

「平成20年度最優秀発表賞受賞論文」

M型星における中心星近傍領域での惑星集積N体シミュレーション

荻原 正博¹，井田 茂¹

2009年4月3日受領，2009年4月30日受理。

(要旨) 観測技術の発展に伴い，低質量の系外惑星が発見され始めており，特にM型星での系外惑星探査が注目を集めてきている。M型星は低光度であるので，ハビタブルゾーンが中心星近傍に存在するが，そのような領域では円盤ガス面密度が大きく，半径方向の惑星移動が惑星形成に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで，本研究ではM型星周りでの地球型惑星形成を，円盤ガスを考慮に入れたN体シミュレーションで調べた。計算の結果，中心星近傍の地球型惑星の軌道構造は惑星移動速度に大きく依存することがわかった。また，これまで発見されている中心星近傍のスーパーアース(地球質量の数倍程度の惑星)は，惑星移動速度が遅い状況で形成したと解釈できる。更に，惑星移動によって多くの氷成分が内側領域に輸送され，惑星は概して水を多く含むことが示唆された。

1. はじめに

M型星とは，恒星のスペクトル分類において最も暗い星とされる恒星である。銀河系円盤において7-8割を占めるほどの数があるのだが，暗い星であるが故に高分散分光観測には適さず，これまでの系外惑星探査のターゲットはもっぱら太陽型星(F, G, K型矮星)であった。しかし，観測技術の発展により，近年はM型星の周りにおいても系外惑星が発見されてきており，もっといえば系外惑星探査において重要なターゲットの一つになりつつあると言える。M型星は観測が難しい，その一方で，太陽型星では発見できないような惑星を発見できるのである。例えば，ハビタブルゾーン(そこにある惑星は液体の水を表面に持ち得るという軌道領域)が中心星に近い(およそ0.1AU)ことによりハビタブルプラネットの観測可能性は太陽型星よりも大きい。実際に，2007年4月にハビタブルゾーン内に存在する可能性のある惑星が初めて発見された[1]が，それらはM型星をまわるものであった。また，惑星が恒星前を通過する際の減光を観測するトランジット法でもM型星は有利な点がある。恒星断面積が小さいことによって，太陽型星と比較してより小さい惑星を検

出することができるのである。実際に，2009年2月現在までにトランジット法によって検出された最小質量の惑星はM型星周りに存在する惑星である[2]。

今後の観測においてもM型星の中心星近傍，つまりハビタブルゾーン付近に存在する地球型惑星が多く発見されると考えられる。そこで本研究では，今後の観測結果を期待し，M型星の中心星近傍での地球型惑星の形成をN体シミュレーションにより調べた。本稿では，次節で中心星近傍での惑星形成理論とその問題点を述べ，セクション3で計算モデルを，セクション4でその結果を説明する。セクション5とセクション6は計算結果を基に議論を深め，セクション7でまとめるという形で進めていく。

2. 中心星近傍での惑星形成 ～惑星移動と平均運動共鳴～

中心星近傍では円盤ガスの面密度が大きく，また原始惑星の集積時間が円盤ガスの寿命(数百万年程度)よりも十分に短いと考えられるので，そのような領域での惑星形成において円盤ガスの効果は重要な役割を果たす。円盤ガスは，惑星の軌道離心率や軌道傾斜角を下げるといった効果を持つが，惑星系の構造に最も大きな影響を及ぼすのは惑星を中心星方向に移動させる

1. 東京工業大学大学院理工学研究科
ogihara@geo.titech.ac.jp

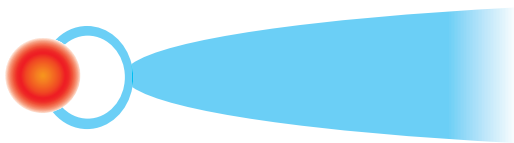


図1：円盤内縁付近のイメージ図。中心星の熱で電離した円盤ガスは、中心星の磁力線に引きずられて降着することで、円盤には内縁が存在する。

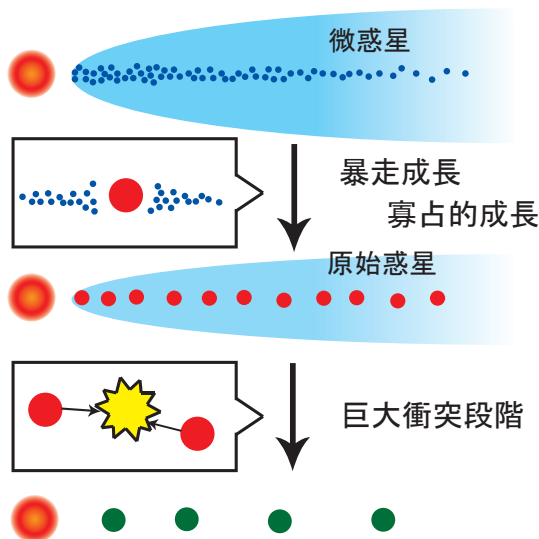


図2：コア集積モデルに基づいた微惑星からの地球型惑星形成の概念図。微惑星の集団の中で大きめの微惑星が選択的に周囲の微惑星を食べ(暴走成長)、ある軌道間隔において原始惑星が並んで形成する(寡占的成長)。円盤ガスが散逸すると、原始惑星同士が摂動を及ぼしあい軌道交差を起こし、衝突する(巨大衝突)。十分に軌道間隔が開くと、惑星系は長い時間安定になる。

効果である。地球型惑星形成では、原始惑星が円盤ガスに自身の重力で密度波を立て、その密度波を介して円盤ガスに角運動量を渡し、その結果中心星に向かって移動していくという「タイプI惑星移動」[3,4]が重要である。

一方、惑星移動を引き起こす原因となる原始惑星系円盤は恒星表面と連結しているのではなく、ある領域以内では恒星の磁力線づたいに電離した円盤ガスが恒星に降着しており、円盤には内縁が存在すると考えられている(図1参照)。このためタイプI惑星移動により移動してきた原始惑星は、円盤内縁で止まり、そこで形成することが指摘されている。Terquem&Papaloizou[5]は太陽型星の周りで、原始惑星10体程度の N 体計算を行い、原始惑星がタイプI惑

星移動で円盤内縁まで移動し、内縁付近で惑星同士が相互作用を起こし、最終的に数個の惑星が内縁付近に平均運動共鳴に入った状態で形成することを示した。

平均運動共鳴とは、2天体の軌道周期の比が整数になる場合であり、その整数比は2天体の軌道位置で決まる。共鳴関係になる軌道位置に2天体が存在した場合、多くは軌道が安定化される。(共鳴だと常に同じように力を受けるため不安定になると考えがちだが、この場合2天体の会合は最も離れた軌道位置で生じるようになるので安定化される。共鳴の状態にもよるが、内側の天体の近点と外側の天体の遠点で常に会合する場合は非常に安定になる傾向にある。)2天体間の中心星方向への移動速度に違いがある場合、いつかは共鳴の軌道位置を惑星が通過することになるが、その際に共鳴の効果によって軌道が安定化され惑星移動が止まることがある。これを「平均運動共鳴への捕獲」という。簡単には、移動の相対速度が小さいと共鳴に入りやすい傾向にある。

ところが、これまで中心星近傍において地球型惑星からなる多重惑星系が2つ(2009年2月現在)発表されているが、どちらも平均運動共鳴には入っておらず[1,6], Terquem&Papaloizou[5]ではこれを説明できていない。この問題に対して、我々は形成過程の惑星移動速度を遅くすることで、観測結果を説明できるのではないかと考えた。(移動速度を遅くすることで惑星は共鳴に捕獲されやすくなるので逆センスに思えるが、我々のアイデアは共鳴に入った惑星を多く作り、最終的に共鳴から外すというものである。詳しくは、セクション4で説明する。)実は惑星移動速度を遅くするメカニズムがいくつか提唱されており[例えば7], 実際の惑星移動速度がどの程度であるかはよくわかっていない。Terquem&Papaloizou[5]は線形計算の結果で得られた速度で惑星は素早く中心星に落下すると考えて計算を行ったが、本研究では惑星移動速度がより遅い場合も考えて惑星集積を調べた。

3. 計算モデル

本計算において、中心星は質量 $M_* = 0.2M_\odot$ 、光度 $L_* = 0.01L_\odot$ と仮定した(M_\odot , L_\odot はそれぞれ太陽質量、太陽光度)。それに付随する円盤のガス成分・固体成分の面密度分布は、太陽系最小質量円盤モデル[8]に

従って与える。一般的に、円盤面密度は中心星質量の1.2乗に比例して減少すると考えられるが、観測から算出された円盤面密度は2桁程度の分散があり[参照9]、質量 $M_* = 0.2M_\odot$ の恒星が太陽系最小質量モデル程度の円盤を持つとしても悪い仮定ではない。また、中心星から離れた場所では円盤中で水が固体として存在できるようになり、そのぶん面密度が上昇する。円盤上で水が凝結する境目を「氷境界」とよび、本計算では、それを0.3AUと置いた。この面密度分布に沿って、0.05AUから0.4AUまで初期に微惑星を5000体配置する。

前節において、円盤には内縁が存在することを述べたが、その位置を中心星の自転周期と円盤ガスの公転周期が一致する場所(共回転半径)と考える。中心星の自転周期を観測結果から平均的な3日とすると内縁はおよそ0.05AUであり、円盤ガスによる惑星移動はここで止まる。

コア集積モデルでは微惑星は暴走成長、寡占的成長を通じて原始惑星を形成し[10]、その後の円盤散逸とともに巨大衝突段階を経験して地球型惑星が形成する[11]としている(図2参照)が、微惑星から地球型惑星形成を通したN体計算は殆ど行われていない。本研究では中心星近傍での惑星形成に注目したが、その様な領域では惑星の重力圏が小さくなり微惑星同士が重力散乱を起こす確率が小さくなり計算が軽くなる。このことに着目することで、微惑星から最終的な地球型惑星形成までの惑星集積を追うことが可能となった。

粒子 k の運動方程式は、

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_k}{dt^2} = -GM_* \frac{\mathbf{r}_k}{|\mathbf{r}_k|^3} - \sum_{j \neq k} GM_j \frac{\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j|^3} + \mathbf{F}_{\text{damp}} + \mathbf{F}_{\text{typeI}} + \mathbf{F}_{\text{other}} \quad (1)$$

とする($k, j = 1, 2, \dots$)。右辺第1項は中心星からの重力、第2項は惑星間の相互重力、第3項以降は円盤ガスの効果などをモデル化した力である。軌道積分するにあたって、惑星間の相互重力は東京工業大学及び国立天文台所有のGRAPE-6を使用し高速化を図った。 \mathbf{F}_{damp} は惑星の軌道離心率、軌道傾斜角を減少させる効果、 $\mathbf{F}_{\text{typeI}}$ はタイプI惑星移動の効果、 $\mathbf{F}_{\text{other}}$ はその他の円盤ガスの効果や相対論的效果による重力の補正項を含んでいる。その中で、惑星移動速度($\mathbf{F}_{\text{typeI}}$)はパラメータ

として振って計算を行った。本稿ではそのうちの二つの極限の計算を示す。それぞれ、線形論で見積もられたタイプI惑星移動速度で素早く移動する場合と、タイプI惑星移動を考慮しない場合、つまり運動方程式にタイプI惑星移動の項を含めない場合である。注意して欲しいのが、タイプI惑星移動を考慮しない場合においても、原始惑星は中心星に向かってゆっくり移動するという点である。円盤ガスの重力的な抵抗によって惑星の軌道離心率が減少するが、これによって惑星はエネルギーを失う。ケプラー運動する天体の力学的エネルギー E は、 $E \propto -1/a$ (a は軌道長半径)で表され、つまりエネルギーを失うことで軌道長半径が減少する。この移動は、原始太陽系円盤の1AU付近では無視できるほど小さいのだが、円盤ガスの面密度が大きい中心星近傍では無視できない。具体的には、0.1AU付近においては線形論で導かれたタイプI惑星移動速度の100分の1程度の移動速度で落下する。

惑星同士が衝突した際は完全合体を仮定し、惑星の運動量を保存させて合体させた。惑星集積、特にその最終段階はカオス的な振る舞いをするので、初期の微惑星の配置をランダムに変えた計算をそれぞれ4ラン以上行い、最終結果を議論する。

4. 結果

計算結果を説明する。図3はこの節で説明する計算結果を表したスナップショットである。左図に惑星移動が速い場合、右図に惑星移動が遅い場合の計算結果をそれぞれ示す。

4.1. 円盤中での惑星集積段階

4.1.1. タイプI惑星移動あり

まず、タイプI惑星移動を考慮した計算結果を説明する。図4は4ラン行ったうちの、典型的な結果である。各時間において、質量の大きな惑星30個の軌道進化を表している。計算結果の基本的な描像は太陽系形成論における暴走成長/寡占的成長で理解できる。惑星の集積速度は、中心星からの軌道距離が小さいほど早くなるので、微惑星の暴走成長、原始惑星の寡占的成長は、内側から外側に向かって進行する。一方、タイプI惑星移動速度は質量が大きいほど速くなり、ある程度成長した原始惑星は次々と中心星に向かって落下してい

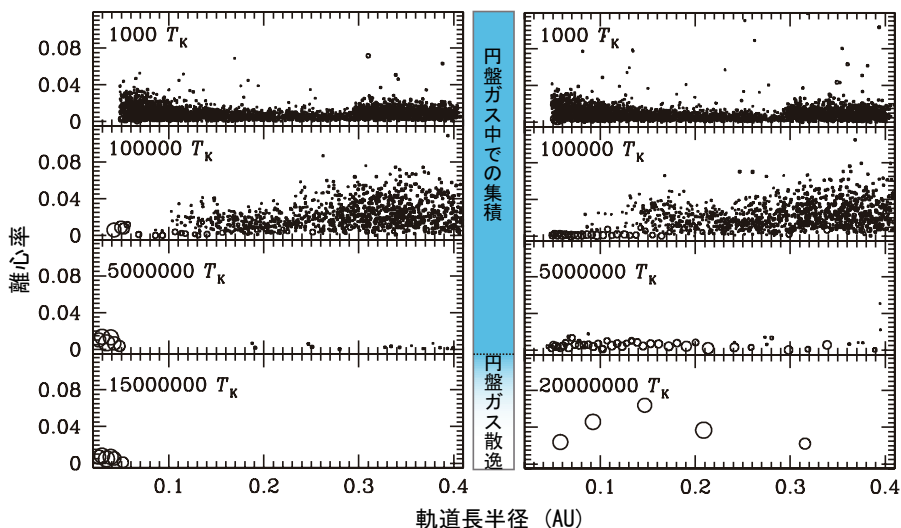


図3：横軸に軌道長半径、縦軸に軌道離心率を取った各時間でのスナップショット。それぞれの円が惑星を表し、大きさは物体の物理半径に比例させている。 T_K は $0.2M_\odot$ の周りを、0.1AUでのケプラー時間。5000000 T_K 以降は円盤ガスを散逸させる。左図はタイプI惑星移動ありの場合。円盤内縁付近に惑星が形成していることがわかる。右図はタイプI惑星移動なしの場合。最終結果は左図と大きく違う。

く、先に成長した原始惑星が移動した後は、次の原始惑星が外側領域で成長し、ある程度成長すると中心星に落下していくという様子で系は進化していく。

このとき、円盤内縁付近に形成する惑星に注目してみる。まず、初期に移動してきた原始惑星は内縁において移動を停止する。その次に移動してくる原始惑星は内縁付近まで落下し、既に存在している原始惑星との軌道間隔が狭まってくると、互いの原始惑星が軌道反発することで移動してきた原始惑星の移動速度を減速する。(軌道反発とは、公転角速度の異なる2天体が角運動量を交換して生じる現象で、内側の天体は角運動量を失い更に内側へ、外側の天体は角運動量を得て更に外側へ移動しようとする。結果として、2天体が重力的に相互作用した結果、互いの軌道は離れることとなる。)

しかし、タイプI惑星移動速度は速いので多くの場合は惑星移動を完全に止めることはできず、原始惑星同士が近づき衝突・合体を引き起こす。この段階での衝突は、原始惑星同士の「巨大な」衝突も生じており、太陽系形成論と同じように寡占的成長段階と巨大衝突段階を明確に区別することができないといえる。結果として移動の最中や近接散乱後に、うまく平均運動共鳴に捕えられたものが合体せずに生き残るので

ある。原始惑星が外側から流入してくる間はこのプロセスを繰り返し、最終的には円盤の内縁付近に4-6個の惑星が、平均運動共鳴に入った状態で形成した。これは、Terquem&Papaloizou[5]の結果と一致している。また、本研究では初期の微惑星を0.05-0.4AUの間に分布させているが、これより外側から微惑星/原始惑星が流入してきて内縁付近の惑星の構造に影響を及ぼすことも考えられる。しかし、4-6個並んだ惑星系に更に外側から原始惑星を移動させても衝突するなどで質量は大きくなるが常に4-6個の惑星が残ることになり、外側からの微惑星/原始惑星の流入はあまり影響しない。最終的に形成する惑星の質量は、初期の固体質量に依存するのだが、4ラン平均しての最大質量は $0.82 \pm 0.17M_\oplus$ (M_\oplus は地球質量)であり、また離心率は円盤ガスによって小さく(~ 0.01)抑えられている。

4.1.2. タイプI惑星移動なし

次に、タイプI惑星移動を考慮しない場合、つまり惑星移動速度がタイプI惑星移動の0.01倍程度の場合の計算結果を説明する。この場合の軌道進化を表したのが図5である。タイプI惑星移動ありの場合、外側領域では原始惑星は孤立質量(惑星移動を考えないとき、周辺の微惑星を全部食べきったときに原始惑星

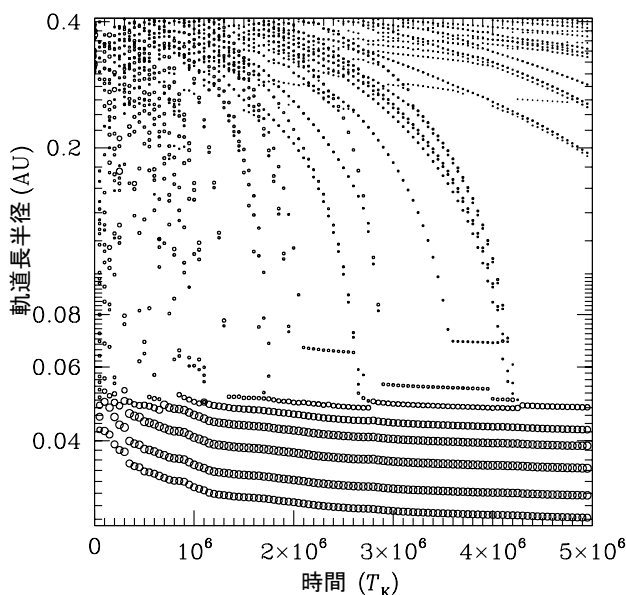


図4：タイプ I 惑星移動ありの場合での，惑星の軌道長半径の時間進化を表す．各時間において，質量の大きな惑星を30個プロットしている．

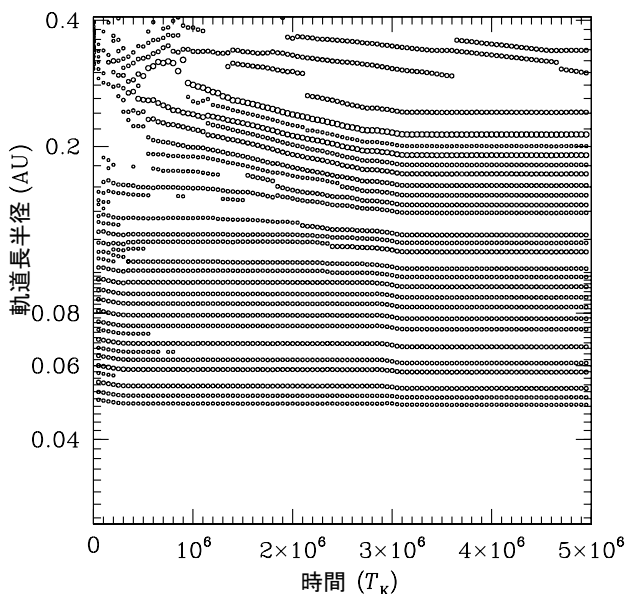


図5：図4と同様の図。但し、タイプ I 惑星移動の効果は含まれていない。

が獲得する質量)に達する前に中心星に落下していたが，惑星移動が遅い場合は原始惑星はほぼ孤立質量に達する．中心星との距離が近いほど成長速度と移動速度が速いことは変わらないので，内側の原始惑星が先に内縁に達し，その次に落下してくる原始惑星と相互

作用を起こす様子は先の計算と同様である．異なるのは，惑星移動速度が遅い為，内側の原始惑星との軌道反発で移動が止められやすい点である．外側から移動してきた原始惑星は，既に内側に形成している原始惑星の共鳴関係に影響を与え，それを壊すこともあるが，

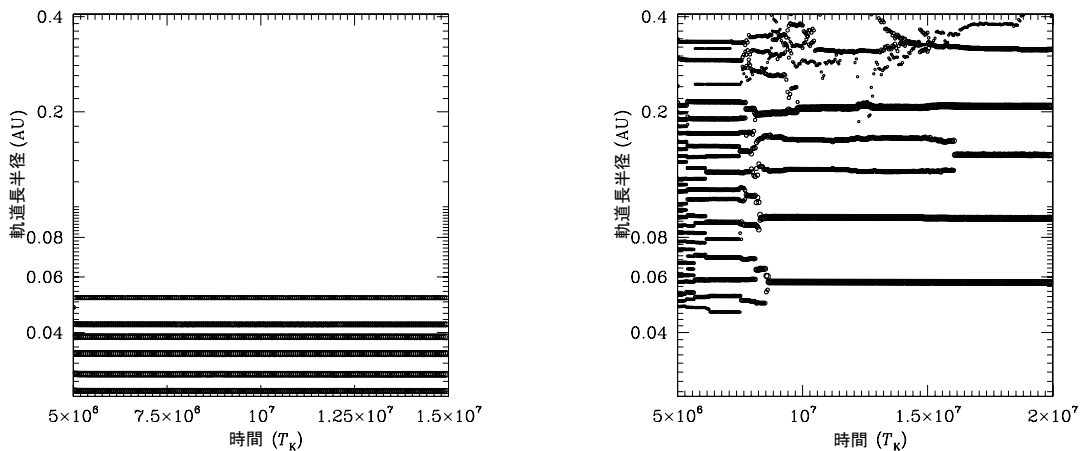


図6：円盤ガス散逸後の軌道進化。左図は図4の、右図は図5の続きの計算。右図では、円盤ガス散逸後に軌道交差を起こし、共鳴関係を全て失っている。

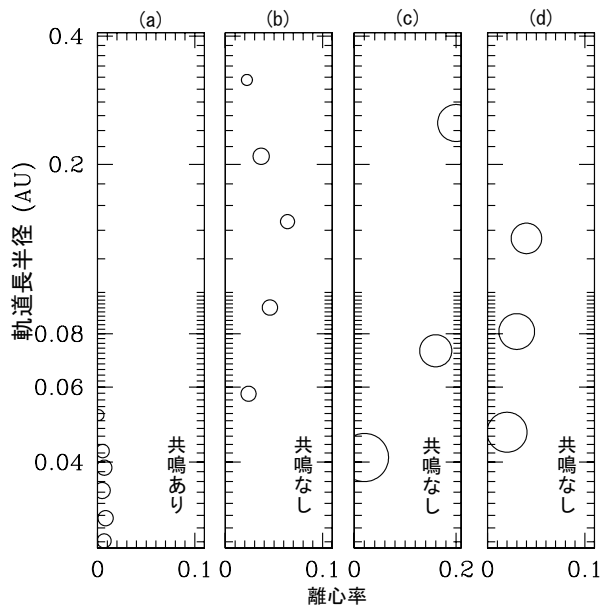


図7：計算結果(a),(b)と観測結果(c),(d)の比較。(a)は惑星移動が速い場合の計算結果、惑星は内縁付近にかたまっており、共鳴関係を持ち、軌道間隔が狭い。(b)は惑星移動が遅い場合の計算結果、惑星は内縁付近にかたまっておらず、共鳴関係を失っており、軌道間隔も広い。(c),(d)はそれぞれGI 581, HD 40307の系。観測結果は、(b)の結果と類似している。見やすくするために、(c)の横軸スケールを2倍にしている。

合体することは稀であり多くは新たに平均運動共鳴に捕獲されることになる。このとき更に内側に存在する惑星間の軌道間隔を狭めるので、時間の経過とともに原始惑星同士の軌道間隔は狭くなり、結果としてより近い平均運動共鳴関係を持つことになる。(例えばタイプI惑星移動ありの場合5:4などだが、タイプI惑星移動がない場合は14:13など。)最終的に軌道間隔の狭い40個程度の多くの惑星が内側から並んで形成し、そ

の為に内縁付近にかたまっ形成するのではなく、形成領域が広がっていることがわかる。最大質量は $0.20 \pm 0.033M_{\oplus}$ と孤立質量程度であり、離心率は先の計算と同様に小さい。

4.2. 円盤散逸後の惑星軌道進化

寡占的成長の結果形成した原始惑星は円盤ガスの重力的な抵抗によって離心率が抑えられているが、円盤

ガスの散逸とともに軌道不安定を引き起こし，原始惑星同士が巨大衝突するというのが太陽系地球型惑星形成の最終段階であると考えられている．本研究では，これまで円盤ガス中での惑星集積を追ってきたが，その結果形成した惑星の軌道間隔は非常に狭く，円盤ガスの散逸とともに軌道不安定を起こすと考えられる．

ここでは，これまでの計算の続きとして，円盤ガスを散逸させてその後の軌道進化の様子をみてる．計算時間短縮の為に，ガス中での最終結果($5 \times 10^6 T_K$)から $0.01 M_{\oplus}$ 以上の惑星を取り出し，円盤ガスを 10^4 年 ($\sim 1.4 \times 10^5 T_K$)のタイムスケールで散逸させた．図6の左図がセクション4.1.1(図4)の続きの計算，右図がセクション4.1.2(図5)の続きの計算におけるそれぞれの惑星の軌道進化を表す．

セクション4.1.1のタイプI惑星移動ありの計算の結果，円盤ガス中では6個の惑星が5-9ヒル半径の間隔で形成していた．(ヒル半径とは，惑星の重力圏の大きさを表し，中心星重力より惑星自身の重力が優勢になる領域である．)これは，円盤ガスが無い場合だと $10^5 T_K$ 程度で不安定になると考えられる[12]のだが，円盤ガスを散逸させても安定であった．これは，惑星が平均運動共鳴に入っていることによって，系が安定化されている為と考えられる．他の3ランでも同様の振る舞いをし，最終的に平均で軌道間隔は 9.5 ± 0.97 ヒル半径，離心率は 0.0086 ± 0.0061 ，最大質量は $0.82 \pm 0.17 M_{\oplus}$ となり，共鳴に捕獲されている系が形成した．

一方，セクション4.1.2のタイプI惑星移動なしの場合は，円盤ガスの散逸の結果全く異なる様子がみられた．図5の最終結果では，45個の惑星が5-6ヒル半径程度の間隔で共鳴状態で形成していたが，円盤ガスの散逸とともに，離心率が上昇し軌道交差を始めて巨大衝突を引き起こした．但し，ここでの軌道交差は1AU付近でのそれとは様相が異なる．中心星に近い領域では，(惑星の物理半径/ヒル半径)が1AUと比較して大きくなり，近接散乱を起こす確率が減少する．その結果，惑星の離心率が上昇しにくくなり，離心率が十分に大きくなる前に隣り同士の惑星と衝突するという局所的な軌道交差を起こすのみで巨大衝突段階は終焉に向かう．最終的に，平均して10-20個の惑星が，軌道間隔 19 ± 2.2 ヒル半径で形成し，離心率は 0.055 ± 0.020 ，最大質量は $0.50 \pm 0.097 M_{\oplus}$ と得られた．円盤散逸後に巨大衝突を経験した為，共鳴関係は全て壊れているこ

とに注意して欲しい．

5. 観測結果との比較

これまでみてきたように，中心星近傍で形成する惑星の軌道情報(共鳴関係，軌道間隔，配置，離心率)は，惑星移動速度でほぼ決まっているといえる．別の言い方をすれば，これらの軌道情報は円盤ガス散逸後に巨大衝突を経験するか否かで大きく変わり，巨大衝突を起こす為には惑星移動がある程度遅い必要がある．惑星移動が速い場合には，最終的な惑星は軌道間隔が狭く，円盤内縁付近にかたまっており，離心率は小さく，共鳴に入った状態で形成する．一方，惑星移動が遅い場合には，最終的には軌道間隔がより広く，円盤内縁付近にかたまってはならず，ある程度の離心率を持ち，共鳴に入っていない状態で形成することがわかった．

これまでのN体計算では最新の観測結果を説明できていないことをセクション2で述べたが，「惑星移動が遅い場合」のシナリオだと説明できる(図7参照)．M型星($M_* \approx 0.3 M_{\odot}$)であるGl 581において，b ($M_F \sin i = 16 M_{\oplus}$ ， $a = 0.041 \text{ AU}$)，c ($5 M_{\oplus}$ ， 0.073 AU)，d ($7.5 M_{\oplus}$ ， 0.25 AU)の3惑星が発見されているが，これらは軌道間隔が広く ($\sim 21 - 47$ ヒル半径)， 0.25 AU まで広がって分布しており，共鳴に入っていないので「惑星移動が遅い場合」で形成したと考えられる．惑星質量が本計算結果より大きいので，太陽系最小質量モデルよりも重い円盤で形成したか，氷境界以遠で面密度が大きく上昇していたのであろう．

これまでの議論のうち，円盤の温度分布(例:氷境界の位置)，中心星質量などはM型星の条件で考えてきたが，惑星の移動速度によって最終的な惑星の軌道情報が変わるという力学的な描像は太陽型星においても適用できると考えられる．K型星($M_* \approx 0.77 M_{\odot}$)HD 40307の惑星系は，b ($M_F \sin i = 4.2 M_{\oplus}$ ， $a = 0.047 \text{ AU}$)，c ($6.9 M_{\oplus}$ ， 0.081 AU)，d ($9.2 M_{\oplus}$ ， 0.13 AU)から成っている[6]が，これらもまた軌道間隔が広く ($\sim 17 - 20$ ヒル半径)，共鳴に入っていない惑星であり，「惑星移動が遅い場合」と考えると説明できる．

なお，微惑星形成時から円盤ガスが存在せず，惑星はその場形成したと考えた場合も，軌道間隔が広く，共鳴に入っていない惑星が形成すると考えられるが[13]，惑星集積時間が短い中心星近傍では円盤ガスが

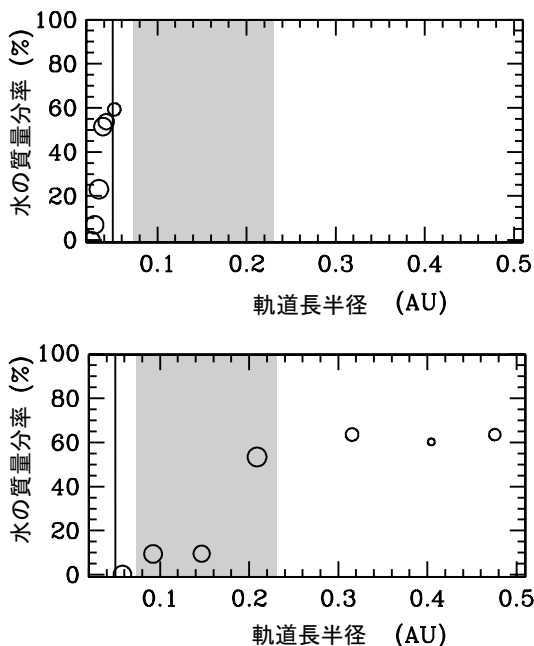


図8：水の質量分率と惑星の軌道位置の関係を示す。図中の実線は円盤内縁(0.05AU)を、影を落とした領域は $0.01L_{\odot}$ の恒星周りでのハビタブルゾーンを表す。上図が図6の左図の結果に、下図が図6の右図の結果にそれぞれ対応している。

存在していないことを考えることは考えにくいだけではなく、その場合初期の円盤面密度が非常に大きい必要がある。例えば、Gl 581の場合だと円盤は太陽系最小質量モデルのおよそ30倍程度である必要がある。

6. 組成

本研究の狙いの一つがM型星のハビタブルゾーン周辺(中心星近傍)での地球型惑星の形成を調べることであるが、それらの惑星がどのような組成をしているのかにも興味がある。更には、海(液体の水)を持つ惑星がどの程度存在するのを知りたいのだが、これを議論する為には水の供給と保持の2つの条件を考える必要があり簡単ではない。ここでは惑星への水の供給のみを考え、惑星の組成について議論していく。地球の海の起源は諸説ある[14]が、本研究においては氷境界以遠から氷微惑星・氷原始惑星が何らかの理由で内側の地球型惑星形成領域まで移動して、それが地球に衝突したという仮説[15]で考える。これまでのM型星の周りでの惑星移動を無視した計算によると、太陽型星と比較してM型星の地球型惑星には水は供給されに

くいとされていた[13]が、本研究において惑星移動を考慮に入れた場合、その結果は大きく変わることがわかった。

氷成分を扱うモデルとして、セクション3で説明した通り、太陽系最小質量円盤を考える。氷境界(0.3AU)以遠で水が凝結することで、面密度が3倍になるとおいた。つまり、計算の初期に0.3AU以内では微惑星は全て岩石であり、0.3AU以遠では33%が岩石で67%が水であると与えた。本研究において中心星は主系列段階にあると仮定したが、M型星は前主系列段階が太陽型星と比較して長く、組成を詳細に議論する際には中心星の光度進化、つまり氷境界やハビタブルゾーンの位置の進化も考える必要がある。しかし、本研究の主眼は惑星集積のダイナミクスを追うことにあり、星の光度の進化を考慮した計算は今後の課題とする。

N体計算で、それらの物質の移動を追った最終結果が図8である。影を落とした領域は解析的に求められたハビタブルゾーン[16]、垂直の実線は計算で仮定した円盤内縁の位置(0.05AU)を表している。結果をみると、タイプI惑星移動がある場合、ない場合ともに多くの量の氷成分が内側領域に輸送され、最終的に形成した惑星は「びしょびしょ」であった。M型星周りでトランジット観測されているGJ 436bの組成は大部分が氷である可能性も指摘されており[2]、本研究結果の傾向と良い一致がみられる。図8において注意して欲しいのは、円盤内縁の位置とハビタブルゾーンの位置はおよその目安であり、円盤内縁とハビタブルゾーンがより接近している可能性もある。よって、ここでは必ずしも惑星移動が遅い方がハビタブルプラネットの形成確率が高いと言っているわけではない。また、中心星に近いほど岩石主体の惑星であり、外側にいくほど水主体の惑星であることがわかる。これは、内側の惑星は外側の惑星に防御されることによって、氷原始惑星が集積しにくくなっている為である。更に、組成は惑星移動速度にも依存する。本稿で示した結果では、いずれも惑星は水を多く含むという結果になったが、惑星移動速度がこれより遅い場合、具体的には線形論で見積もられた移動速度の0.01倍よりも遅い場合には、形成する惑星は岩石主体の組成になると考えられる。詳しくは、Ogihara&Ida[17]を参照されたい。

7. まとめと今後の展望

本研究では、M型星での地球型惑星形成を円盤ガスを考慮に入れたN体シミュレーションによって調べた。一般的に、地球型惑星形成は暴走成長/寡占的成長段階とそれに続く比較的長いタイムスケールで生じる巨大衝突段階の2段階で記述されるが、本研究では2段階を通して計算した。

本研究における重要な結論は、惑星移動速度の違いが最終的に形成する惑星系の多様性を生み出すことである。惑星移動は、太陽系での1AU付近の地球型惑星形成や木星型惑星のコア形成に関して重大な問題となっているが、それだけでなく更に中心星近傍領域での惑星形成にも影響を及ぼすのである。繰り返しになるが、惑星移動が遅い程、円盤内縁から共鳴に捕獲された状態で並ぶ惑星の数が増え、円盤散逸後に巨大衝突を起こす傾向にあることがわかった。本稿では、惑星移動速度が極限の場合の2つの計算結果を示したが、他の移動速度での計算結果から、巨大衝突段階を引き起こすか否かの境界は、線形論で得られたタイプI惑星移動速度の0.1倍程度であることが示唆されている。

惑星移動速度が遅くなると形成する惑星数が増加し、系としてより不安定になることで円盤散逸後に軌道不安定を起こすのであろうと解釈できるが、共鳴に入った惑星系の安定性はよくわかっておらず、今後詳細に調べていきたい。

また、太陽型星周りでの先行研究[5]や、本研究からの類推によると、比較的大きな地球型惑星が中心星近傍に存在する確率が高いが、太陽系においては0.4AU以内に惑星は存在せず、矛盾する。この問題に関しては、また別の機会に取り上げることとする。

本研究で調べた中心星近傍の地球型惑星は、地上からの視線速度観測に加え、KeplerやTESSなどの宇宙トランジット観測によって次々と明らかになっていき、それらの形成時の情報(惑星移動速度など)も大まかに読み取れるであろう。これまでに発見されている系は、「惑星移動速度が遅い場合」であると解釈でき、今後似た様な惑星系の発表が相次ぐのではないかと予想する。その一方で、惑星科学者を志す一人として、理論では説明困難な惑星が発見されることをも期待しているのである。とにかく、今後の観測結果が待ち遠しくて仕方がない。

謝辞

本稿に対して丁寧な査読をして頂きました小久保英一郎氏に感謝致します。また、本研究をまとめるにあたって様々な助言を頂きました東京工業大学井田研究室・中本研究室の構成員の方々に感謝致します。

参考文献

- [1] Udry, S. et al., 2007, A&A 469, L43.
- [2] Gilon, M. et al., 2007, A&A 472, L13.
- [3] Goldreich, P. & Tremaine, S., 1980, ApJ 241, 425.
- [4] Ward, W., 1986, Icarus 67, 164.
- [5] Terquem, C. & Papaloizou, J. C. B., 2007, ApJ 654, 1110.
- [6] Mayor, M. et al., 2009, A&A 493, 639.
- [7] Masset, F. S. et al., 2006, ApJ 652, 730.
- [8] Hayashi, C., 1981, Prog. Theor. Phys. Suppl. 70, 35.
- [9] Ida, S. & Lin, D. N. C., 2004, ApJ 604, 388.
- [10] Kokubo, E. & Ida, S., 1998, Icarus 131, 171.
- [11] Kominami, J. & Ida, S., 2002, Icarus 157, 43.
- [12] Chambers, J. E. et al., 1996, Icarus 119, 261.
- [13] Raymond, S. et al., 2007, ApJ 669, 606.
- [14] 玄田英典・生駒大洋, 2008, 遊星人17, 238.
- [15] Morbidelli, A. et al., 2000, Meteorit. Planet. Sci. 35, 1309.
- [16] Kasting, J. et al., 1993, Icarus 101, 108.
- [17] Ogihara, M. & Ida, S., 2009, ApJ, in press.