

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740291

研究課題名（和文） GPUを用いた衝突計算コードの開発

研究課題名（英文） Development of Impact Simulation Code with GPU

研究代表者

玄田 英典 (GENDA HIDENORI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90456260

研究成果の概要（和文）：

研究代表者がこれまでに開発してきた CPU ベースの天体衝突コードを GPU ベースに改良した。幾つかの工夫を施し、最終的には CPU ベースで達成していた速度の 30 倍以上の演算性能を出せるようになった。応用例として、高解像度の月形成衝突計算を行ったところ、原始月円盤に低解像度の計算では見られなかった腕状構造が現れたが、角運動量輸送はあまり起こらず、現在の月が形成可能な円盤が形成された。また、衝突実験グループとの共同研究も行い、本計算コードの有用性を示せた。

研究成果の概要（英文）：We developed a GPU-based code for impact calculation from CPU-based code. We added some new components to our code in order to solve the equations quickly. Finally, calculation speed becomes 30 times faster than the previous CPU-based code. We applied our code to several problems. We performed very high-resolution simulation of the moon forming impact, and we found that the effect of angular momentum transport was weak. We conducted cooperative research on impact simulation with experimental lab.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成・進化

### 1. 研究開始当初の背景

惑星科学において、天体衝突現象は極めて重要なプロセスである。それは、月や小惑星の表面状態を決めている衝突痕（クレータ）の存在や、惑星形成プロセスそのものが天体衝突による集積の積み重ねであることを考

えれば明らかである。天体衝突の研究は主に、実験的手法とシミュレーション的手法の2つのアプローチがある。日本には、世界でもトップレベルの衝突実験が行えるグループが複数ある。一方で、シミュレーション的手法を用いた代表的なグループ及びその牽引

者がいないのが現状である。本研究では、上記の点を踏まえ、GPU (Graphics Processing Unit) コンピューティングによる衝突シミュレーションコードを開発し、日本において手薄であったこの分野の充実を図ることを目的の1つとする。

GPUはCPUに代わって高度なグラフィックス処理を行うための演算ユニットとして開発され、現在では一般的なPCにおいても広く使われている。近年では、処理すべきグラフィックの規模が大きくなるにつれ、GPUの演算性能が非常に多くの演算ユニットを並列化することによって飛躍的に上昇し、成長が頭打ちになってきたCPUの代わりに、GPUを用いた科学計算 (GPU コンピューティング) が工学や医学などの幅広い分野で行われ始められるようになった。GPU用のプログラミング言語も開発が進み、以前より手軽にGPUコンピューティングが可能となり、「個人が購入できるスーパーコンピュータ」と言われるようにまでなった。本研究では、将来的にも性能が持続的に上昇すると期待されるGPUを用いた衝突シミュレーションコードを開発する。

研究代表者は、これまでに、SPH法と呼ばれる流体計算手法の1つである計算コードの開発をしてきた。この計算コードを用いて、地球型惑星形成の最終段階で必然的に起こる、原始惑星同士の衝突 (巨大天体衝突と呼ぶ) をシミュレーションし、地球型惑星の特徴に関するいくつかの重要な結論を導いてきた。

SPH法は、粒子法の1つで、大規模な変形をとともなう衝突現象などに大変適した計算手法である。その反面、計算量が多く、高解像度の計算を行うためには、高性能のコンピュータが常に必要であり、原始惑星同士の衝突のような自己重力系では、10万粒子の計算が限界であった。

研究代表者はこの衝突コードを用いて、10万粒子という比較的低解像度でも正しい結果が得られる現象に注目して研究を行ってきた。例えば、原始惑星同士の衝突による合体・非合体の条件などがあげられる。しかしながら、衝突現象の細部を見たい場合、さらに粒子数が必要となる。例えば、衝突によって原始惑星の周りにばら撒かれる物質の質量などは、同じ衝突条件においても、ファクターで3倍程度のばらつきが存在する。このばら撒かれた物質 (原始月円盤と呼ぶ) が後に月となる材料物質となることを考えると、最終的に形成される月の質量にも大きな不確実性が生じる。さらに、最近の研究によると、解像度を上げると、原始月円盤で角運動量輸送が起こり、円盤物質そのものがなくなってしまう可能性も指摘されている。

## 2. 研究の目的

GPUを用いて、惑星科学の分野において極めて重要なプロセスである天体衝突現象を、これまでにない高解像度でシミュレーションを可能にするコードを開発する。このコードを用いて、解像度の点で決着のついていない月形成問題の解決を図り、本コードの有用性を示す。そして、現実的な効果 (現実的な状態方程式、強度、空隙など) をコードに組み込み、衝突実験データと直接比較できるようにコードを改良する。最終的には、本研究で得られたGPUコンピューティングのノウハウを惑星科学の分野に還元し、シミュレーション分野の方面から惑星科学を牽引する基盤を構築する。

## 3. 研究の方法

研究代表者がこれまでに開発してきた天体衝突SPHコードをGPU上で計算できるようにコードを改良する。開発は、NVIDIA社が提供するC言語をベースとした「CUDA」というプログラミング言語を使用する。高解像度を実現するためにいくつかの工夫を行い、これまでの100から1000倍の粒子数を扱えるコードを作成する。このコードの有用性を示すため、地球型惑星形成の最終段階で必然的に起こる巨大天体衝突に注目し、これまで解像度の点で解決されていなかった月形成問題の解決を試みる。さらに、より詳細な効果 (現実的な状態方程式、強度、空隙など) をモデル化したものをコードに組み込み、衝突実験で得られるデータ (衝突クレータの半径・深さ、イジェクタの速度分布など) と直接比較ができるようなコードを作成する。

## 4. 研究成果

研究代表者がこれまでに開発してきたCPUベースの天体衝突コードをGPUベースのコードに改良した。

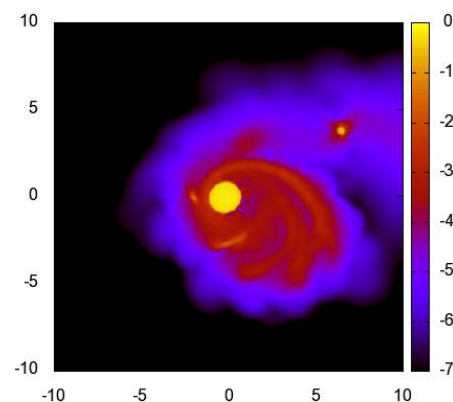


図1. 高解像度の月形成衝突シミュレーション。密度分布を示す。

各SPH粒子間の重力相互作用をすべて計算した場合、その計算量は粒子数の2乗に比例

するため、扱える粒子数の限界が 30 万粒子程度となる。月形成問題を扱うにはさらに多数の粒子が必要である。そこで、重力相互作用を Tree 法 (Barnes & Hut 1986) を用いて近似的に解くことによって、この問題を解決した。Tree 法による重力の計算量は、およそ粒子数の 1 乗に比例する。

さらに、Godunov SPH 法 (Inutsuka 2002) を拡張し、コードに組み込むことによって、さらに高速化を試みた。この手法では、粒子間の相互作用を計算する際、理想気体の Riemann 問題を解析的に解いており、計算の時間幅を大きくとることが可能となり、高速度が実現される。また、計算精度も、標準的な SPH 法よりも向上することがわかっている。最終的には、Tesla ボードを用いて、通常のコンピュータの 30 倍以上の演算性能を出せるようになった。

100 万粒子を超える高解像度の月形成衝突シミュレーションを行ったところ、原始月円盤に腕状の構造が現れたが、Wada et al. (2006) で示されたような角運動量輸送はあまり起こらず、現在の月を説明するような質量と角運動量をもった円盤が形成されることがわかった (図 1)。

また、衝突実験グループ (杉田研・東大) との共同研究 (Sekine, Genda, Sugita, Kadono, Matsui 2011, Sekine & Genda 2012) も行っており、衝突計算コードの有用性を示すこともできた。例えば、図 2 は、タイタン表面に彗星が高速衝突した際に達成される最高圧力を示している。これらの数値計算と、実験グループが求めた  $N_2$  脱ガス率 (図 3) を組み合わせることによって、タイタン大気の形成について議論することが可能となった。

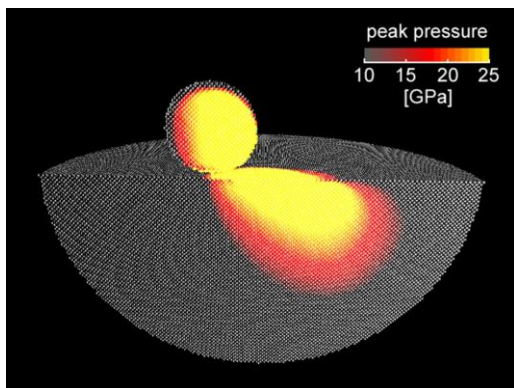


図 2. 彗星の氷表面への衝突数値実験。高速衝突により発生する最大圧力分布を示している。

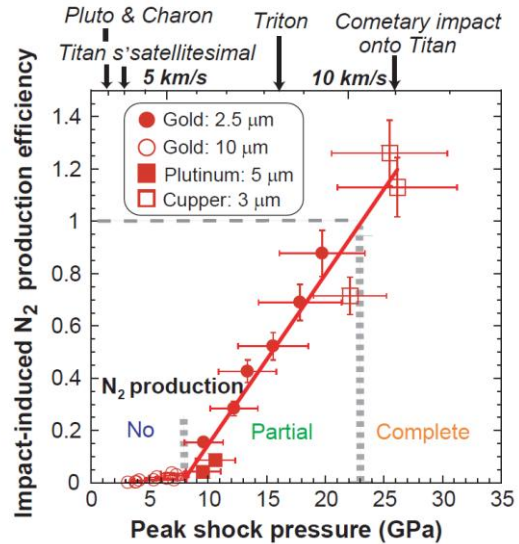


図 3. 衝突実験によって求められた  $N_2$  生成率とピーク圧力の関係

また、申請者が作成した計算コードで、高解像度の巨大天体衝突シミュレーションをすることによって、衝突天体本体だけでなく、衝突時にばらまかれる破片についても定量的に議論ができるようになった。例えば、ばらまかれる破片のサイズ分布や速度分布といったデータは、惑星形成の力学的側面だけでなく化学的側面にとっても極めて重要な情報である。衝突でばらまかれた破片は、現在観測で報告されている高温デブリ円盤の起源である可能性が高いことがわかった (図 4)。

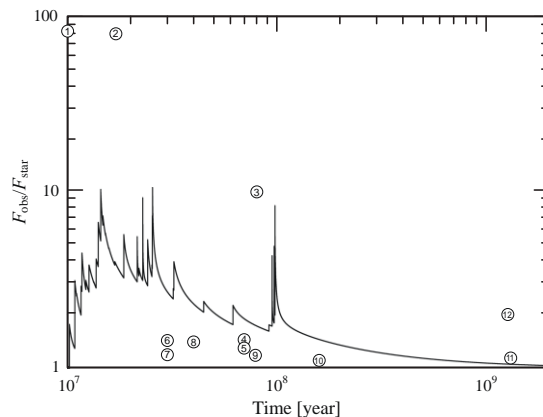


図 4. 巨大天体衝突ステージにおける  $24 \mu m$  で観測した場合の赤外超過。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Maruyama, S., Ikoma, M., Genda, H., Hirose, K., Yokoyama, T. and Santosh, M., 2013, The naked planet Earth: Most essential pre-requisite for the origin and evolution of life, *Geoscience Frontiers* 4, 141-165, 査読有.
- ② Genda, H., Kokubo, E. and Ida, S., 2012, Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets, *Astrophysical Journal* 744, 137(8pp), 査読有.
- ③ Sekine, Y., Genda, H., Sugita, S., Kadono, T. and Matsui, T., 2011, Replacement and late formation of atmospheric N<sub>2</sub> on undifferentiated Titan by impacts, *Nature Geoscience* 4, 359-362, 査読有.

[学会発表] (計41件)

- ① 玄田英典、小林浩、河原創、松尾太郎、小谷隆行、村上尚史、藤井友香、小久保英一郎、他 SEIT メンバー、ジャイアントインパクトは見えるのか?—高温デブリ円盤の直接観測、日本天文学会 2013 年春季年会、埼玉大学、埼玉県、2013 年 03 月 22 日.
- ② 玄田英典、小林浩、小久保英一郎、地球型惑星形成後期の衝突デブリ円盤について、日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会、神戸大学統合研究拠点コンベンションホール、兵庫県、2012 年 10 月 26 日.
- ③ 玄田英典、月形成衝突のレビューと SPH 法による最新の結果、衝突研究会、北海道大学、北海道、2011 年 11 月 18 日.
- ④ 細野七月、玄田英典、井田茂、GPU を使った、tree-Godunov-SPH 法による地球型惑星の高解像度ジャイアント・インパクト・シミュレーション、地球惑星科学連合 2011 年大会、幕張メッセ、千葉県、2011 年 5 月 24 日.
- ⑤ Genda, H., Kokubo, E. and Ida, S., Giant Impacts and Terrestrial Planet Formation, Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands Waterway Marriott Hotel and Convention Center, Texas, USA, 2011 年 3 月 8 日.

[その他]

取材協力

- ① コズミックフロント(BS NHK)「大冒険! はやぶさ 太陽系の起源を見た」2011 年 9 月 20 日放送
- ② コズミックフロント(BS NHK)「地球外生命を探せ」2011 年 4 月 12 日放送

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

玄田 英典(GENDA HIDENORI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号: 90456260

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし