

Giant Impact による地球周辺円盤の形成

納田明達

概要

月の起源には古くから多様な説が唱えられてきた。近年力学的、物質科学的知見が増し、巨大衝突説が有力視されている。本研究では、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) を用いて、衝突後の質量分布に注目して系統的なシミュレーションを行う。

1 月の起源としての巨大衝突過程

月は地球唯一の衛星であり、我々に最も身近な天体である。それ故に月はいく多くな々の関心を引き寄せてきた。米国アポロ月探査によって月の岩を地球に持ち帰り、月に月震計を設置するなど月の地球物理・科学的研究が著しい進展を見せた 1960 年代以降、月の起源に関する研究がさかんに行なわれてきた。

月の起源に関する現在最も有力視されているのは巨大衝突 (Cameron and Ward(1976), Wood(1986)) である。巨大衝突説とは地球に火星サイズほどの天体が衝突を起こし、破片からできる地球周辺円盤から月が集積するということものである。

この巨大衝突説は、月が金属鉄に乏しく、地球のマントルとその主成分化学組成が似ている、月には揮発性の高い化学組成 (Na など) が不足している、といった地球化学的研究結果との整合性が高く、また、現在の月-地球系の大きな角運動量の説明にも都合が良いために多くの研究者の支

持を得ている。巨大衝突過程についての研究は Cameron らのグループによって精力的になされており (Benz et al. 1986, 1987, 1989, Benz and Cameron 1991, Cameron 1997, 2001, Canup and Cameron 2001)、現在までに地球の 1/10 程度の天体が地球に衝突すると現在の月の主成分組成とほぼ等しいを持つ地球周辺円盤が形成されることが分かっている。(Canup and Asphaug 2001)

一方、火星より大きい天体の巨大衝突は惑星形成の後期段階に実現したと考えられる。Kokubo and Ida(1998)によれば地球領域では火星サイズの原始惑星がまず形成され、それが衝突によって現在の惑星へと成長したとされている。これらの衝突のいずれかで月が形成されたとするのは自然な考えである。

ここで重要なことは巨大衝突のパラメータ、すなわち 2 天体の質量比、無限遠での相対速度と impact parameter といった初期条件と巨大衝突後の物理条件、すなわち質量の空間分布や角運動量の分布との関係を把握することである。現在までの巨大衝突

に関する研究では月形成に都合の良いパラメータの詳細な調整が行われ、月形成に必要な条件を非常に狭い範囲に絞ってきた。その結果原始惑星程度の大きさの天体同士の巨大衝突について、一般性の高い理論、経験則を得ることは不可能であった。巨大衝突の結果生じる破壊や、質量の飛散といった素過程の広いパラメータの下での数値計算による再現と理論化を無くしては、惑星成長過程での月形成の必然性や他の形での衛星系を持ち得た可能性を議論するのは難しい。

そのために我々は広いパラメータ領域での Giant Impact のシミュレーションを行い、巨大衝突現象の一般的な性質の理解を試みた。

2 巨大衝突の数値モデル

本研究ではターゲットとなる天体（原始地球）とインパクターとなる天体（原始惑星）の2体のみを考え、その衝突を再現した。ターゲット天体の質量は1地球質量としてインパクター天体の質量を0.03～1.0地球質量の範囲で変えてシミュレーションを行った。二体の相対軌道は無限遠での速度が0になるように初速度を与え、放物軌道の最接近距離とターゲットとインパクターの半径の和との比($r_{\min}$)をパラメータとして0.1～2.0の間で変えながら計算を行う。

ターゲットおよびインパクター天体はそれぞれ静水圧平衡の流体球できているとし、状態方程式はポリトロップ $P = K\rho^\gamma$ を仮定、ポリトロップインデックス γ は3,4,6と変え、状態方程式の差が与える影響を考察した。

2.1 Smoothed Particle Hydrodynamics

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) では流体を広がりを持った小さな粒子 (SPH 粒子) の重ね合わせとして表現し、それぞれの SPH 粒子の運動を解くことにより流体の運動を表現する。SPH に関する詳細は Monaghan (1992)、計算プログラムの設計と作成については Hernquist and Katz (1989) を参考として挙げておく。

重力計算専用機 (GRAPE) は SPH 計算に次のような利点を持つ。SPH 粒子は他全ての粒子からの重力（自己重力）がかかるため、 i 番目の粒子の受ける力は

$$m_i \mathbf{r}_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} + \sum_{j=1}^n G_{ij} \quad (1)$$

ここで P_{ij} は j 粒子が i 粒子に及ぼす圧力勾配と人工粘性で、 G_{ij} は j 粒子が i 粒子に及ぼす重力である。圧力は近傍粒子からのみ受けるので GRAPE のネイバースト機能を使うことにより、高速に計算することが可能である。重力計算は GRAPE を使えば高速に直接計算ができる。

ただし、近傍の粒子については粒子の重なり合いを考えた補正が必要である。その補正も近傍粒子が対象になるため圧力の計算と同様に高速に計算することが可能である。

3 結果

衝突シミュレーションの結果、図1、図2、図3のような結果が得ら

れた。図1はポリトロープインデックス $\gamma = 4$ 、インパクター質量が 0.3 ターゲット質量、相対軌道の最接近距離とターゲットとインパクター半径の和との比 $r_{\min}$ が 0.4 の場合である。

図1の11枚の図は左上の図から右向きに、上の段から下の段に行くにつれて時間が進んでいき、それぞれ $t = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$ の時の様子を xy 平面上に投影した図である。図1において長さはターゲット半径、時間は約 1450 秒で正規化されている。ターゲットの大きさは1地球半径(約 6370km)に取られているので図における長さの単位は地球半径により正規化されていることになる。

$t = 0$ で、インパクターは左上から、ターゲットは重心が $(0, 0)$ に保存されるように右下から近づいていき、 $t = 5$ までに衝突を起こし、その後飛び出した放出物がケプラー速度の差によって円盤状に広がるのが分かる。円盤状に広がった物質のうち、軌道の近地点が地球半径よりも外にあるものの総質量を計算することにより衝突放出物の量を見積もることができる。

図2は図1のパラメータのうちの $r_{\min}$ を 0.1 にした場合である。この場合は正面衝突に近く、衝突による放出物はほとんどない。すなわちインパクターは地球に吸収されてしまうことがわかる。

図3は図1のパラメータのうちの $r_{\min}$ を 1.6 にした場合である。この場合は接近した影響でインパクターが変形させられてエネルギーが散逸するため、衝突後の軌道離心率は1より小さくなるものの、遠点は 100 地球半径以上と非常に大きな値を持つ。

このようなシミュレーションを最接近距離 ($r_{\min}$) および質量比を変えていくことにより図4を得る。図4の横軸は最接近距離をターゲット半径とインパクター半径との和で規格化したものであり、縦軸は衝突による放出物の量をインパクターの質量で規格化したものである。

図3より、質量比によらず $r_{\min}$ が小さいところでは放出物はほとんど無く、 $r_{\min}$ が大きいところではインパクターの質量にほぼ等しくなっていることがわかる。これは先ほどもあったように、 $r_{\min}$ が小さい場合は地球に吸収され、大きい場合は衝突せずに通り過ぎるためである。

また、今回のシミュレーションのうち、インパクターとターゲットの質量の比が 0.1 以下の場合において $r_{\min}$ が 0.8~1 の付近に放出物の値に極大値があるということが分かった。この理由については、衝突による運動エネルギーの散逸の効果が衝突放出物に効率的に働き、閉じた軌道にのりやすいのではないかと考えているが、現在解析中である。

参考文献

- [1] W. Benz, A. G. W. Cameron, and H. J. Melosh. The origin of the Moon and the single-impact hypothesis III. *Icarus*, 81:113–131, 1989.
- [2] W. Benz, W. L. Slattery, and A. G. W. Cameron. The origin of the Moon and the single-impact hypothesis I. *Icarus*, 66:515–535, 1986.

- [3] W. Benz, W. L. Slattery, and A. G. W. Cameron. The origin of the Moon and the single-impact hypothesis II. *Icarus*, 71:30–45, 1987.
- [4] A. G. W. Cameron. The origin of the Moon and the single-impact hypothesis V. *Icarus*, 126:126–137, 1996.
- [5] A. G. W. Cameron and W. Benz. The origin of the Moon and the single-impact hypothesis IV. *Icarus*, 92:204–216, 1991.
- [6] A. G. W. Cameron and W. R. Ward. The origin of the moon. *Proc. Lunar Planet Sci. Conf.*, 7:120–122, 1976.
- [7] R. M. Canup and E. Asphaug. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth’s formation. *Nature*, 412:708–712, August 2001.
- [8] R. M. Canup, W. R. Ward, and A. G. W. Cameron. A Scaling Relationship for Satellite-Forming Impacts. *Icarus*, 150:288–296, April 2001.
- [9] Lars Hernquist and Neal Katz. TREE-SPH: A unification of SPH with the hierarchical tree method. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 70:419–446, June 1989.
- [10] Shigeru Ida, Robin M. Canup, and Glen R. Stewart. Lunar accretion from an impact-generated disk. *Nature*, 389(6649):353–357, 25 September 1997.
- [11] E. Kokubo and S. Ida. Oligarchic Growth of Protoplanets. *Icarus*, 131:171–178, January 1998.
- [12] J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30:543–575, 1992.
- [13] John A. Wood. Moon over mauna loa: A review of hypothesis of formation of earth’s moon. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips, and G. J. Taylor, editors, *Origin of the Moon*, pages 17–56. Lunar and Planetary Institute, Houston, 1986.

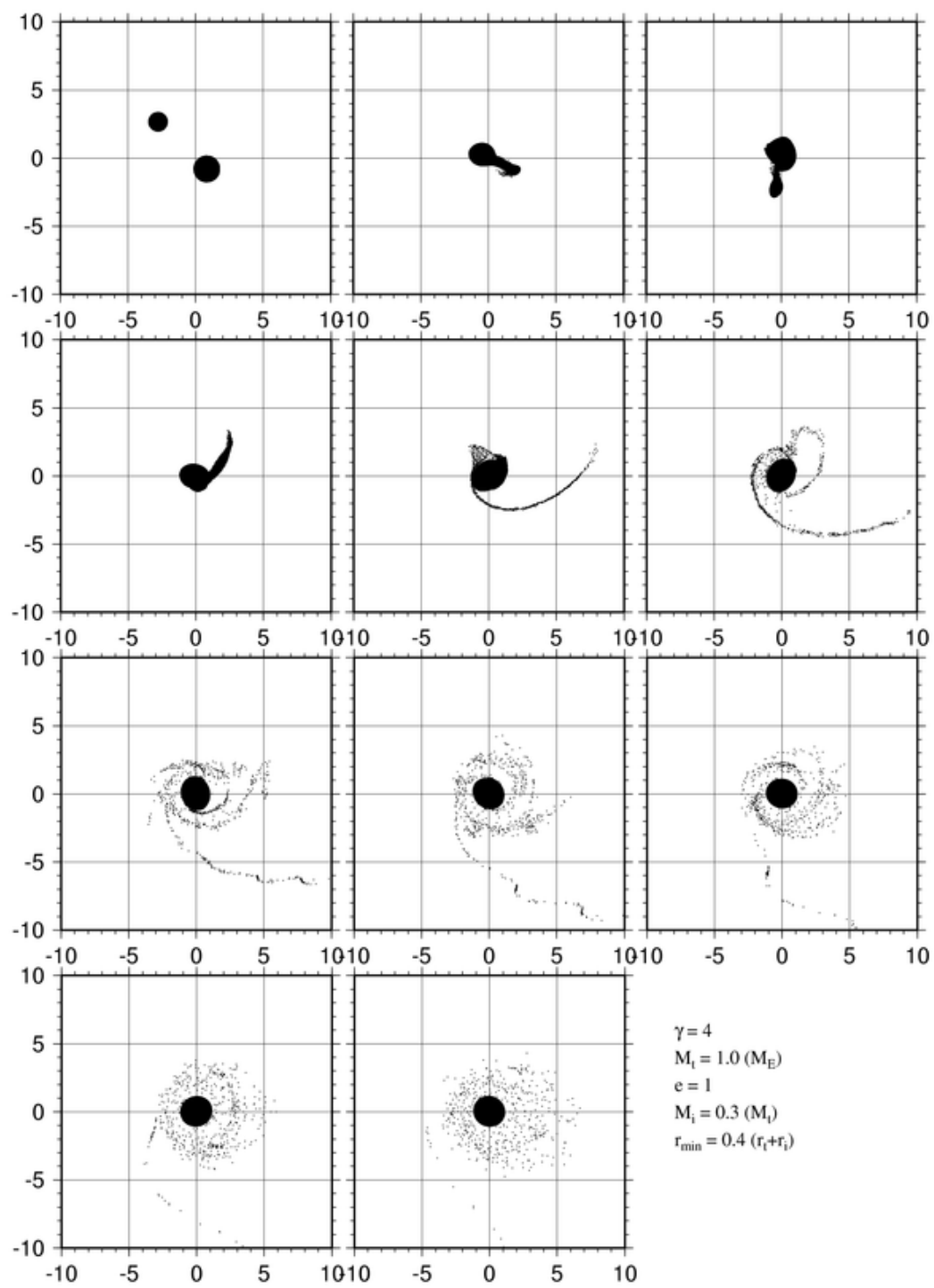


図 1: $\gamma = 4$, $M_i = 0.3M_t$, $r_{\min} = 0.4$ のスナップショット

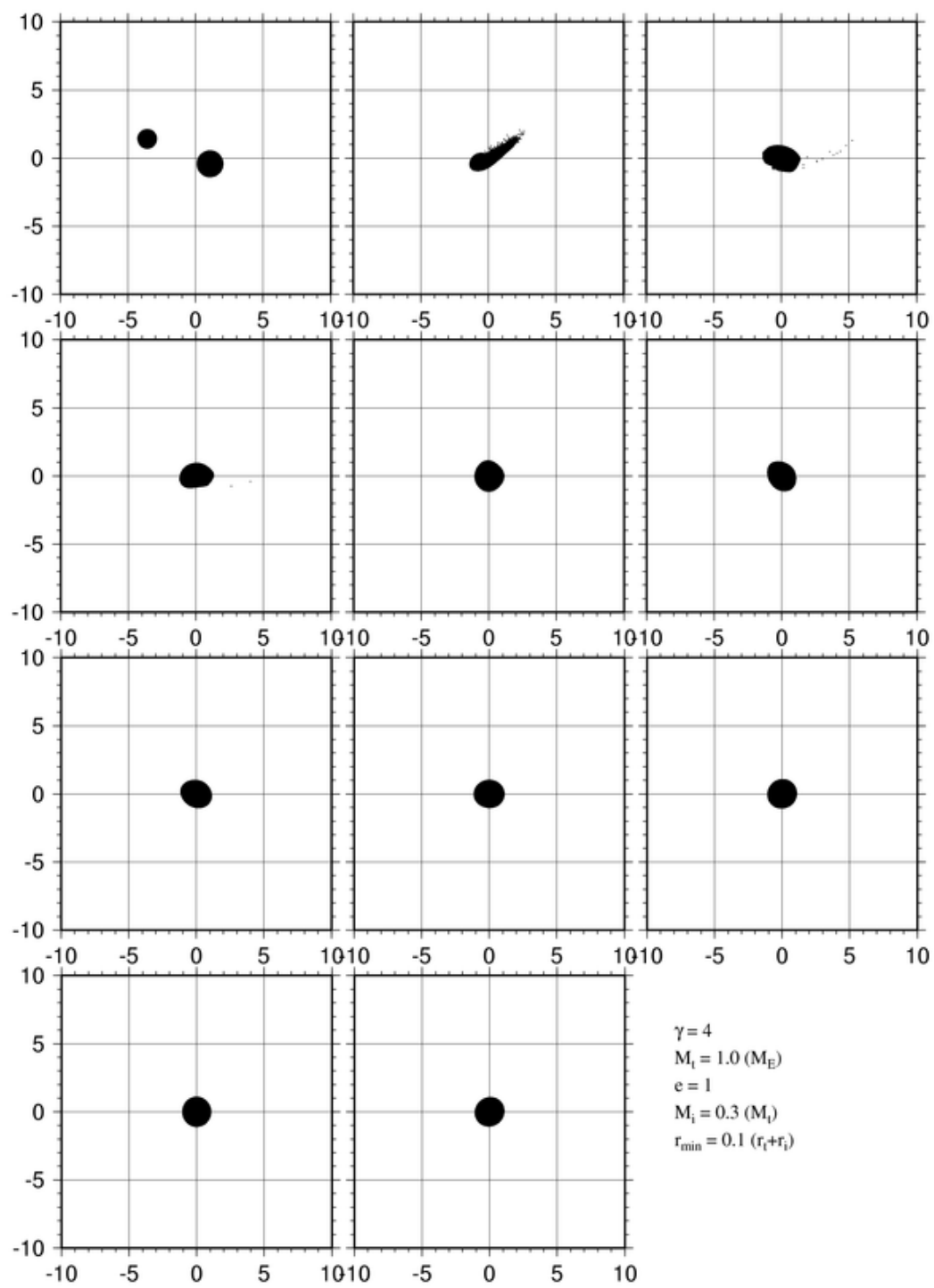


図 2: $\gamma = 4$, $M_i = 0.3M_t$, $r_{\min} = 0.1$ のスナップショット

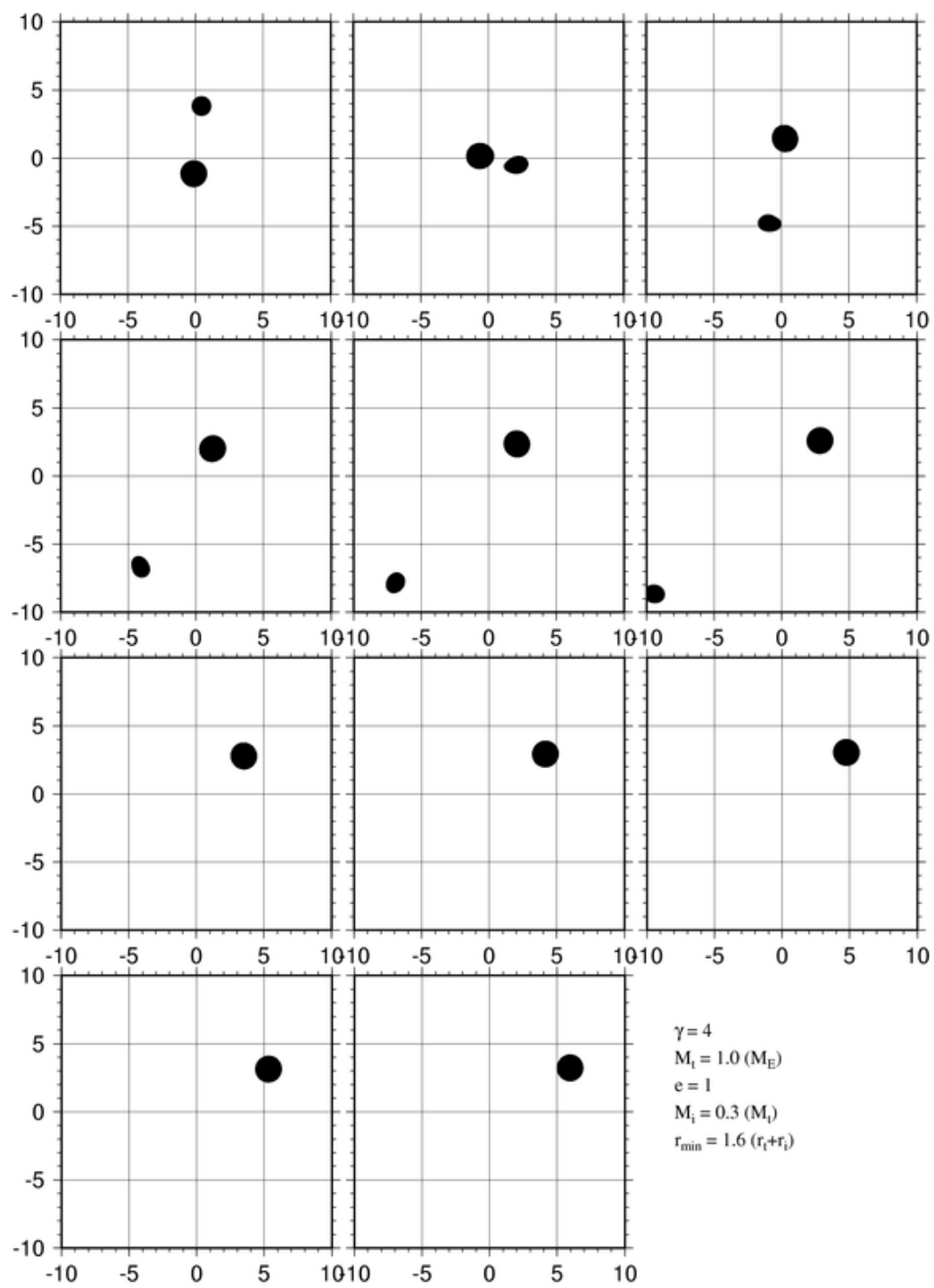


図 3: $\gamma = 4, M_i = 0.3M_t, r_{min} = 0.1$ のスナップショット

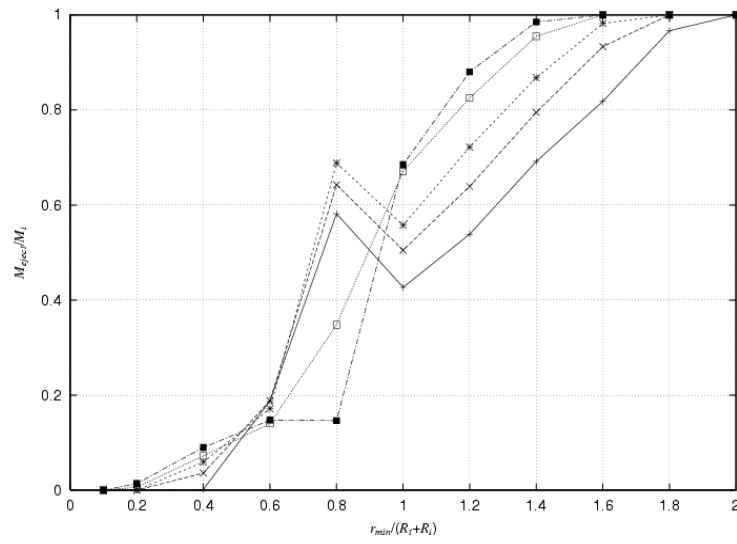


図 4: 最接近距離に対する放出物の質量比のふるまい ($\gamma = 4$ の結果)。図中のシンボル $\times$ $*$ $\square$ $\blacksquare$ の線はそれぞれ $M_i = 0.03, 0.06, 0.1, 0.2, 0.3 M_t$ に対応している