

ブラックホールへの降着流中に生成する衝撃波

青木 成一郎 (東大理)、小出 真路 (富山大工)、

工藤 哲洋 (国立天文台)、柴田 一成 (京大理)

1. 要旨

1次元一般相対論的電磁流体力学数値シミュレーションにより、ブラックホールの周りの降着円盤内の衝撃波形成について調べた。その結果、2種類の衝撃波が得られた。ブラックホールから外向きに伝播する衝撃波と、ブラックホールへ向かって伝播する衝撃波である。前者は、遠心力によるポテンシャルの障壁によって、gas pressure driven jet を加速する衝撃波と同じメカニズムで生成することが解った。後者は、準周期的に生成し、epicyclic frequency による cut off が有限であるために、降着円盤内で生じた波がブラックホールへ向かって伝播することができ、さらに、ブラックホール近傍の密度が低いために、波が増幅して衝撃波となることが解った。また、この衝撃波の周期は、high-frequency QPO の周期と同じオーダーとなる結果となることが分かった。

2. イントロダクション

宇宙ジェットの一般相対論的電磁流体力学数値シミュレーションである、Koide et al. 1998, 1999において、ジェットが2層構造になるという結果が得られている。磁場の力により加速される magnetically driven jet とガス圧により加速される gas pressure driven jet である。後者は非相対論的扱いには見られなかったジェットで、彼らによれば、一般相対論の効果による激しい降着により、降着円盤内の降着流中において衝撃波が生成し、ジェットを加速すると考えられている。しかし、この衝撃波の生成メカニズムは詳しく調べられていない。そこで、今回、1次元一般相対論的流体力学数値シミュレーションを行い、衝撃波形成について調べた。

3. 方法

シュワルツシルトブラックホールの周りに sub-Kepler で回転 (Kepler 回転で安定) する降着円盤を置いた。時空はシュワルツシルト時空で固定。赤道面に沿った 1 次元一般相対論的流体力学による数値シミュレーションを行った。境界は自由境界を探っている。今回、降着円盤内の温度と回転速度 (ケプラー回転で安定) についてパラメータサーベイを行った。

4. 結果

1次元一般相対論的流体力学数値シミュレーションにより、以下の 2種類の衝撃波が得られた。

(i) 外向きに伝播する衝撃波 (図 1)

パラメータサーベイを行った結果、降着円盤の回転速度が大きく、降着円盤の温度が低い場合に外向きに伝播する衝撃波が得られた。これから、外向きに伝播する衝撃波の生成メカニズムは以下で解釈できる。初期に不安定な降着円盤は、時間とともに落下する。つまり、降着円盤のより外側から、角運動量が供給され、時間が経つとケプラー回転となる。その際、降着円盤のより外側の角運動量の方が内側より大きい為、内側の方が早くケプラー回転に達する。

従って、落下してきた物質は、降着円盤のより内側の物質とぶつかり、波が発生する。そこで、降着円盤の温度が低いと波の速度振幅が音速を超える、衝撃波となる。つまり、この衝撃波は遠心力によるポテンシャルの障壁によって生成する。Koide et al. 1998, 1999 の gas pressure driven jet を加速する衝撃波との比較から、両者の衝撃波は同じ生成メカニズムで生じることが解った。

(ii) (準周期的に) 内向きに伝播する衝撃波 (図 1, 図 2)

準周期的に、内向きに伝播する衝撃波が得られた。(線形) 波の伝播の数値シミュレーション(安定な降着円盤の一点に圧力の擾動を加えた)の結果得られた減衰振動と sub-Kepler の場合の振動が非常に良く似ている。その為、sub-Kepler の場合の周期性は、降着円盤内の様々な点で生じた波の重ね合わせと、擾乱が大きいことによる非線形効果の結果と解釈できる。また、一般相対論の場合、非相対論の場合と異なり、epicyclic frequency が有限であることから、生成した波はブラックホールへ内向きに伝わることができ、さらに、ブラックホール近傍では、ブラックホールが物質を吸い込み、物質の密度が下がっている為、伝播に伴い、この波の速度振幅が増大し、超音速となって、衝撃波が生じることが解った。また、この衝撃波の周期を中心のブラックホールの質量を 10 太陽質量として見積もると 67Hz となり、high-frequency QPO の典型的な周波数 (100Hz 程度) と同じオーダーとなることが分かった。

参考文献

- Kato, S., Fukue, J., & Mineshige, S. 1998, Black-Hole Accretion Disks(Kyoto: Kyoto Univ. Press)
Kato, S. 2001, PASJ, 53, 1
Koide, S., Shibata, K., & Kudoh, T. 1998, ApJ, 495, L63
Koide, S., Shibata, K., & Kudoh, T. 1999, ApJ, 522, 727
Matsumoto, R., Kato, S., & Honma, F. 1988, in Physics of Neutron Stars and Black Holes, ed. Y. Tanaka(Tokyo: Universal Academy Press), 15

図 1

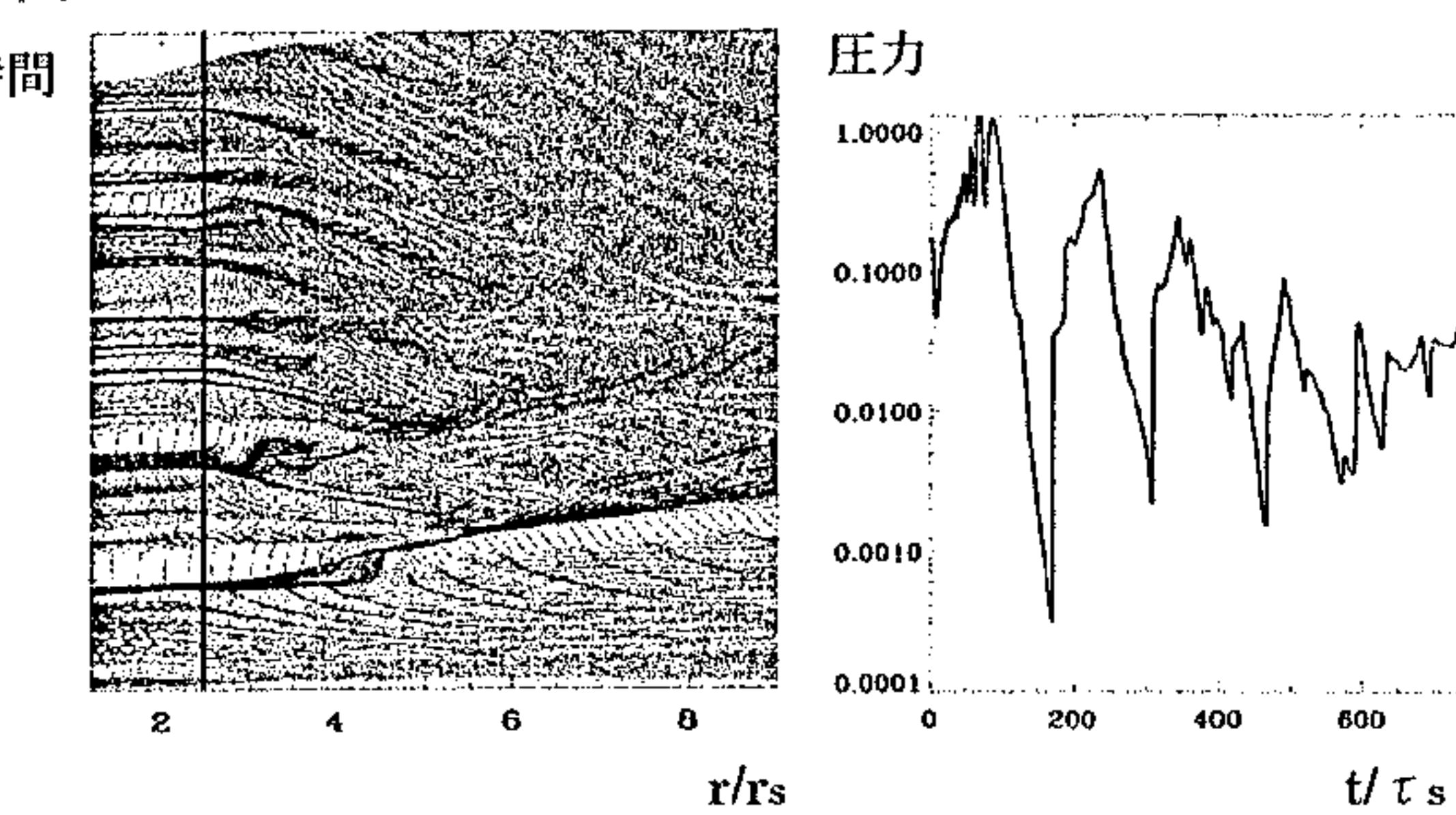


図 1：圧力の時間変化。横軸はブラックホール（半径： r_s ）からの距離。縦軸は時間。外向きに伝播する衝撃波が 1 回、内向きに伝播する衝撃波が数回、出ている様子が見られる。

図 2 : $r=2.5r_s$ (図 1 の実践上)での圧力の時間変化。横軸は、時間 ($\tau_s = r_s/c$)、縦軸は圧力。内向きの衝撃波が数回、伝播する様子が分かる。