

1 研究の進捗状況

現在主に、時空の漸近的対称性についての研究を堀田昌寛氏と富塚健志氏と共同で行っている。まずこの研究分野について概観して説明する。時空の物理を記述する一般相対論は微分同相写像がゲージ変換に対応するとしばしば言われている。実際、多くの微分同相写像に対応する変換のもとで、時空の計量は互いに物理的に区別可能なものへと変化しないため、そのような変換はゲージ変換であるといえる。その一方で、一部の特殊な微分同相写像はゲージ変換とはみなせず、物理的に非自明な変換となる。例としてポアンカレ群の変換のひとつであるローレンツブーストを考えると、ある質量を持つブラックホール時空は別の質量をもつブラックホール時空へと変化する。したがって、この変換は物理的に区別可能な変化を生み出す非自明な変換であり、ゲージ変換とはみなせない。一般相対論のように一般共変性をもつ理論では、変換の生成子、つまり変換に対応する電荷は時空領域の境界の積分で与えられることがわかっている (例えば [1, 2] など)。このことから非自明な変換は時空領域の境界での漸近的ふるまいによって分類ができ、時空の漸近的対称性と呼ばれる。

歴史的には、時空の漸近的対称性の研究は空間無限遠方に流れ出ていく重力波の研究から始まった [3, 4]。この経緯に加えて、近年の AdS/CFT 対応に対する注目の高まりもあり、空間無限遠方における漸近的対称性について数多くの研究がなされてきた。その一方で、無限遠方以外の境界については堀田氏らによるシュワルツシルトブラックホールの地平面における対称性の研究 [5, 6] 以外にはほとんど研究がなされてこなかった。しかし 2016 年の Hawking 氏らの研究 [7, 8] によってブラックホール地平面の対称性を調べることで、時空の物理学における 2 つの未解決問題^{*1}を解決できる可能性が指摘され、ブラックホール地平面における漸近的対称性にも注目が高まっている。

これまで無限遠方や地平面における漸近的対称性の研究は数多くあるが、いずれも発見的手法によって行われてきた。すなわち、注目する変換の漸近的ふるまいをはじめに与えたうえで、それに対応する電荷の積分可能性や代数関係の計算が行われてきた。発見的手法に基づいて研究が行われているため、これまでに時空の漸近的対称性の完全分類はなされておらず、最近でも新しい対称性が見つかることがある (例えば、文献 [9] は 2020 年に Physical Review Letters において出版された)。

我々の研究では、このような発見的手法を用いるのではなく、物理的に非自明な変換が満たす条件を書き下すことにより漸近的対称性を分類する新しい手法の開発を行っている。この我々の手法に基づく、非自明な変換を小さな構成要素ごとに分解して調べることができるため、これらの積み重ねによって漸近的対称性の完全分類が可能となることが期待できる。具体例として特に Minkowski 時空内の Rindler 地平面における漸近的対称性の解析を行い、先行研究 [10] において未発見であった新しい対称性を見つけることに成功した。これらの研究成果は現在論文の執筆に取り掛かっている。また我々の手法は任意の時空に適用可能であるため、ブラックホール時空や膨張宇宙などの様々な具体的時空における漸近的対称性の研究も引き続いて行っている。

2 博士論文執筆状況

博士論文の主な内容は、既に出版済みの 4 つの論文 [11, 12, 13, 14] である。これらの論文では、量子系において情報を記憶する自由度を同定する新しい手法を開発した。この自由度を量子情報カプセルと名付け、その応用を文

^{*1} (1) 時空のエントロピーの起源はなにか?

(2) ブラックホールに落ちていった (量子) 情報は完全に消え去ってしまうか?

献 [12, 14] で行った. 特に, 文献 [14] では量子場を介した情報通信についての研究を行い, 量子場の量子ゆらぎとその量子もつれによって情報の流れが古典場を介した通信とは異なることを示した. また, 空間次元による情報の流れの変化も解析した*2. これらの研究をまとめて再構成しながら博士論文を執筆中であるが, 既に出版済みの論文に基づいているため順調に書き進めている.

博士課程終了後の進路

博士課程終了後は日本学術振興会海外特別研究員に内定しており, カナダのウォータールー大学においてポストドクとなる予定です. ウォータールー大学には GPPU の海外研修で修士博士を通してこれまでに合計 3 ヶ月滞在しており, 現地の教授らと共同研究することができました. この場を借りて報告するとともに, このような素晴らしい経験を得られる機会を与えてくれる GPPU プログラムを運営してくださっている皆様に感謝いたします.

参考文献

- [1] J. D. Brown and M. Henneaux, Commun. Math. Phys. **104**, 207 (1986).
- [2] R. M. Wald and A. Zoupas, Phys. Rev. D **61**, 084027 (2000).
- [3] H. Bondi, M. G. J. van der Burg and A. W. K. Metzner, Proc. Roy. Soc. Lond. A **269**, 21 (1962).
- [4] R. K. Sachs, Proc. Roy. Soc. Lond. A **270**, 103 (1962).
- [5] M. Hotta, K. Sasaki, and T. Sasaki, Class. Quant. Grav. **18**, 1823 (2001).
- [6] M. Hotta, Phys. Rev. D **66**, 124021 (2002).
- [7] S. W. Hawking, arXiv:1509.01147.
- [8] S. W. Hawking, M. J. Perry, and A. Strominger, Phys. Rev. Lett. **116**, 231301 (2016).
- [9] D. Grumiller, A. Pérez, M. M. Sheikh-Jabbari, R. Troncoso, and C. Zwickel, Phys. Rev. Lett. **124**, 041601 (2020).
- [10] M. Hotta, J. Trevison and K. Yamaguchi, Phys. Rev. D **94**, 083001 (2016).
- [11] K. Yamaguchi, N. Watamura, M. Hotta, Phys. Lett. A **383**, 1255 (2019).
- [12] M. Hotta, K. Yamaguchi, Physics Letters A **384**, 126078 (2020).
- [13] K. Yamaguchi, and M. Hotta, Phys. Lett. A **384**, 126447 (2020).
- [14] K. Yamaguchi, A. Ahmadzadegan, P. Simidzija, A. Kempf, E. Martín-Martínez, Physical Review D **101**, 105009 (2020).

*2 これらの内容は以前の進捗発表において報告しているため, ここではこれ以上詳述しない.