

解説

コンピュータ・グラフィックスの基本的テクノロジーと最近の話題

7. サイエнтиフィックビジュアライゼーションと CG の中の物理現象

Scientific Visualization and Physically-Based Simulation in CG by Susumu SHIRAYAMA (Part-time Employee of NABLA Inc.).

白 山 晋¹¹ (株)ナブラ, 嘱託研究員

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) は近年のマルチメディア関連の分野以外にもさまざまな方面で応用され発展を続けている。科学技術の分野でも解析が複雑になるにともなう CG の高度な利用が模索されるようになった。また、CG においても科学技術計算を利用しようという試みがなされている。

物理現象を解明しその知見を利用するということが科学における 1 つの目的である。現象解明のプロセスにおける CG のかわりを考えてみよう。物理現象を解明する場合、観測、実験、数値モデルの構築、理論・数値解析、そして、応用という作業が繰り返される。こうしたプロセスでは抽象化によって数値モデルが作られ、その数値モデルは何かしらの方程式で表されることが多い。つまり現象の中から普遍的なものを数式として抜き出そうとするのである。たとえば、物の落下は空気抵抗が無視できるものとし、重力加速度を g とすると高さ h と速度 v によって

$$\frac{dh}{dt} = v, \quad \frac{dv}{dt} = -g$$

と表現される。こうすることで落ちるものが石であろうがボールであろうがその運動を記述することができる。この方程式は容易に解けるのでコンピュータの中で石を投げることにも可能になる。しかし、通常は解が解析的に表現できることは稀で、方程式は数値計算によって解かれ、膨大な数値を掃き出すこととなる。これを理工学に利用するものを科学技術計算と呼ぶこととしよう。その数値を視覚化する方法がサイエнтиフィックビジュアライゼーション (Scientific Visualization:

SV) である。視覚化する部分で CG が用いられるために SV は科学技術計算への CG の応用という面をもつのだが、数値計算によって得られるデータの表現方法が確立していなかったために、科学技術計算という観点のもとで写実的な表現よりも抽象的なデータ表現が好まれた^{1),2)}。一方、サイエнтиフィックビジュアライゼーションは CG の立場からも、盛んに研究されてきた。しかし、得られた画像は最近の CG からみると科学啓蒙などの一部の用途を除いて現実感が欠けている。これはみえないものを視覚化するという命題を意識しすぎたために科学技術計算側の視点に立ってしまったせいである。つまり、物体の落下のように物の位置自身が必要な情報となり、また、可視である (みえる) 場合は少なく、みえない対象に対し物理量の分布をいかに表現するかということ、その中から何かしらの定量値と普遍性を見い出すことが科学技術計算における可視化の目的であったためである。たとえば、山を表現する場合、等高線よりも立体図や航空写真の方が実際の山の形を把握しやすい。また、たなびく煙とか揺らめく木の葉のほうが、速度ベクトル図よりも直感的に空気の流れを捉えることができる。しかし、科学技術計算側からの SV も CG 側からの SV も等高線を採用し、その比較から山の特徴を調べようとする。また、ベクトル場を解析することで流れの性質を調べようとする。こういった傾向の中でも一部の研究者は写実性に着目し続けてきた。そして、写実性の果たす役割を考えることがサイエнтиフィックビジュアライゼーションにおける最近のテーマの 1 つになっている。

コンピュータグラフィックスの分野では、科学技術計算をベースとした SV に加えて、自然物体

の表現としての可視化の研究がある。これを物理法則に基づく CG と呼ぶことにする。この場合の物理現象としては計算時間の節約を理由に擬似的な物理シミュレーションの結果とその人為的な修正が使われる場合が多い。ところが、最近のマルチメディアの分野では、より高度な CG を実現するためにより忠実に物理現象を再現する試みがなされている。具体的には、人為的な部分を少なくするために、実験、観測、計算データの使用という科学的な手法が使われ始めている。物理法則に基づくシミュレーションは運動（形態変化）とその表現に分けられる。運動を正確に求めるには現象を忠実に再現する数値モデルと精度に比例した大規模計算が必要になる。表現を精緻化しようとすると高度な光学モデルが必要になる。科学技術計算は前者、すなわち数値モデルや大規模計算を重視し、コンピュータグラフィックスでは後者、すなわち光学モデルを欠くことはできない。効率的な作業を行うためにはどちらかを優先させる必要があるが、場合によっては融合させる必然性が生じる。

本稿では科学技術計算における写実的な可視化と CG における科学技術計算の活用についてこれまでの経緯と現状を踏まえながら解説する。著者は流体解析を専門としているため、流れの可視化を例に SV と CG の関連を述べるが、ほかの分野でも同様の議論が可能であると思われる。

2. 科学技術計算の中の CG

科学におけるシミュレーションは自然現象の仮想空間での模倣という面をもっている。本来ならば抽象化された数値モデルであっても、その結果を抽象的なデータで表現しては複雑化する現象の理解を助けることにはならない。しかしながら、写実性が軽視されてきたのも事実である。その経緯を考えてみよう。

コンピュータグラフィックスが生まれた頃、科学技術計算で得られたデータは少量であり手書きで処理されていた。はじめにグラフ、単純な物理量の分布、物の動きなどがコンピュータの画面上で視覚化されるのだが、CG 自身が表示という手段そのものであったため、科学技術計算の結果の表示と CG は同一視できた。その後、CG は表示手法そのものを発展させるとともに表示という手

段を超え、表現法、芸術性を取り込みながら、映像の創造そのものに拡張していく。

一方、科学技術計算では数値物理モデルの構成において抽象化という側面が強化された。またモデル構築の過程で得られた支配方程式を眺めれば現実を再構成できると多くの研究者が考えたようである。しかし、実際にはそれほど単純ではなく、得られたデータを理解しやすい形にする必要が生じた。これがサイエンティフィックビジュアライゼーションの提案理由である。データの表現に関してはその方法が確立していなかったために、観測、実験での可視化の模倣をすることとなる。コンピュータへの表示のために CG が用いられた。ところが、このときに写実的な表現は棄却され、可視化においても抽象化が強調されることとなった。この抽象化は一般解を表現するという意味でのデータの特徴抽出と分類、定量化（解析対象からの普遍性の探求）のために行われたとされるが、計算機資源が関係したことも事実である。結局、数値物理モデルの構成に用いられてきた抽象化という概念が強調されてしまい、CG は表示の手段としてだけ用いられるようになる。こうして、現象は、「現実的に」という意味で見えなくなる。もともとみえない現象を追うわけだから当然といえるのだが現実感を強調することで現象の把握が容易になる場合もある。たとえば、80 年代後半に散乱光の研究を進展させ、リアリティの追求のために提案された CG のラジオシティ法は放射伝熱解析で輻射輸送の計算に用いられていた手法の応用である。これを SV に応用すれば現象を忠実に再現できる分野もある。ところが、ラジオシティ法を用いた可視化の例はきわめて少ないのである。光学的効果の利用という面では、SV における CG は散乱光の研究以前の鏡面反射を中心とした 80 年代初期のレベルであると考えてもよい。

このように CG の進化と科学技術計算の目的が原因で CG と科学技術計算の結果の表示は一部を残して分離してしまう。とくに写実的な表現、すなわち、光学の部分が簡略化されてしまった。

2.1 みえない現象を追って

みえない現象を捉えるために発展してきた科学技術計算の結果の表示は、数値データから何をどうみるかという作業として定義できる。そして、

何がわかるのかという部分を重視する。「何を」の部分は物理現象、工学への応用など、それぞれの分野で異なり、なかなか一般的なものを見い出すのは難しい。たとえば、単純に最小値、最大値というのでは意味がない。一般的なものを見い出すには数学的な部分を含めたそれぞれの分野の深い知識が要求される。当然、科学技術計算側では、「何を」と「何がわかったのか」の部分を最も重要視する。この点がボトルネックとなって、CG側のSVの研究の大部分が対象となる分野において評価されず、補助的なものとみなされていることも事実である。このため、CGにおけるSVは情報全般の可視化および可視化システム自身へと概念を拡大しているようである。

「どうみるか」は、手法、システム論、表示技術に分けられる。はじめに可視化手法を表示対象図形によって分類して紹介する。この中では粒子追跡という可視化手法が流体計算に特有なものであるが、これもベクトル場の表現の特殊な例として扱うことができる³⁾。また、ほかの計算物理・工学の可視化においても同様の手法が用いられている。

(a) 点や線による可視化から

- メッシュ図
- ベクトル図
- 等値線図
- 仮想粒子追跡による可視化

(b) 多角形による可視化から

- 切断面または物体形状の表示
- 等値領域表示（平面または曲面上）
- 等値面図

(c) 光線追跡を模倣した可視化から

- ボリュームレンダリング

これらのものは直接的なデータ処理法であり、多くの可視化ソフトの中で提供されている。いくつかの方法はさらなる効率化・高速化を目指して研究されているが、その成果が実際の可視化作業に活かされている例は少ない。直接的なデータ処理に関していえば既存のものをを用いて結果が同じであれば、数倍の効率化では評価されない。こうした理由でボリュームレンダリングを含めても直接的なデータ処理法の研究は90年代初頭において完了していたといっても過言ではない^{1)~3)}。例外は等値領域表示の3次元への拡張である。等値領

域表示の目的は特徴領域の抽出であるのでボリュームレンダリングに定量性を加えたものがその候補と考えられる⁴⁾。ただし、この場合もほかの方法で代用可能なことが多いので、手法の提案と同時にほかの方法では得ることのできない効果が示されなければならない。つまり、「何を」の部分が必要となる。「どうみるか」に関することで残されているテーマは、精度⁴⁾、特徴領域の自動抽出と情報圧縮のための技術、大規模計算との連携（並列化などの実装に関して）、ネットワークの利用などである。いずれも「どうみるか」ということだけでは議論することはできないのだが、強いといえば物理的な部分を排除できるテーマである。ただ、数値計算とは深くかわる部分は残る。たとえば、CGの分野では先述した直接的なデータ処理法をさまざまなデータ形式に適用する研究が行われているが、データはデータとして考えることが多い。ところが数値計算からのデータならば、その補間法はもともになる計算に用いられる数値アルゴリズムの精度に強く影響されている。また、それを再現する必要がある⁴⁾。実験、観測の場合もその精度を無視することはできない。精度の問題は数理物理モデルの局所解の補間の問題である場合が多い。

各々の分野に踏み込む必要はあるが、基本的な手法の解くべき問題への応用法、普遍的な性質をみつけるための特徴領域の自動抽出と情報圧縮の概念⁵⁾は最も重要なテーマである。これらは現象の解釈や定量化に関連する。そして、以下に述べるケースはSVの研究自身を推し進める起爆剤となっている。

可視化の適用される対象によっては得られたデータを用いた新たな物理シミュレーションを要求する場合がある。たとえば、仮想粒子に重力や集合運動の効果を入れたり、光学的な効果（粒子の光学散乱など）を加えることが考えられる。そして、これらの研究の多くが写実性を要求し、サイエンティフィックビジュアライゼーションの目的とされる理解しやすい形でのデータ表現が欠けていることを再認識させることとなる。数値解の有効性の確認が予想されたよりも難しいために実験、観測との光学レベルでの定量的比較が必要となったことがそれらの研究を加速している。

2.2 自然の中の可視化

みえないものの可視化であることの多いサイエントフィックビジュアライゼーションがその発展段階でみえるものを模倣している。たとえば、自然界または生活の中には可視化された流れが存在する。みえる流れには水面に浮かぶ木屑、水蒸気や炎、煙などの流れ自身の動きがみえるものと風に揺れる旗や舞う木の葉など流れによって運動する物体の振舞いから流れが類推できるものがある。実験室での可視化を考えれば前者は自然の中でのトレーサ法に相当する。トレーサ法とは流れの中に粒子や染料、小さなシャボン玉などの目印になるもの（トレーサ：Tracer）を注入または発生させ、それを追うことで流れ場をみようとする方法である。SVの仮想粒子追跡法はこれをまねている。

自然界には実験室での可視化に相当するものが存在し、目にみえる姿で流れが現れる。そして、それをSVが模倣し、コンピュータの画面上に流れが表示される。その過程で省略されるものの1つが光の効果である。このためにSVによる結果と自然界にある流れ、実験室での流れは映像としては食い違いを生じる。

2.3 観察、観測のSVへの応用

観測データの場合は光の性質を十分に考慮するため、抽象的な画像が得られたとしてもそれが最終的な目標に近いことが多い。計算では数値モデルを採用するために前節で述べた食い違いが問題となることがある。流れをトレーサ法で可視化する場合、トレーサ粒子はシャボン玉のように個々が識別できるものか煙粒子のように集合体として扱うものかのどちらかである。粒子による光の散乱は粒子径によっては画像に強く影響を与えるため、実験や観測との比較を考えるとその効果を加味したSVが必要となる。これ以外にも、シャドウグラフ（かげろうのようなもの）、シュリーレン法のように、直接、光の性質を用いた可視化が行われている。得られた画像はSVでは密度の等値線、等値領域による表示と比較されることが多い。この比較において光の振舞いを正しく組み入れる方法が提案されている⁵⁾。そして、CFI（Computational Flow Imaging）と呼ばれる分野を発展させることになった。こうして、SVの観測、実験、あるいは、自然界の写実的な模倣が

見直されたのである。CGにおけるレンダリングは光学という物理シミュレーションであるから、その部分をSVに加えるわけである。必然的に写実性が強調され、そのイメージは時として解析する人間の洞察力を高めてくれる。また、原理のはっきりしない現象からモデルを構成する場合の観測や実験との厳密な比較において重要な役割を担う。

3. CGの中の物理現象

コンピュータグラフィックスと物理現象が関連するものとして科学技術計算でのSV、CGの側から研究されているSVのほかに物理モデルに基づいた自然物体の表現、アニメーションというCGの分野がある⁶⁾。用途としては、映画のシーンを構成するためのものなどさまざまであるが、CGの利用範囲が拡大するに従い効率重視型と精度追求型に別れて発展している。ただし、技術計算を目的としたものではないので、精度を追求するといってもその作業は簡略化される。また、高度な数値モデルを嫌う傾向があることも事実である。

自然物体の表現には、重力のさまざまな効果、フラクタルによる複雑形状の形成過程などがあ。実際の自然物体はフラクタルでそれらしく表現できるし、成長過程を何かしらの自己相似写像で説明できる場合もある。しかしながら、自然物体そのものを表現しきれないために、大まかな構造は観察か簡易的な数値モデルによって与え、細部にフラクタル表現を用いることが多い。また細部の構造が本当にフラクタルで表現されるのかという問題もある。モデルの善し悪しはでき上がった画像が現実に近いかな否かで判断されることが多いため、従来の科学技術計算の立場からは数理的な考察が少ないことが問題とされる。しかし、観察による自然物体の表現という方法は科学的手法でもあるので、CGを作ったプロセスの中に物理法則が潜んでいる可能性は否定できない。さらに最近の複雑系の研究に用いられている手法がCG制作にいち早く取り入れられていることも興味深い。

自然物体の表現以上に物理モデルに基づいたアニメーションは難しく、科学技術計算との連携が重要となる。ところが計算の手法が確立している

場合でも、効率の問題から、簡易的なモデルが使われる場合がある。舞い落ちる木の葉、煙草の煙、雲、炎などである。これらのものは、その運動の支配方程式の性質をもったモデルを用いて作られているが、モデルの精緻化によって支配方程式を満足しないことが数学的に示されるものが大半である。このため現実と似ていて似ているが現実とは異なる運動を映像化している可能性がある。このようなCGを発展させる場合にモデルを正確にする（科学技術の手法を利用する）必要が生じるのである。

ただし、この場合も、自然物体の表現法と同様に一方的に擬似的であると決めつけることはできない。1つには科学技術計算自身が困難なためである。流体計算ではナビエ・ストークスの方程式 (Navier Stokes: NS) というものが用いられることが多い。この方程式は流体現象に関する数値モデルの1つであるが、数値的であっても解くことは難しい。たとえば、球という単純な形状を過ぎる流れですら完全に解析されていないのである。まして、熱とか化学反応が絡むとその数値解自身の保証が大仕事である。もう1つは、CGでの観察によって修正される現象が科学技術計算で得られる結果よりも現実をうまく表現する場合があるためである。CGのアニメータの観察力が簡易化された物理モデルを補っているのである。先にあげた例の中にもそういったものがある。

CGでは自然界の流れをできるだけ忠実に映像として表現しようとする。観察と探索、そして、再現という作業を、NS式に頼ることなく行っている。レンダリングの部分で映像製作に費やされる計算時間はSVに比べるとはるかに多くなるが作られた映像は流体の専門家を欺くほど現実と忠実な場合がある。科学技術計算でも、みえる流れの可視化ということに着目すると、観察力と再現ということを見捨てることはできないし、そのプロセスにおける方法論は意味のあるものである。このこともSVにおける現実感の考慮という方向性を刺激しているように思われる。そして、写実性の追求は映像が擬似的かどうかの判断にも役立つ。このようにCGと科学技術計算は1つのフィードバック・プロセスに組み入れることが望ましい。

いずれにしろ、CGにおいて観察力を客観的に

評価するためには（個々のアニメータの技量に頼らず誰でも同じように自然現象を表示できるように）、積極的に科学技術計算の手法や科学技術計算によるシミュレーションの結果を取り入れるのがよいと思われる。このとき、効率が一番の問題となるが、採用したモデルの精緻化によって科学技術計算と同程度の精度となることを保証することは必要であろう。

4. SV と CG の融合

雲のCG画像を取り上げることで科学技術計算側からみたSVと物理モデルに基づくCGの融合の必要性を考えてみよう。

コンピュータグラフィックスで雲を扱う場合、用途はさまざまであるが、見た目だけを考えるとテクスチャマッピングによる表現やクラウドボール⁹⁾による方法を用いれば現実感のある表示を実現できる。それでも雲の表示のために新たな手法が提案されているのは立体感の不足とダイナミックな動きのためである⁷⁾。気象の専門家は雲の生成過程を簡易的なモデルによって説明している。そういった専門家は蓄えられた知見をもっており、簡易モデルを組み合わせることで生成過程を説明しているわけである。つまり、多くの部分はコンピュータの中で表現できる形となっていない。また、その簡易モデルだけでは実際の雲が表現しきれないことは支配方程式の一部（たとえばNS式）と現象の対応を考えても明白である。さらにいえば、現象のすべてが説明されているわけではないのである。このため、数値計算に対する期待は大きいのだが、現状では雲を計算で捉えることには困難な作業をとらなう。それでも計算によってなんらかの知見が得られれば、理論、そして、CGに反映されていくはずである。このときにCGからのフィードバックも期待できる。

雲の表示に関しては多重散乱の効果をいかに含めるかが問題となる。この点に関してはCGの方が先行している⁸⁾。というのもSVに散乱光まで含めた例がきわめて少ないからである。ただ、最先端のCGを用いても実際の雲と異なる点は指摘できる。たとえば積乱雲のCGにおいて境界が拡散的に表現されることは実際の流体現象とは異なる。感覚的にいえば雲はもやもやとした境界のはっきりしないものと思われがちだが、雲の形態に

よっては領域が明確に区別できる場合がある。積乱雲が一例である。この場合、関連する現象として乱流混合が考えられる。乱流混合の過程では予想よりも境界が明確になることはよく知られている事実である。積乱雲の形成過程を考慮すると、その境界はこうしたものであると考えられる。このため、光の散乱に絡む粒子属性は雲がない部分から滑らかに変化するというよりはある部分で急激に変化していると考えた方がよい。そうすると文献8)にあるような雲のモデリングでは粒子密度の分布が現実と異なってしまうのでリアリティが欠落してしまう。また、層状性の雲も大気の流れ運動と深くかわりをもって可視となっている現象である。気流方向の渦構造が雲の形を決めるうえで重要である。山越えの気流にともなう雲もまた流れ場に左右されてその形態を変化させる。このように現象が十分理解されなければ、画像の質を上げることが難しいものはたくさんある。それらの現象を解明するような計算ができれば、その計算を直接利用しなくとも、その成果から得られたモデルをCGに応用すればよい。

また、2.3節で述べたようにSVに高度の光学モデルを用いれば、科学技術計算から、より精度の高い情報を得ることが可能となるだろう。

5. おわりに

科学技術計算の結果の表示法は先行するCGの研究成果を取り入れることで発展してきたが、数学的思考能力に長けた研究者は写実性を否定的に考えてきた。このためSVにおけるCGはCGとしての質の高さはなく、また、質を追求することも少なかった。

しかし、近年、結果の表示の解釈において洞察力を高めるために写実性の追求が意味をもつことが認識されてきた。確かに高度なレンダリング技法に対する計算負荷は非常に大きく、科学技術計算に続けて可視化を行うためにはそれに適した計算環境、アルゴリズムが必要となる。また、CGの中の物理現象に科学技術計算を取り入れるためには計算機資源の問題があることは否めない。

しかしながら、両者の交流によって、より質の高い科学技術計算とより質の高いCGが実現できることは明らかである。このように両者の融合は多くの利益をもたらすことが期待されるのだが両

者にまたがる研究、および、研究者の数はまだ少ない。その研究は始まったばかりであるし、マルチメディア時代を迎え、ますます盛んになるはずである。この分野での実例をともなった研究が注目される。

付記 紙面の都合で具体例を紹介できなかったが、サイエンティフィックビジュアルゼーションについては文献1)~4)、また、ボリュームレンダリングについては今回の特集の「ボリューム・データのグラフィックス表示」を参照してほしい。また、CGの中の物理現象とSVの融合の試みの例は「ツイスター」などの映画の特殊効果の中にある。これらの詳細はComputer Graphics World誌などで紹介されている。

参考文献

- 1) 白山 晋, 桑原邦郎: 流れのシミュレーション結果を可視化するシステム, 日経CG, 創刊前秋号(1986).
- 2) Shirayama, S. and Kuwahara, K.: Flow Visualization in Computational Fluid Dynamics, Int. J. of Supercomputer Applications, Vol. 4, No. 2, pp. 66-80 (1990).
- 3) Shirayama, S.: Processing of Computed Vector Fields for Visualization, J. of Comput. Physics, Vol. 106, No. 1, pp. 30-41 (1993).
- 4) Shirayama, S.: Several Sources of Errors in Numerical Flow Visualization Techniques, AIAA-95-1714-CP (June 1995).
- 5) Hesselink, L.: Digital Image Processing in Flow Visualization, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 20, pp. 421-485 (1988).
- 6) 中嶋正之監修: 3次元CG, pp. 93-117, オーム社, 東京 (1994).
- 7) 清水英之, 牧野光則, 大石進一: 粒子の成長を考慮した積乱雲の表現, NICOGRAPH 論文集, pp. 142-149 (1995).
- 8) Nishita, T., Dobashi, Y. and Nakamae, E.: Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pp. 379-386 (1996).
- 9) 大口孝之, 上田明彦, 佐藤雅弘: “台風” コンピュータアニメーションによる科学啓蒙映像の制作, NICOGRAPH 論文集, pp. 365-374 (1991).

(平成8年10月28日受付)



白山 晋

1959年生, 1982年京都大学工学部航空工学科卒業, 1987年東京大学大学院工学系博士課程修了, 東京大学工学博士, (1985年カリフ

ォルニア州立大学バークレー校数学科研究員,) (株)計算流体力学研究所, (株)ソフテックを経て, 現在, (株)ナブラ, 嘱託研究員, 科学技術計算のコンピュータ・グラフィックスへの応用, 海洋大循環などの環境に関する流れの研究に従事, e-mail: VH6S-SRYM@asahi-net. or. jp