

統計力学のためのバーチャルラボラトリーの開発

2 + 1 次元の講義

九州大学大学院理学研究院

小田 垣 孝

§ 1 はじめに

近年のIT技術やインターネットの進歩にはめざましいものがあり、それらを活用した新しい教育法を開発することは、教育に携わるものの使命であろう。事実この10年ほどの間、教育的利用価値の高い情報が、インターネットを利用して共有されるようになった。例えばインターネット博物館¹⁾を利用すれば、博物館を訪問しなくても、展示物の情報をインターネットに接続された教室で表示できるようになっている。

バーチャルラボラトリー(VL)は、Java(サンマイクロシステムズ社)によりハードウェアやOSに依存せず動画を表示させることが可能となったこと、インターネットによる配信ができ、メンテナンスが容易になったこと、高輝度の液晶プロジェクターが利用可能となったことを最大限利用し、講義形態を質的に向上させるために開発されたものである²⁾。(図1参照)VLは、様々な現象の時間発展や関数・図形の振舞などを、インタラクティブに教室のスクリーン上に表示させるものである。従来、時間変化する運動の説明でも軌道を示す図が用いられ、いわば2次元平面による講義が主であった。VLを用いた講義は、時間軸を活用するいわば2 + 1次元の講義である。表1は、講義に用いられる演示媒体の比較をまとめたものであるが、VLの優位性は歴然としている。

§ 2 統計力学のためのVL³⁾

2.1 基本的概念と講義の進め方

統計力学の枠組みの直感的な理解を助けるためのVLを、現象の時間変化を見て考えられること、ミクロな時間変化の視覚化、パラメーターを変えたときの現象の変化の視覚化を基本の方針として作成した。このVLは、巨視的過程において系がたどる微視的な変化や分配関数を求めるときに必要となる原子の運動状態や量子状態などを視覚化する2 + 1の動画、関数表示、ビデオから構成されている。表2に、VLの内容を示す。

VLを用いた講義は、対象とする現象を液晶プロジェクターによって、教室内のスクリーンに写しだすことから始める。(現在、収容数120名の講義室で約60名が受講)現象の時間変化を仮想体験させた後、現象を理解するための理論の構築、展開、解析を行う。得られた結果のパラメーター依存性をVLによって示し、現象の物理的考察を深化させて、理解の促進をはかる。

2.2 例1：二つの系の熱的接触

二つの系を熱的に接触させると温度が等しいところで平衡に達する現象(アニメ1)を、微視的に見たときに何が起きているかを動画(図2:アニメ2)により示す。エネルギーの初期値を与えて時間発展させ、平衡状態に達する過程を見せ、その微視的に見たときの条件を考えさせる。ついで、全エネルギーをどちらか片方の系に集めた状態をつくり、ごく少量のエネルギーを反対側の系に移すと、系のとる微視状態数が飛躍的に増加することから、その微視的状态の数が最大になるところで平衡状態となることを納得させる。ついで、板書で統計力学の考え方に基づく解析を行う。

2.3 例2:二準位系

図3(アニメ7)でミクロカノニカルを選択してスタートすると、エネルギーを一定に保ちつつ、状態が変化する。このときの状態数が組み合わせの数で与えられることを説明した後、ボルツマンの原理を用いて熱力学量を求める。

カノニカルを選択して動画をスタートさせると、温度を一定に保ちつつ、様々なエネルギーの状態が出現し、系のエネルギーが揺らぐこと、また、左下の図によって、あるエネルギーの状態が出現する確率が、おおよそ指数関数的になることを説明する。様々な温度で状態の変化を見せた後、板書により状態の出現確率を導く。

なお、このアニメは負温度の説明にも用いる。

2.4 例3:繰り込み変換

図4(アニメ18)は、ブロックスピンによる繰り込み変換を示す。まず、あらかじめ用意された各温度の平衡分布を選択して左面にロードし、startによって、その温度における時間発展を行う。適当なところでpauseした後、右面にコピーし、Renormalizeにより、 $256 \times 256 \rightarrow 126 \times 126 \rightarrow 64 \times 64 \rightarrow 32 \times 32 \rightarrow 16 \times 16 \rightarrow 8 \times 8$ の繰り込みを行う。臨界点以下ではゼロ度と同様の状態に向かうのに対し、臨界点より上ではランダムな配列を持つ高温状態に向かうことを示し、臨界点が繰り込み変換の不安定固定点になっていることを見る。

§3 講義の効果

3.1 教える側から見た利点

微視的状态など板書では説明が困難な事柄が動画を示しながら説明できること、現象の時間変化を見せつつ理論を展開できること、また、パラメーターを変化させたときの振舞の違いを瞬時に表示できることなどにより、講義の展開が極めて容易にできる。特に、アニメ2、4、6、7、16、17、18、A1は、概念を理解させる上で有効である。

3.2 受講生の意見

基本となる微分方程式のある物理学の他の分野とは異なり、統計力学は初めて学ぶ学生には馴染みにくい科目であるが、講義を聴いた学生からは、「動画によって何をやりたいかを知った上で話が進むので理解しやすかった」などのV Lを支持する感想を得ている。学生の感想のうち二つを紹介する。

「・・・微視的な状態を想像して問題を解いたり、解いた結果から物理的な挙動を考察することは重要なことと思われるが、その際にバーチャルラボラトリーはとても有用で

あった。私は、特に二つの系を接触した状態を示した「アニメ 2」や相転移についての「アニメ 17」が分かり易く、印象深かった。また、Web上で公開されているということも、自分が必要とするときに自由にアクセスできるという点で、非常に有難い。・・・」

「統計力学の講義で教科書の説明に沿ってこのバーチャルラボラトリーを見たけども、非常にイメージをつかみ易かった。物理ではいつも現象や数式をイメージしなければならないが、本や教科書を読んでそれを自分ですることは易しいことではない。それは統計力学でも同じだが、微視状態や非常に高温、低温の世界など普段接しない世界を想像するのはより難しいと思う。その点でこのバーチャルラボラトリーはどのような現象かを目で見ることができるので分かり易いし、イメージをつかむのに役立った。さらに、このバーチャルラボラトリーは係数や条件を変えることもできるのでより理解が深められてよいと思う。・・・」

§ 4 おわりに

VLを用いた講義は、理論的展開が時間変化する現象を理解するためのものであるということを実感させて行うことができ、教員の説明を向上できるだけでなく、学生の理解度も格段に高めることができる。また、VLはホームページ上に常設され、学生による自習や他大学からの利用も容易にできるようになっている。

本稿で提案した講義法は、IT技術を用いてこれまでの講義を質的に進化させるものであり、物理の講義にとどまらず、あらゆる自然科学の講義に応用でき⁴⁾、さらに初等・中等教育でも用いることができる。VLを用いた2 + 1次元の講義は、今後IT時代の新しい効果的な教育手段として確立することが期待される。

単純な動画作成にはFlashの利用も考えられるが、本システムのように分子動力学や関数の表示など汎用的な教材作成にはJavaが最も適している。なお、VL作成用の初心者向けJavaの入力システムは、桜井によって開発されている⁵⁾。

謝辞

VLの実装は、全面的に桜井雅史君(九大院理)に負った。また統計力学のVL作成には、緒方隆盛君(九大院理)と小田垣まりかさん(京大理)にも協力してもらった。

参考文献

- 1) 例えば、<http://www.museum.kyushu-u.ac.jp/ONLINEMUSEUM/onlinemuseum.html>
- 2) Visual Basic や Mathematica は、OS依存性や動画の作り易さ、汎用性から見て、利用できないか、Javaには劣っており、本システムの目的には適さない。
- 3) <http://www.cmt.phys.kyushu-u.ac.jp/~M.Sakurai/phys/statphys/>
を参照。対応した教科書：小田垣 孝「統計力学」(裳華房、2003)。
- 4) 小田垣 孝「基礎科学のための数学的手法」(裳華房、2000)。
- 5) 桜井雅史、平成13年度未踏ソフトウェア創造事業。
<http://www.ipa.go.jp/NBP/13nendo/13mito/mdata/2-12.htm> 参照。

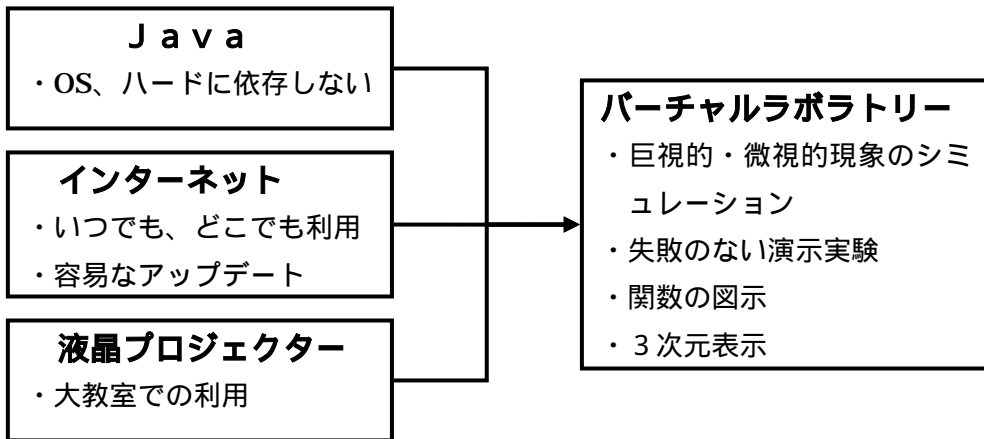


図1 . バーチャルラボラトリー開発の概念

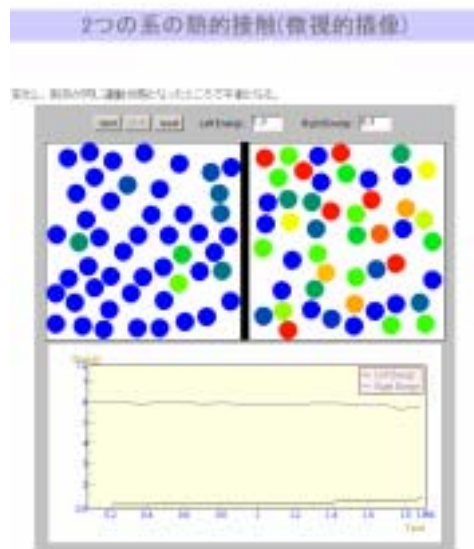


図2 . 二つの系の熱的接触

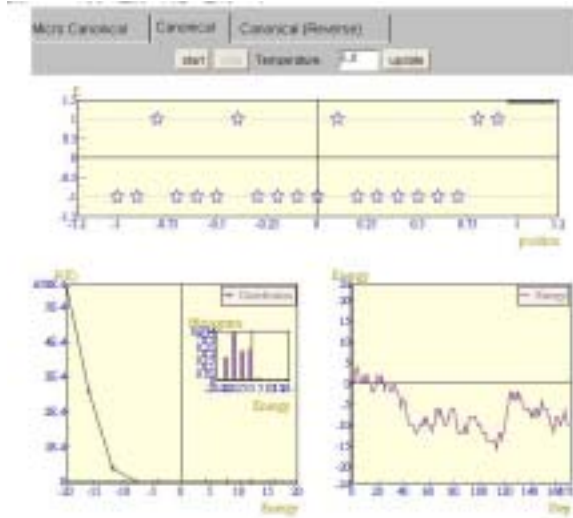


図3 . 二準位系

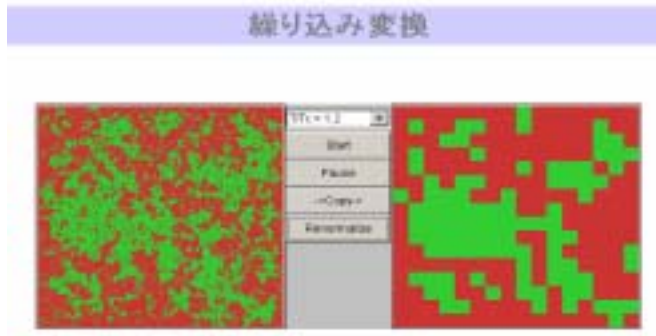


図4 . イジングスピン系の繰り込み変換。

表 1 . 講義で用いられる演示媒体の比較

媒体	次元	長所 ()・短所 ()
教科書、板書	2	時間発展が示せない 変数の変更ができない 示せる図の数が限られる
教卓実験	3+1	理想化できず、失敗することもある 大きな教室では用いられない 微視的な現象は示せない 準備に時間がかかる
ビデオ	2+0.5*	失敗がない 講義がビデオの進行に縛られる 変数を自由に変えられない 配布・アップデートが困難である
V L	2+1	巨視的・微視的時間変化を示せる インタラクティブに変数を変えられる 失敗がない アップデートが容易にできる いつでも、どこでも利用できる

* 時間発展を自由にコントロールできないという意味で 0.5 次元とした。

表2 統計力学のためのV L

1	2つの系の熱的接触(巨視的描像)
2	2つの系の熱的接触(微視的描像)
3	熱的接触させた系の状態数
4	自由膨張
5	位相空間(1次元の箱の中の粒子)
6	位相空間(箱の中の多粒子系のアンサンブル)
7	2準位系(ミクロカノニカル、カノニカル、負温度)
8	調和振動子(古典論)
9	調和振動子(量子論)
10	磁性体(古典論、量子論)
11	グランドカノニカルアンサンブル
12	高分子の負の膨張率(ビデオ提供伊藤猛宏教授)
13	ボーズ分布、フェルミ分布
14	多原子分子の自由度
15	フェルミ面・フェルミ分布
16	ボーズ-アインシュタイン凝縮
17	イジングスピン系の相転移
18	繰り込み変換
A1	ルジャンドル変換
A2	ギブスパラドックス
A3	球面調和関数