

微小スケールの流れに基づく輸送機構の理解

機械工学専攻 熱流動態学講座
教授 竹内 伸太郎

1. 略歴

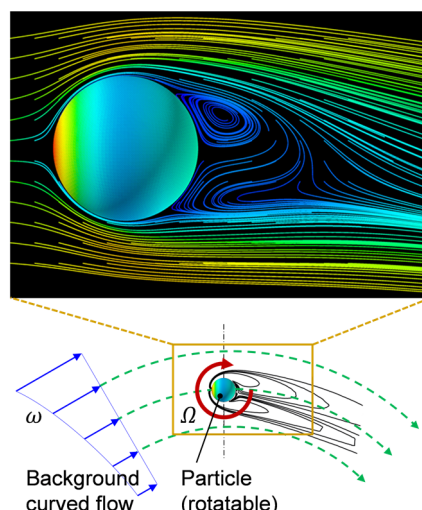
私は2010年に当時の機械工学専攻マイクロ機械講座に准教授として着任し、2023年4月1日付で熱流動態学講座の教授に昇任いたしました。それ以前は、2001年3月に大阪大学で学位を所得し、ポスドクを経て、2003年より大阪大学工学研究科機械工学専攻で助手を三年半務めた後、2007年から約三年間を東京大学で過ごしました。その間継続して流体力学に関連するモデリングと数値解析に従事し、主な研究内容としては流体と固体物体の相互作用問題、流れの中における熱および物質の輸送問題があります。以下ではそれらの中から代表的なものについて概略をご紹介します。

2. 分散粒子を含む流れの解明

学位取得以降長く取り組むことになったこの問題は、ポスドクの際に従事した流体と固体粒子の運動の相互作用に関するテーマがきっかけです。当時の数値解法は流体中における固体粒子運動を球形の質点としてモデル化したものでしたが、その後大阪大学の助手に着任してからは非質点効果のモデリングに着手し、以後多数の粒子・気泡・液滴などの分散要素の相互作用を含めた大きなテーマに発展しました。分散要素を非質点として取り扱くと、非球形性、可変形性や粒子内温度分布など、興味深い現象を記述する自由度が生まれます。それらのうち可変形性については、弾性物体と流体の運動の相互作用問題に携わった際に、弾性体の応力を場の量として流体応力とカップリングするモデリングを経験し、以下の「応力場の粗視化」へつながる視点を得ました。

粒子の非質点効果が複雑に現れる問題の一つに粒子乱流があります。粒子直径 d と流れの最小渦サイズ η の大小は、粒子による乱流変調現象が切り替わる条件の一つであり、その大小関係に応じて粒子に作用する流体力（および流体が粒子から受ける反力）の数理的表現を切り替えて問題を解きます。しかし、 d が η と同程度の場合は有効な方法がなく、粒子乱流の理解は遅れていました。私達はこの場合において粒子周囲の流れ場の粗視化プロセスを見直し、非質点効果を含む新規な基礎方程式を提案しました。その結果、数値計算コストの大幅な削減（高解像度数値計算に対し約4万分の1の計算時間）に貢献し、乱流変調現象における支配因子を明らかにしてきました。

今後計算機が発達しても、分散要素の界面近傍から装置・人間・環境の全スケールにわたって数値解析を実施するのは困難であり、この例のように、適切な粗視化を導入して現象をとらえ直すという視点は重要になると考えています。

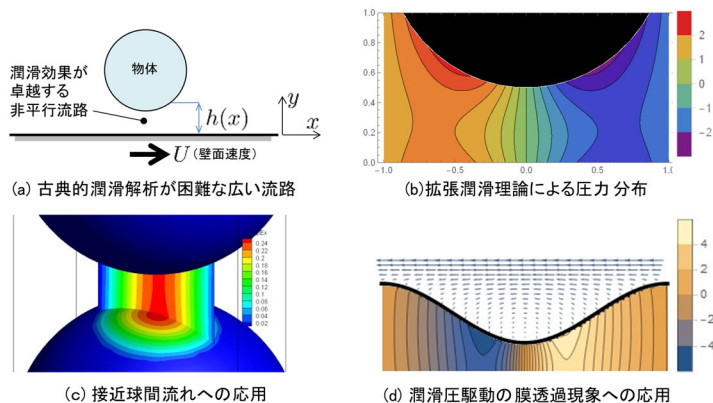


粒子乱流解析の一例：曲がった流れの中に置かれた粒子の後流

3. 機械の効率や生体の機能を支配する流れ

混相流中の輸送現象に影響を与える未解明現象として、分散要素間の潤滑があります。流体中で接近して相対運動する二物体の間では大きな圧力が発生するとともに剪断応力は大きく減少し、この現象は古くからベアリングなどの機械要素の潤滑に用いられてきました。混相流では（機械要素間の固定距離下における潤滑とは状況が異なり）粒子間

距離が比較的広い範囲まで潤滑の効果が顕れ、流れ全体に大きな影響を及ぼしているはずですが、十分に理解されていません。私はその解決を目指して、従来モデルよりも広い条件で使える潤滑モデルを構築しました。そのアイデアは、潤滑が起こる領域においてある条件の下、粒子表面上の圧力（2次元情報）から粒子間の圧力分布（3次元情報）を再構成し不足する解像度を補うというものです。



狭隘部における潤滑流れのモデリングと応用例

これにより 2020 年に日本機械学会より流体工学部門フロンティア表彰を受けました。

この潤滑モデルを利用した発展的な話題として物質の膜透過問題があります。生体内や医療機器内部において、透過性をもつ膜で被われた物体が接近して相対運動する際に、潤滑に由来する圧力変化により物質の膜透過が促進または制限されることがあります。私はこの問題の数理的側面に着目して潤滑圧駆動による物質輸送モデルを構築し、さらにイオンや熱の影響も含む系への発展を目指しています。

4. おわりに

以上の成果の一部は研究室の大学院生との議論から発展したものです。私達が研究課題に取り組む際には、物理モデルに基づいて数理モデルあるいは計算モデルを構築していくというプロセスを採り、学生にはその段階で力学現象の普遍的な面を意識するように伝えています。大学院生の中には、大胆な粗視化を採り入れる段階と緻密なモデリングを進める段階を使い分ける人がおり、彼らの自由な考え方にはしばしば驚かされ、またそのような姿を見て私も刺激を受けてきました。

流体は物質、エネルギー、情報等の輸送媒体として自然や環境、工業、医療などにおいて重要な役割を担い、流体力学はこれらの分野における問題解決に貢献してきました。今後も新しい視点や解析手法の発達により、異なるスケールにわたる物質、エネルギー、情報の輸送・伝達の理解が深まり、現象の（系の詳細によらない）普遍的な側面が明らかになっていくと考えています。私は微力ながらその発展に貢献し、また次世代の研究者を育成して参りたいと思っています。

(大阪大学 工学部 機械工学科 1996 年卒
 同 工学研究科 機械工学専攻 博士前期課程 1998 年修了
 同 機械物理工学専攻 博士後期課程 2001 年修了)