

理学博士中村卓史氏の「ブラックホールの形成と重力波放出の理論的研究」に対する授賞審査要旨

一般相対性理論によると、高密度の天体である中性子星の重力収縮の際や、中性子星の連星の合体の際には、重力場の波動、すなわち重力波が放出されて、最終的には、ブラックホールが形成される。ことが現在知られている。このような、非常に強い重力場を持つ天体の進化を説明するためには、重力場、すなわち時空の歪曲を記述するアインシュタイン方程式と、この歪曲した時空における流体の運動を記述する方程式を同時に解かねばならない。この数値解法の研究は、一九七〇年頃から数値相対論として発展してきた。その一環として、中村卓史氏は、一九八〇年頃には二次元の重力収縮の問題の困難を解決して、三次元問題へと進み、さらに重力波の放出を含んだ新しい解析的・数値的な計算方式の発見とその拡張を重ねることによって、上記のようなブラックホール形成に至る中性子星の進化過程の全貌を説明することに初めて成功した。

中村氏の主要な研究は、(一) 回転する中性子星の重力崩壊の過

程、(二) 回転ブラックホールに落下する粒子の放出する重力波の強度と波形、(三) 中性子星の連星の合体と重力波の放出過程、の三つに大別される。

(一) 回転する中性子星の重力崩壊

中村氏が研究を始める以前は、中性子星の重力崩壊の研究は一次元の球対称の場合に限られていた。同氏は、まず、回転する星の重力崩壊という二次元の軸対称問題を取り上げ、回転軸上に存在する計量テンソルの特異性を回避するための、新しい座標と変数を導入することによって、ブラックホールに至る進化過程の計算に世界で初めて成功した(論文1, 2)。その結果、星の初期の角運動量が、ある臨界値以下である場合には、初期の密度や回転速度の分布の如何によらずに、最終的には、地平面によって囲まれた回転ブラックホールが形成されることが明らかになった。

(二) ブラックホールに落下する粒子の放出する重力波

次に、中村氏は佐々木節氏と共同で、重力波の研究に取り組み、アインシュタイン方程式から、いわゆるSasaki-Nakamura方程式を解析的に導出し、この方程式を解くことによって、回転ブラックホールに向かって粒子が落下する際に放出される重力波の完全に相對

論的な計算が可能になった(論文6)。この方程式は現在多くの研究者に利用されている。

中村氏は、この方程式を具体的に解くことによって、種々のエネルギーと角運動量を持った粒子が回転ブラックホールに落下する際に放出される重力波の強度と波形を詳細に計算した。その結果、粒子が回転軸上を運動する場合は、粒子の静止質量エネルギーの0.1%以下の重力波しか放出されないが、そうでない場合は、最大10%までの大きな放出が可能であることを初めて発見した(論文7)。

### (三) 中性子星の連星の合体と重力波の放出

一九八九年にテイラーが、電波の周期的なパルスを放出している中性子星の連星(パルサー)を発見すると、この種の連星の最終的な合体が宇宙の有力な重力波源の一つであると考えられるようになった。

中村氏は、まず、いわゆるポストニュートン近似を用いた、上記の合体過程の計算に着手した。中性子星の運動に対する重力波の反作用は時間についての三階の微分を含むので、安定で精度の良い計算は困難であったが、同氏はこれを克服する新方式を考案して、合体に至る全過程の計算に初めて成功した(論文8、9)。その結果の一つとして、両中性子星の質量が太陽質量の一・五倍の場合、放出

される重力波の総エネルギーは星の静止質量エネルギーの4%の程度であることを明らかにした。

中村氏は、上の研究と並行して、無近似の完全に一般相対論的な方式の研究を進めた。当時、いわゆる正準ADM (Arnold-Deser-Misner) 形式の方程式は、系の時間発展を記述するのに適したものと考えられていた。しかし、同氏は、この形式のままの数値計算は精度が極めて悪いので、この形式のうちの束縛方程式を発展方程式の方に取り込むことによって、精度の難点を除去した、変形ADM形式を考案して、これをまず重力波の伝播の計算に適用した(論文7、11)。この変形方式は長時間の積分に対して極めて安定で精度が良いことが判明して、現在では、BSSN (Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura) 形式と呼ばれて、数多くの研究者に利用されている。

中村氏らは、このBSSN形式を用いて、中性子星の連星が重力波を放出しながら次第に接近し、最終的には合体してブラックホールを形成するという進化過程の、完全に相対論的な計算に画期的な成功を取めた(論文12)。その結果、星の合体前後の密度変化の状況や、放出される重力波の強度、波形、スペクトルなどの時間変化が初めて明らかになった。

重力波はまだ観測されていないが、中村氏らの研究によって、観

測と比較すべき理論値が前もって得られたことの意義は大きい。

わが国の TAMA300 や米国の LIGO など、重力波の検出を目指した組織的研究が現在数多く進行中である。中村氏は、TAMA300 の発足以来、その理論関係の指導者として活躍し、さらには、今後の重力波観測の目標や対象に関する種々の将来計画を提案している(論文 14、15)。その一つは、人口衛星に乗せた検出装置を用いて、十億光年以上の遠方にある、中性子星の連星が放出する重力波を観測し、宇宙膨張の加速度などを測定するという興味ある提案である。

以上のほか、中村氏は、宇宙論、星の形成、超新星、ガンマ線バーストなど、天体物理学の広い分野にわたる理論的研究を行って、多数の独創的な論文を発表している。

中村氏は、数多くの国際会議で招待講演を行い、また一九九〇年には、数値相対論の研究に対して、西宮湯川記念賞を受賞している。

#### 主要論文

中村氏には二三七編の発表論文があるが、表題の研究に関する主要な論文を次に掲げる。

1. A New Formalism of the Einstein Equations for Relativistic Rotating Systems. Prog. Theor. Phys. **63** (1980) 719, K. Maeda, S. Miyama, M.

Sasaki and T. Nakamura

2. General Relativistic Collapse of an Axially Symmetric Star. Prog. Theor. Phys. **63** (1980) 1229, T. Nakamura, K. Maeda, S. Miyama and M. Sasaki

3. General Relativistic Collapse of Axially Symmetric Stars Leading to the Formation of Rotating Black Hole. Prog. Theor. Phys. **65** (1981) 1876, T. Nakamura

4. General Relativistic Collapse of Rotating Supermassive Stars. Prog. Theor. Phys. **66** (1981) 2038, T. Nakamura and H. Sato

5. General Relativistic Collapse of Rotating Stars. Ann. NY. Acad. **422** (1984) 56, T. Nakamura

6. Gravitational Radiation from a Kerr Black Hole I. — Formulation and a Method for Numerical Analysis—. Prog. Theor. Phys. **67** (1982) 1788, M. Sasaki and T. Nakamura

7. Gravitational Collapse to Black Holes and Gravitational Waves from Black Holes. Prog. Theor. Phys. supplement. **90** (1987) 1-218, T. Nakamura, K. Oohara and Y. Kojima

8. Gravitational Radiation from a Coalescing Binary Neutron Star III — Simulations from Equilibrium Model—. Prog. Theor. Phys. **83** (1990) 906-940, K. Oohara and T. Nakamura

9. Gravitational Radiation from a Coalescing Binary Neutron Star IV — Tidal Disruption—. Prog. Theor. Phys. **86** (1991) 73-83, T. Nakamura and K. Oohara

10. Coalescence of Spinning binary neutron stars of equal mass — 3D numerical Simulations —. Prog. Theor. Phys. **88** (1992) 1079-95, M. Shibata, T. Nakamura and K. Oohara

11. Evolution of three-dimensional gravitational waves: Harmonic slicing case. Phys. Rev. **D52** (1995) 5428-5444, M. Shibata and T. Nakamura

12. 3D General Relativistic Simulations of Coalescing Binary Neutron Stars. Prog. Theor. Phys. supplement **136** (1999) 270–286, K. Oohara and T. Nakamura
13. Gravitational Waves from a point particle in circular orbit around a black hole — Logarithmic terms in the post-Newtonian expansion—. Phys. Rev. D**49** (1994) 4016–4022, H. Tagoshi and T. Nakamura
14. Gravitational Waves from Coalescing Black Hole Macho Binaries. Astrophys. J. **487** (1997) L139–L142, T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka and K. S. Thorne
15. Direct Measurement of the Acceleration of the Universe using 0.1 Hz Band Laser Interferometer Gravitational Wave Antenna in Space. Physical Review Letters **87** (2001) 221103, Naoki Seto, Seiji Kawamura and T. Nakamura

工学博士 榊 裕之氏及び工学博士 大野英  
 男氏の「半導体ナノ構造による電子の量  
 子制御と強磁性の研究」(共同研究)に  
 対する授賞審査要旨

エレクトロニクスと情報技術の驚異的進展には、半導体が不可欠な役割を果たしている。例えば、トランジスタの演算機能や半導体レーザーの発光機能は、半導体内の電子の密度を増減させ、電気伝導率や光増幅率を制御することで達成されている。通常の半導体では、電子は自由な荷電粒子として振舞うが、ナノメートル級の極微の構造に閉じ込めると、運動の自由度(次元性)が制限され、量子力学的な波動性が顕わになり、著しい影響を及ぼす。また、磁性原子の存在下では、電子の持つスピンの重要な役割を果たす。榊氏と大野氏は、半導体のナノ構造の形成や磁性不純物の導入によって、電子の波動性と次元性およびスピン自由度を自在に制御する先駆的研究を進め、半導体に新たな物性と優れた素子機能を付与できることを明らかにした。この研究は、電子工学・固体物理学・ナノ物質科学が交叉する先端領域に、新たな学術分野を開くものであり、国内外