

## まえがき

2015 年 9 月 14 日、アメリカの重力波望遠鏡 Advanced LIGO が重力波の初観測に成功し、重力波天文学の幕が開けた。アインシュタイン (A. Einstein) が一般相対性理論を導出してから、ちょうど 100 年目に成し遂げられた偉業だった。2015 年の初検出以降も順調に観測が続き、この 6 年間で、すでに 50 を超える重力波源またはその候補が観測された。その中でも、我々研究者に最も強いインパクトを与えたのは、重力波以外の手段では発見するのが難しい連星ブラックホールの合体現象が多数観測されたことだった。その結果、我々の宇宙に対する認識が大きく改まった。さらに、最初の発見から約 2 年経った 2017 年 8 月 17 日には、連星中性子星からの重力波およびその合体に伴う電磁波対応天体が初めて観測された。これは重力波と電磁波が同時に直接観測された初の事例だったのだが、これによって重力波研究のみならず周辺分野の多くの研究が活性化された。そして、重力波という新しい天文観測手段の威力が大いに認識されることになった。今後も、より感度の高い重力波望遠鏡の建設がアメリカやヨーロッパを中心に議論されており、重力波天文学の発展は当面続くものと思われる。特に、検出周波数帯域が地上の重力波望遠鏡とは全く異なる、宇宙重力波望遠鏡 LISA の打ち上げが 2030 年代前半に予定されており、これによって、これまでとは異なる重力波源が観測されることが期待される。

重力波を重力波望遠鏡で確実に捉えるには、予想される重力波の波形をあらかじめ正確に予想する作業が必要になる。重力波の信号が一般には微弱なため、検出器固有の雑音と信号を識別するには、波形のテンプレートが必要だからである。つまり理論研究が必要なのだが、それに対してなくてはなら

ない研究が、数値計算により一般相対性理論の基本方程式であるアインシュタイン方程式などを解く研究、いわゆる数値相対論である。重力波の波形を理論的に高精度で求めるには、アインシュタイン方程式や一般相対論的な運動方程式などを正確に解かなくてはならないが、それらは非線形な連立偏微分方程式であり、一般的な問題に対して解析解を求めることは不可能である。したがって、数値計算を用いた「数値」相対論が不可欠になる。数値相対論はまた、高エネルギー宇宙物理学でも重要な役割を担う。近年、 $\gamma$ 線バーストや重力崩壊型超新星爆発では多様な現象が観測されてきた。これらの現象では、一般相対論的かつダイナミックな天体が駆動源と推測されるが、その駆動源自身を直接的に観測することは難しい。したがって、それらがどのようにして起きるのか理解するには理論研究に頼らざるを得ないが、ここでも数値相対論が必要になる。本書の第一の目的は、この数値相対論の基礎について解説することである。また、特に中性子星連星の合体を取り上げ、数値相対論によってどのようなことが理解できるのか、について伝えることを第二の目的とする。

アインシュタイン方程式は複雑な偏微分方程式なので、数値相対論の中心課題は、この複雑な偏微分方程式を精度良く解くことになる。出版社の方に本書の執筆を依頼された際には、「読者に考え方を伝える入門書を」と注文されたのだが、具体的に式を書かないと数値相対論の本質的な作業を読者に伝えるのは難しい。数値相対論の基本方程式に触れずに得られた結果だけをまとめても、数値相対論を本格的に研究したい者を引きつけるのは難しかろう。また、数値相対論について日本語で書かれた教科書が存在しないことが、以前から気になっていた。そこで本書では、少々複雑なものでも、必要不可欠な式はむしろ積極的に記すことにした。ただし、やる気さえあれば、誰でも導出できるように、式変形については丁寧に記したつもりである。また1つの章を使って、アインシュタイン方程式を解くための数値計算法の概略についても解説した。数値相対論ではどのような方程式をどのように解いているのか、その基本を理解していただければと思う。

なお、数値相対論に関する洋書は数書出版されており、筆者も2016年に、

詳細まで記述した専門書 [1] を出版した。本書の第 2～4 章は、その要約版と位置付けることができる。もし数値相対論をより突っ込んで勉強したくなったならば、この参考図書にも目を通していただければ幸いである。

本書の執筆にあたっては、研究者仲間である川口恭平、木内建太、久徳浩太郎、林航大、藤林翔、和南城伸也の諸氏に、数値データや図の提供、および本書の修正でお世話になった。この場を借りて、深く謝意を表したい。

2021 年 6 月 ドイツ ポツダムにて

柴田 大