系外惑星「遠い世界の物語」その7 ～原始惑星系円盤観測から探る系外惑星～

金川 和弘[1]

（**要旨**）近年のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA望遠鏡）やハワイ・マウナケアの大型光学赤外望遠鏡（すばる望遠鏡）など大型望遠鏡を用いた原始惑星系円盤観測の進歩により惑星形成領域にギャップ構造をもつ円盤が多数発見されている．このような円盤ギャップ構造の形成を説明する有力なメカニズムとして，惑星と円盤との重力相互作用が挙げられる．本稿では，観測されたギャップが惑星によって形成されたとすると，その構造からギャップを形成した惑星にどのような制限をつけることができるのかについて紹介する．また，ALMAの長基線観測キャンペーンで得られたデータを元にHL Tau円盤のギャップの構造から惑星質量を見積もった結果も併せて紹介したい．

1. はじめに

原始惑星系円盤は，星の誕生と同時に星の周囲に形成され，水素ヘリウムからなるガス成分と，塵（ダスト）成分から構成される．我々の地球に代表される岩石惑星や木星のような巨大ガス惑星は，その名が表すとおり，原始惑星系円盤の中で生まれる．円盤に含まれるダスト成分の集積によって，岩石惑星や巨大ガス惑星のコアが形成される．そのうち，巨大惑星のコアは周囲の円盤ガスを捕獲し，大量のガスをまとった巨大惑星へと成長すると考えられている．また，ガス円盤との重力相互作用はある程度大きな岩石惑星や巨大ガス惑星を円盤の内側（または外側）に移動させてしまう．このように，ガス惑星の存在は惑星の質量および軌道半径の進化に強く影響する．その後，円盤ガスが散逸すると，現在の太陽系のようなガス成分を周囲に持たない中心星と惑星から成る系ができあがる．視線速度法やトランジット法などで観測されるのは主にこの段階の惑星である．このような系外惑星観測からは，太陽系惑星では見られない中心星に非常に近い位置を公転する巨大ガス惑星（ホットジュピター）や地球サイズの惑星，それとは逆に中心星から非常に遠方に存在する惑星が多数観測されている．系外惑星発見以後の惑星形成論の大きな課題として，このような太陽系惑星とはかけ離れた惑星を持つ惑星系の形成を説明できるように太陽系の形成モデルを拡張していく必要がある．どのようにして多彩な惑星系が形成されたのか？その一つの原因として考えられているのが，原始惑星系円盤と惑星の相互作用である．

観測的な制約から，これまでは主に理論面から原始惑星系円盤中の惑星形成および進化の研究は進められてきた．しかし，近年ではALMAやすばる望遠鏡などによって原始惑星系円盤の惑星形成領域の直接観測が可能になり，円盤中の惑星形成および進化に対して理論研究だけでなく，観測的にアプローチすることもできるようになってきた．実際に，ALMAやすばる望遠鏡によって惑星が作ったと考えられるスパイラルやギャップ構造を持った原始惑星系円盤が多数発見されている．このような観測からは円盤ギャップの深さ，幅およびガス温度を読み取ることができる．原始惑星系円盤のギャップ構造が惑星と円盤の相互作用で形成されたとすると，円盤観測から得られた観測量からそのギャップを作った惑星の情報を得ること可能だろうか？本稿では，まず惑星が原始惑星系円盤にギャップを作るメカニズムについて簡単に触れた後，実際に観

1. 北海道大学低温科学研究所
2016年1月よりポーランド シュチェチン大学に異動.
kanagawa@lowtem.hokudai.ac.jp

測されたギャップ構造からどのようにして惑星質量が見積もられるのかについて，筆者の最近の論文[1-3]を元に紹介していきたい．

2. 巨大惑星による円盤ギャップ構造の形成

この節では，原始惑星系円盤中に誕生した巨大ガス惑星によるギャップ形成のメカニズム(円盤-惑星相互作用)について簡単に説明していきたい．さて，まずは円盤にギャップを開けないような比較的小さな惑星(月質量から数地球質量程度)を考えよう．惑星が形成されるような段階にある円盤は，中心星重力と遠心力がほとんど釣り合った状態，すなわちケプラー回転していると考えられる．このような差動回転(ケプラー回転)する円盤の中に，惑星が存在すると図1のように，惑星重力によって生じた密度揺らぎ，いわゆる密度波が励起される．密度波は惑星との相対速度が超音速であるような領域で励起されるため，波は惑星が存在するという情報をもって惑星から離れる方向に伝播していく．円盤内側ほど速い回転速度を持つため，図1のように，惑星より外側($x > 0$)では惑星の後方に，惑星より内側($x < 0$)では惑星の前方に密度波が存在する．このため，惑星の後方にある密度波($x > 0$)は惑星を後方に引っ張ることで惑星の回転速度を遅くする．逆に，惑星の前方にある密度波($x < 0$)は惑星を前方に引っ張るため，惑星の回転速度を速くするように働く．このような重力相互作用は惑星にトルクを及ぼし，惑星の惑星の軌道長半径を変化させる．また，惑星が受けたトルクの反作用として密度波も惑星から角運動量を受け取る．すなわち，惑星の後方にある波は正の角運動量を，惑星の前方にある波は負の角運動量をそれぞれ惑星から受け取ることになる．惑星から受け取った角運動量は波と共に惑星から離れる方向に運ばれ，やがて密度波が減衰すると周囲の円盤ガスに受け渡されることになる．このプロセスは，後述する円盤ギャップの形成において非常に重要である．

木星のような巨大惑星は，周囲の円盤ガスとのやり取りによって惑星軌道に沿ったギャップ構造を形成する．円盤と惑星の重力相互作用は惑星質量が大きくなるほど強くなり，惑星から円盤ガスに受け渡される角運動量は多くなる．前述のように惑星軌道の内側のガスは負の角運動量を惑星から受け取るため，円盤の内側方向に移動する．同様に，惑星軌道の外側のガスは正の角運動量を惑星から受け取るため，円盤外側に移動する．このような角運動量の交換に伴う円盤ガスの移動によって惑星の近傍領域からガスが取り除かれ，惑星軌道に沿った低ガス密度領域(円盤ギャップ)が形成される(図2)．一方で，このようなギャップ構造は円盤内の乱流に起因する実効的な粘性によるガスの拡散によって徐々に埋められる．最終的なギャップの深さは，惑星が円盤に及ぼす重力トルクの大きさとガスの粘性拡散の強さの釣り合いで決まる．惑星トルクの大きさは惑星質量に関係しているので，ギャップの深さは惑星質量を反映している．すなわち，質量が大きな惑星ほど深いギャップを開けることができる．後述のように，この関係を利用してギャップの深さからそれを作った惑星の質量を見積もることができる．

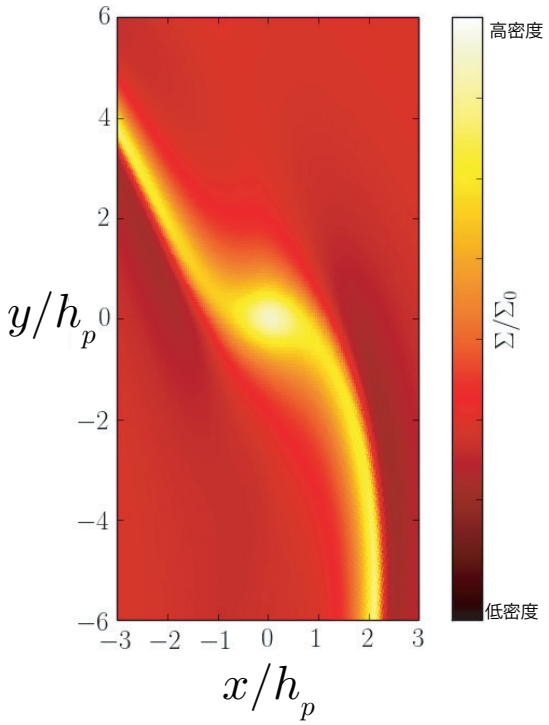

図1：2 次元数値流体計算によって得られた惑星近傍の原始惑星系円盤のガス面密度構造．円盤ガスとの重力相互作用によって惑星が円盤に密度波を励起していることが分かる．図は，惑星質量がM_p = 3地球質量，円盤の温度を反映する円盤の鉛直方向の厚み(h_p)が惑星の軌道長半径(R_p)の5%，および円盤粘性の強さを表すパラメータαが10^{-3}のときの計算結果．(粘性のパラメータαの値が大きいほど円盤粘性が強いことを表している．)

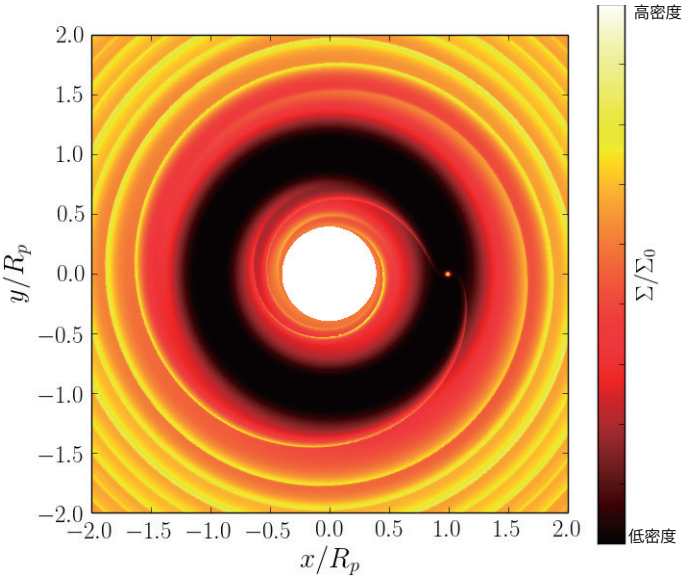

図2：数値流体計算から得られた巨大惑星周りの原始惑星系円盤の構造．巨大惑星の軌道に沿って軸対称な低ガス密度領域（ギャップ領域）が形成されているのが分かる．図は，$M_p = 1M_J$，$h_p/R_p = 0.05$，$\alpha = 10^{-3}$の場合の計算結果．（M_Jは木星質量．）

ギャップの幅については密度波の伝播および減衰過程と密接に関係していると考えられている．密度波は円盤内を惑星から遠ざかる方向に伝播していく内に，円盤粘性や波の非線形発展に伴う衝撃波によって徐々に減衰する．波が減衰した場所で波が運んでいた角運動量が円盤ガスに受け渡され，ガス密度の勾配が形成される．すなわち，密度波の減衰プロセスがギャップの幅を決定しているのである．しかしながら，従来の波の減衰モデルは地球質量程度の比較的小さな惑星の場合ではギャップの幅をよく再現するのだが，木星のような巨大惑星が作るギャップの幅を説明できない[4]．このようにギャップの幅を決めるメカニズムは未だ分からない部分が多いが，数値流体シミュレーションの結果によると惑星質量が大きくなるほど幅の広いギャップが形成されることが分かっている[5, 6]．もし，ギャップ幅と惑星質量の定量的な関係が得られればギャップの幅から惑星質量を見積もることが可能となる．次節では，筆者の最近の研究で得られたギャップ深さおよびギャップ幅と惑星質量の定量的な関係を示し，実際に円盤観測（特にミリ波やサブミリ波観測）から得られる観測量からどのように惑星質量を見積もれるのかを見ていきたい．

3. 円盤ギャップ構造の直接観測による惑星質量の見積もり

現在までにミリ波やサブミリ波の観測によって，ギャップ構造を持つ原始惑星円盤が多数発見されている[7-10]．このようなギャップ構造の形成過程として，前節で説明した惑星｝円盤相互作用の他に，例えば，ダストの焼結によるもの[11]，円盤のデットゾーン形成に伴うもの[12]，またダストとガスの摩擦を考慮した永年重力不安定性によるもの[13]など様々な形成モデルが提唱されている．しかしここではギャップは惑星によって形成されたものとして話を進めていきたい．円盤ギャップ構造を観測したとき，観測量としてギャップの深さ，幅および円盤温度を得ることができる．このような観測量と惑星質量の定量的な関係が得られれば，その関係を用いて観測量からギャップ中の惑星質量を見積もることができるだろう．ギャップの深さと惑星質量の関係は，最近の幅広いパラメータ空間の高空間解像度の数値流体シミュレーションを用いた研究[5, 6, 14]によって調べられている．また，筆者の最近の研究[1, 2]では，上記の数値流体シミュレーションで得られたギャップ深さを再現するような簡単な理論モデルを構築した．その理論モデルによると，ギャ

ップの深さ（ギャップの底のガス密度$\Sigma_{\rm min}$とギャップ端のガス密度Σ_0の比）は以下のように表される．

$$\frac{\Sigma_{\rm min}}{\Sigma_0} = \frac{1}{1+0.04K}, \qquad (1)$$

ここで，無次元のパラメータKは以下のように定義される．

$$K = \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-5} \alpha^{-1}. \qquad (2)$$

ここで，M_p, M_*, R_p, h_p, αはそれぞれ惑星質量，中心星の質量，惑星の軌道長半径と惑星位置での円盤の厚み，およびShakura & Sunyaevの粘性パラメータ[15]を表す．また，惑星位置での円盤の厚みh_pと惑星の軌道長半径R_pの比を円盤アスペクト比と呼ぶ．図3は式(1)と数値流体シミュレーションで得られたギャップの幅を示している．式(1)は数値流体シミュレーションの結果をよく再現していることが分かる．無次元パラメータKは惑星質量，円盤アスペクト比，円盤粘性の組み合わせであるので円盤のアスペクト比，円盤粘性の大きさが分かっていれば，ギャップの深さから惑星質量の見積もりを行うことができる[2]．しかしながら，ギャップの深さによる見積もりにはギャップ底ではガス密度が小さくそこから発せられる放射も弱いため，深いギャップであるほど正確にギャップのガス密度を見積もるとこが困難になってくるという弱点がある．一方で，ギャップの幅はギャップの底に比べてガス密度が大きいので観測が容易である．

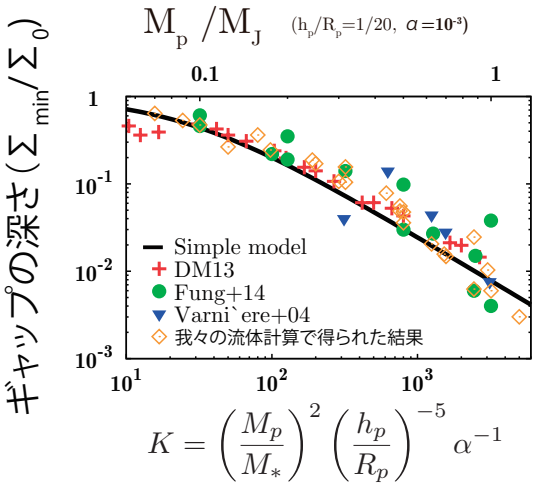

図3：惑星が作るギャップの深さ．縦軸はギャップ深さ（ギャップ底とギャップ端のガス密度の比），横軸は無次元のパラメータ K．シンボルは数値流体計算[5, 6, 14]で得られたギャップの深さを表している．黒線は筆者らのモデルで与えられるギャップ深さ（式[1]）．(Kanagawa et al. 2015b [2] Figure 1を改変．)

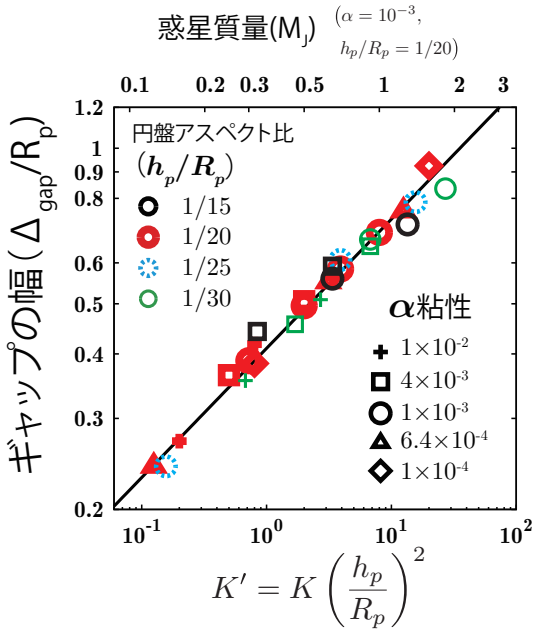

図4：筆者らの数値流体計算で得られたギャップの幅（縦軸）と無次元のパラメータK'（横軸）との関係．ギャップの幅Δ_{gap}はギャップの端をガス面密度がギャップ外側の値の半分になった場所とし，その間の距離として定義している．(Kanagawa et al. 2015c [3] Figure 3を改変．)

ギャップの幅と惑星質量の間にはどのような関係があるのだろうか？筆者らはその関係を調べるために，様々な惑星質量，円盤アスペクト比，および円盤粘性を持つ円盤についてギャップ形成の数値流体シミュレーションを行った[3]．その結果得られたギャップの幅が図4である．ここで，ギャップの幅$\Delta_{\rm gap}$はギャップの端をガス面密度がギャップ外側の値の半分になった場所とし，その間の距離として定義している．この図から分かるように，ギャップの幅は以下で定義される無次元のパラメータK'でよくスケールされ，

$$K' = \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-3} \alpha^{-1}, \\ = K\left(\frac{h_p}{R_p}\right)^2, \qquad (3)$$

ギャップ幅は以下のような経験式で表すことができる．

$$\frac{\Delta_{\rm gap}}{R_p} = 0.41K' = 0.41\left(\frac{M_p}{M_*}\right)^{1/2}\left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{3/4}\alpha^{-1/4}. \quad (4)$$

この関係式を用いることで，ギャップ深さを用いた惑星質量の見積もりの場合と同じように，ギャップの幅から惑星質量を求めることができる．

この節ではギャップの観測量から惑星質量を見積もる方法としてギャップの深さを用いる方法(式[1])とギャップの幅を用いる方法(式[4])を紹介した．もし観測されたギャップが惑星が作ったもので，かつギャップの深さ・幅共に十分な精度で観測されたとすると，そのギャップ深さ，幅からそれぞれ見積もった惑星質量は一致するはずである．すなわち，式(1)と(4)から惑星が作ったギャップと深さと幅が満たすべき以下の関係を導き出すことができる．

$$\left(\frac{\Delta_{\rm gap}}{R_p}\right)\left(\frac{\Sigma_{\rm min}}{\Sigma_0-\Sigma_{\rm min}}\right)^{1/4}\left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-1/2} = 0.92. \quad (5)$$

ここで，円盤のアスペクト比は観測量であるガス温度から見積もることができるので，式(5)の左辺は観測量だけで構成されていることが分かる．つまり，式(5)を使えば，観測量だけから観測されたギャップが惑星が作ったものかどうかを判別することができる．

次節では上記の関係式の観測への応用について述べるが，その前にこの節で紹介した惑星質量の見積もりを観測に適用する際の注意点を述べていきたい．ここで我々のモデル(式(1)と(4))は円盤ガスのギャップ構造に適用されるべきものである．一方で，ALMAなどによるミリ波サブミリ波連続光の観測で得られるのは，円盤ガスに含まれているダスト成分の分布である．したがって，ダストとガスのカップリングが弱い場合にはこのような観測で得られた結果には我々のモデルは適用できない．ダストとガスで同じギャップ深さ，幅が観測されるかどうかは円盤のガス密度，円盤粘性に依存しており，ガス密度円盤粘性が大きいとダストとガスと同じギャップ深さ，幅のギャップが観測される[16]．例えば，この後の節で紹介するHL Tauの円盤のような比較的思い円盤ではガス密度が高いため，ガスとダストで同じギャップ深さ，幅が観測される可能性は十分にある．このようにダスト連続光の観測に我々のモデルを適用する際にはダストとガスがよく混ざっているかどうかに注意する必要がある．

4. HL Tauの場合

ここまで円盤ギャップ構造から惑星質量を見積もる方法について述べてきた．最後にこの方法をALMA望遠鏡の長基線のキャンペーン観測で得られたHL Tau円盤のギャップ構造[10]に適用して惑星の質量を見積もってみたいと思う．この観測でHL Tau円盤は異なる3つの周波数帯で観測されている．そのうち230 GHz帯(Band 6)と345 GHz帯(Band 7)のデータを使うことで，円盤の光学的厚さ，円盤温度を見積もることができる(詳しい解析方法は[2]をご覧いただきたい)．この解析にはダストの性質を仮定する必要があり，ここではよく使われるダストの吸収係数が波長のβ乗に比例するモデルを用いる．図5aはALMA Band 6で得られたHL Tau円盤の輝度温度の分布，円盤長軸(x=0方向)に沿った方向のガス密度および円盤の厚みを示している．光学的厚みからガス密度を見積もる際にはダストの吸収係数として$\kappa = 2\times10^{-2}$ g/cm^2($\beta = 1.5$，ガス–ダスト比を50と仮定)を使っている．図5bからも分かるように，HL Tauの円盤は比較的質量の大きな円盤である．円盤粘性の大きさにもよるが，このようなガス密度の大きな円盤ではダスト分布は円盤ガスの分布と分離しにくい．以下では円盤ガスとダスト粒子はよく混ざっているとして，ギャップの深さおよび幅を見積もる．図5から見積もったギャップの深さ，幅およびそこから見積もった惑星質量を表1にまとめている．30 AUおよび80 AUにあるギャップ構造はギャップの深さ，幅の両方から見積もった惑星質量がほぼ一致しており，これらのギャップが惑星によって作られたと考えても矛盾しない．一方で，10 AU付近のギャップ構造はギャップ幅から見積もった惑星質量に対してギャップの深さから見積もった惑星質量が小さい．すなわち，このギャップは惑星起源のものでない可能性がある．しかし，ここで注意したいのは10 AUや30 AUにあるギャップは幅が観測のビームサイズと同程度であるため，完全に空間分解されていない可能性がある．その場合にはギャップ構造

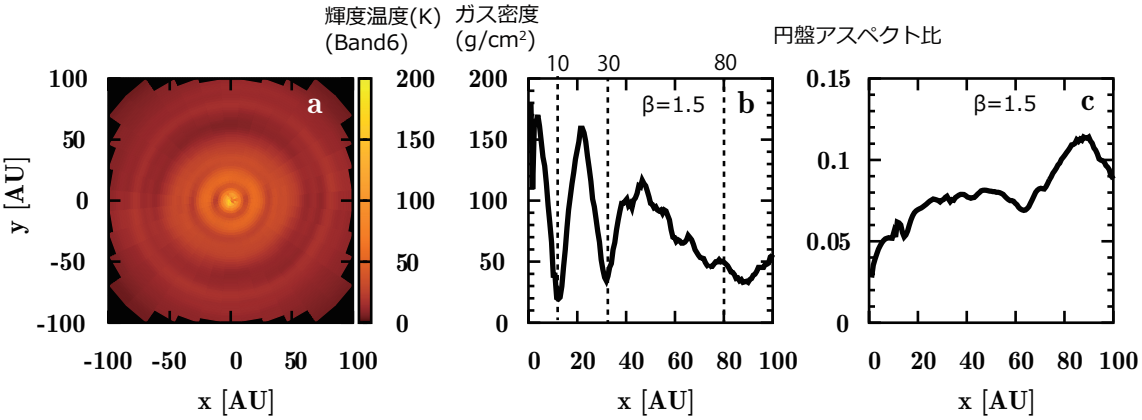

図5：HL Tau円盤の230GHz帯(Band6)での輝度温度(a)と，x = 0 方向に沿った円盤ガス密度(b)と円盤アスペクト比(c)．この図はALMA 長基線キャンペーン観測で得られたデータを用いている．円盤ガス密度(b)，アスペクト比(c)を計算する際はダストの吸収係数を波長のβ乗に比例するとしてβ = 1.5 と仮定している．また，観測データの解析には茨城大学の塚越崇氏，百瀬宗武氏に協力していただきました．

表1：HL Tau円盤のギャップの深さ，幅とそこから見積もられる惑星質量．ギャップの深さ，幅は図5のガス密度分布(b)から見積もっている．また，10AUギャップ，30AUギャップの深さは観測の観測のビームサイズでならされてしまっている可能性を考慮して上限値(惑星質量では下限値)として見積もっている．ここでM_Jは木星質量を表している．

ギャップの位置 (R_p)	ギャップの深さ (Σ_{min}/Σ_0)	ギャップの幅 Δ_{gap}	ギャップの深さから見積もった惑星質量	ギャップの幅から見積もった惑星質量
10 AU	< 0.1	9.5 AU	> 0.3 M_J	1.4 M_J
30 AU	< 0.3	7.5 AU	> 0.3 M_J	0.2 M_J
80 AU	0.4	24 AU	0.7 M_J	0.5 M_J

は周囲の構造にならされてしまうため，ギャップの深さは浅くなってしまうと考えられる．もし，この効果で細いギャップが浅く見えているとすると10 AUのギャップは惑星起源であるという可能性も残されている．

最後に，表1に示した惑星質量の精度について言及しておきたい．表1の見積もりではβ= 1.5を仮定したが，ギャップの深さおよび幅はダストの性質(βの値)に依存することにも注意する必要がある．例えば，10 AUのギャップの場合，β= 1または2とした場合では，ギャップ幅はそれぞれ13.5 AU，9 AUとなる．従って，幅から見積もった惑星質量は3.3 M_J(β= 1のとき)，1.3 M_J(β= 2のとき)となる．このようなβの不定性から，表1の惑星質量の見積もりにはファクター2程度の不定性があると考えられる．また，ここではダスト粒子は円盤ガスとよく混合していると仮定したが，円盤粘性が小さな場合や円盤ガスの量が図5bの見積もりよりも小さい場合はダスト分布はガスの分布と大きく違っているかもしれない．その場合には，ダストの濾過作用によって実際のガスのギャップの深さ，幅は図5で見られるよりも大幅に浅く，狭くなることが知られている[16, 17]．したがって，ダスト分布とガス分布が大きく乖離している場合は，実際の惑星質量は表1の見積もりよりも大幅に小さくなる．より正確な惑星質量の見積もりを行うためには，ガスとダストの分布の違いといった円盤の詳細な物理状態の解明が必要である．

5. まとめと今後の展望

本稿では，原始惑星系円盤のギャップ構造が惑星で形成されたとすると，円盤観測から得られるデータでどのように惑星質量を見積もるのか，その方法を紹介した．また，その方法をALMAで観測されたHL Tau円盤のギャップ構造に適用し，ギャップの中に惑星が存在した場合，その質量を見積もった．今後，

ALMAやすばる望遠鏡によって今回紹介したHL Tau円盤の観測のような惑星形成領域まで分解したギャップ構造を持つ原始惑星系円盤の直接撮像イメージが多数得られることが期待される．このような観測結果を説明する際に，我々のモデルは非常に有用であろう．

原始惑星系円盤と惑星との相互作用は，系外惑星の質量・軌道の多様性を生み出す起源の1つであると考えられている．円盤ギャップの観測から円盤内の惑星を特定することで，円盤内ので惑星進化に観測的な面から制限を与えることができるだろう．今後，このように原始惑星系円盤の観測の面からも系外惑星の多様性の起源に迫ることができると期待される．

謝 辞

本原稿は，田中秀和氏，武藤恭之氏，谷川享行氏，竹内拓氏，塚越崇氏，百瀬宗武氏との共同研究の結果をまとめたものです．共同研究者の方々には，この場をお借りしてお礼申し上げます．また，筆者が博士課程の内からご指導をいただきました田中秀和氏には特に感謝申し上げます．筆者はこれまでに，新学術領域研究(23103004, 26103701)，ALMA共同利用PIサポートプログラム(NAOJ-ALMA-0135)の助成を受けました．また，本稿の図5はALMA長基線観測キャンペーンで得られたデータを用いています．本研究で行った数値流体シミュレーションは国立天文台シュミレーションプロジェクトのスーパコンピュータCray XC30と北海道大学低温科学研究所の環オホーツク情報システムを用いて行いました．最後に本稿の執筆の機会を与えていただき，また注意深く原稿を読んでくださった成田憲保氏に感謝いたします．

参考文献

[1] Kanagawa, K. D. et al., 2015, MNRAS 448, 994.
[2] Kanagawa, K. D. et al., 2015, ApJ 806, L15.
[3] Kanagawa, K. D. et al., submitted, ApJ.
[4] Duffell, P. C., 2015, ApJ 807, L11.
[5] Varniere, P. et al., 2004, ApJ 612, 1152.
[6] Duffell, P. C. and MacFadyen, A. I., 2013, ApJ 769, 41.
[7] Casassus, S. et al., 2013, Nature 493, 191.
[8] Fukagawa, M. et al., 2013, PASJ 65, L14.
[9] Osorio, M. et al., 2014, ApJ 791, L36.
[10] ALMA Partnership, et al., 2015, ApJ 808, L3.
[11] Okuzumi, S. et al., 2015, ArXiv e-prints.
[12] Flock, M. et al., 2015, A&A 574, A68.
[13] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S.-i., 2014, ApJ 794, 55.
[14] Fung, J. et al., 2014, ApJ 782, 88.
[15] Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A., 1973, A&A 24, 337.
[16] Zhu, Z. et al., 2012, ApJ 755, 6.
[17] Dong, R. et al., 2015, ApJ 809, 93.