇雲にコンピュータを操作しているだけというスタイルの授業がある。コンピュータを操作する時間は確かに十分保証されているものの、生徒にとっては何をしたいのかがよく分からないまま、ただコンピュータの前に座っているだけの時間になってしまうのだ。

このようなことは、コンピュータに限ったことではない。実験や操作あるいはゲームなどを取り入れた授業などでも同様の傾向はある。生徒の作業に主体性を移行するという点で、コンピュータ利用も同様な側面が出てくるのだ。そのような意味では、これらの授業に関するノウハウをコンピュータ利用の場合にはも適用することが示唆される。

コンピュータの利用の仕方としては、教師主導から生徒主導に至るまで、様々な使い方が考えられるが、コンピュータとのインターアクションを生かす授業にするためには、ある程度生徒主導にしなければならない。しかし、何をしたいのか分からないのでは学習は成立しない。そのため、基本的な作業の流れが分かる程度までには、どういう行動を取るべきかを事前に議論さ

せ、また作業後に、発表させ、検討させることが基本的である。

2.2.4 (同様の環境の中で平行して作業をしている) 生徒同士の間の情報交換

作業をしているときに、もちろん自分の環境とのインターアクションが様々になされるはずだが、同時に平行して作業をしている周りとの情報交換がとても重要なことが少なくない。特に、何をどうしていいのかよく分からなくなったり、ソフトの機能等についての疑問が生じるなど、情報交換をしたい機会が、コンピュータを使う場合にはとても多くなってくる。そういうときに、どのように対処すべきかという行動様式も、ある意味では隠れたカリキュラムの一部なのであり、マニュアルとの接し方、情報交換の仕方なども考慮しておく必要がある。(2.4節参照)

2.3 ソフト=学習環境の開発がインターラクティブ

Polya が言うような、数学の実験科学としての側面を反映するためには、上記のような数学的活動、教授=学習活動がインターラクティブであることは不可欠な要因と言っていいたいだろう。そういう意味では、上記の考察は、必ずしもコンピュータ利用に限った議論ではない。それに対して、1.2で考察した点、つまり教具の開発あるいは学習環境の開発としてソフト開発を位置づけた場合、これまでとは別の意味でのインターラクティブの意味が現れてくる。

というのは、これまで行われてきたような教具と比較して、コンピュータ利用の場合には、次の2つの点が大きな特徴となる。

1. 開発の場面と利用の場面とが分離してしまいやすい。
2. 改良や複製が容易である。

一般に、教具の開発等は、授業を自分自身で行う機会の多い教師自身が行うことが多いが、コンピュータ利用の場合、開発が教室から離れた場所で行われることが多い。開発を分離できるということは、より専門的な人による開発を可能にするという面でプラスの面もあるけれども、同時に開発が一人歩きすることも少なくない。そのため、よりよいソフトの開発は、利用場面との相互作用が豊富である、ということが導かれるのである。逆説的な面から考察してみよう。

2.3.1 バージョンアップのないソフト

よく言えば完成されたソフトを意味するが、実際にはそういうことは稀である。実際、十分に使われているソフトでバージョンアップが数年間されていないようなものがどれだけあるかを調べてみれば明らかである。もちろん、市販ソフトの場合には、バージョンアップが重要な収入源という意味もあるが、それ以上に、利用の現場を分析し、改善の余地を探せば、改良の方向が必ず見つかるはずだということを示唆していると言えよう。むしろ、定期的に意見交換し、改良するサイクルを確立することが重要なのである。

しかし、教育用ソフトの実際を調べてみると、そのようなサイクルを持っているものはあまり多くない。次に述べるように、完成されている場合もないわけではないが、多くの場合、開発と利用とのインターアクションが少ない場合が少なくない。

また、そのソフト自身に関しては、改良の余地を考える必要はあまりないように感じるソフト

もないわけではない。そのようなソフトの大半は、使う授業場面が限られているソフトである。つまり、ある単元のある授業を想定して作っているソフトである。この種のソフトが教育用ソフトには多いが、この場合、使う場面が限定されているため、ある程度の吟味を行えば、一定の完成度に到達する。しかし、同時に、次節で述べるような問題点も抱えているようなものが少なくないのも事実である。

2.3.2 発想を広げたときに、それに対応してくれないソフト

上述のような完成品は、よく言えば、定番の授業を示唆してくれる。しかし、我々が、一つの授業像しか考えない場合は少ない。いろいろと変更の可能性を吟味して、こうしたらどんな授業になるだろうなどと検討する。同じ単元であっても、生徒の実態によって、かなり臨機応変に対応しているのが実際の授業であるし、そういう部分が授業の面白さでもある。上述のような完成品に対してよく感じる不満は、そういう授業検討の面白さを許容してくれないことが多いことである。ソフトを見れば、授業の流れは分かるほどきっちりしているのでマニュアルなど要らないのだが、ちょっと変えてみようと思ったときに、「それはこのソフトでは無理ですね」という返事が返ってくるようなソフトであることが少なくない。しかし、本来コンピュータとは、思考を自由に広げることを支援すべきものであって、思考を制限すべきものではないはずだ。

もっとも、思考に対応する方法は様々である。ソフトの内部で思考に対応する方法だけでなく、ソフトを数多く用意して、そこから「選択する自由」を用意するという手もあれば、「ソースコードを変更し、自分なりのソフトを作る自由」を用意する手もある。重要なのは、思考の広がりに対して、どのような対応の手を用意しているかが明確かどうかという点である。しかし、それをきちんと準備しているソフトは残念ながらまだ少ないのである。

2.3.3 それを使っても新しい世界を与えてくれないソフト

この種のソフトには2種類のものがある。一つは、それがなくなるときにも分かっていたことしかしてくれないソフトであり、もう一つは、奇抜なものを与えてくれるけれども、その原理が分からず、まったくコントロールすることができないソフトである。

コンピュータを使うには、いろいろなことを学ばなければならないことが多い。それだけの投資をしながら、ないときとあまり変わらない成果しか得られないのでは、使わない方がましである。また、奇抜なもの、例えば驚くようなグラフィックスを与えてくれるとしても、それをコントロールすることが全く不可能ならば、絵や VTR のように一方向的なメディアと変わらない。最初は気を引かれることがあるとしても、そこから自分の世界を広げ、深めていくことができないのである。これらのソフトの場合は、結果として、改良を考える気にさえならないということが少なくない。

以上、3つの点から逆説的に述べた。より前向きに述べるなら、次のようにまとめることができる。

- (1) いいソフトとは、原理は分かっている、自分なりにどうコントロールすればいいかが分かっていると同時に、その原理を使いこなしてみると、思いもしなかったようないろいろ

ろな現象が広がってくるようなソフトである。

- (2) いいソフトは、発想をいろいろと広げてくれる。そのため、使っているうちに、当初は想定していなかったような、いろいろな現象を導き出してくれる。その経過で、多くの場合、新しい不満点、改良すべき点が発見されてくることが多い。
- (3) そのような不満点、改良すべき点が発見されたときに、元のソフトが改良しうるようなサイクルが確立していることが必要なのである。そして、そのようなサイクルこそが、開発と利用場面との間のインターアクションなのである。

2.4 ユーザー集団（教師）における情報交換がインタラクティブ

さてここでは、より具体的に Geometric Constructor の使われ方を分析に基づいて考察を進めることにしよう。これまでのユーザーの方々の様子を拝見していると、様々な差異がある。その中でも顕著なことのひとつとして、ユーザー集団におけるネットワークがある中で使われているケースはそうでない場合は顕著な差があることが指摘できる。もちろん、個人として使いこなしている方もいる。しかし、ユーザー集団を形成している場合の方が、ソフトの習熟に要する個人的な努力が少なくても、かなり広くそして深く使いこなすためのノウハウを持っている場合が多いように感じる。

例えば、私自身をいくつかのソフトのユーザーとして分析してみよう。自分の不可欠の道具として付き合い合っているソフトはせいぜい数本である。それらに関しては、熟知している。長い付き合いがある。だが、その他のソフトに関しては、限られた時間と労力の中で、基本的な事例を追体験してみたり、基本的な思想や設計、インターフェイスなどを理解するに止まることが多い。Geometric Constructor と開発意図が近接しているソフトとして CABRI と GeoBlock を持っているが、それらを使って新しい数学的世界を広げることは意外に少ない。それは、この二つのソフトの機能が低いからではない。その気になって付き合い合えば、それに見合った体験を広げてくれるのは分かっているのだが、そのために新たに学習しなければならないことと使える時間的余裕を考えると、結局 Geometric Constructor で考えることになってしまう。

一方、研究会や文献などで、上記のソフトや他のソフトではどのような事例をどう扱っているのかを調べることがよくある。これはかなり有益だ。昨年、PME では Labrode 氏と議論することができたが、CABRI の開発者でもありスーパーユーザーでもある氏との会話からは得るものが非常に多かった。GeoBlock の場合でも事情は同様である。科学教育学会などでの日高氏との対話や、実践に関する文献からは得るものが多い。

このように、対価を支払って購入したつもりでいる「ソフト」以外にも、非常に重要なものがある。購入した「ソフト」が与えてくれるのは、その扉を開けば、いろいろな世界が広がって、体験をさせてくれることのできる「可能性」である。しかし、それは「可能性」でしかないから、それを自分のものにするためには、自分自身が現実には「体験」をするしかない。しかし、実際に「体験」をするには、膨大な努力と時間が必要なのである。丁度、読書が追体験の役割をするよう

に、ソフトの場合にも自分の体験を補充する様々なものが必要なのである。

Geometric Constructor のユーザー集団のことに話を戻し、川崎市と松江市の場合を例に挙げよう。川崎市の場合、昨年、今年と川崎市総合教育センターから研修にみえた地曳先生、山下先生や馬場指導主事をはじめ、熱心に使ってくださっている先生方がいる。いくつもの研究授業・研究会が開催されている。私自身も、昨年秋に、向ヶ丘中学校での中町先生の研究授業・研究会に参加することができた。また、松江市の場合、松江教育センターの梅瀬先生を中心とした集団がある。夏、秋に伺って、授業検討会等を行うことができた。両者に共通することがいくつもあった。その中の2点を挙げておこう。

第一に、先生方がコンピュータ中心の議論ではなく、教材や授業を中心とした議論を深くなさっている点である。中にはコンピュータのハードについて詳しい方もいるが、そうでない方が多い。その代わり、それをどう使うとどんな授業ができるのか。こういう種類の授業をしたいなら、こういう種類のソフトの方が適している。こういうことはやめた方がいい。そのような様々な知見を持たれている。

第二に、おそらく、多くの先生方は、それほど多くの労力を必要としないで、ソフトの利用法を習得されている点である。「労力が少なくて済む」ということが重要なのではない。もちろん、基本的な使い方を身近な方から教えてもらえるという点もあるかもしれない。しかし、これを使ってこんな問題・教材を考えるとどうなるだろうという雰囲気が出てきていることが重要なのである。それに付随して、「ソフトの習得」のための労力ではなく、「教材研究の一部」としてのソフトの習得になってしまうのである。地曳先生をはじめとする幾人かの先生方から、ときどき興味深い問題を提示されることがある。自分なりに発展させてみたり、問題の提示の仕方を工夫してみたりする。これが非常に楽しい。これは、ユーザーと開発者としてのやりとりではなく、ユーザー同士のやりとりの魅力だと思う。以前も、数学の問題をいろいろと考えてみることもあったが、そのときは証明できるかどうかに自分の興味があった。今はむしろ、「試しにやってみると何か発見できそうな実験室」があるから、何かやってみよう、という意識の方が強い。実験の中で大体の結果が分かってきて、場合によっては、その後の証明を考えてみることもあれば、数学的な一般化を考えることもある。いずれにしても、「証明」や「計算」とは違ったアプローチが、何となくその気にさせているところがある。そのような部分が、コンピュータの重要性でもあり、またユーザー間のインターアクションの重要性なのではないだろうか。

このようなユーザー間の情報交換をどのように確立するかは、ソフトの開発とは全く別の問題である。開発者がコントロールできるような問題ではない。実際、ほとんどの場合、このような集団は自然発生的なものだからだ。しかし、コンピュータ利用の問題を考える上で、このユーザー間の情報交換は考えるべきいくつかのことを示唆している。

第一に、(どのようにソフトに関しても、)このようなユーザー集団があるという事実である。特に管理的な立場にある人は、ハードやソフトを購入しただけでは足りないものがあることを自覚しておく必要がある。また、ソフト開発にあたって、想定されるユーザー集団において、で

きるだけ自然な思考の延長としてソフトについて議論できるような、様々な工夫が必要になってくる。その中には、ソフト自体の問題もあるが、それ以外にも、マニュアルの整備、関連資料の整備等の問題が生じてくる。

第二に、ユーザー集団の成立を阻害する要因はできるだけ排除すべきだという点である。このように言うと、あまりに当たり前のことのように思えるかもしれないが、実際には、これを阻害しているようなことが非常に多い。特に、著作権と資産の管理に係わる面でいろいろな障害が生じる場合が多い。違法コピーと高価なソフトの関係と学校の予算の問題ももちろんある（ただ、これは行政等の問題であって、我々がどうこうできる問題ではない）。ハード・ソフトは使って初めて価値が生じるものなので、その厳格な管理は死蔵である。また、他の機種では使えないようなソフトの価値は低い（使おうと思って使えないソフトなら、ないのと同じである。）が、そのようなものも少なくない。さらに、県・市等で開発しているソフト、収集している自作ソフトの場合、行政単位の範囲内でしか使えない場合が多い。また、情報交換にはそれなりに経費がかかるが、そのような通信費が積極的に認められる場合は決して多くない。

第三に、できることならば、それぞれの地域に発生している集団間の情報交換がより容易になるような支援をすべきだという点である。

第四に、生徒がソフトを使った学習をする場合においても、このような生徒間の情報交換の在り方について、十分な配慮をすべきだという点である。

以上の議論からも示唆されるように、ソフトの実体というものは、ソフトの機能よりも、それを取り巻く人間のネットワークの問題の方が大きなウェートを占める部分が大い。そのようなネットワークというものは、簡単に構築できるものではない。金子郁容氏が『ボランティア もうひとつの情報社会（岩波新書）』の5章「もうひとつの情報社会」の中で「情報という概念が、現在の経済・社会システムに流通しているのとは基本的に異なる価値観を提示している可能性」について議論しているが、そのような新しい価値観で物事を考え、行動することが要求されるからである。

しかしまた、手掛かりは身近なところにもあることを忘れないようにしたいと思う。たとえば、次の二つの職員室では、Aの方がずっと上手にコンピュータを使っていることが多いというような身近な事例が我々の身近なところにあるからだ。

A：気軽に質問しあえるような雰囲気の中でコンピュータの素人と自称している先生達が集まっている職員室

B：コンピュータに精通していると自他共に認めるような人がいて、その人にほとんど任せっきりになっている職員室

3. 数学的探究の分析と教材研究

3.0 教材研究に当たって、数学的探究を分析・研究することの必要性

前節でいくつかの観点から考察したように、コンピュータを数学教育の中で利用していく上では、インタラクティブということが非常に重要である。1.1で指摘したように、

- (1) 答えを安易に与えてくれる機器として使う使い方の場合、むしろ教育目標を阻害する危険性が高い。
- (2) 教育目標の実現あるいは、生徒の数学的活動そのものを改善してくれるかどうかはコンピュータ利用の基本的な判断基準となる。

という2点が考えられるため、単にソフトを開発するだけでは不十分であって、それがどのような役割を果たすのかを検討することが重要になってくる。そのような作業が、いわゆる教材研究に係わる部分であるが、その教材研究においても、プロセスそのもの、つまり、数学的探究を分析し、研究することが非常に重要になってくる。

そのような教材研究にも、いくつかの段階を想定することができるので、以下、順次検討してみることとする。

3.1 今まで成立していた学習過程にそのまま導入する

まず、第一に、従来の（コンピュータ以外の教具等を使って行っていた）学習の中にコンピュータを導入する場合が挙げられる。ここでも、いくつかのチェックポイントがありうる。

- (1) これまでの学習との整合性が取れるか

ソフトの設計によっては、これまでの教育内容とは異なった知識体系を元に行っている場合もある。Logo のタートル幾何などがその一例だ。タートル幾何における思考の進め方と、通常のユークリッド幾何における思考の進め方は異なる。そのため、Logo をそのまま通常の授業の中に導入すると、学習内容との不整合が生じる。不整合を乗り越えて導入するためには、それなりの対策が必要になってくる。それらを明らかにすることが、第一のチェックポイントである。

- (2) これまでの学習内容のどの範囲をカバーするのか

一つの授業だけで限定して使うソフトなどならば別だが、ある程度長期的に使いこなすツール型のソフトの場合には、これまでの学習内容の中のどれ程度の範囲で使えるのかを吟味することが必要になる。数学全領域とまではいかなくても、せめて単元程度のまとまりが望まれる。

- (3) これまでの学習を阻害する使い方はどういう使い方か

電卓に関する部分でも述べたが、教育目標を変えないで道具のみを変えた場合、これまで学習目標であったことを軽減してしまい、かえって望ましくない結果になってしまうこともありうる。そのような、「こういう使い方はしない方がいい」という知識を蓄積することが相当する。

- (4) これまでの学習にとって、どういう点が改良されるのか

これまでの学習を阻害しない限り、コンピュータを導入しても、授業として成立する可能性が

高いが、それだけでは、労多くして益少なしである。それだけの労力を投資するに値するだけの改良を与えてくれるのかどうかを検討することが必要になる。

しかし一般的には、これまで学習として成立していたという事実は、システムを変更しなくてもやっていけることを示している。現在のようなコンピュータ導入期においては、何らかの利用法を見いださなければならないという強いバイアスがかかっているし、新しい機器を使ってみたという生徒の好奇心もあるから、この段階に止まる教材研究であっても、授業で使ってみることになるかもしれないが、そのような要因が薄れてくる数年後においても、使い続けるかどうかということになると、上記のようなことだけでは、足りないことは明らかである。

3.2 新しい学習環境において自然な思考様式とは何かを明らかにする

だが、取り合えず、新しい学習環境の中で学習し、思考し、そして教材研究をすることに慣れてくると、そこから新しいことが次第に明らかになってくる。

その手掛かりは二つある。一つは生徒の活動の分析である。我々自身は、知らず知らずのうちに、今までの学習環境の中での行動様式が身に付いてしまっているが、そういうものを元々持っていない生徒は、その学習環境の中で最も自然な思考は何か、行動様式は何かを示してくれる。それを分析し、その学習環境に適した思考を前提として、学習内容を再検討するのである。

そのための基本的なチェックポイントの一つは、

- ・全く同じ問題を解くときに、これまでの環境（例えば紙と鉛筆）と新しい環境では、問題の実質的な意味はどのように変わっているか

という点である。

問題は、その問題文によって構成されているのではない。それを解く道具が変わることによって、その実質的な意味や難易度は大きく変わる。だが、教科書は、これまでの環境の中で提示し、解決することを前提にして書かれているし、私自身の指導方法に関する知識もそれらを背景としている。この問題は生徒がこういうところでこのように感じるはずだという暗黙の知識がある。それらとのずれがどういうところにあるのか、そのずれは生徒の思考がどのように変化することから生じるのか、つまり、生徒がこの環境で考えるときには、どのような思考が自然なのか等を分析することが重要なのである。

3.3 今まで学習することが困難であったことを学習可能にできないか

もう一つの手掛かりは、教育目標の分析である。つまり、これまでも指導したかったのにこれまでの学習環境ではなかなか難しかったことが、この新しい学習環境では可能になるのかどうかを検討するのである。

この場合には、目標とすることが、新しい学習環境の中では、どのような探究過程として現れるのかを、予め考察することが必要である。そして、多くの場合には、教師であると同時に、その環境を使った熟練した探究者としての自分自身の探究過程を分析し、それを生徒が再体験可能

な形に教材化することが必要になってくる。

多くの場合、ここで検討されるような学習目標は、これまでの学習環境においても、ある程度の条件が満たされれば学習可能であった事柄が多い。例えば、豊富な計算をしなければならないとか、十分な時間が必要だとか、教師による支援等が必要というような場合である。このような、今までの環境の中での探究にとってのボトルネックをコンピュータが解消してくれる場合には、今までは能力のある生徒にしか学習可能する機会が与えられなかったような事柄を学習可能にしてくれることがあるのだ。

3.4 初めて可能になるようなことは何か

前項目で考えていたのは、通常の学習環境において、能力のある人には可能なことを、多少能力的に劣る生徒にも可能にしようということであった。つまり、ある意味では、この学習環境が成立する以前から、ある程度想定できる学習内容である。

しかし、3.2で述べたように、新しい学習環境で探究することに慣れてくると、それまでは想定していなかったようなことが、新しい環境の中では課題として成立することなどが、自然に明らかになってくる。それが明らかになってみると、実は通常的环境の中でもできないわけではないことに気づくことも多いが、以前の環境の中では、気づかなかったのに、新しい環境の中でなら自然に問題として生じるという点が重要なのである。

このような事例の収集には、一般にかなりの時間がかかる。長い目で育てていかなければならない。しかし、それによって初めて、その環境とのインターアクションが地に足がついたものとなり、本当の意味で、コンピュータを使った教育が行えるようになったと言えるのである。

しかし、時間がかかるということ以外に、別の問題がある。つまり、それらの活動は、基本的に、自分がこれまで経験したことがなかったり、指導を受けたこともないことがほとんどだという点である。そして、そのような未知の学習過程を自分なりに分析し、そこにそれなりの数学的価値を見い出し、それを自分なりに定式化し、そしてその教授＝学習過程を検討することが必要だという点である。つまり、必然的に「探究の探究」をしなければならないということなのだ。

この段階に至る前にも、同様のことは少なくない。今までの学習過程の中に新奇な道具を「お客様」として置いているだけならばあまり問題にはならないが、その道具の導入によって、生徒にとっての学習活動が必然的に変化するからには、それらの学習活動をこれまでのものと比較し評価し、そして選択しなければならない。どの活動がより意味があるかということに関する客観的な基準はない。結局、教師自身が責任を持って選択せざるを得ないのである。そのためには、教師自身が、そのような活動について議論できるだけの基礎知識を持ち、必要な場合には、新しい活動を記述するための新しい枠組みを構成することが必要になってくる。そして、その意味において、教材研究をより深く行うためには、数学的探究を記述するだけでなく、数学的探究を研究することが必要になってくるのである。

4. おわりに

本稿においては、概括的な議論を行ったが、もう一方において重要なのは、ケーススタディであり、具体的な教材研究と授業研究の蓄積である。そして、それらのデータを元に、新しいカリキュラムをどのように構築していく方法論を確立し、状況に応じて、それに適したカリキュラムを開発可能にしていくことである。

現在、学校教育の中での数学教育の位置は変化しつつある。特に、受験科目から数学が減少しつつあるのに合わせて、数学を学習する生徒の割合が減少しつつある。しかし、一方において、社会の中での数学が必要とされる度合いはより高くなりつつある。このアンバランスな現象は、ある意味では、それはこれまでの数学教育の硬直さを表すと言ってもいい。

その原因の一つには、数学の学習環境を生み出すことの困難さであった。学校という環境以外では、数学学習を促す適切な場面を作ることが難しかった。いろいろな教具を考案してはきたが、チョーク&トークという方法が他の方法と比べて非常に効率的であり、また効果があったとも言える。しかし、コンピュータによって様々な環境が開発される可能性が出てきたことによって、数学教育はこれまでのような画一的なものから変わっていける可能性が出てきた。また、これまでのように、学校の中だけでなく、数学を必要とする人にとって、学習の場をより広く提供できる可能性もある。現状はまだどこまで至っていないとはいえ、そのような状況が現実のものとなってきたときに、それぞれの状況に応じた数学教育の成立をより容易にし、そして支援していくことができるようにするために、数学教育学を変革していくことが要求されていると言っているだろう。

(本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(奨励研究A 萌, 課題番号05858029)によって支持されている。なお、本論文を元にして、さらにソフトの在り方について議論した論文や Geometric Constructor を使った教材研究の実際を記述した論文等を数学教室のスタッフによる文部省特定研究報告書の中でまとめた。ご覧いただけると幸いです。)

付記: Geometric Constructor ver..4.2~4.6 における改良点

以下は、マニュアル1の7章からver.4.2以降について記述している改良部分を要約しました。詳しいことはマニュアルを参照ください。カッコ内の版以降で対応しています。

- 7.3.2 円と円の交点, 円と直線の交点が「動く」ときの処理の変更 (4.2)
- 7.3.3 描画の高速化 (4.3)
- 7.3.4 作図における「REDO」機能の追加 (4.3)
- 7.3.5 履歴の記録と読出 (4.4)

使い方は次の通りです。

GC04** /W : 記録

GC04** /R : 再生

なお、FM-R などではタイマーが 1/100 秒まで記録されるのでかなり忠実に再生できますが、98 などでは 1 秒単位なので、動きが少し不自然になります。

また、F1, F5 など、文書を参照・修正する部分は記録を取っていません。どんな文書にアクセスしたかのみを再生します。逆に、デモンストレーションとして記録するときに、表示したい文書を F5 などを使って表示し、読みおわったら Esc を押すという使い方ができるようになりました。

- 7.3.6 画面の縦横比率の設定 (4.4)
- 7.3.7 メニューのカスタマイズの容易化 (4.4)
- 7.3.8 BAK ファイルのスイッチの設定 (4.4)
- 7.3.9 メモリ不足等に関するエラー処理の追加 (4.4)
- 7.3.10 測定値の表示桁数の設定 (4.4A)
- 7.3.11 変数名の設定 (4.4A)
- 7.3.12 落書き機能 (F8) の追加 (4.4A)

機能 (1) 画面内をカーソルで自由に動き、文字を書ける。
 (2) 画面内をマウスで自由に動き、右ボタンをクリックしながら動かすと、軌跡が残る。
 (3) Esc キーで落書きを消して元の画面に戻る。

- 7.3.13 Redo 機能の改良 (4.4C)
- 7.3.14 ショートカットキー (4.4C)

(1) ショートカットキーの設定と使い方
 ショートカットキーの長さは、1 文字です。メニュー項目を次のように設定してください。
 X: 元に戻る
 これで、X キーがショートカットキーとして設定されます。大文字小文字は区別されません。

- 7.3.15 点の表示方法の増加 (4.4C)
 点の表示方法として、今までの・, ×の他に、○, □, ■, △, 領域のペイントを付加しました。
- 7.3.16 点の選択時の表示 (4.4C)
 変形等で点を選択するときに、選択可能な点は、○印で表示することにしました。
- 7.3.17 ズーム時の機能の改良と追加 (4.4C)
- 7.3.18 線対称のバグ解消 (4.4D)
- 7.3.19 複数の点を一緒に変形する機能の追加 (4.5)

今までは変形は一つの点を動かすことにしていましたが、複数の点を指定できるようにしました。複数の点は、同一の距離を動くようにしています。そのため、フリーな点ならば、全く同じ方向に動きますし、直線上、円上の点などの場合には、限定されている方向に動きます。

単純な機能の追加と思ったのですが、思った以上に面白いことが分かりました。例えば、四角形で辺に相当する 2 点を指定すると、その辺を動かすようになります。また、対角線の 2 点を指定すると、対角線を動かすようになります。このとき、長さや向きが変わらないので、対角線の長さや向きを変えず、位置だけを変えるとどうなるかを観察することができるようになります。

円上の 2 点を動かすと、長さ一定の弦を動かしているようになる。同一半径の 2 つの円の上の点を指定する場合、異なる半径の 2 円の上の点を指定した場合など、いろいろと楽しめます。

簡単なデモンストレーションを 4.5 の試作版に添付しています。

なお、選択可能な点を○、選択の候補を×、選択済のものを□で表示しています。

- 7.3.19 軌跡のメモリを消去する機能 (シフト + F9) のバグの解消 (4.5)
- 7.3.20 履歴再生機能の改良 (4.5)
- 7.3.21 各種言語への対応可能 (4.6)

英語版等を、ソースファイルをいじらなくても作れるように修正しました。起動時に /LAN (GUAG E) というスイッチを設定すると、登録してある辞書のリストを表示します。その中から選択した辞書によって、日本語のメッセージを翻訳します。外国語のみならず、小学生版、中学生版などを自由に作ることができます。

ただし、「可能」にしたということであって、それぞれの言語対応の辞書ができていないわけではありません。これから少しずつ作っていくことになると思いますが、ユーザーの方が勝手に作ることができますから、希望される方はぜひご利用ください。また、その際には、私の方にその辞書をお送りいただけると幸いです。