

3次元分布データの可視化技法に関する研究

金田 和文

緒言

近年の計算機の計算速度の著しい向上とメモリの低廉化、そしてコンピュータグラフィックス技術のハードウェア、ソフトウェアの長足の進歩により、サイエンティフィックビジュアライゼーションが大きく脚光を浴びるようになった。すなわち、スーパーコンピュータの性能向上により、解析内容が高度化し、解の多次元化をもたらし、その結果、計算機から出力された大量の解析結果を理解することが、非常に困難となってきた。そのため、解析者の感性を触発する可視化手法の開発が、重要課題となってきたからである。また、コンピュータグラフィックス技術の面からも、1970年代初期からのラスタスキャン型CRTや、1983年からの画像生成専用プロセッサを搭載したグラフィックスワークステーションの登場により、ビジュアライゼーションへの基盤が整ってきた。一方、ソフトウェアの面からは、各種光源と環境光を考慮に入れた陰影表示法、光の反射、屈折、透過の表示法、材質感の表示のための各種マッピング法などの基礎的な3次元コンピュータグラフィックス技術が確立され、3次元ボリュームデータ表示手法の開発も進展してきた。これらの背景のもと、可視化技術の開発が着実に進められ、その結果、様々な分野において、可視化が重要な研究課題となってきた。すなわち、計算機からの解析データのみならず、各種実験・測定データを取り扱う工学、医学、気象、宇宙開発などの分野における、不可視あるいは観察が非常に困難な3次元物体や現象の可視化をはじめ、建築分野の開発前の景観予測に至るまで、可視化手法の開発が重要課題となってきた。

本論文は、不可視あるいは観察が非常に困難な3次元空間に分布するベクトルデータおよびスカラーデータの可視化に関する手法を提案するものである。

3次元空間に分布するベクトルデータは、人間が理解し難いデータの一つである。これは、3次元分布情報は、人間の脳裏に浮かべ難いデータの一つであるからである。また、そのデータが計測を必要とする場合には、一般に複雑な装置を必要とし、データ数が有限な個数に限定されるからである。この代表的なものとして、気体や液体などの流体の流れが挙げられる。

本論文では、3次元空間に分布するベクトル値データとして、内燃機関のシリンダ内の空気流動を取りあげ、これを可視化する一手法を提案する。すなわち、測定された空気流速ベクトルデータをもとに、流線を数値計算によって求め、流速の大

きさに応じて流線の色分けしてステレオ表示する。3次元ベクトルデータそのものを表示するのではなく、数値計算により流線を求めて表示することにより、気体の流れの様子が一目瞭然となり、色分け表示により、流速の大きさも同時に観察できる。また立体視手法を用いることにより、流線の3次元的な変化も容易に理解することができる。

解剖学におけるマウス胚子の断面画像データから、もとの形状を再構成し、その内部構造を含めて表示するという問題は、微小で観察困難な多重構造物の可視化という点で、重要な問題の一つである。また、これは、3次元空間を細分する連続的な断面上でサンプルされたスカラデータの可視化問題でもある。特に、このことが、解剖学の生物発生過程の研究において、強く望まれている。すなわち、解剖学においては、マウス胚子のように、いくつかの異なる要素から構成されている多重構造体を、その外形だけでなく内部構造や要素相互の位置関係を同時に、かつ正確に観察する必要がある。

本研究では、観察対象物の切片の断面画像から取り込んだ輪郭線間に三角形パッチを発生して3次元形状の再構成を行い、半透明ステレオ表示を行う方法を提案する。この方法を用いれば、あらゆる角度から物体の外形のみならず、その内部構造も容易に観察することができる。さらに、この方法は、これまでの観察方法に比べ次の点において優れている。(1) 観察に不要な要素の除去や、必要な要素の選択的な表示が容易に行える。また、要素の透明度を変えることにより、観察に適した画像を得ることができる。(2) 切断面での形状を把握し、3次元形状をさらに詳しく理解するために、再構成された物体を、任意の断面により切断表示することができる。(3) ステレオ表示とともに、3次元格子状のスケールを併せて表示することにより、位置の数値的把握も可能となる。

設計・計画段階での建造物の完成予想画像を作成することは、建築分野における、可視化の重要な問題である。建造物のデザイン、事前予測、周囲環境との調和性の評価においては、完成後の形状だけでなく、できるだけ多くの気象条件下の、周囲環境を含んだ建造物の表示が強く望まれる。そのためには、空間中に分布する水蒸気や、微粒子の密度分布を考慮して完成予想画像を作成する必要がある。すなわち、大気中の微粒子の分布状態により、太陽光のスペクトル成分が変化し、その結果、建築物の色相に大きく影響を与える。また、遠くの物体ほど、その色がくすんで見

える。このように、3次元空間中に分布した微粒子を可視化すると同時に、それらの及ぼす影響を考慮した表示を行なうことにより、上述の目的に合致したリアルな画像を作成できる。

本研究では、大気中の微粒子による霧の効果、および、大気中を太陽光が通過することにより生じる光跡の表示法について提案し、さらに、大気拡散モデルを基に、大気中の空気分子、水蒸気、塵などの微粒子の密度分布を考慮して求めた太陽光と空の色を、それぞれ、直射光、および天空光として用いることにより、屋外環境における3次元物体の陰影表示法を提案する。この手法により、幅広い気象条件下での、建造物の明度、色相、彩度の変化を表現し、加えて、霧や霞などの大気中の微粒子の影響も含めたリアルな画像を作成することができる。

まず、第1章では、不可視あるいは観察が極めて困難な物体や現象を扱う分野、および事前予測を必要とする現象の可視化の必要性について述べ、本研究の目的と意義を明らかにしている。また、これまでに研究された3次元空間に分布したベクトル、ならびにスカラデータの可視化手法について概説し、本研究の位置付けを明らかにした上で、本論文で提案する可視化手法の概要について述べている。

第2章では、3次元離散分布ベクトルデータの可視化のための一手法を提案している。提案手法を用いて、3次元空間の流線と流速を同時にステレオ表示することにより、流体の流動状態を容易に把握することができる。内燃機関のシリンダ内の空気流動状態の可視化問題を取りあげ、その有用性を立証している。

第3章では、多重構造物に対する内部構造の可視化法を提案している。提案手法は、3次元分布スカラデータの連続断面から形状の再構成を行い、内部構造の観察のために半透明ステレオ表示を行う。マウス胚子の観察を例にあげ、あらゆる角度から、その外形のみならず内部構造も容易に観察できることを示している。

第4章においては、建造物のデザイン、景観評価のための完成予想画像作成問題を取りあげ、3次元空間に分布するスカラデータと、それによる周囲環境への影響を考慮した可視化法を提案している。すなわち、大気中の空気分子、水蒸気、塵などの微粒子の密度分布を考慮した屋外環境における3次元物体のリアルな陰影表示法を開発した。この手法による周囲環境を含んだ建造物の表示は、視環境評価画像として有用であることを示している。

最後に、第5章において、本研究で得られた成果をまとめて記述し、今後の研究

課題について述べている。

目次

緒言	i
1 序論	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究の概況	2
1.2.1 3次元分布データの分類とその可視化法	2
1.2.2 3次元空間分割と形状再構成に関する概況	3
1.2.3 3次元形状観察のための表示法に関する概況	5
1.3 本論文の概要	7
2 3次元離散分布ベクトルの可視化	9
2.1 概説	9
2.1.1 離散分布ベクトルの可視化に関する研究概況	9
2.1.2 提案手法の概略	10
2.2 3次元空間の四面体要素分割	11
2.3 離散分布ベクトルの内挿および外挿法	13
2.3.1 内挿による流線の計算	13
2.3.2 外挿による境界面上での処理	15
2.4 流線の表示	17
2.5 適用例	17
2.6 結言	22
3 3次元多重構造物の再構成と表示	23
3.1 概説	23
3.1.1 3次元多重構造物の表示に関する研究概況	24
3.1.2 提案手法の概略	25
3.2 多重構造物を扱うためのデータ構造	26
3.3 高精度再構成のための空間分割法	28

3.3.1	高精度再構成手法の処理手順	28
3.3.2	全輪郭線を用いた再構成	30
3.3.3	部分輪郭線を用いた再構成	31
3.4	三角形化による3次元形状再構成	33
3.4.1	自動分岐処理による三角形化	33
3.4.2	開いた輪郭線を含む場合の三角形化	35
3.4.3	形状変化の激しい輪郭線の三角形化	36
3.4.4	部分輪郭線の三角形化	38
3.5	切断面表示	39
3.5.1	三角形パッチの切断	39
3.5.2	切断面の作成	41
3.6	半透明ステレオ表示	41
3.6.1	優先順位テーブルの作成	43
3.6.2	半透明ステレオ表示法	46
3.7	適用例	48
3.8	結言	59
4	空間密度分布データの可視化	61
4.1	概説	61
4.1.1	空間密度分布データの可視化に関する研究概況	62
4.1.2	提案手法の概略	63
4.2	微粒子の密度分布を考慮した空間のモデル化	63
4.2.1	大気拡散モデル	63
4.2.2	霧のモデル	64
4.3	空間密度分布データの表示	65
4.3.1	霧と光跡の表示	65
4.3.2	空間内の物体の表示	69
4.3.3	鏡面反射光の計算法	71
4.4	適用例	72
4.5	景観評価の観点からのコンピュータグラフィックス画像の信頼性に関する考察	73

4.5.1	評定尺度法による評価	77
4.5.2	一対比較法による評価	82
4.5.3	まとめ	82
4.6	結言	83
5	結論	85
	謝辞	88
	参考文献	89
	付 録	
A	球面過剰	95
B	シリンダ内の空気流動測定	96
C	Christiansen らの物体再構成手法	98
D	Klassen の大気拡散モデル	101
E	光学的距離 $t(s)$ の計算	104
F	平行光線の光跡の積分法	105

第 1 章 序論

本章では、本論文の研究目的と、これまでに研究されている 3 次元分布データの可視化法について、3 次元分布データの分類に基づき、それらの形状再構成と表示手法を概説し、本研究の位置付けを明確にした後、本研究の概要について述べる。

1.1 研究の目的

計算機の高速化と、メモリの低廉化、そしてソフトウェアの進歩により、科学、工学、医学等極めて広範な分野において、可視化が重要な研究課題となってきた。すなわち、(1) 計算機の高速化の結果としてもたらされた大量の数値情報の理解の困難さと、それを解決する手段としての可視化の重要性の再認識、(2) ラスタスキャン型カラー CRT をはじめ、画像生成専用プロセッサを搭載した高速グラフィックスワークステーションの普及、(3) ソフトウェア技術の面からは、3 次元コンピュータグラフィックス基礎技術の確立と、3 次元空間分布データの表示手法の進展、これらの背景のもと、可視化技術の開発が様々な分野において、着実に進められている。その結果、解析データの可視化のみならず、各種実験観測データを扱う工学、医学、気象、宇宙開発などの分野での、不可視あるいは観察が極めて困難な物体や現象の可視化をはじめ、建造物の開発前の完成予測など、コンピュータグラフィックスの応用範囲を広げつつある。

本論文は、不可視あるいは観察が極めて困難な物体や現象の可視化問題を取り扱う。上述の分野における可視化の対象は、主として、3 次元空間に分布するベクトルデータ、およびスカラデータに大別することができる。そこで、本研究では、これら両者のデータに関する可視化手法を開発することを目的とする。

3 次元空間に分布するベクトルデータは、最も理解し難いデータの一つである。その理由は、主として、(1) 3 次元分布情報は、人間の脳裏に浮かべ難いデータであり、そのうえ、(2) そのデータを計測により得る場合には、データ数が有限な個数に制限されるからである。本研究では、気体の流動状態の可視化を取り上げ、この二つの問題を解決するための手法を開発する。

3次元空間に分布する異種類のスカラデータの可視化問題も重要課題となっている。本論文では、多重構造物の内部構造の可視化手法と、建築分野における建造物の完成予想画像作成手法を開発する。

前者は、観察の非常に困難なものの一つである。特に、解剖学の生物発生過程の研究において、このことが望まれている。この分野の研究では、マウス胚子のように、多くの要素から構成される多重構造物を、その外形だけでなく、内部構造や要素相互間の位置関係を同時に、かつ正確に観察する必要がある。この問題を解決するために、(1) 観察対象物の断面データからもとの形状を再構成し、(2) 内部構造を含めて、観察し易い表示法を開発する。

後者は、現実にはまだ存在しないもの(すなわち、不可視のもの)を、現実に基づいた条件下で可視化する問題である。建築分野においては、設計、事前予測、視環境評価のために、様々な気象条件下での、周囲環境を含んだ建造物の完成予想画像を作成することが重要課題となっている。これを実現するために、大気中の空気分子、水蒸気、塵などの微粒子の密度分布を考慮して表示を行う手法を開発する。

1.2 研究の概況

1.2.1 3次元分布データの分類とその可視化法

3次元分布データは、大別すると、ベクトルデータとスカラデータの2種類に分類できる。3次元空間に分布したベクトルデータの代表的なものとして、気体や液体などの流体の流れが挙げられる。これらは、3次元空間内のそれぞれの点において、流れの速さと方向を持つ。また、スカラデータとしては、マクロなものとしては、大気中に漂う水蒸気や微粒子による霧が挙げられる。これらは、3次元空間内に分布した水蒸気や微粒子の密度分布のスカラデータである。ミクロなものとしては、微小な生物の構造も、3次元空間に分布したスカラデータとして扱うことができる。すなわち、その構造は、3次元空間内に配置された種々の異なる器官から構成されるからである。このように、物体、および物理現象を観測することによって得られたベクトルデータおよびスカラデータを、人間が理解し易いように可視化することは、その物体や現象を理解する上で非常に重要な問題である。

3次元空間に分布したベクトルデータを可視化する方法としては、2次元平面へ投影された矢線ベクトルを表示する方法が、一般に用いられてきた。しかし、この方

法では、投影された方向成分のベクトルの大きさのみしか把握できず、観察者の誤解を招く恐れがある。ベクトルの3次元的な方向を把握するため、矢線ベクトルの先端をピラミッド状の立体で置き換える方法[1, 2]が提案された。しかし、この方法を用いても、直観的な把握は困難であり、さらに、観察領域全体の3次元ベクトルデータを表示するためには、多数の2次元平面図を用いなければならないという問題もある。

本論文 第2章において、3次元ベクトルデータそのものを表示するのではなく、観察者が直観的に理解し易い表現に変換して表示する方法を提案する。

3次元空間に分布したスカラデータの可視化法は、大別すると、次の2種類の方法に分類できる。すなわち、(1) しきい値を用いて境界面を作成し、それを表示する方法(代表的なものとして、[3]–[9],[29],[34])と、(2) スカラデータを直接表示する方法(代表的なものとして、[10]–[17])である。

(1)の方法は、空間内の3次元形状や、それら相互間の位置関係を、主に観察する場合に適している。また、境界面を曲面パッチや平面パッチで作成した後は、既存のコンピュータグラフィックス技法を用いて、表示を行うことができる。しかし、境界面を作成する際のしきい値を、適切に決定する必要があり、また、しきい値以下の情報は表示されない。

(2)の方法は、大気中の霧のように、空間内での分布状態を観察する場合に適している。これは、スカラデータを微粒子の分布密度として扱い、光がその空間を通過するときの放射伝達を考慮して表示する方法である。

本論文 第3章では、多重構造物の要素形状や、要素相互の位置関係の把握に主眼をおいた可視化を行うため、(1)の方法に基づく可視化手法を提案する。一方、第4章では、大気中の微粒子の密度分布を考慮した霧や光跡の効果の表示を行うため、(2)の方法に基づく表示法を提案する。

1.2.2 3次元空間分割と形状再構成に関する概況

3次元分布データは、一般的に、(1) 離散点、(2) 断面、(3) 空間全体、のいずれかで与えられる。これにより、可視化法が異なる。実験・測定によって得られるベクトルデータの場合には、空間的、あるいは時間的制約により、(1)の形態でデータが与えられることが多い。一方、スカラデータの場合には、試料の切片データやCT

スキャナの断層データのように、一般に、(2) あるいは (3) の形態で与えられる。

ベクトルデータが (1) の離散点で与えられる場合には、空間内の任意の点でのベクトル値を補間により求めるために、データ点を頂点とする多面体を用いて空間を分割する必要がある。2 次元空間を、与えられた点を頂点とした三角形要素により分割する手法は、Frederick らによって開発されている [18]。これを 3 次元問題に拡張し、任意の空間を四面体要素に分割する手法 [19] が、Nguyen によって提案されている。

スカラデータが、(2) の断面上で与えられる場合には、(2-1) 断面上での等ポテンシャル線 (輪郭線) を求め、上下断面の等ポテンシャル線 (輪郭線) 間に面を張り、形状再構成を行う方法 [3]–[6],[8],[9], [20]–[25] と、(2-2) 断面データを補間により、(3) の空間全体を含むデータに変換し、表示する方法 [26] がある。

(2-1) については、三角形パッチなどの平面パッチを用いる方法 [3]–[6],[8],[9], [21]–[25] と、カージナル・スプラインなどの曲面パッチを用いる方法 [20] がある。

平面パッチの場合は、処理が比較的簡単であり、シンプルなアルゴリズムで、比較的複雑な形状の再構成を行うことができる。しかし、表示の際には、パッチがそのまま表示されるのを防ぐために、スムーズシェーディング法 [27, 28] を用いて表示を行う必要がある。平面パッチを張る代表的な方法には、再構成された物体の表面積が最小となるよう、グラフ理論を用いて三角形パッチを発生する方法 [4] がある。しかし、この方法は、分岐形状を扱うことができない。これを解決する方法を、Christiansen らが提案した [5]。なお、対象を円柱形状に限定し、円柱座標系を用いて形状を効率よく再構成する手法 [21] も提案されている。

曲面パッチによる場合は、再構成形状を曲面のまま取り扱うことができる。しかし、アルゴリズムが複雑となり、取り扱う形状が限定される。

(2-2) については、上下断面のスカラデータから、線形補間により、空間全体でのスカラデータを求める方法 [26] が提案されている。空間全体でのデータが得られれば、次の (3) で述べる手法を用いて形状再構成を行うことができる。

スカラデータが、(3) の空間全体で与えられる場合は、(3-1) スカラデータを、空間を構成する微小立方体で離散化したボクセルデータとし、それを用いて形状を再構成し、表示する手法 [29]–[35]、および (3-2) スカラデータを直接表示する方法

[10]–[17]、に分類できる。

(3-1)の方法は、しきい値を用いて、ボクセルのもつ値を2値化することにより、形状を再構成する方法である。この方法は、(2-1)の方法のように、輪郭線間をパッチを用いて接続する必要がなく、形状が複雑な場合でも、容易に処理することができる。しかし、形状の精度が、ボクセルの大きさに依存しているため、精度を増すには、膨大な記憶容量が必要となる。この問題点を、データ構造の面から解決する手法として、8分木構造を用いた形状表現法 [30, 32, 33] が開発されている。また、ボクセル形状が粗くても、スムーズな面として表示するために、ボクセルのもつ値から境界面を求め、その法線ベクトルを用いて表示を行う手法 [31, 34, 35] も開発されている。

(3-2)の方法は、いくつかの異なる性質の物質が、空間内部に互いに混じり合っており、境界面を特定するのが困難なもの、あるいは、霧などのように境界面をもたないものの可視化に適している。しかし、空間中を積分計算する必要があり、他の方法に比べて多くの計算量を必要とする。その詳細は、次節で述べる。

本論文 第2章では、測定データが(1)の離散点で与えられるため、Nguyen の分割手法 [19] を用いて、観測空間を四面体要素に分割する。

本論文 第3章で提案する形状再構成手法は、スカラデータが断面上で与えられるため、(2-1)の方法を採る。すなわち、分岐の処理方法を示し、優れた形状再構成が行える Christiansen らの手法 [5] を発展させた手法を提案する。

本論文 第4章では、空間全体にわたって密度分布が与えられた微粒子による霧の効果を可視化するため、(3-2)の方法に基づく可視化法を提案する。

1.2.3 3次元形状観察のための表示法に関する概況

3次元形状観察のための表示法について、(1)形状再構成手法には依存しない3次元物体観察のための表示手法と、(2)前節での再構成手法に依存した表示手法に分けて述べる。

(1)については、3次元物体を、(1-1)2次元平面に投影する方法、(1-2)左右それぞれの目の位置から見た透視図により、ステレオ表示する方法 [36]、に大別できる。

(1-1)の代表的な方法には、よく知られているように、複面投影、等測投影などの平行投影と透視投影がある [37]。複面投影は、直交座標軸に平行に投影する方法

で、建築物の設計図面などでよく用いられる。等測投影は、主軸方向の寸法が等しく、配管図などによく使用される。しかし、両者とも、複雑な物体形状を直観的に把握するのには適していない。透視投影は、視点に近いほど、物体が大きく表示されるため、人間の感覚に近い性質をもっており、前述の投影法と比べ、3次元形状を一目で把握し易い特徴をもつ。しかし、奥行き情報を長さに置き換えて表示を行うため、表示対象物に対する知識が無い場合には、誤解を招く恐れがある。

より詳細な3次元形状の観察には、(1-2)の方法が優れている。これは、両眼視差(左右の目に見える画像の差)と、輻輳(両眼が1点を見つめるための交差角を制御するための眼球運動)を利用して、奥行き情報を得る方法である。その生理的メカニズムや、立体視の成立条件に関する研究もある[38, 39]。

(2)に関する表示法について、(2-1)境界面により再構成された物体の表示法と、(2-2)直接スカラデータを表示する方法に分けて述べる。

(2-1)の境界面の表示法については、(2-1-1)不透明な面として陰影表示する方法[4]-[8],[23]-[25], [31, 34, 35]と、(2-1-2)半透明な面として表示する方法[20, 22]、(2-1-3)任意断面での物体の切口を併せて表示する手法[8, 26, 34, 44]、に分けられる。

(2-1-1)の手法は、3次元物体の外部の構造を観察するのに適している。内部構造を併せて観察するためには、(2-1-2)の半透明表示法が優れている。半透明表示する面の陰影値を、その背後の色と一定の割合で混ぜ合わせる方法[41]が提案された。しかし、この方法では、半透明感の乏しい画像しか得られない。そこで、面が視線方向に垂直な部分は透明度が高く、周辺部分の面が視線に平行に近くなるほど透明度が低くなる透明度パラメータを用いる手法[42]が提案された。実際の物理現象に即して、反射、屈折を考慮して半透明物体を表示するレイトレーシング法[43]も提案された。しかし、物理現象に即した半透明表示は、物体表面において反射や、屈折を生じ、必ずしも観察に適した方法ではない。(2-1-3)の手法は、切口での要素形状を併せて観察できるため、物体の内部構造を容易に把握できる。特に、要素の多重度が高い物体の内部構造を詳細に観察するのに適している。

(2-2)に関しては、スカラデータ値を空間中の微粒子などの物質の分布密度として扱い、光がその空間を通過するときの放射伝達を考慮して表示を行う方法[10]-[17])が提案されている。

大気中の微粒子を可視化するために、微粒子による光の一次散乱を考慮したモデル [10] が提案された。さらに広い範囲での現象の可視化を行うために、多重放射散乱を考慮した手法 [11] が提案された。これらの手法は、空間中を積分計算する必要があり、多くの計算量を必要とする。そこで、表示の高速化ために、被積分関数中の対数関数を多項式近似する方法 [12] や、視線を軸とした円筒座表系を用いる方法 [13] が提案された。また、光源の配光特性を考慮して、表示を行う手法 [14] も提案された。さらに、大気中の微粒子の密度分布のみでなく、一般のスカラデータを、取り扱う方法 [15, 16, 17] が提案された。

本論文では、第2章と第3章において、3次元的な流動状態や形状の観察を行うため、(1-2) のステレオ表示法による可視化手法を提案する。一方、表示対象物が建造物である第4章においては、(1-1) の透視図を用いた可視化手法を提案する。さらに、第3章において、ステレオ表示法を用いて数量的把握が行える方法を提案する。

本論文 第3章においては、(2-1-2) で述べた半透明表示手法が、必ずしも内部構造の観察に適したものではないため、内部構造の観察に適した半透明モデルを構築し、それに基づいて表示する手法を提案する。さらに、三角形パッチにより構成された多重構造物に対して、(2-1-3) の切断面表示を行う方法を提案する。

本論文 第4章で提案する3次元空間密度データの可視化手法は、(2-2) のスカラデータを直接表示する手法に基づく方法を提案する。

1.3 本論文の概要

本研究では、3次元空間に分布するベクトルデータの可視化の際に問題となる、計測データ個数の制限を解決するために、(1) 観測空間内のベクトルデータを内挿・外挿を用いて求める手法を開発する。また、人間の脳裏に描き難い3次元分布情報を直観的に把握できるよう、(2) 3次元ベクトルデータそのものを表示するのではなく、理解し易い表現 (気体流動状態の可視化では、流線など) に変換して、表示を行う手法を提案する。内燃機関におけるシリンダ内の空気流動の計測データを用い、シリンダ内の空気流動状態の可視化を行い、提案手法の有用性を示す。

多重構造物の内部構造の可視化問題については、観察対象物の断面データからもとの形状を再構成する際、(1) 断面輪郭線間に三角形パッチを発生して3次元形状を再構成する手法を、多重構造物が取り扱えるように拡張し、(2) 開口部や分岐な

ど、複雑な形状をもつ物体でも、ユーザの介入を必要とせず、もとの形状に忠実に再構成できる手法を開発する。多重構造物を、その外形だけでなく、内部構造や要素相互間の位置関係について、容易かつ正確に観察するために、(3) 内部構造の観察に適した半透明モデルを構築し、それに基づいてステレオ表示を行い、(4) 内部構造をさらに詳細に観察するために、三角形パッチにより構成された多重構造物の任意断面での切口を併せて表示する手法を開発する。解剖学の分野における、マウス胚子の発生過程の観察に適用し、提案手法の有用性を示す。

開発前の建造物の景観予測において問題となる、3次元空間に分布したスカラデータと、それによる周囲環境への影響を考慮した可視化を行うために、(1) 大気中の微粒子の密度分布を考慮した霧の効果の表示や、太陽光が通過することにより生じる光跡の表示法、(2) 大気中の微粒子による周囲環境への影響を考慮するために、太陽光のスペクトル分布を考慮した3次元物体の陰影表示法を開発する。提案手法により、種々の気象条件下での、周囲環境を含んだ建造物の完成予想画像を作成し、視環境評価のために有用であることを示す。

第 2 章 3 次元離散分布ベクトルの可視化

本章では、3 次元空間に離散分布するベクトルデータの可視化のための一手法として、気体流動状態の可視化問題を取りあげ、気体の 3 次元の流線と流速の両者を同時に表示することにより、気体の流動状態を容易に理解することができる表示法を提案する。

なお、空気流動の計測データは、広島大学工学部第一類（機械系）廣安博之教授から提供していただいた。

2.1 概説

3 次元空間中に分布するベクトル値データは、一般に計算値または実測値としてしばしば与えられる。前者は、任意の観測点の値を求めることができるが、後者の場合は、その測定位置および個数は一般に限られたものとなる。本章では、後者の場合のデータを、人間が理解し易いように可視化するための一手法を提案する。

提案手法は、次の点に特徴がある。(i) 3 次元ベクトルデータを可視化する方法として流線を用いるので、速度ベクトルの矢線による方法より流体の動きが理解し易い。(ii) カラー XY プロットを用いて、速度ベクトルの大きさに応じて色分けして流線を描くので、流速も同時に観察することができる。(iii) 任意の点を与えることにより、その点を通る流線を数値的に求めるので、事実上、任意本数の流線を描くことができる。また、データ外挿手法により、測定が困難、もしくは不可能な場所でのデータを補い、流線を求めることができる。(iv) 両眼視差による立体視法を用いて流線を表示するので、3 次元空間内での流動状態をより直接的に理解することができる。

本論文で提案する方法に、内燃機関におけるシリンダ内の空気流動の計測データを適用し、シリンダ内の空気流動状態の可視化に有用であることを示す。

2.1.1 離散分布ベクトルの可視化に関する研究概況

3 次元空間内に分布するベクトルの実験観測データや、計算機での数値解析結果のデータを可視化し、人間が理解し易い形式で表現することが非常に重要な問題と

なっている。しかし、これまで行われてきた後述の手法だけでは極めて不十分であり、実験観測データが複雑であればあるほど、また、数値解析によって得られるデータ量が多ければ多いほど、より効果的な表示技法が要望される。

本章では、3次元空間に分布するベクトル値データ（以下、3次元ベクトルデータと略称する）に関する実験観測データを取り上げ、このデータの可視化手法について提案する。

3次元ベクトルデータが人間に理解し難いのは、主として次の二つの理由による。

(1) 3次元ベクトルデータの観測には、一般に複雑な装置を必要とし、観測時間の点からも、観測データの個数が比較的少数となる傾向がある。また、観測不可能な場所も存在する [45]。

(2) 3次元的な分布状態は、人間の脳裏に描き難いデータの一つである。

3次元ベクトルデータを表示する最も簡単で、よく用いられている方法は、観測されたベクトルを二つ以上の2次元平面での矢線ベクトルとして表現する方法（図2.4参照）である。しかし、この方法では、(1), (2)とも考慮されていない。

(2)をある程度解決した方法として、矢線ベクトルの先端をピラミッド状の立体で置き換える方法 [1, 2] が提案された。この方法によれば、ピラミッドの2次元平面への透視図が、人間の3次元的思考を助ける。しかし、この表示法を十分活用するためには、観察者のこの表示法に対する慣れが必要である。さらに、観測領域全体の3次元ベクトルデータを表示するためには、多数の2次元平面図を用いなければならないという、前述の方法と共通の欠点もある。

2.1.2 提案手法の概略

本論文で提案する手法は、前節の(1), (2)を根本的に解決する方法である。まず、(1)を解決するために、与えられた3次元ベクトルデータをもとに観測領域を四面体要素に分割し、要素内のベクトル値を補間により求める。さらに、必要に応じて、これらのデータを外挿することにより、観測不可能な点のデータを生成し、四面体要素を構成する。

次に、(2)を解決するために、微分方程式を離散化して解き、流線を算出する。流線は、最終的にカラーXYプロットを用いて流速に応じて色分け表示するので、速

度ベクトルの大きさも可視化される。また、両眼視差による立体視法を用いて表示を行う。すなわち、それぞれ左右の目に対応した位置に視点を置き、上述の処理により求めた流線の透視図を作成する。そして、それらの図を左右の目で観察することにより、両眼視差による立体視が可能となる。

以上のように、提案手法を用いれば、測定に携わらない人でも、3次元的な流体の動きを容易に理解することができる。本論文では、提案手法の有用性を示すために、3次元ベクトルデータとして、内燃機関のシリンダ内の空気流動測定データを用いる。すなわち、測定されたシリンダ内の空気流速ベクトルデータをもとに、流線を数値計算によって求め、左右の目から見た一組の透視図を作成する。これらを左右の目で観察することにより、シリンダ内の空気流動の状態を3次元的に理解できる。

2.2 3次元空間の四面体要素分割

可視化のための流線の算出は、すべて計算機により離散的に行う。したがって、流線を計算する前処理として、観測の行なわれた3次元空間を四面体要素の集合に分割する必要がある。分割の結果得られる各四面体要素の形状は、各々の要素およびその周辺の要素内における流線計算の精度に影響を与える。各四面体要素の各辺の長さがすべて等しい場合、すなわち正四面体のとき、最も良好な計算結果が期待できる。しかし、実用上、領域全体にわたって正四面体要素に分割できるのはごく限られた場合のみである。したがって、各四面体要素の形状を正四面体になるべく近づけることが必要である。

一般に、3次元空間を四面体要素の集合に分割するには、次の二つのステップが用いられる。

- (1) 四面体要素を生成するための頂点の座標を指定する。
- (2) 上記の頂点に接続関係を与え、四面体要素を生成する。

最も精度の良い流線計算結果は、作成された四面体が正四面体のときに得られる。すなわち、(1)については、隣接する頂点間の距離が等しく設定された場合が最良である。しかし、(1)は一般に最良とはならない。なぜなら、流線を計算するために必要な流速ベクトルが与えられるのは実測点のみであり、測定を行う際に(1)の最良

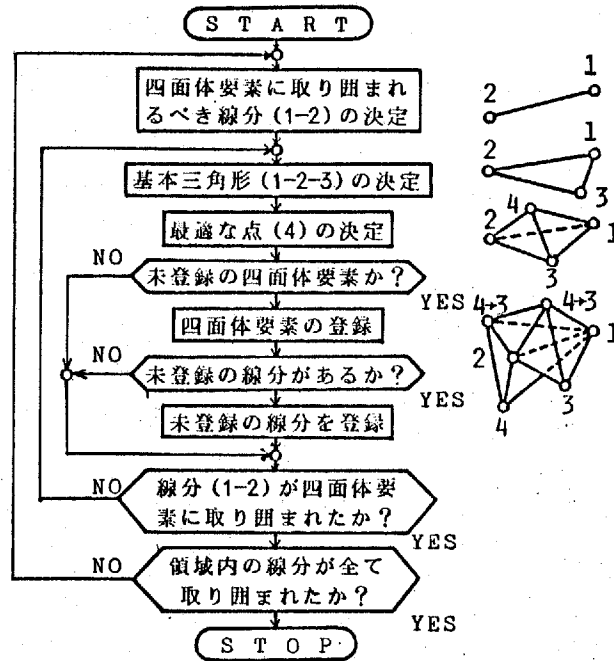


図 2.1: 四面体要素分割の手順

化を考慮して測定点を設定することは一般に困難だからである。したがって、以下では、(2) の最良化について考える。

本論文では、2次元解析においてよい結果を与える Frederick らの三角形要素分割手法 [18] を 3次元問題に拡張した手法 [19] を採用することにより、上記 (2) の問題を解決した。この手法は、次のステップにより構成される (図 2.1 参照)。

- (A) 流速ベクトルのデータ点の任意の一点を頂点 (1)、これに最も近いデータ点を頂点 (2) とし、四面体要素に取り囲まれるべき線分 (1-2) を決定する。
- (B) 頂点 (1),(3),(2) で構成される角が最大となるデータ点 (3) を探し、一つの四面体要素を構成する三角形のうち最初に生成されるもの (以下この三角形を基本三角形と呼ぶ。) (1-2-3) を構成する。
- (C) 基本三角形 (1-2-3) に対し、球面過剰 (付録 A 参照) を最大とするデータ点を求め、四面体要素 (1-2-3-4) を構成する。
- (D) (C) で定まる四面体要素を登録する。
- (E) (1-2-4) を新たな基本三角形とし、 $4 \rightarrow 3$ という番号の付け替えを行う。
- (F) (C),(D),(E) を線分 (1-2) が四面体要素で取り囲まれるまで繰り返す。

(G) 観測領域の境界上にある線分を除き、すべての線分が四面体要素によって取り囲まれるまで (A)~(F) のステップを繰り返す。

以上の四面体要素作成処理が完了すれば、次節の流線計算を開始することができる。

2.3 離散分布ベクトルの内挿および外挿法

2.3.1 内挿による流線の計算

3次元空間内の定常流中において、流線の方程式は、流速ベクトル $\mathbf{V}(x, y, z)$ の x, y, z 成分を用いて、次式で表わされる。

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z} = dt. \quad (2.1)$$

ここで、 dx, dy , および dz は、それぞれ、定常流中の一つの流体粒子が微小時間 dt のあいだに動く距離の x, y, z 成分である。

前節の手続きにより、観測領域は、データ測定点を4頂点とする四面体要素の集合として表現される。したがって、これらの頂点において、測定によって得られた流速ベクトルが与えられている。これらの流速ベクトルを用いることによって、任意の四面体内の任意の点 \mathbf{X} における流速ベクトル $\mathbf{V}(\mathbf{X})$ は、一次式を用いて次式のように近似できる。

$$\mathbf{V}(\mathbf{X}) = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}. \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{A}, \mathbf{B} は、四面体の頂点の座標、および流速ベクトルにより決定される定数行列である。したがって、流線は次の微分方程式の解となる。

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}. \quad (2.3)$$

なお、パラメータ t は、流線に沿って定義されているものとする。ここで、式 (2.3) をラプラス変換すると、次式となる。

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}(\mathbf{B} + s\mathbf{X}_0)/s. \quad (2.4)$$

ただし、 $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}|_{t=0}$, \mathbf{E} は単位行列である。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} s e^{st} \mathbf{X}(s) &= -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \\ \lim_{s \rightarrow -\mathbf{A}} (s\mathbf{E} - \mathbf{A}) e^{st} \mathbf{X}(s) &= \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{B} + \mathbf{A}\mathbf{X}_0) e^{\mathbf{A}t} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

を利用して式 (2.4) を解き、計算機で処理するために、差分方程式に置き換えると、

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}\Delta t} \{ \mathbf{X}(t - \Delta t) + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \quad (2.6)$$

が得られる。ここで、 Δt は計算ステップ幅であり、後述の工夫が必要である。

式 (2.6) を繰り返し用いることにより、一つの四面体要素内の流線を求めることができる。高速処理のためには、次の近似が有用である。

$$e^{\mathbf{A}\Delta t} \simeq \mathbf{E} + \mathbf{A}\Delta t. \quad (2.7)$$

この式を式 (2.6) に施せば、

$$\mathbf{X}(t) \simeq (\mathbf{E} + \mathbf{A}\Delta t) \mathbf{X}(t - \Delta t) + \mathbf{B}\Delta t, \quad (2.8)$$

となる。式 (2.8) を用いることによって、逆行列 \mathbf{A}^{-1} を計算することなしに四面体要素内の流線を数値的に求めることができる。式 (2.8) の計算処理を容易にする変形は、

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) - \mathbf{X}(t - \Delta t) &\simeq \{ \mathbf{A}\mathbf{X}(t - \Delta t) + \mathbf{B} \} \Delta t \\ &= \mathbf{V}(\mathbf{X}(t - \Delta t)) \Delta t, \end{aligned} \quad (2.9)$$

である。

以上のようにして、各四面体要素単位で流線を計算することができる。ここで、数値計算を実行する際の計算ステップ幅 (式 (2.9) 中の Δt) の選択には注意を要する。式 (2.7) の近似誤差を小さくするためには、 Δt を十分小さくしなければならない。しかし、 Δt が小さくなれば、観測領域全体を処理するための計算量が増加する。これらを考慮にいて、適切な Δt の大きさを決定する必要がある。前節の処理により、可視化を行う 3 次元空間は離散化するのに妥当な数の四面体要素に分割されていると考えることができる。換言すれば、一つの四面体要素内においては流速ベクトルの大きな変化はなく、この要素内の Δt は一定としてもよい。

いま、流線がある一つの四面体要素 A から、これに隣接する四面体要素 B へ移るものとする (図 2.2 参照)。四面体要素 B における最適な計算ステップ幅は、以下の手順で求める。なお、図 2.2 中の \mathbf{X}_0 は、計算中の流線が最初に四面体要素 B と交わる点である。

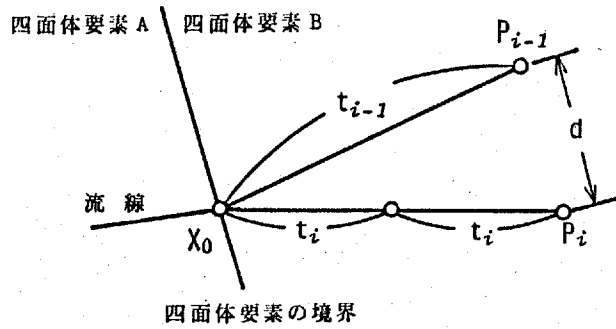


図 2.2: 計算ステップ幅 t_i の決定 ($n=2$ の例)

最適な計算ステップ幅は、次式を満足するものから選択する。

$$t_i = \frac{t_f}{n^i}. \quad (2.10)$$

ここで、 t_f は基本計算ステップ幅であり、適切なステップ幅の初期設定値として与えられる。また、 n は定数である (図 2.2 は $n=2$ の場合に相当している)。式 (2.10) のパラメータ i を決定することが、最適なステップ幅 t_i を決定することにはならない。いま、点 X_0 より n^i ステップ進んだ点を P_i ($i=0, 1, 2, \dots$) とする。 i を増すことによりステップ幅を小さくしていくと、あるところにおいてそれ以上 i を増しても、流線の計算精度は計算量の増加の割には向上しなくなる。したがって、次式を満足する最小の i が最適な計算ステップ幅となる。

$$d < \epsilon. \quad (2.11)$$

ここで、 d は、 P_{i-1} と P_i とのユークリッド距離であり、 ϵ は次式によって決定される許容誤差である。

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(\frac{|\mathbf{V}(\mathbf{X}_0)|}{|\mathbf{V}_0|} \right). \quad (2.12)$$

式 (2.12) において、 ϵ_0 および \mathbf{V}_0 はそれぞれ、数値計算プログラム内で設定される許容誤差および基準速度ベクトル (測定データとしての速度ベクトルを無次元化するために用いる) であり、これらの値は経験的に定める。式 (2.12) は、これらの経験定数を用い、速度ベクトルの大きさに応じて式 (2.11) の許容誤差 ϵ を決定すべきであるとの判断に基づいて導出した。

2.3.2 外挿による境界面上での処理

前節までの処理を用いて、測定点によって決定される四面体要素内の流線を求めることができる。ところで、問題とする領域の境界も含め、すべての場所において

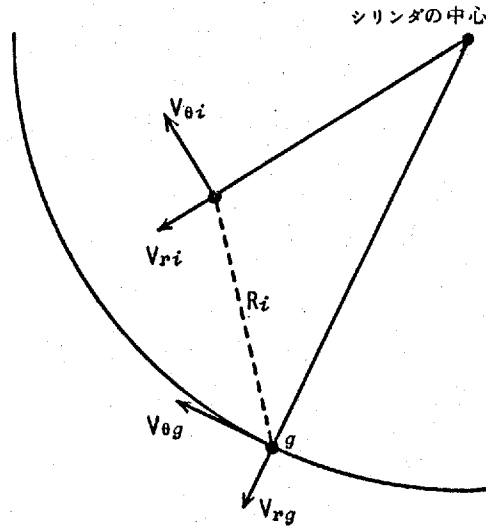


図 2.3: 境界上の流速ベクトルの外挿法

流速データが得られる場合には問題ないが、一般には、境界上での流速の測定は物理的に不可能である場合が多い。したがって、境界上でのデータを何らかの方法で外挿しなければならない。ここで言うデータとは、次の二つの要素から成っている。すなわち、

- (i) データのユークリッド座標
- (ii) (i) における速度ベクトル

であり、これらの二つの要素を求める必要がある。

(i) を求める方法としては、計算機による自動設定法と、人手による方法がある。計測されるデータ点の数が極めて多ければ、前者の方法を用いる方がよい。すなわち、データ点数が多くなれば、四面体要素数が多くなり、個々の四面体要素の形状が計算結果に与える影響が小さくなるからである。しかし、本研究で取り扱う流速データの可視化においては、計測される流速ベクトルの数が比較的少数であるため、後者の方法を用いる。なぜならば、後者の方が流線計算誤差が小さくなるような、より適切な四面体要素を構成することができるからである。

(ii) は、計算機により処理する。具体的な手法を図 2.3 に基づいて述べる。図 2.3 において、境界上の点 g では、流速ベクトルの半径方向成分が零であると仮定できる。したがって、この点における流速ベクトルを次式によって定める。

$$V_{rg} = 0$$

$$\begin{aligned} V_{\theta g} &= \frac{\sum_{i=1}^p \frac{1}{R_i} V_{\theta i}}{\sum_{i=1}^p \frac{1}{R_i}} \\ V_{zg} &= \frac{\sum_{i=1}^p \frac{1}{R_i} V_{zi}}{\sum_{i=1}^p \frac{1}{R_i}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ここで、 V_{rg} , $V_{\theta g}$, V_{zg} は、それぞれ、半径方向、旋回方向、そして軸方向の流速である。また、点 g の近傍にある p 個の測定点の流速データが外挿のために用いられており、 R_i ($i = 1, 2, \dots, p$) は、点 g とこれらの点との距離である。後述のシリンダの流速データへの応用には、 $p = 8$ とした。また、式 (2.13) においては、流速ベクトルの各成分が測定点の距離の増加とともに線形的に減少すると仮定している。この仮定を検証するために、式 (2.13) において、 $1/R_i^2$ や $1/R_i^3$ を重みとする場合の数値計算を行ったが、式 (2.13) を用いた場合とほとんど差異がなかった。そこで、簡単な方法として、この仮定を採用した。

2.4 流線の表示

前節で得られた流線は、定常流中の場合の流体粒子の移動経路を表わしている。すなわち、流速ベクトルの方向を表現している。気体の流動状態の観察には、流速ベクトルの大きさも重要な要素である。そこで、カラー XY プロットを用い、速度ベクトルの大きさに応じて色分けして流線を描く (図 2.6 参照)。これにより、流線と流速を同時に観察することができる。

また、3 次元的な気体流動の状態を観察するため、ステレオ表示を行う。すなわち、左右両眼の midpoint と、注視点を結ぶ直線に垂直で、かつ注視点を含む投影面を用いて、それぞれの目からの流線の透視図を作成する [36]。これを立体視することにより、流線の奥行き情報が得られる。

2.5 適用例

提案手法を内燃機関におけるシリンダ内の空気流動状態の可視化に適用した。付録 B に述べているように、流速データの測定は高スワールポートおよび低スワールポートについて行われた。ポートの違いがシリンダ内の空気流動に与える影響を知るのが、この実験の主要目的である。

図 2.4 は、流速ベクトルの従来の表示法を示している。各流速ベクトルは、断面単

位で垂直成分と水平成分に分けて表示されている。図 2.4 においては、 $z = -15[\text{mm}]$ の水平断面しか与えていないが、実際には、 $z = -4, -15, -25, -50$ および $-165[\text{mm}]$ の合計 5 枚の断面の測定データとして表示しなければならない。また、垂直成分は、図 2.4 のものも含め、4 枚の断面として表示しなければならない。この図から、シリンダ内の空気流動を頭の中で構築するのは極めて困難である。

次に、図 2.5 に立体視法を用いた流速ベクトル表示法を示す。2 枚の図を、それぞれ左右の目で独立に観察すれば、流速ベクトルの分布が立体視できる。この方法は、図 2.4 の表示法よりも、はるかに多くの 3 次元情報を与える。実際、図 2.5 から、シリンダ下方で、高スワールポートの方が旋回方向成分が大きくなること、および、バルブ下方で、バルブに向かって吹き上げる流れがあることなどが理解できる。このように、部分的な流れの様子は把握できるが、この方法では、まだ大域的な流れの様子を知ることはできない。したがって、ポートの違いによるシリンダ内の空気流動の良否を判別することは困難である。

図 2.6 は、提案手法による表示法を示している。ここで使用した四面体要素の頂点数（人手により入力したものを含める）は 174 個で、四面体要素数は 614 個である。図 2.5 と同じように、2 枚の図を用いて立体視することが可能である。図 2.6 によれば、シリンダ内の空気流動が一目瞭然である。さらに、各流線は速度に応じて色分けして表示されているので、流線と流速の大きさを同時に把握することができる。この表示法により、高スワールポートの空気流動は、低スワールポートと比較して、全体的に流速が早く、かつ、スワールの中心がシリンダの中心を通っていることが容易に理解できる。このことは、高スワールポートの方が良好な機関性能を持っていることを示す。実際の機関性能試験においても、高スワールポートは良好な機関性能を示しており [45]、提案手法により流速ベクトルの可視化を行った結果と一致している。

なお、流線計算に用いた計算機は、TOSBAC データシステム 600 であり、表示装置のカラー XY プロッタは、グラフテック WX4636 である。また、図 2.6 を得るための計算時間は、各ポートについて約 17 分であった。

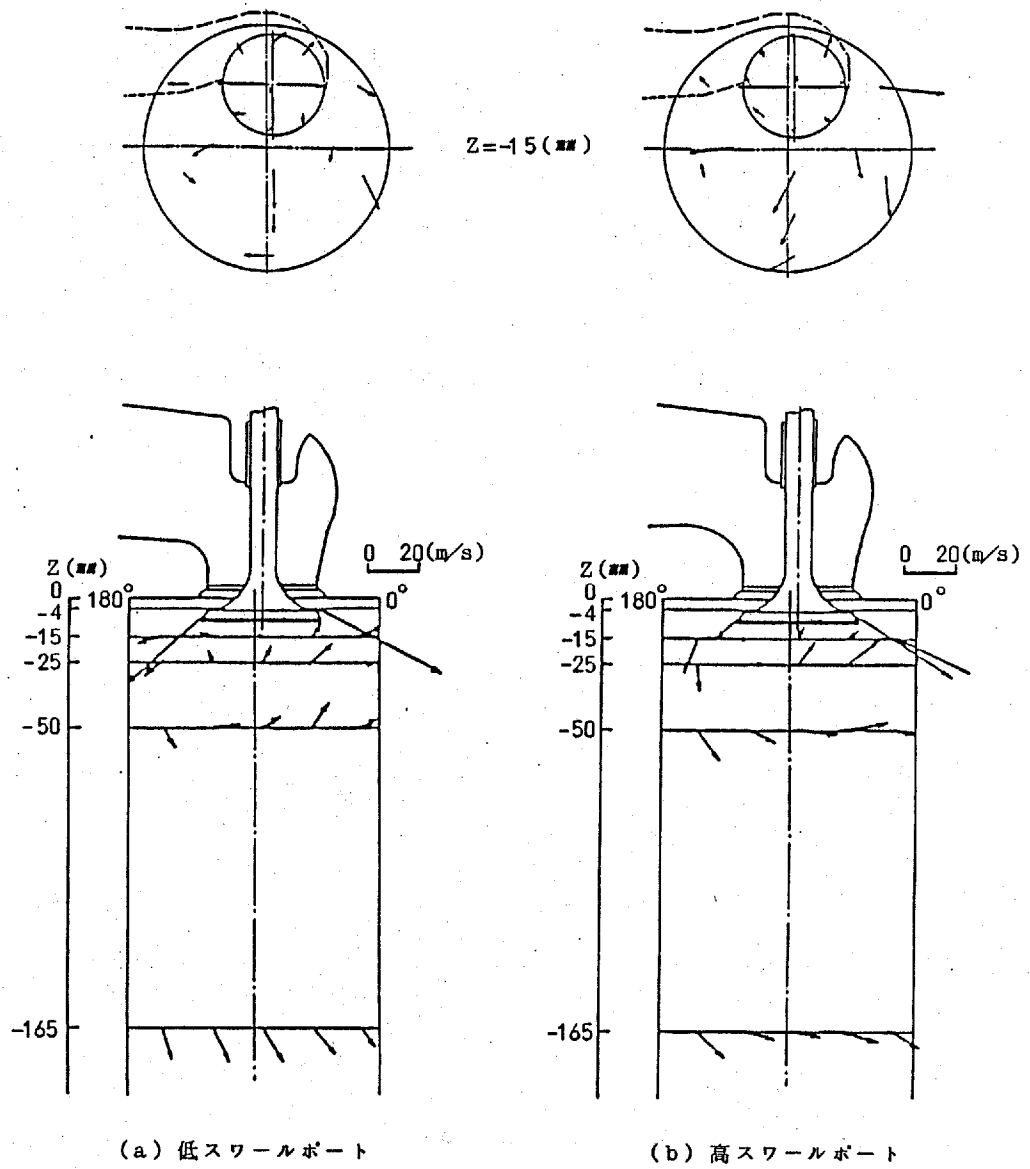
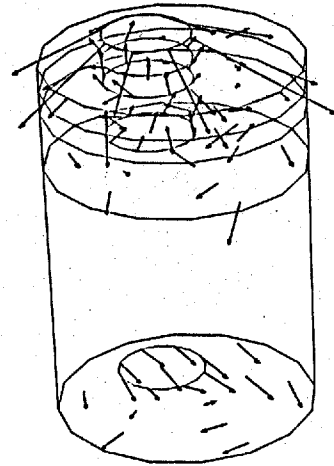
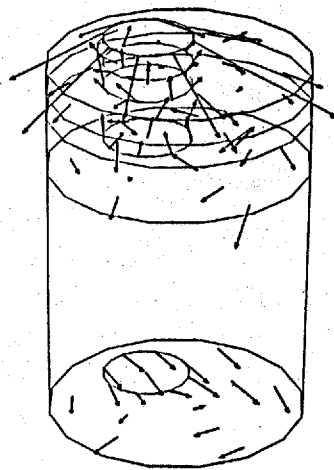
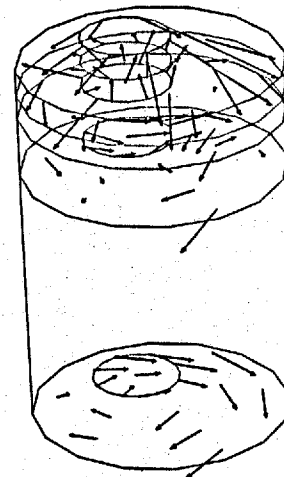
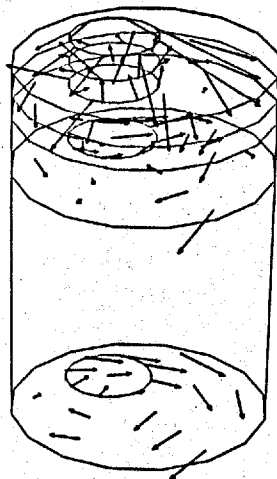


図 2.4: 2 次元の流速ベクトル表示法

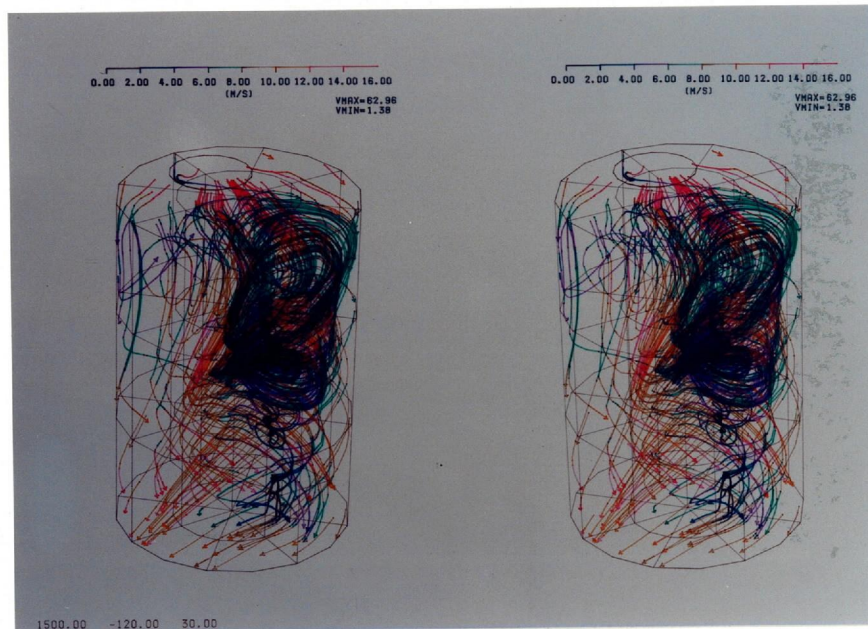


(a) 低スワールポート



(b) 高スワールポート

図 2.5: 両眼立体視法による速度ベクトルの 3 次元表示法



(a) 低スワールポート



(b) 高スワールポート

図 2.6: 両眼立体視法による流線の 3 次元表示法

2.6 結言

本章で提案した3次元ベクトルデータの可視化手法は、次の特徴を有している。

1. 3次元ベクトルデータから流線を計算し、表示することにより、3次元空間での気体流動の様子が一目瞭然となる。
2. 立体視法を用いることにより、3次元的な変化を容易に把握することができる。
3. カラーXYプロットを用いて流線を描くため、流速の変化も流線の分布と同時に観察できる。

本章の適用例においては、気体流動の問題を扱ったが、言うまでもなく提案手法は、3次元空間に離散的に分布するベクトルデータの可視化にきわめて有効な一般的手法である。

第 3 章 3 次元多重構造物の再構成と表示

本章では、3 次元多重構造物のサンプルデータから、その全体像を可視化する一手法として、性質の異なる種々の要素からなる 3 次元多重構造物の内部構造の観察のための表示手法を提案する。すなわち、3 次元多重構造物の断面データから各要素の輪郭線を抽出し、その断面輪郭線から物体を再構成し、外形だけでなく内部構造も含めて同時に表示する方法について述べる。

なお、本章の適用例で使用したマウス胚子の断面データは、広島大学医学部 安田峯生教授、佐藤明直講師から提供していただいた。

3.1 概説

多重構造物をいくつかの切片にしたときの断面データ — すなわち、3 次元空間内に、層状に分布したスカラデータ — から、もとの物体を再構成し、その外形のみならず、通常では観察の極めて困難な内部構造も含めて同時に表示を行うことは、物体の構造を詳細に観察する上で重要な問題である。本章では、3 次元空間内に存在するサンプルされたスカラデータの可視化手法として、多重構造物の断面輪郭線から物体を再構成する方法、および再構成物体の内部構造を含めて観察するための表示手法を提案する。

すなわち、前者に対しては、i) 多重の輪郭線から物体を再構成する際、上下の断面の輪郭線の繋り関係を求めるための階層をなすデータ構造、ii) 原形に忠実な物体を再構成するための 3 次元単位空間の分割法、iii) 開いた輪郭線を処理する手法、iv) 上下の断面の輪郭線の形状が相違している場合でも適切な物体再構成ができる手法を提案する。

また、後者に対しては、i) 再構成した面を、疑似的に着色した半透明な面としてステレオ表示する方法、ii) 物体形状のより詳細な観察を可能とする切断面の表示法、iii) 物体を再構成する多数の微小な三角形パッチを断面によってグループ分けすることにより、前後判定に要する時間を大幅に短縮する方法、iv) 観察に適した半透明感のある画像を得るために、ガラス等の半透明物体の反射、屈折を無視したモデルに準じて表示を行う方法、v) 物体要素を選択して表示する機能と、表示の際のパラ

メータを変えることにより、観察目的に合った画像を得る方法を提案する。

マウス胚子の発生過程の観察に適用することにより、提案手法の有用性を示す。

3.1.1 3次元多重構造物の表示に関する研究概況

各断面上の物体の輪郭線から、もとの物体の表示画像を得るための手順は、一般に、次の三つのステップに分けられる。

- (1) 断面からの輪郭線の抽出
- (2) 輪郭線からの物体の再構成
- (3) 再構成された物体の表示

(1) については、断面画像にしきい値を設けて図形領域を抽出し、その領域の輪郭線を求める手法 [23, 26] が一般に用いられている。

(2) については、多角形や自由曲面を用いて物体表面を構成する方法と、物体をボクセル (物体を構成する微小単位体積要素) により構成する方法がある。

前者の方法としては、隣接する断面の輪郭線間を三角形パッチで埋める手法が広く用いられている。その代表的なものとして、Fuchs らのグラフ理論を用いた三角形化手法 [4] がある。これは、再構成された物体の表面積が最小となるように三角形パッチを発生させる手法である。この手法は、優れた形状の三角形パッチを構成するが、断面間に分岐、合流のある場合、あるいは開口部が存在する場合の処理が解決されていない。Ganapathy ら [6] は、Fuchs らの手法を改良したが、なお分岐を処理することができない。

これに対して、Christiansen らの三角形化手法 [5] は、分岐、合流の処理方法を示し、アルゴリズムも簡単で、上下の断面の輪郭線に大きな形状変化のない場合は、優れた三角形化が行える。しかし、多重構造物の断面輪郭線や開いた輪郭線を扱う方法を示していない。また、断面間の輪郭線形状が非常に異なった場合は物体の再構成を行うことができない。

Zyda ら [9] は、多重輪郭線を処理する手法を提案した。この手法では、輪郭線の接続関係を、輪郭線を取り囲むバウンディングボックスどうしの重なる割合により

決定している。しかし、この手法では、非常に入り組んだ、あるいは細長い輪郭線を取り扱うことができない。

Boissonnat[7] は、3次元空間に散在しているデータ点を用いて物体を再構成する手法を提案したが、多重構造をなす物体や開口部のある物体を扱うことができない。さらに、表示のために、三角形パッチを視点から遠い順にソートする際、断面間の優先順位を用いて処理時間の短縮をはかることができない。

後者のボクセルを用いる方法は、物体を3次元の小立方体であるボクセルの集合として表現する方法[29]である。この手法は、断面間の接続情報を求める必要がなく、形状が複雑な物体でも容易に処理が行える。しかし、精度良く物体を記述するためには膨大な記憶量が必要であり、また、表示画像はボクセルの形状からくる荒さが目立つという欠点がある。記憶容量に関する問題を解決するために、ボクセルを8分木構造を用いて表現する手法[30, 32, 33]が提案されている。また、表示の際、ボクセル形状からくる荒さを防ぎ、物体表面をスムーズに表現する方法として、マーチングキューブ法[34]などが開発されている[31, 35]。

(3)については、グラフィックスディスプレイ上に、再構成された物体を3次元陰影表示する方法[26]が挙げられる。また、物体の内部構造がわかるように、物体の任意の断面での切口を併せて表示する手法[44]も提案されている。しかし、その物体内部の構造を一目で理解するには、物体要素の表面を透明な面として表示する手法[20, 22, 40]が優れている。この半透明表示の手法は、従来の陰影値を用い、背後の物体の色と、半透明表示する物体の色を一定の割合で混ぜ合わせる方法[41]がよく用いられている。しかし、この方法では、半透明感の乏しい画像しか得られないので、面が視線方向に垂直な部分は透明度が高く、周辺部分の面が視線に平行に近くなるほど透明度が低くなる透明度パラメータを用いる手法[42]も提案されている。

3.1.2 提案手法の概略

本論文では、前節(1)の断面からの輪郭線の抽出については、断面写真画像中に、画像処理手法による自動的な輪郭線抽出が極めて困難な部分が存在しているので(図3.1参照)、タブレットから人手により輪郭線を入力する方法を採用する。

前節(2)の輪郭線からの物体再構成については、Christiansenらの手法(付録C参照)に次の3点の改良を加えた。

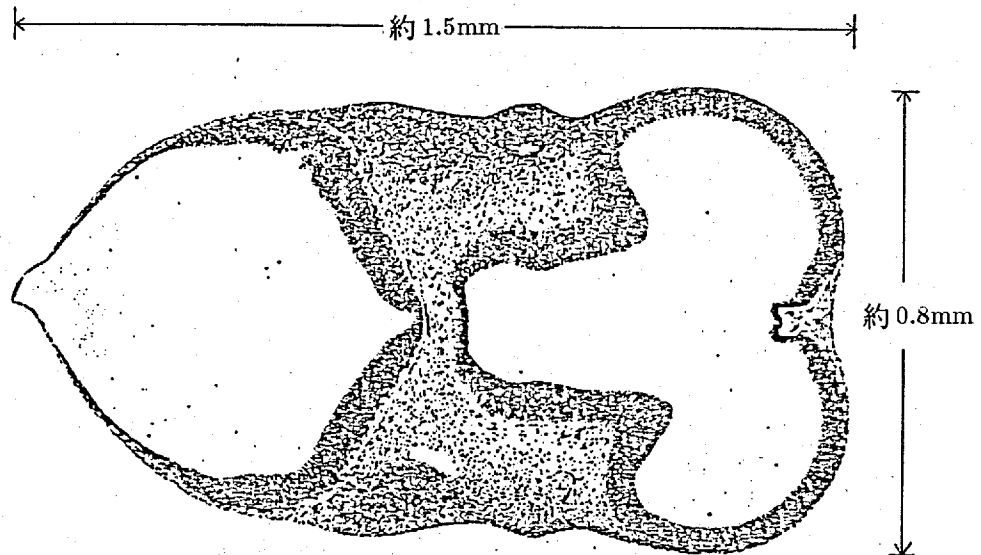


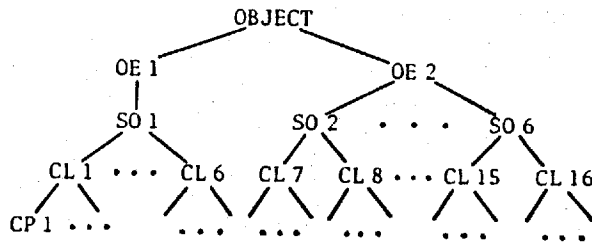
図 3.1: マウス胚子の頭部断面写真 (断面間隔 $7\mu\text{m}$)

- (a) 任意の数の輪郭線が多重構造をしていても、物体を再構成することができる。
- (b) 三角形パッチを生成する際、上下二つの断面間に分岐、合流のある場合でも、ユーザの介入を必要としない。
- (c) 上下二つの断面の輪郭線の形状がかなり大きく変化する場合でも、適切な三角形化が行える。

また (3) の再構成物体の表示については、物理現象に即した半透明表示が必ずしも観察に適したものではないため、物体の内部構造を把握し易い半透明表示法を提案する。すなわち、ガラス等の半透明物体の反射、屈折を無視し、透過光成分のみを考慮したモデルを用いて表示を行うことにより、屈折による形状の歪がなく、反射による物体表面のグレアがない観察に適した画像を得ることができる。また、物体の要素を構成する面の透過率を必要に応じて変化させたり、物体の任意の要素を選択的に表示する機能を備え、これらを効果的に使うことにより、観察に適した表示が行える。このような方法で、右目、左目に対する2枚の画像を出力し、それらを立体視することにより、物体内部の3次元的構造も容易に把握できる。

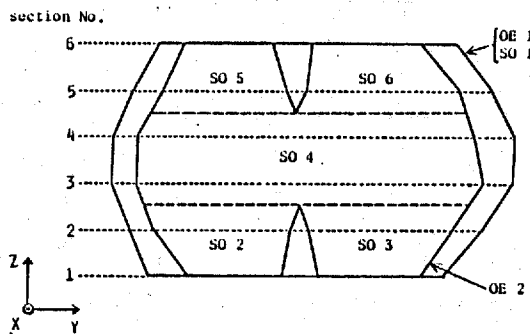
3.2 多重構造物を扱うためのデータ構造

Christiansen らの物体再構成手法は、上下二つの断面の輪郭線に大きな変化がないことを条件としている。そのため、上下の断面の輪郭線に対して、それぞれ輪郭

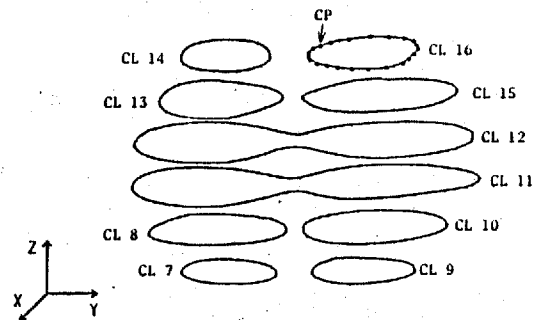


OE: 物体要素
SO: 小物体
CL: 輪郭線
CP: 輪郭点

(a) 階層データ構造



(b-1) 物体要素と小物体



(b-2) 輪郭線と輪郭点

図 3.2: 多重構造物を扱うための階層構造をなすデータ構造

線を内包する x, y 軸方向の辺を持つ長方形について、それらの重なり具合から繋りを判断している。しかし、多重構造物の輪郭線 (図 3.1 参照) に対しては、この方法を使うことはできない。そこで、このような多重の輪郭線も処理できるようなデータ構造を採用する。すなわち、物体を頂点として、物体要素、小物体、輪郭線、輪郭点の順に階層構造をなすデータ構造を採用する (図 3.2 参照)。ここで、物体要素は、物体を構成している互いに性質の異なる要素であり、小物体は、分岐、合流が生ずる区間で物体要素を分割したものと定義する。また、輪郭線は、各断面上の物体要素の輪郭であり、輪郭点は、その輪郭線を構成する点の集合である。

このようなデータ構造を用いることにより、輪郭線が多重となった場合でも、上下の断面の輪郭線の繋りは、その輪郭線の属している小物体を調べることにより容易に求めることができる。また、物体要素の分岐、合流に対しては、それぞれの小物体の繋り関係だけを与えればよい。したがって、ユーザは各輪郭線の繋り関係を

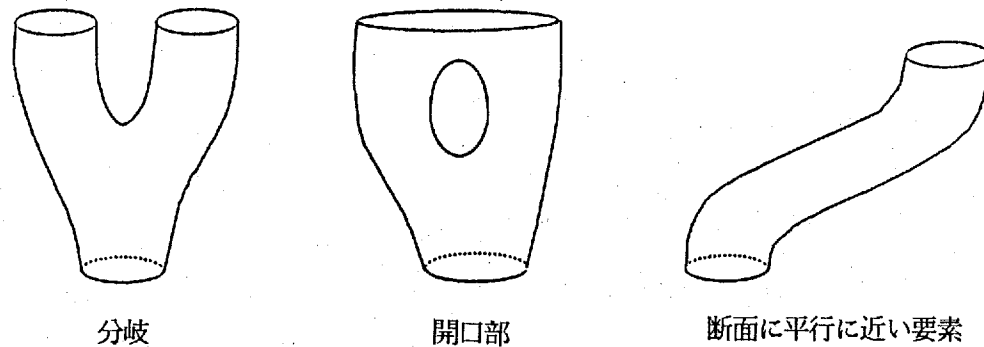


図 3.3: 一定断面間隔の再構成手法では高精度再構成が困難な物体

断面ごとに与える必要はなく、タブレットを用いて輪郭線を入力する際に、その輪郭線の属する小物体を指定するだけでよく、その他の手数は必要としない。

3.3 高精度再構成のための空間分割法

一定断面間隔を使う再構成手法では、図 3.3 に示すように、物体を構成する要素が分岐や開口部をもつ場合、また要素が断面に平行に近い場合には、間隔を極端に小さくしない限り物体を精度よく再構成することはできない。すなわち、隣接する断面間隔が粗いと、上下の要素の輪郭線の形状が非常に異なり、その結果、細長い三角形パッチができ、再構成された物体は原形と大きく異なってくる。この問題を回避するには、断面間隔、輪郭線のサンプリング間隔を、ともに密にとらなければならない。しかし、全間隔を密にとると、一部だけが複雑な物体の全体像を観察する場合においても、膨大なデータ量と計算時間が必要となってしまう。

提案手法では、取り込まれた断面データをあらかじめユーザが設定した断面間隔でサンプルし、その断面の輪郭線を用いて形状再構成を行うことにより、処理の高速化をはかり、かつ、断面間隔が要素形状に比べて粗すぎるとき、適切な枚数の断面データを自動的に挿入し、断面間隔を局所的に密にする手法を提案する。以下、前もって設定された断面を基準断面、必要な場合に全断面データから順次挿入される断面を追加断面と呼ぶことにする。

3.3.1 高精度再構成手法の処理手順

基準断面上の輪郭線形状が急激に変化している場合、追加断面上の輪郭線が自動的にその間に挿入される。挿入される枚数は、上下の輪郭線形状の相違の度合によ

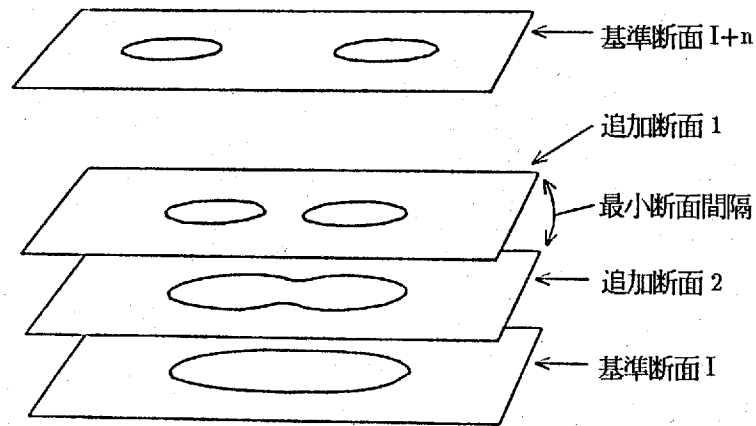


図 3.4: 追加断面の挿入手順

り決定される。ここでは、その手順について述べる。

連続した基準断面を、以下のチェックが行なわれる処理対象断面とし、処理対象断面間において、次の四つの条件が判定される。

- (1) 分岐部分の存在
- (2) 開口部の上下端の存在
- (3) 断面に平行に近い要素の存在
- (4) 輪郭線形状が上下で大きく異なる部分の存在

少なくともこれらの一つの条件を満たすとき、処理対象断面間の中に追加断面が挿入される。そして、その追加断面を新たな処理対象断面として、条件 (1)~(4) を判定し、追加断面の挿入を再帰的に繰り返す。条件をすべて満たさなくなったとき、あるいは、処理対象断面の間隔が最小断面間隔になったとき、挿入操作を終了する。

条件 (1), (2), (3) を、一つでも満たす場合には、挿入された断面上のその要素の一本の輪郭線全体が再構成に使われる。他方、条件 (4) のみを満たす場合には、必ずしも輪郭線全体を使用する必要はないので、輪郭線形状変化の大きな部分のみを使用する。

輪郭線全体を使用する条件 (1), (2), (3) を満たした場合に、どのようにこのアルゴリズムが進行するかを示す (図 3.4 参照)。基準断面が、 n 枚の断面間隔ごとに I と $I+n$ に設定されている。これは、この基準断面間に追加挿入できる $n-1$ 枚のサ

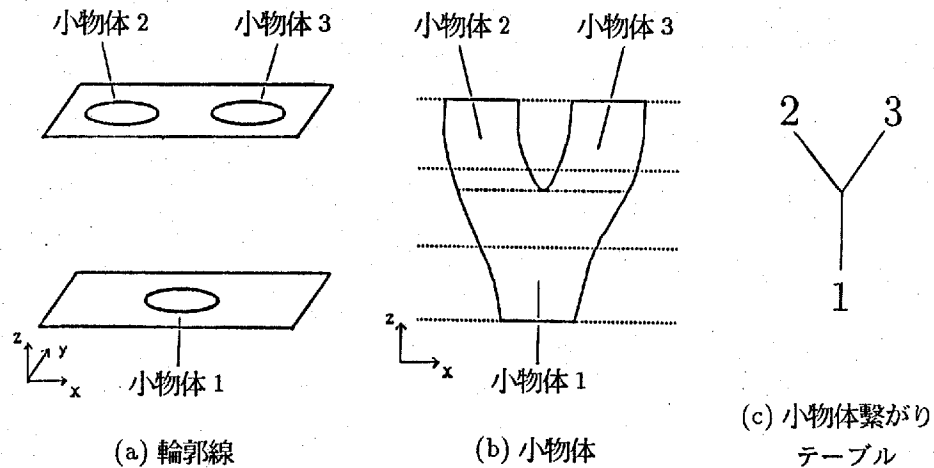


図 3.5: 分岐とその繋り関係

ンプル断面が存在することを示している。この基準断面間で要素が分岐をしているため、追加断面 1 が中間に挿入される。次に、この追加断面 1 と基準断面 I を新たな処理対象断面として条件の判定を行なう。ここにも分岐が存在しており、追加断面 2 がその中間に挿入される。このようにして、条件の判定と挿入を再帰的に繰り返して、断面間隔が最小断面間隔となったところで挿入操作を終了する。

3.3.2 全輪郭線を用いた再構成

(i) 分岐

処理対象断面間に分岐が存在するかどうかは、次のようにして判定する (図 3.5 参照)。各々の輪郭線は、それが属している小物体番号を付けて記憶されている。小物体どうしの繋がり関係は、テーブルに記憶してある。処理対象断面上の輪郭線が異なる小物体番号を持つとき、繋がり関係を示すテーブルを参照し、それらの小物体が繋がりを持っているか否かを調べる。繋がりを持つ場合には、処理対象断面間に分岐が存在する。

(ii) 開口部の上下端

開口部の上下端が存在するか否かの判定は、次のようにして行なう (図 3.6 参照)。下の断面の輪郭線が閉じており、上の断面の輪郭線が開いているならば、断面間に開口部の下端部が存在する。その逆ならば、上端部が存在する。

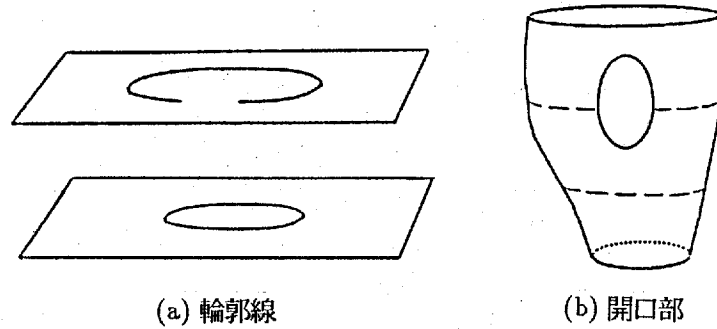


図 3.6: 開口部の上下端

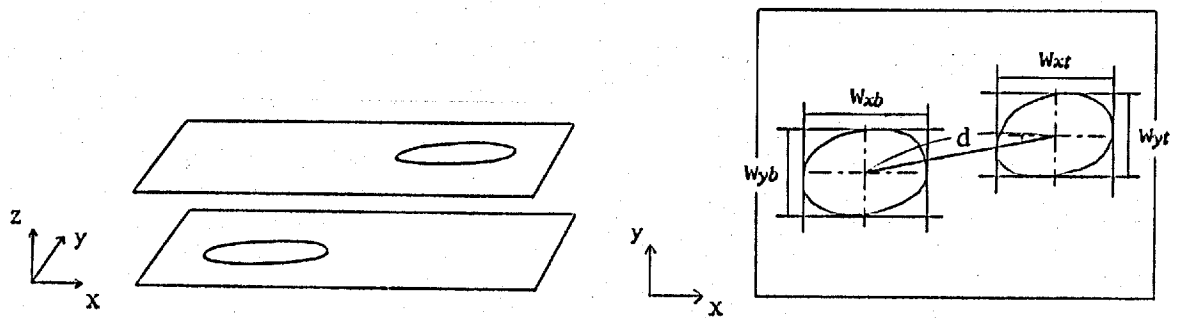


図 3.7: 断面に平行に近い要素の判定法

(iii) 断面に平行に近い要素

要素が断面に水平に近くなる部分は、次のように判定する。処理対象の要素が、断面に平行に近づく部分では、処理対象断面上の輪郭線の中心位置が図 3.7 に示すように大きくずれる。したがって、輪郭線の中心点の位置のずれ d が次の条件を満たすとき、その要素が断面に平行に近いと判定する。

$$d > k_1 \min(w_{xt}, w_{xb}, w_{yt}, w_{yb}). \quad (3.1)$$

ここで、 w_{xt} , w_{yt} は、それぞれ上の断面の輪郭線の x , y 方向の幅、 w_{xb} , w_{yb} は、それぞれ下の断面の輪郭線の x , y 方向の幅、 k_1 は係数である。係数 k_1 の値は、3.7節 適用例において検討する。

3.3.3 部分輪郭線を用いた再構成

前節に述べた条件を用いれば、指定された基準断面間に追加断面が挿入され、原形に近い物体を再構成することができる。しかし、輪郭線の形状の一部のみが大き

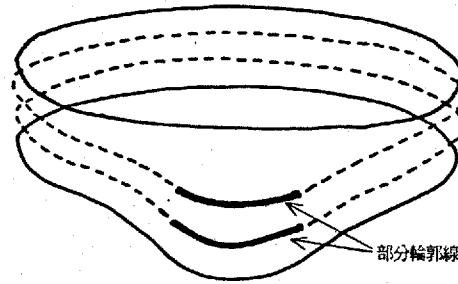


図 3.8: 部分輪郭線

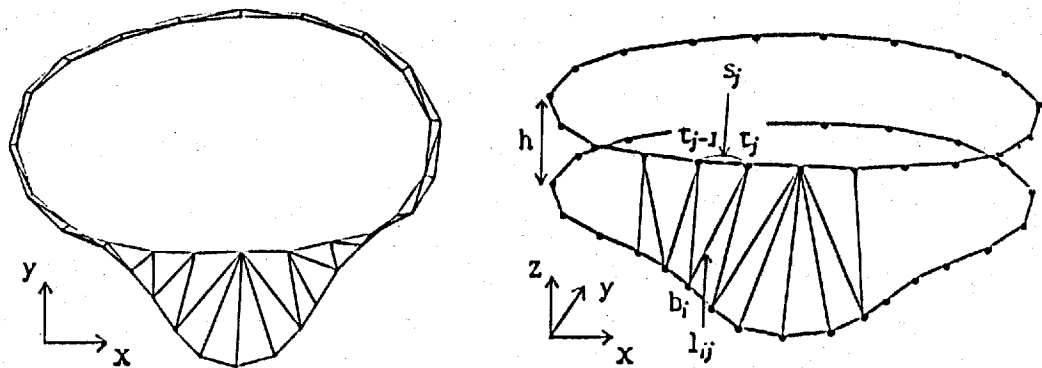


図 3.9: 輪郭線形状が上下の断面で大きく異なる部分の検出法

く変化している場合には、一本の輪郭線全体を挿入する必要はない。このような場合には、輪郭線の形状変化の激しい部分だけを挿入し、これらの部分輪郭線を使って再構成を行なう。ここでいう部分輪郭線とは、図 3.8 のように一本の輪郭線の一部が独立して開いた輪郭線になっている状態をいう。部分輪郭線を用いることによって、記憶容量と計算時間をさらに短縮できる。

以下に、輪郭線が急激に変化する部分の判定方法と、部分輪郭線の作成方法について述べる。

Christiansen らのアルゴリズムを使って三角形パッチを作成する際、輪郭線の形状が上下で大きく変化する部分では、相対する輪郭点を結ぶ線分の長さが他の部分よりも長くなる (図 3.9 (a) 参照)。そこで、この性質を利用して、線分の長さが次の条件を満たすとき、上下の輪郭線の形状が大きく異なっていると判定して、部分輪郭線を挿入する (図 3.9 (b) 参照)。

$$l_{ij}^2 > k_2(h^2 + s_j^2). \quad (3.2)$$

ここで、 l_{ij} は相対する輪郭点 b_i と t_j を結ぶ線分の長さ、 h は隣接する処理断面間の

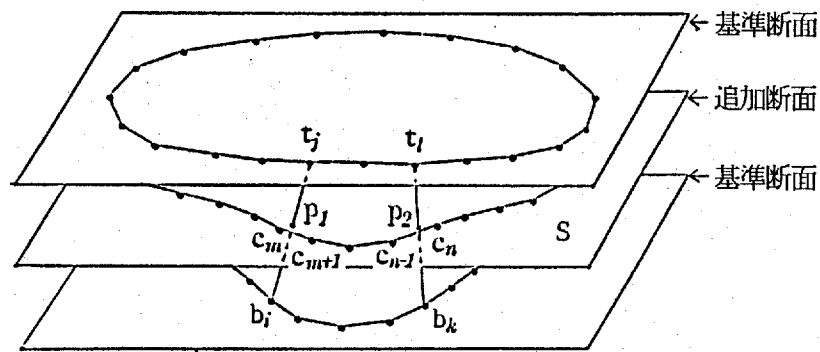


図 3.10: 部分輪郭線の作成

距離、 s_j は輪郭点 t_{j-1} と t_j との距離、 k_2 はあらかじめ設定された係数である。係数 k_2 の値は、3.7節 適用例において検討する。

隣接する基準断面上の輪郭線について、条件式 (3.2) を用いて判定を行ない、その条件を満たす部分に部分輪郭線を挿入する。この条件判定と、部分輪郭線の挿入は、条件が満たされなくなるまで、あるいは、処理対象断面の間隔が最小断面間隔になるまで再帰的に繰り返される。

上下二つの輪郭線の形状が、ともに複雑な場合でも、その形状が同じような形で、条件式 (3.2) を満たさなければ、部分輪郭線は追加されない。

部分輪郭線は、処理断面間の中間の断面輪郭線データを使って、次の手順により作成する (図 3.10参照)。ここで、部分輪郭線の挿入範囲は、前述の方法を用いて b_i から b_k 、 t_j から t_l (ただし、 $i < k, j < l$) として求まっているものとする。

- (1) 中点の断面を含む平面 S と線分 $b_i t_j$ および $b_k t_l$ の交点 p_1, p_2 をそれぞれ求める。
- (2) 中点の断面 S 上の輪郭線 C を構成する輪郭点のうち、交点 p_1, p_2 に最も近い点 c_m, c_n を各々求める。
- (3) それらの点を交点 p_1, p_2 と置き換え、点列 $p_1 c_{m+1} \cdots c_{n-1} p_2$ を挿入すべき部分輪郭線とする。

3.4 三角形化による3次元形状再構成

3.4.1 自動分岐処理による三角形化

生物体をスライスした断面の輪郭線においては、図 3.11のように溝をなして分岐する場合がしばしば発生する。このような場合には、Christiansen らは、次の処理

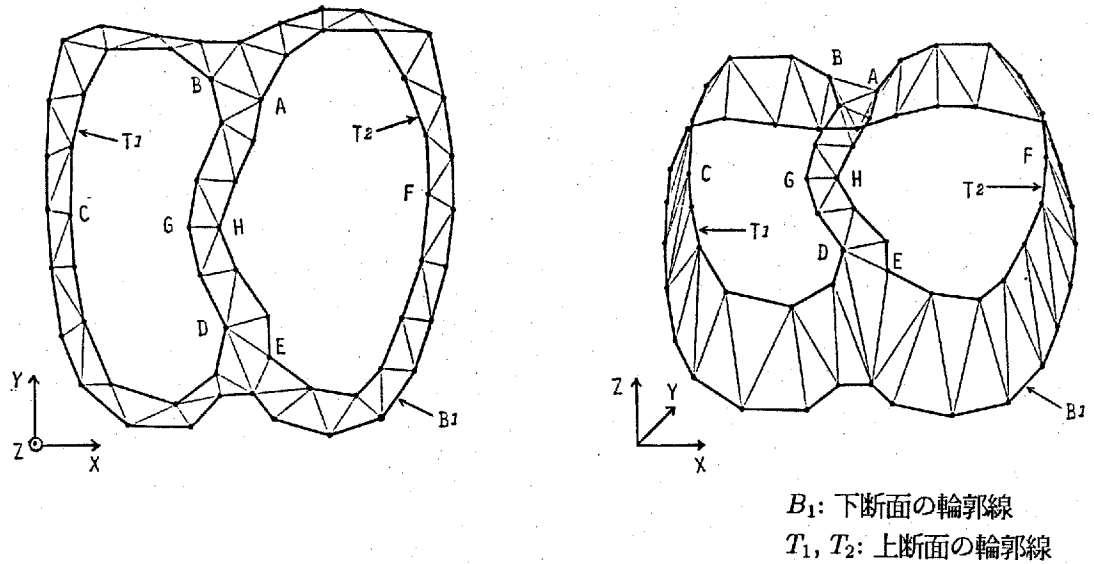


図 3.11: 溝状分岐の処理方法

方法を示している。たとえば、図 3.11において、上部断面の分岐した二つの輪郭線 T_1, T_2 について、その外側の輪郭部に属している $A-B-C-D-E-F-A$ のループを作り、これと下部断面の輪郭線 B_1 との間に三角形パッチを発生させる。次に、セグメント $B-G-D$ と $A-H-E$ 間に三角形パッチを発生させる。この処理により、溝状の分岐(合流)をする場合も物体を再構成することが可能となる。しかし、この場合、点 A, B, D, E を人為的に与える必要がある。

そこで、このような溝状分岐(合流)の処理を自動化し、ユーザの労力を軽減するための、点 A, B, D, E を探索するアルゴリズムを以下に述べる(図 3.12 参照)。

- (1) 輪郭線 T_1 と T_2 が一つの単位面積の正方形に内包されるようにスケール変換を行う。
- (2) 輪郭線 T_1 と T_2 の間の最短距離を与える輪郭点 G_0, H_0 を探し、その距離を d とする。
- (3) $i \leftarrow 0, j \leftarrow 0$ とする。
- (4) G_i, G_{i+1} を通る直線に対して、点 $H_{-(j+1)}$ から下ろした垂線が線分 $G_i G_{i+1}$ 内に落ちる場合は (5) へ、線分内に落ちない場合は (6) へ進む。
- (5) 垂線の長さ l が、 $l \leq d(1+\epsilon)$ (ϵ は許容範囲) のときには、 $j \leftarrow j+1$ とし (4) へ、 $l > d(1+\epsilon)$ のときには、 G_i を B , H_{-j} を A とし終了する。

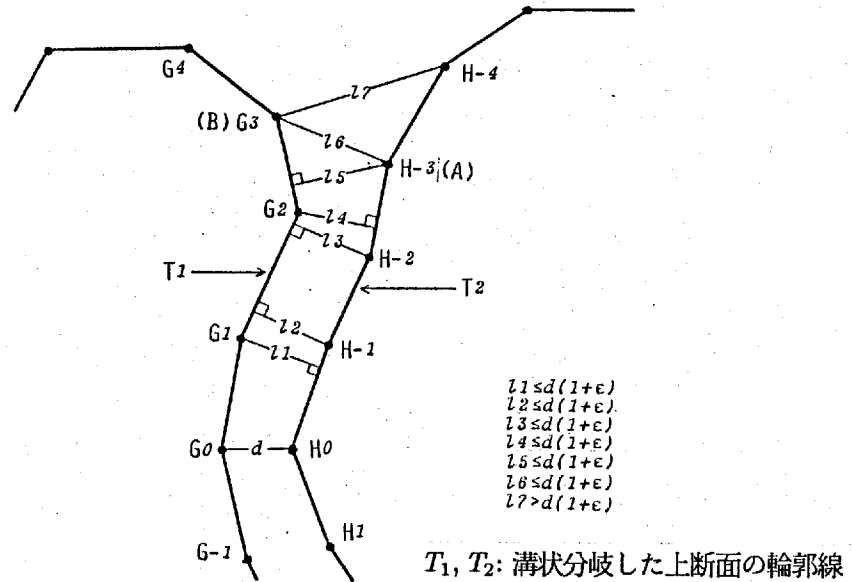


図 3.12: 分岐点 A, B の探索方法

(6) $H_{-j}H_{-(j+1)}$ を通る直線に対して、点 G_{i+1} から下ろした垂線が線分 $H_{-j}H_{-(j+1)}$ 内に落ちる場合には (7) へ、線分内に落ちない場合には (4) へ帰る。

(7) 線分の長さ l が、 $l \leq d(1+\epsilon)$ のときには、 $i \leftarrow i+1$ とし (6) へ、 $l > d(1+\epsilon)$ のときには、 H_{-j} を A 、 G_i を B とし終了する。

ただし、(4)、(6) のステップにおいて、ともに垂線が線分内に落ちなくなった場合には、ステップ (8) へ移る。

(8) 点 $H_{-(j+1)}$ 、 G_{i+1} のそれぞれから最短の距離にある相対する輪郭点 G_k 、 $H_{-k'}$ を探し、二者のうち短い方の距離 l が、 $l > d(1+\epsilon)$ ならば、 G_i を B 、 H_{-j} を A とし終了する。 $l \leq d(1+\epsilon)$ ならば、 $\overline{H_{-(j+1)}G_k} \leq \overline{G_{i+1}H_{-k'}}$ のとき $j \leftarrow j+1$ 、 $i \leftarrow k$ とし、 $\overline{G_{i+1}H_{-k'}} \leq \overline{H_{-(j+1)}G_k}$ のとき、 $i \leftarrow i+1$ 、 $j \leftarrow k'$ として (4) へ帰る。

同様にして、点 D, E を探索する。

適切な許容範囲 ϵ を選ぶことにより、上述の手法を用いて、点 A, B, D, E を自動的に求めることができる。

3.4.2 開いた輪郭線を含む場合の三角形化

物体が開口部をもつ場合、その断面輪郭線には開いた部分が生じる。そして、連続した断面上の輪郭線では、図 3.13 に示す二つの組合せのいずれかが起こりうる。

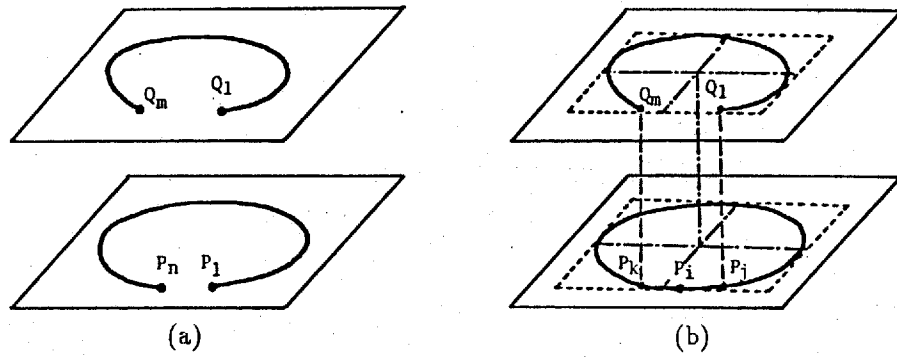


図 3.13: 開口部をもつ物体の連続断面上の輪郭線の組合せ

すなわち、図 3.13 (a) は、両方の輪郭線が開いている場合である。この場合は、各々の断面輪郭線の片側の端点 P_1, Q_1 から三角形化を始め、他方の端点 P_n, Q_m で三角形化を終了する。

図 3.13 (b) は、一方の断面輪郭線が開いており、他方が閉じた輪郭線となった場合である。この輪郭線の組合せは開口部の上下端のいずれにおいても発生する。この場合には、まず最初に輪郭線が開き始める点 P_i を求め、その点を三角形化の開始点とする。すなわち、閉じた輪郭線上の点 P_i と開いた輪郭線の端点 Q_1 から三角形化を始め、点 P_i, Q_m に到るまで三角形パッチを作成する。

輪郭線が開き始める点 P_i は、次のアルゴリズムを用いて求める (図 3.13 (b) 参照)。

- (1) それぞれの断面輪郭線を包含するバウンディングボックスの中心の x, y 座標が一致するように、輪郭線を平行移動する。
- (2) 開いた輪郭線の端点 Q_1 と Q_m に最も近い閉じた輪郭線を構成する輪郭点 P_j, P_k をそれぞれ求める。
- (3) $\overline{P_{i-1}Q_m} < \overline{P_{i-1}Q_1}, \overline{P_iQ_m} > \overline{P_iQ_1}$ を満たす輪郭点 P_i ($k \leq i \leq j$) を輪郭線の開き始めの点とする。

3.4.3 形状変化の激しい輪郭線の三角形化

Christiansen らの三角形化手法は、上下の断面の輪郭線の変化が小さい場合には、原形に近い物体を再構成することができる。しかし、上下の断面間の輪郭線の変化を小さくするには、断面間隔を小さくし、かつ輪郭線を取り込む際に輪郭点を密に取らなければならない。これは、複雑な物体の全体像を観察しようとする場合、データ量が増加し、処理時間も長くなる。そこで、三角形パッチを構成する際に、その

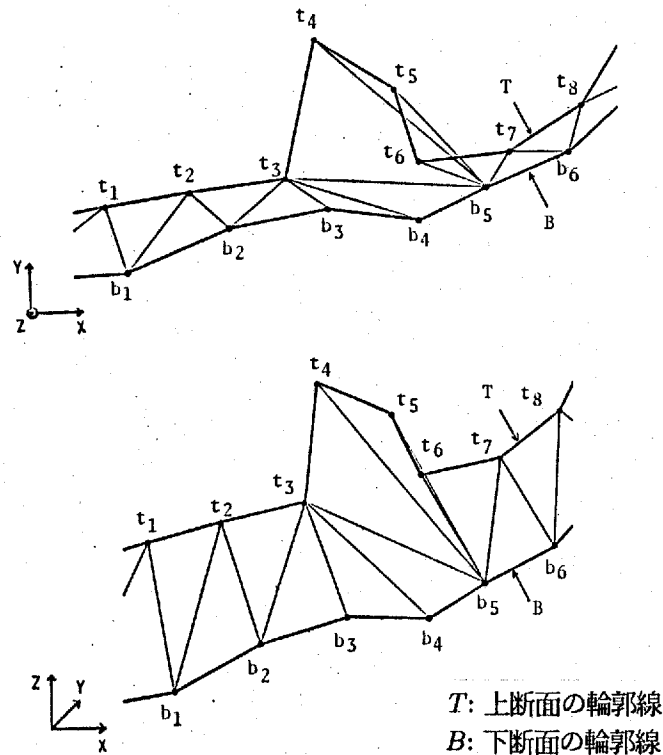


図 3.14: Christiansen らの三角形化手法に大きな形状相違をもつ輪郭線を適用した例
パッチが妥当な形状のものであるかをチェックしながら三角形化を行うことにより、
輪郭線間にかかなりの形状変化がある場合でも、三角形化を適切に行うことができる
アルゴリズムを提案する。

Christiansen らの三角形化手法では、上下の輪郭点の距離が最も小さいものから
出発し、次の輪郭点までの距離の短い方を取ることにより、三角形パッチを構成す
る。そのため、輪郭線の形状にかかなりの相違がある場合、断面上部から見ると、図
3.14のように三角形パッチが互いに交差する不自然なパッチが構成される。また、左
回りに三角形化を行った場合と、右回りに行った場合とでは、再構成された物体の
形状が大きく異なるという不都合が生じる。

このような不自然な形状の三角形パッチが構成されるときは、一つの輪郭点为数
多くの三角形パッチにより共有されている。また、相対する輪郭点を結ぶ線分の長
さが、本来結ばれるべき輪郭点間の距離よりも大きくなる。そこで、これら2点を
考慮して、不自然な三角形パッチが構成されるのを避けるために、三角形パッチを
構成する際に以下の条件を課す。

[条件] 同一輪郭線側に2頂点を持つ隣接する二つの三角形パッチが共通

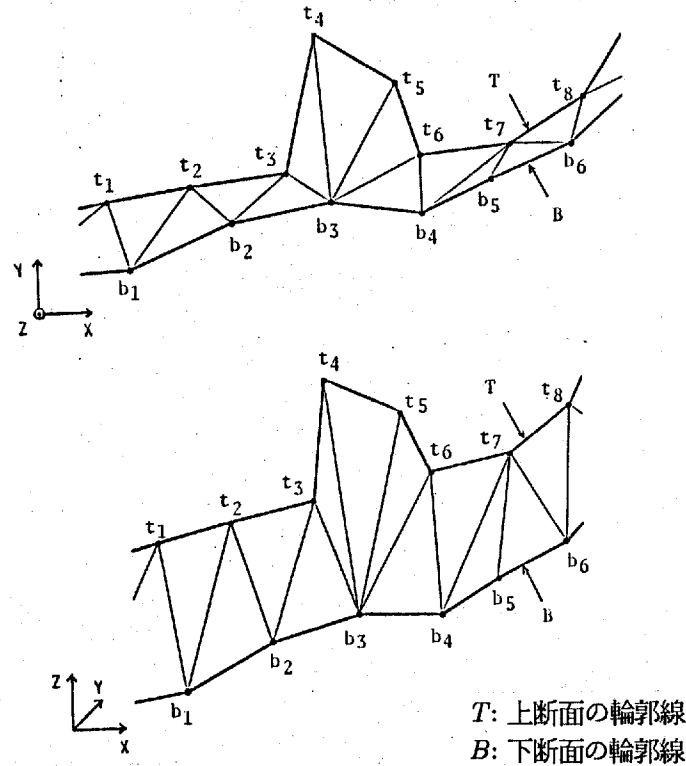


図 3.15: 条件を課した三角形化手法に大きな形状相違をもつ輪郭線を適用した例

の辺を持つ場合、その辺の長さは、この二つの三角形パッチの底辺側の
共通点から、相対する側の輪郭点までの線分のなかで、最短距離である。

この条件により、図 3.14 の線分 b_4t_3 は、線分 b_4t_6 よりも長いために、 t_3 と b_4 は結ば
れず、 b_3 と t_4 が結ばれる。このようにして三角形化を行った結果は、図 3.15 となり
適切な三角形パッチを構成する。

3.4.4 部分輪郭線の三角形化

部分輪郭線が挿入された部分の三角形化は、部分輪郭線の挿入されていない通常
の部分と分けて処理を行なう必要がある。

まず、部分輪郭線に対しては、図 3.16 の太線で示すように、隣接する部分輪郭線
から三角形パッチを発生させる。その後、その他の部分、すなわち通常の輪郭線に
対して、点 b_{k+1} と t_{l+1} から他方の点 b_{i-1} と t_{j-1} まで、反時計回りに三角形パッチを
発生させる (図 3.16 の実線部)。最終的に、間隙 (図 3.16 の破線部) を埋めるために、
左右の境界に三角形パッチを発生させる。すなわち、左側の間隙を例にとると、点
 b_{i-1} と b_i から出発し、境界上での近い方の点を選ぶことにより三角形パッチ発生さ

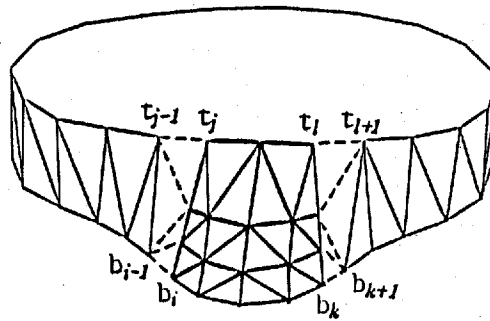


図 3.16: 部分輪郭線を含む三角形化

せる。右側の間隙も同様な方法で埋められる。

3.5 切断面表示

3次元多重構造物の内部構造をさらに詳細に観察するために、物体を任意の凸多面体で切り取り、その切口を併せて表示する手法について述べる。

3.5.1 三角形パッチの切断

切断面表示の基本的な考え方は、再構成された物体から、切取りを行う凸多面体と交わる部分を取り除き、切口を表示するために、その部分に切断面を発生させることである。

切取りを行うために、まず、物体を構成している三角形パッチを切取り多面体との関係により、次の3タイプに分類する。

- (1) 三角形パッチが切取り多面体に包含されない場合
- (2) 三角形パッチが切取り多面体に包含される場合
- (3) 三角形パッチと切取り多面体が交差する場合

(1) の三角形パッチはそのまま表示される。(2) のものは表示されないで、物体を構成している三角形パッチの集合から削除される。(3) の三角形パッチは、切取り多面体内部を削除するために、切取り多面体を構成する面(カット面)と三角形パッチの辺との交点数と、切取り多面体内に存在する三角形パッチの頂点数の両者を用いて、図 3.17 に示すように7タイプに分類される。交点数が2のタイプ2とタイプ3は、切取り多面体の稜線が三角形パッチと交わるか否かにより、さらにタイプ2'とタイプ3'に分類される。

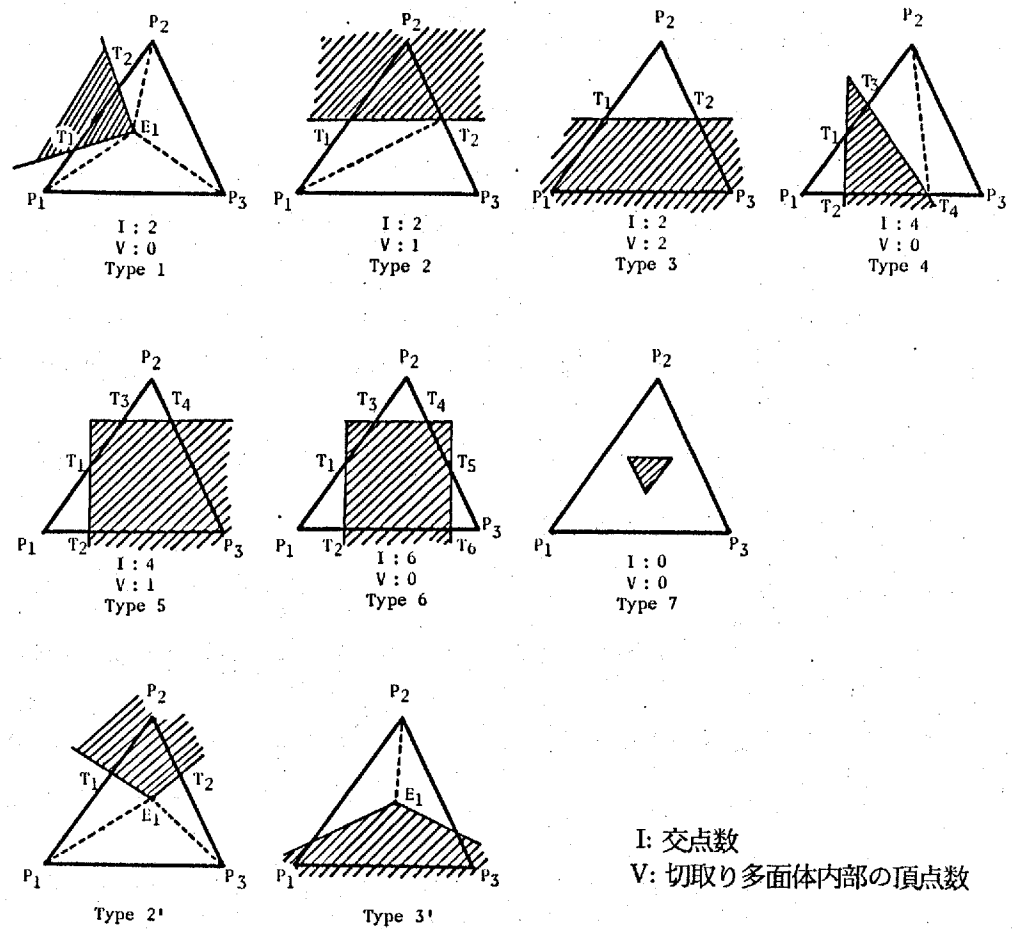


図 3.17: 切り取り多面体によって分割される三角形パッチの分類

図 3.17 に示すように、それぞれのタイプの三角形パッチに応じて斜線部分が取り除かれる。ただし、タイプ 7 については、取り除かれる領域は非常に小さいため、削除領域を無視しても表示画像の精度にはほとんど影響がない。残った領域を、図 3.17 の点線で示したように新しい三角形パッチに分割する。

3.5.2 切断面の作成

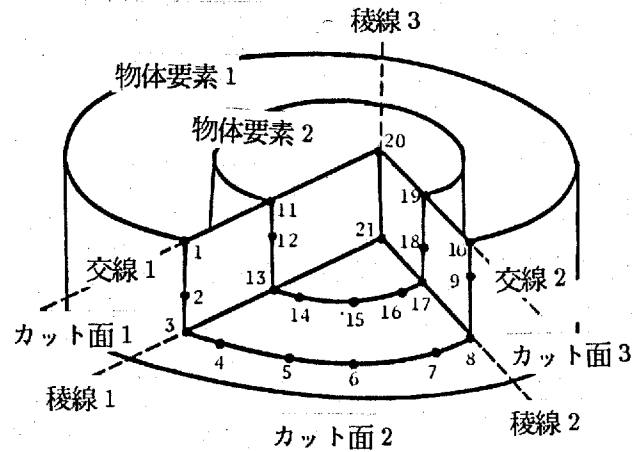
切断面の表示を行うために、前節で述べた三角形パッチと切取り多面体との交点を用い、各物体要素の切口を構成する多角形を作成する。この多角形は、後に述べる優先順位テーブルの作成を効率よく行うために、断面に挟まれた層を単位として作成する。以下に、一つの層における切口の多角形の構成方法について述べる (図 3.18 参照)。

- (1) 各物体要素ごとに、三角形パッチとカット面との交点の繋り (交点列) を求める。
- (2) 切取り多面体の稜線ごとに、三角形パッチとの交点、稜線と断面との交点、および切取り多面体の頂点を繋いだ稜線上の交点列を作成する。
- (3) カット面と断面との交線ごとに、三角形パッチとの交点、および、切取り多面体の稜線と断面との交点を繋いだ交線上の交点列を作成する。
- (4) 稜線上の交点列と交線上の交点列を用いて、各カット面のエッジを構成する交点列を作成する。
- (5) (4) の交点列テーブルを用いて、(1) の交点列の端点から交点列どうしの繋りを調べることにより、各物体要素の切口を構成する点列を求める。

3.6 半透明ステレオ表示

これまでに述べてきた手法により微少な三角形パッチの集合として再構成された 3 次元物体を、その内部構造が容易に把握できるように、物体要素の表面を疑似的に着色した半透明な面として表示を行う。この手順は概略次のステップからなる。

- (1) 視点、および注視点の設定
- (2) 三角形パッチの各頂点の透視変換



(1) 交点列テーブル

要素 1	1 - 2 - 3
	3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8
	8 - 9 - 10
要素 2	11 - 12 - 13
	13 - 14 - 15 - 16 - 17
	17 - 18 - 19

(2) 稜線上の交点列テーブル

稜線 1:	3 - 13 - 21
稜線 2:	8 - 17 - 21
稜線 3:	20 - 21

(3) 交線上の交点列テーブル

交線 1:	1 - 11 - 20
交線 2:	10 - 19 - 20

(4) カット面のエッジを構成する交点列テーブル

カット面 1:	1 - 11 - 20 - 21 - 13 - 3
カット面 2:	3 - 13 - 21 - 17 - 8
カット面 3:	10 - 19 - 20 - 21 - 17 - 8

(5) 切口の多角形を構成する点列

要素 1	1 - 2 - 3 - 13 - 12 - 11 - 1
	3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 17 - 16 - 15 - 14 - 13 - 3
	8 - 9 - 10 - 19 - 18 - 17 - 8
要素 2	11 - 12 - 13 - 21 - 20 - 11
	13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 21 - 13
	17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 17

図 3.18: 切口を構成する多角形の作成

(3) 三角形パッチの面の前後判定

(4) 三角形パッチの面の色の決定

(5) グラフィックスディスプレイ上への表示

なお、ステレオ表示を行うために、(1)~(5)のステップを右目と左目について繰り返す。また、アニメーションを作成する際には、目の位置を少しずつ変えて(1)~(5)のステップを繰り返し、作成された画像をフィルムあるいはビデオにコマ撮りする。以下、(3)、(4)のステップについて詳述する。

3.6.1 優先順位テーブルの作成

半透明表示を行うには、目の位置からみて重なった面の後ろのものほど明るさを落とす必要がある。そのため、物体を構成している三角形パッチの面の前後判定が必要となる。提案手法においては、すべての面を優先順位(目に近いものほど優先順位は高いものとする)に並べたテーブルを作成する。ここで、各物体要素の表面は多数の微少な三角形の面により構成されているため、透視面に投影された場合、一つの三角形と重なる三角形は極めて少数である。したがって、すべての三角形の面について一度に前後判定を行い、優先順位テーブルを作成することは無駄であり、処理時間も非常に長くなる。

そこで、物体を構成する面を図3.19に示すように各断面ごとにグループ分けする。このグループの優先順位は、目の位置が与えられればきわめて簡単に求められる。たとえば、図3.19のように目の位置の z 座標成分が断面間 i に存在すれば、グループの優先順位は i が最も高く、 i から上あるいは下へ遠ざかるにつれて優先順位は低くなる。このグループの優先順位に従い、そのグループ内に存在する面の前後判定を行い、テーブルに優先順位の高い面からその面番号を格納する。

グループ内での面の前後判定についても、三角形パッチを連続した複数個の表と裏のグループに分けて前後判定を行う。なぜなら、一つの層を構成する三角形パッチを、図3.20のように、視点からみて連続した複数個の表と裏のグループに分けたとき、そのグループ内の三角形パッチどうしが重なることはないからである。したがって、一つの層の中では、三角形パッチどうしの前後判定を一つずつ行なうのは無駄であり、三角形パッチを視点からみて連続した表と裏のグループに分け、そのグ

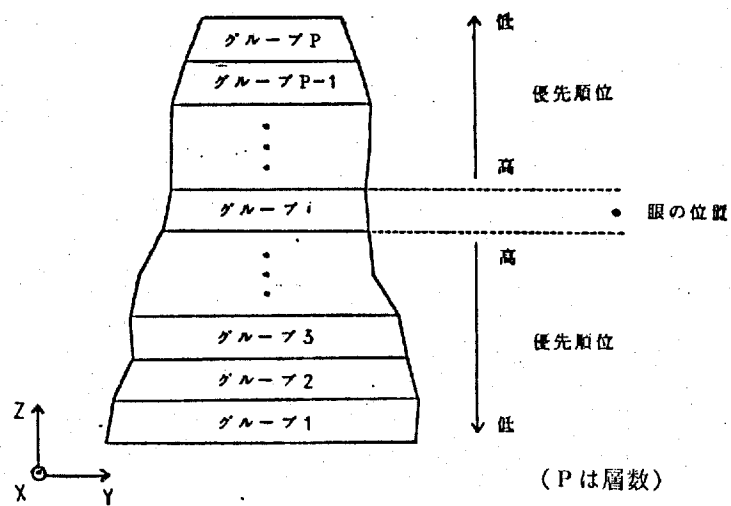


図 3.19: 断面ごとにグループ分けを行う前後判定

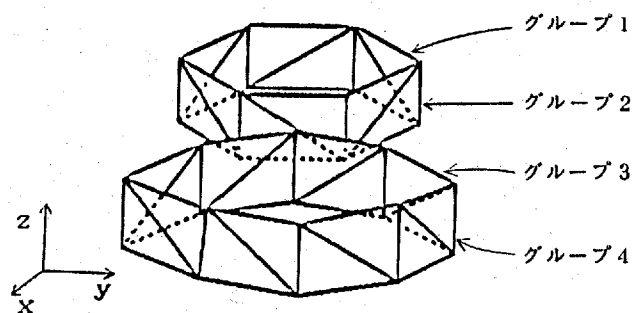


図 3.20: 視点からみた表裏による三角形パッチのグループ化

グループごとの前後判定を行なえばよい。グループどうしの優先順位は、グループ間で重なり合う三角形パッチを、各々のグループから1枚ずつ取り出し、その代表の三角形パッチどうしの前後判定を行なうことにより決定する。以下に、その具体的なアルゴリズムについて述べる(図3.21参照)。

- (1) まず、双方のグループを、リーフが各三角形パッチに対応するように、ルートからグループを2分割してツリーを作る。
- (2) 一方のルート B で代表される三角形パッチの集合を対象にして、他方のグループ A の各ノードで代表される三角形パッチの集合について、投影面上での x, y 方向の MINIMAX テストを行い、重なる可能性がある三角形パッチを求める。この三角形パッチの探索は、深さ優先探索で行い、ルート B と重なる可能性のあるグループ A のリーフ(一枚の三角形パッチに相当)を見つけるまでサーチする。
- (3) もし、重なる可能性のあるリーフが無ければ、そのグループどうしは重なることはない。
- (4) 重なる可能性のあるリーフを見つけたなら、グループ A の探索は一次中断する。そして、グループ A のそのリーフを対象にして、相手のグループを同様な方法でサーチして、重なり合う可能性のあるグループ B のリーフを求め、これらのリーフを各々のグループの代表とする。
- (5) 各々のグループの代表として選ばれた三角形パッチどうしが実際に投影面上で重なるか否かを、透視変換された三角形パッチの頂点座標から判定する。
- (6) 各々のグループの代表として選ばれた三角形パッチが、重ならないと判定されたならば、処理(4)において中断していた次の段階から探索を再開する。重なれば、そのパッチどうしの前後判定を行い、その判定結果をグループの前後関係とする。

すべてのグループに優先順位が付けられたとき、処理中の層内の三角形パッチの優先順位テーブル作成を終了する。

層内において三角形パッチごとに前後判定を行なった場合と、層内においてもグループによる前後判定を行なった場合との処理時間の比較を表3.1に示す。これらの

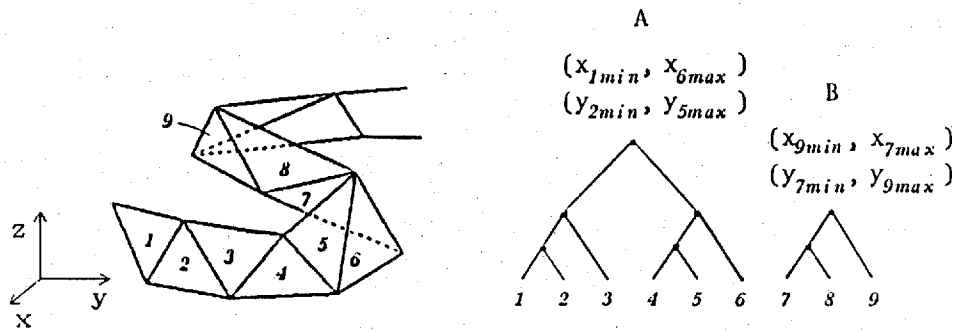


図 3.21: 三角形パッチのグループ化とツリー

表 3.1: 優先順位テーブル作成時間の比較

例 1	輪郭点数	三角形パッチ数	CPU 時間 [秒]
層内は三角形パッチごとに前後判定	3725	7163	54.7
層内もグループ化を行い前後判定	4454	8641	15.6
例 2	輪郭点数	三角形パッチ数	CPU 時間 [秒]
層内は三角形パッチごとに前後判定	8756	17453	97.6
層内もグループ化を行い前後判定	8506	16581	30.1

例により、層内においてもグループによる前後判定を行えば、各パッチごとに前後判定を行なう場合に較べて、優先順位テーブル作成時間を、ほぼ 1/3 に短縮できることがわかる。

このように、物体を構成する面を各断面によりグループ分けでき、そのグループの優先順位も極めて簡単に求められるという性質を利用することにより、さらに、同一断面内においては、視点からみて連続した表裏のグループに分け、そのグループの優先順位を効率よく求めることにより、優先順位テーブルの作成時間を大幅に短縮できる。

3.6.2 半透明ステレオ表示法

物理現象に即した半透明表示は、必ずしも観察に適した画像を生成するわけではない。すなわち、半透明物体を通して観察を行うと、屈折により形状の歪みが生じ、また、半透明物体表面の反射により内部が観察し難くなる。そこで、物体の内部構

造を把握し易いように、半透明物体の反射、屈折を無視し、透過光成分のみを考慮した仮想的な半透明モデルを設定し、そのモデルに基づいて表示を行う。

- (1) 半透明感を強調し、かつ物体要素の形状を把握し易くするために、物体要素の正面部分の輝度を抑え、周辺に行くほどその要素の輝度が高くなる関数 $1/\cos\theta$ を用いる。ただし、 θ は面の法線と視線のなす角である。このモデルにより、各面の色成分を次式で決定する。

$$I_{k\theta} = \frac{I_{k0}}{\cos(\theta - \alpha)}, \quad (k = R, G, B). \quad (3.3)$$

ここで、 $I_{k\theta}$ は面の色成分、 I_{k0} は $\theta = \alpha = 0$ のときの面の色成分、 α は面の明るさの位相を変化させるパラメータ角である。

- (2) 目の位置から見て重なり合う物体要素の前後関係を明らかにするため、各面の明るさは物体要素 i を構成する面を 1 回通過すると、どの色成分も t_i 倍となる。ただし、 t_i は物体要素 i の透過率である。

- (3) 物体要素の前後関係をわかりやすくするために、物体を取りまく媒質中において、面の明るさは距離の 2 乗に比例して減衰させる。

したがって、各面の色成分 I_k は、透過率と距離による減衰により次式となる。

$$I_k = K \frac{I_{k\theta}}{r^2} \prod_i t_i, \quad (k = R, G, B). \quad (3.4)$$

ここで、 K は補正係数、 r は任意に設定された基準点から面までの距離、 \prod_i は光線が透過する面についての t_i の乗算が行われることを表わす。

このモデルの妥当性を確かめるために、簡単な円筒モデルを半透明ステレオ表示し、その立体視を行った。その結果、得られた画像は十分透明感があり、物体の 3 次元構造も容易にとらえることができた (図 3.22 参照)。

物体を三角形パッチのままグラフィックディスプレイ上へ表示すると、無用の皺を生ずる。これを防ぐために、各頂点での法線ベクトルをその頂点を取り囲む面の法線ベクトルの平均とし、三角形パッチ内の法線ベクトルを、その 3 頂点の法線ベクトルから線形補間して求める Phong のスムーズシェーディング法 [28] を適用する。

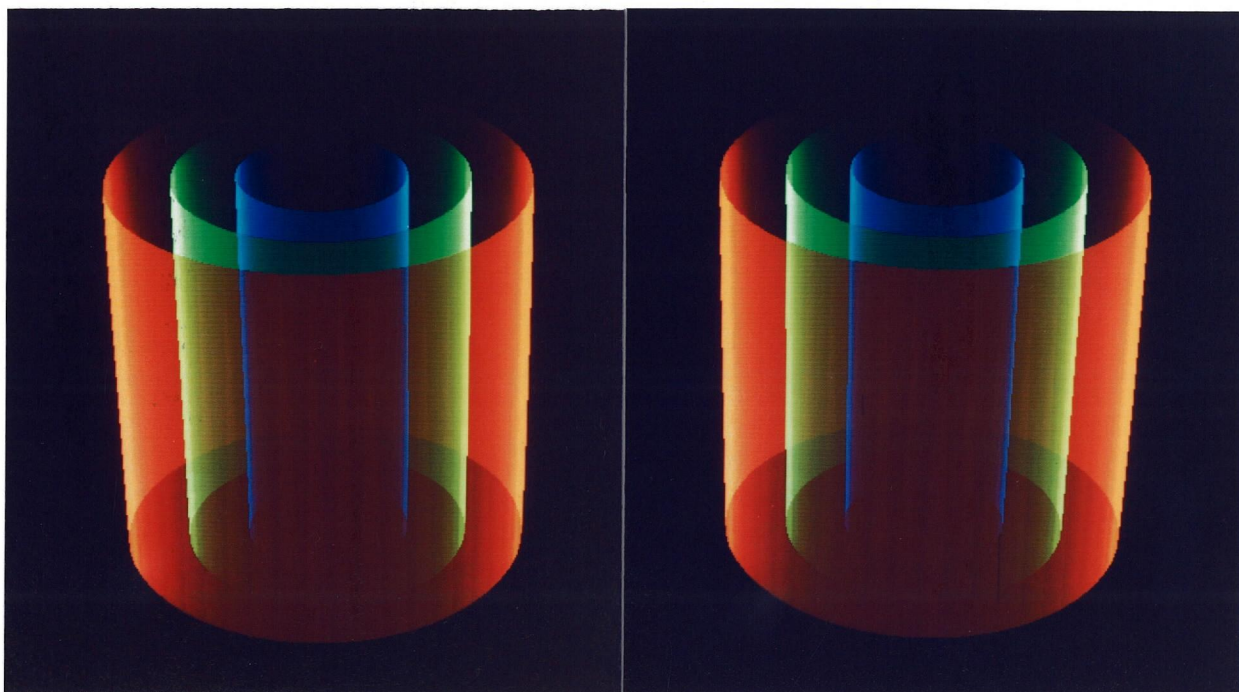


図 3.22: 円筒モデルの半透明ステレオ表示

3.7 適用例

半透明表示手法によって多重構造物を、その内部構造も含めて効果的に観察するための表示方法として、解剖学の研究に使用されているマウス胚子のデータを用い、表示例をあげて説明する。

(i) 物体全体を内部構造も含めて観察し易くステレオ表示を行ったものを図 3.23 に示す。この例では、面の明るさの位相を変化させるパラメータ角 α を零、物体要素の透過率 t_i ($i = 1 \sim 4$) をすべて 0.6、距離による減衰の割合を制御する基準点を目の位置と物体との中間点に設定している。

この表示の場合、物体要素の正面部分が観察しにくい場合がある。その場合には、半透明感は多少損なわれるが、面の位相を変化させるパラメータ角 α を 90° に近づける。図 3.24 に示すように、物体表面の形状がわかりやすい画像が得られる。

(ii) 物体が奥行き方向に長い形状で、特に前面部分を観察する場合、後方の面により観察し難くなる場合がある。そのような場合は、基準点を目の位置に近づけると、距離による減衰効果が強まり、後ろの部分に惑わされることなく観察が行える (図 3.25 参照)。

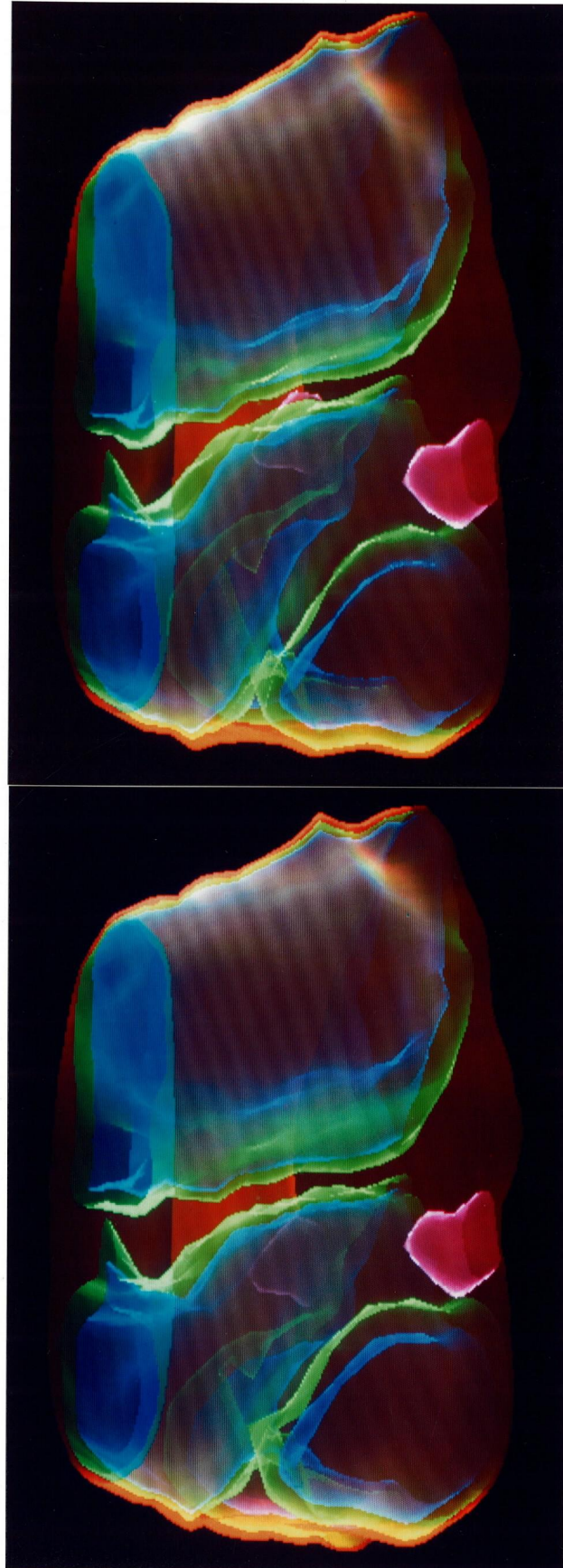


図 3.23: 半透明ステレオ表示例

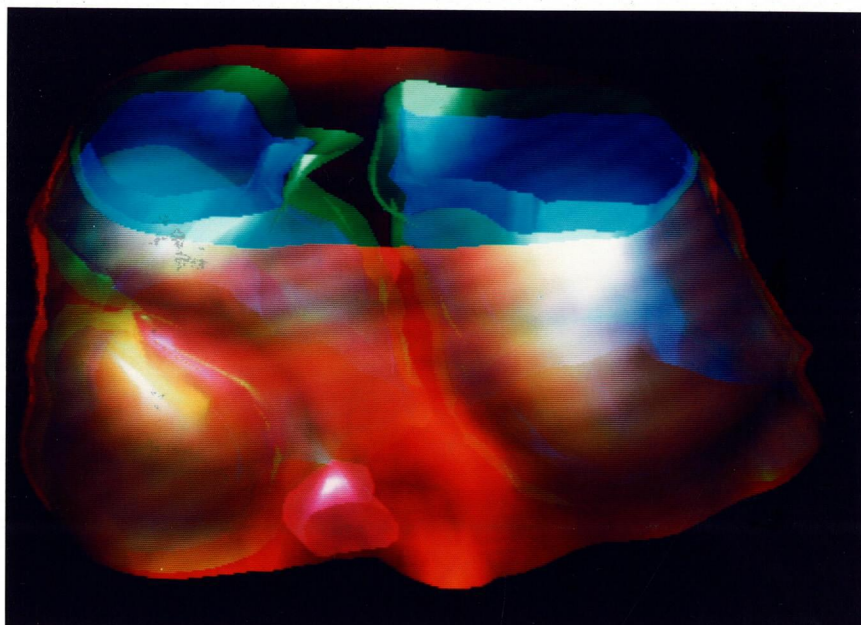


図 3.24: 面の明るさの位相を変化させた表示例

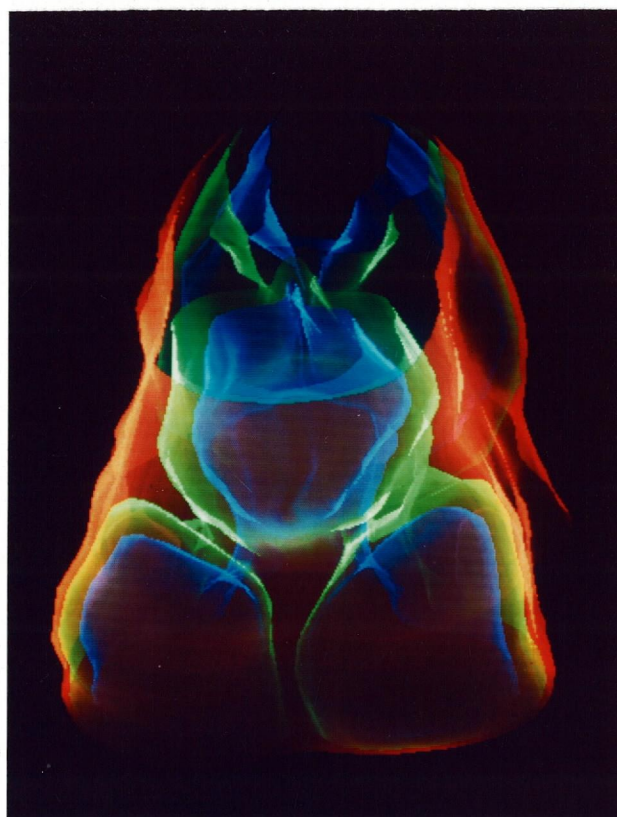


図 3.25: 距離による減衰効果の表示例

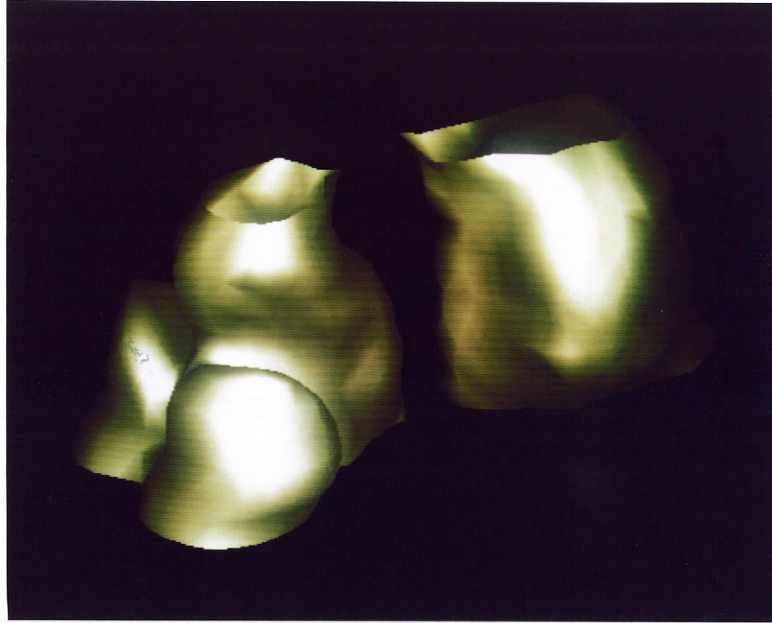


図 3.26: 物体要素抽出表示例

(iii) 物体内部の要素の多重度が低い場合には、透過率は小さな値でよい。しかし、要素の多重度が増し、内部の物体要素まで観察する場合は、透過率を大きくする必要がある。このとき、透過率をあまり大きくし過ぎると、物体要素の前後関係が把握し難くなるため注意を要する。また、内部にある特定の要素に注目する場合、その要素の透過率を零に近づけると、その物体要素が観察し易くなる。透過率を零とすると、当然のことながら物体要素は完全な不透明体となる。

特定の物体要素の形状を観察したい場合、その物体のみを抽出して表示すると便利である。その際、その物体要素の透過率を零として不透明体とし、面の明るさの位相を変化させるパラメータ角 α を 90° に近づけて表示を行うと、従来の陰影表示に相当する画像が得られ、形状の把握が容易となる(図 3.26 参照)。また、物体から任意の物体要素を除いて表示を行うことも可能である。

(iv) マウス胚子の頭部を直方体の一部で切り取って表示した例を図 3.27 に示す。また、切口を併せて半透明表示した例を図 3.28 に示す。これらの図に示すように、切断面での各要素の形状を観察することができ、内部構造を詳細に把握することができる。

空間上における物体内部の要素の位置をより正確に観察するには、図 3.29 に示すような 3 次元スケールを併せて表示することにより、位置の数量的把握も可能である。

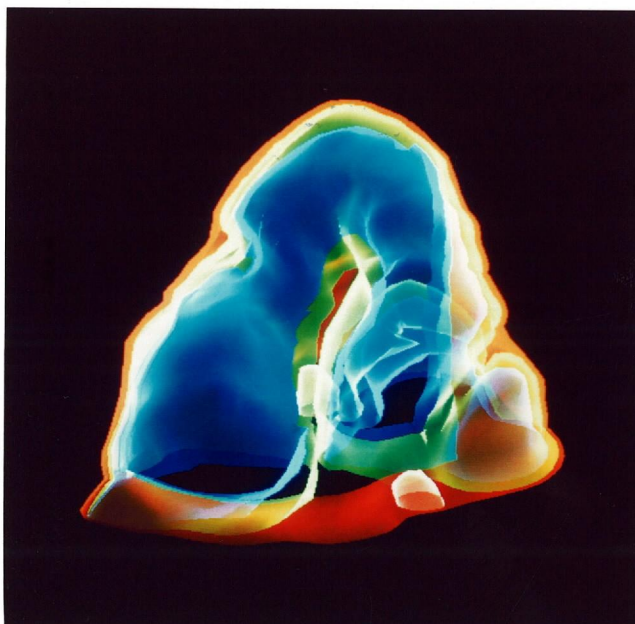


图 3.27: 切断表示例

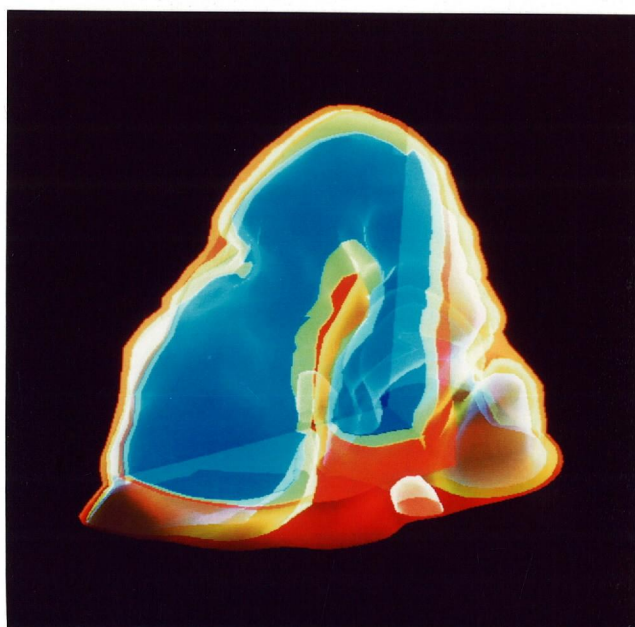


图 3.28: 切断面表示例

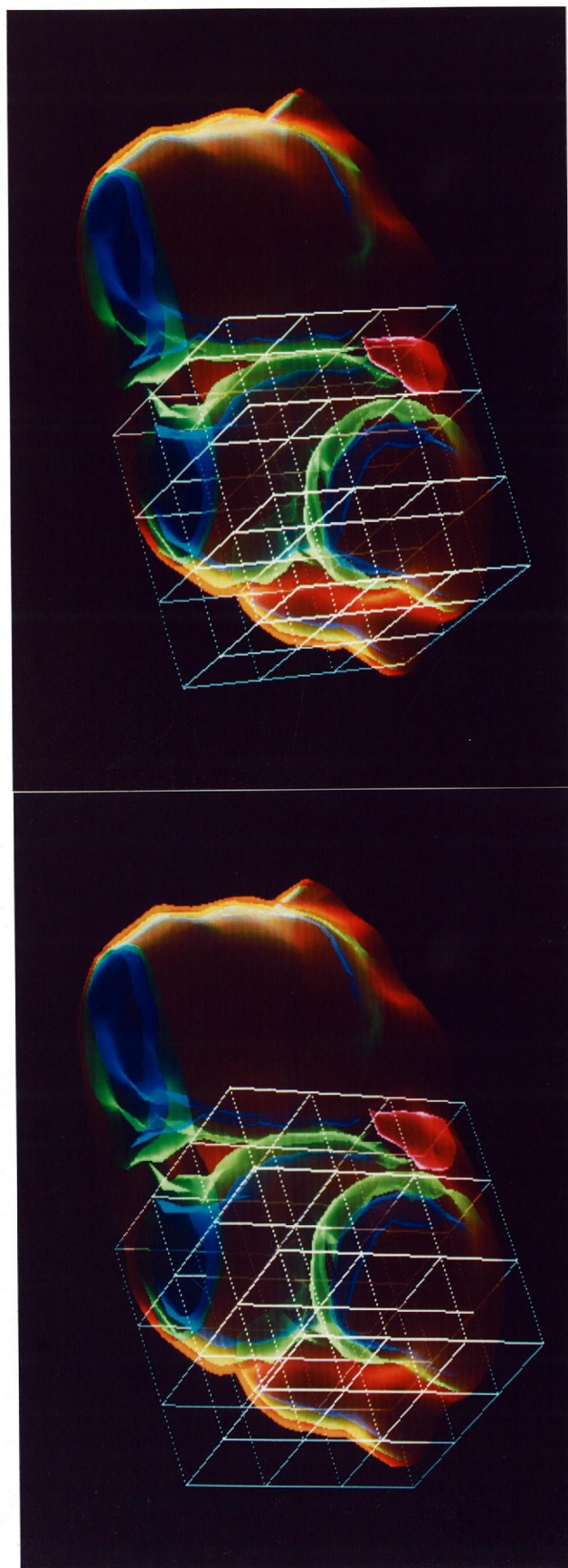


図 3.29: 3 次元スケール表示例

以上の機能を組み合わせて使うことにより、観察に適した表示画像を得ることができる。

(v) 高精度再構成を行うため、輪郭線、あるいは部分輪郭線の挿入を制御する係数 k_1 , k_2 の値を検討する。これらの係数値を適切な値に設定したとき、提案手法は原形に近い物体を精度よく再構成する。7 μ m ごとの断面にスライスされた、628 枚の断面から成るマウス胚子データを用いる。主な要素は、皮膚、神経管、消化器系などから構成されている。

図 3.30、および図 3.31 に、係数 k_1 , k_2 の効果を示す。図 3.30 は、簡易隠線消去 (裏の面を消去) を用いて、三角形パッチの線画表示を行なったものであり、図 3.31 は図 3.30 の (a), (b), (c), (d) に示した再構成物体を、それぞれ陰影表示したものである。図 (a) は一定断面間隔を用いる方法で、30 断面ごとの輪郭線を用い、マウス胚子の皮膚を再構成している。すなわち、追加断面はまったく挿入されていない。断面 330 ~ 360 間においては、要素が三つ以上に分岐しているため、三角形パッチを発生することができない。ただし、図 3.31 (a) においては、断面 340, 352 を人為的に挿入して再構成を行い、陰影表示を行なった。図 (b) は、係数 k_1 を 1.0 に設定し、追加断面を自動的に挿入した例である。ここでは、部分輪郭線は挿入されていない。図 (a) と比べると図 (b) では、分岐部分の形状 (④, ⑤, ⑥) がより忠実に再構成されているのがわかる。図 (c) は、部分輪郭線を用いたものであり、係数 k_2 を 2.5 に設定した。⑦, ⑧ の部分で再構成された形状が改善されている。図 (d) では、 k_2 を 0.5 に設定した。特に、①, ②, ③, ⑦ の部分で形状が改善されている。これらの図より、部分輪郭線を使えばより忠実に物体を再構成することができることがわかる。

前足部分を拡大したものを図 3.32 に示す。図 3.32 の (a), (b), (c), (d) のそれぞれの係数は、図 3.30、図 3.31 のものと同一である。これらの図からも、提案手法の有用性がわかる。

提案手法と、一般的に用いられている一定断面間隔による再構成手法の比較を行うために、2 つの要素 (皮膚と神経管) を含むステレオペアの画像を作成する際に要した三角形パッチ数と計算時間 (CPU 時間) を表 3.2 に示す。提案手法では、図 3.31 (d)、図 3.32 (d) の場合と同じパラメータ値を用い、一定断面間隔の場合については、それと同程度の質の画像を得るために、7 断面ごとの輪郭線を使用して再構成を行った。表 3.2 から、提案手法は、メモリと計算時間の両者において、優れてい

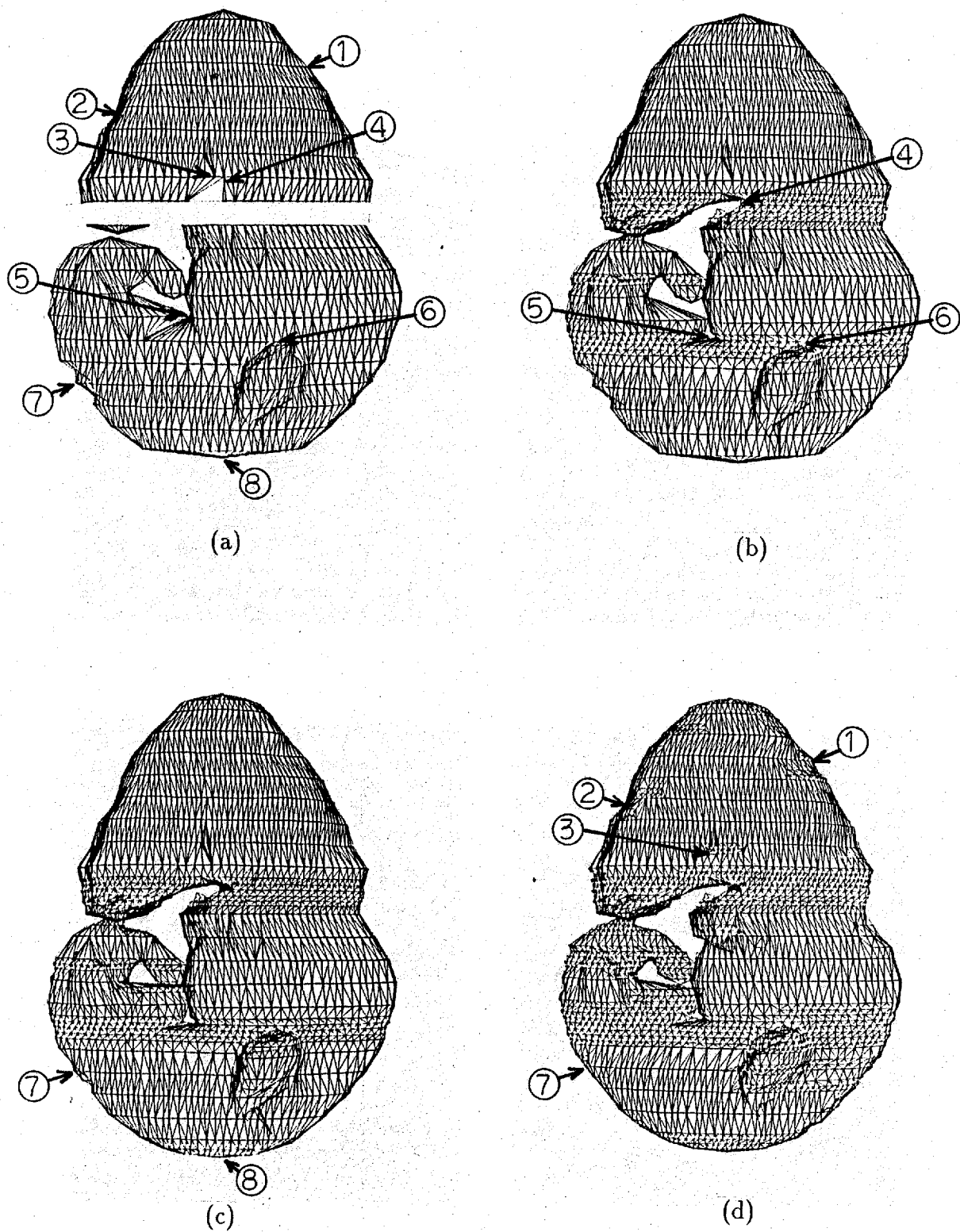
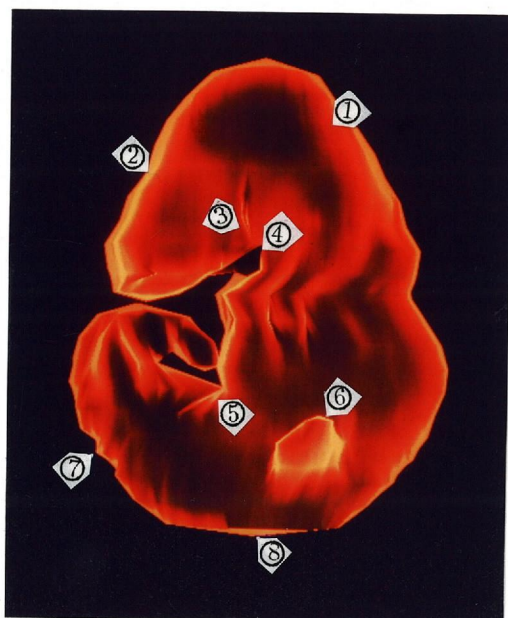
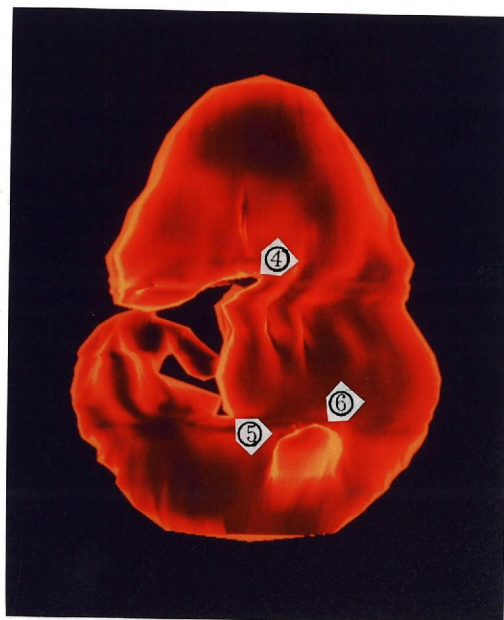


図 3.30: 係数 k_1, k_2 の効果 (三角形パッチ)



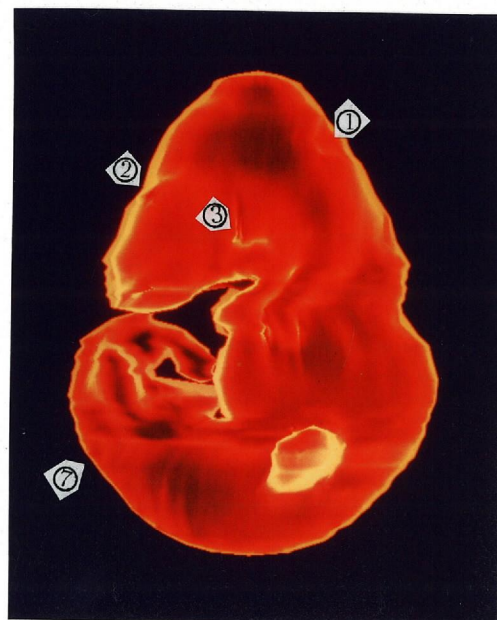
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.31: 係数 k_1 , k_2 の効果 (陰影表示)

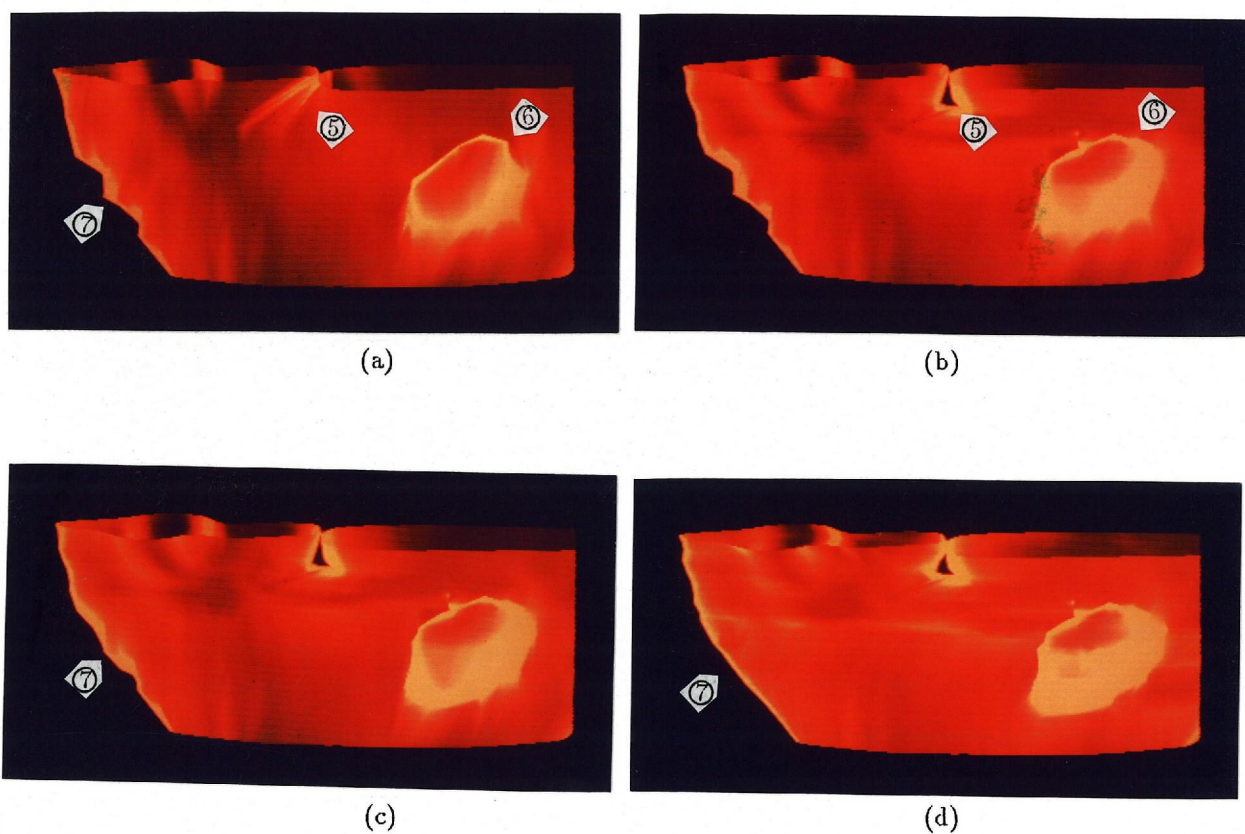


図 3.32: 前足部分の拡大

表 3.2: 提案手法と一定断面間隔による手法の比較

手 法	三角形パッチ数	CPU 時間 [分]		
		再構成	表示	合計
一定断面間隔	31,859	1.0	20.1	21.2
提案手法	17,413	1.1	13.1	14.2

(使用計算機: 2.8 MWIPS)

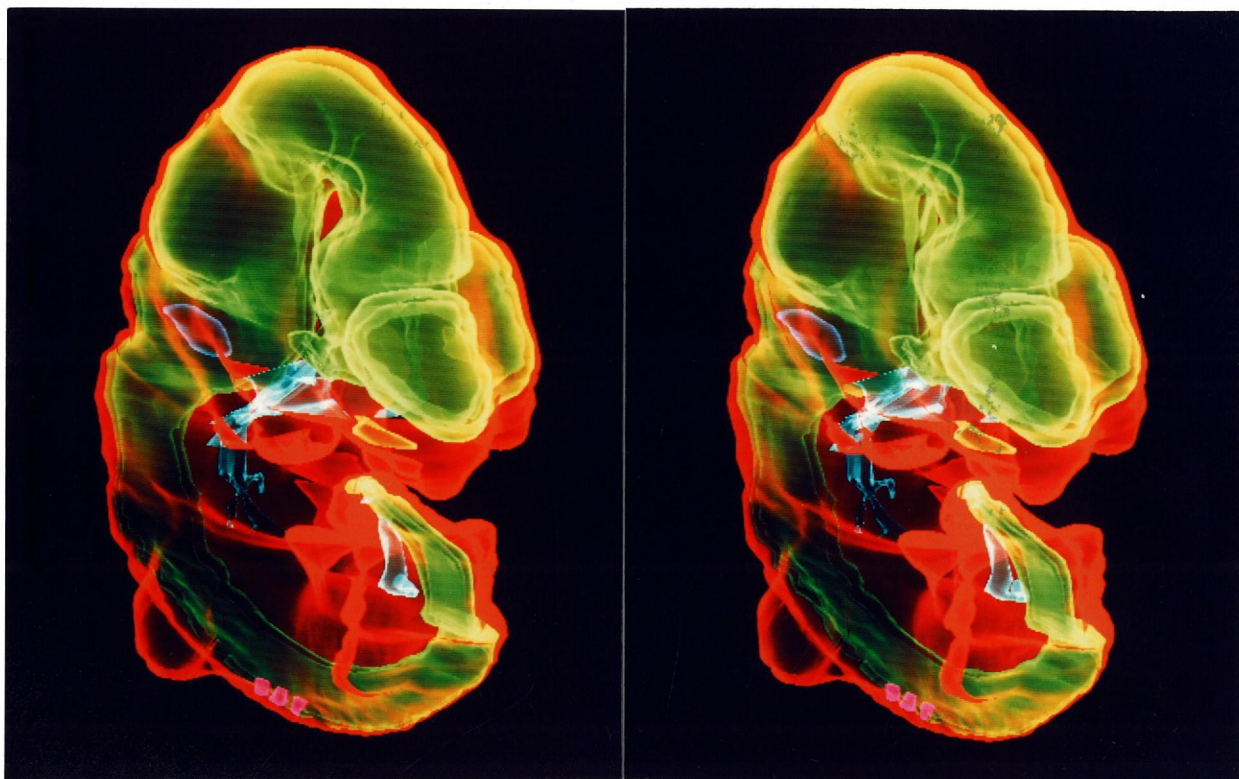


図 3.33: マウス胚子全身の半透明ステレオ表示

ることがわかる。また、提案手法において、物体再構成のために要する時間は、全体のわずか 7.7%に過ぎず、残りは表示（優先順位テーブル作成を含む）に要する時間である。優先順位テーブル作成に要する時間は、グループ内の三角形パッチ数の 2 乗に比例して増加し [47]、スキャン変換による表示に要する時間は、三角形パッチの総数に比例して増加する。これらのことから、大規模の複雑なデータになればなるほど、提案手法の有用性が増すことがわかる。

(vi) 図 3.33 は、マウス胚子の全身の半透明ステレオ表示例である。係数 k_1 および k_2 は、各々 1.0 と 0.5 に設定されている。赤、緑、水色、青、黄、ピンクで表示されたところが各々、皮膚、神経管、消化器系、耳胞、鼻、脊髄神経節である。外部形状とともに内部構造も容易に観察でき、立体視により、各要素の 3 次元的な位置の観察も可能である。このステレオ画像は、31,864 枚の三角形パッチで再構成されており、この画像を作成するのに必要な時間は、2.8 Whetstone MIPS のミニコンピュータを使用した場合、24.8 分（CPU 時間）であった。

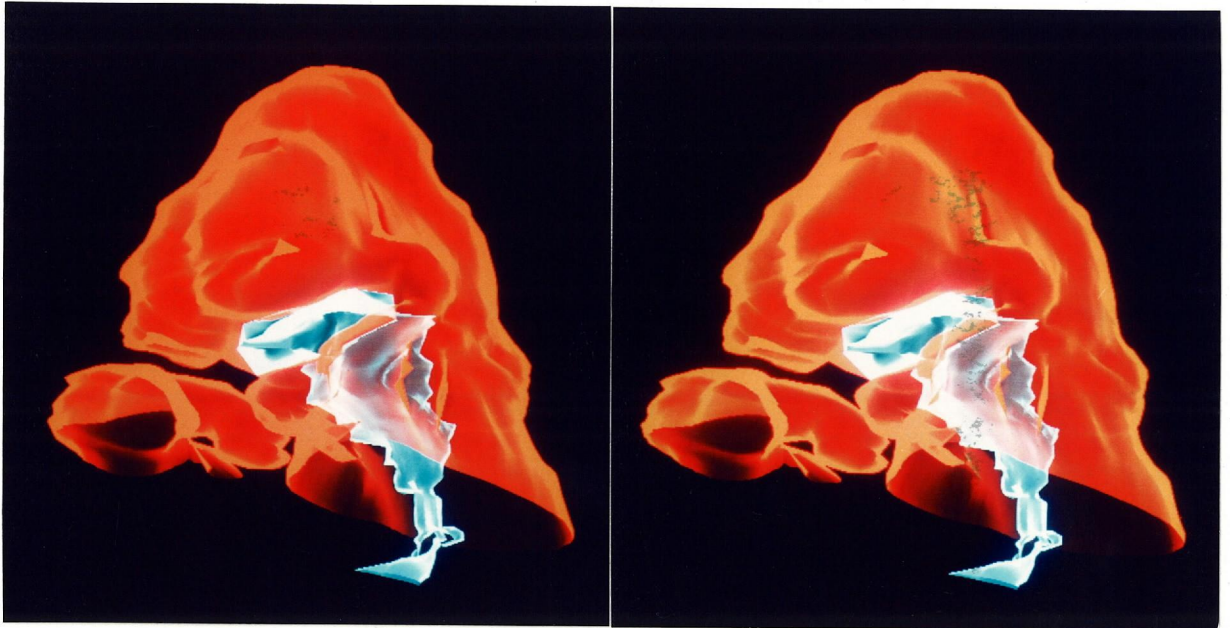


図 3.34: 開口部の例

(vii) 図 3.34は、皮膚と消化器系を抽出し表示したものである。口の部分は開口部として扱っている。消化器系の透過率を下げ視点を変更することにより、口の部分を観察しやすく表示している。

3.8 結言

多重構造物の内部構造を可視化するために、断面輪郭線から物体を原形に忠実に再構成し、半透明ステレオ表示を行う手法について述べた。

輪郭線から物体を構成するステップにおいては、分岐、合流を持たない小物体の概念を導入したデータ構造を用いることにより、幾重にも重なり合った輪郭線から物体を再構成することができる。形状の複雑さに応じて再構成を行う空間を分割する方法を用いることにより、高精度再構成を効率良く行うことができる。また、溝状の分岐、合流をもつ物体要素の自動再構成法、開いた輪郭線を取り扱う手法、上下の断面の輪郭線の形状にかなり相違がある場合でも適切な三角形化を行う手法を示した。

内部構造の可視化のための再構成物体表示法として、半透明表示のための優先順位テーブルの高速作成法、観察に適した半透明感のあるステレオ表示画像を得る手法を示した。また、透過率、距離による減衰などのパラメータを変化させ、物体要素

を選択的に表示する機能を用いることにより、観察目的に適した表示を行うことができることを示した。さらに、内部構造をより詳細に観察するために、再構成された物体を凸多面体を使って切り取り、切口の形状を観察するために切口に面を張って表示を行う方法を示した。

第 4 章 空間密度分布データの可視化

本章では、建造物のデザイン、事前予測、周囲環境との調和性の評価のための未開発の時点における完成予想画像作成問題を取りあげ、3次元空間に分布した密度データと、それによる周囲環境への影響を考慮した可視化手法を提案する。すなわち、大気中の微粒子の密度分布を考慮した霧や光跡の効果の表示法と、屋外環境における3次元物体のリアルな陰影表示法について述べる。

また、視環境評価におけるコンピュータグラフィックス画像の信頼性について考察する。

本章の適用例で使用した建造物のデータ、ならびに統計集計は、大阪市土木技術協会の御協力によるものである。

4.1 概説

3次元空間に分布した密度データを可視化する手法は、大気中の微粒子による霧や霞の表示や、太陽光がその空間を通過する際に生じる散乱、吸収を考慮して現実に即したシーンを表示する問題の中で数多く取り扱われてきた[10]-[14],[50, 56]。本研究では、空間密度分布データの可視化の一手法として、大気中に分布する微粒子と、それによる周囲環境への影響を可視化する問題を取り上げる。

本章では、まず、大気中の空気分子、水蒸気、塵などの微粒子の密度分布を考慮して、空間のモデル化を行った後、大気中の微粒子による霧の効果、および、大気中を太陽光が通過することにより生じる光跡の表示法について提案する。

さらに、大気拡散モデルを基に、微粒子の密度分布を考慮して求めた太陽光と空の色を、それぞれ、直射光、および天空光として用いた屋外環境における3次元物体の陰影表示法を提案する。提案手法を用いることにより、幅広い気象条件下での、建造物の明度、色相、彩度の変化を表現し、加えて、霧や霞などの大気中の微粒子の影響も含めたリアルな画像を作成することができる。

また、コンピュータグラフィックス画像の視環境評価メディアとしての信頼性に関する考察を行い、提案手法が、建造物のデザイン、事前予測、周囲環境との調和性の評価用ツールとして有用であることを確認した。

4.1.1 空間密度分布データの可視化に関する研究概況

3次元空間中に分布した塵などの微粒子と光との相互作用を表示する方法として、Blinn は、微粒子による光の一次散乱を考慮したモデルを提案し、氷の粒で構成されている土星の輪の表示を行った [10]。そして、さらに広い範囲での現象の可視化を行うために、影の効果や、高反射率の微粒子による多重散乱を考慮したモデル化の必要性について議論した。この手法は微粒子の密度が一定で、かつ、比較的反射率が低い場合に限定される。

Kajiya らは、空間中に分布した微粒子による自然現象の可視化を行うために、微粒子の密度を3次元格子を用いてモデル化し、雲のような高反射率の微粒子が存在する場合でも、現実には即した表示が行えるように、多重放射散乱を考慮した手法 [11] を提案した。

Max は、密度一定の雲や霧による一次散乱を考慮したモデルを用い、表示の高速化を行うために、対数関数の多項式近似を行った [12]。さらに、表示の効率化を行うために、視線を軸とした円筒座標系を用いる方法を提案し、自然光による雲間からの光束や、木漏れ日の表示を行った [13]。

西田らは、大気中の微粒子を照らす光源の配光特性を考慮した霧の中の光跡の表示手法 [14] を提案した。さらに、表示の効率化のために、イルミネーションボリュームという概念を導入した局所計算法を併せて提案した。この手法では、微粒子の分布を、密度一定の層状の空間を積み重ねることによりモデル化している。

大気中に分布した微粒子による周囲環境への影響を可視化するには、光源、すなわち太陽の直射光と、空全体からの光(環境光)が、非常に密接に関係する。直射光と環境光により照射された3次元物体の表示に関する研究概況を以下に概説する。

直射光に関しては、1970年代の平行光線から、1980年代に入って点光源 [48] だけでなく、線光源 [48]、面光源 [49] など種々の人工的な光源によって照らされた3次元物体の陰影表示手法が開発されてきた。そして、1987年には、Klassen により、大気中の微粒子による太陽光の散乱、吸収を考慮した大気拡散モデルによる太陽の色と、空の色彩表示法 [50] が提案された。さらに、稲蔭は、大気中の雨粒による光の反射、屈折を併せて考慮することにより、虹の効果を近似表示する方法 [51] を提案した。しかし、これらの手法は、環境光を厳密に考慮していないために、現実には即した画像を作成するには不十分である。

環境光に関しては、1970年代においては、一様な環境光を与える方法や、視点と同じ位置に二次的な光源を置く簡易的な方法が用いられていた。屋内の環境光をより厳密に求めるために、Cohenらと、西田らによって、物体相互間の反射特性を考慮した、いわゆる Radiosity 法 [52, 53] が提案された。さらに、Immelらと、Kajiyaによって、物体の鏡面反射特性を考慮した表示法 [54, 55] が開発され、Rushmeierらにより、屋内の空気中の微粒子による光束の表示を含めた Radiosity 法 [56] が提案された。一方、西田らは、屋外環境における環境光、すなわち、天空光を考慮した陰影表示法 [57] を提案した。しかし、西田らの提案した方法では、大気中の微粒子による光の吸収、散乱を考慮していないため、物体の色相の変化や、霧や霞による彩度の変化を表現することができない。

4.1.2 提案手法の概略

本研究では、自然界における大気中の微粒子の密度分布を考慮して空間のモデル化を行い、Klassen による大気拡散モデルを基に、スペクトル分布を考慮した太陽光と空の色を求める。そして、それらをそれぞれ、直射光および天空光として用い、大気中の微粒子による霧の効果、および光跡表示を行う。

直射光による光跡の表示は、光源を平行光線として扱うことができるため、視線上の散乱光を求める際に解析的積分を用いることができる。天空光による場合は、計算の効率化のために、微粒子の散乱を一様散乱とし、かつ、天空光に対する遮蔽物体を考慮しない条件のもとで、台形積分を用いて表示を行う。

大気中の微粒子による周囲環境への影響を可視化するために、Klassen の大気拡散モデルを基に求めた太陽光と空の色を直射光および天空光として用い、鏡面反射を考慮した 3 次元物体の陰影表示法を開発した。これにより、屋外環境において、スペクトル分布を考慮した現実 に即した画像を作成することが可能となる。

4.2 微粒子の密度分布を考慮した空間のモデル化

4.2.1 大気拡散モデル

よく知られているように、大気に入射した太陽光は、オゾン層、空気分子、および、塵や水蒸気などの浮遊粒子 (エアロゾル) によって散乱、吸収される。オゾン層による可視光の吸収は、空気分子やエアロゾルによるものと比べて少ないので、一

般に無視できる。光の波長に比べて粒径の非常に小さな空気分子により、光はレーリ散乱を起こし、粒径が波長に近いエアロゾルにより、ミー散乱を起こす。そこで、大気中の微粒子の密度分布を、レーリ散乱を起こす粒子と、ミー散乱を起こす粒子に分けてモデル化を行う。

Klassen による大気拡散モデル (付録 D 参照) では、レーリ散乱を起こす粒子の分布を 2 層に分け、それぞれの層ではその粒子は一様に分布していると仮定している。しかし、実際には、大気の密度は地表ほど大きく、高度が上がるにつれて指数関数的に減少する。そこで、標準大気 (海面上の空気密度) に対する大気の密度比により空気分子の密度分布を求める。大気の密度比 ρ は、地表からの高さ h により、次式で表わされる。

$$\rho = \exp\left(-\frac{h}{H_0}\right). \quad (4.1)$$

ここで、 H_0 は、スケールハイト ($H_0 = 7994 [\text{m}]$) であり、大気を等密度と仮定した場合の大気の厚みに相当する。

Klassen の大気拡散モデルにおいて、ミー散乱を起こすエアロゾルの分布する空間は平面状の層をなすモデルを用いている。したがって、日の出や日没時のように太陽高度が低い場合には、太陽光がエアロゾルの分布している空間を通過する距離が無限大となり、現実と大きくかけ離れる。そこで、上述の大気の分布と同様に、エアロゾルの分布を球面状に層をなしたモデルとすることにより、この問題を解決する。地球規模のマクロ的見地からみると、エアロゾルの密度分布もまた、空気分子と同様に、地上からの高さに対し指数関数的に減少し、その減少する割合は空気分子とは異なることが知られている。したがって、ミー散乱を起こすエアロゾルの密度分布は、式 (4.1) のスケールハイトを、 $H_0 = 1.2 [\text{km}]$ [58] として求める。

4.2.2 霧のモデル

高度により密度の異なる霧を表示するために、空間を曲面を用いて二つの層に分け、それぞれの層内では光跡を引き起こす微粒子の分布は一様としてモデル化する手法 [14] が、提案されている。しかし、光跡あるいは霧を発生させる微粒子、すなわち水蒸気とエアロゾルの分布は、地上高に対して指数関数またはそれに近い関数で変化することが知られている。したがって、文献 [14] の手法では、ドライアイス

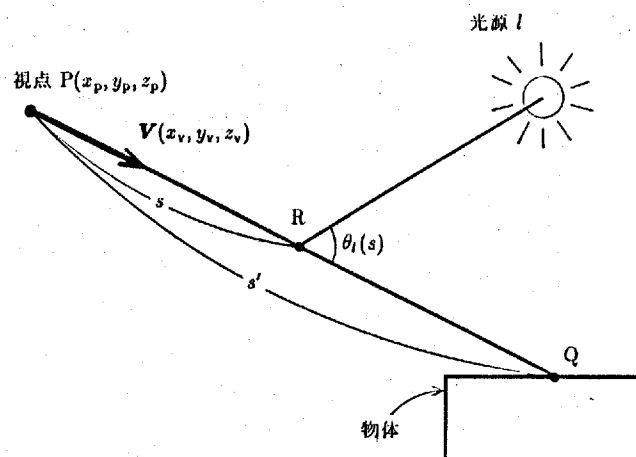


図 4.1: 微粒子による光の散乱

のような人工的な霧の表現を行なうことはできるが、密度が滑らかに変化するような自然現象による霧は表現できない。

微粒子の分布密度の近似関数を指数関数と仮定し、図 4.1 に示す視点 $P(x_p, y_p, z_p)$ から点 Q を見たときの単位ベクトルを $\mathbf{V}(x_v, y_v, z_v)$ とすると、視線上の点 R での微粒子の密度 $\rho(s)$ は次式により定義される。

$$\rho(s) = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z(s)}{h_0}\right). \quad (4.2)$$

ここで、 ρ_0 は高度 0[m] での微粒子の密度、 h_0 はその微粒子のスケールハイトである。また、 $z(s) = z_p + z_v \cdot s$ であり、 s は PR 間の距離を表わす。

なお、地球の大きさと比べると、霧は局所的なものなので、霧は平面状に分布するものと仮定する。

4.3 空間密度分布データの表示

4.3.1 霧と光跡の表示

(i) 光跡の計算法

光が、微粒子の分布する空間中を単位距離通過する際に散乱する割合、すなわち体積散乱係数 $\tau(s)$ は、微粒子の密度 $\rho(s)$ に比例し、次式により与えられる。

$$\tau(s) = \rho(s) \tau_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b}. \quad (4.3)$$

ここで、 λ は入射光の波長、 λ_0 は基準波長、 τ_0 は密度が 1 のときの基準波長の散乱係数を表わす。また、 b は霧の粒子の場合 1.1 ~ 1.2 の値をとる [14]。したがっ

て、PR 間の光学的距離 $t(s)$ は $\tau(s)$ を積分することにより、次式で表わされる (積分法は付録 E 参照)。

$$t(s) = \int_0^s \tau(u) \cdot du. \quad (4.4)$$

図 4.1 の PQ 間の距離を s' 、点 Q での面の輝度を I_0 をすると、点 P に到達する光の強さ I は次式で与えられる。

$$I = I_0 \cdot \exp(-t(s')) + \sum_l \int_0^{s'} \tau(s) \cdot J_l(s) \cdot \exp(-t(s)) \cdot ds. \quad (4.5)$$

ここで、 l は光源を表わし、 $J_l(s)$ は光源 l に対する点 R での光源関数であり、次式で与えられる。

$$J_l(s) = I_l(s) \cdot \exp(-t'_l(s)) \cdot F(\theta_l(s)). \quad (4.6)$$

ここで、 $I_l(s)$ は微粒子のないときの点 R に到達する光の強度を表わし、大気拡散モデルにより求めた太陽の直射光と天空光とを用いて求められる。また、 $t'_l(s)$ は光源 l と点 R との光学的距離、 $\theta_l(s)$ は光源からの光と視線とのなす角、 $F(\theta_l(s))$ は微粒子に対する光の散乱特性を表わす。

遮蔽物体を考慮して光跡表示を行なうには、シャドウエリアを用いて、視線上に光が当たる区間を求め、その区間のみを積分すればよい。以下に、光源が、太陽の直射光 (平行光線)、点光源、および天空光の場合の積分法について述べる。

(ii) 平行光線による光の照射区間の積分法

視点に到達する光の強さを求める式 (4.5) は、一般的には解析的に積分することができないため、数値積分が用いられてきた [14]。しかし、光源が平行光線の場合は、同一視線上では $\theta_l(s)$ が一定となるため、式 (4.6) の $F(\theta_l(s))$ が一定値となる。したがって、式 (4.5) は解析的に積分できる (付録 F 参照)。解析的に積分を行なうことにより、計算量を減らし、かつ正確な値を得ることができる。

(iii) 点光源による光の照射区間の積分法

点光源の場合は、平行光線のように解析的に積分できないので、数値積分 (台形積分) を行なう。

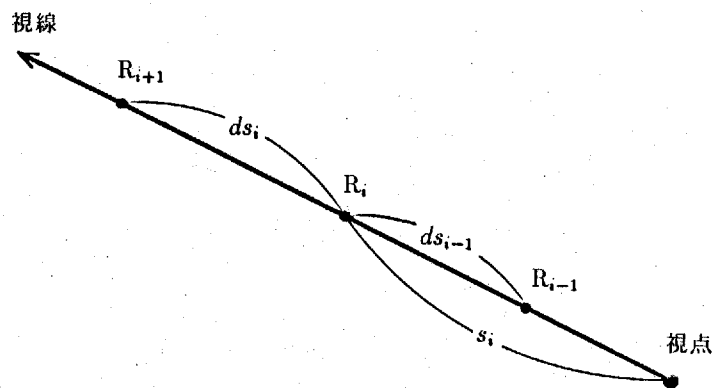


図 4.2: 数値積分の積分間隔の決定

積分は、霧の粒子による散乱光の強いところのみ行なえばよい。しかし、散乱光の強い部分をあらかじめ求めておくことはできない。したがって、積分は、散乱光の強いところから弱いところに向かって行ない、散乱光があるしきい値以下となったところで、積分を打ち切る。図 4.1 において、点 R が視点 P に近いほど、光の通過経路 l -R-P の光学的距離は小さくなり、また、 $\theta_l(s)$ も小さくなる。一般に、 $\theta_l(s)$ が小さくなるほど、 $F(\theta_l(s))$ は大きくなる [14]。したがって、散乱光は視点に近いほど大きくなる。そこで、積分は、視点から視線方向に行なう。

積分間隔 ds_i は、散乱光の強い部分は、積分間隔が小さくなり、散乱光の弱い部分は、積分間隔が大きくなるように、次式により決定する (図 4.2 参照)。

$$ds_i = \frac{ds_0}{\tau(s_i) \cdot J_l(s_i) \cdot \exp(-t(s_i))}. \quad (4.7)$$

ここで、 ds_0 は、基準積分間隔である。ただし、 ds_i が最小積分間隔 ds_{\min} より小さいときは、 $ds_i = ds_{\min}$ とし、 ds_i が最大積分間隔 ds_{\max} より大きいときは、 $ds_i = ds_{\max}$ とする。また、 $\tau(s_i) \cdot J_l(s_i) \cdot \exp(-t(s_i))$ が、あるしきい値未満となれば、積分を打ち切る。

このようにして、散乱光の強さに応じて、積分間隔 ds_i を決定することにより、精度よく、かつ高速に積分を行なうことができる。

(iv) 天空光を考慮した霧の輝度計算

光跡は、大気中の微粒子に、局所的に輝度の差の大きい光が照射されたときに、顕著に現われる。一方、天空光のような輝度の差の小さい光が広範囲に照射されたときは、全体が明るくなる。このような天空光による霧を表現するためには、式 (4.5)

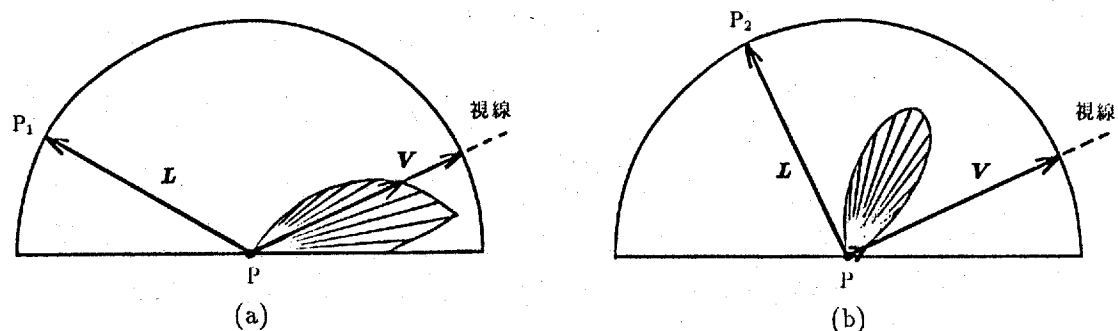


図 4.5: 天空要素による鏡面反射光成分

に限り、次の前提条件を設ける。

(1) 光の散乱特性を考慮しない (一様散乱)。

(2) 天空光を遮蔽する物体を考慮しない。

これら二つの条件により、 $J_l(s_i)$ は点 R_i の高度のみの関数となり、 R_i の x, y 座標、視線と光源の方向との関係は無視できる。したがって、各高度ごとの $J_l(s_i)$ のテーブルを、あらかじめ作成しておくことができる。

4.3.2 空間内の物体の表示

前述の大気拡散モデルを用いて算出したスペクトル分布を考慮して、天空光により照らされた3次元物体を可視化するための陰影表示法について述べる。

天空は半径の非常に大きい半球光源と考えることができるから、これを、文献[57]と同様に、いくつかの帯光源に分割して照度計算を行う (図 4.3 参照)。この帯光源内では、光の強度は帯光源の軸方向に変化し、幅方向には一定であると仮定する。文献[57]で扱われている拡散反射光の計算では、すべての方向に一樣の強度で光が反射するから、帯光源の分割を一樣な幅とし、ある程度荒くすることができる。

一方、鏡面反射光は、よく知られているように、特定の方向 (正反射方向) に強く反射する (図 4.5 参照)。そのため、帯光源の分割幅を細かくする必要があるが、その代わり、正反射方向の帯光源の一部のみについて照度計算を行えばよい。以下では、天空光による鏡面反射光の計算方法について述べる。

(i) 天空光の鏡面反射光

天空光による鏡面反射の計算には、光のスペクトル分布を考慮でき、材質感を精巧に表現できる Cook-Torrance のモデル [59] を用いる。

天空要素を点光源 P_e とみなし、 P_e の位置を x 軸 (PP_0) と PP_e とのなす角 α と、水平面からの角 δ で表現する (図 4.3 参照)。計算点 P における天空要素の鏡面反射光 dI は、文献 [57] の式 (1) に鏡面反射成分を導入することにより次式となる。

$$dI = R_s(\alpha, \delta, \mathbf{V}) \cdot L(\alpha, \delta) \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \cdot r^{-2} \cdot dA. \quad (4.9)$$

ここで、 $R_s(\alpha, \delta, \mathbf{V})$ は天空要素に対する面の鏡面反射率、 \mathbf{V} は計算点 P から視点へ向かう単位ベクトルである。また、 $L(\alpha, \delta)$ は天空要素の輝度であり、大気拡散モデルによって得ることができる。 r は PP_e の距離である。 dA は天空要素の面積であり、次式で与えられる。

$$dA = (r \cdot d\alpha)(r \cdot d\delta \cdot \sin \alpha). \quad (4.10)$$

式 (4.9) を積分することにより、帯光源 S_l による鏡面反射光 I_l は次式となる。

$$I_l = \int_0^\pi \int_{\delta_l - \Delta_l}^{\delta_l + \Delta_l} R_s(\alpha, \delta, \mathbf{V}) \cdot L(\alpha, \delta) \cdot \sin \delta \cdot \sin^2 \alpha \cdot d\delta \cdot d\alpha. \quad (4.11)$$

一つの帯光源の微小区間 $\delta_l - \Delta_l \leq \delta < \delta_l + \Delta_l$ (ただし、 $2\Delta_l$ は一つの帯光源のなす角度) 内では、天空要素の輝度、鏡面反射率とも一定と考えることができる。そこで、 $L(\alpha, \delta)$ と $R_s(\alpha, \delta, \mathbf{V})$ はそれぞれ、 $L(\alpha, \delta_l)$ と $R_s(\alpha, \delta_l, \mathbf{V})$ と表わすができる。ここで、角 δ は次式を満たすようにサンプルされる。

$$\cos(\delta_l - \Delta_l) - \cos(\delta_l + \Delta_l) = \frac{1}{N}. \quad (4.12)$$

ただし、 N は定数である。これにより、式 (4.11) は次式となる。

$$I_l = \frac{1}{N} \cdot \int_0^\pi R_s(\alpha, \delta_l, \mathbf{V}) \cdot L(\alpha, \delta_l) \cdot \sin^2 \alpha \cdot d\alpha. \quad (4.13)$$

したがって、天空全体の鏡面反射光 I は次式によって求められる。

$$I = \sum_{l=1}^N I_l. \quad (4.14)$$

ここで、 N は帯光源数である。

ンプル線との間にあるものとする。そして、帯光源 S_l のサンプル線と x 軸を含む面として定義されるサンプル面の水平面からの傾き角 δ_l を求める。

- (2) 帯光源 S_l のサンプル線上で Q に最も近い天空要素 P_l を求め、 PP_l と x 軸 (PP_0) とのなす角 α_{l1} を求める。 P_l での判定関数が $G(\alpha_{l1}, \delta_l, \mathbf{V}) \geq \varepsilon$ ならば、この帯光源 S_l の積分を次のようにして行なう。

(2.1) 帯光源 S_l のサンプル線上で Q に最も近い天空要素 $P_l(\alpha_{l1}, \delta_l)$ から、サンプル線に沿って帯光源の片方の端に向かって、積分間隔 $d\alpha$ ずつ台形積分を行ない、 $G(\alpha_{l1}, \delta_l, \mathbf{V}) < \varepsilon$ となれば、そこで積分を打ち切る。物体による遮蔽効果を考慮するため、まわりの物体によってサンプル線が遮られて見えない部分があれば、その部分はとばして積分を行なう。サンプル線の可視区間は、サンプル面と物体の交差判定により求める。

(2.2) 天空要素 $P_l(\alpha_{l1}, \delta_l)$ から、サンプル線に沿って、(2.1) で積分した方向と反対側の端に向かって、(2.1) と同様な方法で台形積分を行なう。

- (3) 隣接する帯光源 S_{l-1} に移り、(2) と同様の処理を行なう。

- (4) このように上記の処理を帯光源 S_{l-2}, S_{l-3}, \dots に対して行ない、帯光源 S_i ($i = l-1, l-2, \dots, 1$) のサンプル線上で点 Q に最も近い天空要素 P_i における判定関数が $G(\alpha_{i1}, \delta_i, \mathbf{V}) < \varepsilon$ となれば、それ以降の帯光源に対する積分を打ち切る。

- (5) 反対側の帯光源 $S_{l+1}, S_{l+2}, \dots, S_i, \dots, S_N$ に対しても $G(\alpha_{i1}, \delta_i, \mathbf{V}) < \varepsilon$ を満たす間、(2)~(4) と同様の処理を行なう。

4.4 適用例

同一の大気状態で、太陽高度が変わった場合に、建築物がどのように見えるかをシミュレーションした例を図 4.7 に示す。図 (a)~(c) は、ビル壁面の材質が白いタイル (主に拡散反射成分からなる) の場合、図 (d)~(f) は、アルミ (主として鏡面反射成分をもつ) の場合である。また、図 (a), (d) は早朝 (太陽高度 8°) の例で、図 (b), (e) は午前中 (太陽高度 20°)、図 (c), (f) は日没時 (太陽高度 3°) の例である。これらの図からわかるように、太陽高度の変化により空の色だけでなく、建物の色相も変化している。例えば、壁面が白いタイルの場合 (図 (a)~(c))、昼間に比べ、早朝と

日没時に建物の色相が大きく変化している。通常、これほどの色相の変化が無いように思えるかも知れないが、それは、人間が、色を記憶によって判断しているからである。

図 4.8 は、霧による直射光の変化だけでなく、天空光による環境光の変化の建物の見え方への影響を表示した例である。図 4.8 (a) は、地上ほど霧が濃いときであり、式 (4.2) のパラメータ ρ_0 , h_0 はそれぞれ 0.59, 10.0 である。図 4.8 (b) は、図 4.8 (a) と逆の場合であり、 ρ_0 , h_0 はそれぞれ 0.037, -15.0 である。図 4.8 (c), (d) は建物により直射光が遮られた空間が暗くなり、光跡が生じた例である。建物は逆光のためにシルエットになっている。 ρ_0 , h_0 , 太陽高度は、図 4.8 (c) ではそれぞれ 0.16, 80.0, 40°, 図 4.8 (d) ではそれぞれ 0.088, 80.0, 35° である。

図 4.9 は、自動車のヘッドライトや街灯などのスポットライトによる光跡を表示した例である。ヘッドライトや街灯は、すべて光源の配光特性を考慮している。基準積分間隔 ds_0 , 最小積分間隔 ds_{\min} , 最大積分間隔 ds_{\max} は、ヘッドライトではそれぞれ 0.2, 0.01, 10.0[m], 街灯ではそれぞれ 1.0, 0.01, 10.0[m] である。

4.5 景観評価の観点からのコンピュータグラフィックス画像の信頼性に関する考察

ここでは、本章で述べられてきたコンピュータグラフィックスにより作成されたリアルな画像が、建造物の設計における景観評価画像として信頼性のおけるものであるか否かを考察する。そのため、代表的な計量心理学的手法である評定尺度法と一対比較法 [60, 61] を用いて、種々の画像に対する観察者の反応や、主観的な嗜好を分析した。評定尺度法は、度合に応じていくつかのカテゴリーを定義しておき (図 4.10 参照)、被験者に最も適していると思われるカテゴリーを選択させる方法であり、一対比較法は、ある集合の中から 2 つを被験者に示し、好きな方を選ばせる方法である。

これまで視環境評価のためのメディアとして用いられていた手描きの透視図と、コンピュータグラフィックスによる画像 (以下、CG 画像と呼ぶ) を、図 4.11 から図 4.13 に示す。図 4.11 (a) ~ (c) は、視点を地上高 3.5m に置いた手描きの透視図である。この視点の高さは、建築設計のための透視図を描く際に、最も一般的に用いら







	タイル	アルミニウム
早朝 8°	 <p>(a)</p>	 <p>(d)</p>
午前 20°	 <p>(b)</p>	 <p>(e)</p>
日没 3°	 <p>(c)</p>	 <p>(f)</p>

図 4.7: 太陽高度による建築物の色相の変化



(a)



(b)

図 4.8: 霧と直射光, 天空光とによる建物の見え方への影響



(c)



(d)

図 4.8: 霧と直射光, 天空光とによる建物の見え方への影響 (続き)



図 4.9: 自動車のヘッドライト, 街灯による光跡

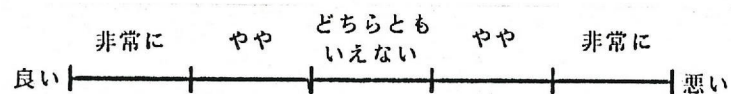


図 4.10: 評価尺度法のためのスケール

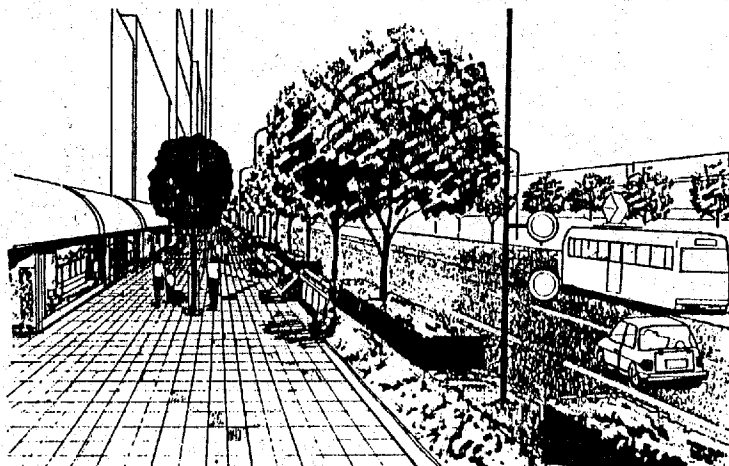
れる。図 4.12 は、同じ視点位置からの CG 画像であり、図 4.13 は、視点位置を歩行者の目の高さ（地上高 1.6m）とした CG 画像である。図 4.12 と図 4.13 において、歩道に沿った並木は、プリミティブにより簡単に近似を行っている。これらの画像を、スライドにより被験者に呈示した。被験者は 65 人中、一般の人 34 人、都市再開発計画に携わっている専門家 31 人から構成されていた。その結果を次節において述べる。

4.5.1 評価尺度法による評価

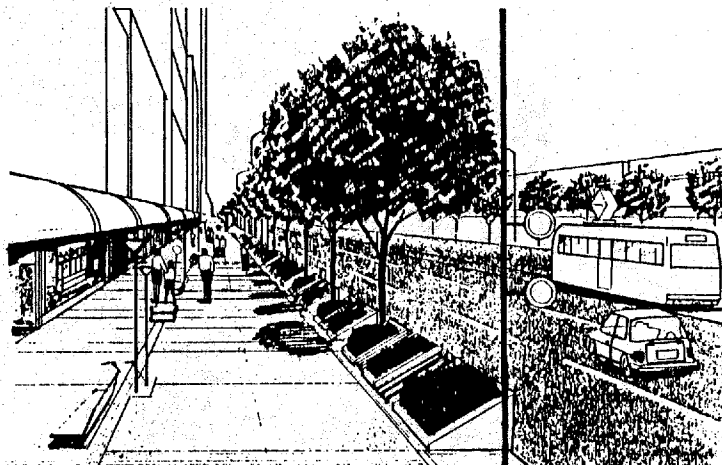
図 4.11, 4.12, 4.13 の画像 (a), (b), (c) それぞれに対して、評価尺度法を用いて、7 項目の質問を行った。図 4.14 (a) ~ (c) は、その結果から、一般の人と専門家の回答の分散を分けて、グラフ化したものである。

景観評価画像としての信頼性を評価するために、専門家から得られた回答の分散を用いて、以下の考察を行う。これは、期待するシーンを画像が忠実に表現している場合のみ、その計画に対して同一の意見や好みをもつ者の集団からの回答が低い

(a)



(b)



(c)

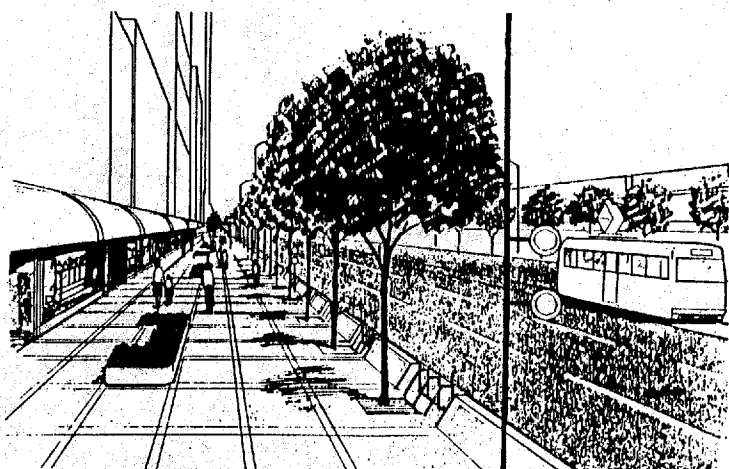
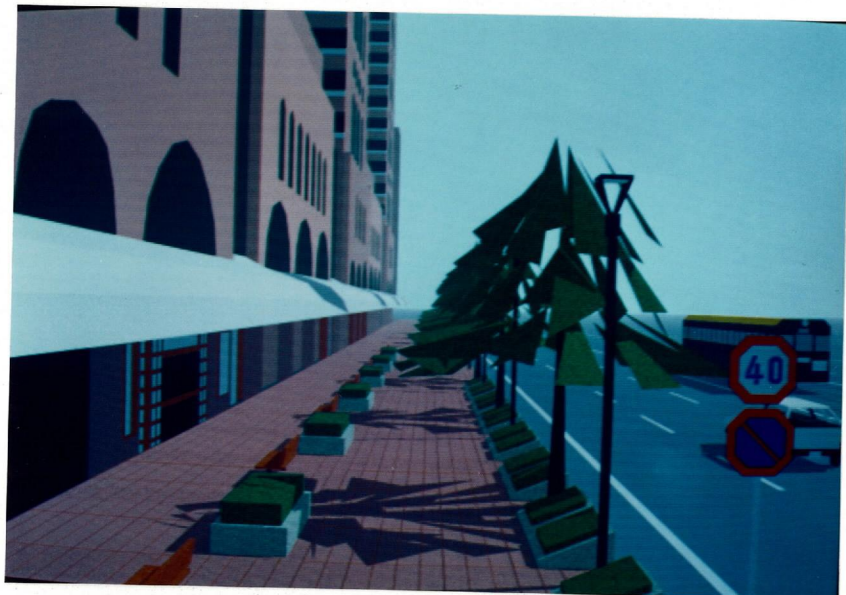


図 4.11: 手描きの透視図の例

(a)



(b)



(c)



図 4.12: CG 画像 (視点は地上高 3.5m) の例

(a)



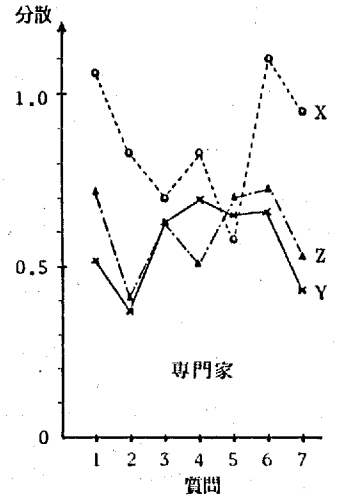
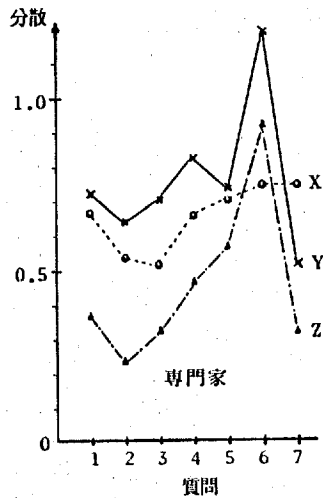
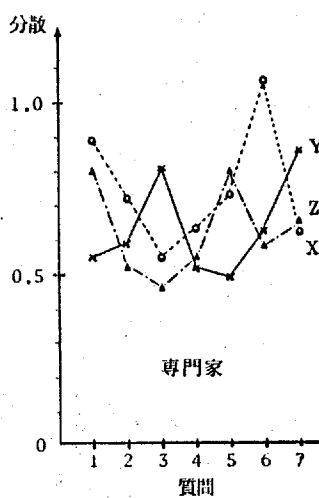
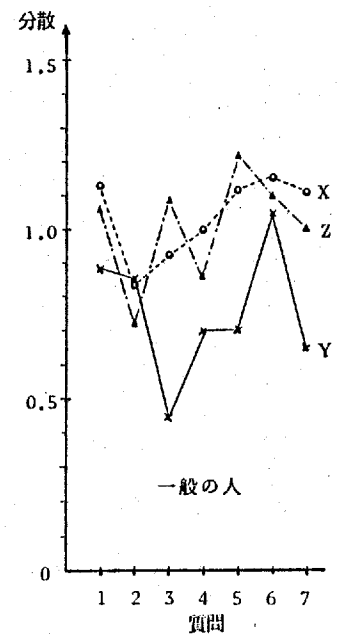
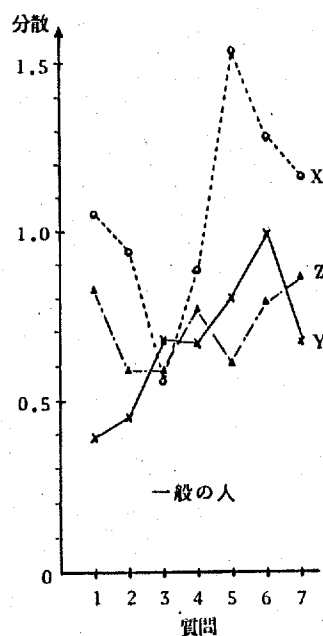
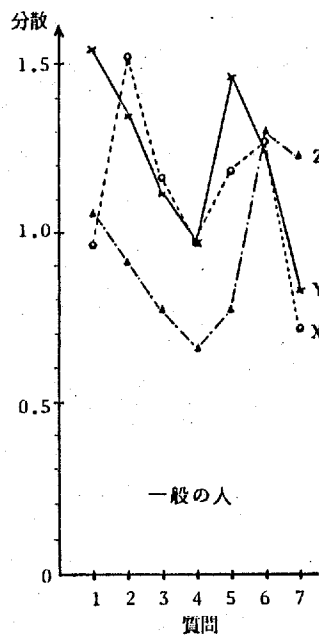
(b)



(c)



図 4.13: CG 画像 (視点は地上高 1.6m) の例



(a)

(b)

(c)

質問項目	質問内容	質問項目	質問内容
1	総合評価	5	歩道の色や模様
2	はなやかさ	6	プランターやベンチ
3	軽快さ	7	歩道の広さ
4	やわらかさ		

図 4.14: 一般の人と専門家の回答の分散 (X は手描きの透視図 (視点:3.5[m])、Y は CG 画像 (視点:3.5[m])、Z は CG 画像 (視点:1.6[m]) に対する結果を示す。)

分散を示すからである。

手描きの図(図 4.11)と、それと視点の高さが同じ CG 画像(図 4.12)を比較すると、図(b)の場合を除き、CG 画像の方が、分散が全般的に小さい。このことは、CG 画像の方がより信頼性が高いことを示している。図(b)の場合、手描きの方が分散が小さい理由は、図 4.11, 4.12 の視点の高さが手描きの標準の高さであり、それが最もよく見える構図であるからと考えられる。手描きの図(図 4.11)と視点を低くした CG 画像(4.13)を比較すると、CG 画像の方が分散が全般的に小さいことから、このことが裏付けられる。

4.5.2 一対比較法による評価

一対比較法によって、手描きの図(図 4.11)と、低い視点からの CG 画像(図 4.13)の比較を行った。被験者に対して、画像を 2 枚ずつ呈示し(例えば、図 4.11(a)と図 4.13(b))、いくつかの観点(例えば、華やかさなど)について、好ましい方の画像を選択させた。その結果は、評価マトリックス P を使って表わされる。ここで、評価マトリックスの要素 P_{ij} ($1 \leq i, j \leq 3$) は、画像 i が画像 j より好ましいと答えた被験者の数を正規化した値を表わす。そのマトリックス P の各行の総和を正規化した値、すなわち、

$$P_{Si} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_{ij}, \quad (4.16)$$

をグラフ化したものを、図 4.15 に示す。

図 4.15 より、一般の人と専門家の両者の場合とも、低い視点からの CG 画像の方が幅広い嗜好のレンジ(すなわち、 P_{Si} の最大と最小の幅が大きいこと)を示している。このことから、CG 画像を用いれば、手描きのものより、より安定した評価が行えることがわかる。

4.5.3 まとめ

上述の評価結果をまとめると、次のことが結論付けられる。

- (1) CG 画像は、全般的に分散の小さな評価値を与えるので、信頼できる景観評価のためのメディアであると言える。

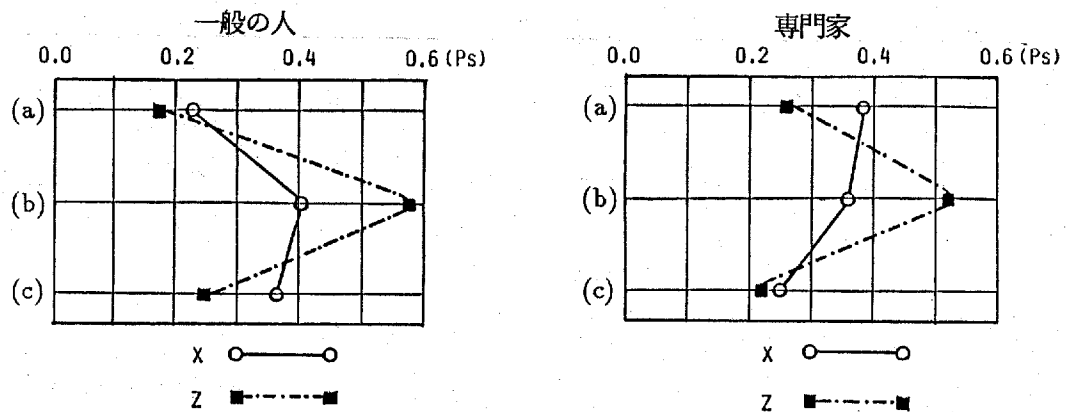


図 4.15: 評価マトリックス P の各行の総和の正規化値 (X は手描きの結果、 Z は低い視点からの CG 画像の結果を示す。)

- (2) CG 画像を用いた景観評価では、幅広い評価のレンジを示すため、安定した評価結果が期待できる。
- (3) 視点の位置は、評価に大きな影響を与える。このことは、視点位置を容易に、かつ、動的に変更できるコンピュータグラフィックスは、景観評価ツールとして非常に有効であると言える。

4.6 結言

本章では、3次元空間に分布したスカラデータの可視化法として、大気中の空気分子、水蒸気、塵などの微粒子の可視化を取り上げ、その密度分布を考慮した霧の効果、および、大気中を太陽光が通過することにより生じる光跡の表示法について述べた。また、それらの微粒子による周囲環境への影響を併せて考慮することにより、屋外環境における3次元物体をリアルに表示することができることを示した。

ここで開発した手法は、建造物のデザイン、事前予測、景観評価のための完成予想画像作成に応用することができる。その際、コンピュータグラフィックス画像が、景観評価のためのメディアとして信頼のおけるものかどうかを、65人の被験者のデータから考察を行った。これにより、コンピュータグラフィックス画像を用いれば、これまで用いられてきた手描きの透視図より、信頼性が高く、より安定した評価結果が期待できることが判明した。

3次元空間中に分布した微粒子の密度分布を考慮した提案手法は、以下の特徴をもつ。

- (1) 太陽の位置と大気の状態により、空や、建物などの3次元物体の色相の変化を表現できる。
- (2) 直射光と天空光によって照らされた鏡面反射成分を含む建物などを、現実に対応して表示することができる。
- (3) スペクトル分布を考慮した直射光と天空光による光跡、および霧の表示を行うことができる。

第 5 章 結論

本論文では、不可視あるいは観察が非常に困難な 3 次元空間に分布するベクトルデータおよびスカラーデータの可視化手法を提案した。

計算機の高速化とメモリの低廉化、ソフトウェアの進歩により、不可視あるいは観察が極めて困難な現象を取り扱う分野をはじめ、建造物の開発前の景観予測に至るまで、様々な分野において、可視化手法の開発が重要課題となってきた。

各種実験・測定データとしてしばしば現われる 3 次元離散分布ベクトルは、計測時間等の制約によりデータ数が有限個に限定され、かつ人間の脳裏に描き難い 3 次元分布情報を含むため、理解し難いデータの一つである。この代表的なものとして、気体流動状態の可視化問題が挙げられる。3 次元離散分布ベクトルの可視化法は、2 次元平面へ投影された矢線ベクトルとして表示する方法が一般的に用いられてきたが、直観的な把握は困難であり、観察領域全体の 3 次元ベクトルデータを観察するためには、多数の 2 次元平面図を用いなければならないという問題がある。

観察の非常に困難な 3 次元多重構造物の内部構造を可視化することが、解剖学において重要課題となっている。すなわち、マウス胚子のように、異なる要素から構成される多重構造物を、その外形だけでなく、内部構造や要素相互間の位置関係を同時に、かつ正確に観察する必要がある。これまでは、多重構造物の切片を観察し、人間が頭の中で立体像を想像して組み立てるか、人手によるスケッチにより透視図を作成してきたが、その内部構造が複雑な場合には、これらの方法では十分な観察は行えない。

開発前の建造物の完成予想画像を作成することは、建築分野における、可視化の重要な問題である。建造物のデザインや視環境評価においては、完成後の形状だけでなく、できるだけ多くの気象条件下の周囲環境を含んだ建造物の表示が強く望まれる。そのためには、空間中に分布する水蒸気や、微粒子の密度分布を考慮した陰影表示法を開発する必要がある。

本研究では、これらの可視化問題を取りあげ、それぞれの問題に適した可視化手法の開発を行った。以下に、本研究で得られた成果を各問題ごとにまとめる。

(1) 3次元離散分布ベクトルの可視化の際に問題となる、計測データ個数の制限を解決するためのベクトルデータの内挿・外挿による補間手法を開発した。また、気体の流動状態を直観的に把握できるよう、流速に応じて流線を色分けしてステレオ表示する手法を開発した。

提案した3次元離散分布ベクトルの可視化手法は、次の特徴を有している。(i) 計測データから、内挿・外挿を用いて算出した流線を表示することにより、観測空間内の気体流動状態が一目瞭然となる。(ii) 立体視法を用いることにより、3次元的な変化を容易に把握することができる。(iii) カラーXYプロットを用いて流線を表示するため、流速の変化も同時に観察できる。

内燃機関におけるシリンダ内の空気流動の計測データを用い、シリンダ内の空気流動状態の可視化を行い、提案手法の有用性を示した。

(2) 多重構造物の内部構造の可視化問題については、3次元空間を細分する連続的な断面上でサンプルされたスカラデータから輪郭線を抽出し、断面上の輪郭線間に三角形パッチを発生することにより、もとの形状を再構成し、内部構造を容易に観察できる表示手法を開発した。すなわち、3次元形状の再構成手法を、多重構造物が取り扱えるように拡張し、開口部や分岐など、複雑な形状をもつ物体でも、ユーザの介入を必要とせず、もとの形状に忠実に再構成を行う手法を開発した。内部構造の観察に適した半透明モデルを構築し、それに基づいてステレオ表示を行い、さらに内部構造を詳細に観察するために、任意断面での切口を併せて表示する手法を開発した。

提案手法は、これまでの観察方法に比べ次の点において優れている。(i) 観察目的に応じて、表示の際の透明度を変え、観察に必要な要素を選択的に表示することにより、詳細な観察を行うことができる。(ii) 切断面での形状を併せて観察することにより、内部構造や要素相互の位置関係を、さらに詳しく理解することができる。(iii) ステレオ表示とともに、3次元格子状のスケールを併せて表示することにより、位置の数値的把握も可能となる。

解剖学の分野における、マウス胚子の発生過程の観察に適用し、提案手法の有用性を示した。

(3) 建造物の開発前の景観予測問題に関して、3次元空間に分布したスカラデータの可視化手法と、それによる周囲環境への影響を考慮した可視化手法を開発した。

すなわち、大気中の微粒子の密度分布を考慮した霧の効果の表示法と、太陽光が通過することにより生じる光跡の表示法を開発した。さらに、大気中の微粒子による周囲環境への影響を考慮するために、太陽光のスペクトル分布を考慮した鏡面反射成分をもつ3次元物体の陰影表示法を開発した。

提案手法は、以下の特徴をもつ。(i) 大気中の微粒子の周囲環境への影響を考慮することにより、太陽の位置と大気の状態により、空や、建物などの3次元物体の色相の変化を表現できる。(ii) 直射光と天空光の両者を考慮して、鏡面反射成分を含む建物などを現実的に即して表示することができる。(iii) 自然光のスペクトル分布を考慮した光跡、および霧の表示を行うことができる。

提案手法により、種々の気象条件下での、周囲環境を含んだ建造物の完成予想画像を作成し、視環境評価への有用性を示した。

今後の課題

提案手法により、3次元分布データの可視化に関して有効な成果が得られた。しかし、急速な計算機の高速化とメモリの低廉化により、さらに多次元の現象の可視化やユーザインタラクティブな観察への要求がますます高まっている。これを解決するために、提案手法を基盤とした次の手法の開発が必要である。

- (1) 3次元離散分布データの可視化では定常流問題を扱った。しかし、非定常流の場合は、流速ベクトルは時間により変化する。非定常流をよりよく理解するためには、流線のみならず、流跡、流脈等の表示や、アニメーション化が必要となる。
- (2) 3次元多重構造物の可視化において、表示の際のパラメータを変化させたり、観察に必要な要素のみを選択して表示することにより、目的に合った観察が行えることを示した。この機能をさらに活かし、より多くの情報を把握するために、リアルタイムで表示パラメータの変更等が行えるインタラクティブな観察システムの開発が必要である。
- (3) 建造物の開発前の景観予測問題では、大気中の空気分子、水蒸気、塵などの微粒子の密度分布を考慮することにより、現実的に即した完成予想画像を作成することができた。さらに、多様な気象条件下での景観予測を行うためには、かな

り大きな粒径の雨粒や雪などの分布密度を考慮した表示手法の開発が必要である。

謝辞

本論文は、著者が広島大学工学部、同学工学研究科(博士課程前期)に在学中、および同学に在職中の研究成果をまとめたものである。この間終始御指導、御鞭撻を賜った広島大学工学部 中前栄八郎教授に衷心より感謝致します。

本論文をまとめるにあたって、数々の有益な御教示をいただいた広島大学工学部 市川忠男教授、佐々木博司教授、吉田典可教授、同学総合科学部 水上孝一教授に深く感謝致します。

本研究の3次元離散ベクトルの可視化に関して議論していただき、また空気流動の計測データを提供していただいた広島大学工学部 廣安博之教授に深く感謝致します。

本研究の3次元多重構造物の可視化に関して議論していただき、またマウス胚子の断面データを提供していただいた広島大学医学部 安田峯生教授、佐藤明直講師に深く感謝致します。

本研究の建造物の完成予想画像作成問題に関して、建造物のデータを提供していただき、コンピュータグラフィックスの信頼性に関して、調査・集計に協力していただいた大阪市土木技術協会に深く感謝致します。

さらに、本研究を進めるにあたり、有益な御討論をいただきました広島大学工学部 山下英生助教授、同学総合科学部 原田耕一助教授、福山大学工学部 西田友是教授に深く感謝致します。また、本研究ならびにプログラム開発に協力いただいた広島大学工学部電気機器工学研究室 佐藤泰典氏(現、沖電気工業(株))、若洲 豊氏(現、日本電気ホームエレクトロニクス(株))、岡本 敬氏(現、ダイキン工業(株))、ならびに同研究室の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Baden Fuller, A. J. and dos Santos, M. L. X.: "Computer Generated Display of 3D Vector Fields," *Computer Aided Design*, Vol. 12, No. 2, pp. 61-66 (1980).
- [2] Nassif, N. and Silverster, P. P.: "Graphics Representation of Three-Component Vector Fields," *Computer Aided Design*, Vol. 12, No. 6, pp. 289-294 (1980).
- [3] Keppel, E.: "Approximating Complex Surfaces by Triangulation of Contour Lines," *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 19, pp. 2-11 (1975).
- [4] Fuchs, H., Kedem, Z. M. and Uselton, S. P.: "Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours," *Communication of the ACM*, Vol. 20, No. 10, pp. 693-702 (1977).
- [5] Christiansen, H. N. and Sederberg, T. W.: "Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics," *Computer Graphics*, Vol. 12, No. 3, pp. 187-192 (1978).
- [6] Ganapathy, S. and Dennehy, T. G.: "A New General Triangulation Method for Planar Contours," *Computer Graphics*, Vol. 16, No. 3, pp. 69-75 (1982).
- [7] Boissonnat, J. D.: "Geometric Structures for Three-Dimensional Shape Representation," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 3, No. 4, pp. 266-286 (1984).
- [8] 仁木 登, 樋口清文, 高橋義造: "頭部 CT 画像からの脳形状の高精度再構成とその濃淡 3 次元表示," *電子通信学会論文誌*, Vol. J69-D, No. 10, pp. 1518-1527 (1986).
- [9] Zyda, M. J., Jones, A. R. and Hogan, P. G.: "Surface Construction from Planar Contours," *Computers & Graphics*, Vol. 11, No. 4, pp. 393-408 (1987).
- [10] Blinn, J. F.: "Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces," *Computer Graphics*, Vol. 16, No. 3, pp. 21-29 (1982).

- [11] Kajiya, J. T.: "Ray Tracing Volume Densities," Computer Graphics, Vol. 18, No. 3, pp. 165-174 (1984).
- [12] Max, N. L.: "Light Diffusion through Clouds and Haze," Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 33, No. 3, pp. 280-292 (1986).
- [13] Max, N. L.: "Atmospheric Illumination and Shadows," Computer Graphics, Vol. 20, No. 4, pp. 117-124 (1986).
- [14] Nishita, T., Miyawaki, Y., and Nakamae, E.: "A Shading Model for Atmospheric Scattering Considering Luminous Intensity Distribution of Light Sources," Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 303-310 (1987).
- [15] Sabella, P.: "A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields," Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 51-58 (1988).
- [16] Upson, C. and Keeler, M.: "V-BUFFER: Visible Volume Rendering," Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 59-64 (1988).
- [17] Drebin, R. A., Carpenter, L., and Hanrahan, P.: "Volume Rendering," Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 65-74 (1988).
- [18] Frederick, C. O., Wong, Y. C., and Edge, F. W.: "Two-dimensional Automatic Mesh Generation for Structural Analysis," International Journal of Numerical Mathematics Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 133-144 (1970).
- [19] Nguyen, V. P.: "Automatic Mesh Generation with Tetrahedron Element," International Journal of Numerical Mathematics Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 273-289 (1982).
- [20] Sunguroff, A. and Greenberg, D.: "Computer Generated Images for Medical Applications," Computer Graphics, Vol. 12, No. 3, pp. 196-202 (1978).
- [21] 萬 淳一, 横井茂樹, 鶴岡信治, 三宅康二: "円柱座標系データ構造による頭部 CT 像の 3 次元表示," 情報処理学会論文誌, Vol. 23, No. 5, pp. 516-521 (1982).

- [22] Cook, L. T., Dwyer III, S. J., Batnitzky, S., and Lee, K. R.: "A Three-Dimensional Display System for Diagnostic Imaging Applications," IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 3, No. 5, pp. 13-18 (1983).
- [23] Suto, Y., Kato, M., Ozeki, T., Ueda, M., Izumida, T., and Tarora, K.: "Three-Dimensional Display of X-ray CT Image," The Visual Computer, Vol. 2, No. 2, pp. 90-96 (1986).
- [24] Anjyo, K., Ochi, T., Usami, Y., and Kawashima, Y.: "A Practical Method of Constructing Surfaces in Three-Dimensional Digitized Space," The Visual Computer, Vol. 3, No. 1, pp. 4-12 (1987)
- [25] Sinclair, B., Hannam, A. G., Lowe, A. A., and Wood, W. W.: "Complex Contour Organization for Surface Reconstruction," Computer & Graphics, Vol. 13, No. 3, pp. 311-319 (1989).
- [26] 萬 淳一, 横井茂樹, 鶴岡信治, 三宅康二: "ラスタ型グラフィックスディスプレイによる頭部 CT 像の 3 次元表示の一方法," 情報処理学会コンピュータビジョン研究会, 14-1 (1981).
- [27] Gouraud, H.: "Continuous Shading of Curved Surfaces," IEEE Trans. on Computers, Vol. C-20, No. 6, pp. 623-628 (1971).
- [28] Bui-Tuong, Phong: "Illumination for Computer-Generated Pictures," Comm. ACM, Vol. 18, No. 6, pp. 311-317 (1975).
- [29] Herman, G. T. and Liu, H. K.: "Three-Dimensional Display of Human Organs from Computed Tomograms," Computer Graphics and Image Processing, Vol. 9, No. 1, pp. 1-21 (1979).
- [30] Tamminen, M. and Samet, H.: "Efficient Octree Conversion by Connectivity Labeling," Computer Graphics, Vol. 18, No. 3, pp. 43-51 (1984).
- [31] Chen, L., Herman, G. T., Reynolds, R. A., and Udupa, J. K.: "Surface Shading in the Cuberille Environment," IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 5, No. 12, pp. 33-43 (1985).

- [32] Gargantini, I., Walsh, T. R., and Wu, O. L.: "Viewing Transformations of Voxel-Based Objects via Linear Octrees," IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 6, No. 10, pp. 12-21 (1986).
- [33] Mao, X., Kunii, T. L., Fujishiro, I., and Noma, T.: "Reconstruction and Cross-Section Generation of Hierarchically Represented 3D Gray-Scale Digital Images," Proceedings of CG International '87, pp. 461-481 (1987).
- [34] Lorensen, W. E. and Cline, H. E.: "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169 (1987).
- [35] Levoy, M.: "Display of Surfaces from Volume Data," IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 8, No. 3, pp. 29-37 (1988).
- [36] Yamashita, H., Harada, K., Nakamae, E, Itano, J., and Hammam M. S. A. A.: "Stereographic Display on Three Dimensional Magnetic Fields of Electromagnetic Machines," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4692-4697 (1981).
- [37] 中前栄八郎, 西田友是: "3次元コンピュータグラフィックス," 昭晃堂, 東京 (1986).
- [38] 磯野春雄, 安田 稔: "時分割立体視の成立条件," テレビジョン学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 549-555 (1987).
- [39] 長田昌次郎: "両眼立体視画像観視における両眼融合限界の画角および視距離依存特性," テレビジョン学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 276-281 (1989).
- [40] 萬 淳一, 横井茂樹, 鶴岡信治, 三宅康二: "ラスタ型 GD による頭部 CT 像の 3次元表示 (2)," 情報処理学会コンピュータビジョン研究会, 19-7 (1982).
- [41] Newell, M. E., et al.: "A New Approach to the Shaded Picture Problem," Proc. ACM National Conference '72, pp. 443-450 (1972).
- [42] Kay, D. S. and Greenberg, D.: "Transparency for Computer Synthesized Images," Computer Graphics, Vol. 13, No. 2, pp. 148-164 (1979).

- [43] Whitted, T.: "An Improved Illumination Model for Shaded Display," Comm. ACM, Vol. 23, No. 6, pp. 343-349 (1980).
- [44] Robb, R. A., et al.: "Quantitative Imaging of Dynamic Structure and Function of the Heart Lung and Circulation by Computerized Reconstruction and Substruction Techniques," Proc. SIGGRAPH '76, pp. 246-256 (1976).
- [45] 村上 顕, 西田恵哉, 新井雅隆, 広安博之, 梶山康一: "LDV を用いた機関吸入特性の定常流計測法," 第4回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, pp. 19-24 (1984).
- [46] 村山 正: "燃焼室形状と燃焼," 内燃機関編集委員会 (編): 内燃機関の燃焼, pp. 137-143, 山海堂, 東京 (1973).
- [47] Foley, J. D. and Van Dam, A., "Fundamentals of Interactive Computer Graphics," Addison-Wesley Publishing Company, pp. 553-573 (1982).
- [48] Nishita, T., Okamura, I., and Nakamae, E.: "Shading Models for Point and Linear Sources," ACM Trans. on Graphics Vol. 4, No. 2, pp. 124-146 (1985).
- [49] Nishita, T. and Nakamae, E.: "Half-Tone Representation of 3-D Objects Illuminated by Area Sources or Polyhedron Sources," IEEE COMPSAC, pp. 237-242 (1983).
- [50] Klassen, R. V.: "Modeling the Effect of the Atmosphere on Light," ACM Trans. on Graphics, Vol. 6, No. 3, pp. 215-237 (1987).
- [51] Inakage, M.: "An Illumination Model for Atmospheric Environment," Proc. CG International '89, pp. 533-548 (1989).
- [52] Cohen, M. F. and Greenberg, D. P.: "A Radiosity Solution for Complex Environment," Computer Graphics, Vol. 19, No. 3, pp. 31-40 (1985).
- [53] Nishita, T. and Nakamae, E.: "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection," Computer Graphics, Vol. 19, No. 3, pp. 23-30 (1985).

- [54] Immel, D. S., Cohen, M. F., and Greenberg, D. P.: "A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 133-142 (1986).
- [55] Kajiya, J. T.: "The Rendering Equation," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 143-150 (1986).
- [56] Rushmeier, H. E. and Torrance, K. E.: "The Zonal Method for Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium," *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 293-302 (1987).
- [57] Nishita, T. and Nakamae, E.: "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 125-132 (1986).
- [58] Sekine, S.: "Optical Characteristics of Turbid Atmosphere," *J. Illum. Engng. Int. Jpn.*, Vol. 71, No. 6, p. 333 (1987).
- [59] Cook, R. L. and Torrance, K. E.: "A Reflectance Model for Computer Graphics," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-24 (1982).
- [60] Yasuda and Umeno: "Social Statistics," Maruzen, Tokyo (1977).
- [61] Wright and Swewall: "Path Coefficients and Path Regression: Alternative or Complementary Concepts," *Biometrics*, Vol. 16, pp. 189-202 (1960).

付録 A 球面過剰

三角形 (1-2-3) に対する点 (4) の球面過剰は、次のようにして求められる。

まず、点 (4) を中心とした単位球を考え、線分 (1-4), (2-4), (3-4) がその単位球と交わる点を、それぞれ A, B, C とする (図 A.1 参照)。球面上の三角形 ABC の各頂点のなす角を、それぞれ $\angle A, \angle B, \angle C$ とすると、球面過剰 E は、

$$E = \angle A + \angle B + \angle C - \pi, \quad (\text{A.1})$$

で与えられる。ここで、 $\pi < \angle A + \angle B + \angle C < 3\pi$ であるから、

$$0 < E < 2\pi, \quad (\text{A.2})$$

の関係が成立する。

提案手法では、三角形 (1-2-3) に対し、この球面過剰を最大とする点 (4) を求めることにより、四面体要素を構成する。

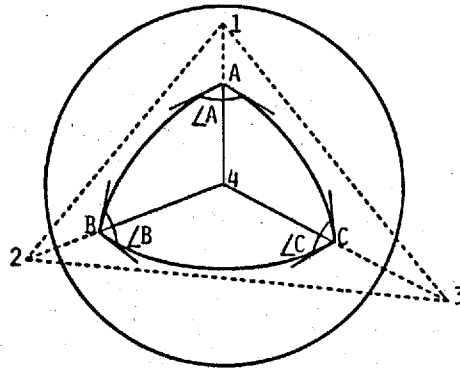


図 A.1: 球面過剰

付録 B シリンダ内の空気流動測定

シリンダ内の空気流動の測定は、吸入式定常流試験装置とレーザ・ドップラ流速計を用いて行う [45]。図 B.1 に測定点網を示す。また、測定は、図 B.2 に示す 2 種類の吸気ポートについて行う。これらの吸気ポートの形状の違いにより、シリンダ内のスワール比 γ_s (渦流の毎分回転数に対する機関の r.p.m. の比 [45]) が異なる。ここでは、高いスワール比 ($\gamma_s = 3.5$) を示すものを高スワールポート、低いスワール比 ($\gamma_s = 2.0$) を示すものを低スワールポートと呼ぶ。両者に対し、測定された流速ベクトルから、本論文で提案する手法を用いてシリンダ内の空気流動状態の可視化を行う。

[註] これらの資料は、広島大学工学部第一類 (機械系) 廣安博之先生から提供していただいた。

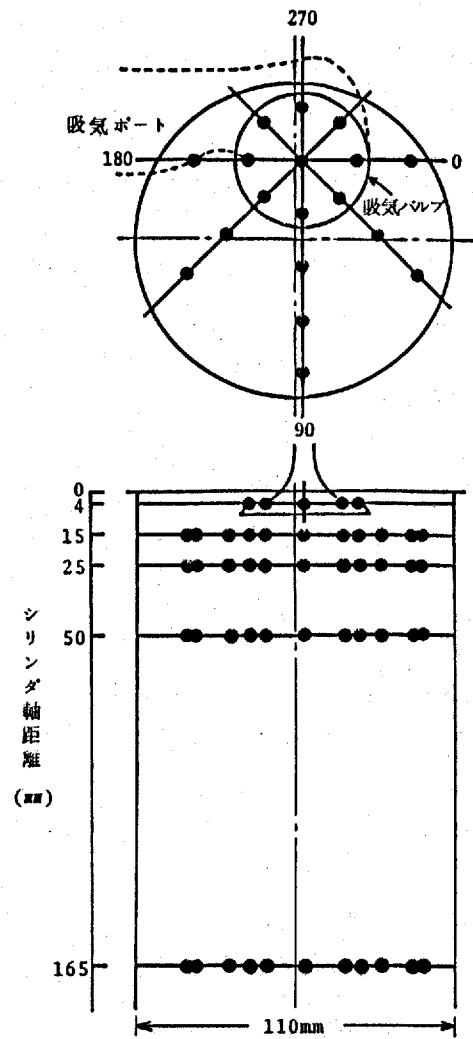


図 B.1: シリンダ内の流速ベクトル測定点

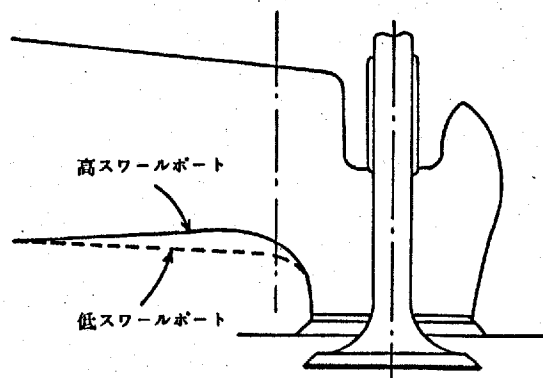


図 B.2: 吸気ポートの形状

付録 C Christiansen らの物体再構成手法

Christiansen らの提案している物体再構成手法 [5] は、概略、以下の手順である。

- (1) 上下の断面の輪郭線の繋りを判定する。
- (2) 1つの輪郭線が2つ以上の輪郭線と繋がっていると判定された場合は、分岐処理を行なう。
- (3) 繋りをもつ輪郭線に対してマッピング処理を行なう。
- (4) 繋りをもつ輪郭線に対して三角形化を行なう。

まず、(1)については、 x, y 軸に辺をもち、輪郭線を内包する長方形の重なり具合から、上下の断面の輪郭線の繋り関係を求める。

(2)については、1つの輪郭線が2つの輪郭線に繋がっていると判定された場合、以下の分岐処理を行なう(図 C.1参照)。

- (i) 2つに分かれた輪郭線の最も近い輪郭線を構成する点(以下、輪郭点と呼ぶ)の中間点の x, y 座標成分をもち、 z 座標成分が、輪郭線の属している上下の断面の平均となる新たな点を設ける。

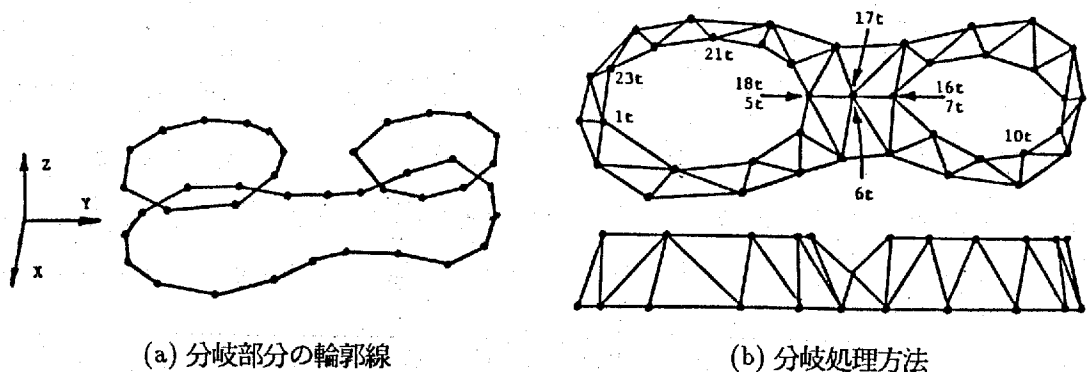


図 C.1: 分岐処理

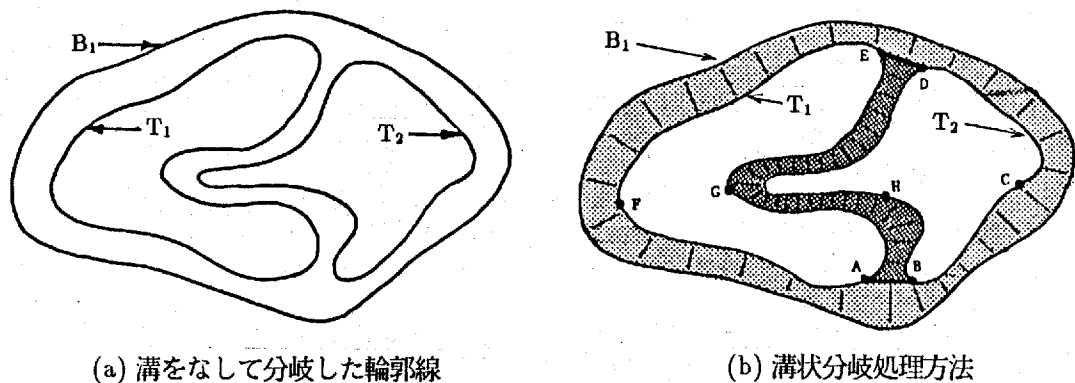


図 C.2: 溝をなして分岐した輪郭線
 B_1 : 下断面の輪郭線
 T_1, T_2 : 上断面の輪郭線

- (ii) 2 つに分かれた輪郭線が 1 つのループをなすように、新たに設けられた点を含めて、図 C.1 (b) に示すように輪郭点の番号付けを行なう。これにより、新たに設けられた点と、それに隣接する輪郭点は、2 重に番号が付けられる。

以上の処理を施すことにより、上下の断面の輪郭線の対応が 1 対 1 となり、三角形化を行なうことができる。

ところが、図 C.2 (a) に示すように、輪郭線が溝をなして分岐して場合は、上記の方法では、三角形化を行なうことができない。そこで、図 C.2 (b) に示すように、下の断面の輪郭線 B_1 と、上の断面の輪郭線の点 A, B, C, D, E, F を通る外側のループどうしを繋りをもつ輪郭線とする。次に、セグメント BHD と、セグメント AGE をもう一つの繋りをもつ輪郭線とする。この処理を施した後、三角形化を行なうと、下の断面の輪郭線 B_1 と、上の断面の輪郭線のループ ABCDEFA の間、そして、セグメント BHD と、セグメント AGE の間に三角形パッチが張られる。

なお、Christiansen らの手法では、点 A, B, D, E は、ユーザが与える必要がある。

(3) に関しては、上下の断面の繋りをもつ輪郭線が、(4) で述べる三角形化を行なう際の条件を満たすように変換を行う。すなわち、各輪郭線が単位面積の正方形ウィンドウに内包するように、その大きさを正規化し、その中心を一致させる。

(4) の三角形化を行なう際には、繋りをもつ 2 つの輪郭線は、次の条件を満足していなければならない。

- 輪郭点が同一方向に番号付けられている。

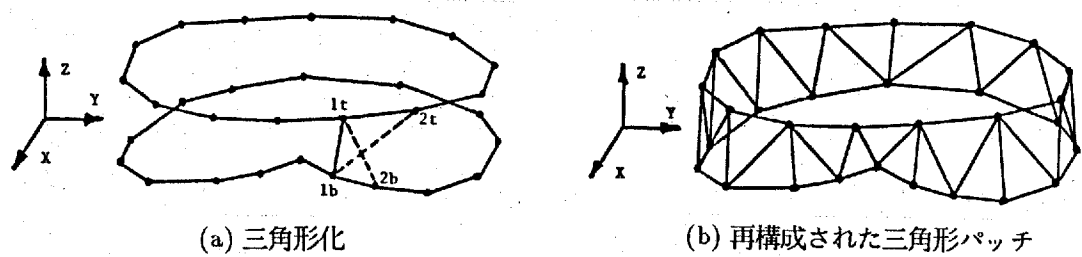


図 C.3: Christiansen らの三角形化手法

- 輪郭線の中心がほぼ一致している。
- 輪郭線の大きさがほぼ同じである。
- 形状が互いに似かよっている。

これらの条件を満たす輪郭線の最も近い輪郭点から出発し、相対する輪郭線の次の輪郭点までの距離の内、短い方の対角線を選ぶことにより三角形パッチを構成する (図 C.3 (a) 参照)。この三角形化により、図 C.3 (b) のような三角形パッチが作成される。

付録 D Klassen の大気拡散モデル

太陽や空の色は太陽高度、大気の状態などによって異なる。Klassen により開発された大気拡散モデル [50] は、大気中の空気分子およびエアロゾルの散乱吸収を考慮して太陽と空の色を求めるものである。本論文では、この大気拡散モデルを改良し、太陽の直射光と天空光のスペクトル分布を求める。

このモデルは、次の前提に基づく。

1. 多重散乱を無視する。
2. オゾン層による吸収は、可視領域において空気分子やエアロゾルに比べて少ないので無視する。
3. 地面と大気との多重反射を考える必要があるが、処理が複雑になるので、これを無視する。
4. 太陽高度が低いときには、大気の密度差により光線は曲がるが、直進性は失われないものとする。

次にこれら二つの散乱光（空気分子とエアロゾルによる）について説明する。

まず空気分子による散乱光について説明する。よく知られているように、光の波長に比べて粒径の非常に小さな空気分子による散乱は、レーリの散乱と呼ばれる。レーリの散乱による反射光 I は次式で与えられる。

$$I(\lambda, \theta) = \frac{I_0(\lambda) \cdot k \cdot F_r(\theta)}{\lambda^4}. \quad (\text{D.1})$$

ただし、

- λ : 入射光の波長
- I_0 : 入射光の強さ
- k : 標準大気に対する定数
- θ : 入射光の方向から測った散乱角
- F_r : 散乱特性を示す角度関数

$$F_r = \frac{3}{4} \cdot (1 + \cos^2 \theta), \quad (\text{D.2})$$

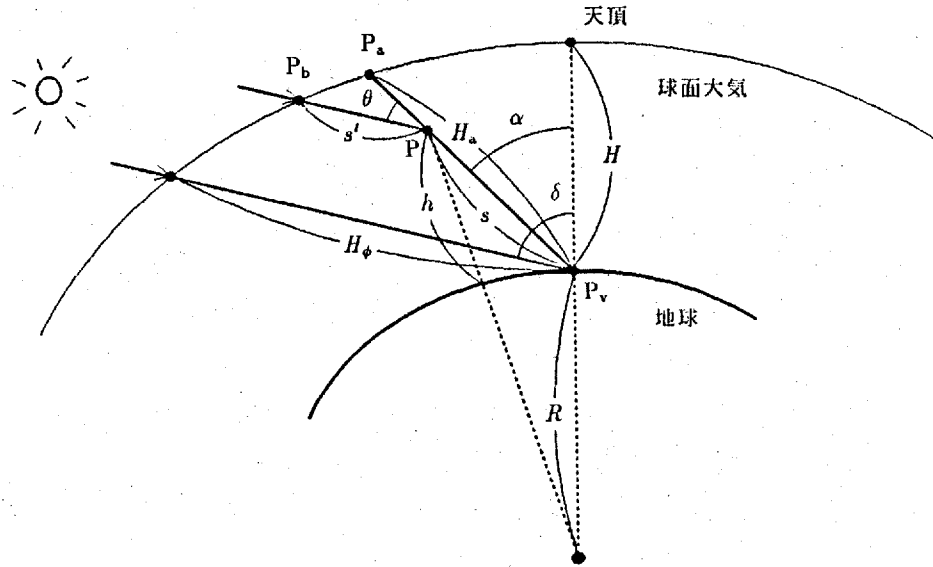


図 D.1: 球面大気モデル

である。また、光が単位長だけ空気中を通過する際に散乱されて減衰する割合、すなわち体積散乱係数 β は、次式で示される。

$$\beta = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda^4}. \quad (D.3)$$

計算点 P_v に入射する光の強度を求めるために、図 D.1 のような球面状の大気を考える。計算点 P_v に入射する光は、 $P_a P_v$ 間に存在する空気分子により散乱減衰された残りである。ある点 P から点 P_v 方向に散乱する光はレーリの散乱式 (式 (D.1)) から求めることができる。また点 P_b に入射する光は点 P に到達するまでに減衰し、また点 P での散乱光も点 P_v に到達するまでに減衰する。

波長 λ の光が大気中の距離 s を通過するときの減衰量を計算するため、体積散乱係数 β を s で積分することにより得られる光学的距離を用いる。空気の密度比を ρ とすると、光学的距離 t は、

$$\begin{aligned} t(s, \lambda) &= \int_0^s \beta \cdot \rho \cdot dl \\ &= \beta \cdot \int_0^s \rho \cdot dl, \end{aligned} \quad (D.4)$$

となる。Klassen は、この空気の密度比を 2 層に分け、それぞれの層では密度比一定として光学的距離を算出している。

大気圏外での太陽光の強さを $I_s(\lambda)$ とし、大気圏外から点 P までの距離を s' とす

ると点 P での P_v 方向への散乱光 I_p は、

$$I_p(\lambda) = \frac{I_s(\lambda) \cdot k \cdot F_r(\theta)}{\lambda^4} \cdot \rho \cdot \exp[-t(s', \lambda)], \quad (D.5)$$

となる。点 P から散乱された光は減衰して P_v に到達する。点 P_v に到達する光 I_v は、 $P_v P_a$ 間の距離 H_a での散乱光を積分することにより求まる。したがって、

$$I_v(\lambda) = \int_0^{H_a} I_p(\lambda) \cdot \exp[-t(s, \lambda)] \cdot ds, \quad (D.6)$$

となる。太陽光は平行光線なので、散乱角は $P_v P_a$ 上で一定である。

また、計算点 P_v に到達する直射日光の成分 I_d は、大気中を通過する距離 H_d から、

$$I_d(\lambda) = I_s(\lambda) \cdot \exp[-t(H_d, \lambda)], \quad (D.7)$$

となる。

次に、エアロゾル粒子による散乱光について説明する。エアロゾルによる散乱光はミーの散乱に従い、粒径や波長に依存する。しかし、ミーの理論は非常に複雑なので、ここでは、散乱特性を示す角度関数に、

$$F_a(\theta, b) = a \cdot \exp(-b \cdot \theta) + c, \quad (D.8)$$

という実験式を用いる。ここで、 a, b, c は実験値である。また、エアロゾルによる減衰係数は、 $B \cdot \lambda^{-b}$ という形で表わされ、実測値として、 $b = 1.3$ が一般に用いられている。ここで B は混濁係数と呼ばれ、大気中のエアロゾル粒子の割合によって変化し、一般に、 $B = 0.05 \sim 0.2$ が用いられる。この角度関数を用いて、レーリ散乱と同様に、計算点に到達する光を求めることができる。ただし、Klassen は、計算コストの削減のために、エアロゾルの分布する空間を平面状の層のモデルを用いている。

付録 E 光学的距離 $t(s)$ の計算

図 4.1 の点 R での微粒子の密度 $\rho(s)$ が、式 (4.2) で定義され、体積散乱係数 $\tau(s)$ が式 (4.3) により与えられるとき、式 (4.4) は、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} t(s) &= \int_0^s \tau(u) \cdot du \\ &= \int_0^s \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p + z_v \cdot u}{h_0}\right) \cdot du \\ &= \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot \int_0^s \exp\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot u\right) \cdot du. \end{aligned} \quad (\text{E.1})$$

式 (E.1) は、以下のように場合分けして、解くことができる。

(1) $z_v = 0$ のとき

$$t(s) = \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot s. \quad (\text{E.2})$$

(2) $z_v \neq 0$ のとき

$$\begin{aligned} t(s) &= \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot \left[-\frac{h_0}{z_v} \cdot \exp\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot u\right)\right]_0^s \\ &= \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot \frac{h_0}{z_v} \cdot [1 - \exp\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)]. \end{aligned} \quad (\text{E.3})$$

さらに、次のように場合分けを行なう。

(2.1) $s = \infty$ のとき

$$t(\infty) = \begin{cases} \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot \frac{h_0}{z_v} & (z_v \cdot h_0 > 0 \text{ のとき}) \\ \infty & (z_v \cdot h_0 \leq 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (\text{E.4})$$

(2.2) $s \neq \infty$ のとき

式 (E.3) は、 $1/z_v$ が含まれるため、 $z_v \simeq 0$ のとき誤差が大きくなり、式 (E.2) との連続性が保たれなくなる。これを防ぐため、式 (E.3) の指数部をテイラー展開することによって式を変形し、 $1/z_v$ を消去する。

$$\begin{aligned} t(s) &= \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot \frac{h_0}{z_v} \cdot \\ &\quad \left\{1 - \left[1 + \frac{\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)}{1!} + \frac{\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)^2}{2!} + \frac{\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)^3}{3!} + \dots\right]\right\} \\ &= \tau_0 \cdot \lambda^{-b} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right) \cdot s \cdot \\ &\quad \left[1 + \frac{\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)}{2!} + \frac{\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)^2}{3!} + \frac{\left(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s\right)^3}{4!} + \dots\right]. \end{aligned} \quad (\text{E.5})$$

付録 F 平行光線の光跡の積分法

図 F.1において、霧がないときの点 R の照度 $I_l(s)$ は、次式で表わされる。

$$I_l(s) = I_l, \quad (F.1)$$

$$F(\theta_l(s)) = F_l. \quad (F.2)$$

ここで、 F_l, I_l は一定値である。点 R と光源との光学的距離 $t'(s)$ は、点 R から光源まで (距離無限大) の区間の体積散乱係数を積分することにより、次式で与えられる。

$$t'(s) = \rho_0 \cdot \tau_0 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b} \cdot \exp\left(-\frac{z_p + z_v \cdot s}{h_0}\right) \cdot \frac{h_0}{z_{Ll}}. \quad (F.3)$$

また、光源関数 $J_l(s)$ は次式で与えられる。

$$J_l(s) = I_l \cdot F_l \cdot \exp(-t'(s)). \quad (F.4)$$

したがって、区間 $[s_1, s_2]$ の散乱光 I は次式となる。

$$I = \int_{s_1}^{s_2} \tau(s) \cdot J_l(s) \cdot \exp(-t(s)) \cdot ds. \quad (F.5)$$

簡単のために、次の置き換えを行う。

$$\alpha = \rho_0 \cdot \tau_0 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b} \cdot \exp\left(-\frac{z_p}{h_0}\right). \quad (F.6)$$

式 (F.5) は、以下のように場合分けして解くことができる。

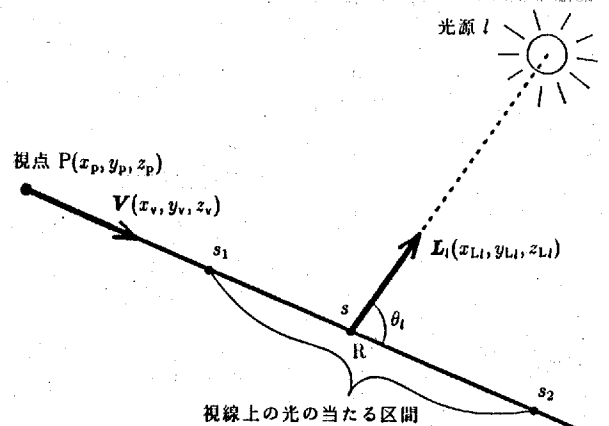


図 F.1: 直射日光による散乱光の解析的な積分

(1) $z_v = 0$ のとき

$$\begin{aligned} I &= I_l \cdot F_l \cdot \int_{s_1}^{s_2} \exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_{Ll}}) \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot s) \cdot ds \\ &= I_l \cdot F_l \cdot \exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_{Ll}}) \cdot [\exp(-\alpha \cdot s)]_{s_1}^{s_2}. \end{aligned} \quad (F.7)$$

(2) $z_v \neq 0$ のとき

$$\begin{aligned} I &= I_l \cdot F_l \cdot \int_{s_1}^{s_2} \alpha \cdot \exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s) \cdot \exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_v}) \cdot \\ &\quad \exp[\alpha \cdot h_0 \cdot (\frac{1}{z_v} - \frac{1}{z_{Ll}}) \cdot \exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s)] \cdot ds. \end{aligned} \quad (F.8)$$

式 (F.8) は、以下のように場合分けして解く。

(2.1) $z_v = z_{Ll}$ のとき

$$\begin{aligned} I &= I_l \cdot F_l \cdot \int_{s_1}^{s_2} \alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_v}) \cdot \exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s) \cdot ds \\ &= I_l \cdot F_l \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_v}) \cdot \frac{h_0}{z_v} \cdot [\exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s)]_{s_1}^{s_2}. \end{aligned} \quad (F.9)$$

(2.2) $z_v \neq z_{Ll}$ のとき

置換積分法を用いる。

$$u = f(s) = \exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s), \quad (F.10)$$

と置くと、

$$\frac{du}{ds} = \frac{d}{ds} f(s) = -\frac{z_v}{h_0} \cdot \exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s), \quad (F.11)$$

であるから、式 (F.8) は、以下のように解くことができる。

$$\begin{aligned} I &= I_l \cdot F_l \cdot \int_{f(s_1)}^{f(s_2)} \alpha \cdot \exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s) \cdot \exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_v}) \cdot \frac{1}{\frac{du}{ds}} \cdot \\ &\quad \exp(\alpha \cdot h_0 \cdot (\frac{1}{z_v} - \frac{1}{z_{Ll}}) \cdot u) \cdot du \\ &= I_l \cdot F_l \cdot \frac{\exp(-\alpha \cdot \frac{h_0}{z_v})}{1 - \frac{z_v}{z_{Ll}}} \cdot \\ &\quad [\exp(\alpha \cdot h_0 \cdot (\frac{1}{z_v} - \frac{1}{z_{Ll}}) \cdot u)]_{\exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s_2)}^{\exp(-\frac{z_v}{h_0} \cdot s_1)}. \end{aligned} \quad (F.12)$$