

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07414

研究課題名（和文）可視光深撮像データを用いた超低温褐色矮星のキャラクタリゼーション

研究課題名（英文）Characterization of Ultracool Brown Dwarfs with Deep Optical Imaging

研究代表者

小西 美穂子（Konishi, Mihoko）

国立天文台・光赤外研究部・特任研究員

研究者番号：30780952

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000 円

研究成果の概要（和文）：近年、非常に温度の低い褐色矮星が見つかってきた。このような星が、どのように生まれ、銀河系にどう分布しているのかを知ることは、星・惑星形成の理解において重要である。超低温褐色矮星の探査は宇宙望遠鏡を用いた赤外線領域での観測が主流であった。一方、可視光領域の観測では、近年稼働を始めたすばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam（HSC）のおかげで、その性質を調べられるようになった。本研究ではHSCデータを用いて、超低温褐色矮星のキャラクタリゼーションのための指標の確立、および未発見の星の検出が目的である。ビッグデータを扱うに長けたディープラーニングの手法を使って指標確立を試みた。

研究成果の概要（英文）：Several ultracool brown dwarfs have been found by recent deep observations. Understanding how such brown dwarfs form and how they are distributed in Milky Way is a crucial key to elucidate the details of both star and planet formation. Infrared surveys with space telescopes have been mainly used to detect and to characterize the ultracool brown dwarfs. On the other hand, properties of the brown dwarfs became able to be investigated also in the optical region, thanks to the recent instrument, such as Hyper Suprime-Cam (HSC) on Subaru Telescope. The purpose of this study is to establish new indices to distinguish/characterize ultracool brown dwarfs and to identify new brown dwarfs by adapting deep learning methods to HSC survey data.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：褐色矮星

1. 研究開始当初の背景

温度が低く軽い星（褐色矮星）が発見されて以来、そのような星の性質が盛んに調べられている。特に近年では、惑星に近いような温度（数百ケルビン）をもつ褐色矮星（Y 型星; Cushing et al. 2011 など）も見つかってきた。このような非常に温度の低い（軽い）褐色矮星が、どのように生まれ、どのような数が存在し、この銀河系にどう分布しているのかを知ることは、星形成過程だけでなく惑星形成過程の解明において重要なテーマである。

このような超低温褐色矮星（本研究では T 型と Y 型星とする、図 1）は赤外線領域で明るいため、その探査や性質の調査などの研究は、WISE（Wide-field infrared Survey Explorer）をはじめとした赤外線宇宙望遠鏡を用いた観測が主流である。一方、このような褐色矮星は可視光領域で暗いため、従来の可視光サーベイ観測（例えば Sloan Digital Sky Survey: SDSS）では検出が難しく、限られた数しか報告されていない。しかし、近年稼働をはじめたすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam（HSC）は、高感度・広視野を達成しているため、超低温褐色矮星のような非常に暗い星の大規模な探査が可能になった。また、様々なフィルターを用いることでその性質を調べることができる。

本研究ではすばる望遠鏡 HSC の戦略観測枠で取得されたデータを用いて、超低温褐色矮星のキャラクタリゼーションのための指標の確率、および未発見の星の検出が目的である。そしてその結果をもとに、超低温褐色矮星の銀河系内の運動を調べることでその分布や質量関数に制限を与えて、このような星の形成の理解を発展させる。

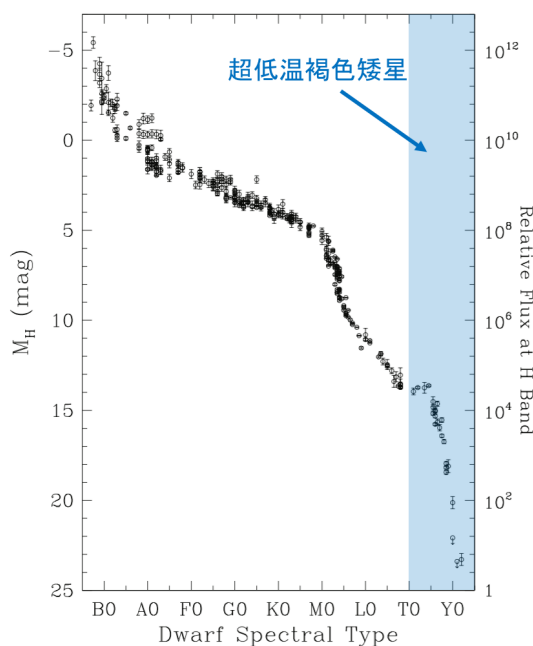


図 1：星の色等級図（Kirkpatrick et al. 2012）。青色の領域が本研究で取り扱う超低温褐色矮星。

2. 研究の目的

本研究全体の目標は、(1) 超低温褐色矮星を同定するための可視光領域の指標の確立、(2) WISE で見つけることができなかった超低温褐色矮星の発見、(3) これらの星の銀河系内の運動の同定、(4) 質量関数の推定、の 4 つである。これらを用いて、超低温褐色矮星の分布を明らかにし、このような星の形成過程の解明を進めることである。本申請内ではその中の (1) の指標の確立、および (2) の新規褐色矮星の発見についての研究を行うことが目標である。

従来、超低温褐色矮星を判別する手段として、赤外線の等級・色や J バンド ($1.2 \mu\text{m}$) での強度幅などが用いられてきた (Mace et al. 2013)。特徴的なスペクトル形状をつくる CH_4 や H_2O 、 FeH などの幅広い吸収線は、可視光領域 ($1 \mu\text{m}$ 前後) にも見られる (図 2)。したがって、可視光領域でも色やスペクトル形状から、超低温褐色矮星を同定するための指標を作ることができると考えられる。本申請では、この指標づくりを主として研究を行い、その結果を用いて未発見の褐色矮星同定を目指す。

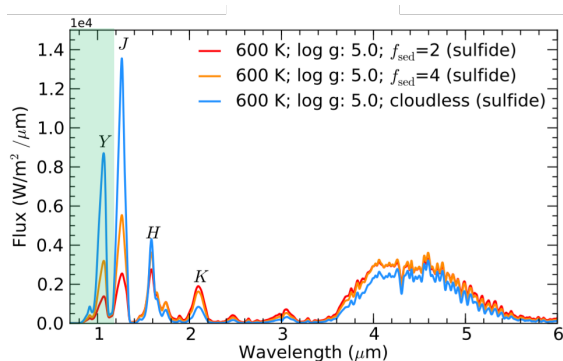


図 2：モデル計算による有効温度 600 ケルビンの星のスペクトル例 (Morley et al. 2013)。緑色の領域が本研究で注目する可視光領域。

3. 研究の方法

本申請の主たる目標は「超低温褐色矮星同定のための可視光領域の指標確立」である。超低温褐色矮星は星自身が暗いために、可視光を用いた広視野かつ深撮像のデータが必要である。そのためには、すばる望遠鏡の HSC を用いて大規模にサーベイを行っている戦略観測枠のデータが最適である。このデータやこのサーベイからつくられたカタログは日本の研究者に公開されている。これらを用いて、まずは既知の褐色矮星（L 型、T 型、Y 型）に関して HSC フィルターで取得された時の色や明るさなどの諸元の抽出を行う。その際に、HSC データのカタログ値が不十分であると判断された場合、自身でデータ解析を行って必要な情報（明るさや位置など）を取り出す。次に、これらを用いて、様々な物理量の相関をとりそれらの性質を調べる。その結果を基

にして、褐色矮星同定のための可視光領域の指標を作る。そして、その指標を HSC でサーベイしている全領域に適用して、未発見の超低温褐色矮星の検出を目指す。

4. 研究成果

まず、HSC サーベイの視野内に既知の褐色矮星を探したところ、113 個の星がいずれかのフィルター (g, r, i, z, Y バンド) で検出されていた。Y 型星は数が限られている上、HSC のサーベイ視野に入っていなかったため、検出数はゼロである。HSC サーベイのグループが作成するカタログは信頼性が高いことが分かったため、カタログ値をそのまま使用する。HSC サーベイ視野内に検出された褐色矮星の色についての関係を調べたところ、 i, z, Y バンドを含む色で既知の相関が見られた。図 3 は $i-z$, $i-Y$ の相関である。カラーバーはスペクトルタイプを示し、M8 型から T8 型まで 1 区切りずつ表している。灰色の点はある領域に含まれる、検出された点源であり、星や銀河だけでなくノイズも含まれている。また、フィルターの組み合わせにより多数のカラーカラーダイアグラムが作成できる。その中には、図 3 のようなシーケンスに乗るような傾向がみられない場合でもある情報を持っていること（ランダムな分布ではないこと）がわかった。例えば、カラーカラーダイアグラム上で特定の領域に固まる場合などである。これらの情報を全て効率よく使用する必要があること、そして膨大な量のカタログデータ（図 3 上の灰色の点）の中から、超低温褐色矮星（図 3 上の赤から黄色の点）だけを抽出するような手法が求められることがわかった。

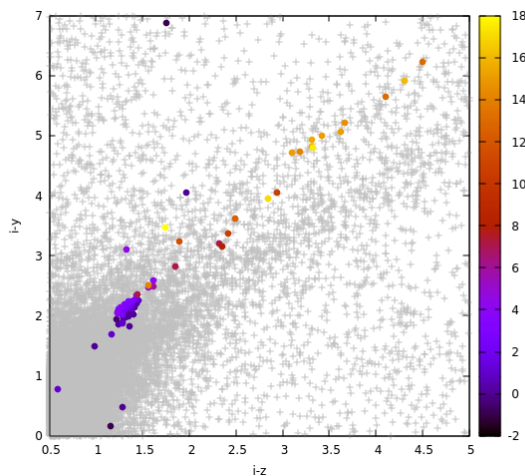


図 3 : HSC フィルター (i, z, Y バンド) のカラーカラーダイアグラム。褐色矮星（カラーバー）とその他 HSC のある領域で検出された点源。カラーバーは M8 型から T8 型まで 1 区切りずつサブスペクトル型を示している（M8 型= -2、L0 型= 0、T0 型= 10）。

そのために、近年注目を集めている「データ科学」の手法を用いた。これはビッグデータを扱うことに長けたものであり、近年では

天文学の分野でも取り入れられ始めている（Honma et al. 2014 など）。本研究では、このデータ科学の手法の一つを褐色矮星の分類・同定に適用することを世界で初めて試みた。ここでは、教師ありの深層学習の一つである多層パーセプトロンを使用した。パーセプトロンとは、ある入力値に対して 1 つの出力値を返すニューロンを設置し、それらの情報を統括することで、入力情報に対してその内容を識別する方法である。これを何層にも重ねたものが多層パーセプトロンと呼ばれている。あらかじめ、入力情報に対する出力がわかっているデータ（教師データ）を使用して、多層パーセプトロンを構築するパラメータを学習させ、最適なものを求める。この学習された多層パーセプトロンに、未知のデータを入力することで、その中から超低温褐色矮星候補を効率的に抽出ことが可能である。

本研究では簡単化のため、2 層のパーセプトロンを使用した。1 層目、2 層目のニューロンの数として 200 個と 100 個を設定した。入力データとして、既知の褐色矮星 (237 個) のスペクトルを HSC のフィルターで畳み込んだもの（空華氏提供）を使用した。簡単化のために、特徴的な相関が見られた i, z, Y バンドを含むカラーを入力情報とし、出力は 5 クラス（late M 型、early L 型、late L 型、early T 型、late T 型）とした。この教師データを与えて学習させたのちに、教師データを入力値として与えた結果が表 1 である。学習が十分に行なわれている場合は、認識率 100% 近い値になるはずであるが、60.8%にとどまっている。特に late T 型（T5 型から T8 型）に関しては分類が難しいことがわかった。一方で、その他のクラス、特に early T 型はうまく分類できている。

さらなるパラメータの調整が必要であるが、褐色矮星のサンプルからそれらのサブスペクトル型を決める手法として、多層パーセプトロンが使用できることが初めて明らかになった。試しに、この学習させた多層パーセプトロンを HSC で実際に検出された褐色矮星（図 3 のカラーバーで色分けした点）に適用させたところ、33.6%の認識率にとどまった。今後はさらに精度を高めるために、教師データのサンプル拡大を行う方法の検討、 i, z, Y バンド 3 色以外の測定量の導入、パーセプトロンのさらなる最適化を行い、認識率を 100% に近づけることを目指す。

クラス	成功 (個)	失敗 (個)	認識率 (%)
late M 型	58	12	82.9
early L 型	29	32	47.5
late L 型	26	18	59.1
early T 型	31	2	93.9
late T 型	0	29	0
合計	144	93	60.8

表 1 : 教師データを学習後の多層パーセプトロンに与えた時の出力値と認識率

上記までは、褐色矮星であるものをクラス分類して超低温褐色矮星を同定する手法を調べていた。実際のカatalogデータには、褐色矮星の他にも、星や銀河などの情報が入っている（例えば図3の灰色の点）。このようなデータの中から、褐色矮星を抽出することも必要である。特に銀河が混同される可能性が高い(Matsuoka et al. 2016 など)。したがって、銀河と褐色矮星を区別することを目的に、別の多層パーセプトロンの構築を行った。銀河の色データとして、Galaxev コード (Bruzual & Charlot, 2003) を用いたモデル計算の値（様々な金属量・年齢を指定）を使用した。Galaxev で作成した i, z, Y バンドの色の相関の例を図4に示した。褐色矮星の教師データは前述のものと同一もの（237個のサンプル）を用いている（図4のカラーバーで色分けした点）。これらを用いて褐色矮星か否かを判別するための多層パーセプトロンを学習させたのち、教師データを入力情報として与えた結果が表2である。この結果から、褐色矮星は34.6%しか認識できていないことがわかる。一方、銀河はほぼ100%同定できている。今後、これらの結果について考察し、認識率を上げるための工夫を試みる予定である。

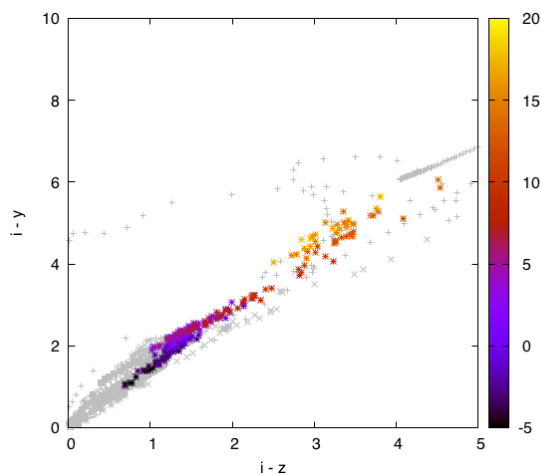


図4：HSC フィルター (i, z, Y バンド) のカラーカラーダイアグラム。カラーバーは既知の褐色矮星 (M5 型 = -5, L0 型 = 0, T0 型 = 10) を示している。灰色の点は Galaxev で作成したモデル銀河の色の一例。

クラス	成功 (個)	失敗 (個)	認識率 (%)
褐色矮星	82	155	34.6
モデル銀河	8286	1	~100

表2：教師データ（褐色矮星+モデル銀河）を学習後の多層パーセプトロンに与えた時の認識率

以上で述べたように、本研究は現在進行中である。引き続き考察やプログラムの改定を続けて、まとめた成果を学会で発表し、学術雑誌への投稿を行う。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計0件）
なし

〔学会発表〕（計0件）
なし

〔図書〕（計0件）
なし

〔産業財産権〕
なし

○出願状況（計0件）
○取得状況（計0件）

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西 美穂子 (KONISHI, Mihoko)

国立天文台・光赤外研究部・特任研究員

研究者番号：30780952

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
なし