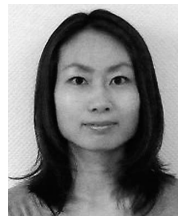


N体シミュレーションで探る 銀河系中心部の若い星の起源



藤井通子

〈鹿児島大学大学院理工学研究科 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-35〉

e-mail: fujii@cfca.jp

銀河系の中心部では銀河中心の巨大ブラックホールに非常に近い場所 (1 pc) で若くて重い星が多数見つかった。このように銀河中心に近い場所で星形成を起こすのは難しいため、外側から星を運ぶ何らかのメカニズムが必要となる。本研究では銀河中心から少し離れたところで形成した若い星団が銀河中心に星を運んだという仮説に基づき N 体シミュレーションを行った。その結果、星団内で星の暴走的合体が起こり、中間質量ブラックホールが形成した場合、そのブラックホールが星団のメンバーだった星を 1:1 平均運動共鳴によって銀河中心に運ぶという新しいメカニズムを発見した。また、このメカニズムによって運ばれた星の分布は、観測されている銀河系中心の若い星の分布の特徴をよく再現できることがわかった。

1. 銀河系中心の若くて重い星

近年、補償光学の発展に伴い、銀河系の中心部 1 pc 以内で若くて (年齢数 Myr) 重い星 (OB 型星) が多数見つかってきている¹⁾³⁾。しかし、銀河中心に非常に近い場所では銀河中心の巨大ブラックホールによる潮汐力が強いいため、星形成は難しいと考えられる。そのため、これらの星がどこで生まれ、どのようにして現在の場所へやってきたのか、長い間議論となっている。観測から、これらの若い星の特徴をもう少し詳しく見てみると、銀河系中心の若い星は大きく二つに分類される。一つは銀河中心 0.1-1 pc に一つ、または二つの円盤上に分布する OB 型星²⁾⁴⁾、もう一つは「S-stars」と呼ばれる 0.1 pc 以内に球対称に分布する B 型星である⁵⁾⁶⁾。

現在、円盤状の分布について有力な説は以下の二つである。一つめは、銀河中心ブラックホール周りにできた重い降着円盤で重力不安定から星が生まれた、つまり、これらの若い星はその場で形

成されたという説である⁷⁾。二つめは、銀河中心から少し離れたところで生まれた若くて高密度な星団が力学的摩擦を受けて銀河中心に沈み、最後はブラックホールの潮汐力によって破壊されたという説である⁸⁾。後者の説の利点は、円盤状の星の分布、星団が楕円軌道で落ちてきたとすれば離心率の高い星の存在、星団内部で中間質量ブラックホールが形成したとすれば IRS13E という星団のコアの残骸と考えられている星の集まりのような銀河系中心の若い星の観測的特徴を再現できる点にある。また、銀河系の中心から 30 pc くらいのところでは、Arches や Quintuplet といった年齢 2-3 Myr の若い高密度な星団が見つまっている⁹⁾。一方、S-stars については、その場での形成は不可能であるため、何らかの方法で外側から星を運んでくる必要がある。そのメカニズムについてはさまざまな説が提案されているが、今のところ有力なものはない。本研究では、銀河系中心部における星団の進化のシミュレーションを行い、星団説が銀河系中心の観測結果を再現できるのかにつ

いて調べた。

2. これまでのシミュレーションの問題点

これまでも銀河中心での星団の進化の N 体シミュレーションは行われていた^{10), 11)}。しかし、それらには以下のような問題点があった。星団のような粒子数は少ないが高密度な系と、銀河のような粒子数は多いが系内の密度差が比較的少ない系とでは必要な計算方法が大きく異なる。具体的には、星団には高精度だが時間のかかるダイレクト法（粒子間の相互作用をすべて計算するため計算量は $O(N^2)$ ）、銀河には高速だが低精度のツリー法（遠くの粒子からの力はまとめてしまうので計算量は $O(N \log N)$ ）が用いられることが多い。しかし、星団と銀河を同時に計算する場合、ダイレクト法では粒子数の多い銀河の計算に時間がかかりすぎ、ツリー法では高密度な星団の内部進化を正しく計算できないという問題が生じる。そのため、これまでの N 体シミュレーションでは、1) 星団のみを N 体で表現し、高精度な方法であるダイレクト法を用いて計算し、星団の軌道進化は力学的摩擦を公式から準解析的に与える方法、2) 星団も銀河も N 体で表現するが、ツリー法を用いるため星団の内部進化は追えない方法、のどちらかを用いるしかなかった。

しかし、これらの方法はどちらも問題がある。まず、潮汐破壊を受けながら銀河中心に沈む星団の場合、力学的摩擦の公式は摩擦を正しく評価できないため、正しい軌道進化を得るには銀河も N 体で表現する必要がある¹²⁾。一方、星団は内部進化によって中心密度が上がり、それは星団が潮汐破壊に対しどの程度生き残れるかに関わるため、星団の内部進化を無視してもやはり正しい結果は得られない。このため、星団の進化を正しく追うためには、星団と銀河を共に N 体で表現し、同時に星団の内部進化も正しく計算する必要がある。

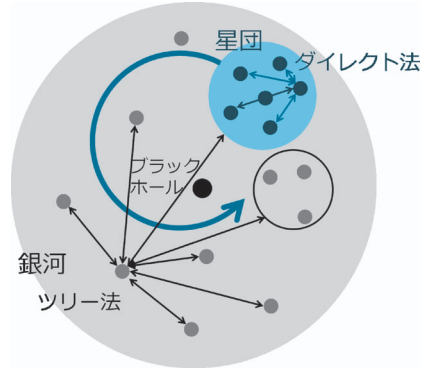


図1 BRIDGE法の模式図。星団の内部運動はダイレクト法で、その他の相互作用はツリー法で計算される。

3. 新しい計算方法「BRIDGE」を用いた N 体シミュレーション

前述の問題を解決するために開発した新しい方法が、ツリー法とダイレクト法のハイブリッドである「BRIDGE」である¹³⁾。BRIDGEでは星団の内部運動のみを高精度のダイレクト法を用いて解き、それ以外の相互作用は高速な近似法であるツリー法を用いる（図1）。これによって、世界で初めて星団の内部進化と銀河を同時に現実的な時間で計算することが可能となった。

本研究では、このBRIDGEを用い、銀河中心に沈む星団の N 体シミュレーションを行った。銀河中心から少し離れたところ（今回のシミュレーションの場合は 13 pc）で星団が生まれたと仮定しシミュレーションを始めると、星団は力学的摩擦を受け銀河中心に沈んでいき、銀河中心から 1 pc あたりで完全に破壊されてしまった。一方、星団の内部は非常に高密度になるため、星どうしの衝突・合体が起こる。この星の合体を取り入れてシミュレーションを行うと、重い星はその重力場によって他の星を引き寄せるため、次々と星が合体していき（暴走的合体）、数千～1万太陽質量まで成長する（図2）。その星は 2-3 Myr で寿命が尽き、最後はブラックホールになると考えられ

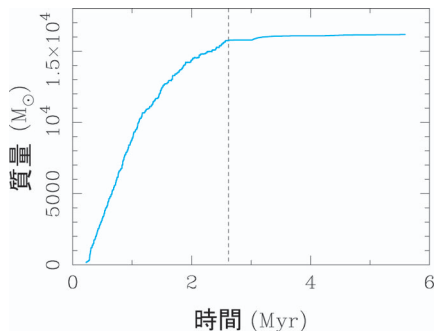


図2 星団内で一番重い星の暴走的合体による質量の進化. 点線の時間で星の寿命が尽き, 中間質量ブラックホールになったと仮定している.

る. そこで, シミュレーションには, 星の合体, 大質量星からの質量損失, ブラックホールの形成を取り入れた. 銀河には粒子数 600 万個, 星団には約 6 万 5 千個を用いている.

4. 星団が銀河中心に星を運ぶ新しいメカニズム

図3は, シミュレーションのスナップショットである. 星団は銀河中心に沈みながら銀河と銀河中心ブラックホールの潮汐力によって壊されてしまう. この過程で星団からはぎとられた星は, 円盤状の分布を作る. 円盤の中心には穴が開いているが, この穴はやがて埋まっていく. それは, 元は星団のメンバーだった星が星団が壊れた後も銀河中心に運ばれていることを示している. これまで, 星団が星を運んだという説では, 星は星団に束縛されて運ばれると考えられていた. しかしシミュレーションの結果を見ると, 星団は銀河中心から約 1 pc で壊れ, その後, 別のメカニズムで星は銀河中心に運ばれていた.

では, 星はどのようにして 1 pc より内側へと運ばれたのだろうか? 図4は銀河中心に運ばれたある星の軌道(黒線)と星団内でできた中間質量ブラックホールの軌道(灰色線)である. 最初, この星は星団に束縛されている(黒線と灰色線は重なっている)が, 4 Myr より少し前で星団に東

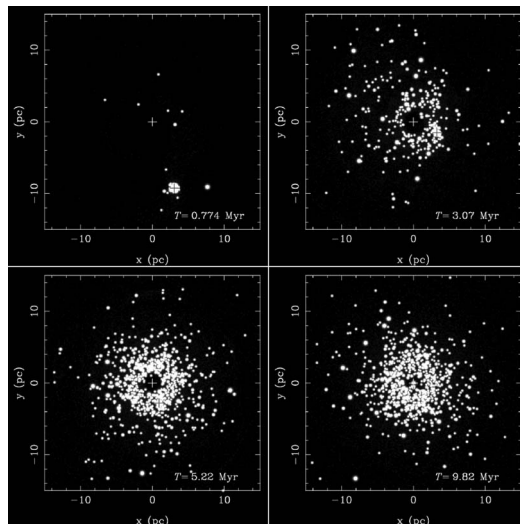


図3 シミュレーションのスナップショット. 星団は銀河中心に沈みながら銀河と銀河中心ブラックホールの潮汐力によって破壊される. 星団が完全に壊れたとき, 星団のメンバーだった若い星たちは中心に穴の空いた円盤状の構造を作るが, 中心の穴はやがて埋まっていく. これは, 星団内でできた中間質量ブラックホールが 1:1 平均運動共鳴によって銀河中心に若い星を運んでいくためである.

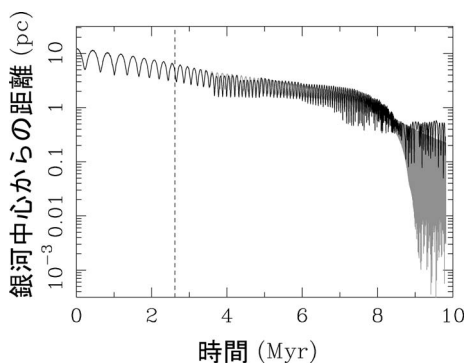


図4 星団・中間質量ブラックホール(灰色線)と平均運動共鳴によって運ばれた星(黒線)の軌道進化. 灰色線は星団内で一番重い星(途中で中間質量ブラックホール)の銀河中心からの距離をプロット. 9 Myr あたりで中間質量ブラックホールの軌道離心率が上昇し, この星は共鳴から外れている. Fujii et al. (2010) 図2より転載¹⁴⁾.

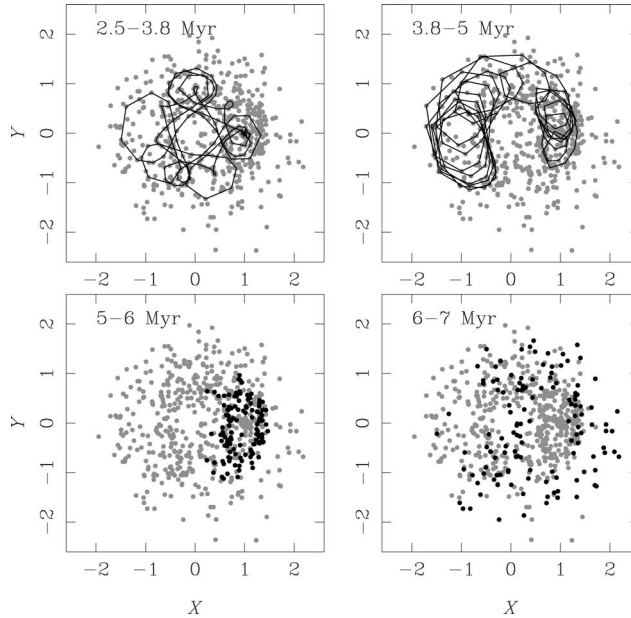


図5 共鳴に入った星の回転座標系での軌道. 中間質量ブラックホールの位置を X 軸上に固定, その軌道長半径を 1 としてプロットしている. 四つのパネルの灰色の点はスナップショットから得られた 2.5-7 Myr の間に通ったすべての軌道, 黒線または黒点はそれぞれの時間間隔の間での軌道を示しており, 左上は共鳴に入る前, その他は共鳴に入ったときの軌道 (右上は馬蹄形軌道, 下は準衛星の軌道) である. Fujii et al. (2009) 図7より転載¹⁵⁾.

縛されなくなる. 本来, 星団からはがれた星は中間質量ブラックホールと比べると軽いため力学的摩擦が効かず, その場所にとどまり続けるはずである. しかし, この星のその後の軌道を見ると, 9 Myr くらいまで中間質量ブラックホールに伴って銀河中心に沈んでいく.

このような星の軌道を詳しく調べた結果, これらの星は星団内でできた中間質量ブラックホールの 1:1 平均運動共鳴に入っていることがわかった. (1:1 平均運動共鳴に入っている星とは, 例えば中間質量ブラックホールが木星だとすると, 木星のラグランジュ点にあるトロヤ群天体である.) 図5は共鳴に入っているある星の軌道を銀河中心ブラックホールを原点に, 中間質量ブラックホールの位置を (1, 0) に固定した回転座標系でプロットしたものである. 灰色の点はすべての時間のスナップショットから得られたこの星の位置で, 各パネルはそれぞれの時間での位置を線または点で

示している (下の二つの図はスナップショットの間隔が軌道周期より長いので, 線で結んでいない). 左上の図ではまだ共鳴に入っていないが, 右上では 1:1 平均運動共鳴の一つである馬蹄形軌道 (回転座標系で見ると二つのラグランジュ点 L_4 と L_5 の間を行ったり来たりし, 馬の蹄の形に見える) に入っている. この星はその後, 準衛星軌道 (中間質量ブラックホールの周りを回っているように見えるが, 束縛されているわけではない) に移行する (図5下のパネル).

星団内でできた中間質量ブラックホールは, 星団が壊れた後も力学的摩擦によって銀河中心に沈んでいく. そのときに, 元は星団のメンバーだった若い星が中間質量ブラックホールとの 1:1 平均運動共鳴に入り, 一緒に銀河中心へ沈んでいく. このメカニズムによって, 星団内で中間質量ブラックホールができた場合, 星団は星団自身が壊れてしまった後も若い星を銀河中心へ運ぶこと

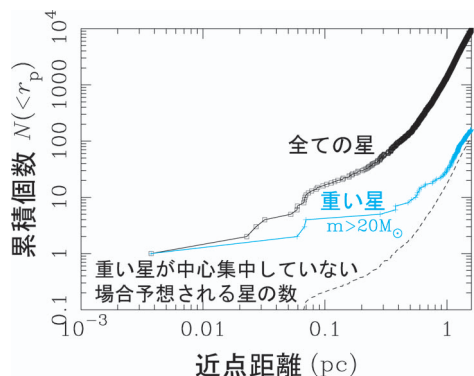


図6 星団のメンバーだった星の銀河中心からの累積個数。横軸は近点距離。黒線はすべての星、青線は20太陽質量より重い星を示す。破線は、星の質量分布がどこでも同じだと仮定した場合に予想される20太陽質量よりも重い星の分布である。銀河中心で重い星の割合が高い、つまり重い星は銀河中心に集中していることがわかる。

ができるのである。これは今まで考えられていなかった新しいメカニズムである。この結果は、中間質量ブラックホールをもつ星団は、0.1-1 pcの円盤状の分布だけでなく、さらに内側のS-starsの起源として有力な候補であることを示している。

また、星団によって星が運ばれた場合、重い星が銀河中心に集中することもわかった。図6は、星団によって運ばれた星を近点距離で見ると累積個数をプロットしたものである。星団内で、重い星は軽い星にエネルギーを与えて星団の中心に集まる。一方、潮汐力による星団の星のはぎとりは外側から起こるため、重い星は星団内に残りやすく、星団が銀河中心に沈んでから星団からはぎとられる。その結果、銀河中心には重い星が集中する。これは銀河系中心の若い星は重い星が多いという観測結果と一致している。

5. 観測との比較

図7はシミュレーションの最後のスナップショットの中心部分を拡大し、星の軌道を描いたものである。これらの星の軌道は、S-starsよりもややスケールが大きい、よく似た分布をしてい

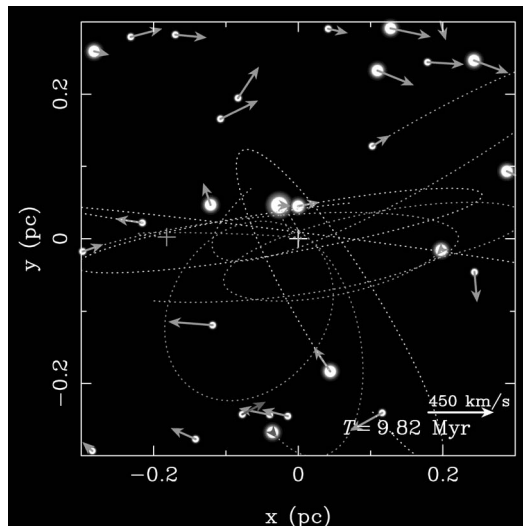


図7 シミュレーションのスナップショット。矢印は星の速度、点線は銀河中心ブラックホールから0.05 pc以内に近づく星の軌道を示す。Fujii et al. (2010) 図1より転載¹⁴⁾。

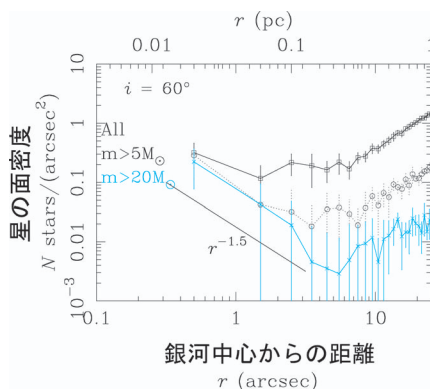


図8 星団によって運ばれた若い星の面密度分布。星団の軌道面を天球面に対し60度回転させて投影している。これは、銀河系中心で見つかっている若い星の円盤の傾きとだいたい同じ角度である。Fujii et al. (2010) 図3より転載¹⁴⁾。

る。次に、星団によって運ばれた星の面密度分布を観測と比較してみた。図8は、天球面に投影した、星団によって運ばれた星の面密度分布である。観測から、若い星の分布は約-1.5乗のべきになると示唆されている^{3), 16), 17)}。シミュレーションの結果は、これを再現できることがわかった。ま

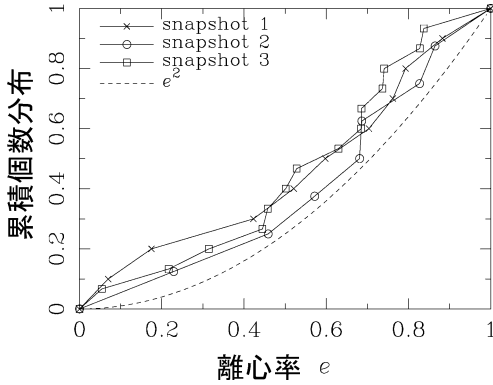


図9 最後から三つのスナップショットにおける軌道長半径が0.3 pc 以内の星の離心率の累積個数分布. ほぼランダムな分布 (e^2) になっている. Fujii et al. (2010) 図5より転載¹⁴⁾.

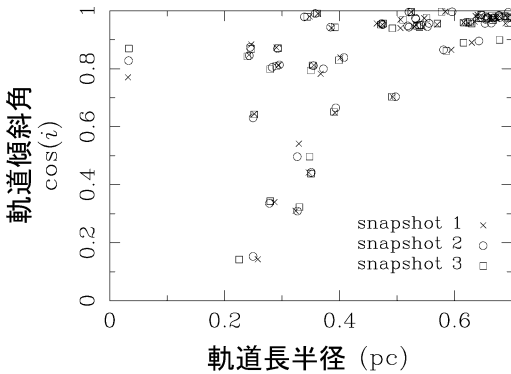


図10 最後から三つのスナップショットにおける銀河中心に近い星の軌道傾斜角分布. 星団によって運ばれた星は外側では星団の軌道面と同じ面に分布する ($\cos(i) = 1$) が, 銀河中心に近づくほど, 軌道傾斜角はばらつき, ランダムな分布に近づく. Fujii et al. (2010) 図5より転載¹⁴⁾.

た S-stars は銀河中心ブラックホールに非常に近いため, ケプラー運動を仮定することで, 軌道の分布が求められており, 球対称でほぼランダムな分布をしていると考えられている^{6), 18)}. 図9と図10はシミュレーションから得られた銀河中心に運ばれた星の軌道の離心率と傾斜角の分布である. これを見ると, 銀河中心に近づくにつれ, 円盤から球対称な分布に変化し, 中心付近で軌道はランダムな分布 ($f(e) = e^2$) になっていることがわ

かる. このように, 星団内でできた中間質量ブラックホールが平均運動共鳴によって若い星を運んだ場合, 観測されている銀河系中心部の若い星の分布をよく再現できることがわかった.

6. まとめ

本研究では, 新しい N 体シミュレーションコード BRIDGE を開発し, それを用いて銀河中心部における星団の進化のシミュレーションを行った. その結果, 星団内で星の暴走的合体が起こり中間質量ブラックホールができると, 星団が完全に潮汐破壊された後に, 星団のメンバーだった星が中間質量ブラックホールとの 1:1 平均運動共鳴によって銀河中心に運ばれることがわかった. これは, 今まで考えられていなかった新しいメカニズムである. また, シミュレーションで星団によって銀河中心に運ばれた星の分布は, 重い星の銀河中心への集中, 若い星の面密度分布の -1.5 乗のべき, 球対称でランダムな S-stars の軌道分布といった観測結果をよく再現している.

謝辞

本稿は筆者の博士論文の内容を元にしています. 博士課程における研究を指導して下さった国立天文台の牧野淳一郎氏に深く感謝いたします. 共同研究者である岩澤全規氏, 船渡陽子氏にも感謝いたします. また, 本稿の執筆を助けて下さり, さらにさまざまなコメントをくださった鈴木 建氏に御礼申し上げます. 筆者は特別研究員として日本学術振興会より支援を受けています. 本稿では The American Astronomical Society の許可を得て図を転載しています.

参考文献

- 1) Krabbe A., et al., 1995, ApJL 447, L95
- 2) Paumard T., et al., 2006, ApJ 643, 1011
- 3) Bartko H., et al., 2010, ApJ 708, 834
- 4) Lu J. R., Ghez A. M., Hornstein S. D., Morris M., Matthews K., Thompson D. J., Becklin E. E., 2006, Journal of Physics Conference Series 54, 279
- 5) Ghez A. M., et al., 2003, ApJL 586, L127
- 6) Gillessen S., Eisenhauer F., Trippe S., Alexander T., Genzel R., Martins F., Ott T., 2009, ApJ 692, 1075
- 7) Levin Y., Beloborodov A. M., 2003, ApJL 590, L33
- 8) Gerhard O., 2001, ApJL 546, L39
- 9) Figer D. F., 2004, ASP Conf. Ser. 322, 49
- 10) Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gerhard O., 2003, ApJ 593, 352
- 11) Kim S. S., Morris M., 2003, ApJ 597, 312
- 12) Fujii M., Funato Y., Makino J., 2006, PASJ 58, 743
- 13) Fujii M., Iwasawa M., Funato Y., Makino J., 2007, PASJ 59, 1095
- 14) Fujii M., Iwasawa M., Funato Y., Makino J., 2010, ApJL 716, L80
- 15) Fujii M., Iwasawa M., Funato Y., Makino J., 2009, ApJ 695, 1421
- 16) Buchholz R. M., Schödel R., Eckart A., 2009, A&A 499, 483

- 17) Do T., Ghez A. M., Morris M. R., Lu J. R., Matthews K., Yelda S., Larkin J., 2009, ApJ 703, 1323
- 18) Schödel R., Ott T., Genzel R., Eckart A., Mouawad N., Alexander T., 2003, ApJ 596, 1015

The Origin of Young Stars near the Galactic Center

Michiko FUJII

Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

Abstract: Young massive stars have been found within 1 pc from the Galactic center (GC). Since *in-situ* formation of stars is difficult because of the strong tidal field of the central supermassive black hole. We performed *N*-body simulations of young star clusters migrating to the GC and investigated whether the star clusters can carry young stars to the GC. We found that intermediate-mass black holes formed in the clusters carry young stars to the GC by a 1 : 1 mean motion resonance and the migration scenario can reproduce the distribution of the observed young stars in the GC.