

## 平成 30 年度（第 64 回）仁科記念賞 授賞理由

### 数値相対論による連星中性子星合体の研究

### Study of Binary Neutron Star Mergers by Numerical Relativity Simulations

柴田大氏 Masaru Shibata

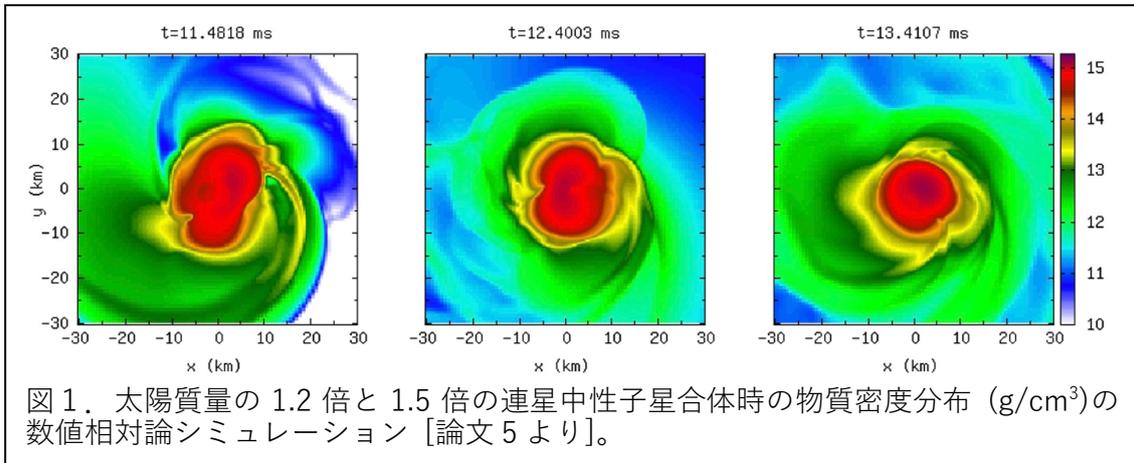
マックス・プランク重力物理学研究所 ディレクター

京都大学基礎物理学研究所 教授

二つの中性子星からなる近接連星(連星中性子星)の合体現象は、一般相対論における重要な研究対象であるのみならず、中性子星の内部構造や重元素の起源を解明するための貴重な実験場を与える。このような動的で強い重力場を伴う天体現象では、観測可能な重力波の発生が予想され、2017 年 8 月に、連星中性子星からの重力波イベント(GW170817)が重力波検出器 advanced LIGO と advanced Virgo によりはじめて発見された。さらに、ガンマ線から赤外線に至る多様な波長領域で電磁波が同時観測されることで、本格的な「マルチメッセンジャー天文学」の幕が開いた。このような合体現象を理解する上では、観測される重力波の波形や放射される電磁波の特徴を重力波源の性質と結び付けることが重要な理論的課題であり、アインシュタイン方程式や一般相対論的流体方程式に基づいた数値的手法による「数値相対論」が必要不可欠となる。

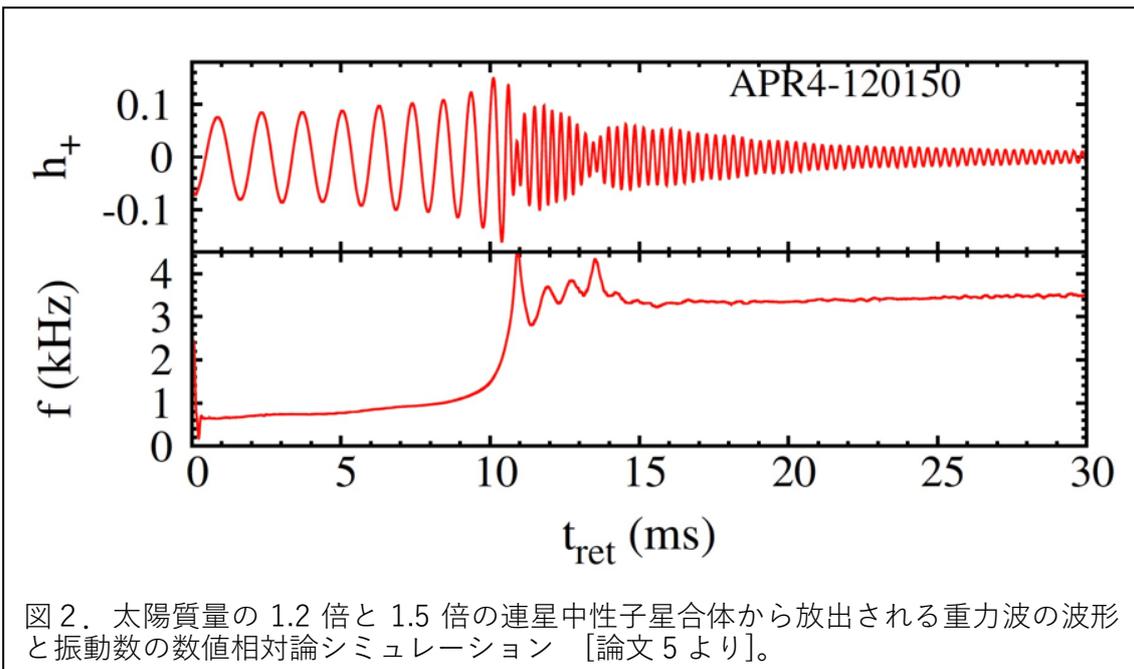
柴田氏は 1995 年に、アインシュタイン方程式を数値的に高精度で時間発展させる新しい定式化を中村卓史氏と共同で提案し、一般相対論の数値計算が長時間安定に実行可能であることを初めて示した。この定式化は、現在の数値相対論における標準形式の一つとなっている。さらに、柴田氏は、現実的な合体現象を扱う際に重要となる適切なゲージ条件の選択、信頼性の高い数値流体コードの構築、ブラックホールの存在を決定する数値的方法や重力波シグナルを抽出する計算手法の開発、などの研究を独自に進め、それらを統合した数値計算の有効性を 1999 年に世界で初めて示した[1]。また、2000 年には、現実的な速度場を持つ初期条件を用いたシミュレーションにより、合体後に遠心力で支えられた大質量中性子星が形成されうることを初めて示した[2]。

その後、柴田氏は若手研究者を先導して、物理過程の精緻化や計算解像度の向上を図り、現実的な条件下でのさまざまなモデルのシミュレーションを行うことで、合体の動的過程、重力波の波形、質量放出やニュートリノ放出などに関する標準的な理論を構築し、連星中性子星の合体現象に伴う重力波及び電磁波の挙動に対する理論予想を進めた。特に、(i) 合計質量が太陽の 2.8 倍以下ならば、合体後にまず大質量中性子星が形成されること[3](図 1)、(ii) 大質量中性子星は角運動量輸送過程を経て動力学的に進化し、



太陽質量の 10-20% の質量を持つトーラスをその周囲に発生させ、最終的にブラックホールと高温高密度の降着円盤からなる系が形成されること [5]、(iii) 大質量中性子星、トーラスともに、高温・高密度の高光度ニュートリノ放射天体であること [6]、(iv) 太陽質量の最大数% 程度の中性子過剰物質が、光速の数% から数十% の速度で放出され、観測可能な可視光・赤外線領域の高光度突発天体になりうること [4,6]、などを示した。柴田氏らによる重力波の波形 (図 2) や質量放出現象 (図 3) の詳細は、連星中性子星合体の標準モデルとして、重力波観測および重力波源からの電磁波対応天体の観測に必須の情報を提供している。

柴田氏は、数値相対論において、現実的な問題に適用可能な標準的手法を構築・確立するとともに、それを特に連星中性子星の合体に適用することで、合体に伴う重力波波形の系統的導出や電磁波対応天体の理論解析を可能にした。柴田氏は、数値相対論による連星中性子星合体研究のパイオニアであると同時に世界のフロントランナー



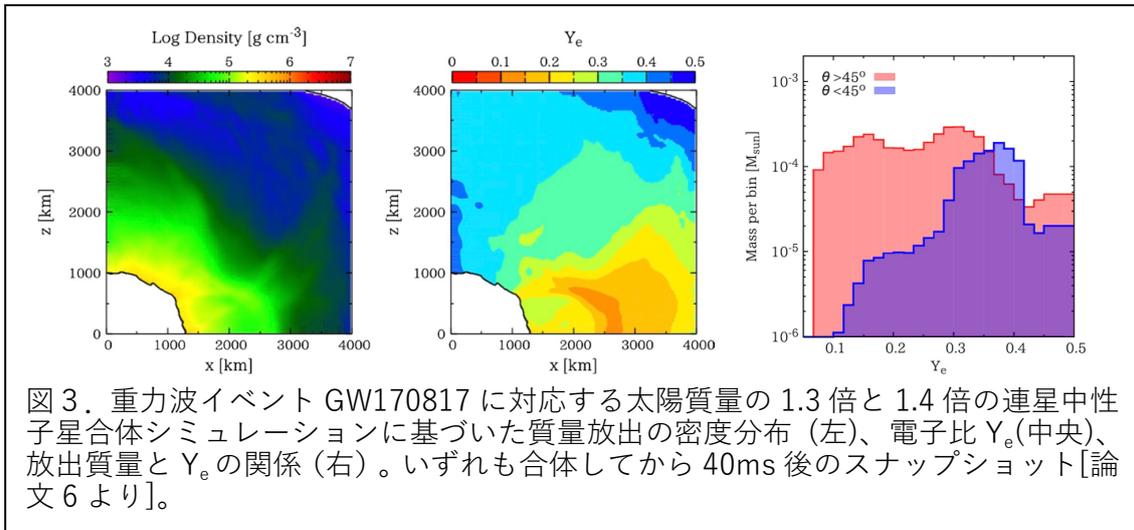


図3. 重力波イベント GW170817 に対応する太陽質量の 1.3 倍と 1.4 倍の連星中性子星合体シミュレーションに基づいた質量放出の密度分布 (左)、電子比  $Y_e$  (中央)、放出質量と  $Y_e$  の関係 (右)。いずれも合体してから 40ms 後のスナップショット[論文 6 より]。

であり、今後さらに進展すると期待される重力波観測や電磁波対応天体の観測とあいまって、その研究の重要性はますます高まると考えられる。

数値相対論および中性子星連星合体の研究における柴田氏の業績は、高い独創性と当該分野への大きなインパクトを持った世界的なものであり、仁科記念賞の授賞に値する。

参考文献：

1. “Fully general relativistic simulation of coalescing binary neutron stars: Preparatory test”, M. Shibata, Phys. Rev. D **60**, 104052-1-25 (1999).
2. “Simulation of merging binary neutron stars in full general relativity:  $\Gamma=2$  case”, M. Shibata and K. Uryu, Phys. Rev. D **61**, 064001-1-18 (2000).
3. “Merger of binary neutron stars with realistic equations of state in full general relativity”, M. Shibata, K. Taniguchi, and K. Uryu, Phys. Rev. D **71**, 084021-1-26 (2005).
4. “The mass ejection from the merger of binary neutron stars”, K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, H. Okawa, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, Phys. Rev. D **87**, 024001-1-27 (2013).
5. “Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform”, K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, T. Muranushi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, Phys. Rev. D **88**, 044026-1-30 (2013).
6. “Modeling GW170817 based on numerical relativity and its implications”, M. Shibata, S. Fujibayashi, K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, and M. Tanaka, Phys. Rev. D **96**, 123012-1-22 (2017).

# 固体におけるテラヘルツ極端非線形光学の開拓 Development of Extreme-nonlinear Terahertz Optics in Solids

田中耕一郎氏 Koichiro Tanaka  
京都大学大学院理学研究科 教授

極端非線形光学現象は、物質中の電子系と光の相互作用エネルギーが電子系を特徴づけているエネルギー（例えば、イオン化エネルギーやバンドギャップエネルギー）と同程度かそれを凌駕したときに発現する光学現象である。実験的には、原子に高強度の可視域パルス光を照射した際に高次高調波発生として現れることが1990年代に明らかとなった。このような光学現象の記述には、摂動論はもはや不十分であり、物質と光を強く結合させた新たな枠組みが必要とされた。その後、現象論の提案を契機として理論的な理解も進み、極端非線形光学現象の応用は、可視光から軟X線を発生させる技術やアト秒光源技術として大いに発展をとげている。その一方で、原子に対して用いられるような高強度可視光パルスを固体に照射すると対象が破壊されてしまうことから、固体における極端非線形光学現象の解明は手つかずの状態であった。周期性をもつ固体結晶においては、電子系はバンド描像によってよく記述されるが、極端非線形光学現象が起きるような光強度下でバンド描像がどこまで適用可能で、そこにいかなる光学現象が現れるかは未知の領域であり、その実現が待たれていた。

田中氏は、照射する光の周波数をテラヘルツ領域まで低くすることにより対象を破壊することなく極端非線形光学現象を観測できるとの着想のもと、パルス波面傾斜法に基づく高強度テラヘルツ光源の開発を行った。その結果、図1に示すような、パルス尖頭電場値で1.2 MV/cm（尖頭磁場は0.4 T）を超えるテラヘルツ光源を世界で初めて実現した[1]。これを契機に、固体におけるテラヘルツ極端非線

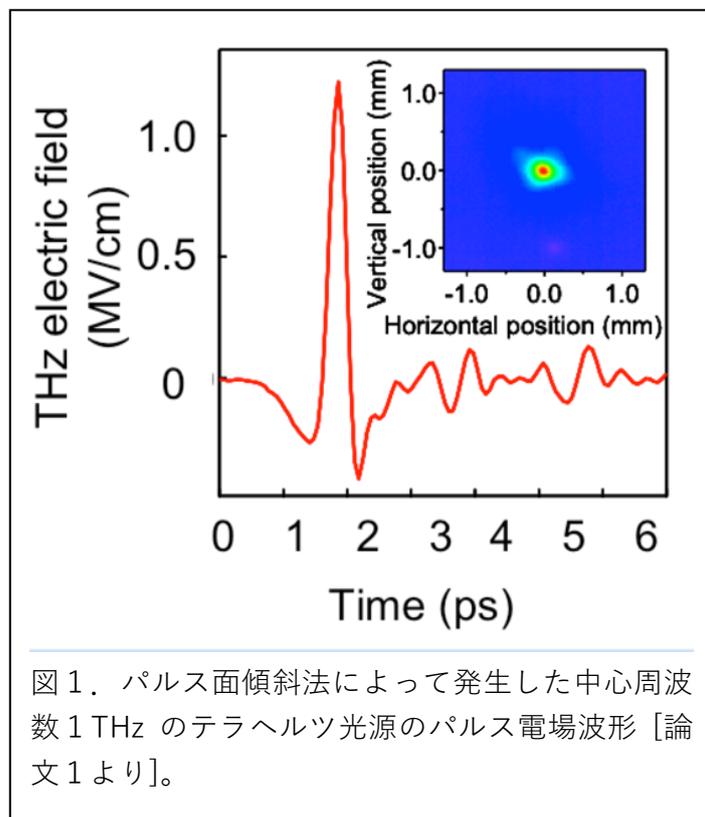


図1. パルス面傾斜法によって発生した中心周波数1 THz のテラヘルツ光源のパルス電場波形 [論文1より]。

形光学の研究は、実験、理論ともに爆発的な勢いで世界中に広がり、新しい発見が相次いでいる。

田中氏はこの光源を用いて、固体物質における極端な非線形光学現象を明らかにした。

まず、ガリウムヒ素 (GaAs) 量子井戸系において1000倍のキャリア増幅を実現し、その機構が高強度テラヘルツ電場による電子のバリスティックな加速と衝突イオン化であることを明らかにした[2]。この研究は、テラヘルツ光の照射により可視域の発光（この場合は、GaAs 量子井戸の励起子発光）が現れるという特異な現象の最初の観測例となった。また、金属構造体を一種の共振器として用いることにより、テラヘルツパルス先頭の磁場を0.9 Tにまで高めることに成功し、傾角強磁性体ホロミウムフェライト (HoFeO<sub>3</sub>) に対して、反強磁性モードの励振による磁化の変調を、飽和磁化の40%にまで大きくすることに成功した[3]。これは、強磁性体において超高速磁化反転につながる道筋を示した例として高く評価されている。

単一原子層物質であるグラフェンにおいても、図2に示すようにテラヘルツ光の照射による近赤外光透過率の高速スイッチングが1ピコ秒という短い時間で起こることを示した[4]。この現象についても、GaAs 量子井戸の場合と同様に、高強度テラヘルツ電場による電子のバリスティックな加速と衝突イオン化がそのメカニズムであることを明らかにした。

さらに、田中氏は最近、周波数60 THzのテラヘルツ光をグラフェンに照射することにより、図3に示すような9次までの高次高調波発生に成功した[5]。これは、反転対称性を有する単一原子層物質における世界で初めての高次高調波発生である。田中氏は高次高調波が有する特異な楕円偏光励起依存性が、光との相互作用を取り入れてからバ

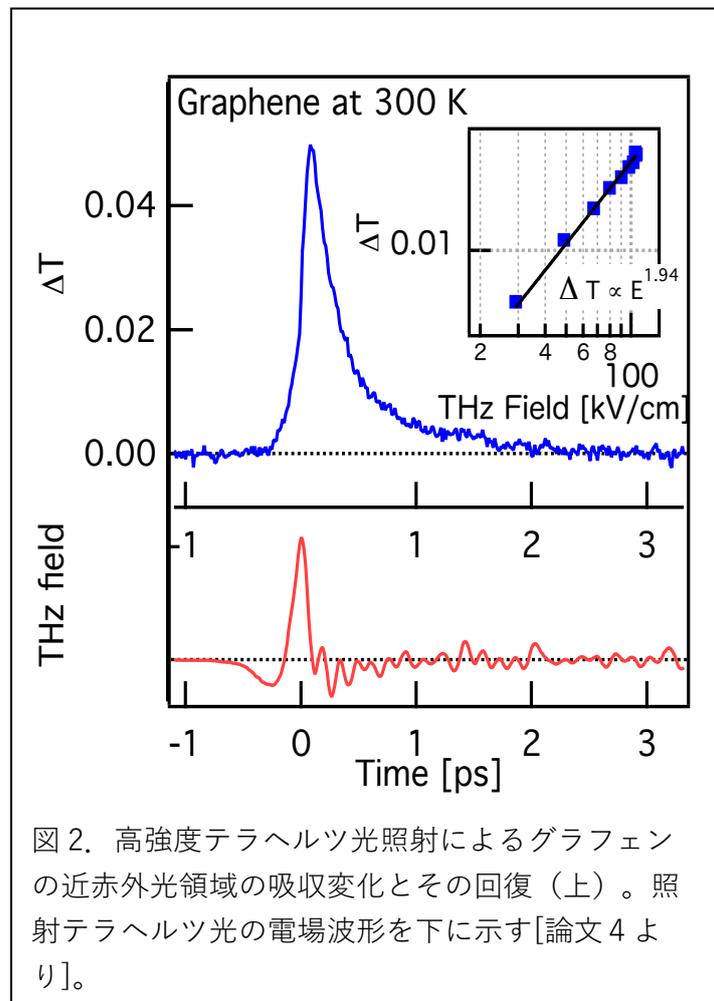
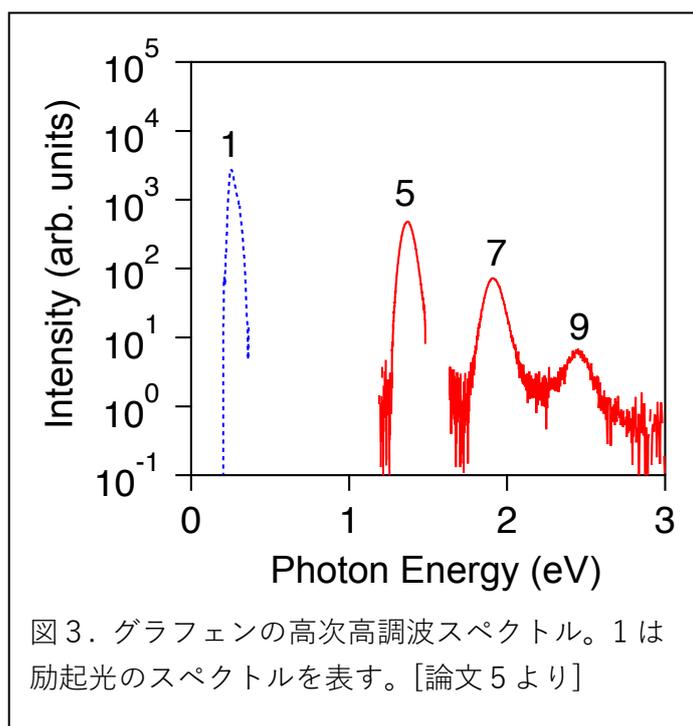


図2. 高強度テラヘルツ光照射によるグラフェンの近赤外光領域の吸収変化とその回復（上）。照射テラヘルツ光の電場波形を下に示す[論文4より]。

ンド計算を行うという新しい方式の理論によって再現できることを示し、グラフェン炭素間の結合の異方性が高次高調波の特異な楕円偏光励起依存性を生み出すことを明らかにした。

田中氏の一連の研究は、固体におけるテラヘルツ極端非線形光学の研究の発端として認識されるべきものであり、その功績は多大であり、世界を先導してきた田中氏の業績は、仁科記念賞の授賞に値する。



参考文献：

1. "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO<sub>3</sub>", H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 091106 (2011).
2. "Extraordinary Carrier Multiplication Gated by a Picosecond Electric Field Pulse", H. Hirori, K. Shinokita, M. Shirai, S. Tani, Y. Kadoya, and K. Tanaka, *Nature Communications* **2**, 594 (2011).
3. "Nonlinear magnetization dynamics of antiferromagnetic spin resonance induced by intense terahertz magnetic field", Y. Mukai, H. Hirori, T. Yamamoto, H. Kageyama and K. Tanaka, *New J. Phys.* **18** 013045 (2016).
4. "Ultrafast Carrier Dynamics Under High Electric Field in Graphene", S. Tani, F. Blanchard, and K. Tanaka *Phys. Rev. Lett.* **109**, 166603 (2012).
5. "High-harmonic generation in graphene enhanced by elliptically polarized light excitation", N. Yoshikawa, T. Tamaya, and K. Tanaka, *Science* **356**, 736-738 (2017).