

学位論文題名

局所異方構造を有する多孔質体中の透過流動

(Fluid permeability of porous media with locally anisotropic structures)

学位論文内容の要旨

多孔質体中の透過流動は、汚水処理などにみられるフィルター濾過や分離プロセス、トリクルベッド反応、ペーパーコーティングといった化学工学から、エネルギーの貯留・運搬、および土壌汚染といった資源・環境工学のように、幅広い分野のさまざまな工学プロセスと密接に関係している。このようなプロセスでは高精度・高効率で物質移動を制御する必要があるが、そのために理解しておくなくてはならないのが多孔質体中の流体の透過特性である。しかしながら、多孔質体は大小さまざまなスケールの空隙を有しており、その複雑性・多様性のために統一的な理解を得ることが極めて困難となることから、流体の移動特性について数多く研究されているにもかかわらず未だ十分な知見が得られていない。こうした背景から、多孔質体中の流体の透過特性を適切に評価するためには、空隙率や空隙形状など多孔質体の構造と透過特性の関係を統一的に理解することが重要であると考えられる。

本研究では多孔質体を粒子層でモデル化し、解析が困難とされる多孔質体の非一様性や異方性に着目した解析を行った。粘性流れを対象とし、多粒子の存在下での流れ場解析には Stokesian dynamics 法を用いた。Stokesian dynamics 法は、系を構成するすべての粒子-流体間の流体力学的相互作用を考慮して流動場を解析することができる手法の一つであり、任意の粒子配列で個々の粒子の位置関係を考慮し、粒子-流体間の相対速度および粒子に作用する抗力の相対的な関係を求めることができる。本研究では、このような特色をもつ Stokesian dynamics 法を用いて、局所的に異方性を有する複雑な粒子層について流体の透過率 (permeability) を理論計算によって求め、その局所異方構造と流体の透過特性との関係について調べることを目的とした。特に、内部の粒子配列に局所的な偏りが存在する粒子層、有限の層厚によって端部近傍における粒子の位置関係が異方的となる有限粒子層、および、異なる粒径を有する粒子が空間的に偏って分布した多分散粒子層に関して、permeability の計算結果から、内部の粒子配列、端部の存在、多分散性による 3 種類の局所異方構造が透過特性に及ぼす影響を明らかにした。

本学位論文は全 6 章から構成される。

第 1 章は緒論であり、多孔質体中の透過流動に関する研究背景について関連する基礎知識および既往の研究成果に基づいて示すとともに、本研究の目的および構成について記述した。

第 2 章では、permeability を評価するための理論解析手法について記述した。本解析では、任意の粒子配列で個々の粒子の位置関係を考慮して、粒子-流体間の相対速度および粒子に作用する抗力の相対的な関係が導出可能な Stokesian dynamics 法を基礎とした手法を用いた。既存の Stokesian dynamics 法を端部が存在する系、および多分散系に拡張した理論計算手法について述べ、最終的に得られた流体速度と粒子に作用する抗力の関係から permeability を算出する方法について示した。

第 3 章では、第 2 章で示した理論計算結果を既往の研究結果と比較することによって手法の妥当性を示したのち、任意のさまざまな構造を有する粒子層の permeability を算出し、透過特性の内部構

造依存性を定量的に明らかにした。具体的には、等方的なランダム構造、土壌のように空隙の連結性が卓越した亀裂構造、粒子が連結して配列したフィルターのような網目状構造、異方的な構造の一例としての縞状構造という、粒子体積率の等しい異なる4種類の粒子層について permeability を算出した。計算結果から、空隙の連結性が permeability に影響を与えることが推察された。さらに、4種類の構造のうち最も空隙の連結性の卓越した縞状構造に関して、縞の明瞭さ、および縞と流体の透過方向とのなす角をパラメータとして定量的な解析を行い、透過特性を評価するためには流体の透過方向における空隙の連結性が重要となることを明らかにした。

第4章では、カラム試験装置など実際の工学プロセスにみられるような有限の厚さを有する粒子層において、端部の存在が流体の透過特性に及ぼす影響について記述した。静止した液中に粒子層が存在する場合に、各粒子に作用する抗力の分布を求めると、端部近傍の粒子に作用する抗力が粒子層内部の値とは異なること(端効果または end effect)が示された。このような端効果は端部の存在によって粒子の位置関係に異方性が生じることに起因すると考えられる。これらの結果をもとに有限の厚さを有する粒子層内部の permeability の分布を算出すると、同様の端効果がみられ、特に粒子が等方的にランダムに配列した粒子層では端部近傍で流体が流れやすくなることが明らかとなった。さらに異なる粒子体積率、異なる層厚を有する粒子層での計算結果から、本計算条件の範囲内では、端効果は粒子体積率の大きな粒子層ほど顕著であり、その範囲は粒子層の厚さに依存せず、およそ粒子半径の5個から10個分であることを明らかにした。

第5章では、砂や礫から成る堆積層、電池や電子デバイス内部など幅広い分野でみられる多分散粒子層を対象とし、粒子のサイズ分布および空間分布と permeability との関係について記述した。多分散粒子が等方的にランダムに存在する物質では、内部の透過特性も等方的であり、粒子の表面積に比例した permeability の解析解が既存の研究結果により得られている。これに対し本章では、異なる粒径を有する粒子の空間分布に偏りがある場合の permeability を解析した。このような異方的な粒子サイズ・空間分布を有する粒子層を定量的に表すために、本研究では成層度というパラメータを設定し、部分的に成層した構造を有する粒子層の permeability の計算結果を示した。結果として、異方的な粒子層の permeability はその粒子サイズ・空間分布に依存することを示し、異なる粒径の粒子の混ざり具合を表す成層度というパラメータにより、混ざり具合の見た目の観察結果から permeability が予測可能であることを提案した。さらに、異方的な多分散粒子層における permeability が、各位置に存在する粒子の表面積に比例する局所透過抵抗の積分によって得られることを明らかにした。

第6章は結論であり、本研究によって得られた成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主査	准教授	原田	周作
副査	教授	五十嵐	敏文
副査	教授	金子	勝比古

学位論文題名

局所異方構造を有する多孔質体中の透過流動

(Fluid permeability of porous media with locally anisotropic structures)

多孔質体中の透過流動は、フィルター濾過や吸着剤による分離プロセスや土質改善プロセスのような環境工学、エネルギー資源の開発・生産プロセスといった資源工学をはじめ、幅広い工学分野と密接に関係している。このようなプロセスの高効率化のために重要となるのが多孔質体中の流体の透過特性である。しかしながら、多孔質体は大小さまざまなスケールの空隙を有しており、その複雑性・多様性のために、流体の透過特性について未だ十分な知見が得られていない。こうした背景から、多孔質体中の流体の透過特性を適切に評価するためには、空隙率や空隙形状など多孔質体の構造と透過特性の関係を統一的に理解することが重要であると考えられる。

本研究は粒子状の多孔質体を対象とし、特に、内部の粒子配列に局所的な偏りが存在する粒子層、端部近傍で粒子の位置関係が異方的となる有限粒子層、さらに異なる粒径を有する粒子が空間的に偏って分布した多分散粒子層に関して解析を行った。粘性流れを対象とし、多粒子の存在下での流動場解析には、個々の粒子の位置関係を考慮し、流体速度および粒子と流体の相互作用力の関係を求めることができる Stokesian dynamics 法を用いた。本研究では Stokesian dynamics 法によって局所的に異方性を有する複雑な粒子層の透過率 (permeability) を理論的に算出し、内部の粒子配列、端部の存在、多分散性による局所異方構造が透過特性に及ぼす影響について調べることを目的とした。本学位論文は全 6 章から構成される。

第 1 章は緒論であり、多孔質体中の透過流動に関する研究背景について関連する基礎知識および既往の研究成果に基づいて示すとともに、本論文の目的および構成について記述した。

第 2 章では、permeability を評価するための理論解析手法について記述した。本解析では、任意の粒子配列で個々の粒子の位置関係を考慮して、流体速度および粒子と流体の相互作用力の関係が導出可能な Stokesian dynamics 法に基づき計算を行った。既存の Stokesian dynamics 法を端部が存在する系、および多分散系に拡張した理論計算手法について述べ、得られた流体速度と力の関係から permeability を算出する方法について示した。

第 3 章では、第 2 章で示した理論計算手法の妥当性を確認したのち、繊維状物質の permeability の実測値と粒子列モデルによる本計算結果の比較によって、本計算手法によって実際に任意の物質の透過特性が予測可能であることを示した。また、粒子体積率は等しいが粒子配列の異なる粒子層の計算結果から、透過特性の内部構造依存性を定量的に示すとともに、空隙の連結性が permeability に影響を与えることが推察された。

第 4 章では、カラム試験装置など実際の工学プロセスにみられるような有限の厚さを有する粒子

層において、端部の存在が流体の透過特性に及ぼす影響について記述した。粒子層内部の局所的な透過抵抗を算出することにより、端部近傍では透過特性が異なること(端効果)が示された。また、端効果は粒子配列に依存することが示され、粒子が等方的にランダムに配列した粒子層では、端部近傍流体が流れやすくなることが明らかとなった。本計算条件の範囲内では、端効果は粒子体積率の大きな粒子層ほど顕著であり、その範囲は粒子層の厚さに依存せず、およそ粒子半径の5個から10個であることが明らかとなった。

第5章では、砂や礫から成る堆積層、電池や電子デバイス内部など幅広い分野でみられる多分散粒子層を対象とし、粒子のサイズ分布および空間分布と permeability との関係について記述した。本章では、異方的な粒子サイズ・空間分布を有する粒子層を定量的に表すために成層度というパラメータを設定し、部分的に成層した構造を有する粒子層の permeability の計算結果を示した。結果として、異方的な粒子層の permeability はその粒子サイズ・空間分布に依存することが示され、異なる粒径の粒子の混ざり具合を表す成層度というパラメータにより、混ざり具合の見た目の観測結果から permeability が予測可能であることを提案した。さらに、異方的な多分散粒子層における permeability が、各位置に存在する粒子の表面積に依存する局所透過抵抗の積分によって得られることを明らかにした。

第6章は結論であり、本研究によって得られた成果をまとめている。

以上を要するに、著者は複雑な空隙形状を有する多孔質体中の透過流動について、多孔質体を多分散粒子層でモデル化し、内部構造の非一様性に着目した解析を行った。その結果、端部が存在する、ややく構造化した成層系など、局所的な異方性を有する多孔質体の透過流動についての知見を得るとともに、透過抵抗の予測モデルを提案した。これらの研究成果は、混相流体力学の分野における術的進歩に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授けられる資格があるものと認める。