

衣内気候の数値シミュレーションとその可視化

お茶大生活科学 菅野 恵 (Megumi Sugeno)

お茶大理 清水久美子 (Kumiko Shimizu)

お茶大生活科学 中島 利誠 (Toshinari Nakajima)

お茶大理 佐藤 浩史 (Hiroshi Sato)

これまで衣内気候の実験的研究は盛んになされているが、最近になって実験結果の解析に数値計算が利用され始めた¹⁾。また、数値計算は実験の補間的役割も果たせることが認識され、今後数値計算がこの分野でも重要な研究手段となることが期待されている。そのためには、より現実に近い計算モデルの作成と計算結果の表示法の研究が必要であろう。我々は衣内気候の数値シミュレーションの有効性を示すために簡単なモデルを作成し実験的な計算を行なった。ここで、それらの計算および可視化に関する考察を報告する。

1 はじめに

人間が衣服を着用すると、人体と衣服および衣服と衣服との間に空気層ができる。この空気層内では外部環境とは異なった温度、湿度、気流の分布を持つ局所的な温熱環境が形成される。これは、衣内気候と呼ばれ、人体と外界との間の熱、水分の移動に深く関与している(図1)。

衣内気候は人間と熱環境系の中に存在し、人体が生理的に体温調節を行うことのできる範囲の限界を補っている。すなわち、暑熱環境下では皮膚からの熱放散や汗の外界への移動を促進し、寒冷環境下では逆に熱放散を妨げて人体の恒温状態を維持する。着心地の良い快適な衣服という観点から言えば、着用時に衣服内に適切な微環境が形成されることが望ましい。生理的な快適感が得られる衣内気候とは、皮膚に接している空気層が温度 $32 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\%\text{RH}$ 、気流速度 $25 \pm 15\text{cm/s}$ の範囲であるといわれている²⁾。衣内気候と衣服の快適性との関係は、外部環境が急激に変化して衣内微環境が非定常状態となった時には特に重要であり、このような場合、人間の生理的快適感覚は衣内気候に大きく影響を受ける。

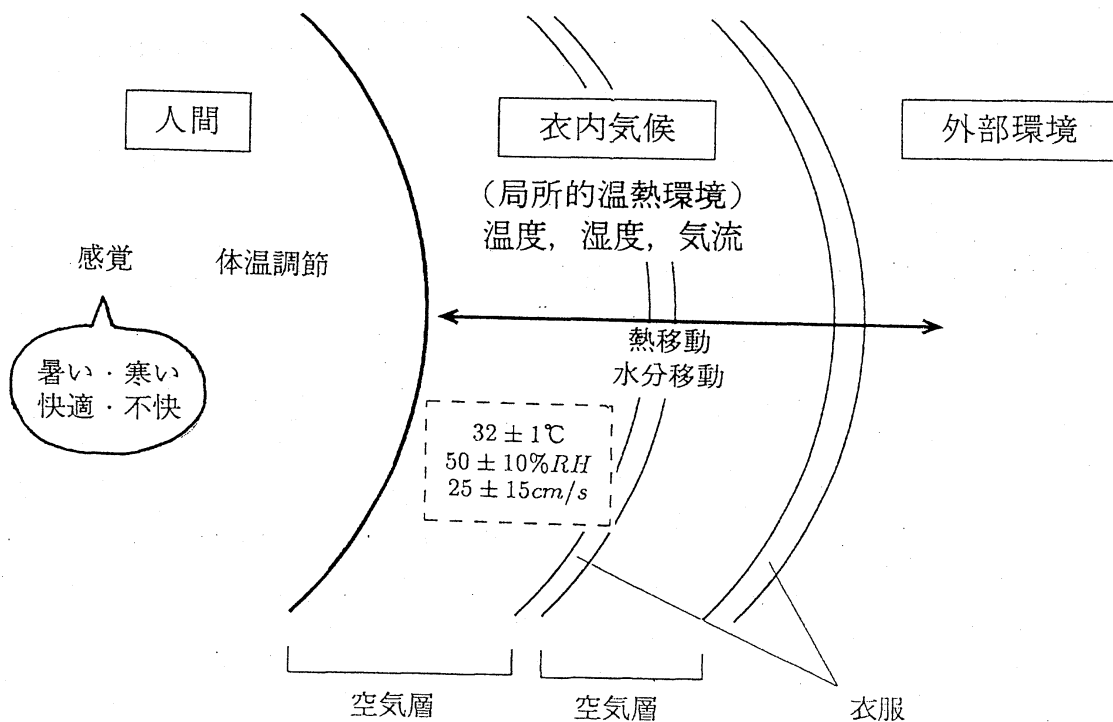


図1 衣内気候

また、衣内気候を熱移動、水分移動といった物理現象としてとらえてモデル化したものを図2に示す。ここでは、皮膚表面が外部環境より高温である場合を想定している。皮膚から放散される熱は空気および衣服素材の熱伝導により衣服表面へ運ばれ、あるいは、衣内に生じる空気の対流により衣服素材を通じて衣服表面に伝わり対流や放射によって環境への放熱が行なわれる。一方、対流により衣服の開口部から直接環境へ放出されるものもある。皮膚表面温度は人体の体温調節機能によって変化し、外界の温度、湿度、人体の熱産生量などによって異なるが、人体が休息時において熱的中立状態にあるときはおよそ $33 \sim 34^{\circ}\text{C}$ の範囲であるといわれている³⁾。この他に、皮膚表面からは常に不感蒸泄と呼ばれる水分の蒸発が起こっており、水蒸気が衣内空気層へ拡散する。皮膚から分泌される汗の移動経路としては、皮膚表面から蒸発するもの、衣服に直接吸水されるもの、蒸発せずに皮膚上を流れ落ちるものが考えられ、汗の蒸発には皮膚からの潜熱移動による皮膚温の低下を伴う。また、衣服を通しての水分移動には、衣服素材の吸水性、吸湿性、放湿性、透湿性などの水分特性が関与している。

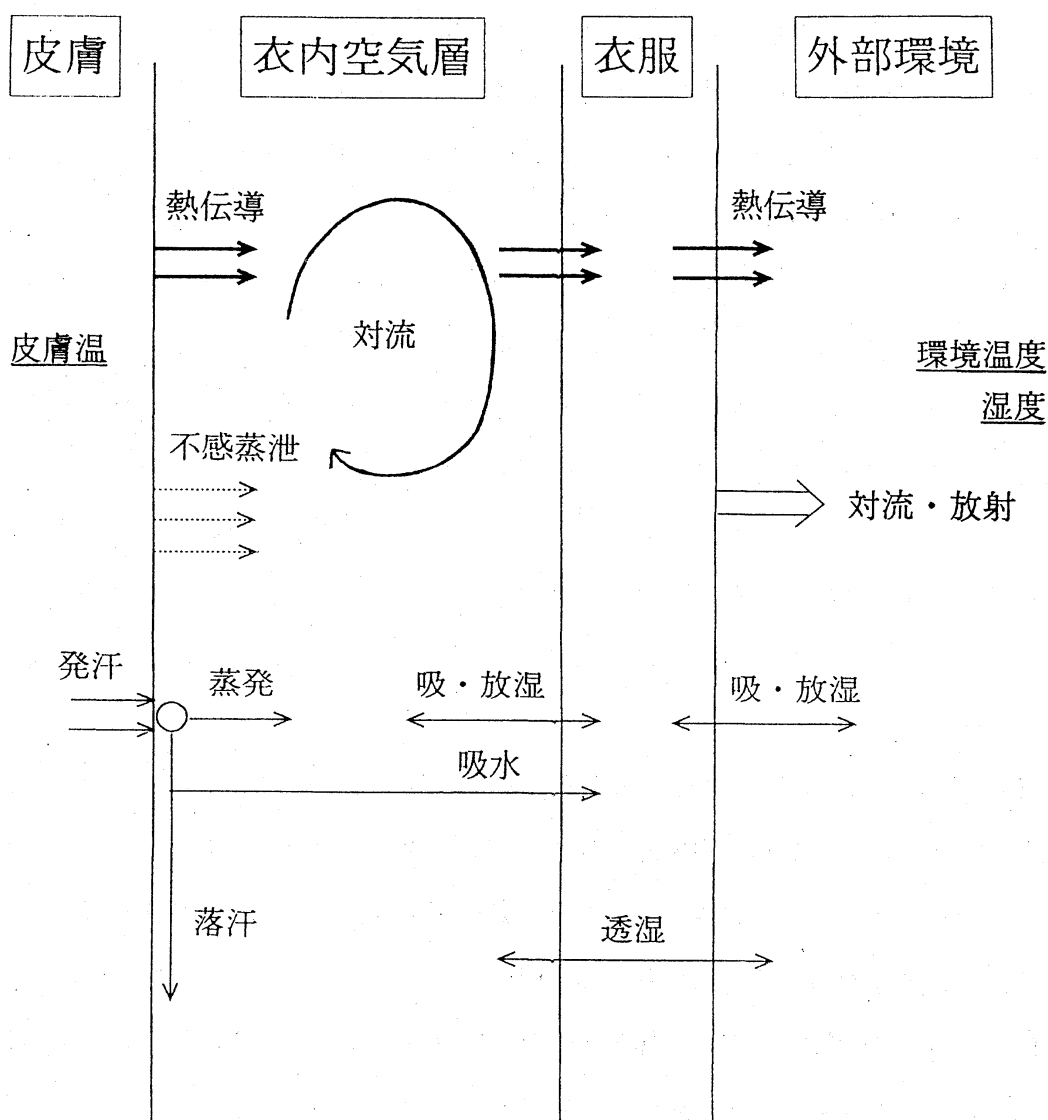


図2 熱移動と水分移動

この様に衣内気候には複雑なメカニズムが見られるが、ここでは、特に、衣内気候を支配する重要な因子として衣内の換気を取り上げる。衣内空気層と環境との間の空気の交換は、人体から外界への熱と水分の移動を促進し、また衣服内に蓄積する炭酸ガスや臭気を外界へ放出する点でも重要である。衣内の換気が十分に行われていないと、特に高温環境下で発汗がある場合などは、衣内に水分が蓄積し、皮膚からの発汗蒸発が妨げられ、その結果、皮膚温が上昇し不快感が高まる。衣内の換気挙動は、衣服素材の通気性の有無や、衣服の袖口及び首回りの開口部、衣内空気層の厚さなど衣服の形状によって大きく異なるもので

ある。これまでの研究では、快適な衣内気候の形成には適切な換気が必要であるといわれているが、換気挙動を含めての衣内気候の検討はまだ十分になされていない。

さて、衣内気候を解明する方法として、被験者による生理実験、あるいはマネキンその他を用いたモデル装置によるシミュレーション実験などがあり、これまでに数多くの研究が発表されている。しかし、センサーの応答性には限界があり、被験者や実験装置に生じる生理的あるいは物理的な反応の時間的変化を詳細に追うことには困難がある。また、外から室内に入ったときのように環境が急激に変化するような場合については、実験条件を再現することは容易ではない。これに対して、コンピュータによる数値シミュレーションでは衣内気候の時間変化をみるのが可能であり、また、環境条件の変更も容易にできるので、衣内気候の非定常状態の様子を詳細に検討することもできる。したがって、衣服の着心地の研究において、コンピュータによる衣内気候の数値シミュレーションは非常に有効な研究手段を与える可能性がある。

本研究では衣内における物理現象を本質的にとらえるために、衣内気候をごく単純化したモデルで取り扱い、熱移動現象および物質移動現象の解明を試みた。すなわち、今回はまず最初の試みとして、水分移動については考慮せず2次元モデルで計算を行った。特に、換気における衣服の開口部の役割に着目して研究を進めた。

将来的には、人体からの発汗現象と衣内の水分移動現象をも含む3次元モデルによる衣内気候の数値シミュレーションを行いたいと考えている。

2 衣内気候の数値シミュレーション

今回は最初の試みであるので2次元モデルでの計算を行なった。図3に用いた計算領域を示す。これは、皮膚上に一枚の衣服を着用した場合の腕の内側から胴体の側面にかけての部分（脇の下の部分）の衣内空気層をモデル化したものである。境界は皮膚表面及び衣服表面を表し、左下の開口部は袖口に相当する。右上は脇の下の部分に対応するが、脇の下から身体の前側（または後ろ側）を通して首の開口部へ抜ける空気の流れを考えて開口部を設定したものである。また、右下の水平方向の境界はウエスト部分に相当し、この境界は断熱壁として取り扱った。

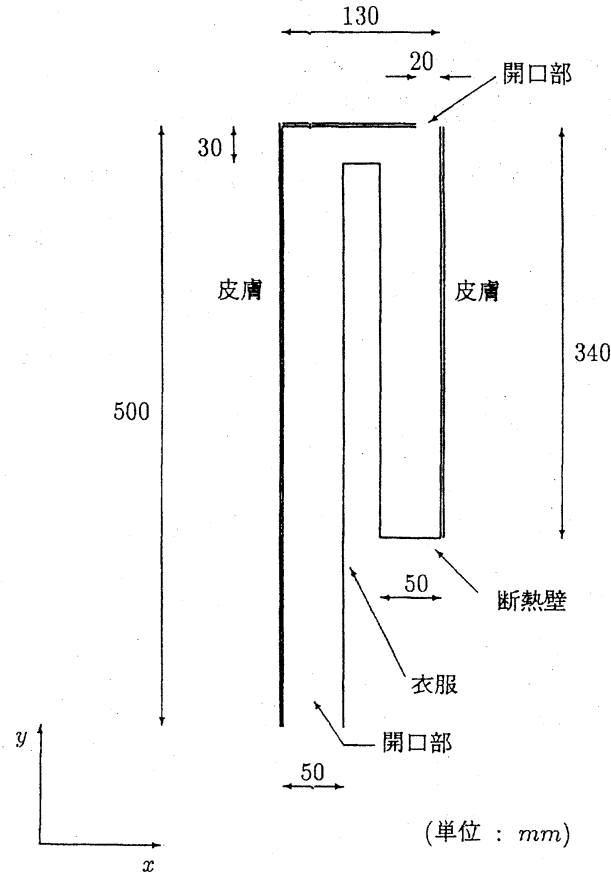


図3. 計算領域

衣服内の空気は非圧縮粘性流体として取り扱うと支配方程式は次式で与えられる。

連続の式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) + g(\beta \Delta \bar{T} + \gamma \Delta \bar{C}) \quad (3)$$

温度の式

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} \right) \quad (4)$$

濃度の式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここで、 t は時間、 $(\bar{u}, \bar{v})$ は流速、 $\bar{p}$ は圧力、 $\bar{T}$ は温度、 $\bar{C}$ は酸素濃度である。単位は MKS 単位系を用いる。また、 $\bar{\rho}$ は空気の密度、 ν は動粘性係数、 α は温度伝導率、 D は酸素の拡散係数、 g は重力の加速度を表す。温度および酸素濃度が空気の流れに与える効果はブシネスク近似で取り入れることとし、その時にあらわれる係数を、それぞれ、 β 、 γ とした。計算で用いたこれらの諸量の値を表 1 に示す。

表 1 計算で用いた定数の値

密度 [kg/m^3] :	$\rho = 1.20$
動粘性係数 [m^2/s] :	$\nu = 1.50 \times 10^{-5}$
温度伝導率 [m^2/s] :	$\alpha = 2.12 \times 10^{-5}$
拡散係数 [m^2/s] :	$D = 1.971 \times 10^{-5}$
重力加速度 [m/s^2] :	$g = 9.8$
[$/K$] :	$\beta = 3.41 \times 10^{-3}$
[$/\%$] :	$\gamma = -1.39 \times 10^{-3}$
プラントル数 :	$P_r = 0.708$
レイリー数 :	$R_a = 1.97 \times 10^8$
:	$F = -0.571$
ルイス数 :	$L_e = 1.08$

計算は次の初期条件と境界条件を用いて行なった。

(1) 初期条件

全領域において: $\bar{u} = 0, \bar{v} = 0$

$$\bar{p} = 0$$

$$\bar{T} = \bar{T}_a$$

$$\bar{C} = 0$$

最初、衣内空気層には窒素を充填し静止させておく。開口部を開放すると共に外界から空気が流れ込み、それに伴って衣内の酸素濃度が変化する様子の見て換気を観測する。また、最

初の温度は外界の温度、すなわち、気温 $\bar{T}_a (= 293K)$ と等しいとした。

(2) 境界条件

すべての壁面において: $\bar{u} = 0, \quad \bar{v} = 0$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial n} = 0$$

温度 皮膚: $\bar{T} = \bar{T}_s$

衣服: $\bar{T} = \bar{T}_a$

断熱壁: $\frac{\partial \bar{T}}{\partial n} = 0$

壁面はすべてすべり無しとした。また、空気も通さないと仮定した。実際の布地には通気性があり、それが衣服の着心地に大きく影響する。したがって、将来この仮定は変更する必要がある。 $\bar{T}_s (= 308K)$ は皮膚温である。開口部の境界条件はいくつかの場合について計算を行ない、より現実に近い結果が得られるものを選んだ。

開口部からの空気の出入りがあるため、2次元流体の計算によく用いられる流れ関数・渦度法は適当ではない。したがって、F.H.Harlow と J.E.Welch が提唱した MAC(Marker And Cell) 法⁴⁾⁵⁾を用いて計算を行なった。すなわち、圧力 $\bar{p}$ を陽に取り扱い、メッシュとしてはスタガードメッシュを用いる。それぞれの量の原点を適当に移動し無次元化を行なうと、無次元化した Navier-Stokes 方程式から圧力 p に対する次の Poisson 方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = & -\frac{\partial^2(u^2)}{\partial x^2} - 2\frac{\partial^2(uv)}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2(v^2)}{\partial y^2} - \frac{\partial D}{\partial \tau} \\ & + P_r \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right) + P_r R_a \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} + F \frac{\partial S}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (7)$$

であり、本来連続の式から $D = 0$ となるべきものであるが、(6) 式にこれを残すことによって解が安定化する。無次元化された支配方程式および圧力に対する Poisson 方程式をスタガードメッシュを用いて差分化し計算を行なった。計算の流れ図を図4に示す。

速度、温度および酸素濃度についての計算結果を可視化ソフトウェア AVS(Advanced Visualization System)を用いてアニメーション化した。AVSは旧 Stardent 社が開発した Scientific Data Visualizer である。データフローパラダイムを基本理念として設計されてお

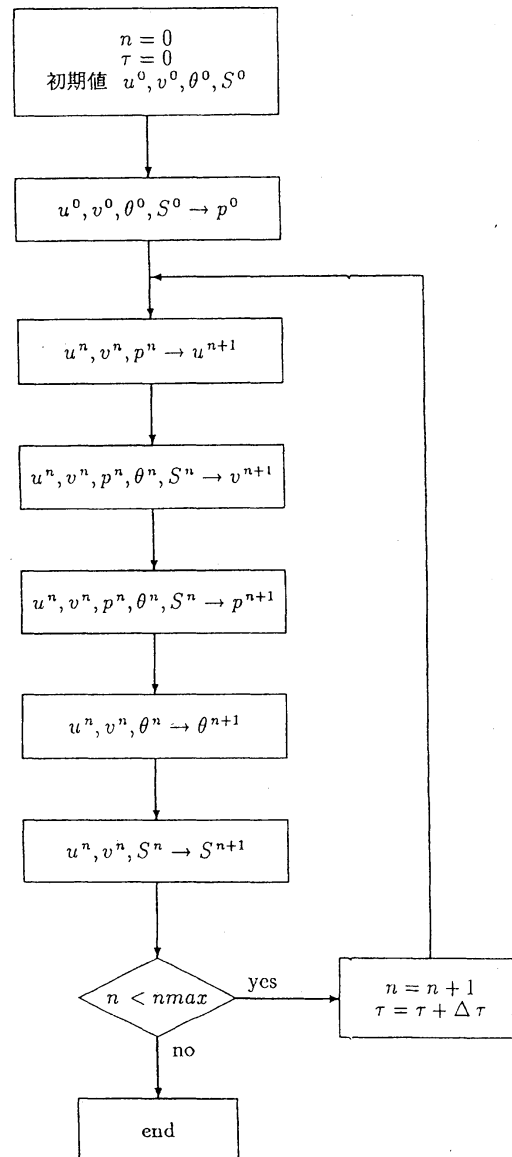


図4 流れ図

り、モジュールと呼ばれる部品を組み合わせてネットワークに組み込むことにより、独自の可視化アプリケーションを作ることができる。各モジュールはネットワーク内での可視化サイクルにおいて、入力ポートを通してデータを受け取り、データ加工、表示データ形式への変換、表示など、それぞれが独自の機能を実行し、出力ポートから加工したデータを出力する。ネットワーク間の結合はデータが流れて行く仕組みを表している。また、各モジュールは内部パラメーターを持つ単独のシステムとみなせるので、パラメータコントローラを操作

することにより、ネットワークを実行しながらインタラクティブにパラメータを制御することが可能である。

3 3次元データの可視化

コンピュータの表示画面は2次元であり、2次元データの可視化に関しては技術的には大きな困難さはない。今回の計算も含めて、2次元スカラー場やベクトル場の可視化、さらに両者の同時表示について、数多くの研究結果が発表されている。しかし、我々は最終的には3次元空間における数値シミュレーションを目指している。したがって、ここで3次元データの可視化について考えてみる。

3次元データを可視化するには様々な問題が生じる。まず、表示画面は2次元であるからどのように3次元データを表示すれば知りたい情報が得られるであろうか。これまで、等値面を描く方法(インダイレクトアプローチ)とボリュームレイキャスティング法(ダイレクトアプローチ)がよく用いられている。しかし、我々にとってこれらの手法のみでは十分ではない。例えば、インダイレクトアプローチは流れの全体像をつかむには不適當である。また、ダイレクトアプローチも全体像をつかむには適しているが、処理に時間がかかり、しかも、データ量が多すぎて定量的なイメージを把握するのには適していない。これは山の形状を知りたいときは写真よりも等高線図が優れていることと似ている。また、局所的な性質を詳しく知りたいときは同時表示が問題になる。複数の3次元データの同時表示は2次元の場合に比べて非常に複雑となり表示方法に工夫が必要である。このように、3次元データの場合にはどのような情報を得たいかによりそれに適した表示法を選ばなければならないし、もしなければ新しい表示法を開発しなければならない。

3次元科学データの可視化の方法として、ボリュームビジュアライゼーションという概念が誕生した。これは3次元モデルの形状や内部構造を2次元画像として表示するもので、さまざまな応用分野で研究、開発が進められている。以前は3次元の形状を2次元画像に投影する方法として、形状の外側だけのデータを与えていた。つまり、グラフィックスの表示対象が線や面だけでり、はりぼてのように、形状の外側のデータだけしかもたなく、例えば、断面を描くと空白となってしまう。しかし、3次元ボリュームデータをボクセルの集合としてとらえ、データ全体をダイレクトに半透明表示する技術が、1985年に米国 Pixar

社によって発表された。これが科学技術目的のボリュームビジュアライゼーションの始まりである。3次元空間に適当な格子点を考え、各格子点に1個または複数個のデータを付与する。このような3次元離散格子点に付与されたデータの集合をボリュームデータと呼び、このボリュームデータを2次元ディスプレイ上に描画することをボリュームレンダリングと言う。最近、さまざまなボリュームレンダリングの技法が開発されつつある。また、ボクセルとはピクセルを3次元に拡張した概念である。

Keller and Keller⁶⁾ はこれまでに開発されたサイエティフィックビジュアライゼーションの事例を集めて体系化している。実際に3次元データの可視化が必要になったとき彼らの文献を参考にするのも一案である。数値シミュレーションを行なっている研究者にとって適切な可視化手法を選択するのは一般に困難である。我々のグループではKeller and Kellerの文献を中心に事例集をデータベース化し、可視化技法選択支援システムを作成した⁷⁾。また、物理現象の可視化を目的として、最近、新しい2つのボリュームレンダリングの手法を提案した。ひとつは、疑似ダイレクトアプローチ⁸⁾で、もう一つはボルグリフ⁹⁾を用いる手法である。どちらの手法も衣内気候の研究に適用可能である。

3.1 疑似ダイレクトアプローチ

ボリュームレンダリングの手法としては、従来から、ダイレクトアプローチとインダイレクトアプローチが知られている。

インダイレクトアプローチは、空間の中で、ある特定の値を選び、その値をもつボクセルをパッチで結ぶことによって等値面を張る手法である。一方、ダイレクトアプローチの一例としてレイキャスティング法がある。まず、ボクセルの値に応じて各ボクセルに色と透明度を与える。(透明度を与える方により3次元構造の内部の見え方を異なってくる。)そして、ある視点とピクセルを結ぶ直線上にあるボクセルの色と透明度を加算し累積カラーを求め、それをピクセルに付与する。

我々は陽子・水素原子衝突の数値シミュレーションの結果を解析するために計算で得られた電子密度の可視化を試みた¹⁰⁾。すなわち、電子の存在確率密度からボリュームデータを作成し、インダイレクトおよびダイレクトアプローチで描画してみた。等値面を描く手法は選ぶ値によって非常に異なった印象を与えることが分かった。しかも、値の選び方によっ

てはメカニズムの解釈に誤解を与えることもあった。一方、レイキャスティング法による画像では全体像はなんとなく分かったが、描画に時間がかかる割には定量的なイメージを得づらく不満足であった。

そこで、我々は次のような疑似ダイレクトアプローチを提案し、それをこの問題に適用してみた。疑似ダイレクトアプローチは次のような手法である。まず、数枚の等値面を作り、各等値面に値に応じて色と透明度を付加する。そして、この等値面を重ねて表示するのである。この、疑似ダイレクトアプローチはインダイレクトアプローチとダイレクトアプローチの中間に位置する。すなわち、疑似ダイレクトアプローチで1枚の等値面を描いたものがインダイレクト、無限枚の等値面を描いたものがダイレクトアプローチと解釈することができる。疑似ダイレクトアプローチが要する時間とメモリーはインダイレクトアプローチの数倍程度、すなわち、等値面の枚数倍程度であり、ダイレクトアプローチに比べると非常に効率的である。この手法はデータの空間コヒーレンスが高い場合には非常に有効であると考えられる。電子密度の空間コヒーレンスは高いので、この疑似ダイレクトアプローチを適用し、画像を作成しアニメーション化した。得られた結果は満足のいくもので、衝突のメカニズムの解明に役に立てることができた。

衣内気候は流れが穏やかで乱流を考慮する必要はない。したがって、衣内気候の研究で取り扱う物理量の空間コヒーレンスは十分に高く疑似ダイレクトアプローチを適用して描かれた画像は研究に大いに役立つことが期待される。

3.2 ボルグリフ

グリフを用いる手法は局所的な性質を表示する場合によく利用される。すなわち、画像上のある場所の性質を知りたい場合に、その場所をマウスでクリックするとグリフが現われてその場所の性質を知ることが出来る。取り扱うデータにより、また、知りたい情報に合わせて様々なグリフが考案されているが、ボルグリフもその一つである。ボルグリフは Volumetric Glyph の略でスカラーとベクトルを同時表示するために考案された。

まず、ボクセルを $3 \times 3 \times 3$ のサブボクセルに分解し、真ん中のものを含む3つのサブボクセルを用いてベクトルを表現する。この3つのサブボクセルの並び方でベクトルの向きを示し、ベクトルの大きさに応じてサブボクセルに色を与える。また、ベクトルの方向を

示すために3つのサブボクセルの透明度を変えてコメットテイル的な雰囲気を出させる。このようにするとベクトルを視覚的に明確に捕えることが可能となる。また、残りのサブボクセルにはボクセルのスカラー値に応じた色を与える。その際、ベクトルの大きさを与える色の範囲とスカラー値を表わす色の範囲は重ならないようにする。このようにして作成したボルグリフはベクトルとスカラーを同時表示する際に有効であろう。現象の動的構造の解明にはアニメーションがよく利用される。その中からある静止画面を選んで現象の解析に用いることがよくあるが、静止画面では動的構造を把握しづらいことが多い。そのような場合ボルグリフを用いて描かれた画像では静止画面であっても内部のダイナミックな構造がよく見える。我々は赤潮の発生のメカニズムの研究を行なっているが、数値シミュレーションの結果をこのボルグリフを用いて画像化し上述の効果を確かめた。衣内気候の数値シミュレーションでは空気の流速のほかに、温度、湿度など複数の物理量が関連していて、これらを同時表示することが望まれる。その際にはここで述べたボルグリフの手法は大いに威力を発揮するであろう。

4 おわりに

我々は衣内気候の研究を行なうため数値シミュレーションが有効な手段と成りうることを確かめるため、簡単な2次元の物理モデルを作成しそれに基づく計算を行なった。そして、数値シミュレーションが非常に有効であること確かめた。しかし、我々が用いたモデルでは湿度を考慮に入れていないし、また、布地の通気性も無視している。現実の衣服の着心地の研究に用いるにはこのモデルではあまりにも単純化しすぎている。今後、モデルをより現実近づけて実験結果との比較にたえられるような3次元モデルの作成に力を傾ける必要があるだろう。

また、3次元の数値シミュレーションを行なった場合どのような可視化手段を用いるかに大きな問題が残される。我々はその際に生じる問題点を検討し、可能なボリュームビジュアライゼーションの手法についての考察を行なった。

本研究はまだ始まったばかりであり、今後衣内気候のモデルに不感蒸泄を取り入れることを検討している。

本研究を行なうに際し数多くのご助言を頂いた千葉大学工学部河村哲也助教授、ボルグリフに関する情報を提供して頂いたお茶の水女子大学理学部藤代一成助教授、井上千鶴氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 秋美先, 加藤豊文, 鎌田佳伸, 中島利誠: "人体と着衣との間の微気候に及ぼす空気層厚さの効果", 繊維学会誌, **50**, (1994) 298.
- [2] 日本人間工学会: 被服と人体 (1980, 日本出版サービス).
- [3] 中山昭雄 編: 温熱生理学 (1977, 理工学社).
- [4] F.H.Harlow and J.E.Welch: "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", Physics of Fluids, **8**, (1965) 2182-2189.
- [5] P. J. Roache (高橋亮一 他訳): コンピュータによる流体力学 (1978, 構造計画研究所).
- [6] Peter R.Keller and Mary M.Keller: Visual Cues: Practical Data Visualization, (1993,IEEE Press).
- [7] 國友優子, 中村恭子, 川田亜矢子, 市川哲彦, 佐藤浩史, 藤代 一成: "可視化技法選択支援システムの設計と実装", 情報処理学会第 48 回全国大会講演論文集 (3), (1994) .
- [8] 川田亜矢子, 佐藤浩史, 藤代 一成: "疑似ダイレクトボリュームビジュアライゼーション", 情報処理学会第 46 回全国大会講演論文集 (2), (1993) 473-474.
- [9] I. Fujishiro, A. E.Kaufman, 茅暁陽, and C. Inoue: "VolGlyphs: An Approach to simultaneous Visualization of 3D Scalar and Vector Data", private communication.
- [10] 白井恵美, 松本英美, 柳瀬京子, 藤代一成, 佐藤浩史: "疑似ダイレクトビジュアライゼーションによるイオン・原子衝突シミュレーションの解析", 情報処理学会第 46 回全国大会講演論文集 (2), (1993) 475-476.