

# JAVA による力学系シミュレーション

杉 原 健 一

## 【あらまし】

1. JAVA による教育ソフト制作の意義
2. 微分方程式のプログラム化
3. JAVA による入力フォーム
4. JAVA によるアニメーション
5. アプレット間通信によるデータの引き渡し
6. 制作した力学系シミュレーションの実例
7. 力学系シミュレーションのモデリング手法

## 【あらまし】

自然科学教育における力学系の理論や法則の理解、力学問題の解決や数値実験には、物理現象や問題の正確なシミュレーションとそれをビジュアライズ(可視化)することが教育効果を上げると考えられる。本研究では、力学系をシミュレートする JAVA アプレット群から成る理科教育学習支援システムを構築することを目指した。本システムを JAVA で制作すれば、JAVA のプログラム(アプレット)はインターネットに接続された世界中のコンピュータで起動させることができる。本システムでは、力学系における各種の初期値、パラメータを入力する、それらの値を使って、力学系を記述する微分方程式に基づく数値実験を行い、それをアニメーション化する JAVA アプレット集の整備を目標とした。

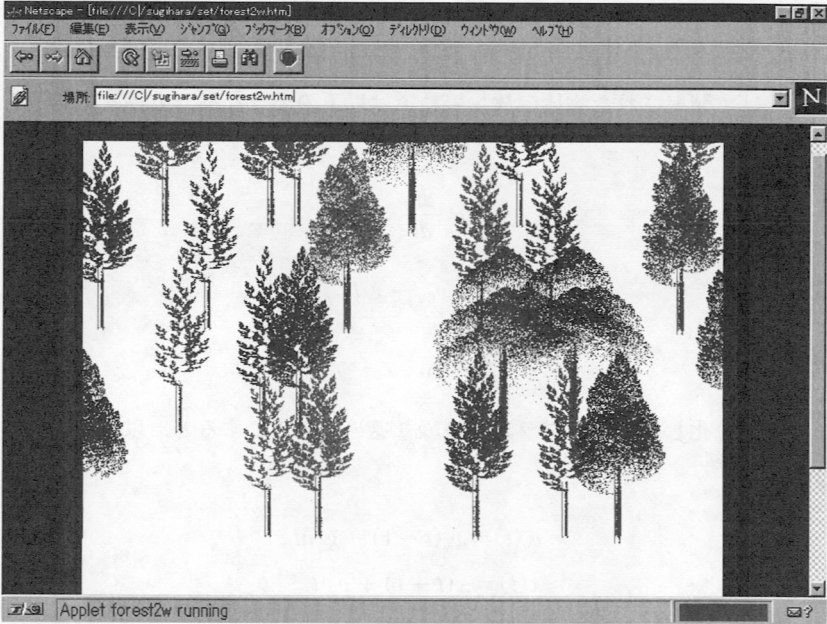
## 1. JAVA による教育ソフト制作の意義

JAVA はインターネットが普及するのと歩調を合わせて発展している。インターネットに接続されたコンピュータの大部分は JVM (Java Virtual Machine) を実装しているブラウザを利用していると考えられるので、JAVA アプレットを起動させることのできるコンピュータは世界でおよそ 1 億台程度と考えられる。JAVA アプレットを実行させることのできるコンピュータは世界中に広まり、教育機関にも広く普及しているので、教育ソフトを開発する場合、プラットフォームに依存しない JAVA でプログラミングすれば、個々のプラットフォームに対応したソフト開発言語でプログラミングするより、はるかに多くの人々が利用することが可能である。

本学習支援システムにおいて、教育ソフトの JAVA アプレットは要求されたクライアントのところへ「飛んで」いき、それを呼び出したクライアント側のライブラリ機能を使って、実行される。実行時の機能の豊富さはクラスライブラリと呼ばれる、様々な API (Application Program Interface) をどれだけ具備しているかによる。「飛んで」いく JAVA アプレットは、バイトコードと呼ばれるプラットフォームに依存しない最小限のセットから成り立つ身軽なファイルである。例えば、次ページのカオスの原理で生成した「林」の画像を作る JAVA アプレットは僅かに 3 KB である。

JAVA はオブジェクト指向を推し進めた言語で、クラスの継承という形で、開発したソフトウェアの再利用が容易になっており、教育ソフトを開発する上でも大きな利点である。つまり、教育ソフト向けに標準的なコンポーネント・ソフトウェアの API を開発、定義、パッケージ化して、そのクラス群を継承 (extends) すれば、そこで定義された再利用可能なソフトウェア部品を組み合わせ、比較的容易に教育ソフトを開発できる。昨今では、ビ

図1 カオスの原理で生成した「林」



ジュアルなプログラミングを可能にした JavaBeans と呼ばれる再利用可能なコンポーネントの整備も進んでいて、ソフトウェアの生産性を上げている。

## 2. 微分方程式のプログラム化

ニュートン力学系の多くが微分方程式によって記述される。この微分方程式をコンピュータを用いて数値計算するとき、微分方程式そのままでは、数値計算できない。微分方程式を差分化して、差分方程式として代数計算することで非線形の微分方程式は計算される。差分法は微分方程式の近似解法を行うことができる。差分法では、独立変数の変域内に離散点の集合をとり、

これらの点における方程式の導関数値（微分商）を差分商で近似し、連続的な関数の代わりに離散点上の導関数の近似値の集合を構成する。

例えば、発射された物体の放物線軌道は以下のような微分方程式で記述される。

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv_y}{dt} = -g$$

$$\frac{dy}{dt} = v_{0y} - g \cdot t$$

$$\frac{dx}{dt} = v_{0x}$$

これを差分化して、プログラム上の繰り返し代入式にすると、以下のようになる。

$$v_y(t) = v_y(t-1) - g \cdot \delta t$$

$$x(t) = x(t-1) + v_x \cdot t$$

$$y(t) = y(t-1) + v_y \cdot \delta t$$

以上の差分方程式で放物線軌道をとる物体の動きをシミュレートする。

### 3. JAVA による入力フォーム

シミュレーションを行う場合、力学系における各種の初期値、パラメータ、運動条件などのデータを入力することから始める。JAVA においては、利用者がデータを入力するのに便利な GUI が用意されており、それらを活用することで、ユーザーフレンドリな教育ソフトを構築できる。

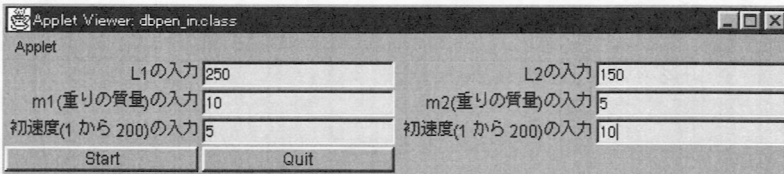
GUI 部品は AWT (Abstract Windows Toolkit) という API にまとめられている。近年、JAVA の AWT をさらに強化するため、GUI 部品を含む Netscape

社の IFC (Internet Foundation Classes) という API を統合した JFC (Java Foundation Classes) を利用できるようになっている。

JAVA の AWT パッケージには、プラットフォームに依存しない形での、グラフィックス処理を行うためのクラスが数多く存在する。例えば、Button クラスのコンストラクタを使えば、プラットフォームに関係なく、コマンドボタンを作成できる。AWT パッケージでは、Button, Dialog ボックス, Menu や MenuBar のある Frame, 文字入力できる TextArea, グループ化された Checkbox, Choice など様々な形態のコンポーネントが存在する。

実現したシミュレーションソフトの入力フォームの一例を以下に示す。GUI 部品のレイアウトとして、GridLayout を指定し、TextField で文字の入力, Label で文字の貼り付け, スタートの入力は Button で行う。

図 2 2重振り子における入力フォーム

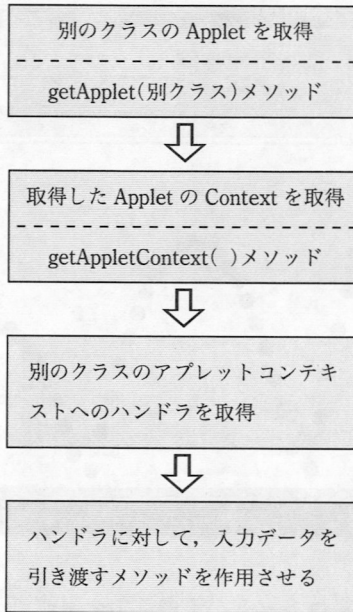


#### 4. JAVA によるアニメーション

シミュレーション画面の一部をダブルバッファリングという手法で、アニメーション化した。ダブルバッファリングでは、裏の画面であるオフスクリーン・イメージを image クラスでのインスタンスとして定義して、それに対して、グラフィックス描画を行い、描画が完了したら表示する。JAVA では、画面イメージをインスタンスとして、定義することができ、描画に時間



図4 アプレット間通信で入力データを引き渡すまでのプロセス



前ページの手順で、入力フォーム・アプレットからアニメーション・アプレットへ各種の変数の初期値、パラメータ、運動条件などのデータを引き渡すことができる。

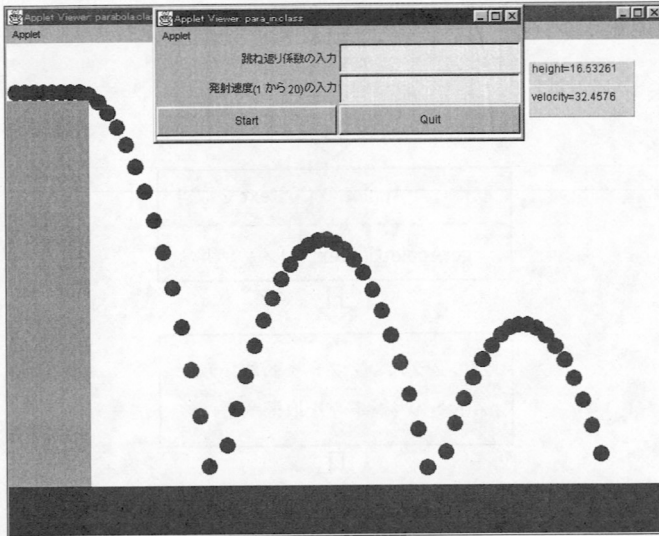
## 6. 制作した力学系シミュレーションの実例

このような開発プロセスを経て制作した力学系シミュレーションの一部を、以下に紹介する。

### ① 放物線を描くボールの軌跡

ここでは、ボールの初速度と床の跳ね返り係数を入力して放物線運動をシ

図5 放物線を描くボールの軌跡



ミュレートする。次の微分方程式がこの運動を記述する。

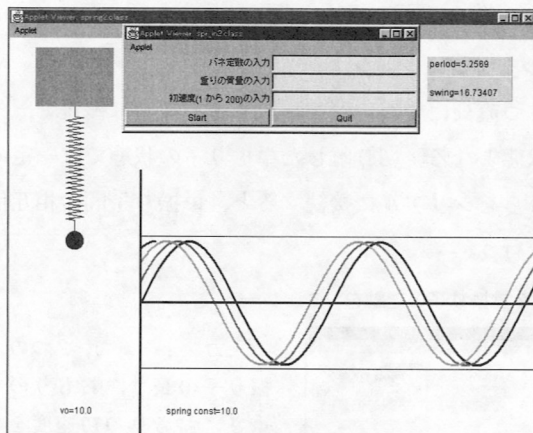
- $\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv_y}{dt} = -g$
- $\frac{dy}{dt} = v_{0y} - g \cdot t$
- $\frac{dx}{dt} = v_{0x}$

## ② バネ振り子の運動

つり下げられたつまきバネに適当なおもりをつけ、つりあいの位置より少し引き下げて離すと、おもりは単振動する。このシミュレーションでは、おもりの垂直方向の変位分を時間の経過とともにプロットして、振動の様子を表示する。

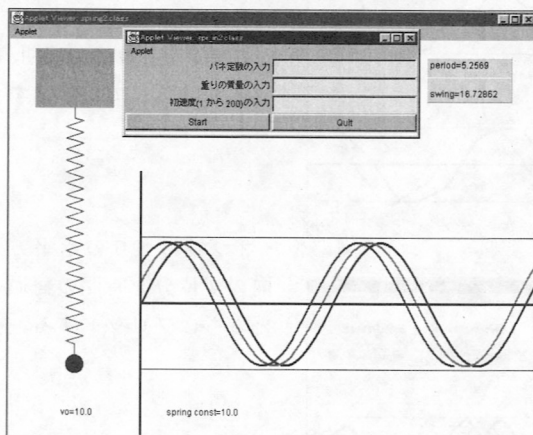


図 6 バネ振り子の運動をシミュレート



入力フォームで、バネ係数、おもりの重さ、おもりの初速度を入力できる。

このバネ振り子の周期、振幅を計算して、表示する。



バネの伸び縮みをアニメーション化し、おもりの大きさは、おもりの重さに応じて変えるようにしてある。

ここでは、バネ係数 ( $k$ )、おもりの重さ ( $m$ )、おもりの初速度 ( $v_{0x}$ ) を入力してバネ振り子運動をシミュレートする。次の微分方程式がこの運動を記述する。ここで、おもりのつりあいの位置からの垂直方向の変位分を  $x$  とする。

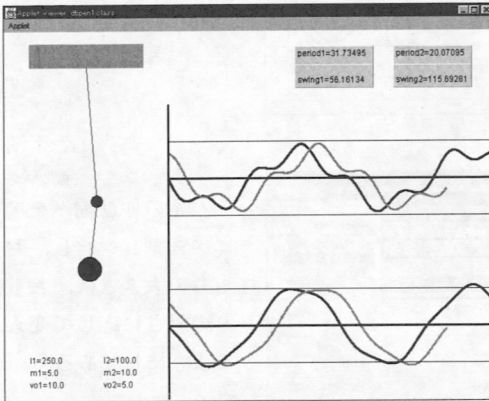
$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt} = -\frac{k \cdot x}{m}$$

$$\frac{dx}{dt} = v_{0x} - \frac{k \cdot x}{m \cdot t}$$

### ③ 2重振り子の運動のシミュレーション

長さが一定の振り子を2つ直列につないだ2重振り子の運動は複雑で、条件によっては、カオスの状態となる。切り離れた単振り子の状態では一定の周波数で振動するが、それらをシリアルに接続すると、単振り子間の相互作用によって、複雑な動きを行う。

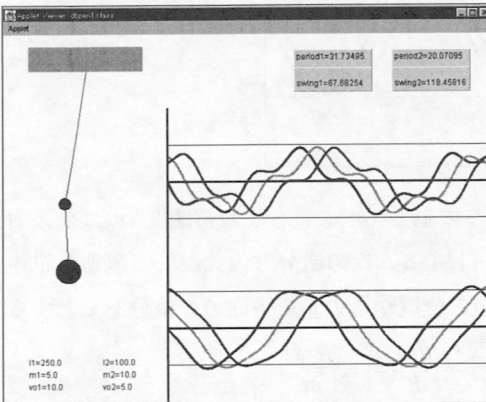
図7 2重振り子の運動をシミュレート



入力フォームで、2つの振り子の長さ、おもりの重さ、おもりの初速度を入力できる。

この2重振り子の周期、振幅を計算して、表示する。

2つのおもりの水平方向の変位分を時間の経過とともにプロットする。



2つのおもりの水平方向の変位分を縦軸、時間を横軸として、時間の経過とともに、変位分をプロットして、振動の様子を表示する。振り子の長さ ( $L_1, L_2$ ), おもりの重さ ( $m_1, m_2$ ), おもりに与える初速度 ( $v_{01}, v_{02}$ ) の値によって、複雑な動きをする。いわば、「シンプルな複雑系」の運動をシミュレートすることができる。

次の微分方程式がこの運動を記述する。ここで、2つのおもりの水平方向の変位分を  $x_1, x_2$  とする。

$$\begin{aligned} \cdot \quad \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= \frac{dv_{01}}{dt} = \frac{g}{L_1 \cdot \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \cdot x_1} + \frac{g}{L_2 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot (x_2 - x_1)} \\ \cdot \quad \frac{dx_1}{dt} &= v_{01} + \frac{g}{L_1 \cdot \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \cdot x_1 \cdot t} + \frac{g}{L_2 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot (x_2 - x_1) \cdot t} \\ \cdot \quad \frac{d^2 x_2}{dt^2} &= \frac{dv_{02}}{dt} = -\frac{g}{L_2 \cdot (x_1 - x_2)} \\ \cdot \quad \frac{dx_2}{dt} &= v_{02} - \frac{g}{L_2 \cdot (x_1 - x_2) \cdot t} \end{aligned}$$

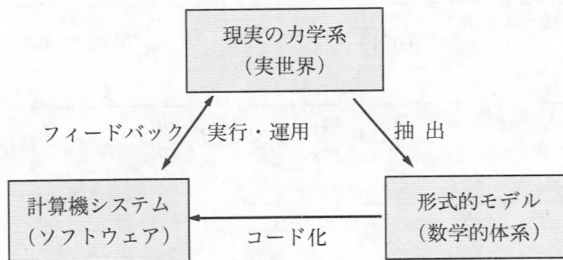
但し、上記微分方程式では、おもりの垂直方向の変位分は十分に小さいと仮定して、おもりの垂直方向の加速度を零とした計算式である。

## 7. 力学系シミュレーションのモデリング手法

力学系シミュレーションを実現するには、現実の力学系の現象を記述する数学的体系を獲得すること、即ち、実世界の力学系システムの数学的モデルを作り上げること (形式的モデリング) が、第一のステップである。次に、獲得した数学的モデルを計算機システム上に実装するために、モデルをプログ

ラミング・コードに変換するプロセス，即ち，力学系の現象を記述する数学的体系を，例えば，差分法などで，計算機が処理可能な代数計算にして，シミュレーションできるようにすることが2番目のステップとなる。そして，シミュレーションソフトを実行して，モデルに含まれる矛盾や曖昧さの検出を行うために，現実の現象を実測（実験）して得られるデータと照らし合わせて，モデルに対してフィードバックを行い，シミュレーションソフトを完成させる。図8に示した3つの基盤上の対象と記述とを相互に対応づける作業を通して，力学系シミュレーションソフトを開発する。

図8 モデリング作業の3つの基盤



コンピュータシステム上に実現された力学系を使って数値実験する場合，力学系に与える初期値や各種のパラメータを連続的に変更して数値実験を行い，求める状態を仮想空間上で実現することができる。例えば，2重振り子においてカオスの状態を実現できることが知られているが，その状態を求めるのに，連続的な数値実験を行い，その状態をコンピュータ上で実現することで，現実の力学系においても，同様のカオスの状態を作り出すことができる。

〔参考文献〕

- [1] 杉原健一，「CG生成を利用するJAVA学習環境の構築」，電子情報通信学会 信学技報 ET97-63 1997年10月
- [2] 飯島 正ほか，「実世界と形式的記述の接点としてのオブジェクト指向モデル」，情報処理学会誌 Vol.35 No.5
- [3] 『岩波情報科学事典』，岩波書店 1990年

- [4] 吉澤純夫, 『Visual Basic & Delphi で物理がわかる力学シミュレーション』, CQ 出版 1997 年
- [5] 井田昌之, 「Java 言語の今」情報科学学会誌, 1998 年 4 月, Vol.39 No.4 通巻 398 号
- [6] 月刊 Java WORLD, 1998 年 3 月, 4 月, 5 月の各号, IDG コミュニケーションズ

ホームページの URL

<http://exerion.biwako.shiga-u.ac.jp/std/sugihara/default.htm>

\* 力学系シミュレーションソフトは上記のホームページに掲載して, ソースコードも取得できるようになっている。