

いまどきのPCはいかに強力なマシンか

12年間のPCの進化を検証する

佐藤 和弘^{*}

過去12年間にわたるPCの進化をたどり、いまどきのPCがいかに強力な計算パワーを秘めているかを、大型計算機との比較を通して検証する。われわれはもはや机上に一昔前の大型計算機センターを開設しているようなものである。

1 理論研究者とパソコンとの出会い

昔の理論屋は紙と鉛筆（と数学公式集）があれば研究ができたらしい。封筒の裏で宇宙の研究をしていたアインシュタインの例もある。しかしずいぶん以前から、理論屋には「計算機」が研究上不可欠の道具となってしまった。全国の大学や研究所に計算センターが開設され、共同利用を目的とする大型計算機（メインフレーム）がサービスを始めたのは1970年代である。計算機使用料を請求されたものの、計算センターには連日連夜計算依頼が殺到し、その混雑はすさまじいものがあった。計算機自体も負荷が大きくなるとよくダウンした。その後TSSの普及などによって混雑は徐々に緩和されて行ったが、そうすると今度は、理論研究者も大型計算機なしには研究ができないという事態が生じた。計算機を利用するためにはどこかの大学あるいは研究所に所属していなければならず、理論屋がまったくの個人として研究を続けることは、事実上不可能になった。

この行き詰まりを変えたのはパソコン（PC）である。1970年代後半にすでに一部のマニアの間では4ビットや8ビットCPUを乗せたPCが広まっていたが、CPUパワーも小さく、使用するハードもソフトも互換性が極めて乏しかった。PCが研究者の間に急速に広まったのは、1984年にIBMがその後のPCの世界標準となる16ビットマシンPC/AT機（技術仕様を無償で公開した）を発売してからである。もちろん当時のPCの計算速度は大型計算機のそれとは比較にならず、使用できるメモリも極めて制限されていた。しかし大きなメモリを必要とせず、CPU速度も本質的ではないという計算にはPCで十分間にあった。理論研究室が積極的にPCを導入し始めたのも1984年前後ではないかと推測する。PCはけっして安価ではなかったが、一度購入してしまえばその後の運用費はただ同然である（大型計算機の使用料は高かったので直にもとが取れた）。計算センターが混み合って結果がなかなか出ないというストレスからも解放された。研究室でPCを導入しだすと、その能力に魅了された研究者個人も自分のPCを手に入れたくなった。そしてPCを手に入れてしまうと、もはや大型計算機などなくても、本質的

^{*}青森公立大学

な研究に取り組むことが可能になった。理論屋は紙と鉛筆の代わりに「PCさえあれば」、個人でも研究ができるようになったのである。

2 PCのグラフィックス

PCは大型計算機にはない機能も持っていた。PCには標準でグラフィックス機能が内臓されており、点や線や円をモニタ画面に描くことができた。言語によっては、これらの基本作図ルーチンをプログラムの中で引用できたので、計算をしながらその結果をグラフィック表示できた（リアルタイム・グラフィックス）。大型計算機の場合は、計算を一通り終了してからでないと、次の処理に入らなかった。そのためすべての計算が終わってから初めて、無意味な計算をした（あるいはプログラムミス）と分かったことがずいぶん多かった。PCではたとえばモニタに表示されるグラフを見ながら、何かが変だと思えば直ちに計算を中止できる。このおかげで、どれほどプログラミングの効率が上がり、計算時間と労力の無駄を回避できたか知れない。

リアルタイム・グラフィックスの威力は、PCでシミュレーションを行ったときいっそう鮮明になる。1970年代後半から80年代初頭にかけて、カオスやフラクタルという非線型動力学の研究が大流行した。計算という観点から言えば、カオスやフラクタルの研究はシミュレーションの一種である。そしてカオスやフラクタルの大流行をもたらしたのは、まさしくPCの普及である。多くの研究者がPCのグラフィックス機能を駆使し、華麗な図（それはアートとして鑑賞に値する）を作成することに熱中した。最後に得られる図を見るだけでも十分にインパクトがあるが、モニタ上で奇妙かつ複雑なアトラクターが時々刻々形成されていくそのプロセスを眺めることはたいへん刺激的であった。またそうしたからこそ、この新奇な現象の真の意味を理解することができたのである。離散力学系のシミュレーション（たとえばライフゲーム）もまたPC上で大流行した。当時の非力なCPUを用いても、PCを用いたシミュレーションはわくわくするほど楽しく、かつ新しい発見に満ちていた。

こうして理論研究者にとってPCは、単に大型計算機の代用というのではなく、むしろ大型計算機を使ったのではけっしてできない、新しい研究分野を切り開くための強力なツールとなっていた。ここまでの話はいわば一般論であるが、著者自身のPCとの出会い、およびその後の研究の方向と強くオーバーラップしている。それを次節以降で述べよう。

3 1987年からの6年間のPC事情

著者がPCと初めて出会ったのは1985年、当時所属していた工学部の研究室においてであった。そのPCは卒研の学生が所有する16ビットマシンであった。それまでの約10年間、大型計算機を研究手段としていた著者は、PCの計算の遅さに失望し、まだまだ実用にはならないと感じた。しかしカラーの図をモニタに表示できることに魅力を感じ、大型計算機とPCとを併用して、生態系の数理モデルのシミュレーション（ライフゲームをベースとする離散力学系）

に取り組んだ。まず個体数分布の変動を、大型計算機を使って計算し、結果をファイルに落とした。次にPCを用いて各時刻での個体数分布をカラー・パターンとして表示し、その画面を一枚ずつ8ミリフィルムにこまどり撮影した。こうして個体数分布の動的変動を示すカラー・アニメーションが完成したが、これはかなりな根気がないとできない研究ではあった（撮影作業はもっぱら学生が担当した）。研究成果を1987年初頭、学内の発表会や複雑系の研究会などで紹介したが、おおむね好評であった。これがPCを用いた著者最初の研究であるが、PCは画面表示のために補助的に用いたのみである。

1987年になると研究室でPCを導入することになり、それから著者とPCとの本格的な付き合いが始まった。このころにはPC用のさまざまなアプリが開発されて、使い勝手は格段によくなっていた。少し詳しく1987年当時を振り返ってみる。最初に使ったのはi286（インテルの16ビットCPU）を搭載し、MS-DOSをOSとするPCであった。これに数値演算プロセッサと4MBのRAMボードを増設した。クロック数は8MHzで、値段は一台50万円を下らなかったかと記憶する。プログラミング言語はFORTRANで、実行できる最大プログラムサイズは64KBであった。HDDは内臓しておらず、FDでファイルの読み書きをしたが、OSとコンパイラをRAMにロードしてから作業を始めたので、結構快適なプログラム開発環境を実現できた。コンパイラには基本的な作図ルーチンが標準で組み込まれており、BASIC感覚でグラフィックスを使用できた。そこで手始めにBASICプログラムをFORTRAN用に書き換えたり、大型計算機用に開発したFORTRANプログラムをPC用に移植したりした。翌1988年にはi386（最初の32ビットCPU）を搭載したマシンが登場し、これも研究室に導入された。このころから、実験と理論の研究室で、獲得できる研究費に大きな差がなくなったと記憶している。このマシンにも数値演算プロセッサと4MBのRAMを増設し、さらに40MBのHDDを外付けした。HDにOSとアプリがすべて入ってしまうことに驚いたが、当時のHDDはときおり不安定で、定期的なバックアップは欠かせない作業であった。

PCを使い出すと、たちまちその魅力のとりこになった。大型計算機では味わえない面白さがある。著者がPCを研究手段のひとつとするまでに長い時間はかからなかった。これらのPCを用いて、カオス、フラクタル、非線型動力学、セルオートマトンなどさまざまな研究テーマを次々に手がけていった。新規に開発したプログラムのほとんどは、リアルタイム・グラフィックスを中心とするシミュレーションであった。PCを手にしてから、大型計算機時代とは比較にならないほど研究の守備範囲が広がった。

こうして1987年以降、著者の研究道具は大型計算機からPCへと急速にシフトして行った。普段の計算やプログラム開発はもっぱらPCで行い、大きなメモリを必要とする計算（シミュレーションでシステムサイズを大きくする場合など）は大型で、という研究態勢である。

しかし著者個人にとってPCの優位を決定的としたのは、1989年に工学部を離れたことである。それまでの豊富な計算機環境もなくなったので、個人でi386を搭載するマシンを購入した。当時、本体、HDD、モニター、プリンタなどの周辺機を含めて70万ほどであった。その後3

年間はこのマシンですべての研究を行ったので、(共同研究で短期間使用した以外は) 大型計算機とすっかり縁が切れてしまった。それは現在も続いている。こうして、PCさえあれば一人でも研究ができるという著者の信念 (のようなもの) が確立することになる。

4 1993年から6年間のPC事情

1993年に著者は青森公立大に着任した。この大学では大型計算機 (メインフレーム) を導入せず、複数のUNIXワークステーション (WS) による分散型のネットワークを構築していた。文系の大学ではあるが情報教育にも力を入れており、久しぶりに豊かな計算機環境に恵まれるようになった。研究室 (といっても文系の大学なので教官一人) では i486DX2 を搭載するPCを導入した。それまで個人で所有していたi386マシンと比較して、その高速ぶり (約10倍) に驚いた記憶がある。PC本体だけで50万を超えていたかと思う。また時期を同じくしてOSもWindows3.1へと進化し、実用的なGUI (いわゆるWIMP環境) が利用できることになった。

1993年から、研究室のPCを使い、離散力学系のシミュレーション (地震のセルオートマトンモデル) を始めた。翌年から戦力に加わった計算サーバ (WS) は、C言語とFORTRAN77のコンパイラを装備し、大型計算機用のFORTRANプログラムをほとんどそのまま実行することができた。また $Mathematica$ (Wolfram Research) というソフトを用いると、WSで得た計算結果を二次元、三次元グラフや密度グラフに表すことができた。それをポスト・スクリプト対応レーザー・プリンタで出力すると、ほとんど修正なしで論文に載せられる美しい図版が完成した。この当時PCとWSとを併用して行った研究の詳細は青森公立大学の紀要 (1996) に発表してある。

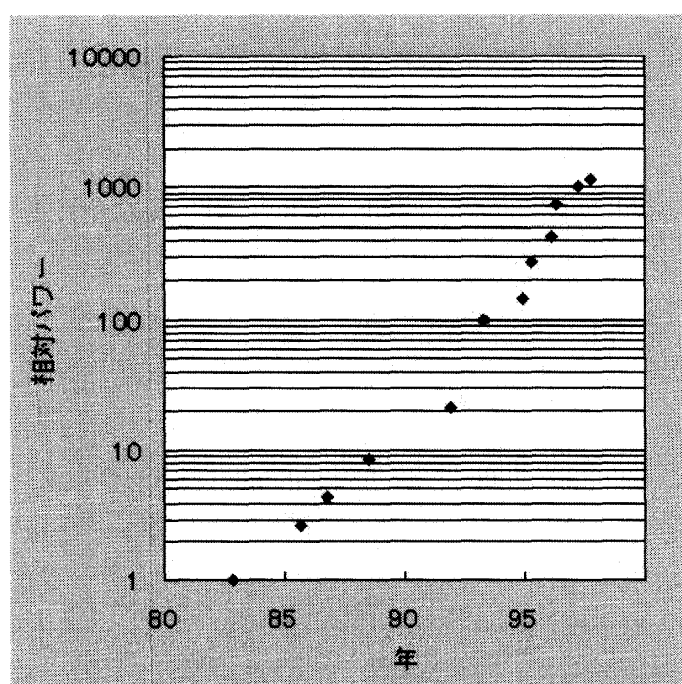


図1 intel社のx86系CPUを搭載した国内某社PCのパワーを、1982年末の値を1として対数グラフにプロットした。15年後の1997年にはパワーはおおよそ1000倍になっていることが分かる (雑誌「アスキー」の資料を参考に作成、推定値もあり厳密なものではない)。

話が前後するが1993年はPentium CPUが登場した年でもある。そして二年後の1995年には32ビットOSであるWindows95が発売された。ハードに遅れること10年、ようやくOSもまた32ビットの時代に入ったわけである。Windows95の発売前後から、世間一般にもPCが急速に普及し、CPUとその周辺の性能も一気に加速された。これを裏付ける資料を図1に示す。この図は1982年から1997年までの15年間に、インテル系CPU搭載マシンの相対パワーがどれほどアップしたかを示すグラフである（縦軸は1982年末を1とする対数グラフであることに注意）。とくに1994年からの97年までの3年間は変化が著しく、マシンパワーが7～8倍に増大した。これは実に毎年約2倍の増大率ということである（さすがにこの倍々という傾向は鈍ったものの1998年以降もPCのパワーアップは続いている）。

著者の研究室のPCは初期のPentiumマシンでしばらくの間停滞していた。パワーのあるマシンをとくに必要としなかったからである（研究も主に地固めの時期であった）。しかし1997年の暮れ、PentiumII（PII）マシンを導入した（PIIはPentiumシリーズの第4世代にあたるが、技術的には新設計のCPUと言ってよい）。クロック数300MHz、128MBのSDRAM、8GBのHDD、4MBのAGPビデオカードを搭載し、Windows95をOSとする、その時点では最高のマシンであった（わずか一年後には普及クラスのPCになり下がってしまったが）。本体のみで30万ほどであった。

5 いまどきのPCはいかに強力なマシンか

前にも述べたように1988年のi386の登場で32ビットCPUの時代が始まった。一度に処理できるビット数が倍増すると、計算速度は大幅に向上する。しかし32ビットCPUの真の魅力は、使用できるメモリアドレスが（16ビットCPUの64KBから）一気に4GBへと増大する点である。フラットなメモリ空間を構築できるコンパイラを使用すれば、PC上で実行可能なプログラムサイズは4GBということになる（事実上PCが搭載する実メモリの上限値までということ、現在最高に強力なWSでも実メモリは1GB程度である）。これなら大型計算機（あるいはWS）を使わないでも、PCを用いて大規模シミュレーションが実行できる。

著者が現在使用している32ビット対応コンパイラは、DIGITAL Visual Fortran (DEC)である。これはFORTRAN90に準拠しているだけでなく、Win32対応グラフィックス・ルーチンを標準で組み込むことができる。このコンパイラとPIIマシンを用いると、いまどきの（普通の）PCが、いかに強力なマシンであるかを検証することができる。そのために、著者が大型計算機を用いて12年前に行った本格的な計算機シミュレーション（当時はよく計算機実験といった）を、PC上で再現してみよう。

まずこの研究の理論的背景を簡単に述べる。生物はリズムに満ちている。睡眠覚醒のリズム、行動のリズムなどは、生物個体に見られるリズムである。内臓や組織にもリズムがある。呼吸や心拍はリズムそのものである。個々の細胞にまで遡っても、そこには代謝のリズムがある。実は真核生物であれば、単細胞生物にさえリズムがあることがわかっている。生物のリズムは、

個々の細胞の持つリズムにその源があるのである。この事実を簡単にモデル化すれば、細胞は生化学的な振動子である。この振動子はエネルギーを注いでやれば安定に発振をする自励振動子 (active oscillator) である。この見方では、組織、器官、個体は振動子からなる素子集団である。しかし個々の振動子の固有振動数は、ある範囲にばらついているだろうし、その上お互いが独立に (位相がバラバラに) 発振したのでは、振動子集団としての出力はあまり大きくならない (振動子の総数 N に比例する程度)。これでは実際の生物に見られる、巨視的でコヒーレントなリズム (出力が N の二乗に比例する) の由来を説明することができない。

そこで近傍の振動子間に適当な相互作用を仮定する。結合が弱いと、各振動子は隣の振動子から多少の影響を受けるものの、それぞれの固有振動数に近い振動数 (と勝手な位相) で振動している。しかし結合が強くなると、振動子は徐々に近傍の振動子と歩調を合わせるようになり、振動数も変調されてくる (これを引き込みという)。引き込みを起こした集団内では、振動子の (変調された) 振動数が一致しており、かつ位相もそろっている (自己同期)。自己同期は局所的に始まるが、結合強度の増加とともに同期領域が広がっていく。同期領域内部の振動子は、他の同期領域の影響を受けることがほとんどなく、きわめて安定な状態にある。結合強度がやがてある臨界値を超えると、自己同期領域はシステム全体に及ぶ。こうして振動子集団に巨視的な秩序が形成され、(われわれが求めていた) コヒーレントなリズムが実現されることになる。

このアイデアを計算機シミュレーションによって裏付けることが、1986年当時の著者の研究目標であった。簡単のため振動子はリミット・サイクル型とし、また各振動子は正方格子の上に並んで、最近接の4つの振動子と結合するとしよう (図2a)。詳細は省略するが、振動子の総数 N を1000個とすれば、この系は2000次元の連立微分方程式で記述される。あとはこの連立微分方程式を、大型計算機を用い、ルンゲ・クッタ法で解けばよい (そのためのFORTRANプログラムを独自に開発したがこの詳細も省略する)。1986年当時のPCではこの研究は無理であり、分子研 (岡崎市にある国立共同研究機関) のHITAC-M680という大型計算機を使用してシミュレーションを行った。図2bはその研究成果の一部を示す (Sato, 1989)。正方格子上に整列した $N=33 \times 33$ 個の振動子が、結合強度の増大とともに、徐々に同期領域を拡大していく様子が図示されている。濃淡のパターンが引き込みによって生じた同期領域の広がりを見せている (原図ではカラーで同期領域を塗り分けている)。この図の元になるデータを得るだけで、当時最新鋭の大型計算機HITAC-M680を用いて数分の計算時間を要した。

まったく同じ計算を、PCで実行した結果が図3である。プログラムは当時のものをそのまま使った。ただし振動子の数が $N=101 \times 101$ と約9倍に増えている。図2b同様、結合強度の増大とともに、引き込みによる同期領域 (濃淡のパターンで示す) が広がっていく様子がわかる (作図にはMathematicaを使用し、レーザー・プリンタで出力した)。この計算に要した時間はわずか数分である。12年間のPCの進化には驚くべきものがある。

PCのパワーを示すもうひとつの例を紹介しよう (こちらは大きなメモリの必要はない)。

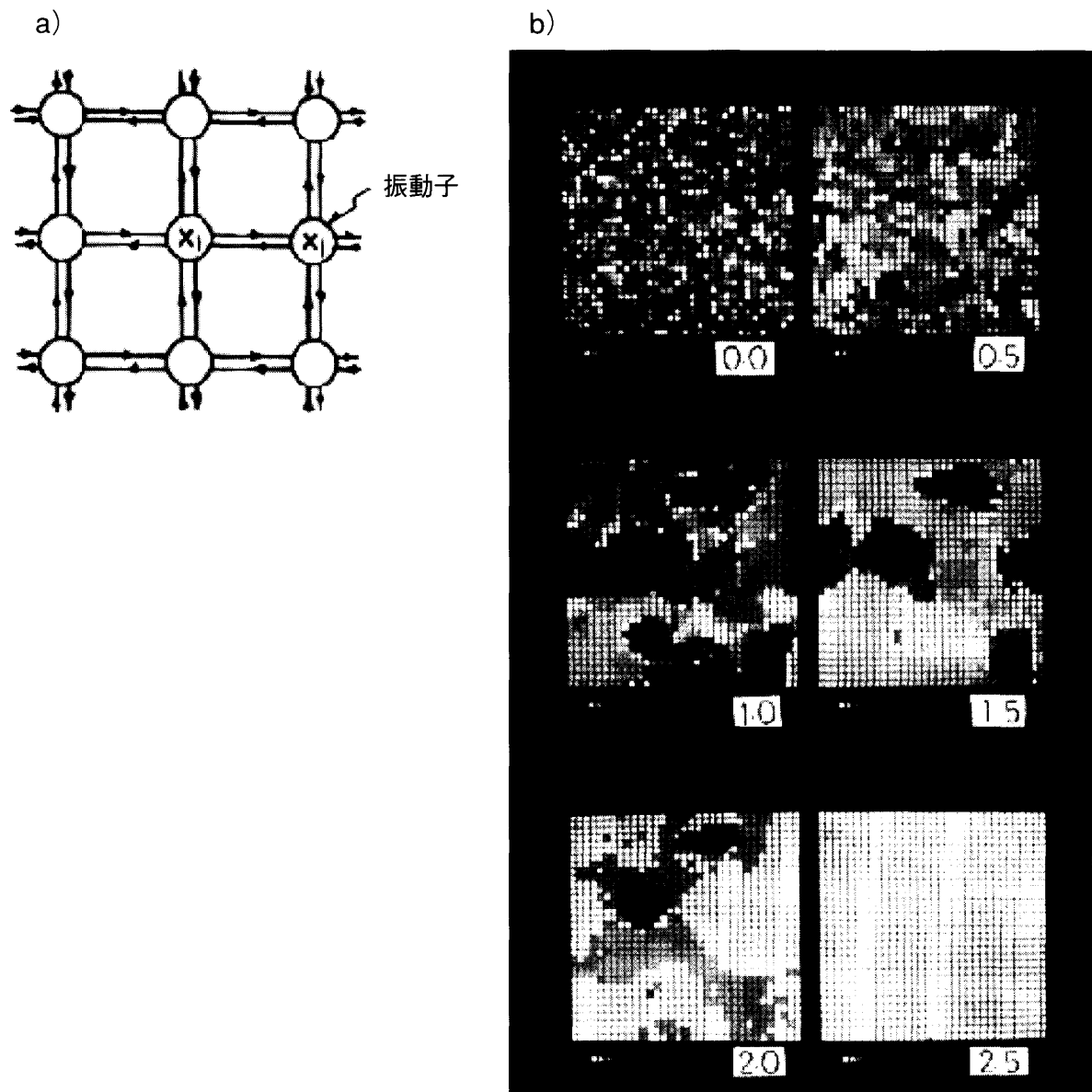


図2 a) 正方格子の上に並び、最近接どうしが影響しあっている振動子の集団。固有振動数はある範囲にばらついている。b) 振動子間の結合強度が増加するとともに、近傍振動子の歩調がそろってきて（引き込み現象）、同期した領域が徐々に広がっていく様子を濃淡のパターンで示す。結合が臨界値を超えると同期領域はシステム全体に及ぶ。システムサイズは $N=33 \times 33$ 、1986年当時の大型計算機を用いて得た結果（K.Sato, 1989）。

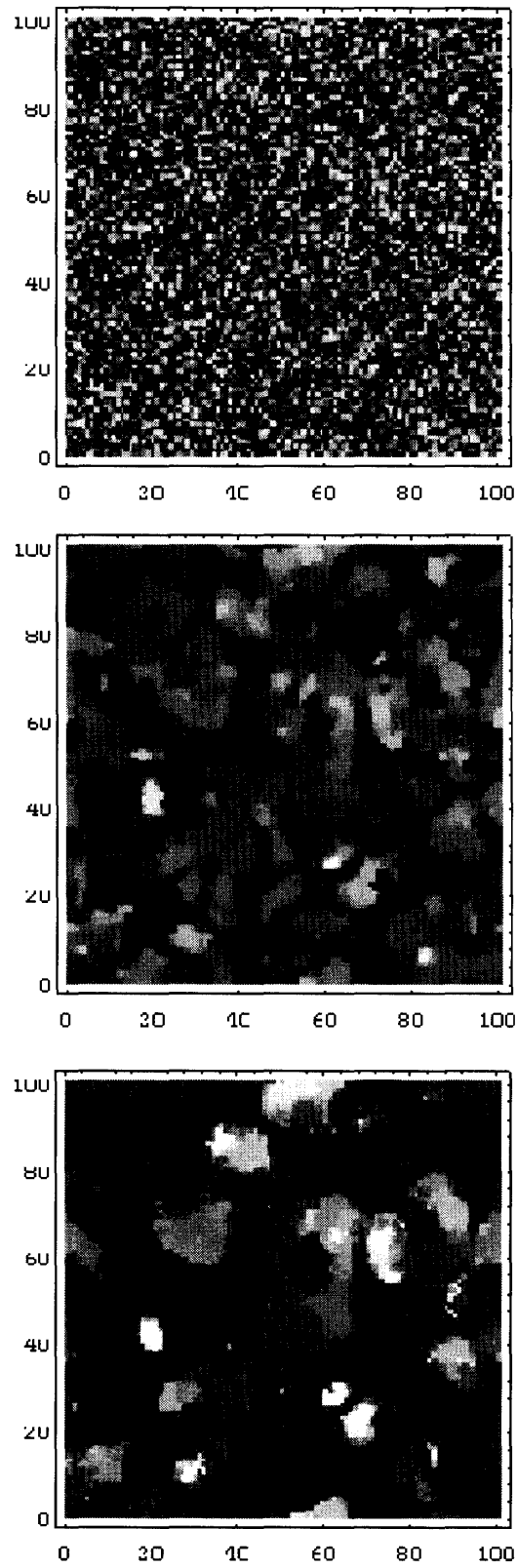


図3 図2と同じ計算をPCで行った結果。システムサイズは $N=101 \times 101$ 。結合強度は上から順に $\gamma = 0.0$ 、 1.0 、 1.5 。

図4はPCの高解像度グラフィックス（16ビット・カラー）を用いて作成されたフラクタル画像（マンデルブロ集合）である。マンデルブロ集合は、単純な反復計算を繰り返すことによって、複雑で自己相似なパターンを生みだすことができる複素写像力学系の一種である。基本図形（図4a）の作図に要した時間は10秒足らずである。複雑な境界部分を拡大した図（図4b、c、d）の作成には1分程度かかっている。PCによるこれらのフラクタル画像と、1988年に出版された「フラクタルの美」という本（芸術的な図にあふれている）に収録された図版とを比較すると、分解能の点で両者にはほとんど差がない。しかし後者は大型計算機を長時間走らせ、さまざまなカラーリングを施すことによってようやく得られた図版なのである。

6 個人研究時代の到来

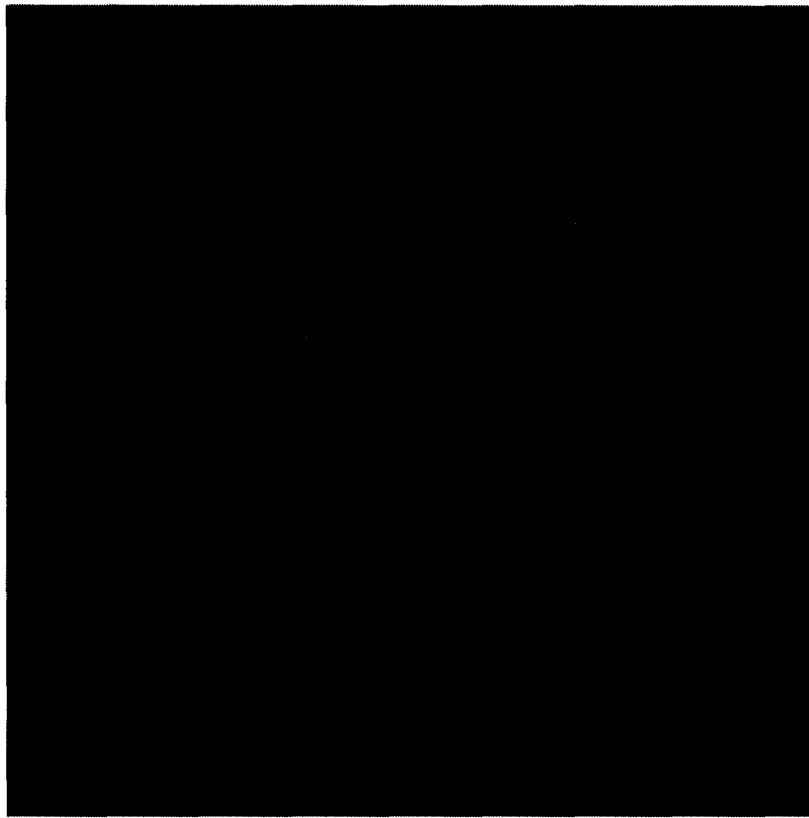
PII搭載クラスのPCは、すでに一昔前の大型計算機的能力を凌駕している。ワープロや表計算に使用しているぶんには、入門クラスのPCでさえオーバースペック気味である。一般ユーザーがPIIクラスのマシンのパワーを実感できるのは、あるいは3Dゲームを体験したときだけかもしれない。ここではインテル系CPU（とその搭載マシン）に話を絞ったが、現在ではインテル互換、PowerPC（Macintosh用）、Alphaプロセッサ（主にWS用）など各種のCPUがあり、いずれも驚くべき演算能力を達成している。CPUのクロック数はますます上昇し、近々1GHzをクリアするであろう。何度も繰り返し述べるように、PCは強力なグラフィックス機能を内蔵しており、シミュレーションを目的とする研究には最強の道具である。特別に巨大なメモリを必要とする特殊な計算（流体力学、とくに乱流関係や気象予報など）を除けば、大型計算機（スーパーコンピュータ）の出る幕はないといってもよい。整数演算が中心となる離散力学系のシミュレーションでは、かなり大きなサイズのシステムに対しても、時々刻々変化する空間パターンを、計算しながらリアルタイムでグラフィック表示することができる。12年前、PCを用いて行った著者最初の研究（第3節冒頭部分）は遠い世界のできごとになってしまった。PCを用いたリアルタイム・シミュレーションについてはまた別な機会に紹介する。

PCは可能性に満ちている。研究者は自分の机の上に一昔前の大型計算機センターを開設しているようなものである。PCひとつあれば個人レベルでもなんら遜色のない研究ができる。ある意味ではよい時代が到来した。

補足

CPUについては具体的な製品名を挙げたが、PCについては機種名を略した。搭載するCPUが同じでもPCの構成によって性能に多少の差がでるのは常識である。要所ではPCの値段にも触れたが、定価ではなく実際の入手価格である。記憶に基づく話のなかには著者の勘違いがあるかもしれない。GUI、WIMPなど専門用語の意味については、情報科学辞典、現代用語辞典などを参照されたい。

a)



b)



c)

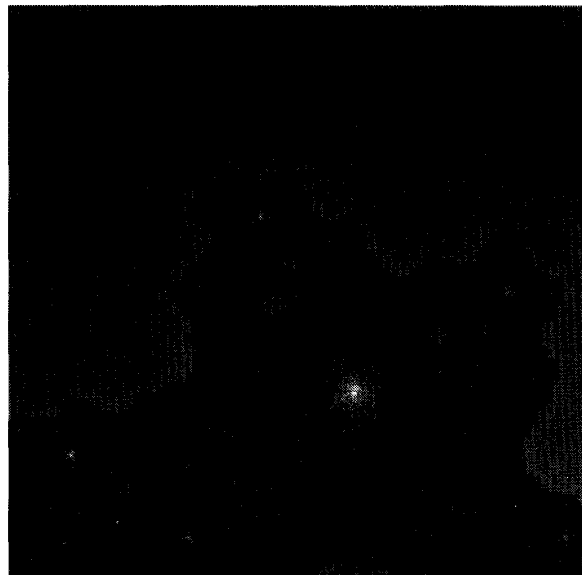


図4 a)マンデルブロ集合の基本図。b)、c) は境界付近の拡大図。原図はWin32対応高解像度グラフィックスを用い、16ビットカラーで作成した。

d)

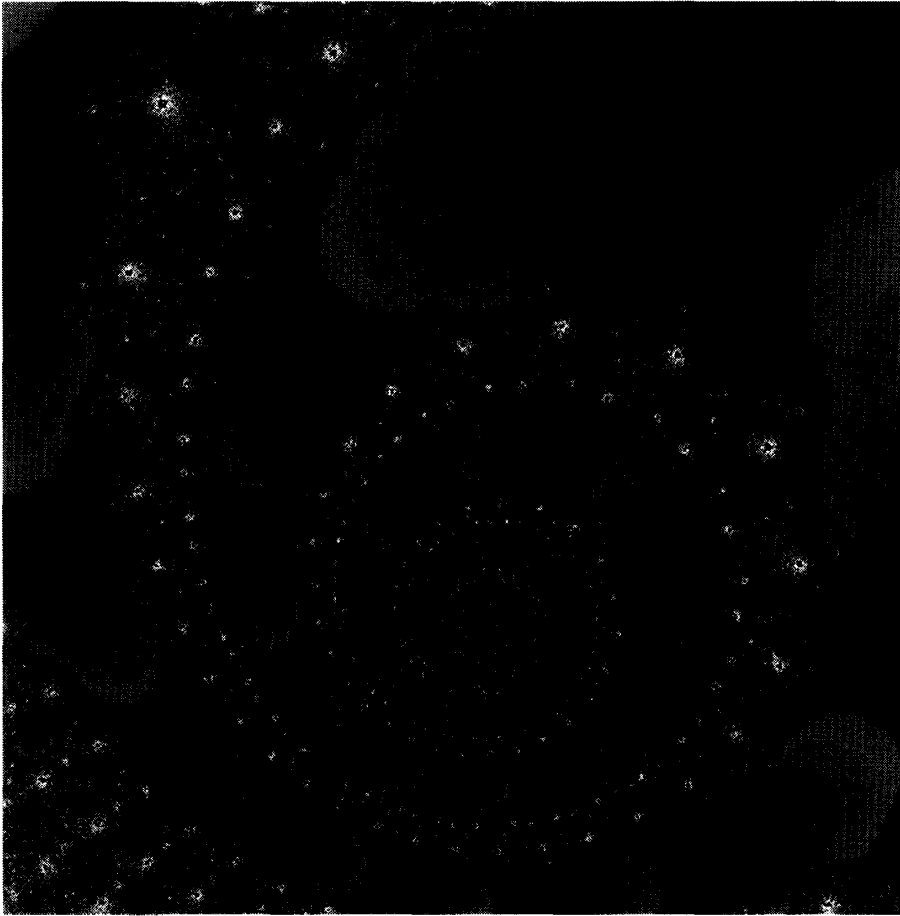


図4（続き） d) 境界領域の拡大図。美しいスパイラルターン。

(1999年1月20日受理)

参考文献

- 相田洋：「新・電子立国1～6」 NHK出版 1996～1997
佐藤和弘「地震の確率セルオートマトンモデル」青森公立大学紀要2巻1号(1996)16-27.
K.Sato : J.Phys.Soc.Jpn.58 (1989) 2010-2021.
H-O.バイトゲン P.H.リヒター著 宇敷重広訳：「フラクタルの美」シュプリンガー東京 1988