

カー・ブラックホール時空には、共形キリング-矢野 (CKY) テンソルによって特徴づけられる「隠れた対称性」が存在する。この対称性は、ブラックホール時空における摂動方程式の変数分離性や、時空の安定性解析に本質的な役割を果たす。4次元カー時空におけるこの対称性はウォーカー・ペンローズ (1970) によって発見され、CKY テンソルの概念自体は柏田 (1968)、立花 (1969) らの研究にまで遡る。超弦理論や超重力理論の発展に伴い高次元ブラックホールが重要視される中、私たちは CKY 構造が高次元時空にも自然に拡張できることを明らかにしてきた [45-69]。特に、CKY テンソルを許容する時空は Kerr-NUT-(A)dS ブラックホール時空に限られることを証明した点 [51,52] は主要な成果であり、現在はこの構造に基づく CKY 時空の安定性および剛性の研究を進めている。

CKY 構造をもつブラックホール時空を解析接続することで、コンパクト多様体上にアインシュタイン計量が自然に誘導される点も重要である。橋本・阪口との共同研究で得られた新しいアインシュタイン計量 [35] も、この統一的枠組みから理解できる。ページ計量、トーリック佐々木-アインシュタイン計量、さらにはトラス作用をもつ球面束上のアインシュタイン計量など、多くの計量が高次元ブラックホール時空から構成可能であり、ローレンツ幾何とリーマン幾何の間により深い対応関係が存在することを示唆している。今後は、高次元ブラックホールから誘導されるアインシュタイン計量の分類や CKY 構造がもつ普遍性を明確化する。

近年、重力波の直接観測 (2015) や銀河中心ブラックホールの撮影 (2019) により、ブラックホールは抽象的な理論解から観測可能な”天体”へと認識が変化した。本研究では、降着円盤やジェットに伴う X 線観測を理解するため、完全流体を背景場としてもつブラックホール時空の構成を目指す。具体的には、CKY 構造に流体の自由度をトーションとして取り込み、アインシュタイン方程式を調和写像の方程式へと変換する枠組みを構築する。この方法により、ブラックホール周辺で剛体回転する完全流体 (ウォルキスト解) が導出できることは既に示しており [62,68]、今後はその一般化と体系化を進める。

さらに本研究では、カー・ブラックホール時空において ワルド (1978) が提唱した「ワルドの4つ組」と呼ばれる演算子の構造を、CKY の視点から再構成することを目指す。ワルドの4つ組は、重力摂動方程式 (チューコルスキー方程式) に現れる変数分離性の幾何学的解釈を与えるものであり、重力波の詳細な解析においても重要な役割を果たすと期待される。CKY 構造とワルドの枠組みを統合することで、重力摂動理論の基盤となる幾何学的構造を明確化し、流体・摂動・幾何学が統合されたブラックホール時空モデルの構築を目指す。これは観測データの精密解析に向けた、理論物理と幾何学の架橋となる重要な研究課題である。