

木曾シュミット・シンポジウム2018 (2018/07/10-11)

# 時間変動データを用いた 自主学習型解析体験教材の開発 ～小惑星探査と視差



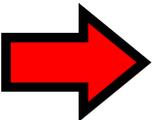
西浦 慎悟

(東京学芸大学・自然・宇宙地球科学)

山縣 朋彦 (文教大学・教育・理科専修)

伊藤 信成 (三重大学・教育・理科教育)

濱部 勝 (日本女子大学・理・数物科学)



# 1. はじめに～自主学習型教材の開発

「観測データは人類共通の財産」  
という天文学界独特の認識 + 高度情報化社会の発達

- ・ 豊富な観測データのアーカイブ化
- ・ 万人が容易にアクセス・入手可能なリソース

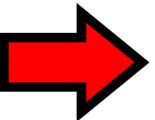
しかし、それでも残る高いハードル

- 1) どこからデータを入手するのか？
- 2) どのようなデータを入手するのか？
- 3) 入手したデータをどのように画像解析するのか？
- 4) どのように各種校正を行うのか？
- 5) どのような情報が抽出できるのか？
- 6) どのように情報を抽出するのか？

解決の一助と  
ならないか？

自主学習型教材の  
開発プロジェクト

中学・高校生が単独で研究活動を体験できることを目指し、  
様々なテーマに対して、観測データ（天体画像、校正用画像）・  
画像解析マニュアル・解説書などをパッケージ化した教材。



・ **自主学習型教材開発の現状：**

2011年度～撮像データの教材化

2014年度～分光データの教材化

画像解析実習用データ集 (西浦ほか, 2012, 東京学芸大学紀要 自然科学系, 64, 45-53)

星雲の発光機構の教育実践 (伊藤ほか, 2013, 三重大学教育学部研究紀要, 64, 35-40)

宇宙年齢導出 (西浦ほか, 2013, 東京学芸大学紀要 自然科学系, 65, 23-33)

教育実践報告 (山縣ほか, 2013, 「教育学部紀要」文教大学教育学部, 47, 171-177)

恒星の温度推定 (伊藤ほか, 2015, 地学教育, 68, 13-28)

HR図描画 (伊藤・高田, 2015, 地学教育, 68, 69-91)

月の視差検出 (伊藤・中川, 2016, 地学教育, 69, 49-72; 伊藤, 2018, 地学教育, 70, 95-111)

恒星スペクトル作成 (西浦ほか, 2016, 東京学芸大学紀要 自然科学系, 68, 73-82)

2017年度～時間変動データの教材化

時間変動現象の新検出法 (山縣ほか, 2017, 「教育学部紀要」文教大学教育学部, 51 ?)

番号	テーマ	番号	テーマ
1	人工衛星	9	銀河系の差動回転
2	地球の自転周期	10	小惑星の光度曲線
3	地球の公転周期	11	星食・掩蔽
4	光行差の検出	12	太陽面振動
5	小惑星の軌道推定	13	食連星・太陽系外惑星
6	流星の輻射点推定	14	脈動変光星
7	運動星団	15	超新星の光度変化
8	銀河系内での太陽運動		

高校の地学でも扱われる  
「視差」を用いた距離測定  
の教材化を目指す。

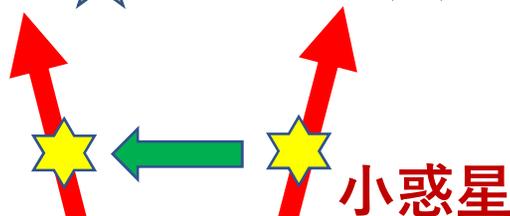
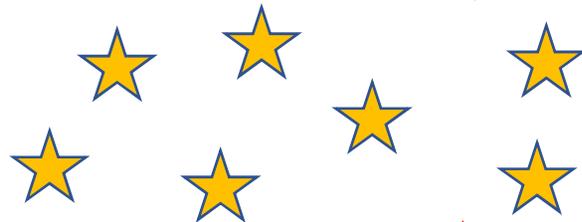
表1：時間変動テーマの  
候補一覧



## 2. 基本原理～小惑星の検出と距離測定

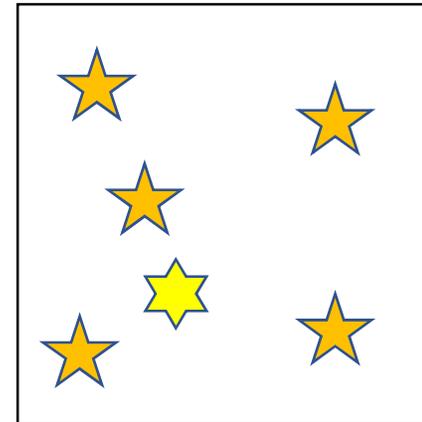
### (A) 小惑星検出の原理：

背景の星々（恒星）遠方に位置するため、見かけ上は不動。

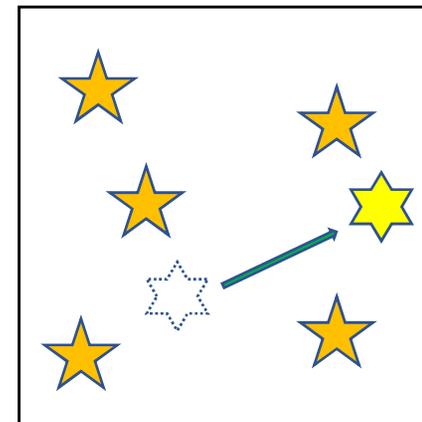


小惑星

近傍に位置するため、非常に短い時間でも、見かけの移動を検出することが可能である。



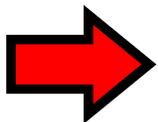
時間経過



時間をあけて撮影した、同じ天域の二つの画像を比べ、移動天体を探索する。

頻繁に使用されるのは、二つの画像を交互に表示して見比べる「ブリンク法」である。DS9やマカリィにはこの機能が内蔵されている。

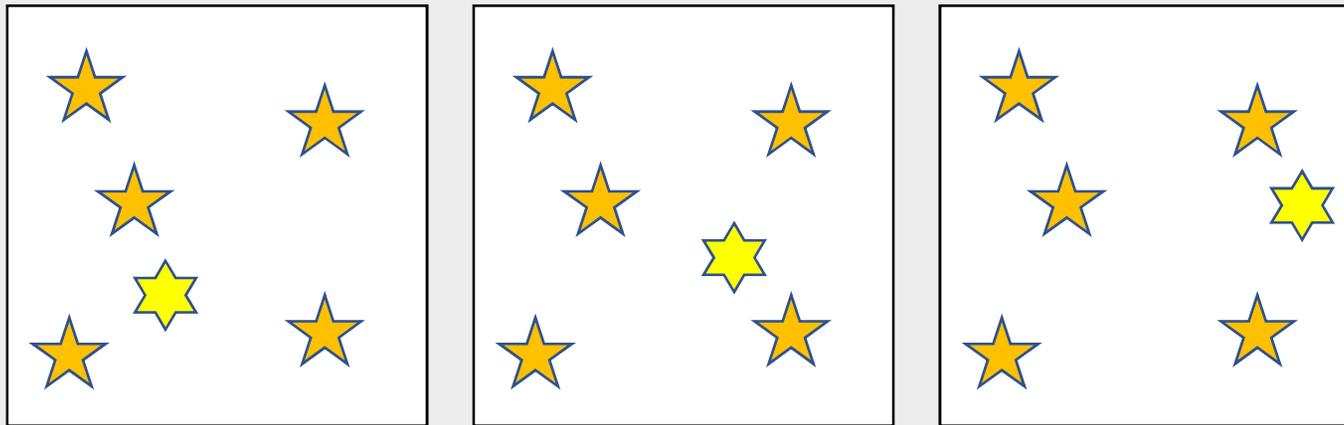
図1：小惑星検出の原理



## ・ 新たな検出方法「RGBカラー合成法」：

3枚の同天域・同波長帯の時系列撮像データに、それぞれ、赤(R)・緑(G)・青(B)を割り当て、疑似カラー合成することで、輝度変化や位置変化を色情報として視覚的に捕える方法。(山縣ほか2017,「教育学部紀要」文教大学教育学部,第51集)

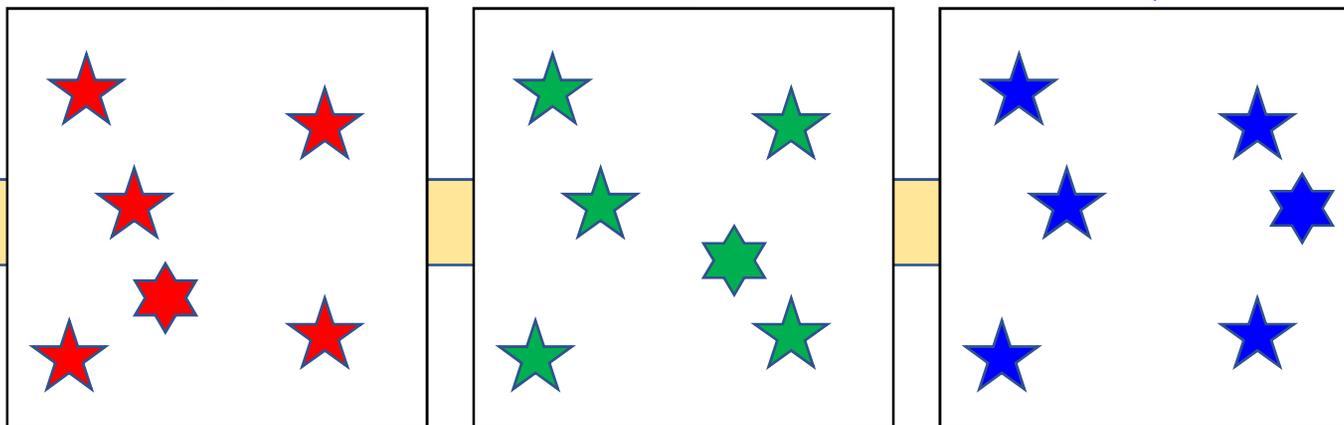
時系列で取得した同じ天域の撮像データ



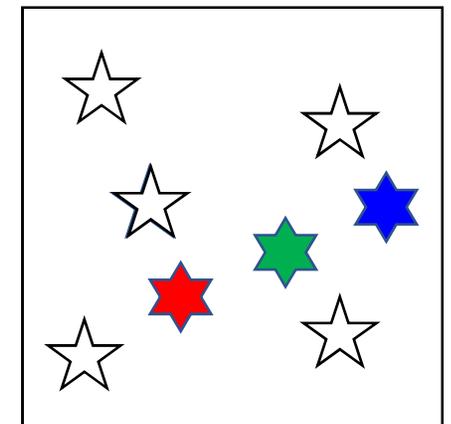
R

G

B



完成した疑似カラー画像

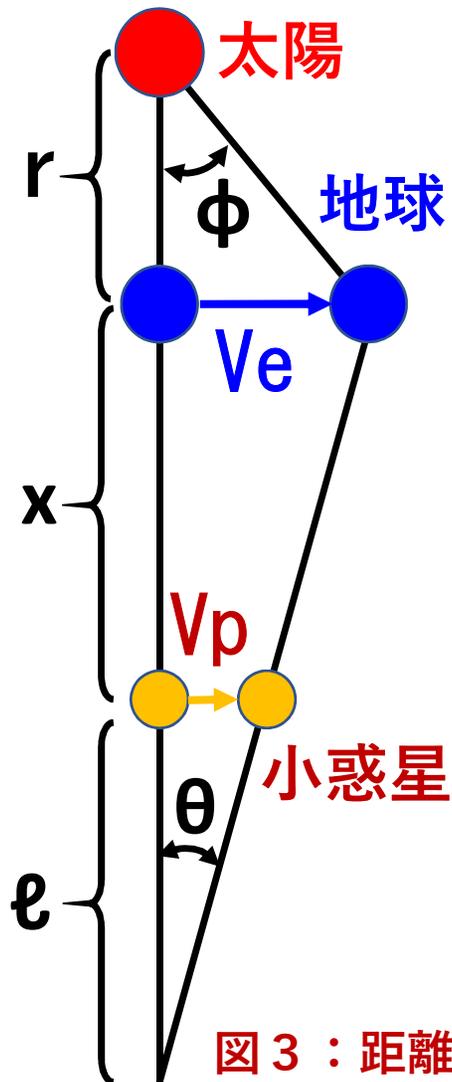


疑似カラー合成

図2：RGBカラー合成法のイメージ図

(B) 小惑星の距離測定の実理：次の原理1, 原理2のいずれかを使用

(原理1) 地球と小惑星は円運動していると仮定し、黄道上で衝の位置にある小惑星、太陽、地球の3者に対して、以下の様に設定する。



- $r$  : 太陽・地球間の距離
- $x$  : 地球・小惑星間の距離
- $V_e$  : 地球の公転軌道上の速度
- $V_p$  : 小惑星の公転軌道上の速度
- $\tau$  : 移動時間
- $d_e$  : 地球の移動距離
- $d_p$  : 小惑星の移動距離

幾何学的に

$$d_e = r\phi = V_e \tau = (x + l)\theta \quad \dots \text{式1}$$

$$d_p = l\theta = V_p \tau \quad \dots \dots \text{式2}$$

ケプラー則より

$$r V_e^2 = (r + x) V_p^2 \quad \dots \dots \text{式3}$$

図3：距離測定の実理1



式1、式2、式3から  $l$ 、 $V_e$ 、 $V_p$  を消去して、 $x$  に関する方程式、

$$\left(1 + \frac{x}{r}\right) \left(1 - \frac{x}{r} \frac{\theta}{\phi}\right)^2 = 1 \quad \dots \text{式4}$$

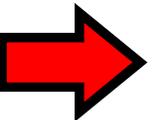
を得る。ここで、 $\frac{x}{r} \equiv y$ 、 $\frac{\theta}{\phi} \equiv \omega$ 、と置いて式を整理すると、

$$\omega^2 y^2 + \omega(\omega - 2)y + (1 - 2\omega) = 0 \quad \dots \text{式5}$$

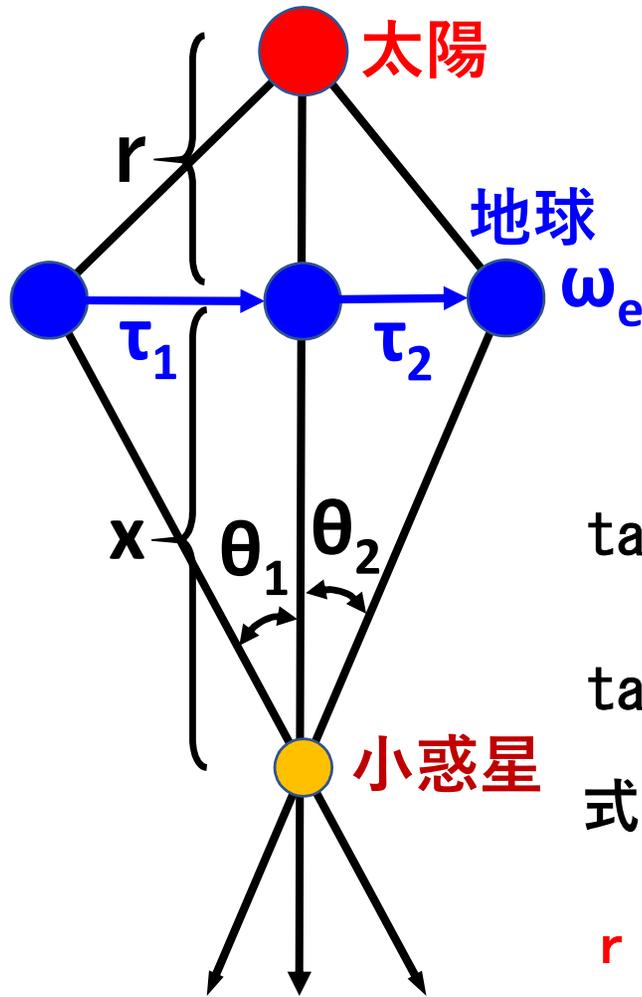
となり、この方程式を解き、意味のある解を採用すると、

$$y = \frac{1}{2\omega} \left[ 2 - \omega - \left( \omega(\omega + 4) \right)^{1/2} \right] \quad \dots \text{式6}$$

を得る。



(原理2) 地球と小惑星は円運動していると仮定し、地球が公転運動によって移動している間、黄道上で衝の位置にある小惑星はほぼ静止していると考える。また、各パラメータを以下のように設定する。



- $r$  : 太陽・地球間の距離  
 $x$  : 地球・小惑星間の距離  
 $\omega_e$  : 地球の公転の回転角速度  
 $\tau_1$  : 衝までの時刻  
 $\tau_2$  : 衝からの時刻  
 $\theta_1$  : 衝までの小惑星の移動角度  
 $\theta_2$  : 衝からの小惑星の移動角度

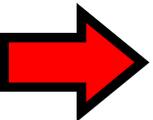
$$\tan \theta_1 = \frac{\omega_e r \tau_1}{x} \doteq \sin \theta_1 \doteq \theta_1 \quad \dots \quad \text{式7}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\omega_e r \tau_2}{x} \doteq \sin \theta_2 \doteq \theta_2 \quad \dots \quad \text{式8}$$

式7、式8を整理して、

$$r + x = \left[ 1 + \omega_e \frac{\tau_1 + \tau_2}{\theta_1 + \theta_2} \right] r \quad \dots \quad \text{式9}$$

図4 : 距離測定の原理2



### 3. 観測天域

- ・黄道帯上で観測日に衝となる天域を観測天域とした。

**表 2 : 観測天域の中心座標および観測日** 注) 天域の名称は便宜上のもの。

天域	RA(2000)	DEC(2000)	観測日(JST)
黄道帯 A	22h 05m 00.0s	-11° 22' 00"	2014年08月18日
黄道帯 B	21h 21m 18.0s	-15° 07' 00"	2016年08月08日

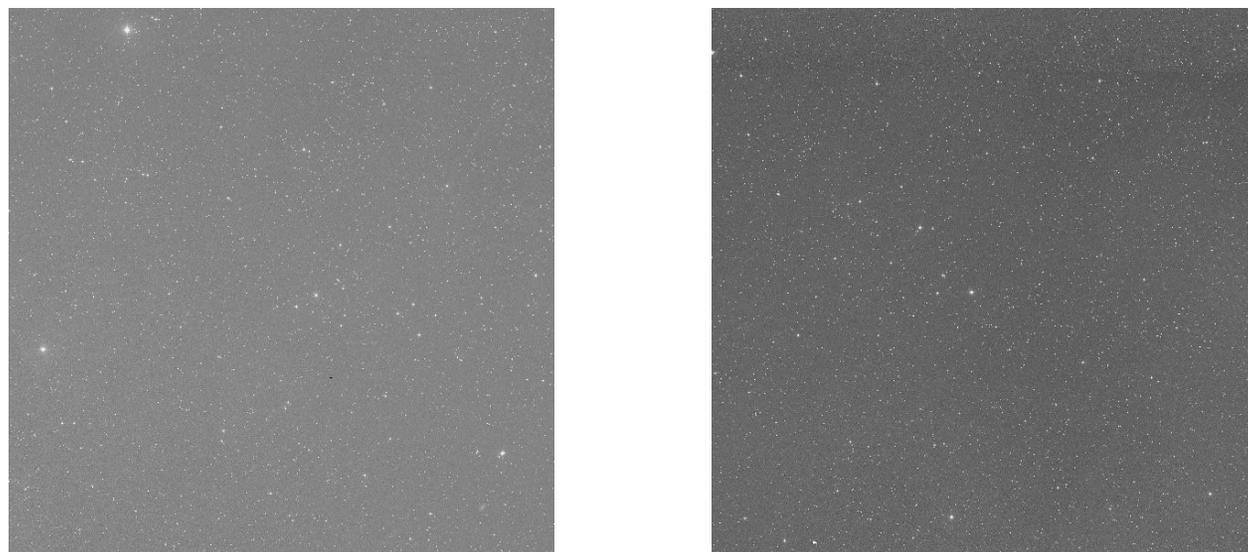


図5 : DSS-1 (Red) による、左) 黄道帯 A、および 右) 黄道帯 B 天域。  
視野は  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 、上が北、左が東。



## 4. 観測機器

東京大学大学院理学系研究科  
天文学教育研究センター木曾観測所

- 105cm シュミット望遠鏡  
有効口径105 cm  
F / 3.1



図6：木曾105cmシュミット鏡

- Kiso Wide Field Camera = KWFC

視野 =  $2^\circ \times 2^\circ$

ピクセル分解能 =  $0''.946 / \text{pix}$

MIT製 2k × 4k CCD × 4枚  
(チップ#0～#3)

SITe製 2k × 4k CCD × 4枚  
(チップ#4～#7)

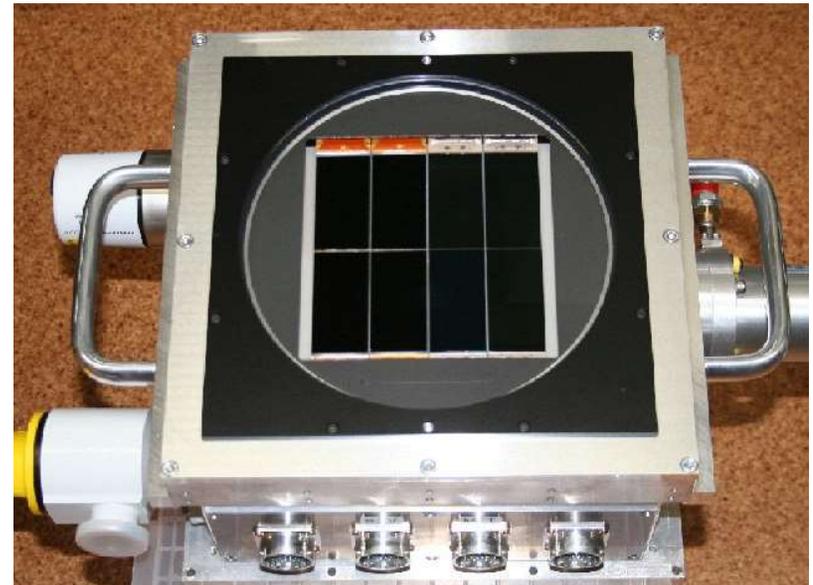


図7：Kiso Wide Field Camera (KWFC)



## 5. 観測および解析

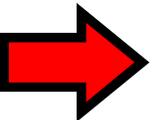
- ・ 目標天域(衝となる天域)を真夜中とその前後約 1 時間に、同じフィルター、同じ露光時間で撮像した。

**表 3 : 観測条件**

KWFC	観測天域	観測年月日	時刻	バンド	露光時間	Z.D.	天候
0086228	黄道帯 A	2014年08月18日	22:50	V	300 秒	50.44	快晴
0086229	//		22:59	V	300 秒	49.77	快晴
0086237	//		24:05	V	300 秒	47.24	快晴
0145280	黄道帯 B	2016年08月08日	23:09	Rc	180 秒	52.27	晴
0145290	//		24:10	Rc	180 秒	50.87	晴
0145298	//		24:55	Rc	180 秒	52.39	晴/薄曇

注) 悪天候のため、黄道帯 A では真夜中の 1 時間後の撮像は叶わなかった。

- ・ 典型的な画像解析をLinux上の **IRAF** で行った。
- ・ **ステライメージ** (アストロアーツ製) でRGBカラー合成を行った。



## 6. 実践例と考察

### ● 実践例～その1

(目的) 本教材用観測データによる、小惑星の検出とその距離測定値の合理性を検証する。

(日時) 2015年08月10日～13日 天体観測解析実習

(対象) 東京学芸大学教育学部3年生×1名

文教大学教育学部3年生×2名

三重大学教育学部2年生×3名

(解析) 黄道帯Aの全8チップ画像、距離測定は原理1に基づく。

(結果) ・6名で全8チップ画像から、164個の小惑星を検出した。  
・検出した小惑星のほとんどは、太陽から2.0～3.5天文単位の場所に位置していた。

→ 火星と木星の間

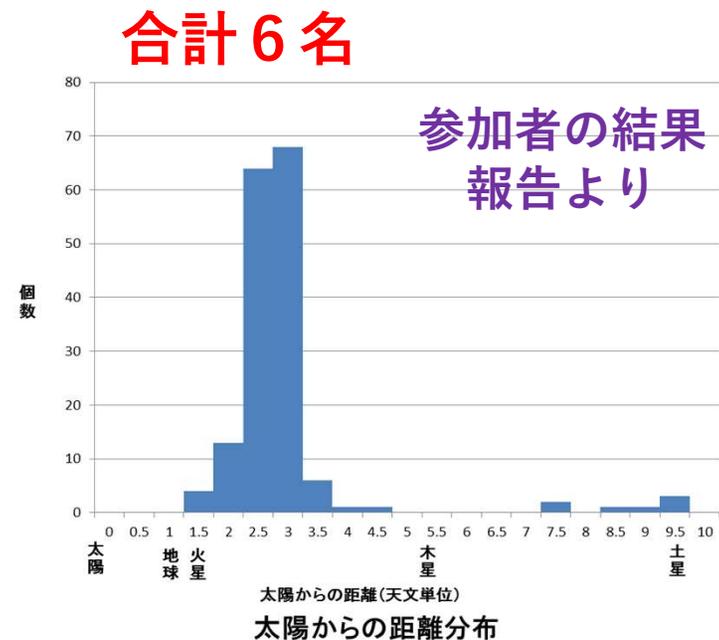


図8：検出された小惑星の位置分布



## ● 実践例～その2

(目的) 本教材用観測データによる、小惑星の検出とその距離測定値の合理性を検証する。

(日時) 2016年08月08日～11日 天体観測解析実習

(対象) 東京学芸大学教育学部3年生×1名  
文教大学教育学部3年生×1名  
三重大学教育学部2年生×1名  
合計3名

(解析) 黄道帯Bのチップ#3、#4画像、距離測定は原理2に基づく。

(結果) ・3名でチップ#3画像から12個、チップ#4画像から9個の小惑星を検出した。  
・検出した小惑星のほとんどは、太陽から3.5～5.5天文単位の場所に位置していた。  
→ 火星と木星の間

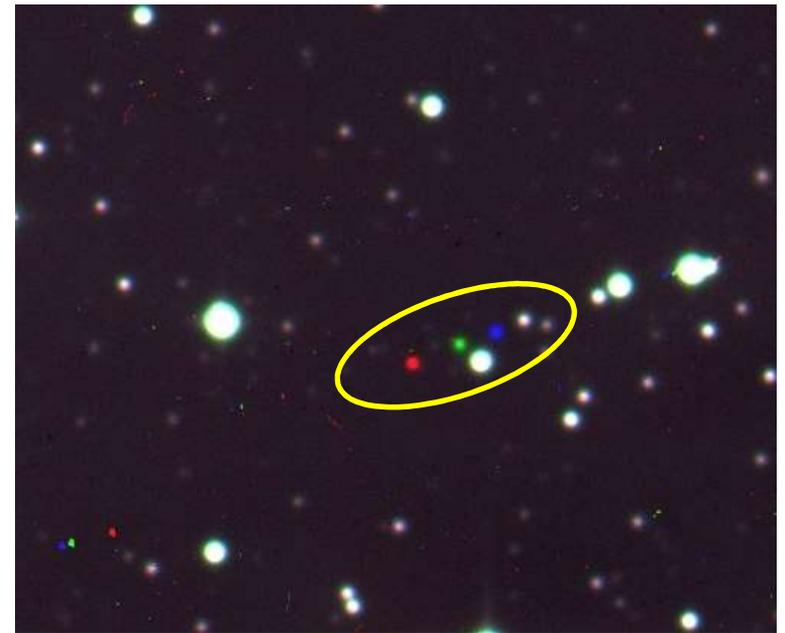
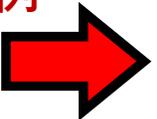


図9：浮かび上がった小惑星の例



## ● 実践例～その3

(目的) ブリンク法とRGBカラー合成法による小惑星の検出数を比較する。

(日時) 2017年08月17日～20日 天体観測解析実習

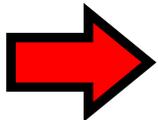
(対象) 文教大学教育学部3年生×2名  
三重大学教育学部2年生×2名 **合計4名**

(解析) 4名に黄道帯Bのチップ#2、#3、#4、#5画像を1枚ずつ割り当て、先にブリンク法で小惑星を検出させた。その後、担当するチップ画像を変えて、RGBカラー合成法で検出を行わせた。距離測定は原理1に基づく。

(結果) ・チップ毎の検出数の違いは**表4**を参照。RGB合成法の方がブリンク法よりも検出数が多かった。  
・チップ#2、#3、#4、#5から、それぞれ、**5個、6個、8個、2個**の小惑星を検出した。  
・位置分布は**1.5～5.5天文単位**。  
→ **火星と木星の間**

**表4：検出方法と検出数**

chip	ブリンク	RGB合成
#2	3個	5個
#3	4個	8個
#4	2個	6個
#5	2個	2個



## ● 実践例～その4

(目的) ブリンク法とRGBカラー合成法による小惑星の検出数を比較する。

(日時) 2017年11月24日、12月01日 地学教育実践論演習 A

(対象) 東京学芸大学大学院教育学研究科1年生 × 3名

(解析) 3名に黄道帯Aのチップ#3、#4、#7画像を1枚ずつ割り当て、その3と同様に小惑星を検出させた。距離測定は行わなかった。

(結果) ・チップ毎の検出数は表5を参照。  
RGB合成法の方がブリンク法よりも検出数が多かった(紫数字は天文研院生による)。

chip	ブリンク	RGB合成
#3	5個	16個
#4	6個	7個
#7	8個	8個

表5：検出方法と検出数

### 考察

- ・実践1～3より、簡単な仮定の下であっても、検出された小惑星の位置は、ほぼ火星と木星の間と算出されることが確認できた。
- ・実践例3と4より、従来のブリンク法と比べて、RGBカラー合成法の方が、小惑星の検出率が向上することが確認できた。

本研究報告は、学術振興会 学術研究助成基金助成金（16K12750：代表 西浦慎悟、17K00971：代表 伊藤信成）の支援を受けています、心から感謝申し上げます。また、天体観測解析実習に参加した全ての学生・院生・教員の皆さんに御礼申し上げます。