

かなた望遠鏡における重力波対応天体検出を見据えた
可視近赤外バンドの限界等級評価

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B155073 西中勇貴

主査：川端弘治

副査：小寫康史

2019年2月28日

概 要

近年、LIGO/Virgo によって中性子星やブラックホールからなる連星の衝突合体起源の重力波が検出されている。これら重力波源の電磁波対応天体観測によって現象の詳細な物理情報を得たい。重力波の位置推定精度は約 30 平方度程度と広めで、重力波源天体の同定は容易ではないが、重力波推定領域内の近傍母銀河を順次観測することで効率良く重力波対応天体を同定できると期待される。同定後、可視・近赤外線で重点的にフォローアップ観測を行うことで、重力波対応天体の放射機構などを調べることも可能となる。広島大学かなた望遠鏡でこのような同定作業をリアルタイムで行うため、自動観測・解析システムが最近構築された。本研究ではこの自動解析データの性能を評価するため、実データから合成画像データの限界等級を求め、露出時間やアパーチャー (星像領域サイズ) との関係性を調べた。その結果、可視 R バンドの限界等級は 500 秒積分で典型的に 19.3 等であり、アパーチャーと限界等級が期待通りに反相関することを確認でき (図 1)、また星像の広がり具合から到達限界等級をある程度推定できることを見出した。今後、これらの結果を自動観測システムへ反映させ、同定観測をより効率よく進められるようにする。

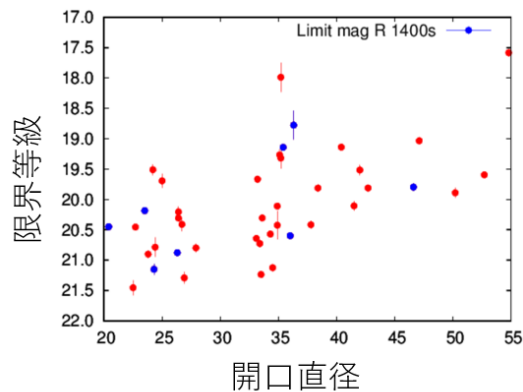


図 1: reference picture

目次

第 1 章	序論	3
1.1	重力波	3
1.1.1	重力波放出天体	3
1.1.2	重力波検出器	3
1.2	重力波源からの電磁波放射	4
1.3	J-GEM	4
1.4	GW170817	5
1.5	本研究の目的	8
第 2 章	観測とデータリダクション	10
2.1	かなた望遠鏡	10
2.2	HONIR	10
2.3	解析手順	11
2.4	限界等級の定義	12
2.5	限界等級の算出	13
2.6	解析・観測の自動化	13
2.7	解析の自動化	14
第 3 章	結果および考察	15
3.1	使用したデータ	15
3.2	露出時間と測光原点	15
3.3	露出時間と限界等級	16
3.4	アパーチャーサイズと限界等級	17
3.5	考察とまとめ	20

図 目 次

1	reference picture	1
1.1	コンパクト天体同士の連星での重力波を放出するイメージ図 [1]	3
1.2	J-GEM の世界的観測網 [16]	5
1.3	GW170817 の到来方向の最終マップと光学対応天体 [7]	5
1.4	GW170817 の重力波及び様々な電磁波による観測を時系列で表したもの [7]	6
1.5	J-GEM で観測した GW170817 の対応天体の図 [8]	6
1.6	J-GEM 観測で得られた GW170817 対応天体の可視近赤外域の光度曲線 [8]	7
1.7	Kilonova モデルの光度曲線と観測値を比較したもの [9]	7
1.8	GW170817 の光度曲線モデルから推定される放出物質の空間分布 [9]	8
1.9	GW170817 の電波観測に基づいたジェット放出モデル [11]	8
2.1	かなた望遠鏡の重力波対応天体自動観測システムのフローチャート	13
3.1	H バンドにおける測光原点と露出時間の関係	15
3.2	J バンドにおける測光原点と露出時間の関係	15
3.3	Ks バンドにおける測光原点と露出時間の関係	16
3.4	R バンドにおける測光原点と露出時間の関係	16
3.5	H バンドにおける限界等級と露出時間の関係	17
3.6	J バンドにおける限界等級と露出時間の関係	17
3.7	Ks バンドにおける限界等級と露出時間の関係	17
3.8	R バンドにおける限界等級と露出時間の関係	17
3.9	H バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係	18
3.10	J バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係	18
3.11	Ks バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係	18
3.12	R バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係	18
3.13	H バンドにおける露出時間 400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	19
3.14	H バンドにおける露出時間 450 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	19
3.15	J バンドにおける露出時間 400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	19
3.16	J バンドにおける露出時間 1050 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	19
3.17	Ks バンドにおける露出時間 400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	19
3.18	Ks バンドにおける露出時間 450 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	19
3.19	R バンドにおける露出時間 1400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係	20

第1章 序論

1.1 重力波

質量をもった物体が存在するだけでそのまわりの時空は歪む。さらにその物体が軸対称ではない運動をすると、この時空のゆがみが光速で伝わる。これを重力波と呼ぶ。重力波は重力相互作用によって発生するため非常に微小である。現在の技術で検出が可能な重力波放射源は、高密度で非常に大きな質量をもつ中性子星やブラックホール同士の連星系および衝突合体であることが示唆されている。

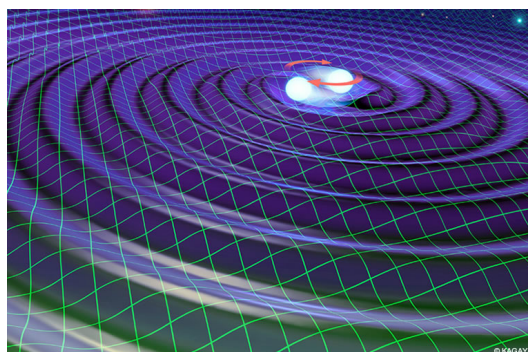


図 1.1: コンパクト天体同士の連星での重力波を放出するイメージ図 [1]

1.1.1 重力波放出天体

重力波放出天体は中性子星およびブラックホール同士の連星系および衝突合体であることが示唆されている。中性子星連星または中性子星とブラックホール連星の合体の場合、可視赤外線領域においても電磁波が放射されることが予想され、光学望遠鏡による観測も可能である。しかしながら、重力波望遠鏡の LIGO/Virgo の 2 台での重力波到来方向の位置決定精度が約 30 平方度であり（2017 年 8 月；O2 ラン後期の例）、重力波放出天体の観測は容易ではない。

1.1.2 重力波検出器

LIGO

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) は米国・ルイジアナ州のリビングストンとワシントン州のハンフォードの 2 つの観測所に設置されている重力波検出器である。L 字型構造をしたレーザー干渉計であり、リビングストンのものは腕の長さが 4 km、ハンフォードには腕の長さが 2 km と 4 km の 2 機が設置されている。反射鏡を用いて腕の中で光を何度も反射させることにより、実効長約 300

km を実現している。

Virgo

Virgo はイタリア・ピサのカシーナに設置されている重力波望遠鏡である。直交する基線長 3 km の巨大なレーザー干渉計であり、反射鏡により実効長 120km を実現している。

KAGRA

KAGRA は岐阜県の神岡鉱山内に建設中である重力波望遠鏡である。KAGRA は感度向上のため、2つの挑戦を行っている。1つは地下 200m 以深という極めて地面振動が少なく、温度・湿度の安定な環境に設置するということである。地面は風や波による地球自身の固有な振動で常に振動している。この振動は地下にもぐることで低減される。このことは重力波望遠鏡を長時間運転し、観測する上で大きな利点となっている。もう1つは検出器にサファイアという光学素子を使用し、かつそれをマイナス 253℃まで冷却することで検出器の感度に影響する熱雑音をさらに低減することを目指している [2]。

1.2 重力波源からの電磁波放射

中性子星同士の合体では r-process (rapid-process) と呼ばれる速い中性子捕獲現象が生じる。[6] 原子番号の大きい不安定な原子核を持つ放射性元素が生み出され、この物質が持つ放射性エネルギーにより電磁波が放射されると考えられている。この爆発現象は kilonova と呼ばれており、理論モデルに基づいたシミュレーションにより、以下の特徴を持つとされる。[3, 4]

- 明るく輝いているタイムスケールは 1 週間程度
- 放射のピークは近赤外線領域
- 可視光領域では急速に減光し、近赤外線領域では緩やかに減光

1.3 J-GEM

J-GEM(Japanese collaboration for Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up observation) は日本で組織された重力波検出フォローアップのための電磁波観測網である。重力波望遠鏡の LIGO/Virgo は、それぞれの検出器に届く重力波到達時間の差から重力波源の位置を決定する。しかしながら、その位置決定精度は 3 台を合わせて 30 平方度程度で、日本で建設中の KAGRA が加わると 10 平方度程度まで改善される。しかし 1 つの可視赤外線望遠鏡の視野が約 0.01-1 平方度ということを考慮すると、これらは広大な領域となり、重力波の到来領域には多数の天体が存在しうる。そこで J-GEM では日本の各研究機関が協力し、それぞれが所有する世界各地の望遠鏡を用いることで重力波到来領域を網羅的に観測することで、効率よく重力波源の電磁波対応天体を特定する。さらには多波長、多モード観測を行うことにより、電磁波領域での放射メカニズムを明らかにすることが J-GEM の目的である。[5, 6]

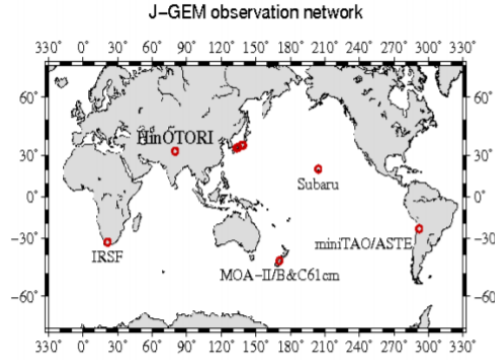


図 1.2: J-GEM の世界的観測網 [16]

1.4 GW170817

GW170817 は、2017 年 8 月 17 日に、LIGO と Virgo によって検出された重力波イベントの名称である [7]。図 1.3 は LIGO/Virgo によって検出された重力波の到来方向の確率マップであり、併せて Fermi/GBM のガンマ線バースト検出の確率マップを表示している。これにより、重力波と同期してガンマ線が検出され、重力波源の電磁波放射が初めて確認された。また、図 1.3 中の右側に、可視光で同定された突発天体および母銀河の画像を示している。この重力波の検出の後、世界中の観測施設や機関によって対応する天体の検出が行われ、ガンマ線、X 線、可視光、近赤外線、電波の波長域の電磁波で重力波源電磁波対応天体が同定された。図 1.4 は重力波検出後の各電磁波観測望遠鏡・検出器の観測・検出のタイムスケールを表している。重力波検出後 1.7 秒後にガンマ線観測衛星の Fermi/GBM および INTEGRAL/SPI にてガンマ線が検出された。そして 10.86 時間後には可視光望遠鏡である 1M2H Swope によって、可視光帯域で天体が同定された。X 線および電波は、それから遅れること約 10 日後に、X 線天文衛星 Chandra および電波望遠鏡の J VLA によって検出された。

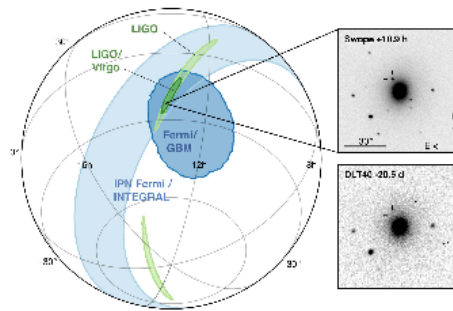


図 1.3: GW170817 の到来方向の最終マップと光学対応天体 [7]

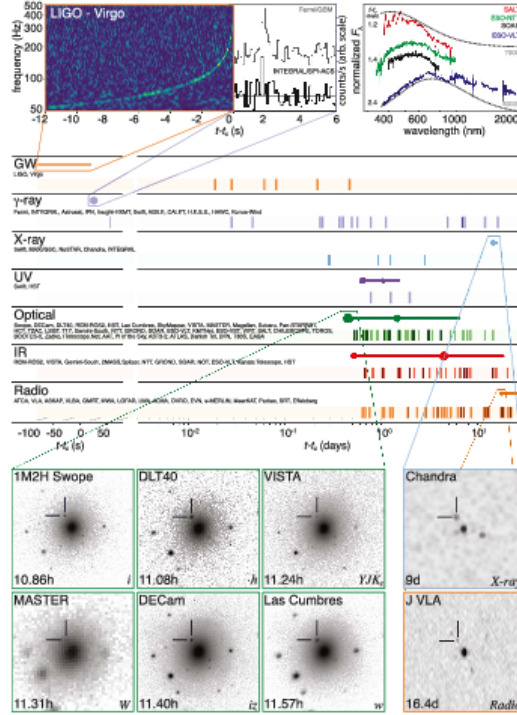


図 1.4: GW170817 の重力波及び様々な電磁波による観測を時系列で表したものの [7]

J-GEM でも重力波 GW170817 の電磁波対応天体の検出を目指して観測が行われ、広島大学かなた望遠鏡、ハワイにあるすばる望遠鏡、南アフリカにある 1.4-m 望遠鏡である IRSF、ニュージーランドにある 1.8-m MOA II 望遠鏡、B&C 61cm 反射望遠鏡などによって観測が行われた。図 1.5 は IRSF およびすばる望遠鏡によって観測された GW170817 の可視光対応天体とその母銀河を表している。重力波検出後 1 日から 7 日にかけて天体が暗くなっており、急激な増光・減光を示した。図 1.6 の上図は GW170817 の可視 (V, R, g, r, i, z バンド) および近赤外線 (J, H, K バンド) での光度曲線を、また下図はその色変化を表している。可視光光度は爆発後急激に減光しているが、近赤外線光度は爆発の 1 3 日後に光度のピークを迎えその後減光した [8, 9, 10]。

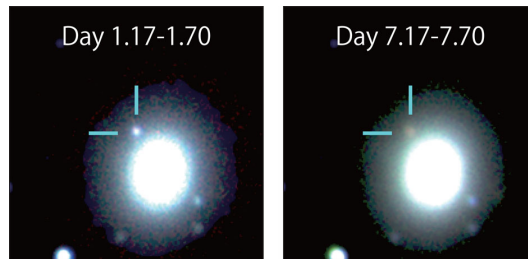


図 1.5: J-GEM で観測した GW170817 の対応天体の図 [8]

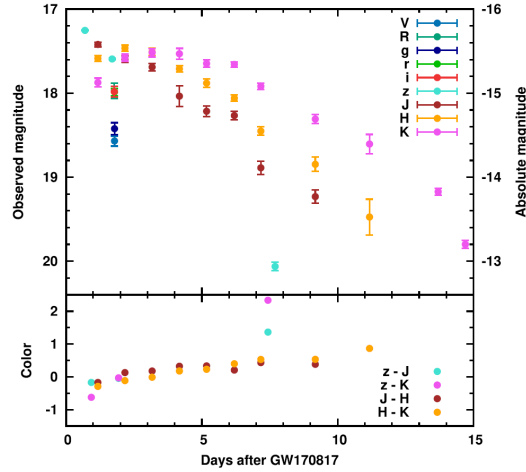


図 1.6: J-GEM 観測で得られた GW170817 対応天体の可視近赤外域の光度曲線 [8]

それまでに検出された重力波は、遠方におけるブラックホール連星の合体によって放出されることで発生したものであったのに対して、GW170817 は中性子星-中性子星連星の合体によって放出された、比較的近いところで発生したイベントであった。

この天体の可視光対応天体について、可視光光度は 1 日で 1 等の急速に減光することを示した一方で、近赤外線光度は 3 日で増光して 8 日かけて 1 等減光するような緩やかな増光・減光を示した。これは r-process によって放射される kilonova モデルで良く説明することができる [8, 9]。図 1.7 は異なる電子状態における kilonova の爆発モデルによって計算された光度曲線と観測された光度曲線を表している。観測された光度曲線は kilonova モデルによっておおよそは説明できる。一部再現できない部分は、爆発の初期と後期で電子状態が異なることを示しており、爆発の異方性によるモデルが提唱されている (図 1.8)。

また GW170817 で観測された電波、X 線、ガンマ線は中性子星連星の合体によって発生したジェットからの放射であることが示唆された。特に電波帯域では天体の超光速運動が観測され、ジェットの直接的な証拠であることが示唆される [11]。また X 線および電波の検出の遅れは、ジェットが 5 度以下と細く絞られているのに対して、地球からの視線方向とジェットの方向が 14 度から 28 度ずれているときに、うまく説明することができる。図 1.9 は中性子星連星合体後に生成されたジェットの想像図であり、ジェット軸に対してずれた方向に地球が存在している。

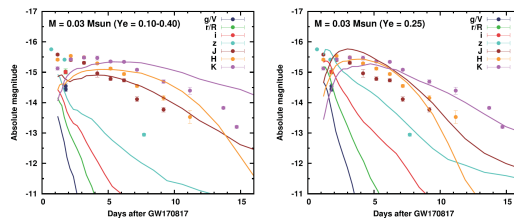


図 1.7: Kilonova モデルの光度曲線と観測値を比較したもの [9]

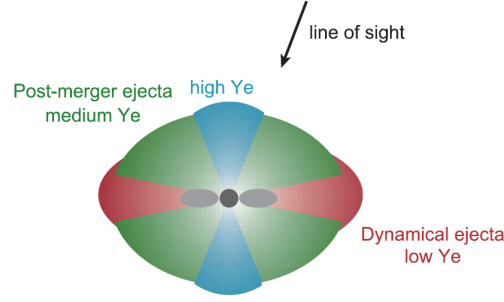


図 1.8: GW170817 の光度曲線モデルから推定される放出物質の空間分布 [9]

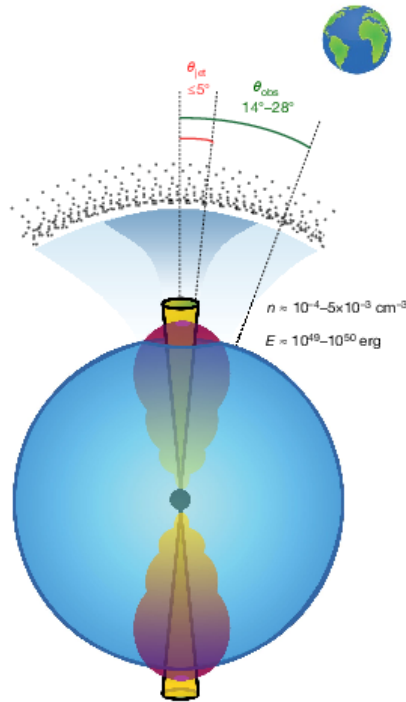


図 1.9: GW170817 の電波観測に基づいたジェット放出モデル [11]

1.5 本研究の目的

重力波対応天体は突発的に増光する天体であり、可視光帯域において12日のタイムスケールで急速に減光する。そのため素早く対応天体を観測し、重力波の電磁波対応天体であると同定しなければならない。J-GEM に所属しているかなた望遠鏡は対応天体の早期同定を行うために、観測・解析をリアルタイムで行い、重力波アラートに即した候補母銀河の自動観測・解析システムが最近構築された。かなた望遠鏡で重力波対応天体の早期検出を目指すにあたり、現在の望遠鏡の性能を理解することは重要となる。重力波のアラートで推定距離が報告されるので、重力波対応天体で期待される等級が概算できる。見

積もられた天体の推定等級と、観測時の環境（天候、シーイング、月のフェーズによる背景光強度当）を考慮することによって、より実効的な観測計画を即座に決定することができると期待される。そのためには、露出時間と各バンドの限界等級との関係性を様々な環境下で調査しておくことが求められる。

本研究では、かなた望遠鏡の HONIR で得られた可視、近赤外領域の観測データを元に限界等級を求め、自動解析システムによる解析データの性能を評価した。さらに限界等級と露出時間やシーイング（星像の広がり具合）との関係を調べ、自動観測システムへフィードバックすることを目指した。

第2章 観測とデータリダクション

2.1 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は広島大学宇宙科学センター所有の東広島天文台に設置されている口径 1.5m の可視近赤外望遠鏡である。駆動速度が 1.5 m 級の望遠鏡としては世界トップレベルであり、突発天体の即時観測を可能としている。かなた望遠鏡の仕様を表 2.1 に示す。

項目	仕様
光学系	リッチー・クレチアン系
主鏡の有効径	1500mm
主鏡材	ULE ガラス
合成 F 値と焦点距離 f	$F/12.2$ $f=18,300\text{mm}$
視野	直径 15 分角
焦点面スケール	11.271 秒角/mm
架台	経緯台
搭載可能重量	カセグレン焦点 500kg ナスミス焦点 1000kg

表 2.1: かなた望遠鏡の諸元

2.2 HONIR

HONIR (Hiroshima Optical Near-InfraRed camera) とはかなた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられている可視赤外同時撮像装置のことである。HONIR は可視 1 バンド、近赤外 2 バンドの 3 バンドで同時に観測が可能な撮像装置であり、撮像モード、分光モード、偏光撮像・偏光分光モードを有している。HONIR の性能を表 2.2 に示す。

項目	可視バンド	赤外バンド
波長範囲 [μ m]	0.4-1.0	1.15-2.4
フィルター	B,V,Rc,Ic,Y	Y,J,H,Ks
視野	10' $\times$ 10'	10' $\times$ 10'
検出器	CCD	HgCdTe (VIRGO)
検出器のピクセル数	2048 $\times$ 4096	2048 $\times$ 2048
ピクセルサイズ [秒/pix]	0.294	0.295
検出器サイズ [mm]	3.72 $\times$ 61.44	40.96 $\times$ 40.96

表 2.2: HONIR の諸元

2.3 解析手順

フォローアップシステムによって取得された重力波候補天体の画像は fits ファイルの形で保存される。この出力されたまま、加工されていない状態の画像のことを生データと呼ぶ。生データが持つ画像中の各ピクセルには、天体や背景スカイの光量に応じたカウント以外にも、バイアスやダークなどの情報を必ず含んでしまう。そのため解析を行う前に一次処理、スカイ引き、WCS 貼り付けという画像処理を行い、天体の情報のみのカウントをもち、天球座標の対応付けが済んだ画像に加工する必要がある。

1 次処理

一次処理とは観測装置起因のバックグラウンドであるオーバースキャン、バイアス、ダーク、フラットを生データから取り除く処理のことをいう。各要素補正用のデータを作成し、それを用いて除去する。

オーバースキャン処理

オーバースキャンとは、電荷をピクセル単位で順次転送して読み出す CCD において、実際に存在するピクセル数よりも多く転送して読み出したカウントを埋め込んだ画像上の領域のことを呼ぶ。この領域のピクセルのカウントには、天体からの光による成分は載らずに、後述のバイアス成分のみのカウントが載る。よって、この領域は、天体からの光が届いているピクセルのバイアス補正の一部に使用したあと、切り取る。このことをオーバースキャン処理とよぶ。

バイアス・ダーク処理

バイアスとは、読み出しカウントがノイズなどで 0 にならないように読み出しの際に印加している電圧により生じるカウントである。ダークとは、検出器内の電子の温度に応じた格子振動によって生じる暗電流、又はそれにより生じるカウントのことである。これらのカウントを生データから差し引くことをバイアス・ダーク処理とよぶ。

フラット割り

検出器の感度は各ピクセルによって多少異なる。また、その望遠鏡の光学系の非一様性も大きく反映される。このピクセルごとの感度の差異を補正するために行うのがフラット処理である。かなた望遠鏡ではドー

ムフラットと呼ばれる望遠鏡に一樣な光を入射させることでフラットを取得する方法を採用してフラット処理を行う。

セルフスカイフレーム作成と差し引き

生データには1次処理で除去したバックグラウンド以外にも、大気による市街光の散乱光（主に可視光領域）や上層大気の自発光（主に近赤外線領域）の影響により背景に広がって載っているバックグラウンドがあり、このバックグラウンドをスカイと呼ぶ。目標天体を観測するとき何秒角かずらして複数枚撮像するディザリング観測を行いピクセルごとに中央値をとることで、天体によるカウントを取り除いたスカイ画像を作成することができる。このスカイ画像を引くことでスカイ成分を差し引く。

WCS 貼り付け・等級原点決め

WCS(World Coordinates System)とは天球での位置を表す座標系で、赤道座標で表される。赤緯 (Declination:DEC) は度単位で表され、赤経 (Right Ascension:RA) は時単位で表される。地球の赤道を天球面に投影したものを天の赤道とよび、赤緯 0° である。また地軸を北極方向、南極方向に延長し天球に交わる点を天の北極、天の南極と呼び、それぞれ赤緯 90° 、 -90° である。赤経は春分点を基準（赤経0時）として6時、12時、18時はそれぞれ順に夏至点、秋分点、冬至点である。本研究の目標天体である重力波対応天体は短い期間で急増光、急減光する。そのため撮像を行った画像にWCSを貼り付け、サーベイされている同じ赤経赤緯座標のカatalogと比較して突発天体の有無を確認する。

2.4 限界等級の定義

アパーチャー測光

天体のカウントを測定する方法の一つとしてアパーチャー測光がある。アパーチャー測光では天体の重心からある開口半径の円領域のピクセルのカウントを積分することで天体のカウントを見積もる。この積分領域の直径をアパーチャーとよび、一般的にアパーチャーは $2.5\text{--}3.0\text{FWHM}$ を取ることが多い。

測光原点

望遠鏡で撮像された天体の等級を調べるために見かけの等級が正確に定まっている星（標準星）のデータを用いる。標準星の等級を元に、撮像された天体の1カウントが何等級に相当するかを求める。この1カウントあたりの明るさを測光原点と呼ぶ。測光原点は式で求められる。

$$m_0 = m + 2.5 \log(C) \quad (2.1)$$

m_0 が測光原点、 m が（既知の）等級、 C がアパーチャー測光で得られた星の総カウントである。

限界等級

一般的に、ある観測において、ぎりぎり検出できるような暗さの天体の等級を、限界等級と呼ぶ。実際には、天体像が認められない背景スカイ光しか載っていない領域において、星像と同じアパーチャー内のスカイのカウント値 C を、多数のスカイ領域で求めて、その標準偏差 σ を求めて、その $N(=1-10)$ 倍のカウントに対応する等級のことを限界等級とすることが多い。これを式で表すと、以下のように書くことができる。

$$m_{lim} = -2.5 \log(N\sigma) + m_0 \quad (2.2)$$

本研究では $N=3$ を採用し、スカイカウント値の標準偏差の 3 倍に対応する等級を限界等級と定義する。

2.5 限界等級の算出

前節で述べた限界等級を、以下の手順で算出する。

1. かなた望遠鏡で撮像された天体画像のセットに対し、一時処理を施したフレームを作成する。
2. SExtractor を用いて、各フレームに写り込んでいる星々をアパーチャー測光し、そのカウントと、SDSS や PanStarrs, 2MASS カタログに掲載されている等級とを比較することで、各フレームにおける測光原点（の平均値）を求める。
3. 測光に用いたアパーチャーを同じ径を持つ円（パッチ）を、各フレーム中の星が写っていないスカイ領域に、互いに重ならないように 2000 個ばらまいて、各パッチ内でのカウントを求め、その標準偏差 σ を求める。その際、平均的な星像の半値幅やスカイレベルのカウントなど、各フレームの特性値も求めおく。
4. 3 で求めた σ 値から限界等級を算出する。

2.6 解析・観測の自動化

かなた望遠鏡の HONIR における重力波天体のフォローアップシステムについて、フローチャートを用いて述べる。

1. フローチャート

自動観測は、図 2.1 に示した流れで進められる。LOGO/Virgo からのアラートを受け、銀河リストを作成し、順次観測するようになっている。

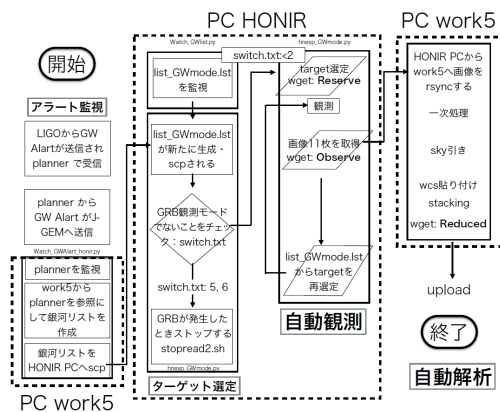


図 2.1: かなた望遠鏡の重力波対応天体自動観測システムのフローチャート

2. Listener.py

重力波望遠鏡で重力波を検出すると、まず LIGO/Virgo の重力波アラートデータベースである GraceDB に該当するイベントの検出情報と、関連する情報 (重力波推定位置、重力波信号の有意度、近傍銀河リストなど) が登録される。そして、世界的な突発天体情報共有ネットワークである GCN (Gamma-ray burst Circular Network) に情報が流れる。GCN は元々ガンマ線バースト用のネットワークであったが、重力波イベント用にも整備されている。J-GEM では GCN を通じて配信された重力波アラートを受け取り、GraceDB にアクセスし、重力波到来方向を推定した確率分布にしたがって近傍銀河のリストを作成する。このとき、重力波到来方向を推定した確率密度が一番高いものから 200 個までの銀河のリストを流すプログラムが Listener.py である。

3. HONIR での重力波フォローアップ

HONIR では重力波天体の観測システムの自動化がなされている。Listener.py によって作成された銀河リストを読み込み hnexp.GWmode.py により重力波天体の観測を行う。

観測リスト内のすべての銀河の観測を開始し、望遠鏡のパラメータを変更して撮像を行い 1 つの銀河を撮像し終わると、次の銀河の観測を開始するループを繰り返すようになっている。リスト全ての銀河の観測を終えたらプログラムは終了する。

2.7 解析の自動化

HONIR では観測された重力波対応天体の解析を行う際の画像処理が自動化されている。Reduction.py を行うことにより、一次処理、スカイ引き、WCS 貼り付けが行われ天体の情報のみの画像を作成できる。本研究は、最近構築されたこの自動解析システムを、実際に得られたデータに適用して進めていく。

第3章 結果および考察

3.1 使用したデータ

2018年10月17日から11月29日までにかねた望遠鏡のHONIRで取得された超新星爆発の観測データを用いて性能評価を行った。それらの観測データを表3.1にまとめている。ひとつの天体に対して複数枚観測を行い、それらを合成した画像データに対して限界等級の計算を行った。測光原点および限界等級の計算は各日にちの各天体、各観測バンドでの合成画像に対して行った。

表3.1の結果から、同一の天体、同一のバンドであっても日付が異なると限界等級、測光原点の値が異なることがわかる。これは撮像した日の天候によるものと考えられる。また、露出時間が長くなるにつれて、限界等級の値も大きくなり、より深いところまで観測が可能になることがわかる。これらについて、次節以降で考察する。

3.2 露出時間と測光原点

露出時間と測光原点の関係性を示した。いずれのバンドにおいても露出時間と測光原点の間に相関があった。また可視光Rバンドでの露出時間と測光原点の関係は、近赤外バンドに比べてばらつきが大きく、可視光バンドでは露出時間と測光原点の反相関関係が近赤外線バンドに比べて弱いことがわかった。測光原点は定義式(2.1)から観測された1カウントでの等級を表している。そのためこの反比例関係は露出時間が長くなると観測される1カウントの等級が深くなる、つまり1カウントで暗い天体まで観測できることを表している。今回の解析では複数の画像を平均することで、合成画像を作成している。そのため露出時間に比例して画像のノイズ成分が減る。これにより、画像での1カウントに相当する等級が大きくなるため、露出時間に相関して測光原点が増加すると考えられる。

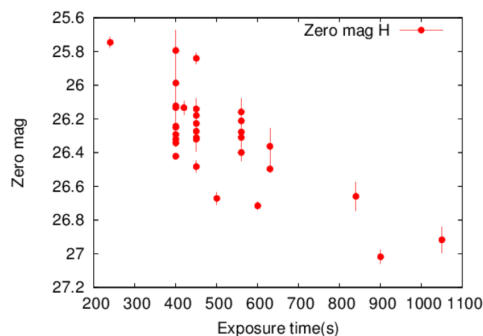


図 3.1: H バンドにおける測光原点と露出時間の関係

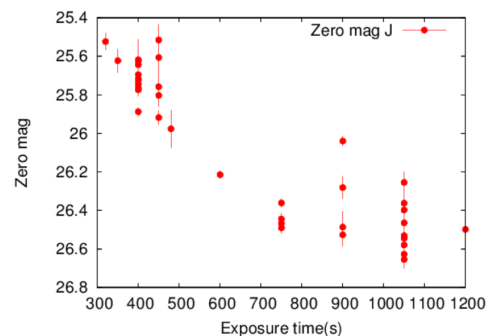


図 3.2: J バンドにおける測光原点と露出時間の関係

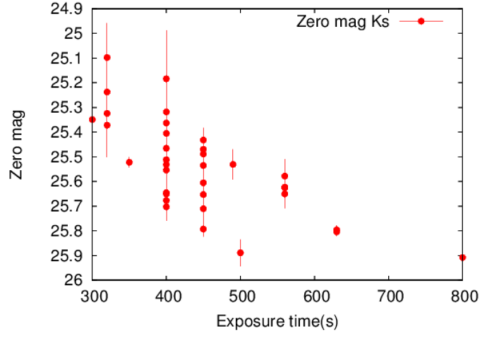


図 3.3: Ks バンドにおける測光原点と露出時間の関係

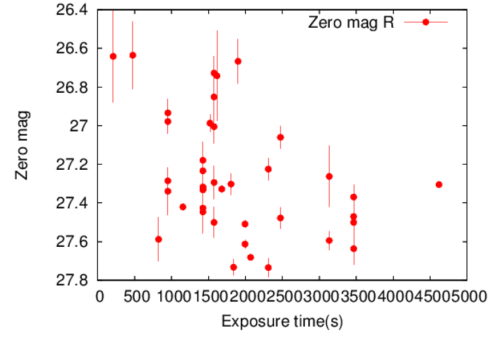


図 3.4: R バンドにおける測光原点と露出時間の関係

3.3 露出時間と限界等級

図 3.5-3.8 に露出時間と限界等級の関係を示した。可視 R バンド、近赤外 J、Ks バンドでは露出時間と限界等級の間に相関があり、これでは露出時間が長くなるとより暗い天体の観測が可能となることを表している。ノイズ成分には、読み出しノイズ、バイアスノイズ、暗電流ノイズ、フラット処理におけるフラットフレームを再現しきれないことによる系統的なノイズ、スカイノイズが考えられる。読み出しノイズ、バイアスノイズ、フラットフレームの系統的ノイズは露出時間に依存しない。一方で暗電流ノイズとスカイ成分による統計ノイズは露出時間の平方根に比例する。露出時間 t が大きくなると、天体信号 S は比例して大きくなるの ($S \propto t$) に対して、上記ノイズ成分は変わらない（読み出しノイズ、バイアスノイズ、フラット処理における系統的ノイズ）か、または時間の平方根に比例して ($N \propto \sqrt{t}$) 増加する（暗電流ノイズ、スカイノイズ）。そのためシグナルノイズ比 (SN 比) は露出時間 t の 0.5 乗で増加する ($S/N \propto \sqrt{t}$)。今回は限界等級を SN 比が 3 となる天体であると定義しているため、露出時間 t 、シグナル S 、ノイズ N 、 $S_{lim}/N_{lim} = 3$ とすると、限界等級 m_{lim} は

$$\begin{aligned}
 m_{lim} &= -2.5 \log_{10} S_{lim} \\
 &= -2.5 \log_{10} 3 - 2.5 \log_{10} N_{lim} \\
 &\propto -2.5 \log_{10} t
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

という関係式が成り立ち、限界等級は露出時間 t の対数に比例することが予想される。実際に図 3.6-3.8 ではばらつきは大きいものの、露出時間に対して系統的に限界等級の値が大きくなっていることがわかる。しかし、近赤外 H バンドでは他のバンドに比べて相関性が小さかった。

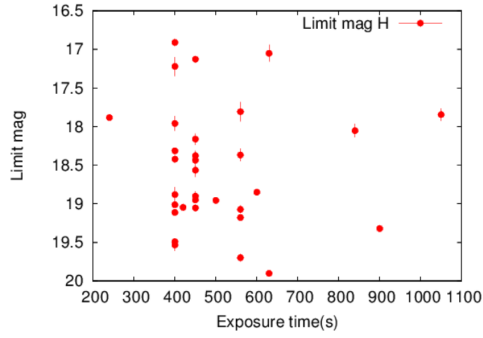


図 3.5: H バンドにおける限界等級と露出時間の関係

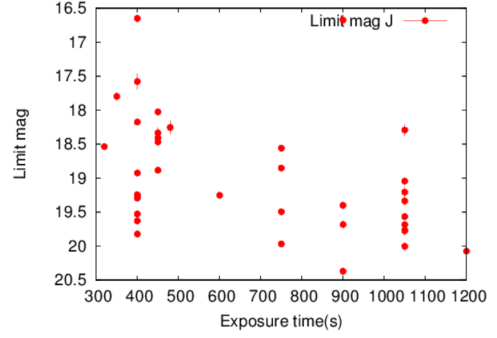


図 3.6: J バンドにおける限界等級と露出時間の関係

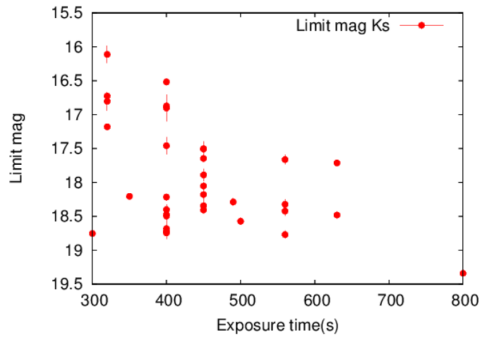


図 3.7: Ks バンドにおける限界等級と露出時間の関係

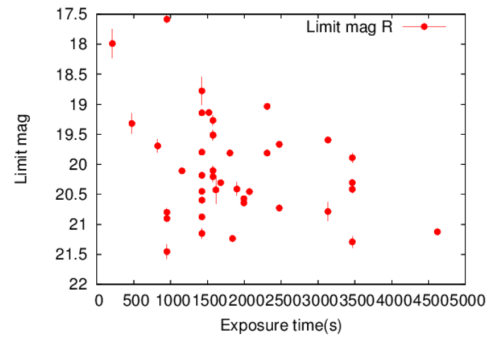


図 3.8: R バンドにおける限界等級と露出時間の関係

3.4 アパーチャーサイズと限界等級

アパーチャーサイズと限界等級の関係を図 3.9-3.12 に示した。星像の広がり（FWHM）によって定義され、FWHM が大きい場合には星像がぼやけて広がってしまう。星の FWHM は天候によって左右され（空気中の水の含有量、望遠鏡周囲の風速、街明かりなど）、FWHM は時間とともに変化する。本研究では、アパーチャーサイズを画像内にある星の典型的な FWHM を算出し、その 2.8 倍の値を用いている。そのため、アパーチャーサイズは観測日ごとに異なっている。アパーチャー測光において、アパーチャー領域のカウントの総和を計算することで、領域内のシグナル量を測定している。背景光やその他のノイズは画像全体に分布しており、アパーチャー測光領域内にも存在する。上記のとおり、天候の影響でシーイングが悪くなると星像は大きくなるため、アパーチャーサイズも大きくなるため、アパーチャー内のカウントを計算するときにはノイズを含んで測定される。アパーチャーサイズが小さいときはカウントを計算する領域が小さくなるため、スカイ成分などによって混入するノイズカウントが少なくなる。一方で、アパーチャーサイズが大きいときには、逆にノイズ成分がサイズに比例して混入してしまう。つまり、シーイングが良いと（星像の FWHM 値が小さいと）、小さい領域に光を集光できるためアパーチャー測光を行う領域も小さくなり、測光時の混入ノイズが少なくなる。そのため、アパーチャーが小さいときは限界等級が深くなる。図 3.9-3.12 のようにアパーチャーと限界等級には相関があることがわかった。

ため、観測時に星の FWHM を測定することによって、そのサイズと設定した露出時間から現在のかなた望遠鏡/HONIR で到達可能な限界等級を推定することができる。

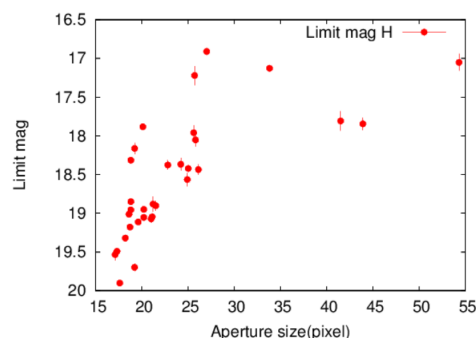


図 3.9: H バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係

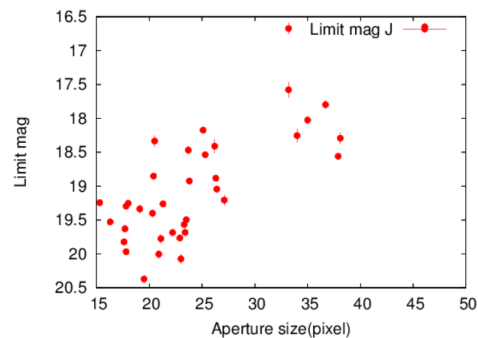


図 3.10: J バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係

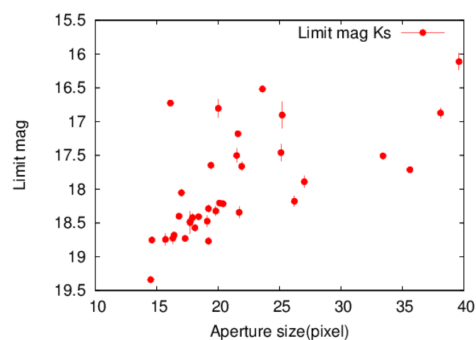


図 3.11: Ks バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係

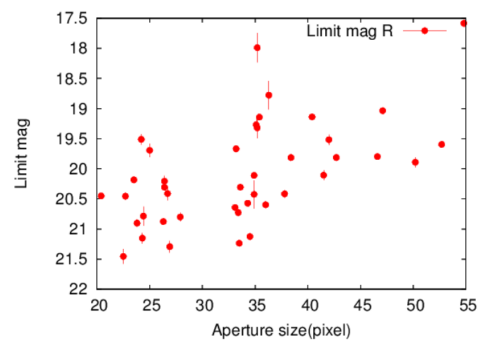


図 3.12: R バンドにおける限界等級とアパーチャーサイズの関係

露出時間が同じ時でも、天候などの影響によりシーイングは変わり、アパーチャーサイズも変化する。露出時間を揃えたときのアパーチャーサイズと限界等級の関係を図 3.13-19 に示した。すべての場合のときと同様に、アパーチャーサイズと限界等級の間に相関が見られた。

可視光 R バンドの場合には、露出時間を 1400 秒（約 23 分）のときを比較している。星の FWHM が 2-3 秒角（7-11 ピクセル * 0.29 秒角/ピクセル）であった場合（アパーチャーサイズが 20-30 ピクセル=FWHM * 2.8）、限界等級は 20-21 等まで期待できる。一方で、FWHM が 3.5-4.5 秒角程度まで広がっていた場合、限界等級は 19-20.5 等程度が見込まれる。また近赤外線 J バンドの場合において、露出時間を 400 秒と 1050 秒のふたつの場合で比較している。星の FWHM が 2-3 秒角（アパーチャーサイズ 20-30 ピクセル）の場合には、限界等級が 18-19.2 等（400 秒）および 19-20 等（1050 秒）となった。露出時間のある値に定めて観測を行うときもシーイングにより観測可能な限界等級の値を推定でき、天体の検出が可能かどうかを判断できる。

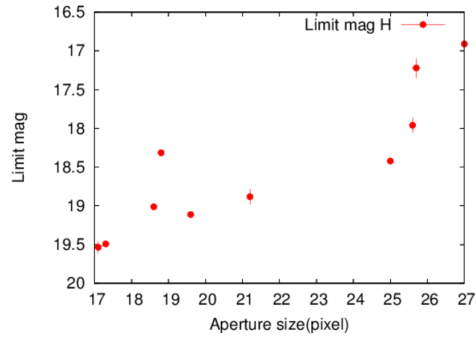


図 3.13: H バンドにおける露出時間 400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

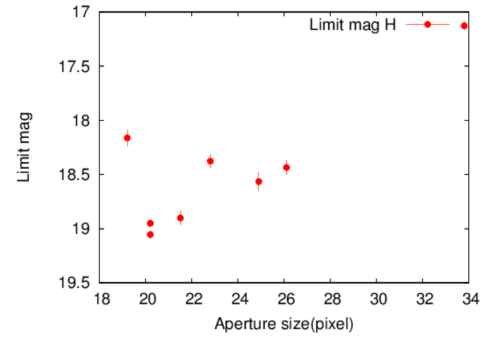


図 3.14: H バンドにおける露出時間 450 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

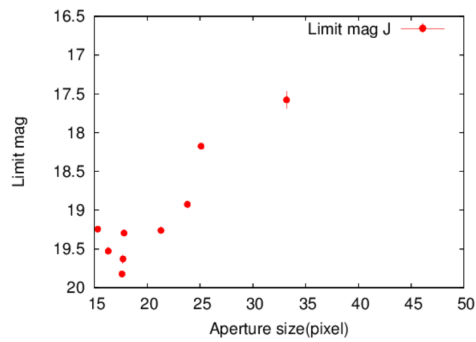


図 3.15: J バンドにおける露出時間 400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

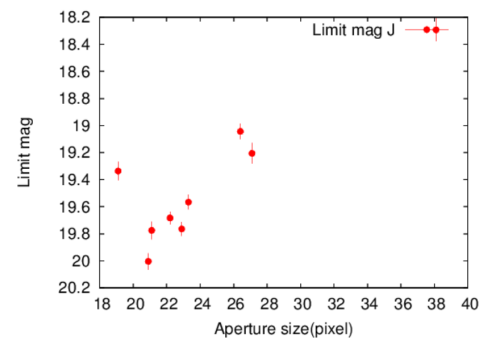


図 3.16: J バンドにおける露出時間 1050 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

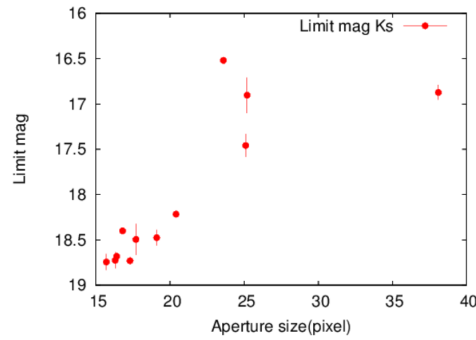


図 3.17: Ks バンドにおける露出時間 400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

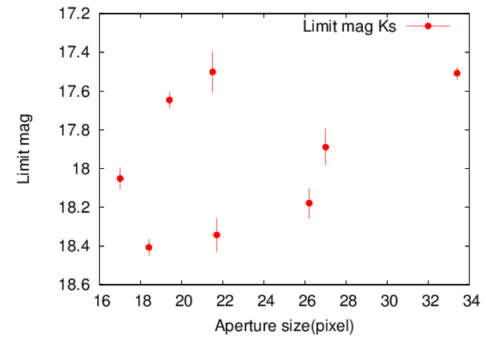


図 3.18: Ks バンドにおける露出時間 450 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

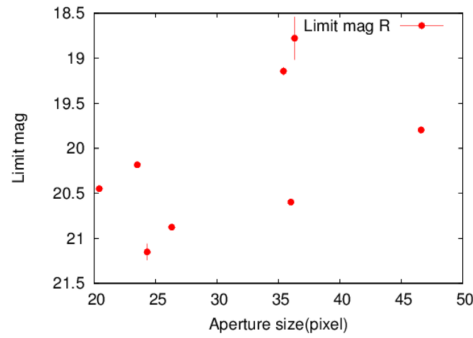


図 3.19: R バンドにおける露出時間 1400 秒での限界等級とアパーチャーサイズの関係

3.5 考察とまとめ

かなた望遠鏡で重力波対応天体の検出を行う上で構築された自動観測・解析システムの観測データの性能を評価するために本研究を行った。まず露出時間と測光原点の関係を調べた。測光原点は 1 カウントでの等級を表し、露出時間が長くなるとより深い等級まで観測ができると考えられる。露出時間が長くなると測光原点の値が大きくなることを確認でき、測光原点と露出時間の間の相関がみられた。可視 R バンドでは近赤外バンドに比べばらつきが大きかった。これは天候などによるノイズの影響を近赤外に比べ可視の方が強く受けるためと考えられる。次に露出時間と限界等級の関係を調べた。可視 R バンド、近赤外 J、Ks バンドでは露出時間が長くなると限界等級の値が大きくなることを確認できた。しかし、近赤外 H バンドでは他のバンドに比べて相関性が小さかった。次にアパーチャーサイズと限界等級の関係を調べた。アパーチャーサイズが大きくなると限界等級の値が小さくなることを確認でき、アパーチャーサイズと限界等級の間の相関がみられた。これはアパーチャーが小さいときには狭い領域で光を集光し、測光時のノイズが小さくなるため限界等級が深くなることを示している。露出時間を揃えたときも同様の相関を確認でき、露出時間のある値に定めて観測を行うときもシーイングにより観測可能な限界等級の値を推定でき、天体の検出が可能かどうかを判断できることがわかった。以上からかなた望遠鏡の HONIR で構築された自動観測・解析システムの観測データの性能を評価できた。

関連図書

- [1] <https://www.nao.ac.jp/news/topics/2016/20160212-gw.html>
- [2] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- [3] 内海洋輔、2018, 天文月報、111 巻, p.84-85
- [4] 田中雅臣、2018, 天文月報、111 巻, p.86-87
- [5] 諸隈智貴、2017, 天文月報、110 巻, p.14-18
- [6] Yoshida, M., et al. 2017, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id. 9 (12 pages)
- [7] Abbott, B. P., et al. 2017, The Astrophysical Journal Letters, 848, id. L12 (59 pages)
- [8] Utsumi, Y., et al. 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, id. 1
- [9] Tanaka, M., et al. 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, id. 102
- [10] Tominaga, N., et al. 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, id. 28
- [11] Mooley, K. P., et al. 2018, Nature, 554, 207-210
- [12] <https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/institution/telescope/abstract>
- [13] <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/index-j.html>
- [14] 長嶋大樹 卒業論文 (広島大学 2016)
- [15] 森祐樹 修士論文 (広島大学 2017)
- [16] 山崎優衣奈 卒業論文 (広島大学 2017)
- [17] https://www.naoj.org/Observing/Instruments/SCam/sdfred/v1.4/SDFRED_manual_ver1.4appendix.html
- [18] <http://jgem.hiroshima-u.ac.jp/>
- [19] 内海洋輔、2017, 天文月報 110 巻, p.30-36