

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	李昱勳
論文題目	GPU Computing Aiming at Vortex Filament Evolution (渦糸運動の解析のためのGPU数値計算の研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は3次元非粘性・非圧縮流体における渦糸運動の数値シミュレーションについて、高速・高信頼性を担保して実行するために、画像処理プロセッサ (Graphics Processing Unit ; GPU) をもちいた並列計算アルゴリズムの設計と実装を論じるものである。</p> <p>流体现象における種々の特異性の解明は重要な課題であり、流体方程式の数理解析の立場からも莫大な先行研究がなされている。渦 (vortex) の運動の解明もその一つであり、3次元空間では1850年代にH. Helmholtzが導入した渦糸 (vortex filament) の概念に基づく研究が活発に行なわれている。渦糸の運動の数理モデルは流体力学におけるBiot-Savart積分により非線型の微分積分方程式で与えられるが、この数理モデルの解析の困難点の一つとして積分核の特異性が挙げられる。これに対して1930年にL. Rosenheadは正則化パラメータの導入を提案し、本研究ではこの正則化されたモデルを用いている。また3次元空間中の直線でない渦糸は、Biot-Savart積分で記述される自己誘導速度を生じると考えられ、運動過程において生じ得るリコネクションと呼ばれる自己交差が一つの重要なテーマとして研究されている。</p> <p>本論文では、この渦糸の運動の数値シミュレーションの高速計算を目的として、GPUの効率的な活用と、それによって可能となった大規模数値計算結果の信頼性の検証を主たる目的としている。なお本研究では、渦運動の数理モデルの数学解析やリコネクションの流体力学的な意味付け等の詳細な言及は研究目的とはしていない。</p> <p>本研究で扱われている離散化はBiot-Savart積分の台形則による近似に基づくもので、渦糸上にとった標本点の個数をNとすると、全体の計算量は$O(N^2)$となり、Nを大きくすると計算時間が急激に増大するという問題点がある。この問題の解決のために、多数の計算コアを有するGPUを利用した高速計算により、大規模計算の高速な処理を目指すことが本論文の目的である。</p> <p>本論文の第一の成果は、計算のパフォーマンスに決定的な影響を与えるブロックサイズに関して、取り得る全ての組み合わせで計算時間を測定して、離散化数に応じて最適なブロックサイズを検証したことである、更にこれらの結果に対して、負荷分散の理論的根拠付けも与えている。</p> <p>この第一の成果によって、大きな離散化数Nでの数値計算の短時間処理が実現され、種々の設定での計算結果を多面的に検討することが可能となり、この成果に基づいて次の通りの第二の成果が得られている。Y. Kimura, K. Moffattにより2018年に発表された先行研究では典型的な二つの事例が扱われているが、そのうちの一方に対して空間方向の離散化の改善による高精度スキームを提案してその精度の検証を与えた。また時間と空間の双方の離散化を伴う数値計算においては、スキームの安定性は計算の信頼性を担保する基本的な概念である。これに対して本論文では安定性のためには、時間刻み幅と空間方向の離散化数、すなわち渦糸を表す曲線上にとる標本点数との間に一定の関係が要請されることを明らかにした。さらに、並列計算状態によっては丸め誤差が予期せぬ挙動を示すことが知られているが、4倍精度と多倍長計算を利用した結果との比較により、本論文で示される設計では標準的な倍精度での計算における丸め誤差の影響が軽微であることも示している。また大規模な計算を繰り返すことにより、リコネクション時刻の精密な評価を与えている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は3次元非粘性・非圧縮流体における渦糸運動の特異性に係る数値シミュレーションについて、高速・高信頼性を担保して実行するために、画像処理プロセッサ (Graphics Processing Unit ; GPU) の利用による並列計算アルゴリズムの設計と実装を論じて、新たな知見を与えている。

流体现象の特異性の解明は、先端的な科学・技術の研究においては重要な課題である。ここではH. Helmholtzが導入した渦糸 (vortex filament) の概念に基づいているが、その運動方程式は流体力学におけるBiot-Savart積分を含んでおり積分核には特異性が現れる。そこで本論文ではL. Rosenheadが導入した正則化パラメータを含む数理解析モデルによる数値計算を論じている。

渦糸の特異性の数理解析では、リコネクションと呼ばれる渦糸の自己交差が一つの重要なテーマであり、2018年にはY. Kimura, K. Moffattが、数値計算により、渦糸のリコネクションに関するある種のスケーリング則の成立を論じている。本論文はこの先行研究の数値計算にGPUを活用するものであり、GPUを利用する計算手法の設計と実装、および計算結果の信頼性評価に関して、次の2点において新たな知見を与えていると判断される。

第一は、GPUでの並列計算に関するものである。数値計算におけるGPUの活用では、対象となる問題の設定毎に適切なアルゴリズムの設計と効率的な負荷分散が重要な課題である。本論文では先行研究の手法に基づき、渦糸をN個の点で離散化した際に全体の計算量がNの2乗 ($O(N^2)$) となる問題に関して、GPUの並列処理機構を効率的に利用した設計を提案し、先行研究では到達できなかった規模の数値シミュレーションを実現している。数値計算でのGPUの利用にあたっては、そのアーキテクチャに適したアルゴリズムの設計や負荷分散が必要となるが、本研究では取り得る全ての負荷分散の組み合わせに対して計算時間を測定し、GPUの特性をもとに結果の妥当性を論じて成果を挙げている。

第二は、数値計算の信頼性に関するものである。時間依存の問題において、数値計算スキームの安定性評価は計算結果の信頼性を保証する重要な概念であるが、典型的な問題を除いて、計算スキームの安定性の厳密な評価は困難である。さらに並列計算においては、丸め誤差の予期せぬ挙動を予め評価することが求められる。これを踏まえて本論文では、標準的な倍精度計算と4倍精度計算、さらに多倍長計算の数値計算結果の比較検証を提案している。これは、定性的議論を本質とする数学解析だけでは論じ得ない問題について、複数精度の数値計算結果をもちいた定量的観点から数値計算結果の信頼性を論じるものであり、新たな情報学的アプローチにより実証的に安定性を論じるものといえる。

以上のことから、本論文は博士 (情報学) の学位基準を満たし、学位論文として価値あるものと認められる。また、令和3年8月12日、論文内容とそれに関連する学識について試問を行った結果、申請者の学識も京都大学博士 (情報学) に相応しいものであると認められた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： 年 月 日以降