

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17669

研究課題名(和文) 近赤外線高分散分光観測で拓く星間巨大有機分子の研究

研究課題名(英文) A Study of Interstellar Large Organic Molecules Explored with Near-infrared High-resolution Spectroscopy

研究代表者

濱野 哲史 (Hamano, Satoshi)

国立天文台・TMTプロジェクト・特任研究員

研究者番号：70756270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：星間有機分子を調べる重要なツールになると期待されている未同定吸収バンドである diffuse interstellar band (DIB) の分子同定に向けて、特に未開拓な近赤外線域においてDIBの系統的な観測的研究を行った。本研究では、まず主力装置の高分散分光器WINERED専用のデータ解析パイプラインを開発した。多数の天体について近赤外線スペクトルを取得し、近赤外線DIBの環境依存性や固有プロファイルの分析からキャリア分子の性質を明らかにした他、新たなDIBを近赤外線域で多数検出することにも成功した。また星間分子C<sub>2</sub>、CNの近赤外線吸収バンドを世界で初めて検出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙における生命の発生過程や惑星系の素となるダストの性質を調べる上で、星間ガス雲中における複雑な有機分子の反応過程や分布は重要である。本研究では、フラレーンやPAHといった巨大な有機分子を調べる道具として期待されているDIBの分子同定に向けて重要な手がかりをいくつか得ることに成功した。本研究を足がかりとしてDIBの同定が成功すれば宇宙における有機分子を探る新たなツールを手に入れることとなり、宇宙化学、宇宙生物学の大きな進展が期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to identify of the carrier molecules of diffuse interstellar bands (DIBs), which are expected to be an important tool to investigate the interstellar organic molecules, I conducted a observational study of DIBs in the near-infrared (NIR) wavelength range, in which the DIBs have not been fully investigated. First, I developed a data reduction pipeline software for the NIR high-resolution spectrograph WINERED, which was mainly used in this study. I collected the near-infrared spectra of a lot of targets, and investigated the environmental dependence of NIR DIBs and its intrinsic profiles. As a result, I succeeded to reveal the properties of the carriers of NIR DIBs. In addition, I also succeeded to detect the NIR absorption bands originated from interstellar C<sub>2</sub> and CN molecules for the first time.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：星間有機分子 赤外線高分散分光 フラレーン 星間物質

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

星間ガス雲に含まれる有機分子は、惑星の材料となるダストの構成物質や生命の“種”として重要な研究分野に位置付けられている。その中で、これまで宇宙空間において観測された中で最もサイズの大きい分子である多環芳香族炭化水素 (PAH) やフラレーン (例:  $C_{60}$ ) は星間空間で起きる分子進化を調べる上で鍵を握る重要な物質であるが、電波による観測は極めて困難である。

星間物質の背景星のスペクトル上に検出される未同定吸収バンドである diffuse interstellar band (DIB) は、星間分子、特に炭素から主に構成される有機分子による電子遷移であると考えられており、特に PAH やフラレーンといった他の波長域では詳しい観測が困難な巨大有機分子についての星間化学反応を調べる重要なツールとなる可能性が期待されている。500 本を超える DIB が見つかっている一方で DIB を生じている物質 (キャリア) は長年一つも同定されてこなかったが、2015 年に近赤外線域の DIB4 本がフラレーンの最安定分子  $C_{60}$  の陽イオン ( $C_{60}^+$ ) による吸収バンドとして同定されたことで DIB による星間化学研究がついに可能となった。

このような背景の中で、研究代表者は本研究課題開始に先立って近赤外線域の DIB の研究を進めてきた。従来 DIB 研究の中心的波長域であった可視光域と比較して、近赤外線域には星間塵による減光の影響が小さく高密度なガス雲や銀河系円盤の広い範囲を見通すことができるといふ観測的なメリットがある。また PAH やフラレーンといった巨大有機分子は多くが近赤外線域に吸収線を生じるためその点でも重要な波長域である。しかし、近年まで近赤外高分散分光器は感度や波長分解能といった点で性能が十分でなく観測は技術的に困難であった。研究代表者は、高感度・高波長分解能のスペクトルを取得可能となる次世代の近赤外高分散分光器 WINERED の開発に参加し、神山天文台荒木望遠鏡に搭載して DIB の観測的研究を行なった(文献)。その初期成果として、WINERED のカバーする波長域 0.91-1.35  $\mu\text{m}$  において過去発見されていた 5 本の DIB に加えて新たに 15 本の DIB を発見することに成功している。これまで技術的に困難であった近赤外線域における DIB の観測的研究が初めて可能となったことを示す大きな成果であり、分光器の性能向上や観測データの蓄積、解析技術の向上により今後大きく発展させることが可能と考え本研究課題を開始した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は  $C_{60}^+$  に続くさらなる DIB のキャリア同定に向けて、特に未開拓である近赤外線 DIB を系統的に調べることであり、具体的には、以下の 3 つのテーマを進めていくことを目的とした。

(1) 近赤外線 DIB の包括的な検出および高精度プロファイルの導出。候補分子の実験室分光データと DIB のスペクトルを比較して分子同定を行うには、広い波長域で微弱な DIB までカバーした DIB のカタログと各 DIB の高精度な吸収線プロファイルが不可欠である。WINERED の高い感度を活かし、近赤外線域の DIB を可視光域に匹敵する高い精度で検出し、さらに 2016 年に導入された WINERED の HIRES モード ( $R = 80000$ ) を用いて高精度なプロファイルを導出する。

(2) 高分散分光データと量子化学モデルプロファイルを用いた DIB キャリアの化学的性質の解明。DIB の固有プロファイルには、分子の極性、サイズ、構造といった情報が反映されており、量子化学モデルを用いたプロファイルフィットによってキャリアの情報を得ることで候補分子に制限をつける。

(3) 大規模サーベイ観測による DIB キャリアの物理的性質の解明。多数の天体について DIB を観測し、DIB の星間ガス雲環境への依存性からキャリアの性質 (イオン化状態や生成過程など) を明らかにする。特に近赤外線の高い透過性を活かして、これまで可視光観測で調べられてこなかった星間減光の強い分子雲・星形成領域のような多様な環境にあるガス雲を網羅的に調べる。

### 3. 研究の方法

WINERED は 0.91-1.35  $\mu\text{m}$  (z', Y, J バンド) を同時にカバーする  $R=28000$  の WIDE モードと、Y または J バンドをカバーする  $R=80,000$  の HIRES モードの 2 つの観測モードを備えている。HIRES モードは本研究の実施期間中にあたる 2016 年夏に開発を概ね終了、試験観測を開始し、2017 年に本格稼働した。本研究では両モードを駆使し延べ 100 天体以上を観測する計画である。当初の計画では、全ての観測データを口径 1.3m の荒木望遠鏡で取得する予定であったが、装置プロジェクトの進展により WINERED は 2017 年よりチリ共和国の La Silla 観測所 NTT 望遠鏡 (口径 3.6m) へと移設されることとなった。大口径化による感度向上により暗い天体の観測が可能になった上、マゼラン雲銀河のような南天でしか観測できない天体が観測可能になった。また、La Silla 観測所は荒木望遠鏡が設置されている神山天文台 (京都市) と比べて湿度が低く標高も高いため、水蒸気による吸収線の影響が大幅に軽減されスペクトルの精度向上が期待できる。特に、計画当初は高精度な測定は困難と想定していた 0.95  $\mu\text{m}$  帯の  $C_{60}^+$  による DIB の観測も移設により可能となった。そのため、計画を変更し荒木望遠鏡での観測に加えて NTT 望遠鏡を用いた観測も実施することとなった。

観測と並行して WINERED 専用のデータ解析プログラムの開発を行った。一般に、高分散分光データの解析は装置特性を考慮する必要があり、加えて近赤外線には大気吸収線や輝線による系統誤差もあるため解析工程は複雑になる。大量に取得される観測データを効率的に処理するた

め、自動解析パイプラインの開発は本研究課題において必須となる。開発を終え次第、観測データの処理を逐次進め、DIBのサーチや測定を行い、各研究テーマの考察を進めていく。

#### 4. 研究成果

##### (1) 近赤外高分散分光データ解析パイプラインの開発

WINEREDの装置特性を考慮した解析パイプラインを開発した。2016年から試験観測を開始したHIRESモードでは、WIDEモードよりもスリット像が検出器上で歪んでいるために従来の解析手法では大きく精度を損なってしまうことがわかった。そのためパイプラインの抜本的な見直しを行い、HIRESモードに対応した解析手法を新たに構築した。また、2017年に行われたNTT望遠鏡へのWINERED移設によって、観測準備期間が従来よりも大幅に短くなり較正データを即座に解析する必要性が生じたため、較正データの自動解析を行うモードも新たに追加した。観測モードによらず高精度なデータを自動的に抽出できる解析パイプラインの開発に成功した。

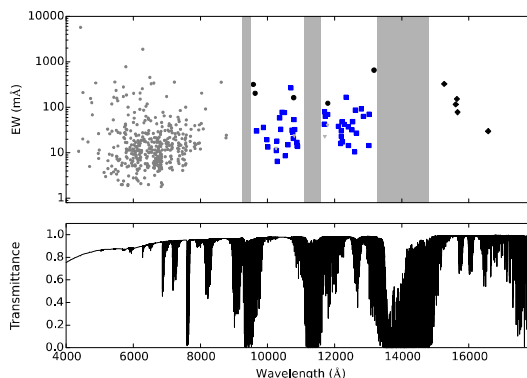


図 1: DIBの強度分布(文献)。WINEREDがカバーする0.91-1.35  $\mu\text{m}$ において新たに本研究で検出したDIBを青点で示している。

##### (2) 近赤外線DIBのサーチ(文献)

星間減光が大きくDIBが非常に強いと期待される天体のスペクトルを取得、解析し、これまで見つかっていなかったDIBをサーチした。WINEREDの波長域0.91-1.35  $\mu\text{m}$ の範囲で新たに39本のDIBを発見した。本研究の以前に我々が同じくWINEREDで発見した15本と合わせて新たに50本以上のDIBを新たに検出することに成功した。本研究成果は近赤外線では最大のDIBのカatalogを提供し、今後実験室分校と協調して進められるであろうキャリア同定作業に重要な役割を果たすことが期待される。

##### (3) 星間ガス雲中の $\text{C}_2$ 、CN分子による近赤外線吸収バンドの初検出(文献)

星間ガス雲中の $\text{C}_2$ 、CN分子によるA-X(0,0)吸収バンドを初めて検出することに成功した。本研究開始当初に想定していた研究テーマではないが、先行研究において $\text{C}_2$ 分子は一部のDIBとよく相関することが示されており本研究課題と深く関連する研究対象である。また、 $\text{C}_2$ 、CN分子の観測によく用いられてきた可視光吸収バンドと比較して、近赤外線吸収バンドは星間減光による影響を受けづらく、また振動子強度が強く検出が相対的に容易になるというメリットがある。本研究では特に $\text{C}_2$ 分子についてWINEREDのHIRESモードを用いて高精度なスペクトルを取得し詳細に分析した。 $\text{C}_2$ 分子の回転分布から星間ガス雲の温度、密度を高精度に推定することに成功した上、同位体化合物 $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ による非常に微弱な吸収線も合わせて検出することに世界で初めて成功した。近赤外線バンドの観測により $\text{C}_2$ 分子について炭素同位体比を制約することが可能であることを示した大きな成果であり、今後の観測の進展により炭素同位体比から $\text{C}_2$ 分子の星間化学反応についてより詳しく理解が進むことが期待される。

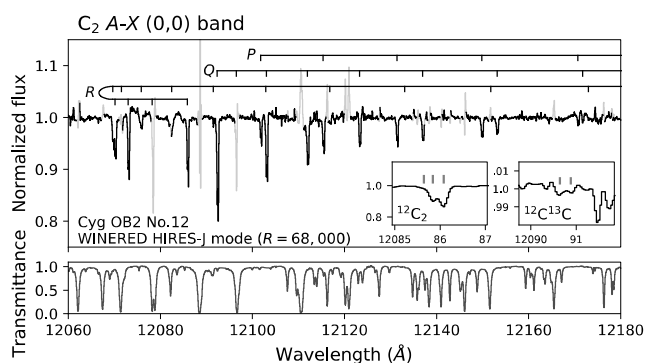


図 2:  $\text{C}_2$  A-X(0,0)バンドのWINEREDスペクトル(文献)。

##### (4) 高分散分光データを用いたDIBプロファイル解析

まずWINEREDのWIDEモードで近赤外線DIBのプロファイルを系統的に調査し、キャリアである分子の回転分布に由来する固有のプロファイルが分解できているDIBの候補を選出した。その結果、特に10697Åに位置しているDIBに分子の回転分布に特徴的な3つの成分からなる固有のプロファイルを見出した。さらに分子の構造やサイズ、回転温度を仮定して吸収プロファイルを計算し、観測されたDIBのプロファイルとの比較からサイズについて制限をつけることに成功した。プロファイルからキャリアの分子構造やサイズといった情

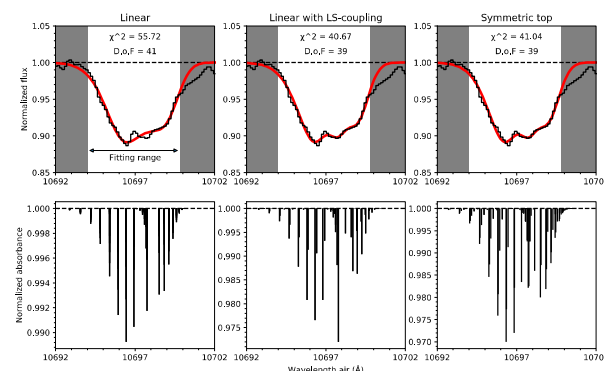


図 3: DIB 10697の高分散プロファイルと分子モデルフィット。

報が得られる DIB は数少なく、本研究で発見した 10697 のプロファイルは将来的なキャリア同定につながる貴重な情報となることが期待される。

#### (5) Cyg OB2 星団における近赤外線 DIB の環境依存性の発見(文献)

Cyg OB2 星団は太陽系から約 1.5kpc 離れた大規模な星形成領域であり、視線上の星間ガスが複雑な構造を持ち、星団内の多数の早期型星による強い星間輻射で照らされていることから DIB の環境依存性を調べる上で重要なターゲットである。Cyg OB2 星団は濃い星間ガス雲によって大きく減光されているが、透過性の高い近赤外線を用いることで初めて系統的かつ高精度な DIB の観測的研究が可能となった。

我々は荒木望遠鏡を用いて星団の 7 天体について高精度なスペクトルを取得し、多数の近赤外線 DIB を検出することに成功した。その結果、検出した全ての近赤外線 DIB について、高密度な分子雲をトレースしていると考えられる  $C_2$  分子の柱密度とは全く相関していないことを明らかにした。この結果は DIB を生じている分子が希薄なガス中に偏在していることを示している。また、10504Å に位置している DIB “ 10504 ” について他の近赤外線 DIB の強度と相関していないことを発見した。

10504 は平均的な星間ガス雲中では他の DIB とよく相関していることが我々の過去の研究で明らかになっており、Cyg OB2 星団で見られた 10504 の特異性は星団中の強い星間輻射場によりキャリアが破壊された結果引き起こされたものと考えられる。一方で、強度が互いに非常に強く相関する DIB のグループも見つかった。このグループに属する DIB は星間輻射によって破壊されない安定した分子であり、また互いに非常に似通った分子的性質、起源を持つものと推測される。本研究で得られた成果は、今後 DIB のキャリアを同定する上で手がかりとなるものと期待される。

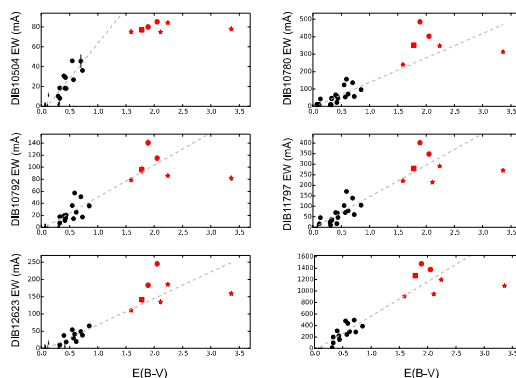


図 4: Cyg OB2 星団において検出された主要な近赤外線 DIB の強度(EW)-色超過のプロット(文献)。10504(左上)に注目すると平均的な星間ガス雲(黒点)中では比例関係にあるが、Cyg OB2 星団(赤点)ではほぼ一定であることがわかる。

#### < 引用文献 >

- Hamano et al. 2015, ApJ, 800, 137
- Hamano et al. 2018, Proceedings of the First BINA workshop, Vol. 87, 276-280
- Hamano et al. 2019, ApJ, 881, 143
- Hamano et al. 2016, ApJ, 821, 42

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hamano Satoshi, Kobayashi Naoto, Kawakita Hideyo, Ikeda Yuji, Kondo Sohei, Sameshima Hiroaki, Arai Akira, Matsunaga Noriyuki, Yasui Chikako, Mizumoto Misaki, Fukue Kei, Izumi Natsuko, Otsubo Shogo, Takenaka Keiichi	4. 巻 87
2. 論文標題 A Survey of Near-infrared Diffuse Interstellar Bands	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin de la Society Royale des Sciences de Liege, in Proceedings of the First Belgo-Indian Network for Astronomy & Astrophysics (BINA) workshop	6. 最初と最後の頁 276-280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25518/0037-9565.7702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hamano Satoshi; Kobayashi Naoto; Kondo Sohei; Sameshima Hiroaki; Nakanishi Kenshi; Ikeda Yuji; Yasui Chikako; Mizumoto Misaki; Matsunaga Noriyuki; Fukue Kei; Yamamoto Ryo; Izumi Natsuko; Mito Hiroyuki; Nakaoka Tetsuya; Kawanishi Takafumi; Kitano Ayaka; Otsubo Shogo; Kinoshita Masaomi; Kawakita Hideyo	4. 巻 821
2. 論文標題 Near Infrared Diffuse Interstellar Bands Toward the Cygnus OB2 Association	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/821/1/42	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamano Satoshi, Kawakita Hideyo, Kobayashi Naoto, Takenaka Keiichi, Ikeda Yuji, Matsunaga Noriyuki, Kondo Sohei, Sameshima Hiroaki, Fukue Kei, Yasui Chikako, Mizumoto Misaki, Otsubo Shogo, Watase Ayaka, Yoshikawa Tomohiro, Kobayashi Hitomi	4. 巻 881
2. 論文標題 First Detection of A-X (0,0) Bands of Interstellar C2 and CN	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2e0f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計15件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 濱野哲史
2. 発表標題 Diffuse Interstellar Bands: Cosmic Shadow of Interstellar Molecules
3. 学会等名 Cosmic Shadow 2018 - ケーサー吸収線系でみる宇宙-
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱野哲史
2. 発表標題 NIR Diffuse Interstellar Bands Survey with WINERED
3. 学会等名 WINERED研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱野哲史
2. 発表標題 WINERED Pipeline: Current status, Problems & Upcoming Updates
3. 学会等名 WINERED研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱野哲史
2. 発表標題 Magellanic Clouds with Magellan: Complex Molecules in Low Metallicity Environment
3. 学会等名 WINERED研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹中慶一, 濱野哲史, 河北秀世, 小林尚人
2. 発表標題 DIB 10697のキャリアへの制限
3. 学会等名 WINERED研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱野哲史, 近藤莊平, 鯨島寛明, 福江慧, 新井彰, 河北秀世, 大坪翔悟, 竹中慶一, 渡瀬彩華, 池田優二, 小林尚人, 松永典之, 安井千香子
2. 発表標題 近赤外線高分散分光器WINERED: データ解析パイプラインの開発
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Hamano
2. 発表標題 Survey of Near-infrared Diffuse Interstellar Bands
3. 学会等名 Fullerenes in Space Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Hamano, Naoto Kobayashi, Hideyo Kawakita, Keiichi Takenaka
2. 発表標題 Near-infrared spectroscopic study of interstellar free radicals
3. 学会等名 34th International Workshop of Free Radicals (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱野哲史, 河北秀世, 竹中慶一, 池田優二, 近藤莊平, 鮫島寛明, 福江慧, 新井彰, 大坪翔悟, 渡瀬彩華, 小林尚人, 松永典之, 安井千香子
2. 発表標題 近赤外線高分散分光器WINERED: C2, CN 分子バンドの検出
3. 学会等名 日本天文学会2017年度秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹中慶一, 濱野哲史, 河北秀世, 池田優二, 近藤莊平, 鮫島寛明, 福江慧, 小林尚人, 松永 典之, 安井千香子
2. 発表標題 近赤外線高分散分光器WINERED: DIB 10697のキャリア分子への制限
3. 学会等名 日本天文学会2017年度秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hamano Satoshi
2. 発表標題 A Survey of Near-infrared Diffuse Interstellar Bands
3. 学会等名 IAU Symposium 332: Astrochemistry VII - Through the Cosmos from Galaxies to Planets (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hamano Satoshi
2. 発表標題 A Survey of Near-infrared Diffuse Interstellar Bands
3. 学会等名 1st BINA Workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年



1. 発表者名 Hamano Satoshi
2. 発表標題 A Survey of Near-infrared Diffuse Interstellar Bands
3. 学会等名 ISM2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hamano Satoshi
2. 発表標題 A Survey of Near-infrared Diffuse Interstellar Bands
3. 学会等名 近赤外線高分散分光観測で探る恒星物理 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 濱野哲史
2. 発表標題 近赤外線高分散分光器 WINERED による微弱な DIB の探査
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----