メディア学大系

11

CG によるシミュレーションと可視化

菊池　司
竹島由里子
共著

コロナ社

メディア学大系 編集委員会

監　修

〈第 1 期〉

相 川 清 明（元東京工科大学，工学博士）
飯 田　　仁（元東京工科大学，博士（工学））

〈第 2 期〉

相 川 清 明（元東京工科大学，工学博士）
近 藤 邦 雄（東京工科大学，工学博士）

〈第 3 期〉

大 淵 康 成（東京工科大学，博士（情報理工学））
柿 本 正 憲（東京工科大学，博士（情報理工学））

編集委員

稲 葉 竹 俊（東京工科大学）
榎 本 美 香（東京工科大学，博士（学術））
太 田 高 志（東京工科大学，博士（工学））
大 山 昌 彦（東京工科大学）
菊 池　　司（東京工科大学，博士（工学））
榊　　俊 吾（東京工科大学，博士（社会情報学））
佐々木 和郎（東京工科大学）
進 藤 美 希（東京工科大学，博士（経営管理））
寺 澤 卓 也（東京工科大学，博士（工学））
藤 澤 公 也（東京工科大学，博士（政策・メディア））
松 永 信 介（東京工科大学，博士（理学））
三 上 浩 司（東京工科大学，博士（政策・メディア））

（五十音順，2020 年 1 月現在）

「メディア学大系」刊行に寄せて

ラテン語の“メディア（中間・仲立ち）”という言葉は，16 世紀後期の社会で使われ始め，20 世紀前期には人間のコミュニケーションを助ける新聞・雑誌・ラジオ・テレビが代表する“マスメディア”を意味するようになった。また，20 世紀後期の情報通信技術の著しい発展によってメディアは社会変革の原動力に不可欠な存在までに押し上げられた。著名なメディア論者マーシャル・マクルーハンは彼の著書『メディア論―人間の拡張の諸相』（栗原・河本訳，みすず書房，1987 年）のなかで，“メディアは人間の外部環境のすべてで，人間拡張の技術であり，われわれのすみからすみまで変えてしまう。人類の歴史はメディアの交替の歴史ともいえ，メディアの作用に関する知識なしには，社会と文化の変動を理解することはできない”と示唆している。

このように未来社会におけるメディアの発展とその重要な役割は多くの学者が指摘するところであるが，大学教育の対象としての「メディア学」の体系化は進んでいない。東京工科大学は理工系の大学であるが，その特色を活かしてメディア学の一端を学部レベルで教育・研究する学部を創設することを検討し，1999 年 4 月世に先駆けて「メディア学部」を開設した。ここでいう，メディアとは「人間の意思や感情の創出・表現・認識・知覚・理解・記憶・伝達・利用といった人間の知的コミュニケーションの基本的な機能を支援し，助長する媒体あるいは手段」と広義にとらえている。このような多様かつ進化する高度な学術対象を取り扱うためには，従来の個別学問だけで対応することは困難で，諸学問横断的なアプローチが必須と考え，学部内に専門的な科目群（コア）を設けた。その一つ目はメディアの高度な機能と未来のメディアを開拓するための工学的な領域「メディア技術コア」，二つ目は意思・感情の豊かな表現力と秘められた発想力の発掘を目指す芸術学的な領域「メディア表現コ

ア」，三つ目は新しい社会メディアシステムの開発ならびに健全で快適な社会の創造に寄与する人文社会学的な領域「メディア環境コア」である。

「文・理・芸」融合のメディア学部は創立から 13 年の間，メディア学の体系化に試行錯誤の連続であったが，その経験を通して，メディア学は 21 世紀の学術・産業・社会・生活のあらゆる面に計り知れない大きなインパクトを与え，学問分野でも重要な位置を占めることを知った。また，メディアに関する学術的な基礎を確立する見通しもつき，歴年の願いであった「メディア学大系」の教科書シリーズ全 10 巻を刊行することになった。

2016 年，メディア学の普及と進歩は目覚ましく，「メディア学大系」もさらに増強が必要になった。この度，視聴覚情報の新たな取り扱いの進歩に対応するため，さらに 5 巻を刊行することにした。

2017 年に至り，メディアの高度化に伴い，それを支える基礎学問の充実が必要になった。そこで，数学，物理，アルゴリズム，データ解析の分野において，メディア学全体の基礎となる教科書 4 巻を刊行することにした。メディア学に直結した視点で執筆し，理解しやすいように心がけている。また，発展を続けるメディア分野に対応するため，さらに「メディア学大系」を充実させることを計画している。

この「メディア学大系」の教科書シリーズは，特にメディア技術・メディア芸術・メディア環境に興味をもつ学生には基礎的な教科書になり，メディアエキスパートを志す諸氏には本格的なメディア学への橋渡しの役割を果たすと確信している。この教科書シリーズを通して「メディア学」という新しい学問の台頭を感じとっていただければ幸いである。

2020 年 1 月

東京工科大学
メディア学部　初代学部長
前学長

相磯秀夫

「メディア学大系」の使い方

メディア学は，工学・社会科学・芸術などの幅広い分野を包摂する学問である。これらの分野を，情報技術を用いた人から人への情報伝達という観点で横断的に捉えることで，メディア学という学問の独自性が生まれる。「メディア学大系」では，こうしたメディア学の視座を保ちつつ，各分野の特徴に応じた分冊を提供している。

第1巻『改訂メディア学入門』では，技術・表現・環境という言葉で表されるメディアの特徴から，メディア学の全体像を概観し，さらなる学びへの道筋を示している。

第2巻『CGとゲームの技術』，第3巻『コンテンツクリエーション（改訂版）』は，ゲームやアニメ，CGなどのコンテンツの創作分野に関連した内容となっている。

第4巻『マルチモーダルインタラクション』，第5巻『人とコンピュータの関わり』は，インタラクティブな情報伝達の仕組みを扱う分野である。

第6巻『教育メディア』，第7巻『コミュニティメディア』は，社会におけるメディアの役割と，その活用方法について解説している。

第8巻『ICTビジネス』，第9巻『ミュージックメディア』は，産業におけるメディア活用に着目し，経済的な視点も加えたメディア論である。

第10巻『メディアICT（改訂版）』は，ここまでに紹介した各分野を扱う際に必要となるICT技術を整理し，情報科学とネットワークに関する基本的なリテラシーを身に付けるための内容を網羅している。

第2期の第11巻～第15巻は，メディア学で扱う情報伝達手段の中でも，視聴覚に関わるものに重点を置き，さらに具体的な内容に踏み込んで書かれている。

第11巻『CGによるシミュレーションと可視化』，第12巻『CG数理の基礎』

では，視覚メディアとしてのコンピュータグラフィックスについて，より詳しく学ぶことができる。

第 13 巻『音声音響インタフェース実践』は，聴覚メディアとしての音の処理技術について，応用にまで踏み込んだ内容となっている。

第 14 巻『クリエイターのための 映像表現技法』，第 15 巻『視聴覚メディア』では，視覚と聴覚とを統合的に扱いながら，効果的な情報伝達についての解説を行う。

第 3 期の第 16 巻～第 19 巻は，メディア学を学ぶうえでの道具となる学問について，必要十分な内容をまとめている。

第 16 巻『メディアのための数学』，第 17 巻『メディアのための物理』は，文系の学生でもこれだけは知っておいて欲しいという内容を整理したものである。

第 18 巻『メディアのためのアルゴリズム』，第 19 巻『メディアのためのデータ解析』では，情報工学の基本的な内容を，メディア学での活用という観点で解説する。

各巻の構成内容は，大学における講義 2 単位に相当する学習を想定して書かれている。各章の内容を身に付けた後には，演習問題を通じて学修成果を確認し，参考文献を活用してさらに高度な内容の学習へと進んでもらいたい。

メディア学の分野は日進月歩で，毎日のように新しい技術が話題となっている。しかし，それらの技術が長年の学問的蓄積のうえに成立しているということも忘れてはいけない。「メディア学大系」では，そうした蓄積を丁寧に描きながら，最新の成果も取り込んでいくことを目指している。そのため，各分野の基礎的内容についての教育経験を持ち，なおかつ最新の技術動向についても把握している第一線の執筆者を選び，執筆をお願いした。本シリーズが，メディア学を志す人たちにとっての学びの出発点となることを期待するものである。

2023 年 1 月

柿本正憲
大淵康成

まえがき

1963年にIvan Sutherlandが世界で最初のグラフィックスシステムであるSketchpadを開発してから60年ほどであるが，その間にコンピュータグラフィックス（CG）技術は目を見張るような進展を遂げてきた。CGを扱う多くの企業が誕生し，多くの大学や研究機関でより現実的なCGを生み出すためのアルゴリズムが研究されてきた。それによって現在では，見た目では写真やカメラで実際に撮影した映像と見分けがつかないようなものをつくり出すことができるようになった。さらには，コンピュータやグラフィックスハードウェア，およびディスプレイ装置の進歩とともにCG技術が一般にも広く普及したことにより，だれでもより高い品質のCGを素早くつくれるようにしたいという欲求が出てくるのも当然のことである。

CGアニメーションにおいて，ダイナミックなシーンではキャラクタは自由に動きまわり，それによってさまざまな動きやエフェクトが生じる。従来これらの動きやエフェクトのクオリティは，制作者の技量による部分が大きかった。しかしながら，CGが使われるシーンが増えるにつれて，もっと簡単につくれないかという要求が生まれてきた。そして注目されたのが，物理シミュレーションである。物理シミュレーションを利用すれば，CGアニメーションの表現として使えるさまざまな現象をコンピュータ内で再現することが可能となる。その一方で，物理シミュレーションの理解のためには物理に関する知識はもちろん，数学，力学，数値演算などさまざまなことを学ぶ必要があるため，これからCGを学ぼうという学生や技術者にとってはハードルが高くなる。

また，CGは作品制作だけでなく，工業，医療，自然科学の分野でも利用されている。これらの分野では製品の構造を決めるためのシミュレーションや，病巣の発見，自然現象の解明など実験や計測で得られたデータを視覚的に解析

するために CG を利用している。

本書では，読者として，CG シミュレーション技術を学ぼうとする大学生，および大学院生を想定している。

1 章では，CG における物理シミュレーションの位置づけや役割に関して概説する。物理シミュレーションとキーフレーム法の対比，および本書で取り上げる物理シミュレーションの種類に関しても述べる。

2 章では，物理シミュレーションを理解するうえで欠かすことができない数学と力学に関して解説する。

3 章では，「アルゴリズム」を利用して図形形状をデザインする例を紹介する。アルゴリズムとして手順をコード化することで，少ないデータで複雑な形状を再現することが可能となる。本章では，フラクタルとボロノイ図を応用する。

4 章では，流体シミュレーションに関して解説する。流体力学で流体がどのように扱われているかを説明した後，流体の支配方程式であるナビエ・ストークス方程式を中心に，CG への応用方法について説明する。

5 章では，物体同士の衝突などに代表される剛体シミュレーションに関して説明する。また，布や糸，クッションなどの柔らかいものを扱う方法も解説する。

6 章では，シミュレーションや実験計測などで得られたデータを視覚的に解析するコンピュータビジュアリゼーション（可視化）について説明する。作品としての CG ではなく，解析のためにどのように CG が利用されデータの解析が行われているかについて述べる。

7 章では，流れ場や磁場などのデータに含まれるベクトルデータの可視化方法を紹介する。

8 章では，温度や圧力といった各点がただ一つの数値をもつスカラーデータの可視化方法をまとめる。

なお本書では，さまざまなアルゴリズムの実装に関して，SideFX 社の Houdini というツールを利用している。アルゴリズムをベースとして，造形/

シミュレーションを実践したい人に向けて，CG とプログラミングの結びつきが強力な Houdini を用いることで，その手法を理解してもらうことを目指している。

本書で学んだ読者が将来，新しい表現や技術の研究開発，または CG 作品の制作に貢献するとしたら，それは筆者らの無上の喜びとするところである。

最後に，多くの有益なコメントをいただいたシリーズ監修の相川清明先生と近藤邦雄先生，柿本正憲先生に感謝するとともに，長期にわたり辛抱強く筆者を激励し続けてくださったコロナ社の皆様に厚く御礼を申し上げます。

2023 年 2 月

菊池　司
竹島由里子

注 1）　本書の書籍詳細ページ（https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339027976/）からプログラムコードなどの補足情報がダウンロードできます。

注 2）　本書で使用している会社名，製品名は，一般に各社の登録商標です。本書では ® と ™ は明記していません。

目　　次

1章 CG シミュレーションとは

1.1 CG におけるシミュレーションの役割 — 2
1.2 キーフレームアニメーションとシミュレーション — 3
1.3 物理シミュレーションの基本的な流れ — 5
1.4 物理シミュレーションの種類 — 8
演 習 問 題 — 9

2章 ベクトルと力

2.1 ベクトルと行列 — 11
2.1.1 ベクトルの基礎 — 11
2.1.2 内 積 と 外 積 — 12
2.1.3 行　　列 — 14
2.1.4 固有値，固有ベクトル — 16
2.2 応力とテンソル — 17
演 習 問 題 — 20

3章 手続き型形状表現法

3.1 フ ラ ク タ ル — 22
3.1.1 フラクタルの概要 — 22
3.1.2 フラクタルの応用 — 24
3.1.3 マンデルブロ集合のアルゴリズム — 25
3.1.4 マンデルバルブのアルゴリズム — 26
3.1.5 マンデルバルブの実装手法 — 28
3.2 ボ ロ ノ イ 図 — 35
3.2.1 点ベースのボロノイ図 — 35
3.2.2 曲線ベースのボロノイ図 — 37
3.2.3 曲線ベースのボロノイ図の実装手法 — 38

演習問題 51

4章 流体シミュレーション

4.1 流体の基礎 53
4.1.1 密度と圧力 53
4.1.2 粘性 54
4.1.3 圧縮性と非圧縮性 55
4.2 流体の支配方程式 57
4.2.1 移流項 57
4.2.2 圧力項 57
4.2.3 粘性項 58
4.2.4 外力項 60
4.2.5 流体支配方程式の解法 60
4.3 格子法 61
4.3.1 グリッド分割 61
4.3.2 スタガード格子 62
4.3.3 支配方程式の差分化 63
4.3.4 液体表面追跡 65
4.4 粒子法 70
4.4.1 SPH法 71
4.4.2 SPH法による支配方程式の解法 71
4.4.3 近傍粒子探索 73
4.4.4 粒子からの界面サーフェス抽出 74
4.5 FLIP法 75
4.5.1 初期構成 78
4.5.2 格子を用いた圧力項の計算 78
4.5.3 流速のマッピング 79
4.5.4 移流項の計算 79
4.5.5 数値拡散を伴わない流速のマッピング 80
4.5.6 界面サーフェスの抽出 81
4.6 雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーション 82
演習問題 84

5章 剛体・弾性体シミュレーション

5.1 ボールの運動 86
5.1.1 運動方程式 87
5.1.2 時間積分の離散化 87
5.1.3 回転の運動方程式 88
5.2 衝突処理 89
5.2.1 衝突検出 89
5.2.2 GJK アルゴリズムの原理 91
5.3 弾性体シミュレーション 95
5.3.1 1次元シミュレーション 96
5.3.2 2次元シミュレーション 97
5.3.3 3次元シミュレーション 98
5.4 位置ベースの変形シミュレーション 99
5.4.1 シェイプマッチング法 99
5.4.2 PBD 100
5.4.3 XPBD 105
5.5 非周期的空間充填と XPBD を用いた弾性凝集体のプロシージャルモデリング 109
演習問題 110

6章 コンピュータビジュアリゼーション

6.1 コンピュータによる可視化 112
6.1.1 CG と可視化 112
6.1.2 可視化による理解の流れ 112
6.1.3 可視化の分類 113
6.2 科学技術データのディジタル表現 114
6.2.1 標本点の取得 114
6.2.2 標本点以外の物理値の補間 116
6.2.3 データの特性による分類 118
6.3 サイエンティフィックビジュアリゼーション 120
6.3.1 可視化の四つの特徴 120
6.3.2 可視化処理の流れ 121
6.3.3 物理値の可視化表現 123
演習問題 125

7章 ベクトル場の可視化

7.1 2次元ベクトル場 — 127
7.1.1 矢印表示 — 127
7.1.2 流線表示 — 129
7.1.3 LIC法 — 130
7.2 3次元ベクトル場 — 131
7.2.1 ヘッジホッグ法 — 131
7.2.2 流線表示 — 133
7.3 時系列データ — 134
演習問題 — 135

8章 スカラー場の可視化

8.1 2次元スカラー場 — 138
8.1.1 グリフ表示 — 138
8.1.2 疑似カラーコーディング — 139
8.1.3 等値線（等高線）表示 — 140
8.2 3次元スカラー場 — 143
8.2.1 断面表示 — 144
8.2.2 ボリュームレンダリング — 144
8.2.3 等値面 — 146
演習問題 — 149

引用・参考文献 — 150
演習問題解答 — 153
索引 — 157

1章 CG シミュレーションとは

◆ 本章のテーマ

本章では，コンピュータグラフィックス（CG）における物理シミュレーションの位置づけ，考え方，および役割に関して説明する。CG アニメーションの制作手法としてキーフレーム法があるが，キーフレーム法では表現が困難である“運動が物理シミュレーションによって再現できる”ことを解説する。また，本書で取り上げる物理シミュレーションの種類に関して概観する。

◆ 本章の構成（キーワード）

1.1 CG におけるシミュレーションの役割
　モデリング，マテリアル，カメラワーク，ライティング，レンダリング
1.2 キーフレームアニメーションとシミュレーション
　キーフレーム法，中割，アニメーションカーブ，物理シミュレーション
1.3 物理シミュレーションの基本的な流れ
　モデル化，支配方程式
1.4 物理シミュレーションの種類
　剛体シミュレーション，流体シミュレーション

◆ 本章を学ぶと以下の内容をマスターできます

☞ 3 次元 CG の制作工程
☞ CG アニメーションの代表的な手法であるキーフレーム法
☞ キーフレーム法と物理シミュレーションの違い
☞ 物理シミュレーションの基本的な流れと種類

1.1　CG におけるシミュレーションの役割

コンピュータグラフィックス（computer graphics：**CG**）が一般的に広く認識されるようになり，3 次元の CG を使った表現が当たり前となっている。現在は以前と比べ，表現のクオリティはますます向上し，表現対象もより複雑化している一方，一つの CG アニメーションを制作するための時間と人的リソースに関しては十分であるとは言い難い場合もある。ユーザの要求が高度化し，高画質で動きにもリアリティがある CG が求められ，さらには動的に変化するリアルタイム性，そしてインタラクティブ性を兼ね備えたコンテンツが市場から要求されている。そのような中で，少ない人的リソースと時間の中で高いクオリティの CG を制作するための技術が日々研究・開発されている。本書では，その中でも現実世界の現象をコンピュータ上で模擬的に再現する CG シミュレーションと，それを可視化するための CG 技術について解説する。

3 次元 CG 制作の工程は，**モデリング**，**マテリアル表現**，**カメラワーク**，**ライティング**，**レンダリング**といったいくつかの段階に分かれる。それぞれの行程の概要はつぎのとおりである。

〔1〕 **モデリング**　仮想の 3 次元空間の中で，CG による**立体形状**（**モデル**）をつくることを**モデリング**（modeling）と呼ぶ。つくりたい形状に合わせて，適切なモデリングの要素や手法を選択することが重要である。

〔2〕 **マテリアル表現**　質感のことを**マテリアル**（material）と言い，モデリングされたモデルに質感を与えることを**マテリアル表現**と呼ぶ。マテリアルはそのモデルの質感を決定付ける大きな要素であるため，適切なパラメータの設定や表現方法の選択が重要となる。

〔3〕 **カメラワークとライティング**　3 次元空間内に配置された CG モデルに対し，カメラの位置や向き，レンズの設定などを決め，構図をとることを**カメラワーク**（camerawork）と呼ぶ。また，演出方針を踏まえ，3 次元空間にライトを設定し，モデルの見え方を決めることをライティングと呼ぶ。これらの設定の際には，なにをどのように表現したいのかを明確にしておくことが

重要である。

〔4〕 **レンダリング**　3次元空間内に配置されたモデルやライト，カメラなどの情報をもとに計算を行い，最終成果物である2次元画像を得ることを**レンダリング**（rendering）と呼ぶ。レンダリング時に得られる表現にもさまざまなものがあり，目的に応じて適切な表現方法を選択することが重要である。

さてここで，CGアニメーションを制作する場合，工程〔1〕で制作した3次元形状モデル（以後，単にモデル）を動かさなければならない。モデルが変化しないならば，アニメーションにする意味がない。また，周囲の環境，例えば海や川のシーンの場合，それぞれの水の動きであったり，炎が燃え上がるようなシーンならば，炎そのものの動き，および煙の動きなど複雑なエフェクトが必要になる。このようなアニメーションの場合や作品に複雑なエフェクトをかけたい場合は，「モデルの動きを設定」する工程と「エフェクトの適用」という工程が必要となる。CGにおいては，各工程においてさまざまな技術が開発されており，自動化を追及することでCG制作に掛かる時間と手間を大きく削減している。「モデルの動きを設定」する工程と「エフェクトの適用」というどちらの工程においても，アニメータの制作を支援するツールが多く開発され，経験が浅いアニメータでもリアリティの高いアニメーションが制作できるようなシミュレーション技術が発展してきている。

1.2　キーフレームアニメーションとシミュレーション

CGアニメーションを制作する手法の最も基本的なものに**キーフレーム法**（key-frame method）がある。キーフレーム法とは，一連の動作・ポーズの中で重要なポーズ（キーフレーム）を先に設定し，その間のフレームをあとから埋めていく手法である。なお，キーフレーム間を補間することを**中割**（in-between animation）と呼ぶ[1),†]。

† 肩付きの番号は巻末の引用・参考文献を示す。

図 1.1 は，キーフレーム法を使ってキャラクタの形状の変化（twist）を設定した例である。CG アニメーションでは，アニメータはポーズだけでなく，オブジェクトの色やライトの強さなどの属性パラメータの変化も設定できる。また，キーフレームを中割したフレームはソフトウェアの補間機能を使用して自動的に生成できる。しかし，そのままでは機械的な動きになってしまうことがあるため，中割フレームの補間方法に関しても適切な調整を行う必要がある。

キーフレーム　…　中割　…　キーフレーム　…　中割　…　キーフレーム

図 1.1　キーフレーム法

キーフレームを補間した値の変化をグラフの曲線で表示したものを**アニメーションカーブ**（animation curve）と呼ぶ（**図 1.2**）。このグラフを編集することで中割フレームでのオブジェクトの動きなどを制御することが可能である。

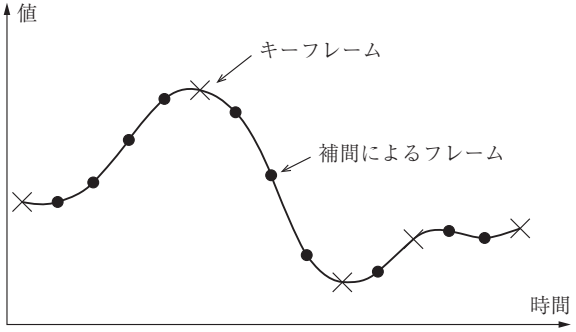

図 1.2　アニメーションカーブとキーフレーム

シミュレーションという手法がいつ頃発明されたかは定かではないが，少なくともコンピュータの発明がその手法を格段に進歩させたことは間違いない。いまやシミュレーションは科学技術の分野において，その基本的方法論である「実験」的手法の一つとして，着実に市民権を得ている。「シミュレーション

（simulation）」の語源は “simulate” であり，「模擬する」「まねる」という意味である[2)]。シミュレーションを直訳すると，模擬実験とでもいうことになるのであるが，簡単に言ってしまえば「試しにやってみること」ということである。例えば，災害時に備えた避難訓練や自動車の安全性を確かめるための衝突実験，スポーツで本番に備えた練習試合もシミュレーションと言える。これらの中でも，CG において使用されるシミュレーションは**コンピュータシミュレーション**（computer simulation）と呼ばれるものである。

例えば，自動車の衝突実験を実際にやろうとすると，実験で車は潰れてしまい，計測機器なども含めるとかなりのコストを必要とする。しかしながら，この実験をもしコンピュータの中で模擬実験できれば，大きなコスト削減になるだけでなく，さまざまなパターンを何度でも試せるという利点がある。そして，CG においてコンピュータシミュレーションを利用すれば，キャラクタの動きに応じて細かく動く髪の毛や服の動き，水や煙，爆発などといった熟練のアニメータでも再現が難しいものまでコンピュータに計算させることができる。これまでの手作業で動きをつけるキーフレーム法では不可能だった動きが，コンピュータシミュレーションを利用すれば再現可能になり，だれもが高品質な CG アニメーションを制作できるようになる。また，シミュレーションをリアルタイムに計算することができれば，ユーザの入力に対してインタラクティブに反応を返すこともできる。最近のゲームにはすでにコンピュータシミュレーション技術が導入されており，複雑な運動をリアルタイムに表現することが可能となっている。

本書では，コンピュータシミュレーションの中でも物理法則に基づく**物理シミュレーション**（physics simulation）に焦点をあてて解説する。

1.3 物理シミュレーションの基本的な流れ

CG でシミュレーションしたいものと言えば，水や炎，煙，髪の毛や服などの形を変えるものから，ボールなどの運動が物理法則に従うもの，あるいは物

索　　引

【あ】

アダプティブ・レイマーチング法 *82*
圧縮応力 *18*
圧縮性 *55*
圧　力 *53*
圧力項 *57*
アーティファクト *62*
アニメーションカーブ *4*

【い】

移流項 *57*

【え】

液　体 *53*

【お】

オイラー的アプローチ *60*
オイラー法 *60*
応　力 *17*

【か】

外　積 *14*
回　転 *14*
回転行列 *15*
ガウスザイデル法 *104*
角加速度 *88*
角速度 *88*
可視化 *112*
カメラワーク *2*
慣性テンソル *88*
慣性モーメント *88*
貫通深度 *93*

【き】

疑似カラーコーディング *138, 139*
規則格子 *116*
気　体 *53*
キーフレーム法 *3*
境界球 *90*
境界適合格子 *116*
境界ボリューム *89*
曲率依存反射関数 *109*

【く】

クラッタリング *127*
グリフ表示 *138*

【こ】

格子構造 *115*
格子法 *61*
構造格子（データ） *62, 115*
剛体シミュレーション *8*
固　体 *53*
コッホ曲線 *22*
固有値 *16*
固有ベクトル *16*
コンピュータグラフィックス *2*
コンピュータシミュレーション *5*
コンピュータビジュアリゼーション *112*
コンプライアンス値 *105*

【さ】

サイエンティフィックビジュアリゼーション *113*
再初期化処理 *68*
三角形ポリゴン *14*

【し】

シェイプマッチング法 *99*
時空間独立性 *120*
軸平行境界ボックス *90*
自己相似性 *22*
姿　勢 *88*
質　点 *96*
支配方程式 *6, 61*
シューア補行列 *108*
ジュリア集合 *23*
状態方程式 *98*
衝突応答 *89*
衝突検出 *89*
情報可視化 *113*

【す】

数値解析 *8*
数値計算 *7*
数値流体力学 *9*
スカラー積 *12*
スカラー値 *12*
スケーリング則 *22*
スタガード格子 *63*
スプラッティング法 *146*
スムースカーネル *81*

【せ】

接触多面体 *94*
接触法線ベクトル *93*
セミラグランジュ法 *65*
セ　ル *115*
漸近線判定法 *148*
前進オイラー法 *58, 87*

せん断応力 18
せん断ひずみ 19

【そ】

速度ベクトル 11

【た】

第一人称性 121
ダウンサイジング 122
縦ひずみ 19
単位ベクトル 11
弾性体 8, 95
弾性体力学 17

【ち】

直交格子 116

【て】

定常流 134
ディリクレ境界条件 76, 78
テクスチャマッピング 24
データ入力 122
データフローパラダイム 122
転 写 78
伝達関数 124

【と】

等高線表示 140
同次座標系 12
等値線表示 138, 140
等値面表示 144
凸 包 91
トリリニア補間 118

【な】

内 積 12
中 割 3
ナビエ・ストークス方程式 7, 57
ナローフェーズ 89

【ね】

粘 性 54
粘性流体 54

【の】

ノイマン境界条件 76

【は】

バイリニア補間 117
ばね-質点系 96

【ひ】

非圧縮性 55
非構造格子（データ）62, 115
非侵襲性 121
ひずみ 19
引張応力 18
非定常流 134
非粘性流体 54

【ふ】

フィルタリング 122
複素数列 25
物理シミュレーション 5, 17
フラクタル 22
ブロードフェーズ 89

【へ】

ベクトル積 14
ヘッジホッグ法 131

【ほ】

ポアソン比 19
ポアソン方程式 58
ボイルの法則 98
法線ベクトル 14
補間操作 71
ボリュームフォトン マッピング法 82
ボリュームレンダリング 144
ボロノイセル 35

【ま】

マーチングキューブ法 146
マッピング 78, 122, 123
マテリアル 2
マテリアル表現 2
マンデルバルブ 26
マンデルブロ集合 23, 25

【み】

密 度 53
ミンコフスキー差 92
ミンコフスキー和 91

【む】

無構造データ 114
無次元量 19

【め】

メタボール 74
メッシュベース移流法 69
メッシュレス法 99

【も】

モデリング 2
モデル化 6

【や】

矢印表示 127

【ゆ】

有限差分法 61
有限体積法 61, 99
有限要素法 99

【よ】

横ひずみ 19

【ら】

ライティング 2
ラグランジュ乗数
　――の計算 105
　――の更新 105
ラグランジュ的
　アプローチ 60
ラグランジュ法 60

【り】

粒子追跡法 135
粒子法 70
流跡線 134
流線表示 127
流体シミュレーション 9
流体摩擦力 58
流体力学 17
流脈線 134

【れ】

レイキャスティング法 145
レイトレーシング法 74
レベルセットサーフェス 80
レベルセット法 66, 109
連結リストアルゴリズム 73
連続の式 55
レンダリング 2, 3, 74, 122, 123

【アルファベット】

AABB 90
bucket 法 73
BV 90
CG 2
fast marching method 68
FDM 61
FEM 99
FLIP 法 75
FVM 61, 99
GJK アルゴリズム 91
kernel 71
kernel 関数 71
LIC 法 127, 130
MAC 法 78
marching cubes 法 68
MPS 法 70
OOBB 90
PIC 法 80
Sparse Volume 32
SPH 法 70, 71
SSS 109
VDB 32
Worley Noise 35
PBD 99, 105
XPBD 99, 100

―― 著 者 略 歴 ――

菊池　司（きくち　つかさ）
1994 年　岩手大学工学部情報工学科卒業
1999 年　岩手大学大学院電子情報工学研究科博士課程修了（情報工学専攻）
博士（工学）
1999 年　株式会社 JFP 勤務
2000 年　拓殖大学助手
2004 年　拓殖大学専任講師
2007 年
～08 年　高麗大学（韓国）客員教授
2009 年　拓殖大学准教授
2014 年　東京工科大学准教授
2018 年　東京工科大学教授
現在に至る

竹島　由里子（たけしま　ゆりこ）
1994 年　お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業
1996 年　お茶の水女子大学大学院理学研究科修士課程修了（情報科学専攻）
1999 年　お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士課程修了（人間環境学専攻）
博士（理学）
1999 年　お茶の水女子大学大学院助手
2001 年　東北大学流体科学研究所助手
2004 年　日本原子力研究所博士研究員
2005 年　東北大学流体科学研究所助手
2007 年　東北大学流体科学研究所助教
2010 年　東北大学流体科学研究所講師
2015 年　東京工科大学准教授
2018 年　東京工科大学教授
現在に至る

CG によるシミュレーションと可視化

Simulation and Visualization with Computer Graphics

Ⓒ Tsukasa Kikuchi, Yuriko Takeshima 2023

2023 年 4 月 28 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　者　菊池　司
竹島　由里子
発行者　株式会社　コロナ社
代表者　牛来真也
印刷所　萩原印刷株式会社
製本所　有限会社　愛千製本所

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発行所　株式会社　**コロナ社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-02797-6　C3355　Printed in Japan　（松岡）

JCOPY　＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。