これまでの研究成果のまとめ

高次元宇宙モデルが注目され、大型ハドロン衝突型加速器の実験によるブラックホール生成の可能性が議論されていたことを受け、高次元でのブラックホール時空の性質を明らかにするべく、これまで、主に高次元重力理論の厳密解に関する研究をしてきた。

高次元ブラックホール解の多様性と一意性に関する研究

カー解の一意性が知られていた 4 次元ブラックホール解の状況とは異なり、定常軸対称な 5 次元ブラックホール解として、事象の地平面のトポロジーが互いに異なる、マイヤース・ペリー解とブラックリング解が知られており、高次元ブラックホールの構造の多様さが垣間見えていた。そこで、事象の地平面のトポロジーを指定した上で、解の一意性を示せるかについて焦点を当てた。

5 次元アインシュタイン方程式の真空解として、互いに可換な 2 つの回転キリングベクトル場をもち、事象の地平面が正則で 3 次元球面と同相であり、漸近平坦な 5 次元定常ブラックホール解はマイヤース・ペリー解のみであることを示した [8]。

[16] では、同様の手法を事象の地平面のトポロジ―が 2 次元球面と円周との直積と同相であるようなブラックリングに対して適用した。互いに可換な 2 つの回転キリングベクトル場をもち、回転軸上に欠損角を持たず、事象の地平面が正則で漸近平坦なブラックリングを表す定常な真空解はポメランスキー・センコフの 2 軸回転ブラックリング解に限られることを示した。

高次元重力理論の厳密解の生成に関する研究

アインシュタイン方程式は非線形偏微分方程式なので、一般には方程式を解くことは困難である。ところがアインシュタイン方程式の適当な解に対して、その解を一定の手続きで変換することでアインシュタイン方程式の別の解を生成することができる場合がある。

このような変換の手法として知られているものの一つに、ベリンスキーとザハロフによる逆散乱法がある。逆散乱法はシードとして既知の解を選び、シードにソリトンを加えることで別の解を生成する手法である。[13] では、ベリンスキー・ザハロフの逆散乱法を応用し、5 次元ミンコフスキー解をシードとしてソリトンを 2 つ加えた解を構成することで、2 次元球面方向に回転するブラックリング解である三島・井口解が得られることを示した。

2 つの可換なキリングベクトル場があるとき、5 次元アインシュタイン・マクスウェル・チャーン・サイモンズ系は $G_{2(2)}$／(SL(2,R)×SL(2,R))を対象多様体とする非線形シグマモデルとなる。対象多様体への $G_{2(2)}$の作用を用いて、5 次元アインシュタイン方程式の真空解から 5 次元アインシュタイン・マクスウェル・チャーン・サイモンズ方程式の解を生成する方法が知られている。この生成方法をラシードブラックホール解に適用し、新たな回転荷電カルツァ・クラインブラックホール解を構成した [18]。

I have studied on exact solutions for the higher-dimensional gravity to throw light on higher-dimensional black hole spacetimes in the context of higher-dimensional cosmological models and black hole formation at the LHC.

Uniqueness and non-uniqueness of the higher-dimensional black holes:

It is known that the Kerr solution is the unique black hole solution of the four-dimensional vacuum Einstein equations, whereas there exist various black hole solutions of the five-dimensional vacuum Einstein equations. For example, the Myers-Perry black hole solution with S^3 horizon and the Emparan-Reall black ring solution with S^2 x S^1 horizon was known at that time. Hence we restricted ourselves to stationary black holes with spherical topology.

We showed the uniqueness of the asymptotically flat, black hole solution to the five-dimensional vacuum Einstein equation with a regular event horizon homeomorphic to S^3, admitting two commuting spacelike Killing vector fields and a stationary Killing vector field. The five-dimensional Myers-Perry black hole solution is unique in this class. [8]

In [16], we adapted the similar method to black rings. We showed that the only asymptotically flat black ring solution without a conical singularity to the five-dimensional vacuum Einstein equations is the Pomeransky-Sen'kov black ring solution.

Generating the exact solutions of higher-dimensional gravity:

It is difficult to solve the Einstein equations which are nonlinear partial differential equations. In some cases, one can generate new solutions from known ones.

One such technique is the inverse scattering method developed by Belinski and Zakharov. This method generates solitonic solutions from a known solution as a seed. In [13], we extended the inverse scattering method to the five-dimensional vacuum Einstein equations and showed the Mishima-Iguchi black ring solution with a rotating two sphere can be generated as two solitonic solution from five-dimensional Minkowski spacetime as a seed.

Under the assumption of the existence of two commuting Killing vector fields, the five-dimensional Einstein-Maxwell-Chern-Simons equations reduce to a nonlinear sigma model with the target space $G_{2(2)}$ / (SL(2,R) x SL(2,R)). $G_{2(2)}$ isometry of the target space generates a charged solution of the five-dimensional Einstein-Maxwell-Chern-Simons equations from a vacuum solution of the Einstein equations. Applying the $G_{2(2)}$ generating technique to the Rasheed black hole solution, we generated a new rotating charged Kaluza-Klein black hole solution to the five-dimensional Einstein-Maxwell-Chern-Simons equations. [18]