

## 数値相対論の展開

柴田 大 (京都大学基礎物理学研究所 mshibata@yukawa.kyoto-u.ac.jp)

数値相対論は、ブラックホールの誕生や中性子星連星の合体のような一般相対論的かつ動的な強重力現象を理論的に解明するための唯一の研究手段である。過去10年間にこの分野で多くの研究成果が得られた。特に、中性子星やブラックホールからなる連星の合体過程や放射される重力波の特徴が深く理解されるようになった。本記事ではこれらの研究成果についてまとめ、そして今後の展望を述べる。

### 1. はじめに

数値相対論に関する解説記事を書くのはこれが初めてではなく、2006年5月号の物理学会誌に当時の現況報告をさせていただいた。<sup>1)</sup> 当時は、それ以前に存在した様々な理論的かつ技術的課題が解決に至り、科学的な計算がようやく本格的に可能になった時期で、記事にはそれまでの困難とそれが如何に解決されたかがまとめられている。その後、数値相対論は、分野としての収穫期に入った。つまり、それまでに構築されてきた基礎的な枠組みを興味ある問題に適用できるようになった。前回記事を書いてから約9年が経過したのだが、その間、数値相対論によるシミュレーションで多くの知見が得られた。特に、天文・宇宙観測と比較可能な現実的シミュレーションが行われるようになった。そこで本記事では、過去9年間に得られた知見と近い将来の展望をまとめることにしたい。その前にまず、数値相対論の概要とその歴史を簡単にまとめておこう。

数値相対論とは、一般相対論的で(つまり強重力で)かつ動的な現象を、数値計算によって解明することを目的とする研究分野である。一般相対論の基本方程式はアインシュタイン方程式であるが、これを解くことが中心課題になる。アインシュタイン方程式は非線形連立偏微分方程式であるため、興味ある動的問題に対して解析解を求めることが困難である。そのため数値計算が理論研究に不可欠になり、数値相対論という分野が生まれた。

数値相対論は、一般相対論的と思われる天体および宇宙現象—具体的には、ブラックホール、中性子星、連星中性子星—が観測され始めた1960年代から70年代にかけて次第に研究されるようになり、70年代後半から本格的に研究成果が発表されるようになった。日本でも中村を中心とした京大グループが数値相対論の黎明期に活躍し、80年代初頭には、回転する大質量星の重力崩壊によるブラックホールの形成条件に関して画期的な研究成果が発表された。<sup>2,3)</sup>

90年代に入ると、数値相対論が世界中で本格的かつ大々的に研究されるようになった。最大の理由は、アメリカのLIGOをはじめとする大型重力波望遠鏡の建設に予算がつき、それに対応して重力波の波形を正確に予言するための

理論研究が要求され始めたことである。LIGOや日本のKAGRAのように地上に建設される重力波望遠鏡は、約10 Hzから数kHzの重力波に対して感度を持ち、その最も有望な重力波源は、中性子星やブラックホールからなる連星の合体である。そこで、合体现象を解き明かし、かつ正確な重力波の波形を導出することが、数値相対論の最重要課題になった。

さらに、多波長電磁波観測による高エネルギー天文学が発展したことも、研究の大きな動機になった。今でも完全に解明されていない高エネルギー現象としてガンマ線バーストをあげることができる。ガンマ線バーストは、数ミリ秒から数1,000秒程度の短い継続時間に典型的には $10^{51}$  ergにもおよぶ大量のエネルギーが放射される突発的な天体現象であるが、<sup>4)</sup> その中心エネルギー源に関して多くは判っていない。大量のエネルギーを短時間に放射するので、コンパクトな天体であるブラックホールやその周りに存在する大質量の降着円盤が絡む強重力現象ではないかと推測されている。しかし、それがどのように誕生し、またその後どのように大量のエネルギーが生成されるのかについては、詳しい理解が得られていない。中心エンジンは非常に高密度な環境下であり電磁波に対して不透明になるので、電磁波を用いた直接的観測は難しい。そこで、理論研究が重要な役割を担い得るのだが、その際に数値相対論が強力な研究手段になる。なぜならば、ガンマ線バーストの中心エンジンは、動的かつ一般相対論的な状況下で誕生したと推測されるからである。

数値相対論を発展させる動機は大いにあったのだが、90年代にはその発展速度は遅かった。その最大の理由は、アインシュタイン方程式を数値計算に適した形に定式化する手法やゲージ条件に関して、解答がなかなか得られなかったからである。特にブラックホール時空に対してシミュレーションができず、最大の難関になっていた。状況が変わり始めたのは99年からである。まずこの年に連星中性子星の合体に対するシミュレーションが可能になった。<sup>5)</sup> これは、アインシュタイン方程式を解くための有効な定式化や現実的問題に適したゲージ条件の1つが判ったからである。しかし、それでもなお、ブラックホール時空に対す

るシミュレーションを可能にするには時間がかかった。ブラックホール時空を長時間精度良く計算し続けるための強力な定式化と数値計算手法がついに判ったのは、2005年である。<sup>6,7)</sup> ここら辺りの事情に関しては、前回の記事に書いたので興味があればご参照いただきたい。<sup>1)</sup>

さて、2005年以降、ブラックホールの有無に関わらずシミュレーションが実行可能になった。この状況で、大きく分けて2つの方向に研究が進んだ。1つは、可能な限り高精度で連星ブラックホールのシミュレーションを行い、合体過程および放射される重力波の波形を正確に求める研究である。この研究では真空時空が対象になるので物質を扱う必要がなく、如何にアインシュタイン方程式を正確に解くか、という課題に集中できる。この方向の研究は高度に発展し、連星ブラックホールの合体については、すでに理論的に詳しい理解が得られている。これについては2節で紹介する。もう1つが、中性子星を含む連星の合体や大質量星の重力崩壊に関する研究である。これに対しては、物質場の物理的情報を正しく考慮した研究が必要になる。具体的には、(i) 中性子星に対して現実的な状態方程式を用意する、(ii) 高温の場合にはその効果も含んだ状態方程式を用いる、(iii) ニュートリノ輸送の効果を採用入れる、(iv) 中性子星は通常強い磁場を持つので磁気流体効果を採用入れる、などの作業が必要になる。これについてはわれわれ日本のグループが大きく貢献してきた。課題は当然まだあるものの、大きな進展があった。本記事では特に、連星中性子星の合体に対する最近の進展について3節で述べる。

## 2. 連星ブラックホールの合体

恒星サイズの連星ブラックホールはこれまでに観測されることがないが、2つの大質量恒星からなる連星系が進化した結果か、あるいは一部の球状星団のような高密度星団における3体衝突過程を通じて形成されると推測されている。また、太陽質量の百万倍を超えるような超巨大ブラックホールの連星は、宇宙初期に銀河系同士の衝突によって形成され得ると推測されている。

近接連星ブラックホールは、重力波放射によってエネルギーと角運動量を失い、軌道半径を縮め、やがて合体し、新たに定常なブラックホールを誕生させると考えられている。恒星サイズのブラックホールの典型的質量が太陽の10倍程度だとすると、合体直前直後の連星ブラックホールは100~1,000 Hz程度の重力波を放射するので、LIGOやKAGRAの格好の重力波源になる。そこで重力波の波形を正確に予言し、来る観測に備えることが、重力波観測計画には重要になる。<sup>\*1</sup> 軌道半径が十分に大きく、各々のブラックホールの軌道速度が光速 $c$ に比べて十分に小さい場合には、ポストニュートン近似を用いてその軌道進化過

程や重力波の波形を解析的に精度良く求めることができる。<sup>9)</sup> しかし、軌道半径が十分に小さくなるとポストニュートン近似の精度が落ち、アインシュタイン方程式を近似なしに解く必要が生じ、数値相対論の出番になる。

連星ブラックホール合体に対するシミュレーションは、2005年に可能になって以来、欧米の多くのグループによって実行されてきた。その結果、合体後新たに定常ブラックホールが速やかに誕生するというシナリオが確立し、また典型的な重力波の波形パターンが理解されるようになった。最近5年間は特に、Caltech-Cornell-CITA (CCC) グループによって高精度化が推進されている。彼らは、マルチドメイン・スペクトル法と呼ばれる独自に発展させた手法を用いて、高精度「計算」を実行可能にした。

解くべき場が滑らかである場合、スペクトル法で数値計算を行うと、基底関数の数を増やすとともに誤差が指数関数的に減少することが知られている。<sup>10)</sup> 多くのグループは、アインシュタイン方程式を数値的に解く際に差分法を用いるのだが、その場合にはグリッド幅を小さくしても、差分精度の次数でしか誤差が減らないので、高精度化を推進するにはスペクトル法が断然優れている。ここで重要な点は、連星ブラックホール時空のような真空時空では、重力場の基本変数である計量が滑らかであるという事実である。したがって、スペクトル法を採用することに大きな利点がある。一方、物質が存在して衝撃波のような不連続面が存在すると、スペクトル法の精度が劣化することが知られており、その場合には真空のときほどのご利益はない。

さて、4次元時空のブラックホールには、有名な唯一性定理が存在する。そのため、電荷を持たないとすれば、ブラックホールは質量と自転ベクトル3成分の合計4つのパラメータしか持たない。連星ブラックホールであれば、合計8つになる。ただし、質量に対してスケール不変性が存在するので、実際には7つのパラメータが本質的な自由度になる。<sup>\*2</sup> この7つに対してできる限り多くの計算を実行して、合体過程と放射される重力波の特徴を系統的に調べ尽くすことが、この研究分野の課題である。特に大きな質量比の場合や、ブラックホールスピン<sup>\*3</sup>の大きさが上限値の1に近い場合、計算は容易ではない。しかし、CCCグループの精力的研究によって多くの知見が得られてきた。例えば、文献11, 12では、スピンの大きさが共に0.97または0.98で、スピンの向きが共に軌道面に垂直方向を向いた等質量の連星ブラックホール合体の結果が報告されている。これらの計算では、合体約26周前から計算を開始し、合体後新たに誕生するブラックホールが定常になるまで正確に計算がなされている。

<sup>\*1</sup> 重力波のデータ解析では、観測データに対して理論計算で予言された重力波波形(テンプレートと呼ばれる)との相関を取り、重力波の検出や重力波源の特定を行う。<sup>8)</sup>

<sup>\*2</sup> 真空のアインシュタイン方程式は4次元座標のスケール変換に対して不変であり、その結果、今の場合には合計質量に対してスケール変換不変性が生じる。

<sup>\*3</sup> ここでブラックホールスピンとは、自転角運動量、質量をそれぞれ $J, M$ とした場合に、 $cJ/GM^2$ で定義される無次元量である。なお $G$ は重力定数を表す。

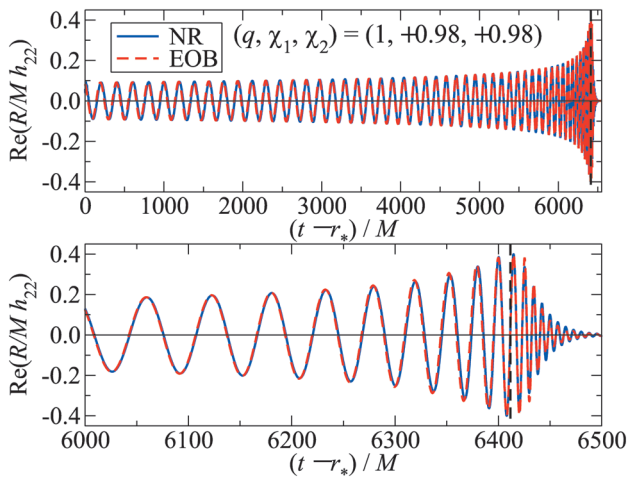


図1 スピンの大きさが共に0.98で、その向きが共に軌道面に垂直方向である場合の等質量の連星ブラックホール合体による重力波の波形。実線が数値相対論の結果を、点線がEOB法による結果を表す。縦に引かれた破線は、振幅最大時の時間を表す。上図が全シミュレーション結果を、下図が合体直前直後の結果を示している。横軸は遅延時間を、縦軸は軌道面に垂直方向から観測した場合の重力波の振幅を表す。Mは2つのブラックホールの質量の和で、時間の単位は $GM/c^3$ である(Mが太陽質量の20倍ならば、時間の単位は約0.0985ミリ秒)。Rは、重力波源から観測者までの距離を表す。この図では約6,400  $GM/c^3$ までが公転軌道にある連星からの重力波を表し、それ以後が合体時の重力波を表す。合体後ブラックホールが誕生し定常状態に落ち着く過程で、減衰振動が特徴的な重力波が放射される(下図参照)。文献12から転載。

精度良い計算を行えば、高精度の重力波波形を得ることができる。そのような波形を多数、系統的に導出し、モデル化を行えば、それは重力波観測のデータ解析においてテンプレートとして利用できる。精度の良いテンプレートを構築することがこの分野の重要課題なのだが、そのような研究にもここ数年大きな進展があった。BuonannoとDamourが最初に提唱したEffective-one-body (EOB) 法と呼ばれる半解析的な手法は、ポストニュートン近似をベースにした現象論的2体問題モデル化法である。<sup>13)</sup> EOB法には、数値相対論で求めた波形との比較により決定しなければならないパラメータが複数存在するのだが、数値相対論の発展とともにそれらのパラメータが精度良く決められるようになり、テンプレート構築に展望が開けている。図1に文献12で発表された研究の一例を紹介する。この例では、スピンの大きさが0.98で共に軌道面に垂直方向を向いた等質量の連星ブラックホール合体による重力波の波形が示されている。連星が約26周公転運動し、その後合体し、最終的にスピンの大きさが0.95程度のブラックホールが誕生する場合の重力波である。実線が数値相対論で導出された重力波を表し、点線がEOB法による結果を表す。EOB法で、数値相対論の結果がよく再現できることが図1には示されている。

ブラックホールスピンの向きおよび軌道角運動量の向きが全く揃っていないと、連星は複雑な歳差運動を起こす。そのような場合、重力波の振幅は複雑なモジュレーションを起こすのだが、今後はこのような波形も精度良く再現することがテンプレート構築の課題である。

### 3. 連星中性子星の合体と観測的予言

連星中性子星も2つの大質量恒星からなる連星の進化の結果、誕生すると考えられている。連星ブラックホールの発見例は未だないが、連星中性子星はわれわれの銀河系内において、候補も含めれば10例ほど電波観測を通じて観測されている。そのうち6例は確実に連星中性子星だと考えられており、またコンパクトな軌道半径を持つ。<sup>14)</sup> そのためこれらは、宇宙年齢よりも十分に短い時間内に、重力波放射の結果、合体すると予想されている。

上で述べた6例は観測された電波パルスの詳細解析により、質量が正確に測られている。合計12個の中性子星は驚くほど質量が一樣で、すべて太陽の1.23倍から1.44倍の間にある。特に、太陽の1.30~1.35倍付近に質量を持つものが多いため、連星中性子星における中性子星の典型的な質量は、その程度だと考えられている。

連星中性子星も連星ブラックホールと同様に、重力波放射とともに軌道半径を縮め、やがて合体する。合計質量が仮に太陽の2.7倍とすれば、軌道半径が約700 kmのときに放射される重力波の周波数が10 Hzになり、それよりも小さな軌道半径では周波数が10 Hz以上になるので、LIGOやKAGRAで観測可能になる。軌道半径が約700 kmになって以後約15分が経過し、重力波の周波数が1 kHz程度になるときに合体が始まる。この合体前15分間と合体後の重力波を正確に予言することが、重力波検出計画において理論研究者に求められている。

重力波源という側面のみならず、連星中性子星の合体は、継続時間の短いガンマ線バーストや、可視光線や赤外線を10日間ほど放射する突発的天体の源<sup>15)</sup>としても有力視されている。これらの現象を予言するためにも、数値相対論は重要である。この目的のためには、詳細な物理モデル化を行いながら数値相対論的シミュレーションを行う必要がある。例えば、ガンマ線バーストは、ブラックホール周りに高温・高密度の降着円盤が誕生し、そこから放射される大量のニュートリノの対消滅が起源で起こるとい説や、あるいはブラックホール周りの磁気流体過程によって起こるとい説が有望視されている。これらの仮説を確かめるには、ニュートリノ放射や磁気流体過程を考慮したシミュレーションが不可欠になる。中性子星が存在するので、当然、中性子星物質を正確に表す状態方程式も用いなければならない。

中性子星を調べる場合に常に問題になるのは、その状態方程式が正確に判っていないことである。最近発見された、質量が太陽の約2倍の中性子星<sup>16)</sup>を説明するには、状態方程式が高密度で高い圧力を持つことが必要であり、一定の制限が状態方程式に課される。しかし、中性子星の半径に対する情報が不足しているため、未だに制限は不十分である。つまり多数の状態方程式「候補」が存在するのだが、どれが正しいのか判らないので、連星中性子星の合体に対しては、もっともらしいものを系統的に多数用いてシミュ

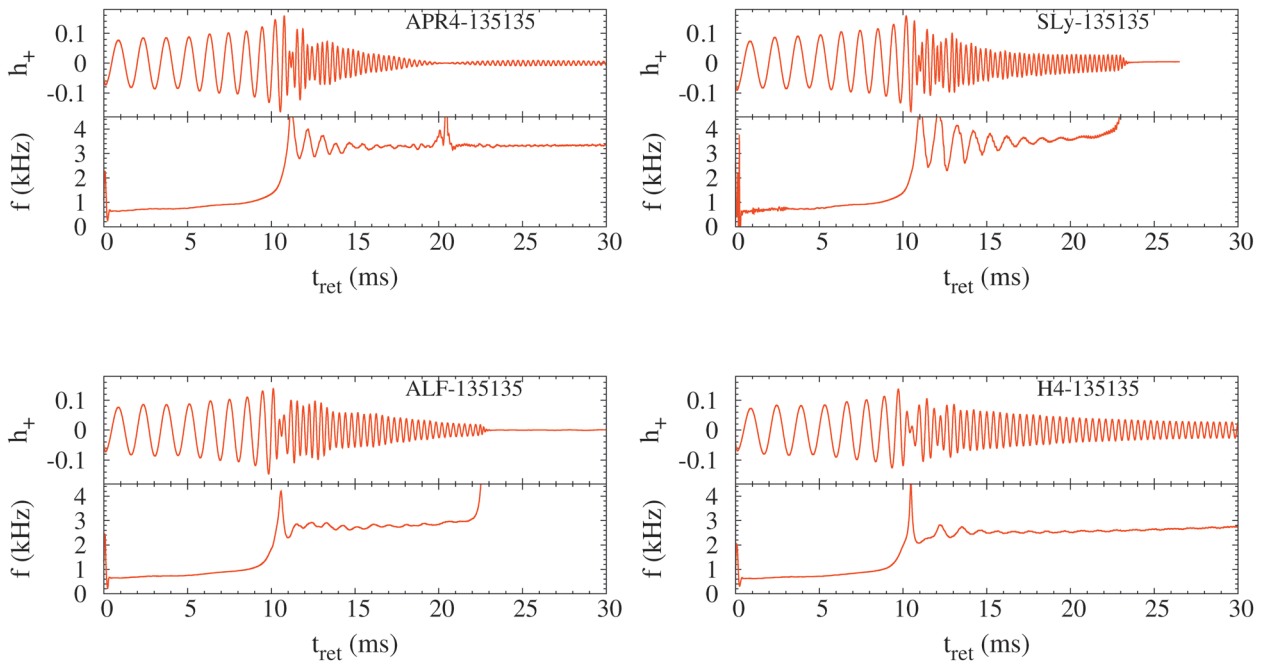


図2 全質量  $M$  が太陽の2.7倍の等質量の連星中性子星合体による重力波の波形と周波数の時間変化。横軸が遅延時間を、縦軸が軌道面に垂直方向から観測した重力波の振幅に観測者までの距離を掛けて  $GM/c^2$  で割った量 (上図) および周波数 (下図) を表す。全てのモデルで  $M=2.7$  太陽質量だが、状態方程式が異なる。状態方程式は図の右上に表示 (APR4, SLy, ALF, H4 が状態方程式を表す。各々の状態方程式に対して1.35太陽質量の中性子星の半径は約11.1 km, 11.4 km, 12.5 km, 13.6 kmである)。いずれのモデルでも約10 msまでが公転軌道にある連星から放射される重力波を表し、その後が合体後誕生する大質量中性子星による重力波を表す。大質量中性子星からの重力波はいずれも準周期的に放射されるが、その特徴的周波数が状態方程式に依存する。(連星ブラックホール合体の場合と全く異なることにも注目。) なお状態方程式がSLyとALFの場合には、合体後10 ms程度経過した後にブラックホールが誕生している。文献17より転載。

レーションを実行しなくてはならない。したがって多くのシミュレーションが必要になる。

連星中性子星の合体に対しては2つの方向に研究が進んだ。1つは、ニュートリノ放射や磁気流体過程はとりあえず無視して、現実的な状態方程式だけを考慮して合体前から合体直後に至るまでのシミュレーションを実行し、重力波の波形や合体直後に誕生する天体の状態方程式依存性の解明を目指す研究で、もう1つはガンマ線バーストなど合体後起こりうる現象に注目し、ニュートリノ放射や磁気流体過程を可能なかぎり現実的に考慮する研究である。

前者に関して、われわれのグループは過去数年間にわたりしつこく研究し理解を深めたので、ここで簡単に紹介したい。最近の研究で判った最も重要な知見の1つは、観測事実と無矛盾な現実的な状態方程式を仮定すると、典型的な質量(質量の総和が太陽の2.7倍程度)の連星中性子星が合体する場合、即座にブラックホールになることはなく、まず大質量の中性子星が新たに誕生することである。誕生する大質量中性子星は、その後、重力トルクや磁気流体的な角運動量輸送効果の結果、角運動量を外層に運ぶため回転による遠心力を弱め、最終的にブラックホールへ重力崩壊すると予想されるが、それでも自身の自転周期や振動周期(1ミリ秒程度)よりも十分に長時間(数10~数100ミリ秒程度)安定に存在できる。

この合体描像においては、重力波観測に関して2つの注目すべきフェーズが現れる。1つは合体直前のフェーズで、もう1つは合体後大質量中性子星が進化するフェーズであ

る。どちらのフェーズで放射される重力波の波形も中性子星の状態方程式に強く依存する。合体直前の連星からの重力波が状態方程式に依るのは、公転軌道運動が中性子星の半径に依存するからである。これは、近接連星では星がお互いからの潮汐相互作用により変形し、その結果歪んだ星が作り出す重力場が質点の場合と異なることによる。ここで半径の大きな星の方が歪み易く、潮汐効果による変更をより大きく受ける。したがって、この効果の度合いが重力波観測で決定できれば、中性子星の状態方程式に制限を課すことができる。

合体直後に誕生する大質量中性子星からの重力波の波形も状態方程式に強く依存する。これは、大質量中性子星がケプラー回転速度程度で自転し、それに付随して重力波が放射されることと、自転周期がその半径に強く依存することによる(よって、放射される重力波の周波数は、近似的に、半径の3/2乗に反比例する)。図2に、質量は全く同じだが、異なる状態方程式を持つ連星中性子星の合体後に誕生する大質量中性子星からの重力波の波形と振動数を示す。<sup>17)</sup> 連星ブラックホール合体の場合と異なり、基本的には準周期的な重力波が放射されるが、状態方程式によってその周波数が2~3.5 kHzの範囲で大きく異なる(中性子星の半径が大きい場合の方が低周波数になる)。このkHz帯重力波が検出され、その周波数が特定できれば、中性子星の状態方程式に強い制限を課すことができるであろう。

高エネルギー天体現象の説明を視野に入れたシミュレーションも発展した。特にニュートリノ輻射輸送を考慮した

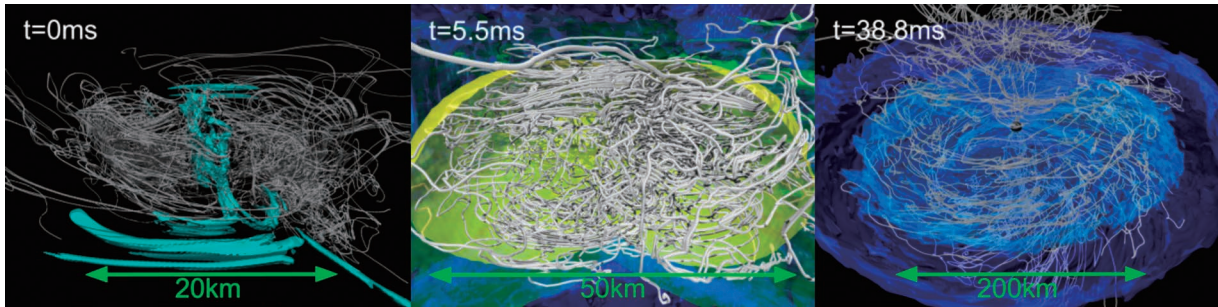


図3 連星中性子星の合体に対する高解像度磁気流体計算の結果。(左) 連星中性子星合体時の磁場強度と磁力線。水色はケルビン・ヘルムホルツ不安定性により急激に磁場が増幅した(磁場強度  $10^{15.6}$  ガウス以上の)領域を、白線は磁力線を表す。(中央) 合体後5.5ミリ秒の密度場の等値面と磁力線(白線)。黄色 =  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>, 緑 =  $10^{12}$  g/cm<sup>3</sup>, 青 =  $10^{10}$  g/cm<sup>3</sup> を表す。合体後誕生した大質量中性子星の差動回転により、磁場が回転方向に捻られつつ、回転磁気流体不安定性により乱れた磁場が生まれる様子が示されている。(右) 合体後38.8ミリ秒の密度場等値面と磁力線(白線)。青 =  $10^{10.5}$  g/cm<sup>3</sup>, 紺色 =  $10^{10}$  g/cm<sup>3</sup> を表す。中心部にはブラックホールが存在し、その周りに太陽質量の5%程度の質量の、強く磁化された降着円盤が存在する。文献22より転載。

数値相対論の発展に関しては、関口の寄与が大きい。彼のコード開発のおかげで、連星中性子星の合体のみならず、ブラックホール・中性子星連星の合体や大質量星の重力崩壊によるブラックホール形成などに対して、現実的問題設定の下での研究ができるようになった。<sup>18)</sup> これに関しては最近の物理学会誌において自身で紹介しているので、ここでは割愛する。<sup>19)</sup>

連星中性子星が合体すると、太陽質量の1%程度の物質が飛び散る可能性がある。この飛び散る物質(エジェクタ)は可視光線や赤外線を高光度で放射し得るので、光学望遠鏡で観測できる可能性があり、それが重力波の電磁波対応天体になるのではと最近注目を集めている。この現象に対する数値相対論研究も最近活発に行われているが、これに関しては久徳と仏坂によって解説記事が書かれたので、参照していただければと思う。<sup>15)</sup>

エジェクタは突発的電磁波光源という側面以外にも、r過程重元素(例えば金、銀、プラチナ、ウラン)の起源としても注目を集めている。これらの重元素は中性子過剰な環境下で重元素の急速な中性子捕獲過程(r過程)を経て生成されたと考えられているが、そのような環境を作り出す起源天体は未だに謎である。これまでは超新星爆発が生成源だと思われてきたが、最新の理論計算はこの説に対してあまり肯定的ではない。<sup>20)</sup> 質量数が195付近の重い元素を作るのが難しいからである。連星中性子星の合体はこれに代わって注目を集めている。実際、中性子星の状態方程式がある種のクラスであれば、連星中性子星の合体によるエジェクタでr過程重元素を量的にも組成比的にも、うまく説明でき得るという研究結果が最近発表された。<sup>21)</sup> この研究でも、関口の開発した数値相対論的輻射流体コードが活躍している。なお、この方面の研究は物理過程をより精密化し、計算解像度を向上させながら発展中である。

磁気流体計算に関してもスーパーコンピュータの発展とともに、物理的な効果を取り入れたシミュレーションが可能になり始めた。磁気流体計算で鍵となるのは高解像度である。なぜならば、磁気流体では様々な不安定性や磁場増幅機構が存在するが、系のスケールに比べて特徴的な波長

がはるかに短いものが多く、十分な解像度を保証しないと物理的に正しいと言えるシミュレーションが実行できないからである。これに関しては現在稼働中の京コンピュータから恩恵を受けた。図3に木内が開発した多並列計算用コードで行った、一般相対論的磁気流体シミュレーションの結果を示す。<sup>22)</sup> この例では、これ以前のシミュレーションよりも約20倍の全メッシュ数を用いたシミュレーションが実行されている。その結果、これまでその役割が不明瞭であったケルビン・ヘルムホルツ不安定性や磁気回転不安定性の合体における定性的な役割が解明された。ただし、この計算でも解像度が十分なわけではなく、さらに高解像度の計算が必要であるが、現実的計算への一里塚となるような計算がついに可能になったことが重要である。

#### 4. まとめと展望

本記事で述べたように、数値相対論は過去10年の間に大きく発展した。今後は数値相対論によって予言された重力波の波形や電磁波の光度曲線が観測に利用され、重力波の検出、ガンマ線バーストの正体の解明、新たな天体の発見などに応用されることが期待される。これらが達成されたときに初めて、数値相対論が物理学の一分野として確立されたと言えるようになるだろう。そのために、さらに研究を推進し、定量的により詳しい研究を進める必要がある。

理論研究分野としての数値相対論には、まだまだ課題がある。課題の一番は、より精密な輻射輸送効果を組み込んだ流体計算を可能にすることである。高温・高密度物質内のエネルギー輸送過程として、ニュートリノの役割は非常に重要である。その放射、吸収の効果を近似的に取り扱うことは可能になったが、より正確に取り扱うには、実空間、運動量空間の両方の輻射分布を考慮するために、ボルツマン方程式を解かなくてはならない。これを実行するには、6次元位相空間に対する偏微分方程式を解く必要がある。そのため、精度良い数値計算には現状の計算機資源を遥かに超えた資源が必要になり、今のところだれも手をつけようとしていない。しかし、計算機の進歩は速く、近い将来6次元問題を解くことも可能になると予想される。それに

備えて、今後この方面に努力をつぎ込む必要がある。

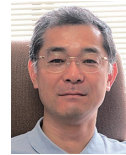
数値相対論を重力研究の様々な分野に応用することも課題である。例えば、AdS/CFT対応の研究が大流行りであったが、これに数値相対論を応用するような発展も始まりつつある。<sup>23)</sup>他にも高次元重力理論,<sup>24)</sup>一般相対論以外の重力理論,<sup>25)</sup>宇宙論<sup>26)</sup>などで数値相対論が用いられてもよい。こういう新たな分野に数値相対論を拡大させていくことは課題と同時に楽しみなことでもある。

#### 参考文献

- 1) 柴田 大：日本物理学会誌 **61** (2006) 332.
- 2) T. Nakamura: Prog. Theor. Phys. **65** (1981) 1876.
- 3) T. Nakamura, K. Oohara and Y. Kojima: Prog. Theor. Phys. Supp. **90** (1987) 1.
- 4) 中村卓史, 山崎 了：日本物理学会誌 **60** (2005) 271.
- 5) M. Shibata: Phys. Rev. D **60** (1999) 104052; M. Shibata and K. Uryu: *ibid.* **61** (2000) 064001.
- 6) F. Pretorius: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 121101.
- 7) M. Campanelli, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 111101; J. G. Baker, *et al.*: *ibid.* **96** (2006) 111102.
- 8) 例えば, 柴田 大：日本物理学会誌 **53** (1998) 581.
- 9) L. Blanchet: Living Rev. Relat. **17** (2014) 2.
- 10) スペクトル法については, 例えば以下の文献に詳しい。石岡圭一『スペクトル法に数値計算入門』(東京大学出版会, 2004)。
- 11) G. Lovelace, M. Boyle, M. A. Scheel and B. Szilagy: Class. Quantum Grav. **29** (2012) 045003.
- 12) A. Taracchini, *et al.*: Phys. Rev. D **89** (2014) 061502.
- 13) A. Buonanno and T. Damour: Phys. Rev. D **59** (1999) 084006.
- 14) 例えば, D. R. Lorimer: Living Rev. Relat. **11** (2008) 8.
- 15) 久徳浩太郎, 仏坂健太：日本物理学会誌 **69** (2014) 319.
- 16) P. Demorest, *et al.*: Nature **467** (2010) 1081; J. Antoniadis, *et al.*: Science **340** (2013) 1233232.
- 17) K. Hotokezaka, *et al.*: Phys. Rev. D **88** (2013) 044026.

- 18) Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku and M. Shibata: Prog. Theor. Exp. Phys. **01** (2012) A304.
- 19) 木内建太, 関口雄一郎：日本物理学会誌 **67** (2012) 560.
- 20) 例えば, S. Wanajo: Astrophys. J. **770** (2013) L22.
- 21) S. Wanajo, Y. Sekiguchi, *et al.*: Astrophys. J. **789** (2014) L39.
- 22) K. Kiuchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, M. Shibata and T. Wada: Phys. Rev. D **90** (2014) 041502(R).
- 23) H. Namtilan, F. Pretorius and S. G. Gubser: Phys. Rev. D **85** (2012) 084038.
- 24) 例えば, M. Shibata and H. Yoshino: Phys. Rev. D **81** (2010) 104035.
- 25) 例えば, M. Shibata, K. Taniguchi, H. Okawa and A. Buonanno: Phys. Rev. D **89** (2014) 084005.
- 26) 例えば, C. Yoo, H. Okawa and K. Nakao: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 161102.

#### 著者紹介



柴田 大氏：専門は宇宙物理学理論。数値相対論を用いて、さまざまな強重力現象を研究している。

(2014年5月19日原稿受付)

#### Development of Numerical Relativity Masaru Shibata

abstract: Numerical relativity is the unique tool to theoretically clarify the nature of dynamical and general-relativistic phenomena such as black-hole formation and merger of neutron-star binaries. In the past decade, appreciable progress has been achieved in this field, and in particular, details of the merger process of binary neutron stars and binary black holes and associated emission process of gravitational waves have been clarified. In this article, we describe the latest progress in this field and touch briefly on the future perspective.