

地球接近天体 (1566)Icarus と  
その同一起源候補天体 2007 MK<sub>6</sub> の  
近赤外測光観測

自然科学研究科 地球科学専攻  
41428507 櫻井 友里

2018/02/15

# Abstract

It has been suggested that the asteroid 2007 MK<sub>6</sub> (hereafter MK6) was released from (1566)Icarus (hereafter Icarus) (Ohtsuka et al., 2007). Rotation period of Icarus was estimated to be 2.2726 hours (Warner, 2015) which is slightly slower than the rubble pile spin barrier ( 2.2 hours). Since the diameter of Icarus is as small as 1 km (Harris, 1998), the YORP effect may change the rotation period. A spin rate acceleration for the Icarus caused by YORP effect might result in an disintegration in the near past.

In order to examine the hypothesis that "MK6 was released from Icarus", we observed Icarus and MK6 at Nishi-Harima Astronomical Observatory with the 2.0m Nayuta telescope and Nishiharima Infrared Camera (NIC). The NIC is a near-infrared three band ( $J$ ,  $H$ , and  $Ks$ ) simultaneous camera. In this study, we derived near-infrared colors ( $J - H$ ,  $H - Ks$ ) of Icarus and MK6.

Based on our color observation, we confirmed that Icarus is a Q-type or S-type asteroid, that is consistent with the colors in visible wavelength (Hicks et al., 1998). On the other hand, it is difficult to unambiguously classify the spectral type of MK6 due to a large photometric error. We need more data to determine the spectral type of MK6, and to examine whether Icarus and MK6 are made up of the same material or not. The next opportunity for observing MK6 is in June 2025.

## 要旨

小惑星 2007 MK<sub>6</sub>(以下 MK6) は、その軌道要素から (1566)Icarus(以下 Icarus) の分裂天体である可能性が示唆されている (Ohtsuka et al., 2007) . 2015 年に推定された Icarus の自転周期は 2.2726 時間 (Warner, 2015) で、これはラブルパイル天体が分裂するとされている自転周期 2.2 時間 (Warner et al., 2009) よりわずかに遅いものであった . Icarus の直径は約 1km(Harris, 1998) と小さいため、YORP 効果が働いて自転が遅くなる可能性があり、自転が速くなった Icarus から MK6 が放出されることで Icarus は現在の自転速度になったのかもしれないと考えられている .

「MK6 は Icarus の分裂片である」という仮説を検証するため、西はりま天文台の口径 2m なゆた望遠鏡と近赤外線撮像装置 NIC を用いて、Icarus と MK6 の近赤外 (JHKs バンド)3 色同時測光観測をおこなった . Icarus と MK6 いずれも近赤外の 3 色同時測光観測はこれまでおこなわれていない . 本研究では、Icarus と MK6 の近赤外の色を比較することで、分裂仮説の妥当性を検討した .

観測の結果、Icarus の近赤外の色は Q 型または S 型小惑星と似た色を示した . この結果は可視光の観測結果 (Hicks et al., 1998) と整合的である . 一方で、MK6 は測光の誤差が大きく特定のスペクトル型に対応させることができなかった . 本研究の観測結果においては、Icarus と MK6 は同一の物質であるとも異なる物質であるともいうことができず、分裂仮説の検証は次の観測好機 (2025 年 6 月) に持ち越されることとなった .

# 目次

第1章 序論	1
1.1 (1566)Icarus と 2007 MK <sub>6</sub>	1
1.2 小惑星の族	2
1.3 小惑星の自転周期と分裂	2
1.4 YORP 効果	2
1.5 研究の概要	4
第2章 小惑星の反射率	5
2.1 小惑星の色	5
2.2 スペクトル型	5
2.3 Icarus と MK6 のスペクトル型	6
第3章 観測	9
3.1 観測地点	9
3.2 観測装置	9
3.3 近赤外線観測	11
3.4 観測方法	12

---

3.4.1	(1566)Icarus . . . . .	12
3.4.2	2007 MK <sub>6</sub> . . . . .	14
<b>第4章</b>	<b>解析</b>	<b>16</b>
4.1	一次処理 . . . . .	16
4.1.1	画像の重ね合わせ . . . . .	16
4.2	測光 . . . . .	18
4.2.1	測光パラメータの決定 . . . . .	19
4.2.2	測光方法 . . . . .	20
4.2.3	測光結果 . . . . .	24
4.3	相対測光 . . . . .	26
<b>第5章</b>	<b>近赤外線の色</b>	<b>30</b>
<b>第6章</b>	<b>まとめ</b>	<b>33</b>
	謝辞	34
	参考文献	35
	付録	38
1.	近赤外線撮像装置 NIC の装置関数 . . . . .	38
2.	アンサンブル測光 . . . . .	41

# 第1章 序論

## 1.1 (1566)Icarus と 2007 MK<sub>6</sub>

地球に接近する可能性がある天体を，地球接近天体と呼ぶ．地球接近天体は現在 2000 個ほど発見されており，その中に (1566)Icarus(以下 Icarus) と 2007 MK<sub>6</sub>(以下 MK6) という 2 つの小惑星が存在する．Icarus と MK6 の軌道要素を表 1.1 に示す．

Ohtsuka et al. (2007) は，軌道進化計算に基づいて Icarus と MK6 の軌道を遡って計算し，MK6 は Icarus の分裂片である可能性を指摘した．MK6 が分裂片であるとしたら，Icarus と MK6 は地球接近天体として初めて確認された族 (family) ということになる．

表 1.1: (1566)Icarus と 2007 MK<sub>6</sub> の軌道要素 (J2000.0)

ORBITAL ELEMENTS	(1566)Icarus	2007 MK <sub>6</sub>
	2007 Apr 10.0 <sup>a</sup>	2007 Apr 10.0 <sup>a</sup>
Mean anomaly $M$	285.14414°	336.75725°
Perihelion distance $q$ (AU)	0.1866177	0.1959358
Semimajor axis $a$ (AU)	1.0778849	1.0807494
Eccentricity $e$	0.8268668	0.8187038
Argument of perihelion $\omega$	31.29236°	25.38152°
Longitude of ascending node $\Omega$	88.08105°	92.94672°
Inclination $i$	22.85385°	25.15553°
Reference	JPL	Nakano

<sup>a</sup>Osculation epoch (TT).

出典 : Ohtsuka et al. (2007) Table 1

## 1.2 小惑星の族

似た軌道要素をもつ小惑星は、グループにまとめて族と呼ばれる。族は1つの母天体が衝突破壊されてできた分裂片からなると考えられており、これまでに確認された族は全てメインベルトに存在する。Icarus と MK6 のような地球接近天体で、明確に族と分類できるものは現在までに見つかっていない。これは、太陽に近い場所では軌道進化が速く進むため、族があったとしても比較的短時間のうちに軌道が変わってしまい、族として識別できなくなるためと考えられている。

もし MK6 の母天体が Icarus であるならば、Icarus と MK6 は地球接近天体における族の1例目となる。このことは、地球接近天体における軌道進化速度の見積もりや、族を生成する分裂の頻度など、天体力学に大きな意味をもつものとなる。

## 1.3 小惑星の自転周期と分裂

図 1.1 は小惑星の大きさと自転周期の関係を示したものである。直径が 200m 以上で自転周期が 2.2 時間以下の小惑星は、ほとんど存在していないことがわかる。これは、小惑星がラブルパイル構造(複数の岩塊が重力により弱々しく結合した状態)であることに関係していると考えられている (Warner et al., 2009)。ラブルパイル構造の小惑星は、自転が速くなり遠心力が大きくなると分裂する。自転周期が 2.2 時間以下で速く自転しているものは、ラブルパイル構造でないひとまとまりの岩塊と考えられている。

Icarus の自転周期は 2.2726 時間と推定されており (Warner, 2015)、これは小惑星が分裂する限界の自転速度よりわずかに遅いだけである。

## 1.4 YORP 効果

小惑星の自転速度を変化させるメカニズムの1つに YORP 効果がある (e.g., Paddack, 1969)。YORP 効果は、非対称な形状をした天体において、太陽光の反射と天体表面からの熱輻射が非等方的になることによって生じたトルクが、自転軸や自転速度を変える効果である (e.g., Rubincam, 2000)。現在、(1620)Geographos、(1862)Appollo、(25143)Itokawa、(54509)YORP の 4 天体において、YORP 効果による自転周期の変化が検出されている (Durech et al., 2008, Kaasalainen et al., 2007, Taylor, 2007, Lowry et al., 2014)。

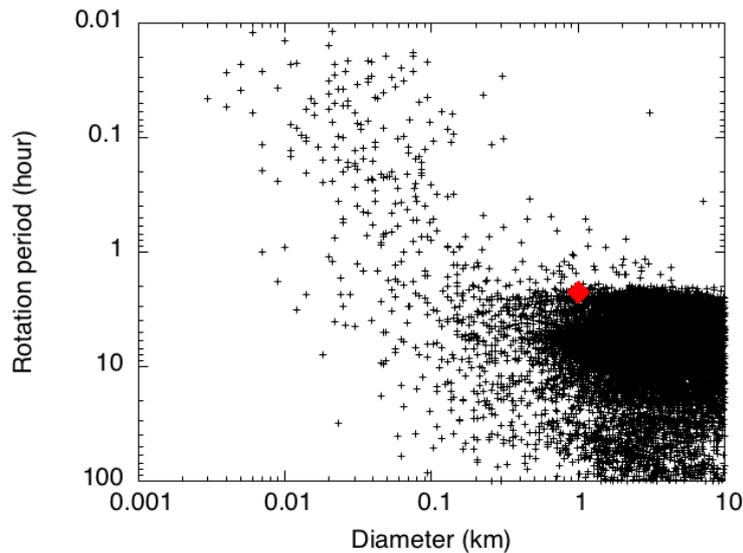


図 1.1: 小惑星の直径と自転周期の関係．データは LCDB(The Asteroid Lightcurve Database) を使用．赤は Icarus を示す．

非対称な形状をした天体で太陽光の反射によってトルクが発生することは、赤道に三角柱がついた天体を例にして説明することができる(図 1.2)．三角柱が太陽から見て右側にある場合、太陽光は入射方向に垂直な面に当たり、天体を反時計回りに回転させるトルクを生じさせる．天体が自転して三角柱が左側にきた場合にもトルクは生じる．右側と左側で、太陽光に対する三角柱の面の角度が同じならば、トルクは右側と左側で大きさが等しく向きが反対になるため完全に打ち消しあう．しかし図のように三角柱の面が太陽光に対して異なる角度で向く場合には、トルクの大きさと向きが反対にならないため、正味でトルクが残る．これが YORP 効果である．

物体の慣性モーメントはおおよそ大きさの 5 乗に比例するのに対し、輻射によって生じるトルクは面積と重心からの距離、すなわち大きさの 3 乗に比例する．そのため、小さな天体ほど YORP 効果はよく働く．また、天体の形状の非対称が大きいくほど YORP 効果は大きくなる．

Icarus の直径は約 1km と推定 (Harris, 1998) されており、これは YORP 効果が十分に効く可能性のある大きさである．

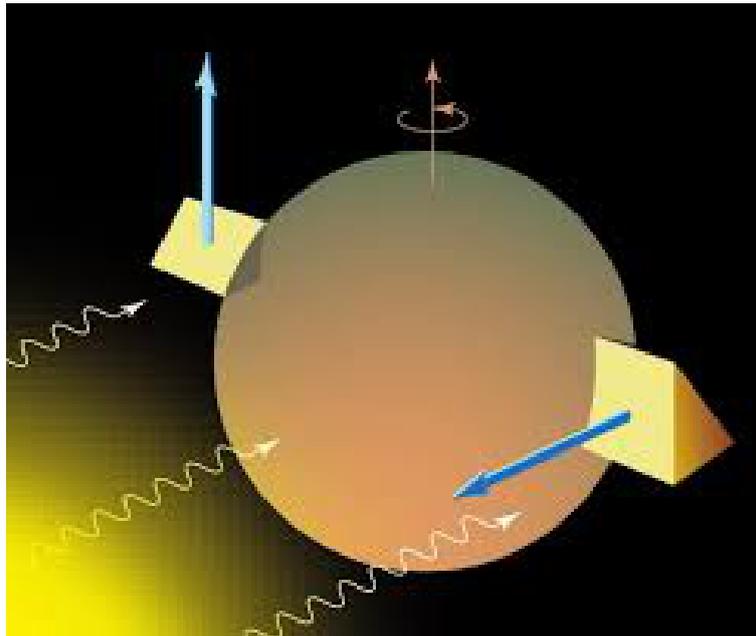


図 1.2: YORP 効果の説明図．この図で太陽は左下の方向にあり，図の白い矢印は太陽光，青い矢印は太陽光が反射して出ていく方向を表している．

([http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2007/pdf/kiso2007\\_kitasato.pdf](http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2007/pdf/kiso2007_kitasato.pdf))

## 1.5 研究の概要

本研究では MK6 が Icarus の分裂片であるという仮説を検証をするため，西はりま天文台の口径 2m なゆた望遠鏡と近赤外線撮像装置 NIC を用いて，Icarus と MK6 の近赤外 3 色同時測光観測をおこなった．Icarus と MK6 のいずれも，近赤外線の 3 色同時測光観測はこれまでおこなわれていない．Icarus の観測は 2015 年 6 月 18 日～6 月 21 日に，MK6 の観測は 2016 年 6 月 15 日～6 月 18 日におこなった．天候不良のため，データを取得できたのは Icarus と MK6 それぞれ 1 夜ずつであったが，これらのデータからそれぞれの天体の近赤外線の色を推定した．推定された近赤外線の色に基づいて，Icarus と MK6 の分裂仮説の妥当性を検証した．

## 第2章 小惑星の反射率

### 2.1 小惑星の色

ここでは反射率の波長依存性を色と呼ぶ。反射率は物質によって異なる値をもつため、小惑星の色をみることで、小惑星の表面がどのような物質でできているのかを推定することができる。

Icarus と MK6 の色が同じであるならば、Icarus と MK6 の表面は同じ種類の物質であると推定され、MK6 は Icarus の分裂片である可能性が高くなる。Icarus と MK6 の色が異なるならば、Icarus と MK6 の表面は異なる種類の物質であると推定され、MK6 は Icarus の分裂片である可能性が低くなる。

### 2.2 スペクトル型

可視光の反射率に基づいた小惑星の分類は、スペクトル型と呼ばれる (e.g., Bus et al., 2002)。いくつかのスペクトル型は特定の物質に関係があると考えられていて (表 2.1)、例えば、S 型は岩石質、C 型は炭素質、M 型は金属質と推定されている。

近赤外線でも可視光と同様に、反射率を使って小惑星を分類することができる (e.g., Sykes et al., 2000)。図 2.1 は 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) で観測された小惑星の J-H, H-Ks を示したものである。近赤外線の色で見ても、小惑星はスペクトル型によってある範囲にかたまって分布していることがわかる。

表 2.1: スペクトル型と物質の関係.

スペクトル型	物質と特徴
M型	金属質．スペクトルに吸収帯が見られず，全体的に右上がり．
C型	炭素質．アルベドが10%以下と暗く，スペクトルは比較的平たい．
S型	岩石質． $1\mu\text{m}$ 付近に幅広い吸収帯が見える．全体的に赤化傾向．
Q型	S型に似ているが，S型のような赤化が見られないもの．
A型	カンラン石に特徴的な $1\mu\text{m}$ 吸収帯をもつ．

出典：廣井, 杉田 (2010)

## 2.3 Icarus と MK6 のスペクトル型

過去におこなわれた可視光の観測では，Icarus のスペクトル型は S 型もしくは Q 型であると報告されている (Chapman et al., 1975, Hicks et al., 1998) . MK6 のスペクトル型はまだ特定されていない．

近赤外線の波長域では，可視光とは異なる物質の特徴をみることができるとため，近赤外線と可視光の観測を組み合わせることで，より確からしく物質を同定することができる．しかし近赤外線の観測は可視光と比較して難しいため，あまり観測がおこなわれていない．近赤外線の観測は，よくおこなわれている可視光の観測を補完するものとしても有用である．

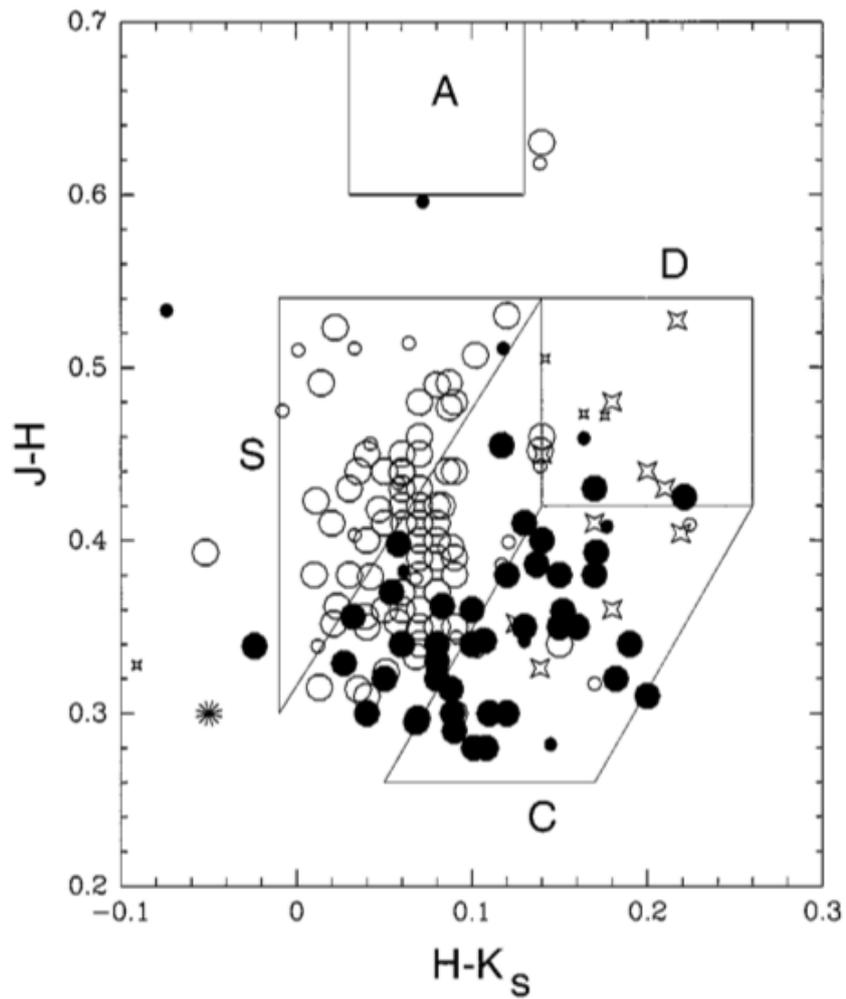


図 2.1: 小惑星の2色図．白丸はS型，黒丸はC型，星形はD型小惑星を表す．線で囲まれた領域はほぼ種類のスペクトル型のみが現れる領域を示す (Sykes et al. (2000) から引用)．

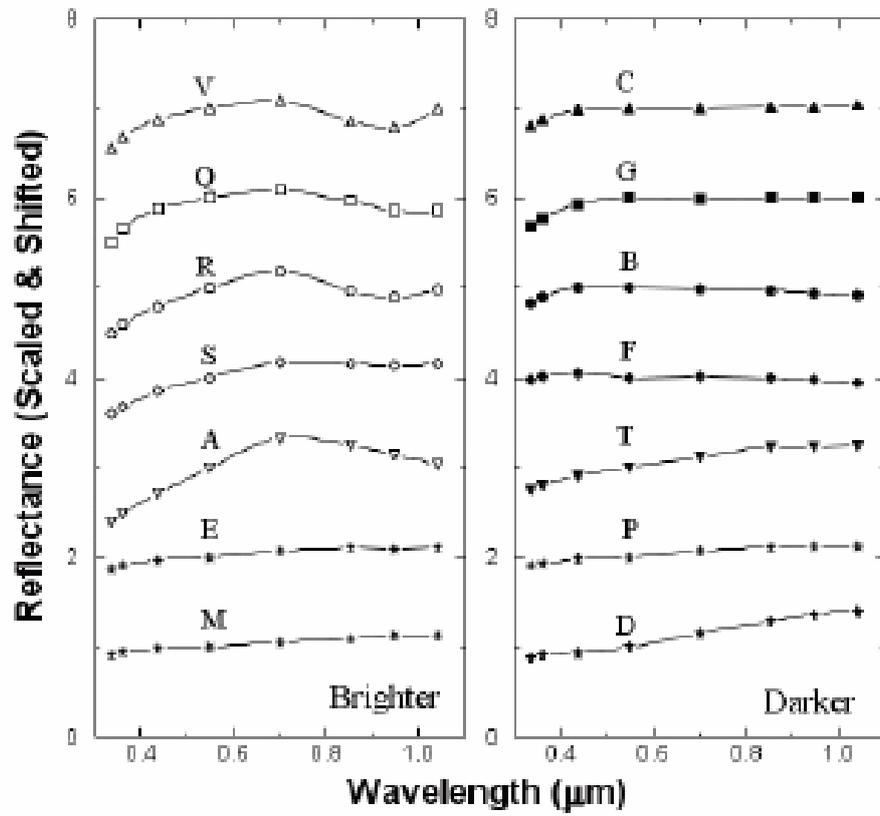


図 2.2: Tholen et al. (1984) による分類別の 8 色拡張可視小惑星スペクトル(ECAS)の平均 (廣井, 杉田 (2010) から引用) .

## 第3章 観測

### 3.1 観測地点

観測は Icarus , MK6 とともに西はりま天文台 (<http://www.nhao.jp>) でおこなった．西はりま天文台は兵庫県佐用郡佐用町大撫山の頂上付近 (東経 134°20'08 , 北緯 35°01'31 , 標高 449m) に位置している．



図 3.1: 西はりま天文台 . 2015 年 6 月 20 日撮影 .

### 3.2 観測装置

観測には西はりま天文台の口径 2m のなゆた望遠鏡 ([http://www.nhao.jp/research/nayuta\\_telescope.html](http://www.nhao.jp/research/nayuta_telescope.html)) と , 近赤外線撮像装置 NIC ([http://www.nhao.jp/%7Enic/nic\\_wiki/index.php](http://www.nhao.jp/%7Enic/nic_wiki/index.php)) を使用した . NIC はなゆた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられていて , J バンド , H バンド , K<sub>s</sub> バンドの 3 色で同時に撮像することができる . なゆた望遠鏡の諸元については表 3.1 に , NIC の諸元については表 3.2 に示

す。また、NIC の装置関数は付録 1 に記載した。

表 3.1: なゆた望遠鏡の仕様

主鏡	有効口径/2000mm, 主焦点/F1.5
光学形式	リッチークレアチン光学系
焦点	カセグレン焦点 (F12), ナスミス焦点 1(F12), ナスミス焦点 2(F5)
架台形式	経緯台
架台駆動速度	AZ 軸 最大 0.5 度/秒, EL 軸 最大 0.5 度/秒
製作	三菱電気株式会社
観測装置	眼視観望装置 HIVISCAS (高感度ハイビジョンカラーカメラ) NIC (近赤外線撮像) MINT (可視光多色撮像) MALLS (可視中・低分散分光器) VTOS (可視試験観測装置) LISS (狭帯域撮像分光装置)

出典: [http://www.nhao.jp/research/nayuta\\_telescope.html](http://www.nhao.jp/research/nayuta_telescope.html)

表 3.2: 近赤外線撮像装置 NIC の諸元

	Unit	J	H	Ks
Wavelength center	$\mu$ m	1.25	1.63	2.15
Wavelength width	$\mu$ m	0.16	0.30	0.31
Conversion factor	$e^-$ /ADU	$9.2 \pm 0.2$	$9.8 \pm 0.2$	$9.4 \pm 0.2$
Linearity limit	ADU	$\sim 8000$	$\sim 8000$	$\sim 8000$
Field of view	arcmin <sup>2</sup>	$2.73 \times 2.73$	$2.73 \times 2.73$	$2.73 \times 2.73$
Limiting magnitude	mag	18.9	19.0	18.0

出典: Takahashi et al. (2013)

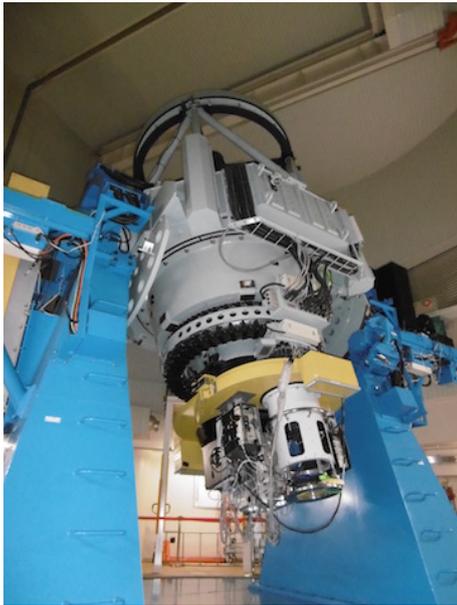


図 3.2: 口径 2m なゆた望遠鏡 .  
2015 年 6 月 18 日撮影 .

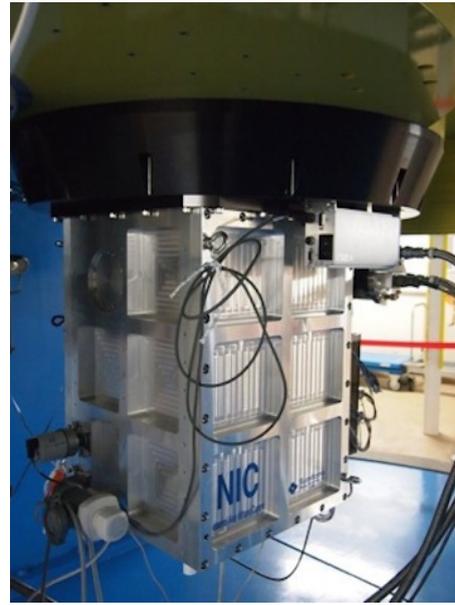


図 3.3: 近赤外線撮像装置 NIC  
(<http://www.nhao.jp/%7Enic/nic-wiki/index.php>)

### 3.3 近赤外線観測

近赤外線の観測では、背景放射成分の除去が重要となる。背景放射とは、地球大気や望遠鏡から射出される熱輻射のことである。近赤外線の背景光は、観測機器の温度や大気の状態により、その明るさや視野内での明るさのパターンが時々刻々変化する。本研究では、背景放射の影響を評価するため、ディザリングと呼ばれる方法で観測をおこない、観測した画像そのものを使用して背景光を推定し取り除いた。

ディザリングは、望遠鏡の向きを少しずつずらして同じ場所に天体が映らないように撮像する観測方法である(永山, 2004)。今回は図 3.4 に示した 10 点で撮像をおこなった。ディザリングで撮像された画像を重ね合わせて中央値 (median) をとると、天体が消えて背景光のみの画像を得ることができる。背景光のみの画像は、後に記述する一次処理でスカイ引きをする際に使用する。天体の明るさを測光する際には、天体が重なるように画像をずらして重ね合わせた画像を用いた。重ね合わせることで光量を増やして測光の精度を向上させることができる。

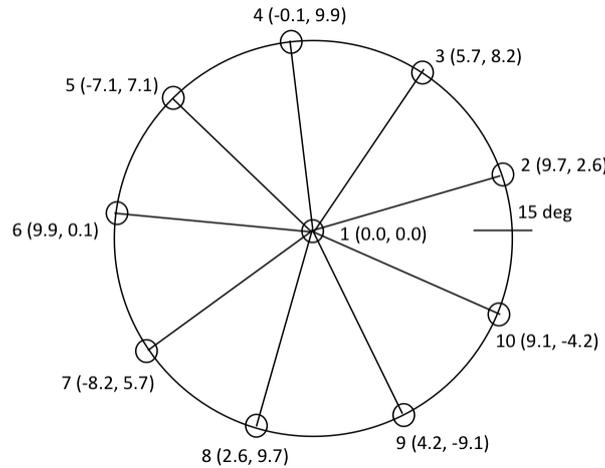


図 3.4: 観測で用いたディザリング (永山, 2004) .

### 3.4 観測方法

#### 3.4.1 (1566)Icarus

2015年6月21日の観測の概要は表3.3にまとめた通りである．Icarusの予報等級は12.5(J)，比較星(14225942-0113366)の等級は11.0(J)であった．画像を1枚取得するための積分時間はIcarusが10秒，比較星は5秒とした．Icarusについては，1, 2, 3回目の観測における積分時間を5秒として観測していたが，天候不良などで天体が暗く映ったため，積分時間を10秒に変更して観測をおこなった．ディザリングをして10枚の画像を取得するのにかかる時間はIcarusで約5分，比較星で約3分であった．12:12-15:53(UT)の間に，Icarusと比較星の観測を交互に20回ずつおこない，各バンドで400枚ずつ画像を取得した(図3.5)．

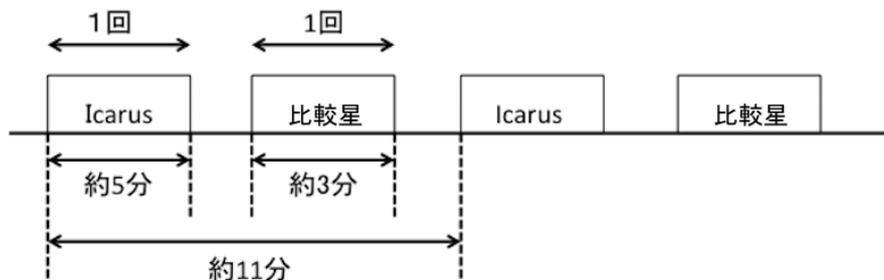


図 3.5: Icarus の観測方法

表 3.3: Icarus の取得データ

時刻 (UT)	対象	積分時間 (s)	枚数	測光
12:12:55-12:16:50	Icarus	5	10	
12:19:08-12:23:01	比較星	5	10	
12:26:48-12:30:42	Icarus	5	10	
12:31:37-12:35:31	比較星	5	10	
12:37:07-12:41:00	Icarus	5	10	
12:42:47-12:46:40	比較星	5	10	
12:47:42-12:52:26	Icarus	10	10	
12:53:04-12::56:57	比較星	5	10	
12:58:14-13:02:58	Icarus	10	10	
13:03:38-13:07:49	比較星	5	10	
13:10:08-13:14:53	Icarus	10	10	
13:15:27-13:19:20	比較星	5	10	
13:20:31-13:25:14	Icarus	10	10	
13:25:53-13:29:46	比較星	5	10	
13:30:43-13:35:48	Icarus	10	10	
13:36:31-13:40:43	比較星	5	10	
13:41:42-13:46:26	Icarus	10	10	×
13:47:00-13:50:53	比較星	5	10	×
13:52:30-13:57:14	Icarus	10	10	×
13:57:48-14:01:42	比較星	5	10	×
14:12:13-14:17:19	Icarus	10	10	×
14:18:02-14:21:56	比較星	5	10	×
14:22:45-14:27:28	Icarus	10	10	×
14:28:01-14:31:55	比較星	5	10	×
14:32:45-14:37:29	Icarus	10	10	
14:38:07-14:42:00	比較星	5	10	
14:43:01-14:47:44	Icarus	10	10	
14:48:18-14:52:12	比較星	5	10	
14:53:01-14:57:44	Icarus	10	10	
14:58:29-15:02:26	比較星	5	10	

15:03:28-15:08:12	Icarus	10	10	×
15:08:51-15:12:45	比較星	5	10	
15:13:44-15:18:28	Icarus	10	10	×
15:19:06-15:23:00	比較星	5	10	×
15:24:00-15:28:43	Icarus	10	10	×
15:29:17-15:33:10	比較星	5	10	
15:34:00-15:38:43	Icarus	10	10	
15:39:22-15:43:15	比較星	5	10	×
15:44:15-15:48:58	Icarus	10	10	×
15:49:32-15:53:26	比較星	5	10	×

比較星 : 14225942-0113366

### 3.4.2 2007 MK<sub>6</sub>

2016年6月17日の観測の概要は表3.4にまとめた通りである。MK6の予報等級は16.2(J)，比較星(14301571+3942435)の等級は12.6(J)であった。画像を1枚取得するための積分時間はMK6が120秒，比較星は20秒とした。ディザリングして10枚の画像を取得するのにかかる時間はMK6で約26分，比較星で約9分であった。MK6の3回目の観測中である13時40分頃にNICの冷凍機が故障し冷却が停止したため，観測を中止した。12:22-16:13(UT)の間に，MK6と比較星の観測を交互に6回ずつおこない，各バンドで110枚ずつ画像を取得した(図3.6)。

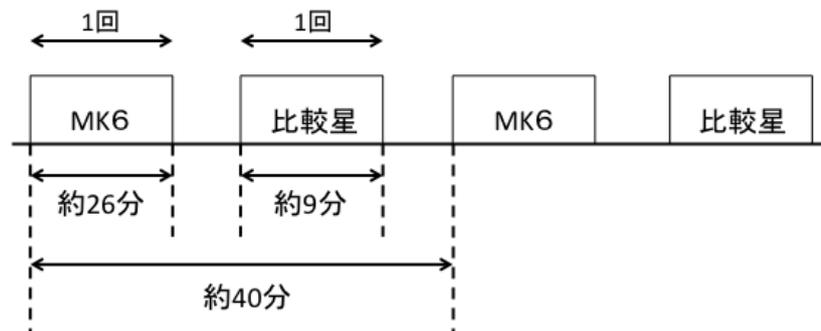


図 3.6: MK6 の観測方法

表 3.4: MK6 の取得データ

時刻 (UT)	対象	積分時間 (s)	枚数	測光
12:22:40-12:48:18	MK6	120	10	
12:49:55-12:58:53	比較星	20	10	
13:02:27-13:28:05	MK6	120	10	
13:30:43-13:39:43	比較星	20	10	
13:40:42-14:06:20	MK6	120	10	×
14:09:51-14:18:49	比較星	20	10	
14:20:29-14:46:07	MK6	120	10	
14:50:54-14:58:01	比較星	20	7	
14:59:19-15:24:58	MK6	120	10	
15:26:58-15:34:06	比較星	20	6	
15:37:07-16:02:46	MK6	120	10	×
16:05:47-16:13:50	比較星	20	7	×

比較星 : 14301571+3942435

表 3.5: 比較星の等級

	$J$	$H$	$K_S$
14225942-0113366	$11.008 \pm 0.024$	$10.718 \pm 0.023$	$10.609 \pm 0.019$
14301571+3942435	$13.735 \pm 0.024$	$13.414 \pm 0.022$	$13.466 \pm 0.037$

出典 : The Two Micron All Sky Survey at IPAC (2MASS)

## 第 4 章 解析

本研究では撮像した天体の画像を解析するのに、IRAF(<http://iraf.noao.edu>) と DS9(<http://ds9.si.edu/site/Home.html>) を使用した。

### 4.1 一次処理

観測で取得した各画像は、近赤外撮像装置 NIC の標準的な一次処理である、ダーク引き、フラット補正、バットピクセル補正、ホットピクセル・ダークピクセル除去、スカイ画像合成、スカイ引き、縦パターン除去、をおこなってから、ディザリングで取得した 10 枚の画像の重ね合わせをおこなった。一次処理は西はりま天文台で使用されているスクリプトを用いて自動でおこなったが、画像の重ね合わせについては自動処理に失敗したため手動でおこなった。

図 4.1 は一次処理後の Icarus J バンド 1 セット目、図 4.2 は一次処理後の MK6 J バンド 1 セット目の画像である。赤い丸で囲っている天体がそれぞれ Icarus, MK6 である。小惑星は太陽の周りを公転しているため、他の恒星の日周運動とは異なる動きをする。そのため小惑星に合わせて画像を重ね合わせると、恒星は列状に並ぶ。

図 4.3 は Icarus と共に観測した比較星の一次処理後の J バンド 1 セット目、図 4.4 は MK6 と共に観測した比較星の一次処理後の J バンド 1 セット目の画像である。赤い丸で囲っている天体がそれぞれ解析に使用した比較星である。図 4.4 には、使用した比較星の他に 3 つの天体が映っているが、これらの星を用いても測光精度を向上させることができなかつたため、解析には用いてない(付録 2)。

#### 4.1.1 画像の重ね合わせ

画像の重ね合わせは「画像整約と三色合成 (<http://www.wakayama-u.ac.jp/atomita/ccd/3color/>)」を参考にして、IRAF と DS9 を用いて手動でおこなった。

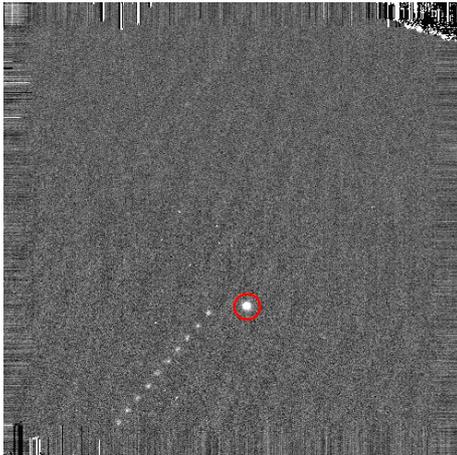


図 4.1: 一次処理後の Icarus .

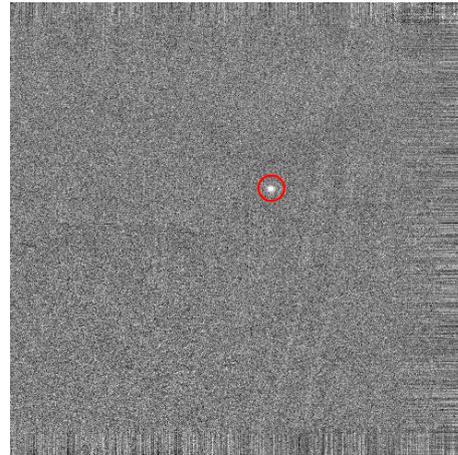


図 4.2: 一次処理後の MK6 .

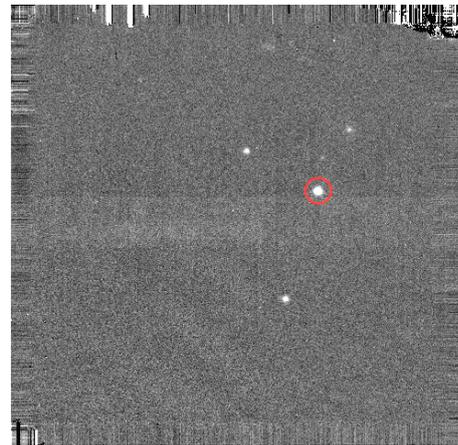
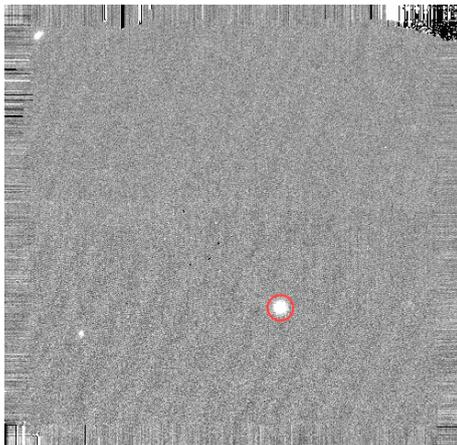


図 4.3: 一次処理後の Icarus 比較星 . 図 4.4: 一次処理後の MK6 比較星 .

まず `xgterm` 上で下記のコマンドを打ち、`IRAF` と `DS9` を立ち上げる .

```
$ ds9 &  
$ cl
```

次に `DS9` 上に撮像した画像を表示し、天体の像の重心位置を調べ、各フレームごとの相対的な位置のずれを見る . 天体の重心位置を調べるには `IRAF` の `imexam` というタスクを使用する .

```
cl > display (撮像した天体の画像名) 1  
cl > imexam keeplog=yes logfile=imexam.log
```

上記のコマンドを打つと DS9 上に小さな円形のカーソルが点滅して出てくる。このカーソルを天体の上に乗せ、`r` のキーを押す。そうすると図 `xx` が表示される。図中の `+` マークは実測点、破線は実測点に合うようなガウス関数曲線である。`+` マークが平坦な頂点を作っていると、その天体は飽和しているため解析には使えない。重心位置はグラフ上に 'Radial profile at xxx.xx yyy.yy' と書かれているが、この値は `imexam.log` というファイルにも書き出されている。`imexam` を終了する際は `q` のキーを押す。

1 セット 10 枚の画像全てに対して `imexam` の結果が取得できたら、基準とする座標値を決め、その値と各画像の天体の座標値との相対差を計算する。そして各画像について、IRAF の `imshift` というタスクを使用して天体の位置を基準の座標値との相対差分ずらす。

```
cl > imshift (撮像した天体の画像名) (出力する画像名) (x 座標の相対差) (y 座標の相対差)
```

`imshift` が終わった画像は DS9 上に `display` コマンドで表示して、全てほぼ同じ位置に天体が写っているかを確認し、問題がなければ IRAF の `imcomb` というタスクを使用して重ね合わせる。

```
cl > imcomb (重ね合わせをおこなう画像名) (出力する画像名) combine=average zero=median
```

## 4.2 測光

天体の明るさを測定することを測光と呼ぶ。天体の明るさを測光するとき気をつけなければならないことは、天体の他に空も光を出しているということである。天体の測光においては、空が出す光の量(スカイ)を見積もって、スカイの影響を取り除く必要がある。図 4.5-図 4.8 は、図 4.1-図 4.4 で天体の重心を通る断面を切り出したものである。それぞれカウント値が山になっている部分は天体の光を感知している素子である。NIC では一次処理でスカイ引きの作業をおこなっているため、スカイ(天体の光を感知していない素子)のカウント値はほぼ 0 になっている。

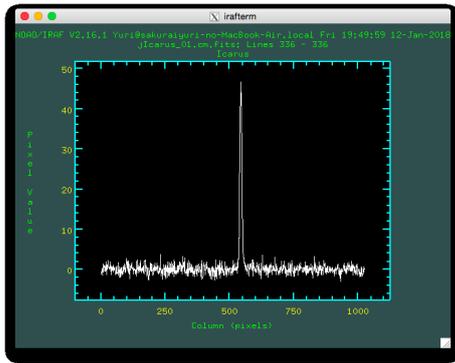


図 4.5: 星像の重心を通る断面で切り出した Icarus のカウント値 .

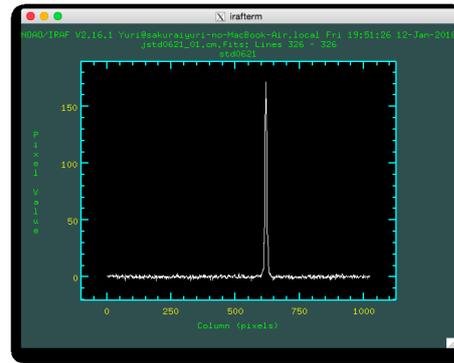


図 4.6: 星像の重心を通る断面で切り出した Icarus 比較星のカウント値 .

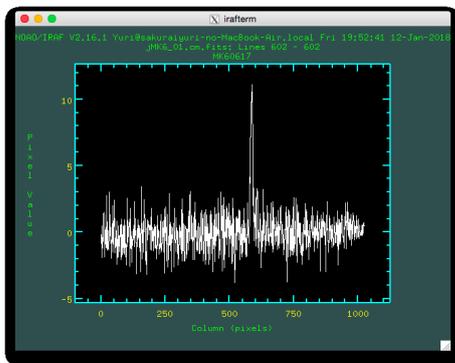


図 4.7: 星像の重心を通る断面で切り出した MK6 のカウント値 .

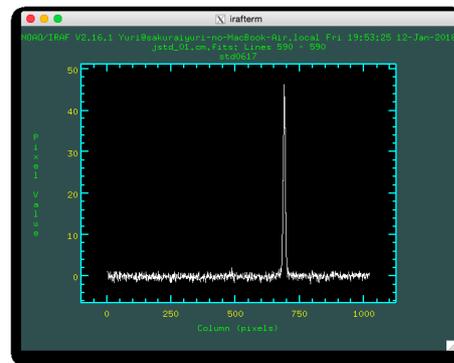


図 4.8: 星像の重心を通る断面で切り出した MK6 比較星のカウント値 .

#### 4.2.1 測光パラメータの決定

測光をおこなう際には、それぞれの天体に対して明るさを測る範囲 (aperture) と空の明るさを測る範囲 (annulus, dannulus) を設定する。aperture は測光円の直径、annulus はスカイを評価する円環の内径、dannulus は円環の幅である。aperture で設定した測光円の内側に含まれるカウント値の総和から、annulus と dannulus で設定した円環において見積もったスカイの値を引くことで、天体のカウント値が計測される。aperture が小さすぎると天体のカウントの漏れがおこるが、aperture を大きくしすぎると sky の不定性による誤差が大きくなる。また、sky の値はなるべく天体の近くで測定するのが良いが、天体に近すぎると漏れてくる天体の光の影響を受けてしまう。本研究では Icarus, MK6 それぞれについて aperture の値を変えながら測光をおこない、グラフの傾きがおおよそ 0 になるころの値を aperture の値とした。また、annulus は aperture と同じ値、dannulus は 5 とした。

図 4.9 と図 4.10 は，Icarus と MK6 に対して，aperture の値を変えながら測光をおこなった結果である．この結果に基づいて，Icarus の aperture は 25，MK6 の aperture は 15 と設定した．また，比較星の aperture はそれぞれ Icarus，MK6 と同じ値を用いた．

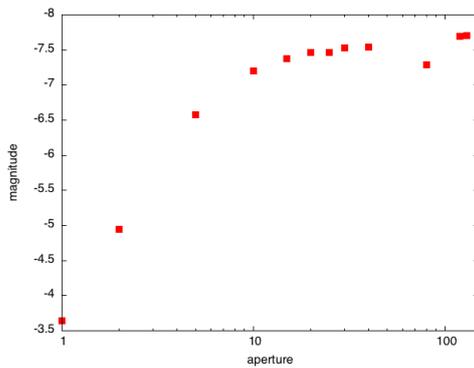


図 4.9: Icarus の機械等級の aperture の大きさに対する依存性．

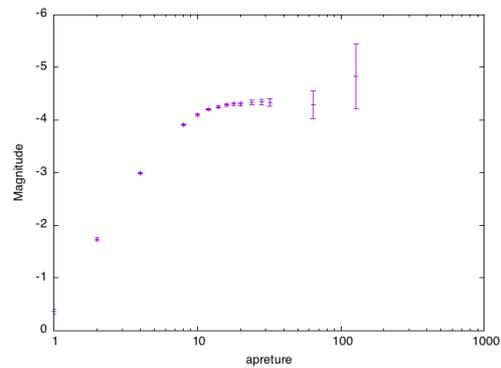


図 4.10: MK6 の機械等級の aperture の大きさに対する依存性．

## 4.2.2 測光方法

まず，IRAF の imexam というタスクを使用して星像の半値全幅 (FWHM) を求める．4.1.1 に示した方法で IRAF，DS9 を立ち上げ，imexam を使用できるようにする．測光する天体にカーソルを当てて a キーを押すと，図 4.11-図 4.14 のような天体のプロファイルが表示され，xgterm ウィンドウに FWHM の値として ENCLOSED，MOFFAT，DIRECT の 3 種類が表示される．本研究では，Icarus，MK6，それぞれの比較星について，各セットの ENCLOSED の値の中央値を FWHM の値として使用した．

IRAF の apphot というタスクを使用し，4.2.1 で決定したパラメータの設定をおこなう．apphot では 5 つの画面に切り替えてパラメータの編集をおこなう．まず最初に phot パラメータの編集をする．

```
cl > epar phot
```

この画面 (図 4.15) では，radplot の初期値が no となっているので，yes に修正する．

カーソルを `datapar` の行に移動させ、`:e` と入力し `datapar` の編集画面に移行する (図 4.16)。この画面では `fwhmpsf` に `imexam` で求めた FWHM の値を入力する。`epadu`、`exposur`、`filter`、`obstime` には撮像した画像の FITS ファイルのヘッダーのキーワードを指定しておく。`datamin` には検出器のリニアリティーの保証範囲を、`datamax` には読み出しノイズの 3 倍程度の負の数を入力する。編集が終わったら `:q` と入力し `phot` の画面に戻る。

カーソルを `centerp` の行に移動させ、`:e` と入力し `centerp` の編集画面に移行する (図 4.17)。この画面では `cbox` に FWHM の 2 倍程度の値を、`maxshif` は 2 ピクセルと入力する。編集が終わったら `:q` と入力し `phot` の画面に戻る。

カーソルを `fitskyp` の行に移動させ、`:e` と入力し `fitskyp` の編集画面に移行する (図 4.18)。この画面では `annulus`、`dannulus` の値を入力する。`annulus` はスカイを評価する円環の内径、`dannulus` は円環の幅である。4.2.1 で決定した `annulus` と `dannulus` の値を入力する。編集が終わったら `:q` と入力し `phot` の画面に戻る。

カーソルを `photpar` の行に移動させ、`:e` と入力し `photpar` の編集画面に移行する (図 4.19)。この画面では 4.2.1 で決定した `aperture` の値を入力する。`zmag` には 0 と入力する。編集が終わったら `:q` を 2 回押し、パラメータの編集を終了する。本研究で設定したパラメータの値を表 4.1 に示す。

続いて `apphot` というタスクを使用して測光をおこなう。

```
cl > display (測光する画像名) 1
cl > phot
```

上記のコマンドを打つと、DS9 上に円形のカーソルが出てくる。これを天体の上に合わせてスペースキーを押すと、図 4.20-図 4.23 のような天体のプロファイルが表示され、`xgterm` 上に簡単な測光結果が表示される。`xgterm` 上に `ok` という表記があれば測光は成功している。測光を終了する際には、DS9 上にカーソルを合わせて `q` キーを押す、`xgterm` 上にカーソルを合わせて `q` キーを押す。詳細な測光結果は、(測光した画像名).`mag.1` という名称のファイルに出力される。ファイルの中身を確認する際には、ターミナル上で

```
$ less (測光した画像名).mag.1
```

と打つと見ることができる。

表 4.1: 本研究で使した測光パラメータ

	(1566)Icarus	比較星	2007 MK <sub>6</sub>	比較星
FWHM	8.5	8.5	9.0	9.3
aperture	25	25	15	15
annulus	25	25	15	15
dannulus	5	5	5	5

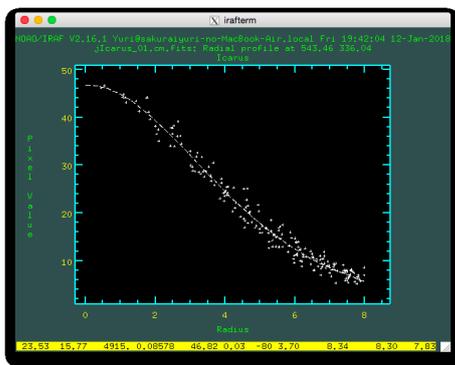


図 4.11: Icarus の星像の広がり (imexam の結果) .

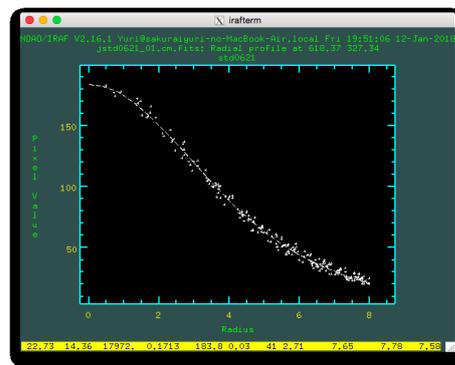


図 4.12: Icarus 比較星の星像の広がり (imexam の結果) .

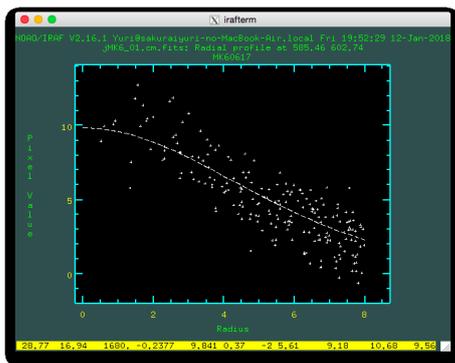


図 4.13: MK6 の星像の広がり (imexam の結果) .

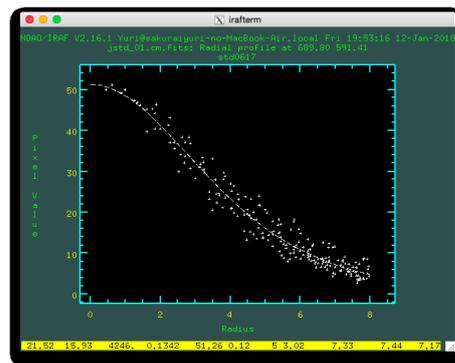


図 4.14: MK6 比較星の星像の広がり (imexam の結果) .

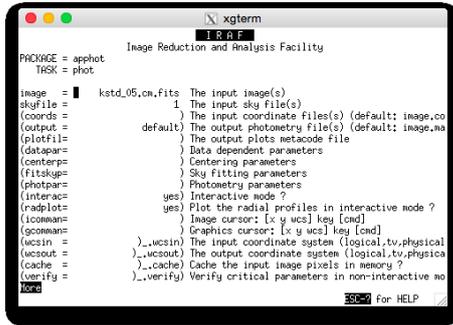


図 4.15: IRAF phot 編集画面 .

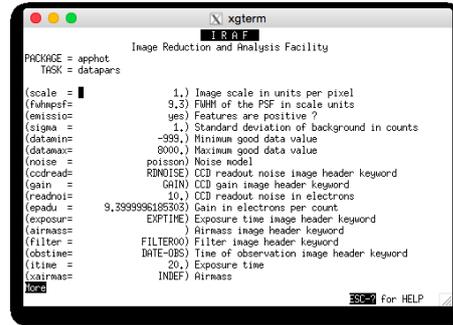


図 4.16: IRAF datapar 編集画面 .

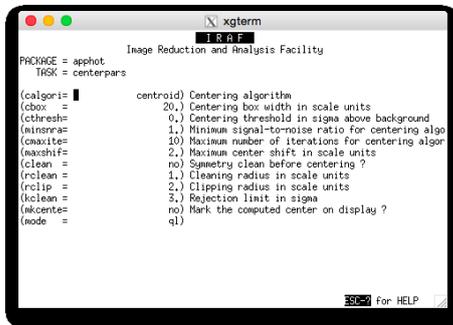


図 4.17: IRAF centerp 編集画面 .

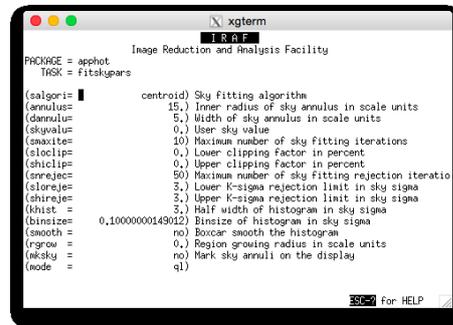


図 4.18: IRAF fitskyp 編集画面 .

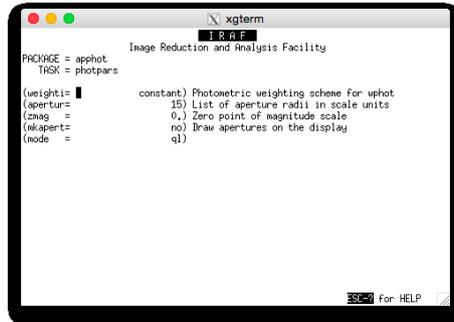


図 4.19: IRAF photpar 編集画面 .

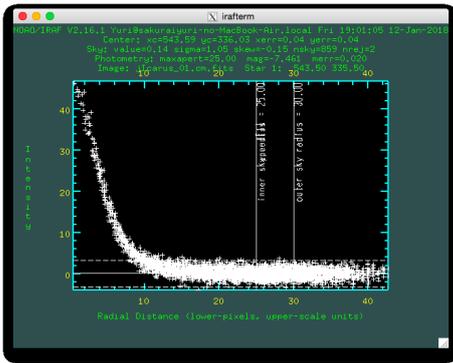


図 4.20: Icarus Jバンド 1 セット目の測光結果 .

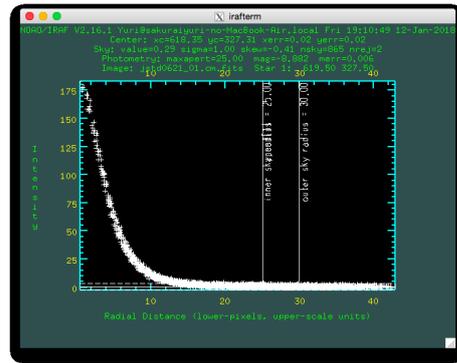


図 4.21: Icarus 比較星 Jバンド 1 セット目の測光結果 .

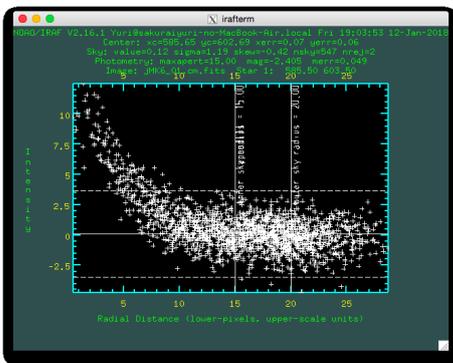


図 4.22: MK6 Jバンド 1 セット目の測光結果 .

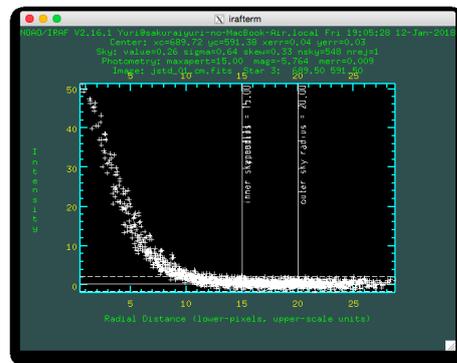


図 4.23: MK6 比較星 Jバンド 1 セット目の測光結果 .

### 4.2.3 測光結果

図 4.24 は Icarus の測光結果 , 図 4.25 は Icarus の比較星 (14225942-0113366) の測光結果 , 図 4.28 は MK6 の測光結果 , 図 4.29 は MK6 の比較星 (14301571+3942435) の測光結果である .

図 4.24 と図 4.25 の 14 時前後と 15 時過ぎにデータがないのは , 天候不良で観測を中止していたためである . 16 時以降も , 天候不良のためデータを取得できなかった . MK6 は Icarus に比べると暗いため , 測光の誤差が大きくなっている (図 4.26, 4.28) . MK6 を観測した日は , MK6 の 3 セット目を観測中に NIC の冷凍機が故障したため , 途中で観測を中止した . MK6 の K<sub>s</sub> バンド 3 セット目のデータがないのは , うまく測光ができなかったためである .

Icarus の H バンド 2, 4, 6 セット目と Icarus の比較星 K<sub>s</sub> バンド 6 セット目の測

光結果は、他とは明らかに異なる測光結果となった (図 4.24, 4.25) . これは重ね合わせをした 10 枚の画像の中の一部に、一次処理で除去しきれなかったホットピクセルやダークピクセルが天体の近くにあったためである . そこで各セットの画像を 1 枚ずつ測光して天体の近くにホットピクセルやダークピクセルがある画像を見つけ、それらの画像を除いて再度画像の合成をおこない測光した . その結果が図 4.26 と図 4.27 である . 明らかにおかしい画像を除くことで、他とほぼ同じ測光結果を得ることができた .

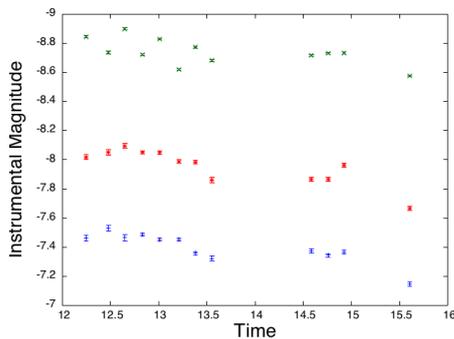


図 4.24: Icarus 機械等級 . 横軸は時間 (UT), 縦軸は機械等級, 青色の点は J バンド, 緑色の点は H バンド, 赤色の点は K<sub>s</sub> バンドの測光結果を示す .

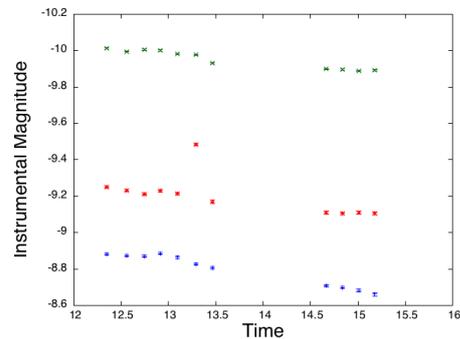


図 4.25: 比較星 機械等級 . 横軸は時間 (UT), 縦軸は機械等級, 青色の点は J バンド, 緑色の点は H バンド, 赤色の点は K<sub>s</sub> バンドの測光結果を示す .

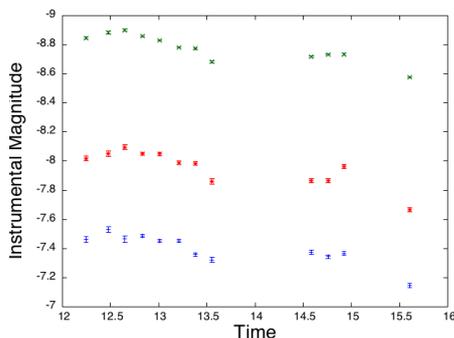


図 4.26: Icarus 補正後 機械等級 . 横軸は時間 (UT), 縦軸は機械等級, 青は J バンド, 緑は H バンド, 赤は K<sub>s</sub> バンドの測光結果を示す .

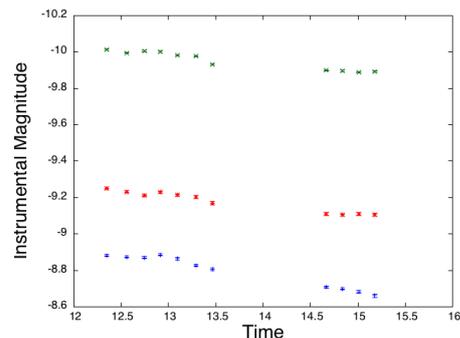


図 4.27: 比較星 補正後 機械等級 . 横軸は時間 (UT), 縦軸は機械等級, 青は J バンド, 緑は H バンド, 赤は K<sub>s</sub> バンドの測光結果を示す .

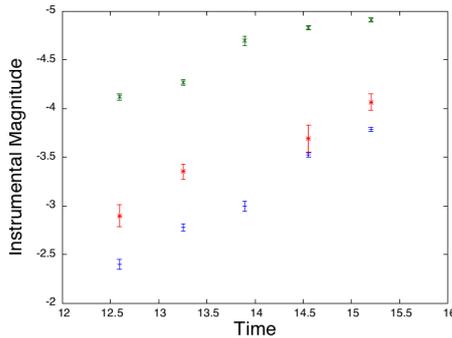


図 4.28: MK6 機械等級．横軸は時間 (UT), 縦軸は機械等級, 青は J バンド, 緑は H バンド, 赤は K<sub>s</sub> バンドの測光結果を示す．

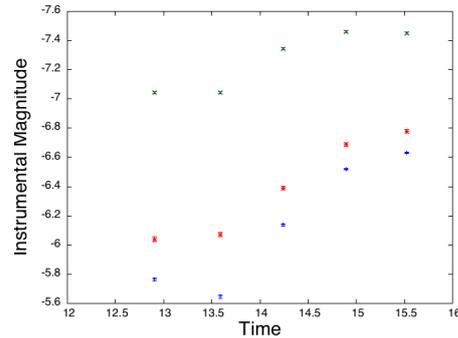


図 4.29: 比較星 機械等級．横軸は時間 (UT), 縦軸は機械等級, 青は J バンド, 緑は H バンド, 赤は K<sub>s</sub> バンドの測光結果を示す．

### 4.3 相対測光

本研究は相対測光によって対象天体の明るさを推定した．相対測光は，対象とする天体の明るさを別の天体の明るさに対する比として決定する．比較に使用する天体のことを比較星と呼ぶ．観測対象の天体と比較星に対する大気減光の影響が同じとき，それらの間の相対的な明るさは大気減光の影響を受けない．比較星の明るさを別の方法で決めることができれば，相対測光によって対象天体の明るさを決めることができる．今回の観測では，2MASS と呼ばれる近赤外星系カタログに載っているもののうち，観測時に Icarus と MK6 それぞれの近傍にある G2V 型 (太陽と同じ型) の恒星を比較星として用いた．近赤外線撮像装置 NIC の視野 (2.73' × 2.73') で，小惑星と同じ視野内に入る適切な比較星が存在しなかったため，本研究では小惑星と比較星を交互に観測した (図 3.5)(図 3.6) ．

図 4.27 と図 4.29 に見られる比較星の明るさの変動は，大気減光の大きさの変動を表している．図 4.26 と図 4.28 に見られる変動は，大気減光の変動によるものと対象天体そのものの明るさの変動によるものが混ざっている．

今回の観測では小惑星と比較星を交互に観測したため，小惑星を観測した時刻に比較星の観測はしていない．そのため，小惑星を観測した時刻  $t$  における比較星の機械等級  $m_c^{i*}(t)$  を以下の式を用いて推定した．

$$m_c^{i*}(t) = \frac{m_c^i(t_1) \cdot (t_2 - t) + m_c^i(t_2) \cdot (t - t_1)}{(t_2 - t_1)}$$

ここで、 $m_c^i(t)$  は時刻  $t$  に観測された比較星の  $i$  バンドの機械等級、 $t_1$  と  $t_2$  は比較星を観測した時刻である。

時刻  $t$  に観測された小惑星の比較星に対する相対的な  $i$  バンドでの明るさ  $\mu^i(t)$  とその測光誤差  $\sigma_1^i$  は

$$\begin{cases} \mu^i(t) = m_a^i(t) - m_c^{i*}(t) \\ \sigma_1^i = \sqrt{(\sigma_a^i)^2 + (\sigma_c^i)^2} \end{cases}$$

ここで、 $m_a^i(t)$  は時刻  $t$  に観測された小惑星の  $i$  バンドの機械等級、 $\sigma_x^i$  は  $x$  を  $i$  バンドで測光した誤差、下付きの  $a$  と  $c$  はそれぞれ小惑星と比較星である。

比較星の明るさとして 2MASS の値を用いると、小惑星の  $i$  バンドの明るさ  $M^i(t)$  とその測光誤差  $\sigma_2^i$  は以下の式で与えられる。

$$\begin{cases} M^i(t) = \mu^i(t) + M_{2\text{MASS}}^i \\ \sigma_2^i = \sqrt{(\sigma_1^i)^2 + (\sigma_{2\text{MASS}}^i)^2} \end{cases}$$

ここで、 $M_{2\text{MASS}}^i$  と  $\sigma_{2\text{MASS}}^i$  は比較星の  $i$  バンドの 2MASS 等級とその誤差である (表 3.5)。

近赤外の色  $J - H$ 、 $H - K_s$  とその誤差  $\sigma_3^{J-H}$  と  $\sigma_3^{H-K_s}$  は、以下の式で計算される。

$$\begin{cases} J - H = M^J - M^H \\ \sigma_3^{J-H} = \sqrt{(\sigma_2^J)^2 + (\sigma_2^H)^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H - K_s = M^H - M^{K_s} \\ \sigma_3^{H-K_s} = \sqrt{(\sigma_2^H)^2 + (\sigma_2^{K_s})^2} \end{cases}$$

これによって求められた小惑星の明るさを表 4.2 と 4.3 に示す。時刻は対象となる天体を観測した時間の中心を書いてある。明るさと色につけた誤差は上の式で計算されたものである。誤差の評価は、測光の誤差と 2MASS に記載された比較星の明るさの誤差の両方を含む。

図 4.30 は Icarus の相対測光の結果、図 4.31 は MK6 の相対測光の結果である。この図における等級は、小惑星そのものの明るさを示している。Icarus, MK6 ともに明るさが時間変化しているように見えるのは、小惑星の自転によって断面積の

大きさが変化するためと考えられる。すなわち，この観測結果を用いることで自  
 転周期の推定をおこなうことが原理的には可能であるが，本研究での観測のみで  
 はデータ数が少なく自転周期の推定はできなかった。

表 4.2: 観測された (1566)Icarus の近赤外線の色

Time(UT)	$J$	$H$	$K_s$	$J - H$	$H - K_s$
12.247	12.42±0.03	11.88±0.02	11.84±0.02	0.54±0.03	0.04±0.03
12.479	12.35±0.03	11.83±0.02	11.79±0.02	0.51±0.04	0.03±0.03
12.650	12.41±0.03	11.81±0.02	11.73±0.02	0.59±0.04	0.08±0.03
12.834	12.40±0.02	11.86±0.02	11.78±0.02	0.53±0.03	0.08±0.03
13.009	12.42±0.02	11.88±0.02	11.78±0.02	0.54±0.03	0.09±0.03
13.208	12.39±0.02	11.91±0.02	11.82±0.02	0.48±0.03	0.08±0.03
13.381	12.46±0.02	11.89±0.02	11.81±0.02	0.56±0.03	0.08±0.03
13.554	12.49±0.03	11.96±0.02	11.91±0.02	0.52±0.03	0.05±0.03
14.585	12.34±0.02	11.89±0.02	11.85±0.02	0.44±0.03	0.04±0.03
14.756	12.36±0.02	11.88±0.02	11.85±0.02	0.48±0.03	0.03±0.03
14.922	12.33±0.02	11.87±0.02	11.75±0.02	0.45±0.03	0.12±0.03
15.605	12.47±0.03	12.03±0.02	12.04±0.02	0.43±0.03	-0.003±0.03

表 4.3: 観測された 2007 MK<sub>6</sub> の近赤外線の色

Time(UT)	$J$	$H$	$K_s$	$J - H$	$H - K_s$
12.591	17.09±0.05	16.33±0.03	16.60±0.12	0.76±0.06	-0.26±0.12
13.254	16.65±0.04	16.18±0.03	16.16±0.08	0.47±0.05	0.01±0.09
13.891	16.61±0.05	15.89±0.05		0.71±0.07	
14.555	16.53±0.03	15.98±0.03	16.31±0.14	0.54±0.05	-0.32±0.14
15.202	16.51±0.03	15.95±0.03	16.13±0.09	0.56±0.05	-0.17±0.09

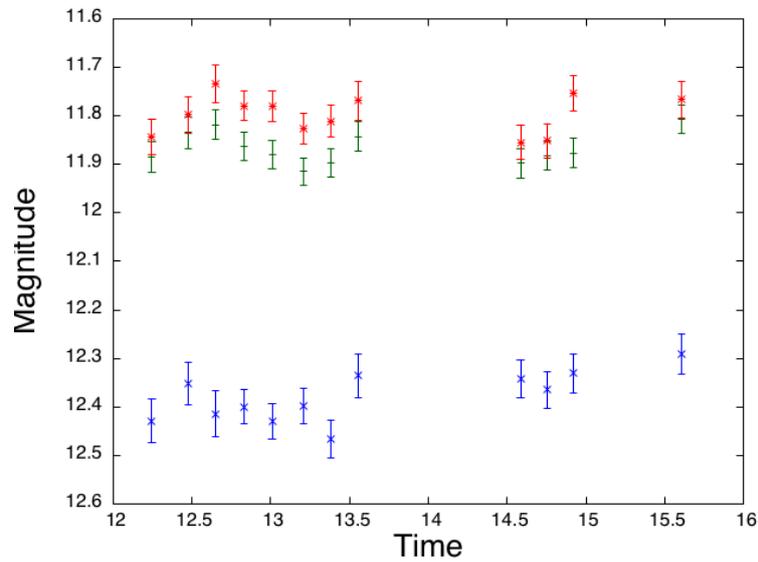


図 4.30: Icarus 相対測光．横軸は時間 (UT)，縦軸は等級，青は J バンド，緑は H バンド，赤は K<sub>s</sub> バンドを示す．

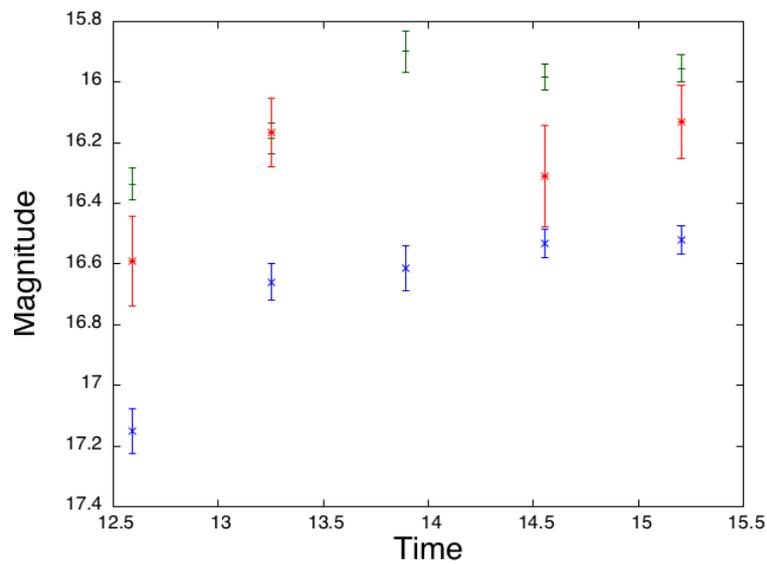


図 4.31: MK6 相対測光．横軸は時間 (UT)，縦軸は等級，青は J バンド，緑は H バンド，赤は K<sub>s</sub> バンドを示す．

## 第5章 近赤外線の色

相対測光の結果を基にして，Icarus と MK6 それぞれについて  $J-H$  と  $H-Ks$  の推定をおこなった．Icarus を観測した 12 セット (表 4.2) と MK6 を観測した 5 セット (表 4.3)，それぞれについて測光誤差の重みをつけて平均を求めることで，Icarus と MK6 の明るさと色を推定した．計算手順を以下に示す．

測光誤差で重みをつけて平均した小惑星の各バンドの明るさ  $\overline{M}^i$  と，その不偏分散  $s_1^i$  は次の式で与えられる．

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{M}^i = \frac{\sum_{n=1}^N M^i(t_n) \cdot \frac{1}{\sigma_1^i(t_n)^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\{\sigma_1^i(t_n)\}^2}} \\ s_1^i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (M^i(t_n) - \overline{M}^i)^2 \cdot \frac{1}{\{\sigma_1^i(t_n)\}^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\{\sigma_1^i(t_n)\}^2}}} \cdot \frac{N}{N-1}} \end{array} \right.$$

ここで， $N$  は観測したセット数である．重みとして用いる測光誤差は，2MASS の測光誤差を含まない  $\sigma_1^i$  を用いる． $N$  個のデータの平均として求められた  $\overline{M}^i$  は，平均  $\overline{M}^i$  で分散が  $(s_1^i)^2/N$  の分布に従うとすると，その誤差  $\sigma_4^i$  は 2MASS の測光誤差も含めて

$$\sigma_4^i = \sqrt{\frac{(s_1^i)^2}{N} + (\sigma_{2\text{MASS}}^i)^2}$$

となる．

$J-H$  と  $H-Ks$  についても同様にして，測光誤差で重みをつけた平均  $\overline{J-H}$ ， $\overline{H-Ks}$  と，その不偏分散  $s_2^{J-H}$ ， $s_2^{H-Ks}$  は以下の式で与えられる．

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \overline{J-H} = \frac{\sum_{n=1}^N \{M^J(t_n) - M^H(t_n)\} \cdot \frac{1}{\{\sigma_1^J(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^H(t_n)\}^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\{\sigma_1^J(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^H(t_n)\}^2}} \\
 s_2^{J-H} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \{(M^J(t_n) - M^H(t_n)) - (\overline{J-H})\}^2 \cdot \frac{1}{\{\sigma_1^J(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^H(t_n)\}^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\{\sigma_1^J(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^H(t_n)\}^2}}} \cdot \frac{N}{N-1}}
 \end{array} \right.$$
  

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \overline{H-Ks} = \frac{\sum_{n=1}^N \{M^H(t_n) - M^{Ks}(t_n)\} \cdot \frac{1}{\{\sigma_1^H(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^{Ks}(t_n)\}^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\{\sigma_1^H(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^{Ks}(t_n)\}^2}} \\
 s_2^{H-Ks} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \{(M^H(t_n) - M^{Ks}(t_n)) - (\overline{H-Ks})\}^2 \cdot \frac{1}{\{\sigma_1^H(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^{Ks}(t_n)\}^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\{\sigma_1^H(t_n)\}^2 + \{\sigma_1^{Ks}(t_n)\}^2}}} \cdot \frac{N}{N-1}}
 \end{array} \right.$$

また、2MASS の測光誤差を加味した  $J-H$  と  $H-Ks$  の誤差  $\sigma_s^{J-H}$  と  $\sigma_s^{H-Ks}$  は

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \sigma_s^{J-H} = \sqrt{\frac{\{s_2^{J-H}\}^2}{N} + (\sigma_{2MASS}^J)^2 + (\sigma_{2MASS}^H)^2} \\
 \sigma_s^{H-Ks} = \sqrt{\frac{\{s_2^{H-Ks}\}^2}{N} + (\sigma_{2MASS}^H)^2 + (\sigma_{2MASS}^{Ks})^2}
 \end{array} \right.$$

以上より求めた Icarus と MK6 の近赤外線の明るさと色を、表 5.1 と図 5.1 に示す。Icarus の近赤外線の色は S 型もしくは Q 型小惑星と似た色を示した (図 5.1)。これは可視光の観測で Q 型とする結果 (Hicks et al., 1998) と整合的である。一方

で、MK6 の近赤外線の色は特定のスペクトル型に対応させることができなかった。MK6 は可視光の観測で O 型とする結果 (Abe et al., unpublished) があるが、これは本研究の観測結果と矛盾しない。O 型小惑星は非常に珍しく、(3268)Boznemcova が知られているのみである。MK6 が O 型であるとすると、本研究は非常に珍しい O 型小惑星を近赤外線で観測した貴重なデータになる。

表 5.1: (1566)Icarus と 2007 MK<sub>6</sub> の等級

	$J$	$H$	$K_S$	$J - H$	$H - K_S$
(1566)Icarus	$12.40 \pm 0.02$	$11.89 \pm 0.02$	$11.82 \pm 0.02$	$0.50 \pm 0.03$	$0.06 \pm 0.03$
2007 MK <sub>6</sub>	$16.59 \pm 0.08$	$16.06 \pm 0.07$	$16.24 \pm 0.10$	$0.57 \pm 0.05$	$-0.13 \pm 0.08$

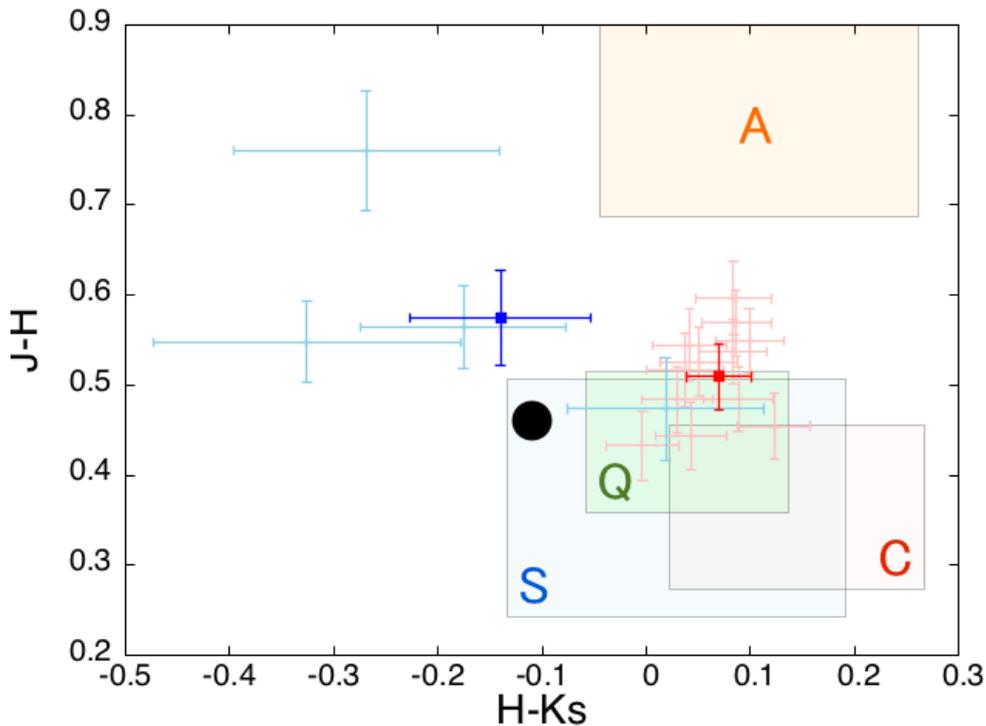


図 5.1: 近赤外線の波長における 2 色図。横軸は H-Ks, 縦軸は J-H。Icarus の測光結果はピンク (表 4.2) と赤 (表 5.1), MK6 の測光結果は水色 (表 4.3) と青 (表 5.1) で表した。また, Asteroid spectrum classification using Bus-DeMeo taxonomy のデータを用いて, S, C, Q, A 型の小惑星が分布する範囲に色をつけ, O 型小惑星 (3268)Boznemcova を黒丸で示した。

## 第6章 まとめ

Icarus と MK6 の分裂仮説を検証するため、西はりま天文台で近赤外 3 色同時測光観測をおこなった。Icarus は 2015 年 6 月 21 日に、MK6 は 2016 年 6 月 17 日に、それぞれデータを取得した。取得した画像データは、J, H, Ks の各バンドについて Icarus で 200 枚、MK6 で 50 枚である。

取得したデータを用いて、Icarus と MK6 それぞれの近赤外線の色を推定した。

(1566)Icarus :  $J - H = 0.509 \pm 0.036$ ,  $H - K_s = 0.069 \pm 0.031$

2007 MK<sub>6</sub> :  $J - H = 0.575 \pm 0.052$ ,  $H - K_s = -0.139 \pm 0.086$

Icarus は Q 型もしくは S 型と推定される。MK6 は推定の範囲が広く、スペクトル型を推定することはできなかった。

本研究の観測結果からは、Icarus と MK6 は同一の物質であるとも異なる物質であるとも結論することはできず、分裂仮説の妥当性については確かな結論を導くことはできない。次の MK6 の観測好機は、2025 年 6 月中旬である。7 年後に分裂仮説の妥当性について進展があることを期待する。

## 謝辞

本研究をおこなうにあたり，終始適切な助言を賜り，また丁寧に指導して下さった はしもと じょーじ准教授に心より感謝申し上げます．

日本スペースガード協会の浦川 聖太郎主任研究員には，天文学の基礎知識や解析方法など，様々なアドバイスをいただきました．

西はりま天文台の高橋 隼研究員には，西はりま天文台のなゆた望遠鏡，近赤外線撮像装置 NIC の操作方法の説明をしていただき，また一次処理の手順について教えていただきました．

同研究室のメンバーには，研究の相談や日々の話し相手になっていただき，楽しく過ごすことができました．

この場を借りて，皆様に心より感謝申し上げます．

## 参考文献

Bus, S. J., F. Vilas, and M. A. Barucci (2002) : Visible-wavelength spectroscopy of asteroids, in ASTEROIDS III, Univ. Arizona Press, pp.169-182.

Chapman, C. R., D. Morrison, and B. Zellner (1975) : Surface Properties of Asteroids : A Synthesis of Polarimetry, Radiometry, and Spectrophotometry. *Icarus* 25, 104-130.

Durech, J., D. Vokrouhlicky, M. Kaasalainen, D. Higgins, Yu. N. Krugly, N. M. Gaftonyuk, V. G. Shevchenko, V. G. Chiorny, H. Hamanowa, V. Reddy, and R. R. Dyvig (2008) : Detection of the YORP effect in asteroid (1620) Geographos. *A&A* 489, 25-28.

Harris, A.W. (1998) : A Thermal Model for Near-Earth Asteroids. *Icarus*, 131, 291-301.

Hicks, M. D., U. Fink, and W. M. Grundy (1998) : The Unusual Spectra of 15 Near-Earth Asteroids and Extinct Comet Candidates. *Icarus* 133, 69-78.

Kaasalainen, M., J. Durech, B. D. Warner, Y. N. Krugly, and N. M. Gaftonyuk (2007) : Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques. *Nature* 446, 420-422.

Lowry, S. C., P. R. Weissman, S. R. Duddy, B. Rozitis, A. Fitzsimmons, S. F. Green, M. D. Hicks, C. Snodgrass, S. D. Wolters, S. R. Chesley, J. Pittichova, and P. van Oers (2014) : The internal structure of asteroid (25143) Itokawa as revealed by detection of YORP spin-up. *A&A* 562:A48.

Ohtsuka, K., H. Arakida, T. Ito, T. Kasuga, J. Watanabe, D. Kinoshita, T. Sekiguthi, D. J. Asher, and S. Nakano (2007) : Apollo Asteroids 1566 ICARUS and 2007 MK<sub>6</sub> : Icarus Family Members? *ApJ.* 668, 71-74.

Paddack, S. J. (1969) : Rotational bursting of small celestial bodies : Effects of radiation pressure. *J. Geophys. Res.* 74, 4379-4381.

Rubincam, D. P. (2000) : Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids. *Icarus* 148, 2-11.

Sykes, M. V., R. M. Cutri, J. W. Fowler, D. J. Tholen, M. F. Skrutskie, S. Price and E. F. Tedesco (2000) : The 2MASS Asteroid and Comet Survey. *Icarus* 146, 161-175.

Taylor, P. A., J-L. Margot, D. Vokrouhlicky, D. J. Scheeres, P. Pravec, S. C. Lowry, A. Fitzsimmons, M. C. Nolan, S. J. Ostro, L. A. M. Benner, J. D. Giorgini, and C. Magri (2007) : Spin Rate of Asteroid (54509) 2000 PH5 Increasing Due to the YORP Effect. *Science* 316, 274.

Tholen, D. J. (1984) : Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. Ph.D. thesis, Univ. of Arizona.

Warner, B. D., A. W. Harris, P. Pravec (2009) : The asteroid lightcurve database. *Icarus* 202, 134-146.

Warner, B. D. (2015) : Near-Earth asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station : 2015 March-June. *Minor Planet Bull.* 42, 256-266.

HAWAII array, [http://www.iac.es/proyecto/emir/pages/observing-with-emir/observing-tools/components/HAWAII\\_QE\\_ascii.dat](http://www.iac.es/proyecto/emir/pages/observing-with-emir/observing-tools/components/HAWAII_QE_ascii.dat)

Image Reduction and Analysis Facility (IRAF), <http://iraf.noao.edu>

NASA JPL's HORIZONS System, <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

Planetary Spectroscopy at MIT, <http://smass.mit.edu>

SAOImage DS9, <http://ds9.si.edu/site/Home.html>

The Asteroid Lightcurve Database (LCDB), <http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

The Two Micron All Sky Survey at IPAC (2MASS), <https://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

西はりま天文台, <http://www.nhao.jp>

富田 晃彦, <http://www.wakayama-u.ac.jp/~atomita/ccd/3color/>

宮坂 正大, <http://www.toybox.rgr.jp/mp366/>

廣井 孝弘, 杉田 精司 (2010) : C型小惑星の探査における可視・近赤外分光の役割. 日本惑星科学会誌 遊星人 19, 36-47.

永山 貴宏 (2004) : 近赤外線掃天観測施設 IRSF の開発と銀河面に隠された銀河団の探索. 名古屋大学博士論文.

# 付録

## 1. 近赤外線撮像装置NICの装置関数

図 1.1 はNICの内部構造を描いたものである。入射してきた光は、まずJ反射用ダイクロイックミラーでJとH, K<sub>s</sub>に分けられ、HとK<sub>s</sub>はもうひとつのH反射用ダイクロイックミラーでHとK<sub>s</sub>に分けられる。J, H, K<sub>s</sub>それぞれに分けられた光は、さらにそれぞれのフィルターを通過してから検出器に入る。

J, H, K<sub>s</sub>それぞれの装置関数は以下で与えられる。

$$\begin{aligned}
 J &: \int_0 R_J(\lambda) \cdot f_J(\lambda) \cdot Q_e(\lambda) \cdot d\lambda \\
 H &: \int_0 T_J(\lambda) \cdot R_H(\lambda) \cdot f_H(\lambda) \cdot Q_e(\lambda) \cdot d\lambda \\
 K_s &: \int_0 T_J(\lambda) \cdot T_H(\lambda) \cdot f_{K_s}(\lambda) \cdot Q_e(\lambda) \cdot d\lambda
 \end{aligned}$$

ここで、 $R_J$ と $T_J$ はJ反射用ダイクロイックミラーの反射率と透過率、 $R_H$ と $T_H$ はH反射用ダイクロイックミラーの反射率と透過率、 $f$ はフィルターの透過率、 $Q$ は検出器の量子効率である。

本研究では、西はりま天文台より提供されたダイクロイックミラー反射率とフィルター透過率のデータ、HAWAII arrayの量子効率のデータ ([http://www.iac.es/proyecto/emir/pages/observing-with-emir/observing-tools/components/HAWAII\\_QE\\_ascii.dat](http://www.iac.es/proyecto/emir/pages/observing-with-emir/observing-tools/components/HAWAII_QE_ascii.dat)) を用いて、NICの装置関数を求めた。



表 6.1: フィルターの特徴

Band	Unit	Cut-on	Cut-off	Center	Width
J	$\mu\text{m}$	1.175	1.332	1.253	0.157
H	$\mu\text{m}$	1.484	1.781	1.632	0.298
Ks	$\mu\text{m}$	1.990	2.303	2.146	0.313

Cut-on, off : 50%透過率

Center :  $(\text{Cut-on} + \text{Cut-off}) / 2$

Width :  $\text{Cut-off} - \text{Cut-on}$

出典 : [http://www.nhao.jp/~nic/nic\\_wiki/index.php?フィルター情報](http://www.nhao.jp/~nic/nic_wiki/index.php?フィルター情報)

## 2. アンサンブル測光

相対測光の精度は、対象天体だけでなく比較星(基準とする天体)の測光精度に依存する。測光精度は天体の明るさに依存するので、基準とする天体はできるだけ明るいものであることが望ましい。1枚の画像の中に複数の天体が写っている場合には、それら複数の天体の明るさを足し合わせたものを仮想的に1個の天体とみなすことで、基準とする明るさの測光精度を向上させることができる場合がある。複数の天体の明るさを足し合わせて測光することをアンサンブル測光という。

複数の天体を足し合わせることで測光精度が向上するかどうかは、それぞれの天体の明るさとその測光精度に依存する。以下、天体1(機械等級  $m_1$ , 測光誤差  $dm_1$ )と天体2(機械等級  $m_2$ , 測光誤差  $dm_2$ )があったとき、天体1と天体2を足し合わせることで測光誤差が小さくなる条件を導く。

天体1は天体2よりも明るく、天体1の測光誤差は天体2の測光誤差よりも小さいものとする。天体1と天体2を足し合わせた仮想的な天体の測光誤差を  $dm$  とする。天体1と天体2を足し合わせることに意味があるのは、足し合わせることで測光誤差が小さくなるとき、すなわち

$$dm < dm_1$$

が成り立つときである。

機械等級  $m$  と測光誤差  $dm$  は、カウント値  $C$  とカウント値の誤差  $E$  と以下の式で表わされる関係にある。

$$\begin{aligned} m &= -2.5 \log_{10} C \\ dm &= 1.0857 \cdot \left( \frac{E}{C} \right) \end{aligned}$$

ここで、

$$1.0857 = 2.5 \log_{10} e$$

である。

天体1と天体2を足し合わせたカウント値  $C$  とその誤差  $E$  は、天体1と天体2のカウント値とその誤差から

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 \\ E &= (E_1^2 + E_2^2)^{0.5} \\ &= \left\{ \left( \frac{C_1 \cdot dm_1}{1.0857} \right)^2 + \left( \frac{C_2 \cdot dm_2}{1.0857} \right)^2 \right\}^{0.5} \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned}
 dm &= 1.0857 \cdot \left(\frac{E}{C}\right) \\
 dm^2 &= 1.0857^2 \cdot \left(\frac{E}{C}\right)^2 \\
 &= 1.0857^2 \cdot \frac{\left(\frac{C_1 \cdot dm_1}{1.0857}\right)^2 + \left(\frac{C_2 \cdot dm_2}{1.0857}\right)^2}{(C_1 + C_2)^2} \\
 &= \frac{(C_1 \cdot dm_1)^2 + (C_2 \cdot dm_2)^2}{(C_1 + C_2)^2}
 \end{aligned}$$

アンサンブル測光をすることに意味があるのは

$$dm^2 < dm_1^2$$

より

$$\begin{aligned}
 \frac{(C_1 \cdot dm_1)^2 + (C_2 \cdot dm_2)^2}{(C_1 + C_2)^2} &< dm_1^2 \\
 (C_1 \cdot dm_1)^2 + (C_2 \cdot dm_2)^2 &< (C_1 + C_2)^2 \cdot dm_1^2 \\
 C_2^2 \cdot dm_2^2 &< (2C_1C_2 + C_2^2) \cdot dm_1^2 \\
 dm_2^2 &< \left(2\frac{C_1}{C_2} + 1\right) \cdot dm_1^2 \\
 dm_2 &< \left(2\frac{C_1}{C_2} + 1\right)^{0.5} \cdot dm_1
 \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned}
 C_i &= 10^{-m_i/2.5} \\
 C_1/C_2 &= 10^{-m_1/2.5+m_2/2.5} \\
 &= 10^{(m_2-m_1)/2.5}
 \end{aligned}$$

ゆえに，アンサンブル測光をして意味があるのは，

$$dm_2 < (2 \cdot 10^{(m_2-m_1)/2.5} + 1)^{0.5} \cdot dm_1$$

の条件が満たされるときである．