

大規模実行に関する報告書

研究の背景と科学的目的

連星中性子星は現在までに 9 個観測されている中性子星二つからなる二重連星である。この天体が合体する際に放出する重力波は 2015 年から 2017 年頃にかけて本格稼働が予定されている大型重力波干渉計 advanced LIGO, advanced VIRGO, KAGRA の重要なターゲットの一つである。このような背景の下、連星中性子合体からの放射される重力波の理論予測が喫緊の課題となっている。

パルサーの観測によって中性子星は一般に 10^{11} から 10^{13} ガウスの磁場を持っていることが分かっている。また、 10^{14} から 10^{15} ガウスという強磁場持つ特異なクラス、マグネター、の存在も観測的に確立している。連星合体における磁場増幅機構の候補は、連星合体時に接触面で発生するケルビン-ヘルムホルツ不安定性による磁場増幅、合体後過渡的に存在する巨大中性子星内部での磁気回転不安定性、ブラックホールに崩壊後形成される降着円盤内での磁気回転不安定性に大別される。しかし、これらの不安定性は全て短波長モードが本質的であるため、高い解像度を設定した大規模数値計算が必須となる。

本研究では磁場中性子連星合体における磁場増幅過程を定量的に解き明かすことを目的とする。また、本コードを用いて、XC30 と京コンピュータの性能比較を行う。

手法

アインシュタイン方程式、磁気流体力学方程式を連立させて数値的に解く数値相対論を本研究では用いる。具体的には Baumgrate-Shapiro-Shibata-Nakamura-puncture 定式化によるアインシュタイン方程式ソルバー、central-scheme と Piecewise-Parabolic-Method による高解像度衝撃波捕獲法、多層格子法を実装した数値コードを使用する。

設定

中性子星モデル：中性子星の質量を観測的に示唆される 1.4 太陽質量に設定する。また核密度状態方程式は相対論的平均場近似に基づく H4(Gledening & Moszkowski 91)を採用する。磁場強度は 10^{15} ガウスとする。

解像度：研究の背景で述べた通り、磁気流体不安定性の本質は短波長モードである。ゆえに高解像度計算が必須であるが、先行研究では十分な解像度が設定されているとは言い難い。そこで、現在までの世界最高解像度を設定したシミュレーションを本システムにて行う。但し、提供された計算機資源（2 日間占有利用）の制限から、連星合体の全てをシミュレートするのは不可能である為、研究の背景で述べた「合体時のケルビン-ヘルムホルツ不安定性による磁場増幅」にのみ着目する。

具体的には最細解像度を 70m に設定し、物理時間約 16ms の計算を実行した。参考までに先行研究で設定されていた最高解像度は約 200m である。本課題では 1,458 ノー

ドを使用した。

結果

(1) xc30 におけるスケーラビリティ及び京との比較

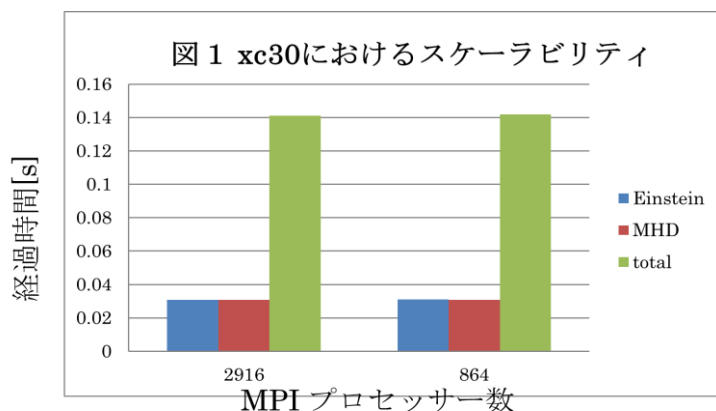


図 1 に xc30 における(weak)スケーラビリティを示した。1 ステップ進む時にかかる経過時間を各メインソルバー(Einstein, MHD)及び全体に対してプロットしてある。図中に示すソルバー以外にも多層格子法による境界値を求める通信ルーチンがある。一般に、このルーチンでは複雑な通信が発生するが、全体としても非常に良いスケーリングを見せている (並列化効率 99.4%)。

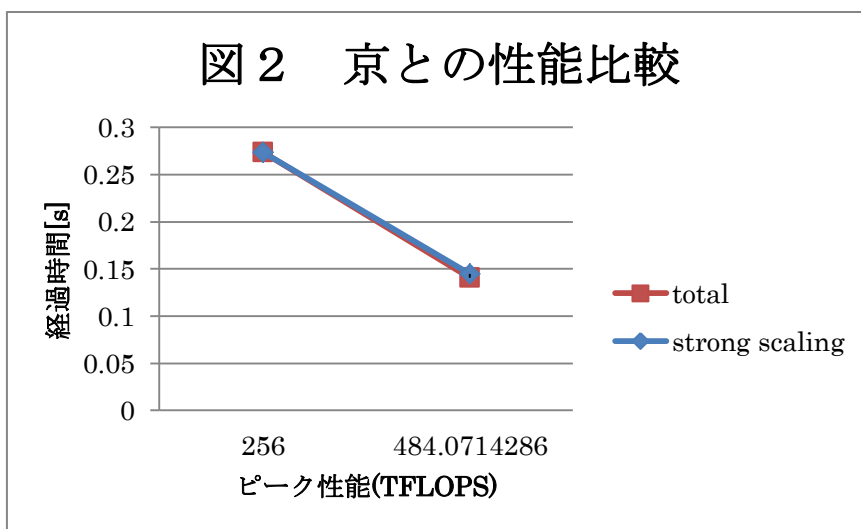


図 2 に京との性能比較の図を示す。京では 2,048 ノード(ピーク性能 256TFLOPS)、xc30 では 1,458 ノード(ピーク性能約 484TFLOPS)を用いて同規模の計算を行なった。全体の経過時間と同時にストロングスケーリングを仮定した線をプロットしている。この図から本コードの xc30 におけるパフォーマンスは京と同程度 (実行効率約 15%) となっていることが分かる。

(2) ケルビン-ヘルムホルツ不安定性による磁場増幅

図3：軌道面の密度と速度場

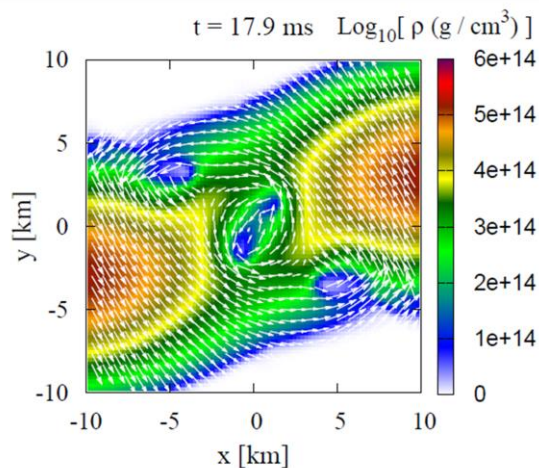


図4：磁場増幅率解像度依存性

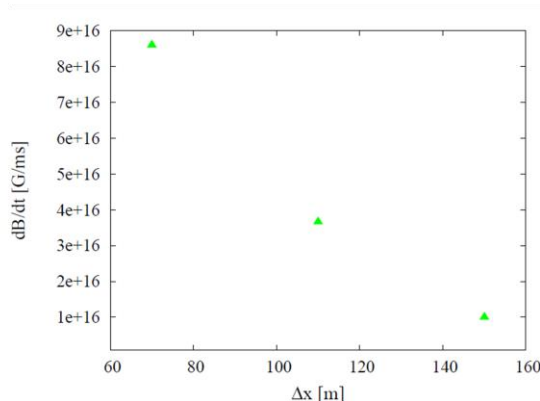


図3、4に合体時の軌道面における密度場と速度場、磁場増幅率の解像度依存性をそれぞれ示す。図3では接触面でケルビン-ヘルムホルツ不安定性による渦が発生していることが分かる。磁場が存在すると渦の巻き込みによる磁場増幅が起こることが示唆されているが、解像度を高くすると磁場増幅率が上がることを期待される。これは、より細かい渦を解像できるようになるからである。

図4では、本課題で行った $\Delta x = 70 \text{ m}$ のシミュレーションに加え、前期に実行した中解像度 ($\Delta x = 110 \text{ m}$)、低解像度 ($\Delta x = 150 \text{ m}$) の計算結果をプロットしてある。予想通り解像度の増加に伴い、磁場増幅率の上昇がみられる。これはこの不安定性の本質であり、収束は期待できない。

まとめ

xc30 システムにおいて1,458 ノード(全システム1,512 ノード)を用いた大規模実行を行った。予想通りコードパフォーマンスが得られ、京と比較したところ、実行効率約15%の性能が出ている事が分かった。

合体時におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性による磁場増幅を世界最高の解像度で調べた結果、より細かい渦を解像することで磁場増幅率が上昇する事を確認した。しかし、磁場連星中性子星合体の全体を解き明かすには物理時間100ms程度のシミュレーションが必要であり、今回割り当てられた計算機資源では全体描像の解明にはまだ至らない。今後の計算機のスケールアップ及びより長時間の大規模チャレンジが期待される。