

重力波地震学で探るブラックホールの破壊過程

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター 勝俣 啓

Gravitational Wave Seismology: Rupture Process of Black Holes

Kei Katsumata

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University,

North 10 West 8, Sapporo 060-0810, JAPAN

1. はじめに

地震学では 3 次元弾性体の運動方程式から出発して、震源での弾性波動（地震波）の発生と弾性体内部での波動伝播を定式化している。同様に 4 次元弾性体（時空連続体）の運動方程式、すなわちアインシュタインの重力方程式を出発点にして、震源での波動（重力波）の発生とその伝播を地震学流に定式化できるはずである。

地震波形の解析から震源過程を推定することができるのと同様に、重力波形から震源過程が推定できるはずである。例えば、中性子星では *starquake* 現象が存在すると考えられていて、地球上の地震と同じく断層運動によってモデル化する試みが天文学者や物理学者によって行われている。しかし断層運動に伴う重力波の発生は未だ定式化されておらず、我々地震学者が地震学的手法を用いて取り組むべき問題であると考えられる。

本論文の目的は重力波地震学の概略を述べることにある。重力波は非常に微弱なため未だ検出されていないが、今後計測技術の急速な進歩により、容易に観測できるようになる可能性がある。その時に備えて重力波を地震学的手法で解析す

ると、どんなことが分かりそうか検討してみたい。

2. 一般相対性理論と重力波

一般相対性理論は特殊相対性理論とは違い、重力または加速度が存在する場合でも成り立つ理論であり、アインシュタインにより提唱された。時間と空間を同等に扱い、重力場を時空間の歪みによって表現している。重力の原因である質量の周囲の時空は歪んでいて、質量が運動するとその歪みの度合に強弱が生じ、この歪みの強弱が光速で伝播して行く。これが重力波である。

3. 断層運動による重力波の励起

一般相対性理論によって導かれた時空連続体の運動方程式（アインシュタインの重力方程式）を用いて断層運動による重力波の励起を定式化する。まず *single force* が作用した場合を考察し、次に *single force* の重ね合わせにより *single couple* を表現し、そして *single couple* を組み合わせて *double couple* による重力波の励起を表現する。独立した 6 つの *double couple* を成分として持つモーメントテンソルにより任意の重力波形を合

成できる．

4．中性子星と starquake

中性子星は恒星の終末期の一形態である．恒星自身の重力のため直径数 10km にまで収縮し，原始を構成する電子と陽子が合体して星全体が中性子のみで出来ていると考えられている．強力な電磁波を放出するパルサーが中性子星の有力候補である．このパルサーはイベント的に強力な電磁波を放出する．その強さと頻度との間には地震の規模別頻度と同様 Gutenberg-Richter の式が成り立つことから，中性子星でも地震のような現象，すなわち starquake が起きているのではないかと推測されている(例えば，*Cheng et al., 1996; Leonard et al., 2001*)．

5．Starquake の震源メカニズム解

Starquake は一種の断層運動で，それにより質量移動が起きて慣性モーメントが変化し，星の回転周期が変化し，周囲の磁場との相互作用で電磁波が放出されるというメカニズムが提案されている(例えば，*Link et al., 1998*)．*Franco et al.[2000]*は中性子上に断層モデルを仮定し，電磁波の放出エネルギーを見積もっている．この断層運動の際には重力波も放出されているであろうから重力波形のモーメントテンソルインバージョンによって震源メカニズム解が得られるはずである．

6．超新星爆発とブラックホールの形成

重力波は超新星の爆発やブラックホールからも放出されていると考えられる．

重力波の地震学的解析から超新星爆発の詳細な破壊過程やブラックホールの形成過程が推定できるかも知れない．

7．重力波は検出可能か？

重力波地震学にとって最も大きな問題は，重力波が実際に観測可能かどうかということである．重力波は一般相対性理論によって予言されていて，連星パルサーの周期遅延率などから間接的にはその存在が証明されている．ただ重力波が存在するにしてもその強さが極端に微弱なため，中性子星の starquake を十分な S/N 比で観測することは不可能であるという考えもある(*Horvath, 1996*)．現在物理学者は共振型検出器や大型レーザー干渉計で重力波を検出しようとしている．数トンの錘が重力波と共振するのを観測する共振型検出器は，初期の機械式地震計を彷彿とされる．また，レーザー干渉計は地殻変動を測定するものと同様である．地球潮汐よりもさらに 10 桁近く微小な変動を捕らえる必要があるため，今のところ重力波検出は成功していない．

8．おわりに - 22 世紀の地震学

地震計が 100 年の歳月を経て格段の進歩を遂げたように，重力波計も必ずやその真価を発揮する時代が来ると考えられる．それは恐らく来世紀，22 世紀になるかも知れないが，地震学にとってはこれから開拓すべきチャレンジングな分野の一つではなからうか？

参考文献

Cheng, B., R. I. Epstein, R. A. Guyer

- and A. C. Young, Earthquake-like behavior of soft gamma-ray repeaters, *Nature*, **382**, 518-520, 1996.
- Franco, L. M., B. Link and R. I. Epstein, Quaking neutron stars, *Astrophys. J.*, **543**, no. 2, pt.1, 987-994, 2000.
- Horvath, J. E., Detectability of gravitational wave bursts from a class of neutron starquake GRB models, *Int. J. Mod. Phys. D*, **5**, 35-43, 1996.
- Leonard, T., O. Papasouliotis and I. G. Main, A Poisson model for identifying characteristic size effects in frequency data: application to frequency-size distributions for global earthquakes, "starquakes", and fault lengths, *J. Geophys. Res.*, **106**, 13473-13484, 2001.
- Link, B., L. M. Franco and R. I. Epstein, Starquake-induced magnetic field and torque evolution in neutron stars, *Astrophys. J.*, **508**, 838-843, 1998.