

反射光特性からさぐる
小惑星 2000LN19 の分光型分類

天文ゼミ

0 5 1 7 亀岡千茶

目次

1.序論	3－18
1－1 本研究の目的	4
1－2 小惑星の概要	5－8
2.観測	19－30
2－1 概要	20－23
2－2 観測方法	24－30
3.解析	31－43
3－1 一次処理	33－34
3－2 解析	35－43
4.結果	44－48
5.考察	49－55
6.謝辞	56－57
参考文献	58－59

1. 序論

1 – 1 本研究の目的

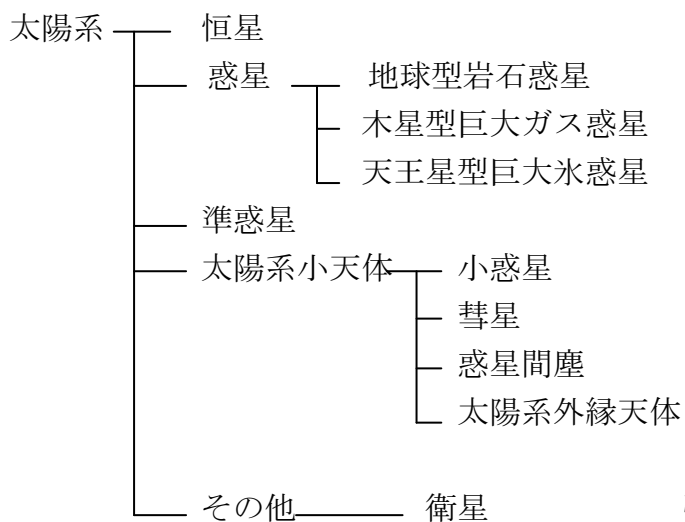
本研究の目的は、地上で出来る観測によって表面組成が未知の小惑星の表面組成を考察、推定することにある。可視光のスペクトルを知ることによって小惑星の表面組成を知ることができる。

そのために、後述の小惑星の g 等級、 r 等級、 i 等級、を求め、二つの波長域の等級の差である色指数を算出する。また色指数の値を基に二色図にプロットし、そのプロットされた領域をもとに、小惑星のスペクトルタイプの推定を行う。

既知の小惑星のスペクトルタイプの分布から本研究のターゲット天体 (2000LN19) の小惑星の分類を考察したい。ここから、その小惑星の表面組成に関して議論を行った。

1-2 小惑星の概要

今回観測する小惑星は、我々のいる太陽系の天体では以下のように分類される。



引用先：阿部雄太さん卒論

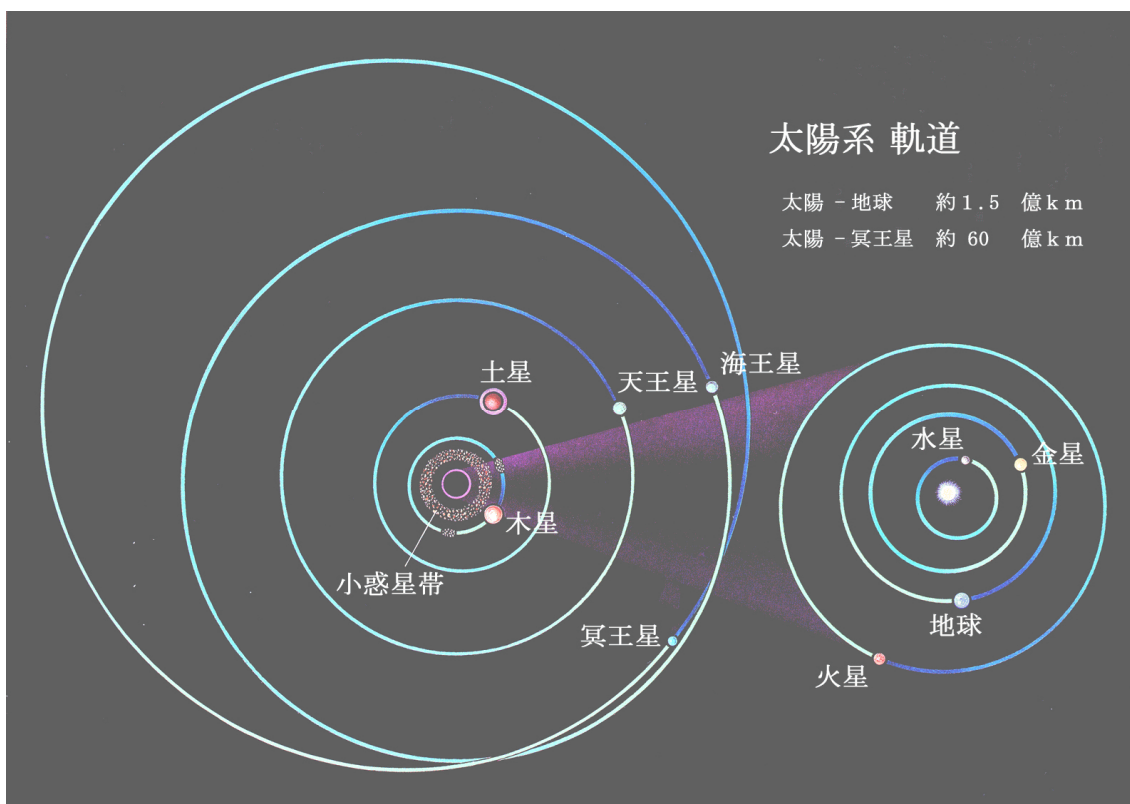


図 1-2-1 太陽系軌道

(引用先：http://www.geocities.jp/t_shimizu2003/earth_histry_1_1_m.html)

小惑星の定義は、「太陽系小天体のうち、岩石、金属、氷等を主成分とし彗星活動を意味するコマや尾をもっていないもの」であるが、小惑星もその軌道や表面組成のスペクトルによって細かく分類される。

1 軌道要素による分類

小惑星の軌道を数値で表したのが軌道要素である。以下に軌道要素について説明する。

・軌道長半径 (semi-major axis)

楕円軌道の長軸の半分の距離。近日点から遠日点までの距離の半分でもある。記号「 a 」で表す。単位はAUが多く用いられる。

*AU・・・Astronomical Unit (天文単位) の略。

天文学で用いる長さの単位。

1 AU = 1.4968億km (太陽～地球の平均距離)

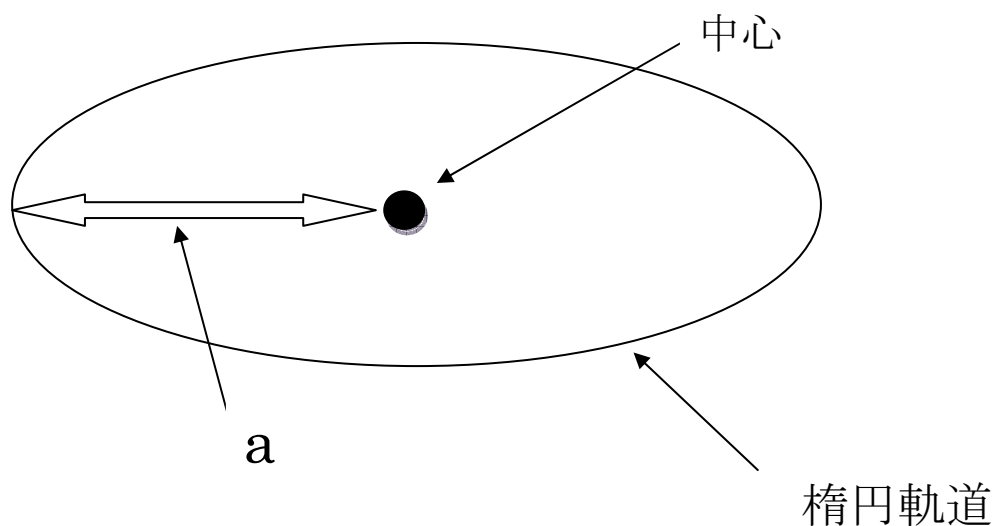


図 1-2-2 軌道長半径

- ・近日点距離 (perihelion distance)

楕円軌道上の太陽に一番近い点が近日点であり、近日点と太陽の距離が近日点距離となる。「 q 」で表し、単位はAU。

反対に太陽から一番遠い点は遠日点。そこから太陽までの距離は遠日点距離と言い「 Q 」で表す。

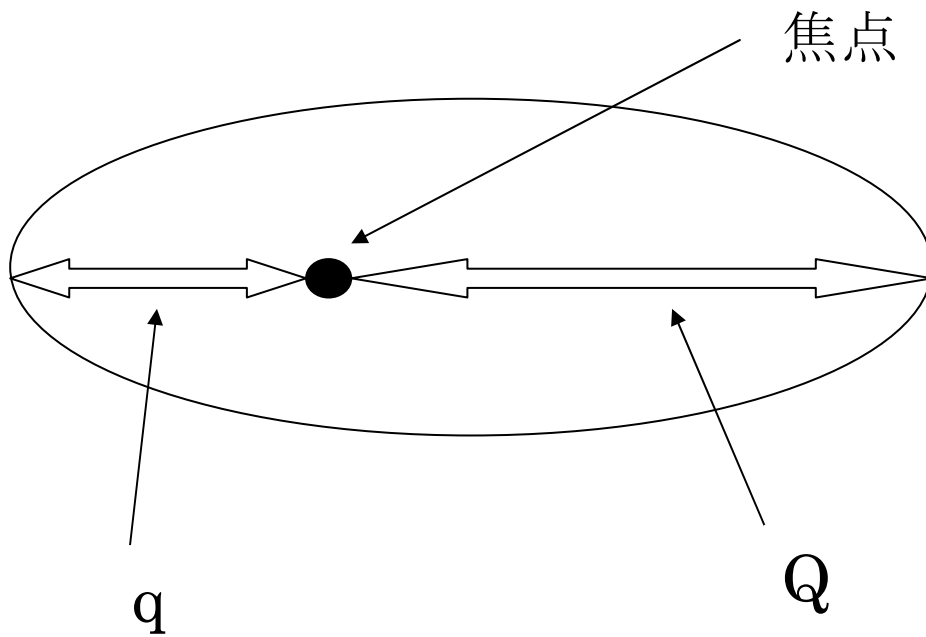


図 1-2-3 近日点距離

・離心率 (eccentricity: e)

円がどの程度潰れているかを表す値。焦点から近日点、つまり近日点距離を「 f_1 」。遠日点距離を「 f_2 」とおくと、離心率 e は以下のように表すことができる。

$$e = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}$$

この離心率の値のよって円がどのようなになっているかが分かる。

$e=0$	円
$0 < e < 1$	楕円
$e=1$	放物線
$1 < e$	双曲線

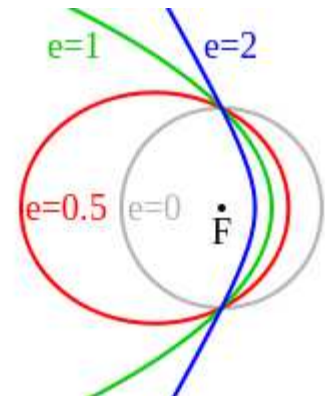


図 1-2-4 離心率 (引用先: <http://ja.wikipedia/>.)

・軌道傾斜角 (inclination: i) 度

天体の軌道面と地球の軌道面がなす角度を軌道傾斜角という。90度以上ならば、地球の公転方向と逆回転で公転する逆行天体である。

・近日点引数 (argument of perihelion: peri) 単位 度

太陽から昇公転方向と近日点のなす角度を近日点引数という。

- ・昇交点黄経 (longitude of the ascending node: node) 度
地球の春分点方向と昇交点方向がなす角度のこと。

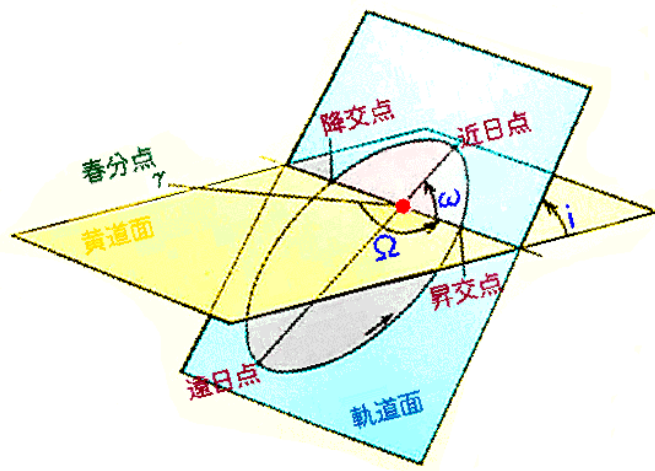


図 1-2-5 昇交点距離

(引用先 : <http://www.f-space.co.jp/~m-kudou/kudohmichiko/elem1.htm>)

以上のような主要な軌道要素を比較したとき、似通っているものをグループわけしており、「族」や「群」と呼ばれる。これらのグループは、母天体（原始惑星）が分裂して小惑星になり、同じ所を回っているものや、木星などの巨大引力の影響によって一定の範囲に集まっているものと考えられる。

- 「群」

小惑星のうち、軌道長半径や公転周期などの軌道要素が類似している小惑星のグループのこと。

- 「族」

小惑星の群のうち、一つの大きな母天体が衝突破壊などによって、砕かれ、小さくなった破片が群を形成していると考えられるもの。

- ・メインベルト小惑星 (Main-belt Asteroid)

火星と木星の軌道間に存在する小惑星をメインベルト小惑星という。メインベルト小惑星は現在発見されている小惑星の9割強を占めている。

火星の軌道から木星の軌道までの領域は小惑星で構成されているため、アステロイドベルトや小惑星帯ともいう。

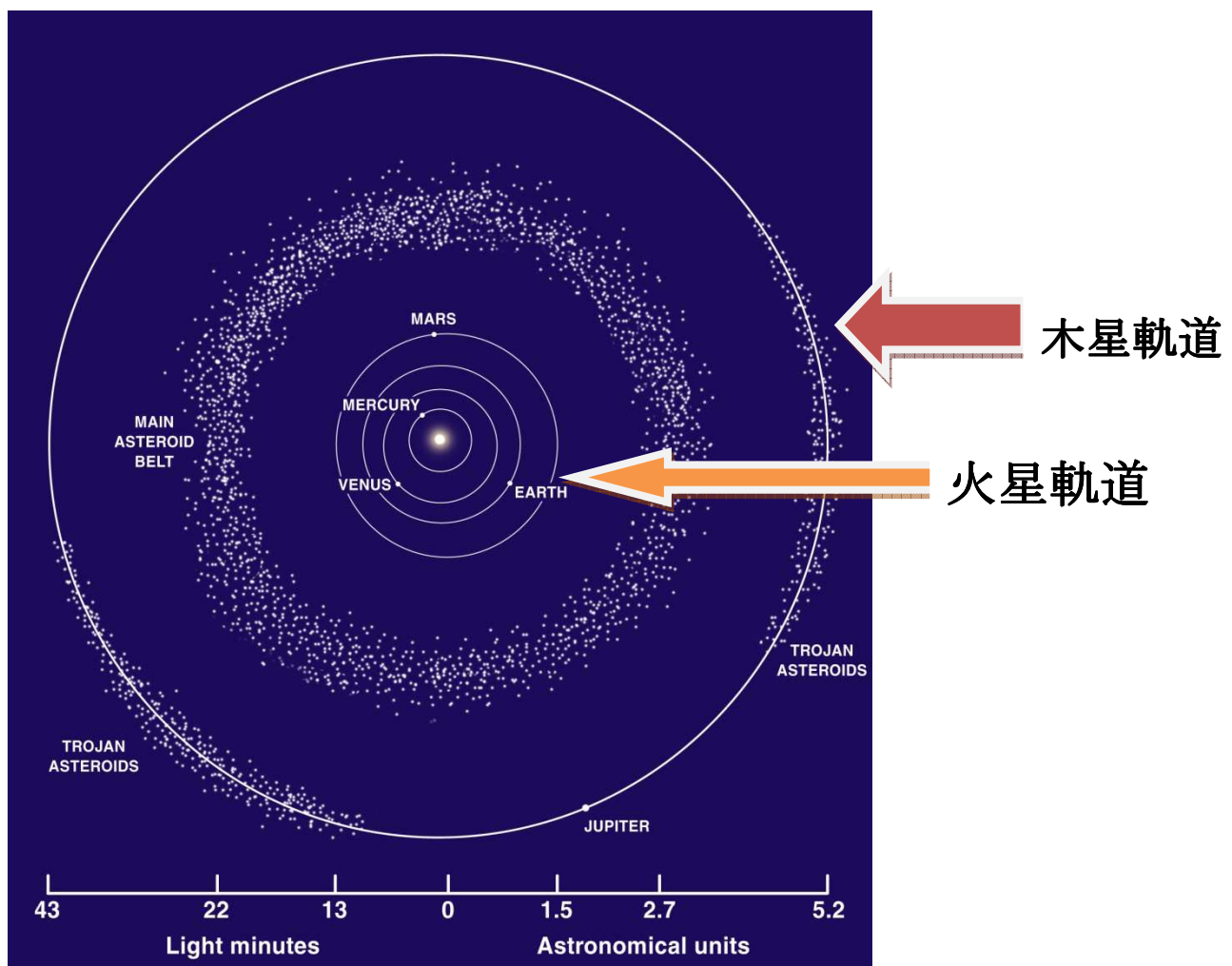


図 1-2-6 メインベルト小惑星の分布

(参照先 <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Asteroid>)

ほとんどのメインベルト小惑星は、木星と小惑星の公転周期の比が4 : 1 と 2 : 1 の関係になるような軌道長半径の間（2 AU~3.3 AU 付近）に位置している。しかし、比が4 : 1、3 : 1、5 : 2、7 : 3、2 : 1になる位置にはほとんど存在しない。

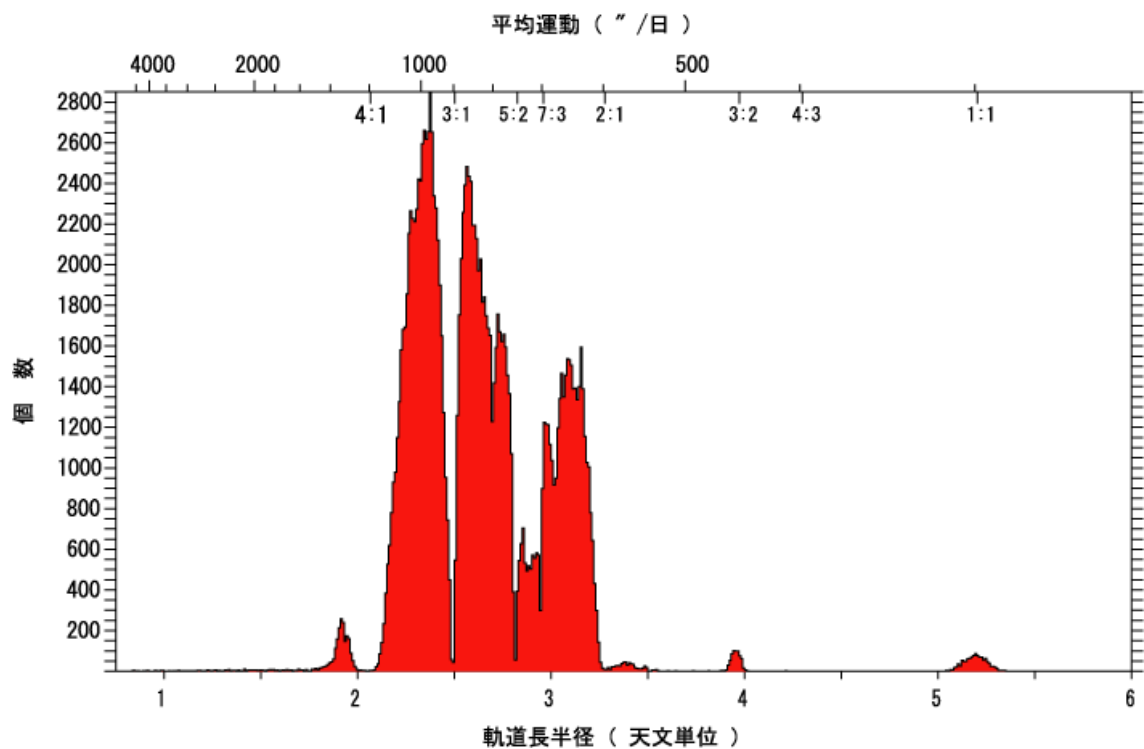


図 1-2-7 小惑星の分布

(参照先 http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_027.html)

- ・地球近傍小惑星

地球に接近する軌道をもつ小惑星を地球近傍小惑星という。軌道長半径、遠日点距離、近日点距離の要素によってさらに細かく以下のように分類される。

	軌道長半径	遠日点距離	近日点距離	小惑星数
アテン群	1 AU 以下	0.983AU 以上		632 個
アポロ群	1 AU 以上		1.017AU 以下	3810 個
アモール群	1 AU 以上		1.017AU 以上 1.3AU 未満	3172 個

- ・アテン群・・軌道のほとんどが地球の公転の内側に存在する小惑星群
例) Aten

- ・アポロ群・・軌道のほとんどが地球の公転軌道の外側に存在する小惑星群
例) Apollo, Itokawa

- ・アモール群・・軌道が地球の内側に入ることはないが、地球の公転軌道に近く存在する小惑星群
例) Amor

- ・トロヤ群

木星のラグランジュ点（L4,L5）付近に存在する小惑星をトロヤ群という。広義には惑星のラグランジュ点に存在する小惑星をトロヤ群というため火星や海王星にもトロヤ群の小惑星が存在する。小惑星によって多少の違いはあるものの、トロヤ群の小惑星は木星との位置関係を保ちながら公転するため、公転周期は木星と同じ約 11.2 年である。

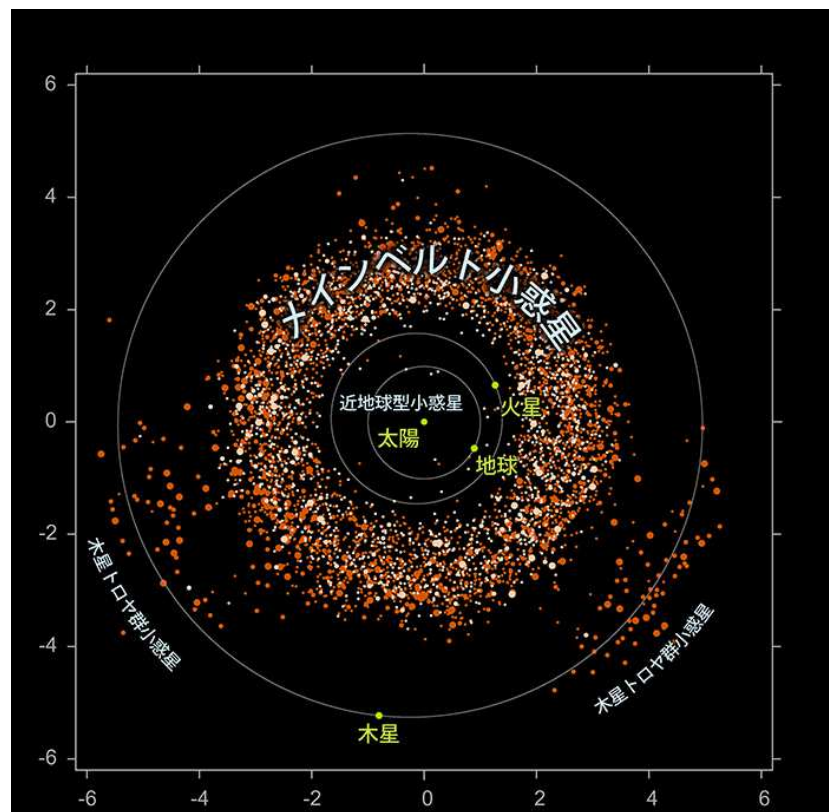


図 1-2-8 トロヤ群の分布

(参照先 <http://www.astroarts.co.jp/news/2011/10/14akari/index-j.shtml>)

*ラグランジュ点

大きな質量を天体が公転すると、その軌道上に安定して存在できる点が存在する。これをラグランジュ点という。将来宇宙移民の方法として宇宙にスペースコロニーという建造物をつくるという案があるが、このスペースコロニーはこのラグランジュ点におかれる。これはラグランジュ点において、物体が安定して地球の周期を公転できるためである。L4は軌道的前方60度に位置し、L5は軌道の後方60度に位置する。

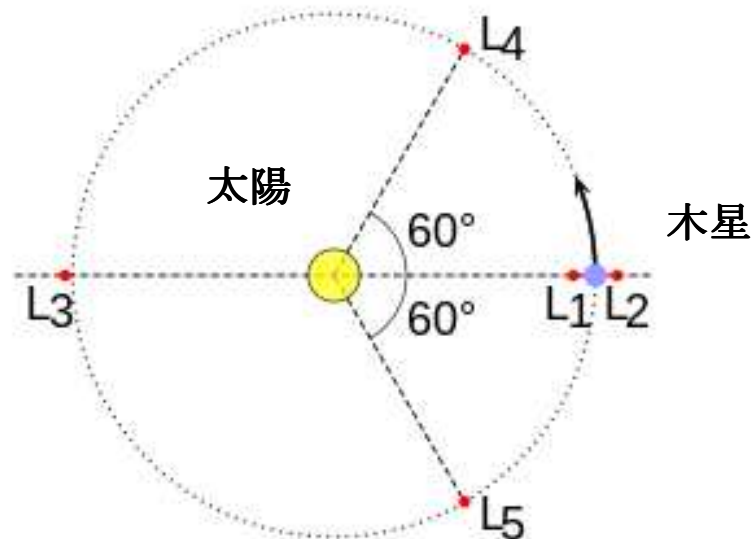


図 1-2-9 太陽と木星のラグランジュ点の位置関係
(参照先 <http://ja.wikipedia.org/wiki>)

- ・ ケンタウルス族

木星と海王星の軌道を公転する氷で覆われた小惑星の分類名。最初に発見されたケンタウルス族はキロンであり、キロンは近日点に近づいた際にコマが観測されたために現在は彗星と小惑星であるとされている。

ケンタウルス族の特徴として、巨大惑星の摂動などの作用によって太陽系から飛び出してしまう軌道が不安定になっている。さらに公転軌道の力学的研究では、太陽系外縁天体から木星族の短周期彗星へと移り変わる途中の段階であるともいわれている。

2、表面組成による分類

我々が見ることができるのが可視光であり、その波長は 0.38～0.77 マイクロメートルの範囲である。しかし、小惑星は可視光の範囲においては、ほぼ光っていないため小惑星は放射している光をみることは不可能である。実際に我々が見ている小惑星の光は、太陽光が小惑星に反射している光である。物体は放射している光のスペクトルによってその成分が明らかになっているのと同様に小惑星のスペクトルによって小惑星の表面組成を考察することができる。これは小惑星の表面物質が太陽光の特定の波長を吸収しているためである。

小惑星のスペクトルによる表面組成の分類を以下に示す。

● S 型小惑星

ケイ酸鉄・ケイ酸マグネシウムなどの石質の物質を主成分とする小惑星。既に知られている小惑星の約 17%を占める。「S」は英語で石質を意味する“Stony”やケイ素質を意味する“Silicaceous”の頭文字である。

S 型小惑星はケイ酸塩ニッケルや鉄などの金属物が混合した化学組成であり、アルベドは 0.10～0.22 と比較的明るい。

● C 型小惑星

炭素系の物質が主成分の小惑星。既に知られている小惑星の約 75%がここに分類される。「C」は英語で炭素質を意味する形容詞“Carbonaceous”の頭文字である。

アルベドは 0.03 程度で非常に暗く、炭素の含有量が高い炭素系コンドライト隕石と類似した特徴をもっている。スペクトルは他のタイプの小惑星よりも青色が多く含まれている。

● M 型小惑星

ニッケルや鉄などの金属を主成分とする小惑星。小惑星の中では3番目に多いグループであり、アルベドは0.10~0.18とやや明るめ。これらの小惑星は、太陽系形成初期の原始小惑星の金属核が衝突等で引きはがされたものと考えられている。

● その他の小惑星

現在発見されている小惑星の9割以上はS型とC型であるが、その他にもS型やC型をさらに細かく分類したものや、数は少ないが分類されている小惑星があるので以下にしめす。

アルベドとは光の入射量に対する反射量の比であり、1だと受けた光を全て反射し、0だと受けた光を全て吸収する物体である。

タイプ	アルベド	スペクトルの特徴
T タイプ	0.042	C タイプに似ている
P タイプ	0.05	M タイプに似ている
D タイプ	0.05	0.7 μ m で深く溝がある
F タイプ	0.065	平らなスペクトル
B タイプ	0.065	C タイプに似ている
G タイプ	0.065	C タイプに似ている
A タイプ	0.12	0.7 μ m にかけて急に上昇する
Q タイプ	0.21	普通コンドライトに似ている
V タイプ	0.25	0.95 μ m で深い吸収線
R タイプ	0.25	赤が目立つ
E タイプ	0.33	比較的赤く平坦

図 1-2-10 小惑星のタイプ

(引用先：http://atsites.jp/yoshitoharada/2045_asteroid.html)

2 観測

2-1 概要

今回の研究は天文学では、観測天文学に分類される。さらに観測天文学は観測する媒体を電磁波に限定し、波長ごとに分類すると以下ようになる。

- ・観測天文学 —————→
 - ・電波天文学
 - ・赤外線天文学
 - ・可視光天文学
 - ・高エネルギー天文学

本研究では可視光天文学を用いて行う。

● 可視光天文学とは

人間の目で見える光を用いて行う天文学のこと

また、観測の手法によっても大きく3つに分類することができる。

- | | | |
|-------------------|-----|---|
| ・観測方法 —————→ | ・測光 | 天体からの光の量を測る。 |
| | ・分光 | 天体からの光を分散素子（プリズム・回折格子）を用いて波長ごとに分解し、その強度を測る。 |
| | ・偏光 | 天体からの光を偏光素子を用いて一定方向にのみ振動する光として抽出すること |

本研究ではこれらの分野の中から「可視光測光観測」を行う。

● 観測場所



なよろ市立天文台きたすばる

施設名	北海道大学 大学院 理学研究院 附属天文台
位置	北緯 44° 22 '27
住所	北海道名寄市字日進 157 番地 1

● ペリカ望遠鏡

本研究では、北海道大学が名寄市に設置したペリカ望遠鏡を使用した。

ペリカ望遠鏡は経緯台式反射望遠鏡で、仕様は以下に示す。



図 2-1-1 1.6m望遠鏡（ペリカ望遠鏡）

● ピリカ望遠鏡の仕様

全体光学系

焦点	: カセグレン式
有効口径	: 1600mm
合成焦点距離	: 19238mm (F/12.6)
有効視野	: カセグレン式 20 分各

主鏡

材質	: 無膨張セラミックガラス
サイズ	: 直径 1620mm、厚み 220mm
コーティング	: SiO 保護膜付きアルミニウム

副鏡

材質	: 無膨張セラミックガラス
サイズ	: 直径 305.6mm、厚み 50mm

2-2 観測方法

● 観測対象の決定・事前準備

観測対象を決定する時、小惑星が観測できる時間帯、等級、高度、赤径、赤緯など観測に必要なものがたくさんある。

NASAのホームページJPLの観測支援システムを用いて小惑星の情報を入手した。

JPL内の「SB What's Observable」から天体を検索する。ここでは、小惑星と彗星の検索ができる。



図 2-2-1 SB What's Observable (引用先: <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbwobs.cgi>)

“Current Setting”は現在選択されている設定であり、大きく分けて3つの設定ができる。

Observation Time → 観測する日時を設定する。表示は世界時(Universal Time)なので、日本で観測する場合は「UT-9」を選択する。

Observer Location → 観測する場所を設定する。登録されている地点を選択するか、経度・緯度を直接入力することで設定する。

- Observer Constrains → 観測対象を選択する細かい条件を設定する。
- Mag.Limit : 検索する小惑星の限界等級。
 - Zenith Dist : 天頂からの角度。この範囲で対象を探す。
 - Obs.Duration: 観測を継続できる最低時間(分)
 - Require Mag.Param's : 等級の情報を要求するか。
 - Group : 検索する対象の種類。小惑星は“ast”
 - Max.Output : リストアップする上限数。

これらを自分の観測にあわせて設定し“Find Observable Objects”をクリックすれば、条件にあった天体が図のようにリストアップされる。

16197 Bluepeter	07:42*	12:10	16:37	07:27	23:48:04	+19 59'42"	15.7	1.87	.949	80.28
16488 1990 RX8	09:24	13:36	17:48	08:24	01:15:04	+15 36'12"	15.8	1.81	.822	61.38
16535 1991 NF3	08:41*	13:42	18:43	09:33	01:20:55	+29 43'22"	15.5	2.11	1.15	57.78
16606 1993 FH11	09:50	13:43	17:35	07:45	01:21:16	+10 34'07"	15.8	2.06	1.07	61.20
16774 1996 VP1	07:49*	12:49	17:49	08:39	00:27:32	+29 17'20"	15.3	1.94	1.00	69.34
17142 1999 JQ95	12:40	15:43	18:46	06:06	03:21:49	-00 14'47"	16.0	2.08	1.13	37.56
17407 1987 TG	09:55	12:39	15:23	05:28	00:17:55	-03 33'50"	16.0	1.95	1.02	80.65
17941 Horbatt	12:55	16:17	19:40*	06:23	03:56:24	+03 39'45"	15.9	1.86	.933	28.20
18301 Konyukhov	10:49	15:31	20:13*	08:29	03:10:04	+24 11'07"	15.6	2.00	1.05	33.59
19732 1999 XF165	12:59	13:42	14:26	01:27	01:21:06	-15 25'13"	15.4	2.01	1.08	70.94
20421 1998 TG3	09:10	12:46	16:21	07:10	00:24:13	+06 27'05"	15.8	1.96	1.00	75.89
20767 2000 PN24	11:38	16:14	20:51*	07:40	03:53:23	+22 30'21"	15.8	2.19	1.28	23.58
20792 2000 SH88	11:08	12:47	14:25	03:16	00:25:10	-11 55'03"	16.0	1.85	.934	81.93
21182 1994 EC2	09:11	12:02	14:52	05:40	23:40:05	-02 31'36"	15.5	1.79	.885	89.21
22104 2000 LN19	10:02	15:13	20:25*	09:15	02:52:20	+32 49'36"	15.4	1.96	1.01	38.45
22110 2000 QR7	11:17	16:12	21:06*	08:00	03:50:41	+27 44'40"	16.0	1.94	1.02	25.04
22412 1995 UQ4	11:17	14:16	17:15	05:58	01:55:06	-00 57'52"	14.8	1.91	.928	57.12
24038 1999 SL8	10:58	14:26	17:53	06:55	02:04:35	+04 46'17"	15.7	1.72	.728	52.77
24280 Rohenderson	09:58	14:41	19:23*	09:19	02:19:42	+24 10'33"	15.9	1.99	1.01	45.07
24445 2000 PM8	18:56	20:40*	22:24*	00:22	08:19:46	-11 20'45"	15.2	1.01	.385	51.04
24827 Maryphil	05:22*	10:14	15:05	05:55	21:51:53	+26 48'04"	15.7	1.80	1.07	102.4
24939 Chiminello	11:34	14:22	17:10	05:35	02:01:06	-02 55'22"	15.5	1.92	.945	56.56
25505 1999 XQ95	08:43*	14:04	19:26*	10:08	01:43:02	+35 49'44"	15.9	2.05	1.10	52.99
26858 Misterrogers	11:30	15:02	18:34	07:04	02:40:38	+05 44'59"	13.9	1.74	.753	44.04
29016 4591 P-L	09:55	14:02	18:09	08:13	01:40:53	+14 10'31"	16.0	2.14	1.15	55.65
29943 1999 JZ78	13:10	16:06	19:03	05:52	03:45:32	-01 29'43"	15.3	2.93	2.03	33.48
33659 1999 JM91	11:19	13:59	16:40	05:21	01:38:07	-04 08'33"	15.9	2.21	1.24	62.28
37424 2001 YA3	09:47	15:17	20:48*	09:30	02:56:24	+38 18'25"	15.7	2.08	1.16	39.03

図 2-2-2 リストアップされた天体

天体名をクリックすると、その天体の様々な情報が表示される。ここで、下位に表示される “Physical Parameter Table”はその天体でこれまでに発表された物理量である。

Physical Parameter Table						
Parameter	Symbol	Value	Units	Sigma	Reference	Notes
absolute magnitude	H	13.2	mag	n/a	PDS3 (MPO 8964)	

図 2-2-3 天体の情報

この項目から自分が研究する内容が既に発表済でないかを確認する。研究が進んでいない天体の中から目標天体を決定する。

この小惑星はまだ絶対等級しか分かっていない。

●本研究の観測対象

本研究の観測対象は 2000LN19 である。この小惑星の軌道要素と分かっている物量は以下の通りである。

Orbital Elements at Epoch 2456600.5 (2013-Nov-04.0) TDB Reference: JPL 7 (heliocentric ecliptic J2000)				Orbit Determination Parameters	
Element	Value	Uncertainty (1-sigma)	Units	# obs. used (total)	611
e	.2428398733854226	9.9397e-08		data-arc span	21233 days (58.13 yr)
a	2.583563382050987	2.0554e-08	AU	first obs. used	1955-10-23
q	1.956171177470511	2.6002e-07	AU	last obs. used	2013-12-10
i	12.2260585620419	1.1556e-05	deg	planetary ephem.	DE431
node	260.429404879779	3.4553e-05	deg	SB-pert. ephem.	SB431-BIG16
peri	129.1235087615205	4.1885e-05	deg	condition code	0
M	8.359570102356908	1.9395e-05	deg	fit RMS	.48914
t_p	2456565.278442963098 (2013-Sep-29.77844296)	8.1784e-05	JED	data source	ORB
period	1516.795765575269	1.81e-05	d	producer	Otto Matic
	4.15	4.956e-08	yr	solution date	2013-Dec-20 05:20:01
n	.2373424347367322	2.8323e-09	deg/d	Additional Information	
Q	3.210955586631463	2.5545e-08	AU	Earth MOID = .987245 AU	
				T_jup = 3.350	

[show covariance matrix]

図 2-2-3 観測対象

(引用先 : <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2000LN19>)

軌道要素	数値	単位
a 軌道長半径	2.583563382050987	AU
e 離新率	0.2428398733854226	—
q 近日点距離	1.956171177470511	AU
i 軌道傾斜角	12.2260585620419	deg
node 昇交点黄径	260.429404879779	deg
peri 近日点引数	129.1235087615205	deg
period 公転周期	4.15	yr

また、2000LN19 の公転軌道を図で表すと以下のようにになっている。

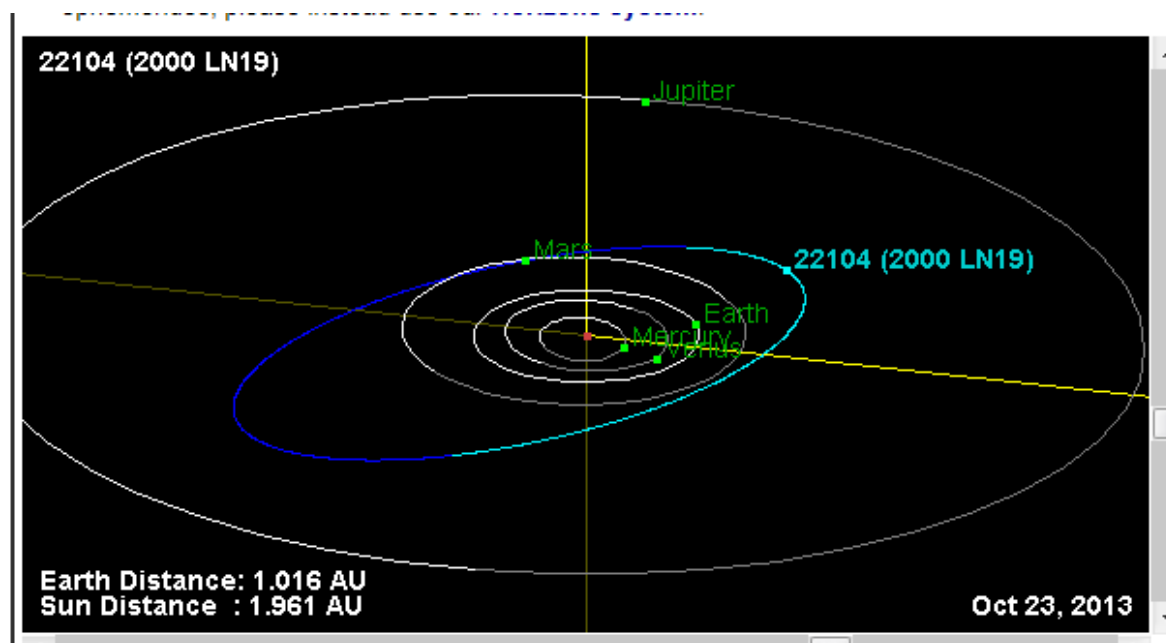


図 2-2-4 2000LN19 の公転軌道（太陽の自転軸より）

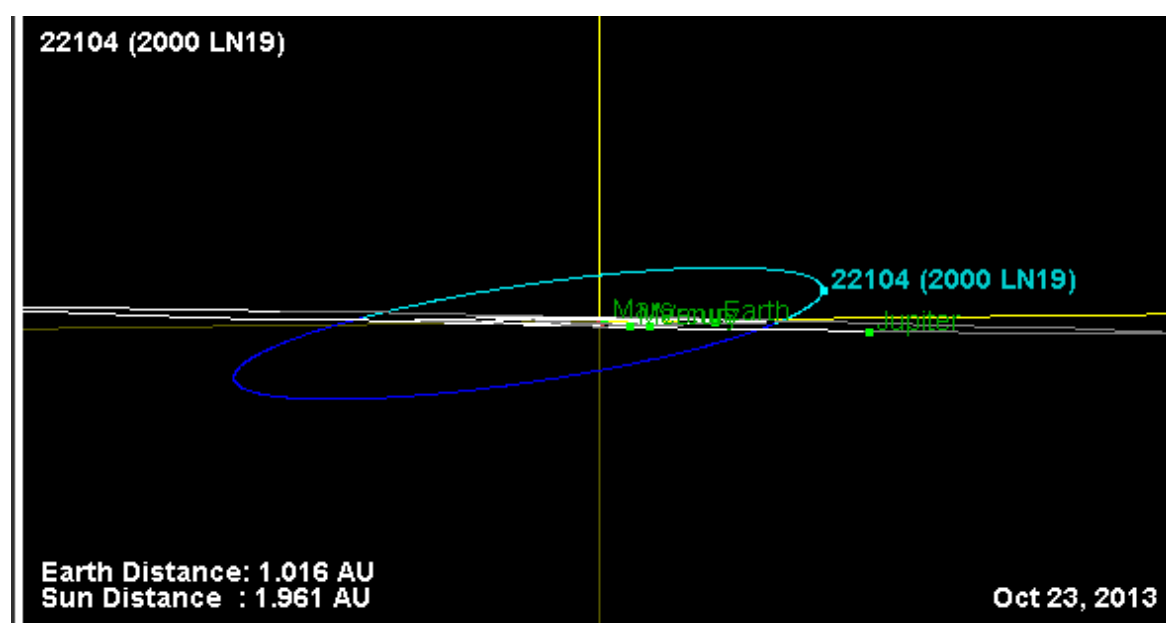


図 2-2-5 2000LN19 の公転軌道（小惑星の昇公転方向より）
（参照先：<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2000LN19>）

小惑星 2000LN19 は以上の公転軌道をもて、メインベルト小惑星であることがわかる。また、この小惑星はいまだ絶対等級しか分かっておらず、この小惑星がなにでできているか、どのタイプに小惑星なのかはいまだに未知である。

本研究では、2000LN19 を多色測光を用いて、小惑星のタイプを推定、考察するものとする。

- 多色測光・・・ 小惑星の表面スペクトルが表面組成に影響されることは、以前にのべている。このことを利用し、多色測光では g' 、 i' 、 r' のフィルターを用いて各バンドの等級を求め、波長間の明るさの差で二色図へのプロットを行いタイプを判断し、そのタイプから表面組成を考察するというものである。

多色測光では、 g' 、 i' 、 r' の等級を求めるために、それぞれの等級が既に観測されている恒星「測光標準星」を用いる。ターゲットの小惑星と同じ視野に入っていることではないため、測光標準星も別個に撮像して測光する必要がある。

● 観測状況

計 6 回名寄に行き 15 回観測を行ったが、天候の影響もあり、正しいと思われるデータは 10 月 23 日にとれたものだけだった。

今回、観測した対象は、研究目的の 2000LN19 と等級を比べるための標準星となる、Hilt404 である。

- Hilt404 標準星はピリカ望遠鏡制御 PC に入っている標準星のデータから、高度が同じような標準星だったのでえらんだ。

10 月 23 にとったデータは以下の通りである。

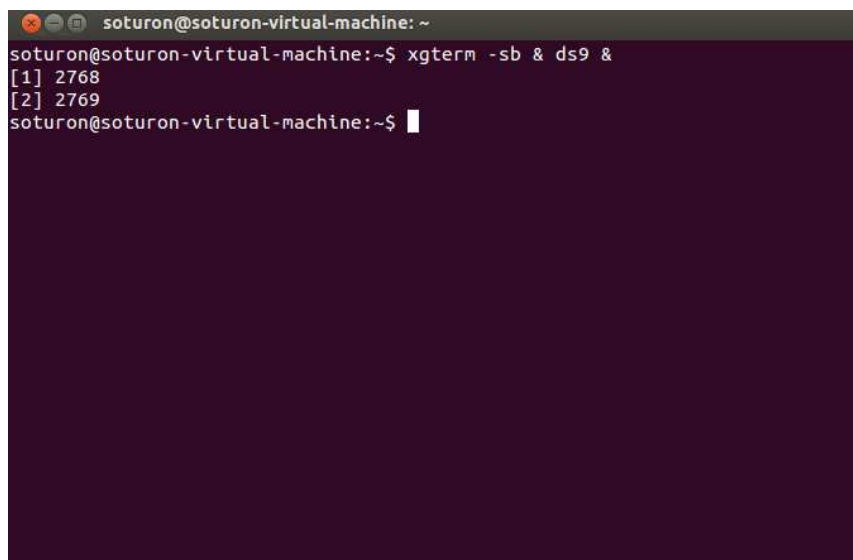
Bias フレーム		10 データ
2000LN19	r フィルター で撮影したデータ	5 データ
	g フィルター で撮影したデータ	5 データ
	i フィルター で撮影したデータ	5 データ
Hilt404	g フィルター で撮影したデータ	5 データ
	r フィルター で撮影したデータ	5 データ
	i フィルター で撮影したデータ	5 データ
Dome フラット	g フィルター で撮影したデータ	5 データ
	r フィルター で撮影したデータ	5 データ
	i フィルター で撮影したデータ	5 データ
計		55 データ

3. 解析

本研究の解析は、天体画像解析ソフト IRAF を使用した。IRAF はアメリカ国立光学天文台のプログラマーにより作成されたソフトウェアで、天文データを解析する目的で使用される。このソフトは同じ天文学ゼミの内潟君により PC にインストールされた。

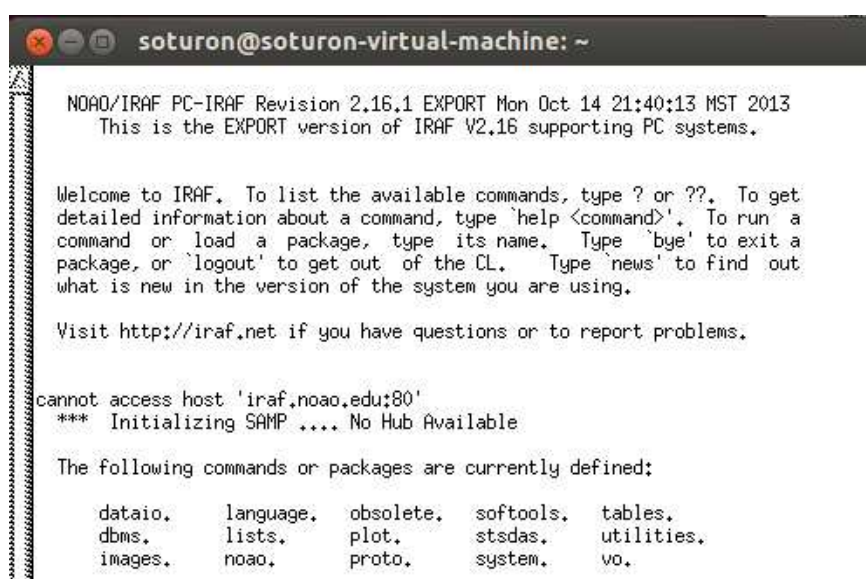
●IRAF の起動

Terminal を開き、端末に `xgterm-sb & ds9 &` と打ち `xgterm` と `ds9` を起動させる。



```
sotur@otur@virtual-machine: ~  
sotur@otur@virtual-machine:~$ xgterm -sb & ds9 &  
[1] 2768  
[2] 2769  
sotur@otur@virtual-machine:~$
```

次に、`xgterm` 上で `cl` と打ち IRAF を起動させる。



```
sotur@otur@virtual-machine: ~  
NOAO/IRAF PC-IRAF Revision 2.16.1 EXPORT Mon Oct 14 21:40:13 MST 2013  
This is the EXPORT version of IRAF V2.16 supporting PC systems.  
  
Welcome to IRAF. To list the available commands, type ? or ??. To get  
detailed information about a command, type 'help <command>'. To run a  
command or load a package, type its name. Type 'bye' to exit a  
package, or 'logout' to get out of the CL. Type 'news' to find out  
what is new in the version of the system you are using.  
  
Visit http://iraf.net if you have questions or to report problems.  
  
cannot access host 'iraf.noao.edu:80'  
*** Initializing SAMP .... No Hub Available  
  
The following commands or packages are currently defined:  
  
dataio.    language.  obsolete.  softtools.  tables.  
dbms.      lists.    plot.      stdas.      utilities.  
images.    noao.     proto.     system.     vo.
```

図 3-1 IRAF 起動

3-1 一次処理

一次処理とは、解析をするための準備であり、英語はフラットフィールドイング (Flatfielding) と呼ばれる作業である。一次処理の流れは以下の通りである。この作業も IRAF を用いて行った。

- ① 合成バイアスフレームと合成フラットフレームの作成。
- ② 合成フラットフレームとオブジェクトフレームから合成バイアスフレームを引き算する。
- ③ 合成フラットフレームを規格化フラットフレームに変換する。
- ④ オブジェクトフレームから「規格化」フラットフレームを割り算する。

この作業を標準星と目標天体のどちらとも行い、一次処理が完了となる。

● バイアスとは

バイアスとは、露出時間 0 秒で発生するノイズのことである。本来、露出時間 0 秒で撮影を行うと、カウント値は 0 になる。しかし、実際には CCD から電荷を読み出す時に生じる読み出しノイズが含まれるため、カウント値は 0 にならない。そのため、生画像にもノイズが含まれているので、そのノイズを取り除くために、露出時間 0 秒でバイアスのみを撮像したバイアスフレームが必要になる。

● フラットフレームとは

一様な光のことであり、感度のむらのことである。CCD カメラは全て同じ感度ではなく感度のいいところもあれば悪いところもある。その感度のむらを知るために一様な光をとり感度のむらを知る必要がある。

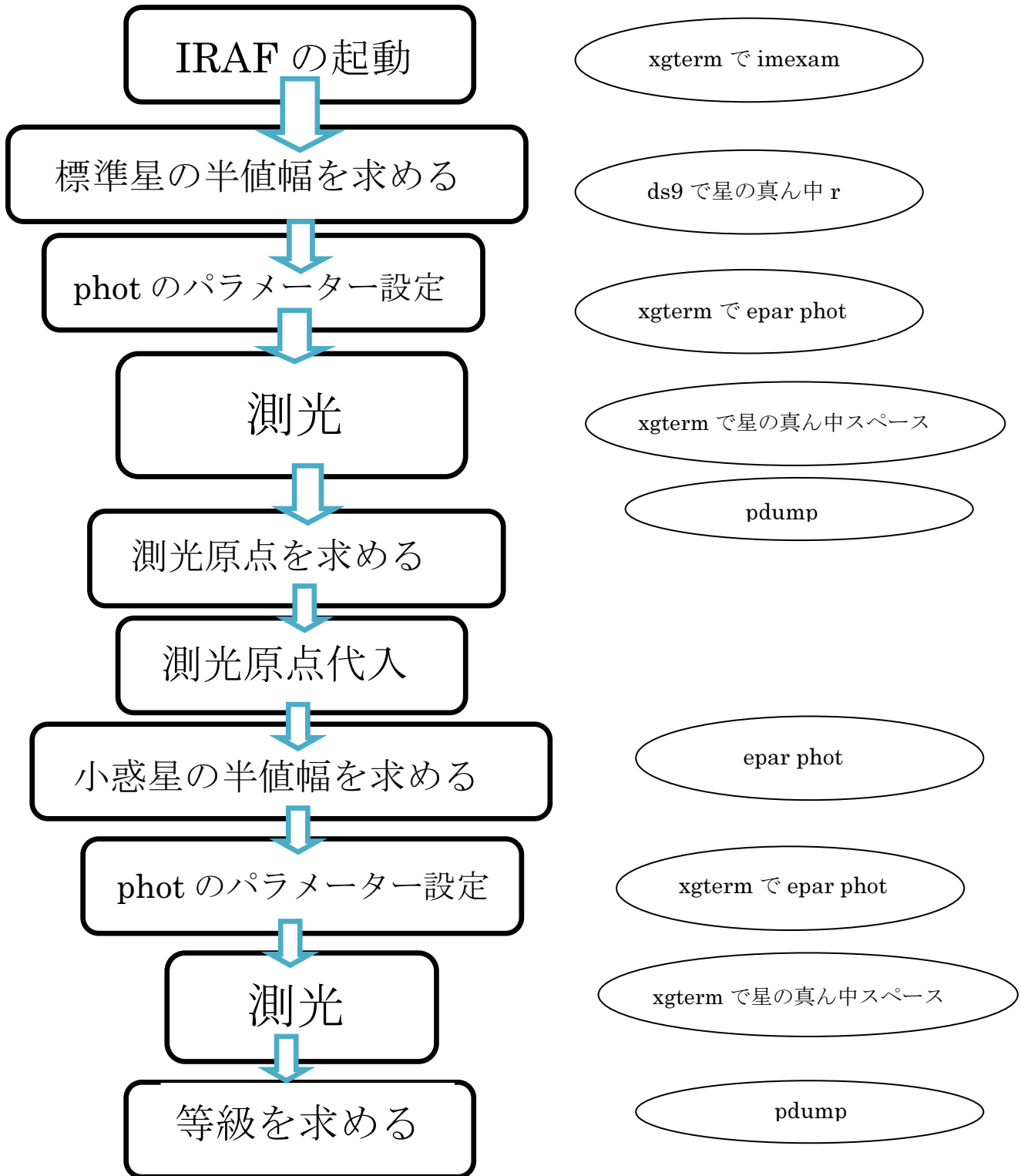
●オブジェクトフレームとは

実際に小惑星を撮った画像のことである。

●規格化フラットフレームとは

フラットフレームのカウント値の平均値で割り、画像全体におけるカウント値の平均値を 1 にしたもの。

3-2 解析の手順



解析とは先ほど説明した一次処理を行った画像を用いて、各フィルターごとの等級を求めることである。解析の流れは以下の通りである。

この作業も一次処理同様に、**IRAF** というソフトを用いて行った。

- ①標準星の各フィルターごとに測光をしてカウント値を測る
- ②標準星のカウント値から測光原点を求める。
- ③目標天体の各フィルターごとに測光をして絶対等級を求める。

●作業方法

標準星も目標天体も方法は基本的には同じである。少し異なる所もあるので、異なる所は別に記載する。

- ① **IRAF** を起動させ **xgterm** で **imexam** と打つ。
- ② **ds9** の標準星のデータを開き、星の真ん中にあわせ **r** をおす

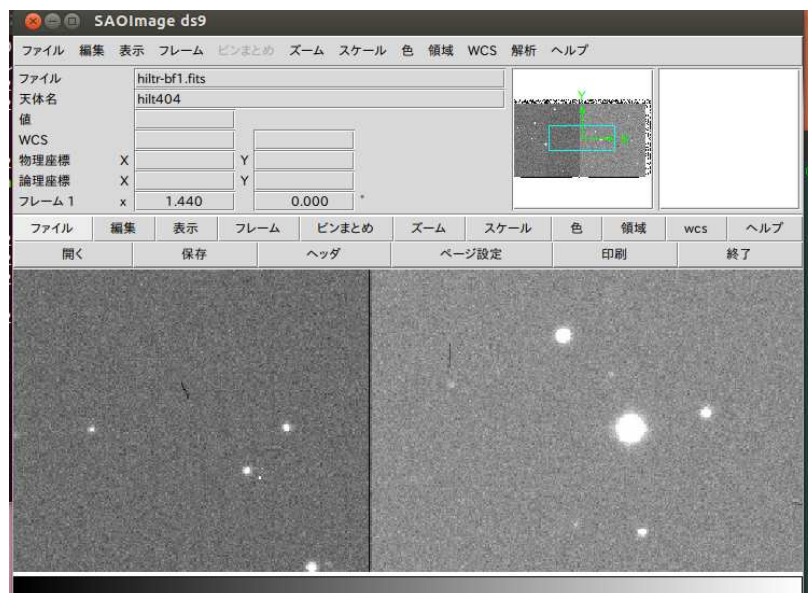


図 3-2-1 ds9 画像

- ③ r をおすとその星の天体の中心から半径方向の明るさの変化の様子 (radial profile) が表示される。

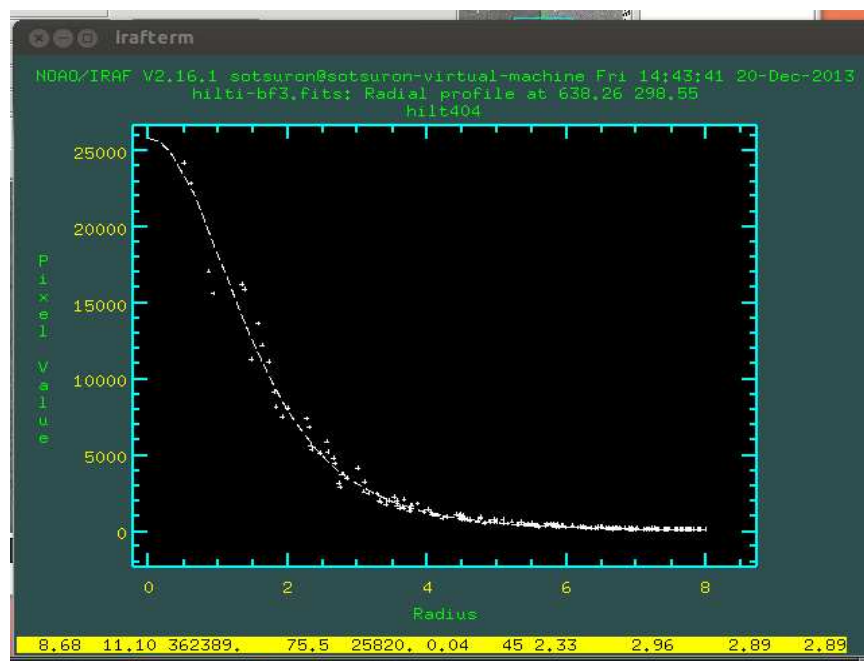


図 3-2-2 明るさの変化の様子

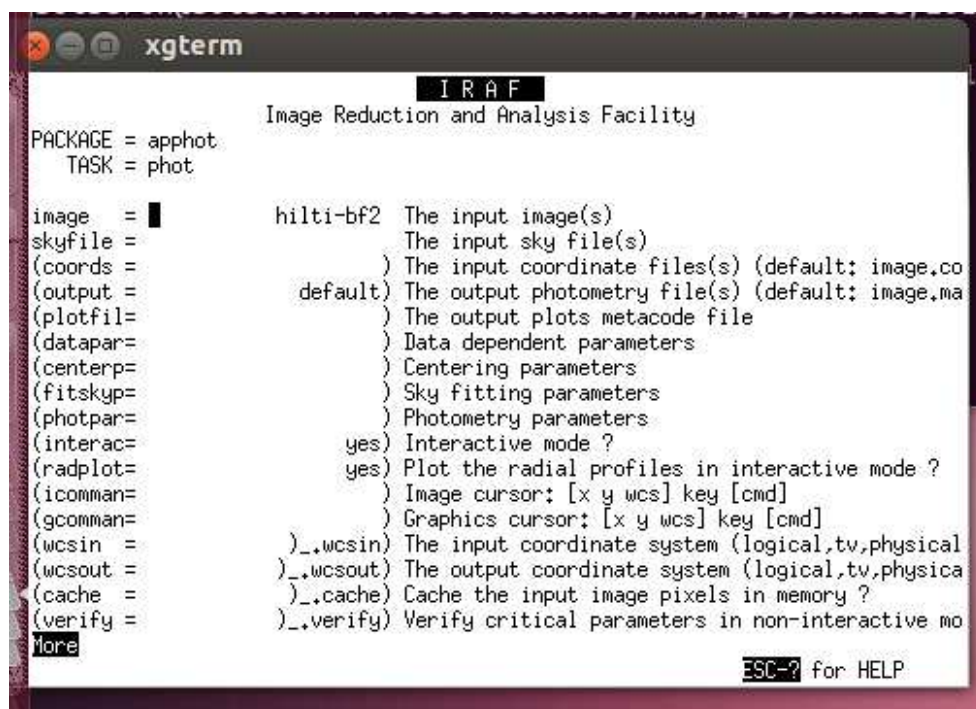
●半値幅とは

星の明るさのピークの半分の値のこと。アパーチャーというどこからどこまでが星か決める際に使うのでうえ図の黄色の右から3番目の値をメモしておく。

- ④ xgterm で epar phot というコマンドのうち phot コマンドのパラメータ設定を行う。

● phot とは

アパーチャ測光するためのコマンドである。



```
xgterm
IRAF
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = apphot
TASK = phot

image = hilti-bf2 The input image(s)
skyfile = The input sky file(s)
(coords = ) The input coordinate files(s) (default: image.co
(output = default) The output photometry file(s) (default: image.ma
(plotfil= ) The output plots metacode file
(datapar= ) Data dependent parameters
(centerp= ) Centering parameters
(fitskyp= ) Sky fitting parameters
(photpar= ) Photometry parameters
(interac= yes) Interactive mode ?
(radplot= yes) Plot the radial profiles in interactive mode ?
(iconman= ) Image cursor: [x y wcs] key [cmd]
(gcomman= ) Graphics cursor: [x y wcs] key [cmd]
(wcsin = )_.wcsin) The input coordinate system (logical,tv,physical
(wcsout = )_.wcsout) The output coordinate system (logical,tv,physica
(cache = )_.cache) Cache the input image pixels in memory ?
(verify = )_.verify) Verify critical parameters in non-interactive mo
More
ESC-? for HELP
```

図 3-2-3 phot 画像

④-1 deta par の変更

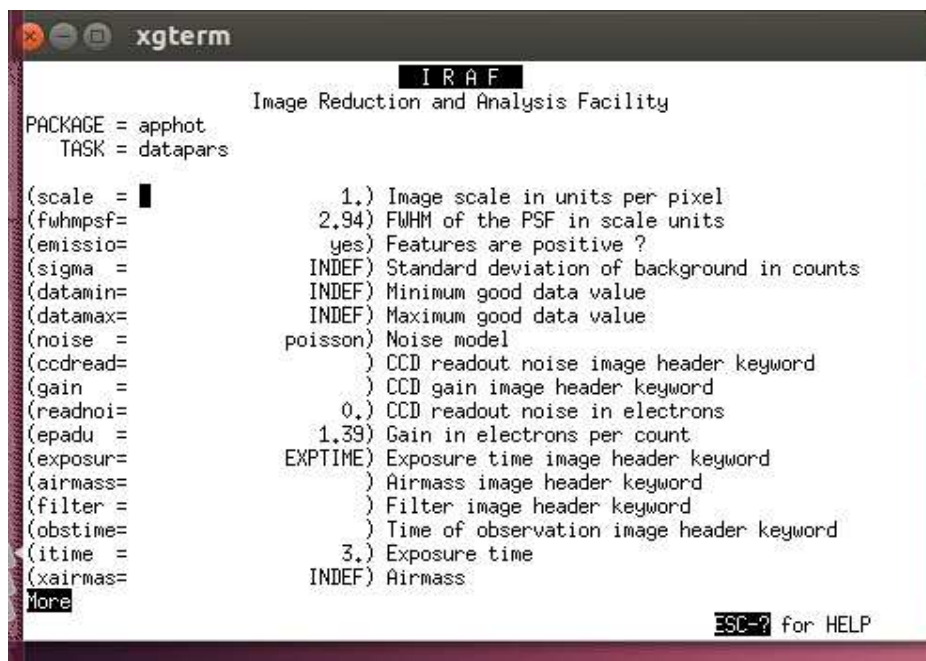


図 3-2-4 deta par 画像

④-2 centerpars の変更

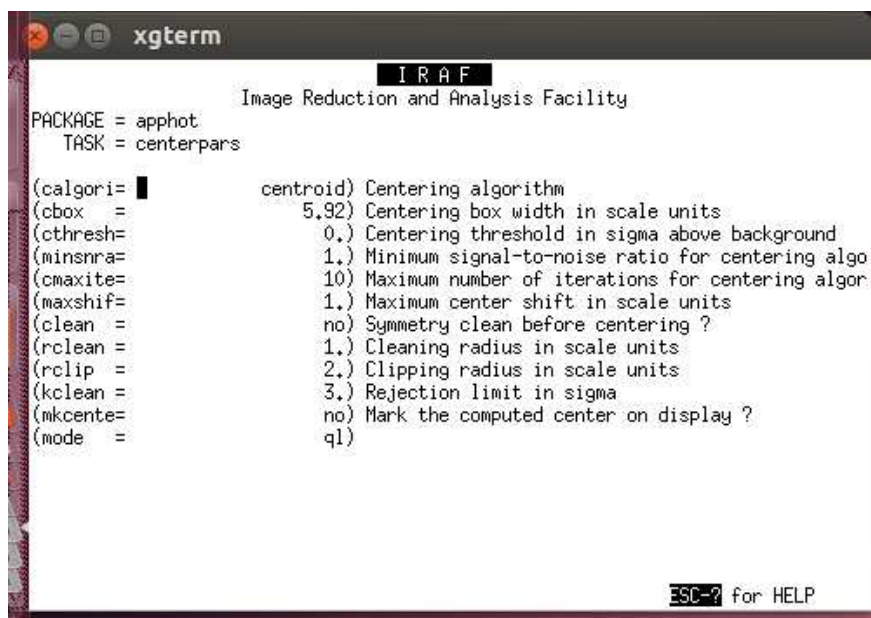
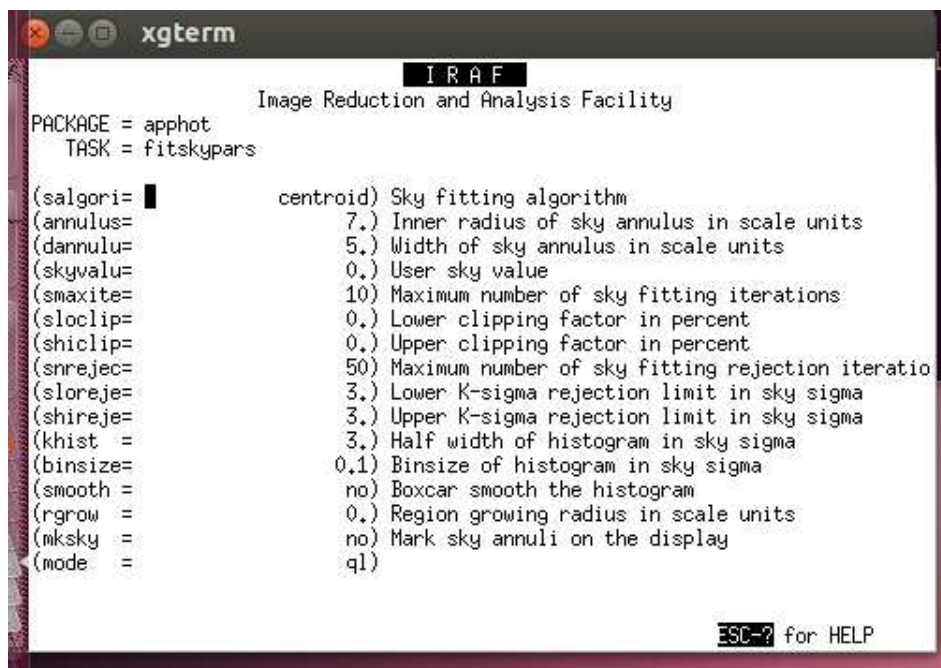


図 3-2-5 centerpars 画像

cbox に半値幅の2倍をいれる。

④-3 fitskypar の変更



```

xterm
IRAF
Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = apphot
TASK = fitskypars

(salgori= centroid) Sky fitting algorithm
(annulus= 7.) Inner radius of sky annulus in scale units
(dannulu= 5.) Width of sky annulus in scale units
(skyvalu= 0.) User sky value
(smaxite= 10) Maximum number of sky fitting iterations
(sloclip= 0.) Lower clipping factor in percent
(shiclip= 0.) Upper clipping factor in percent
(snrejec= 50) Maximum number of sky fitting rejection iterations
(slopeje= 3.) Lower K-sigma rejection limit in sky sigma
(shireje= 3.) Upper K-sigma rejection limit in sky sigma
(khist = 3.) Half width of histogram in sky sigma
(binsize= 0.1) Binsize of histogram in sky sigma
(smooth = no) Boxcar smooth the histogram
(rgrow = 0.) Region growing radius in scale units
(mksky = no) Mark sky annuli on the display
(mode = ql)

ESC-? for HELP

```



```

xterm
IRAF
Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = apphot
TASK = photpars

(weighti= constant) Photometric weighting scheme for wphot
(apertur= 6) List of aperture radii in scale units
(zmag = 21.45382452) Zero point of magnitude scale
(mkapert= no) Draw apertures on the display
(mode = ql)

ESC-? for HELP

```

図 3-2-6 fitskypar 画像

- ⑤ xgterm で phot 測光するファイルの名前をうつ。

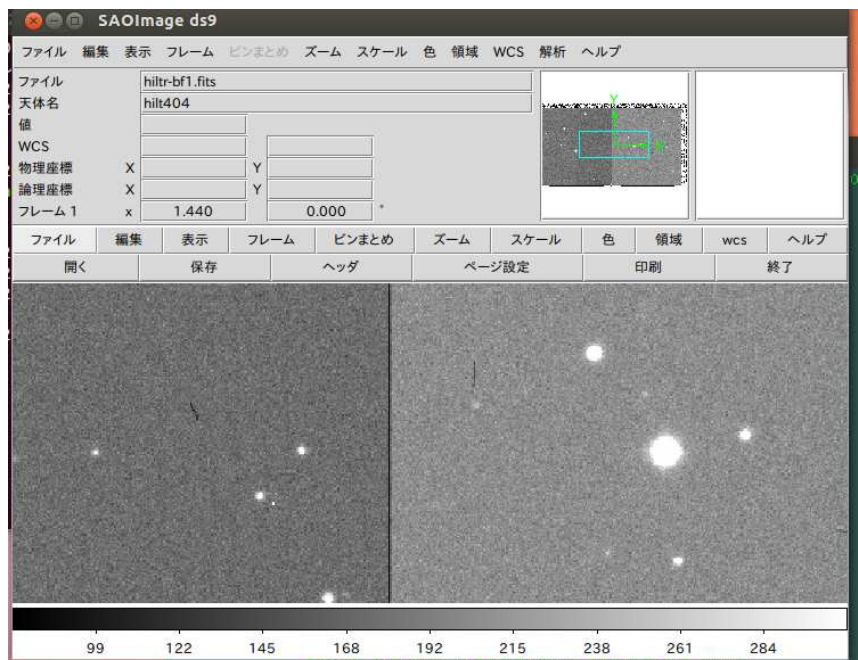


図 3-2-7 phot 測光するファイル画像

星の真ん中でスペースをおすと測光の確認ができる。

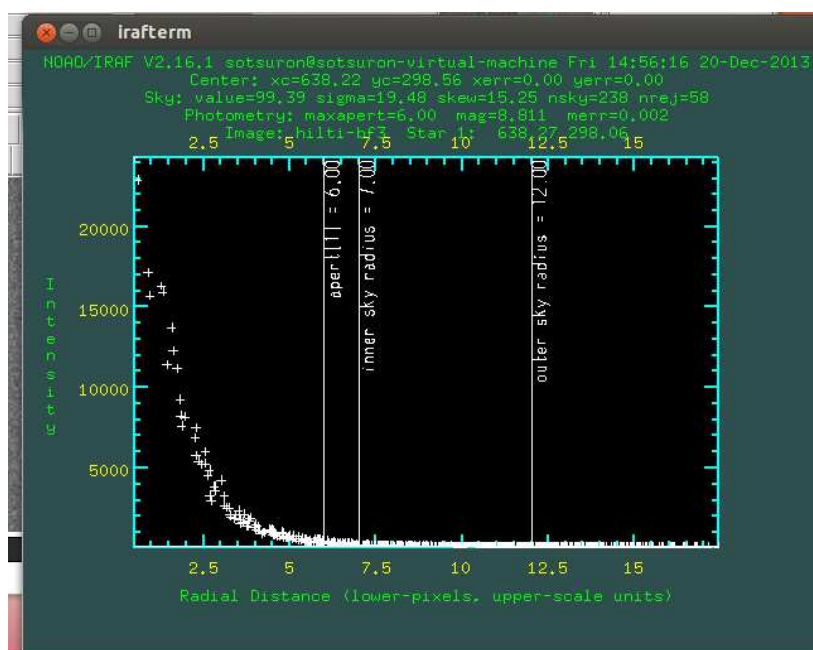
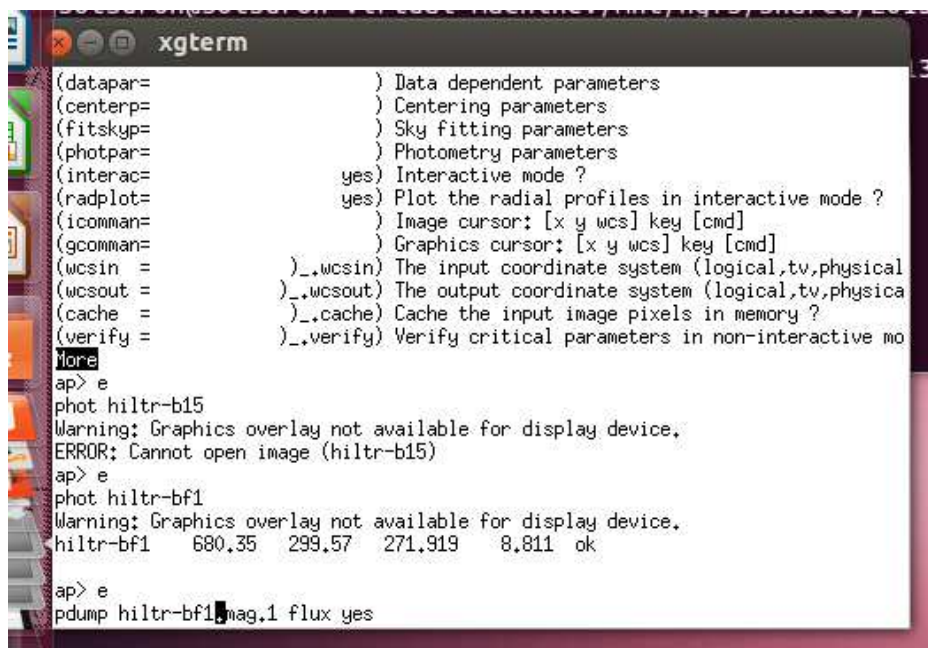


図 3-2-8 測光確認画像

⑥ pdump ファイル名.mag1 flux yes と打つ。



```
(datapar=          ) Data dependent parameters
(centerp=          ) Centering parameters
(fitskyp=          ) Sky fitting parameters
(photpar=          ) Photometry parameters
(interac=          yes) Interactive mode ?
(radplot=          yes) Plot the radial profiles in interactive mode ?
(icomman=          ) Image cursor: [x y wcs] key [cmd]
(gcomman=          ) Graphics cursor: [x y wcs] key [cmd]
(wcsin =           )_.wcsin) The input coordinate system (logical,tv,physical
(wcsout =          )_.wcsout) The output coordinate system (logical,tv,physical
(cache =           )_.cache) Cache the input image pixels in memory ?
(verify =          )_.verify) Verify critical parameters in non-interactive mo
More
ap> e
phot hiltr-b15
Warning: Graphics overlay not available for display device.
ERROR: Cannot open image (hiltr-b15)
ap> e
phot hiltr-bf1
Warning: Graphics overlay not available for display device.
hiltr-bf1 680.35 299.57 271.919 8.811 ok
ap> e
pdump hiltr-bf1.mag1 flux yes
```

図 3-2-9 pdump 画像

すると数字がでてくるので、その星光のカウント値である。

* 目標天体をする場合 ok の横に書いてある数字が等級となる。

- この作業を撮った画像全てで行う。フィルター 5 枚撮ったのでフィルターごとの平均を求める。

⑦ excel を用いて測光原点の式に代入して、測光原点を求める。

測光原点の式

$$\text{Mag} + 2.5 \text{LOG}_{10}(\text{平均}/\text{露出時間})$$

* 標準星のみで行う

- ⑧ xgterm で epar phot と打ち、zmag に先ほど求めた測光原点を入れる。

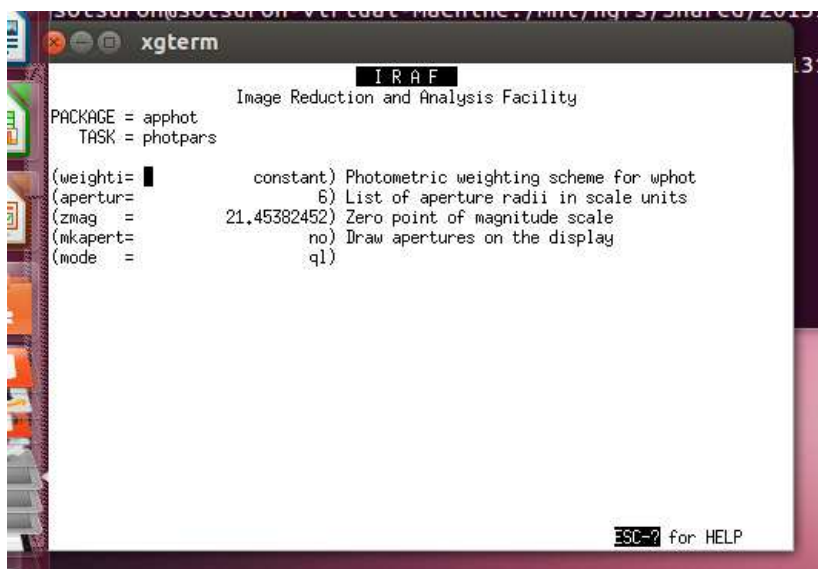


図 3-2-10 epar phot 画像

* 標準星のみで行う。

- この作業を各フィルターごとに行うので標準星の g, i, r フィルター各 5 枚、2000LN19 小惑星の g, i, r フィルター各 5 枚の計 30 回行う。

4.結果

- 2000LN19 の各フィルターごとの等級は以下の通りである。

D	E	F	G	H	
		g	i*	r*	
	2000ln19	15.23	14.683	14.895	
		15.324	14.756	14.875	
		15.345	14.732	14.874	
		15.321	14.697	14.871	
		15.3	14.72	14.86	
	平均	15.304	14.725	14.875	
	R-i	0.15			
	G-r	0.429			
	標準偏差	0.039653499	0.025726251	0.011331372	

図 4-1 結果

g フィルターの等級

15.23

15.324

15.345

15.321

15.3

平均 15.304

i フィルターの等級

14.683

14.756

14.732

14.697

14.697

平均 14.725

<u>r フィルターの等級</u>	14.895
	14.875
	14.874
	14.871
	14.860
平均	14.875

2000LN19 が何タイプの小惑星かを知るためには、2章で述べたように2色図へのプロットが必要である。今回はワシントン大学の Ivezic による2色図を用いた (Ivezic, 2001)。その2色図は以下のものである。

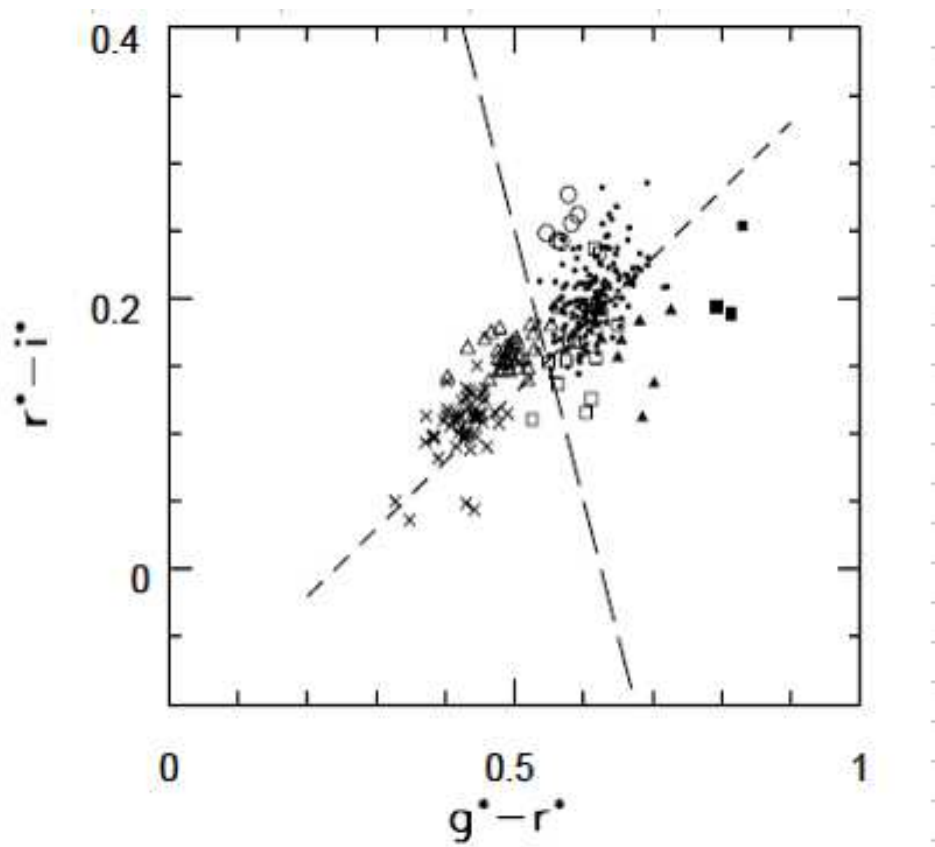


図 4-2 Ivezic による 2 色図

縦軸：r フィルター — i フィルターの等級差

横軸：g フィルター — r フィルターの等級差

g, i, r フィルターの各等級差を出し、上記の二色図へプロットする。
各記号のタイプは以下の通りである。

$\times$ C タイプ $\cdot$ S タイプ $\bigcirc$ D タイプ $\blacksquare$ A タイプ
 $\square$ V タイプ $\blacktriangle$ J タイプ $\triangle$ E タイプ

今回求められた小惑星のカラー（等級差）

$r - i$ 0.15

$g - r$ 0.429

この結果を二色図へプロットすると以下のようになった。

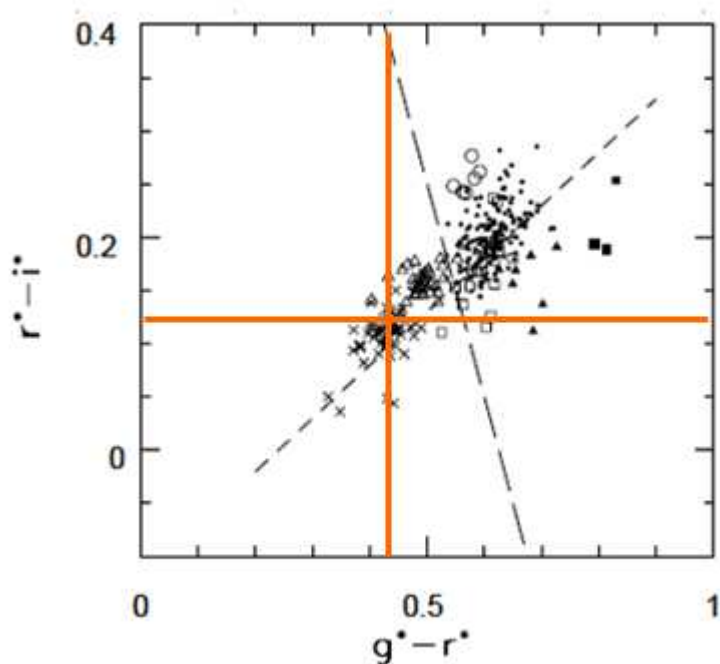


図 4-3 Ivezic による 2 色図に結果をプロットした図
プロットした線横軸 : 0.429 縦軸 : 0.15

5. 考察

●

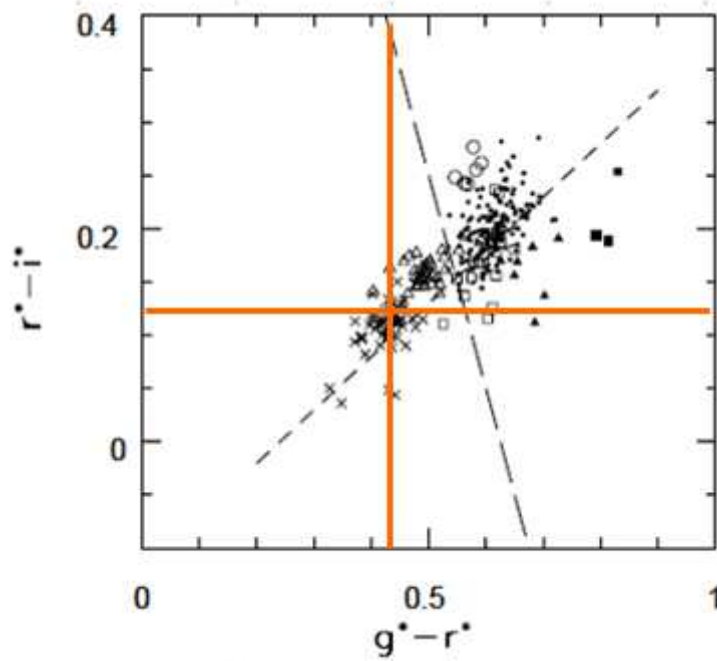


図 5-1 Ivezic による 2 色図に結果をプロットした図

C 型	平均	$r-i$	0.1132	最大	0.16	最小	0.03
E 型	平均	$r-i$	0.1655	最大	0.18	最小	0.13
C 型	平均	$g-r$	0.4312	最大	0.49	最小	0.33
E 型	平均	$g-r$	0.4952	最大	0.59	最小	0.41

この結果をみると、タイプは×の C 型か△の E 型の可能性が高い。

●E 型小惑星とは

E 型小惑星は小惑星の表面反射スペクトルが、赤みがかっていて比較的、平坦であることを特徴とする小惑星である。アルベドは 0.3 以上と比較的高い。小惑星帯の内側部分に分布するハンガリア群の小惑星が大部分を占めている。ハンガリア群と異なる (64) アンジェリーナのような小惑星もある。E 型小惑星は比較的小さいものが多く、直径が 50km を越えるものは 3 個知られているだけで、それ以外の小惑星は 25km 以下である。

●ハンガリア群小惑星とは

ハンガリア群 (Hungaria family) は、太陽の周囲を 1.78 から 2.00 天文単位で公転している小惑星である。通常、離心率は 0.18 以下と低く、軌道傾斜角は 16° から 34° 軌道周期は約 2.5 年である。メインベルトでは最も内側に位置する。

E 型タイプは以上の定義であるが、E 型タイプとされるハンガリア群小惑星の公転周期は 1.78~2.00。"離心率"が 0.18 以下となっている。

本研究で観測した 2000LN19 小惑星の公転周期は 4.15 年、"離心率"は約 0.2428 なので、ハンガリア群としては大きく異なり、2000LN19 が E 型タイプであることはあまり考えにくい。

次に軌道長半径と小惑星のタイプの割合を表したグラフにあてはめてみることにした。

●軌道長半径と小惑星タイプの割合個数のグラフ

以下の図は横軸に軌道長半径、左縦軸に小惑星の個数、右横軸に小惑星のスペクトルタイプの割合を表したものであり、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部の長谷川直さんによって作られたグラフである。

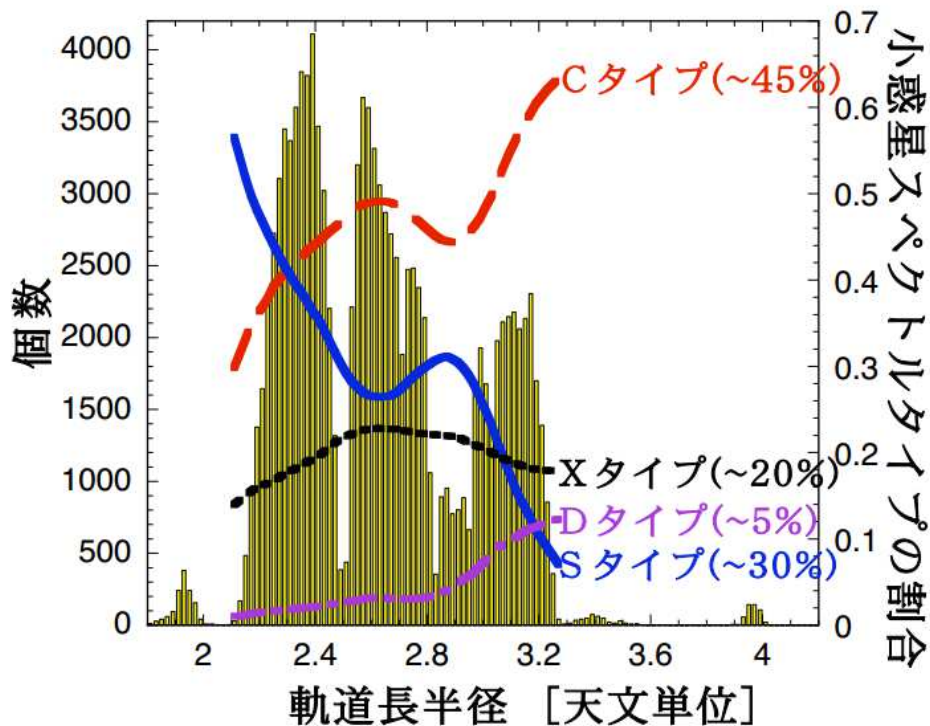


図 5-2 軌道長半径とスペクトルタイプの個数のグラフ

(引用先：www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/workshop2006/hase.pdf)

2000LN19 の軌道長半径は約 2.5835AU なので、赤くプロットした部分にあたる。

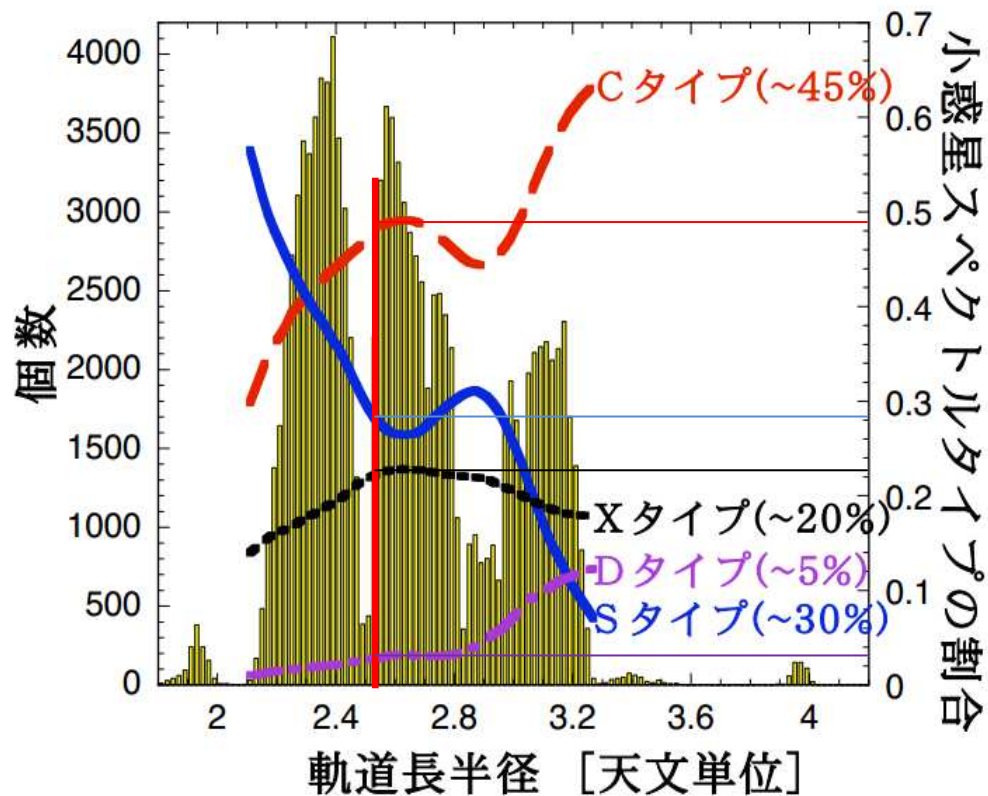


図 5-3 軌道長半径とスペクトルタイプの個数のグラフにプロットした図

プロットした部分のタイプの確立を右横軸に沿って見てみると、約 49%の確率で C タイプ、約 28%の確率で S タイプ、約 22%の確率で X タイプの小惑星、約 3%の確率で D タイプということがわかる。

またメインベルト小惑星の多くはこの C 型小惑星である可能性が高いということも分かっていて、2000LN19 も以下の図のように火星と木星のあいだに存在する、メインベルト小惑星ということがわかる。

(引用：<http://astronomy.lolipop.jp/mainbelt1.html>)

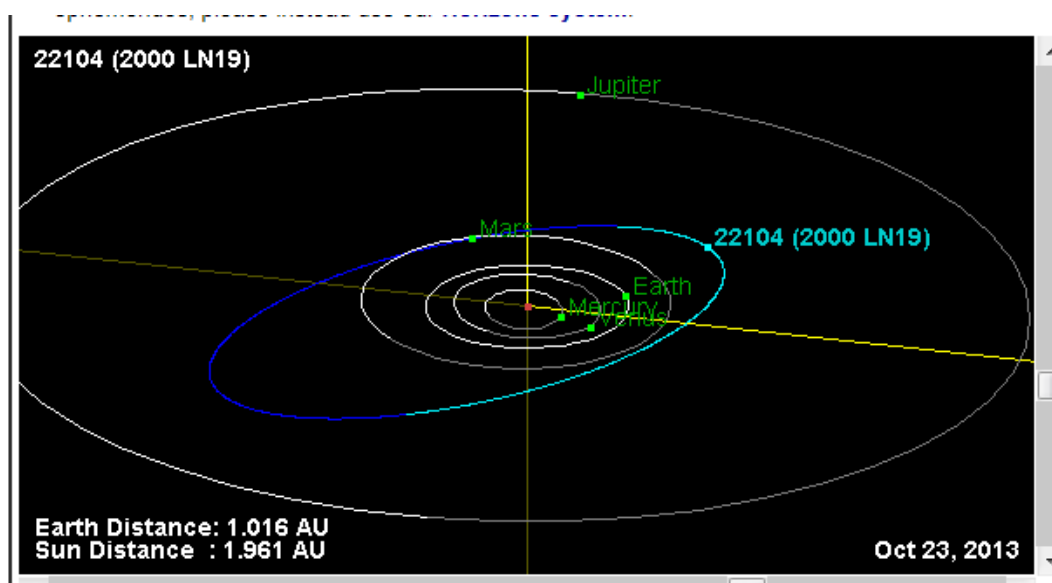


図 5-4 2000LN19 軌道グラフ

以上のことを考慮して、2000LN19 小惑星は、**炭素系の物質が主成分の小惑星の C 型タイプである可能性が高い**ということが分かった。

●今後の展望

今回の観測で 2000LN19 というまだ誰も観測していない小惑星のタイプを決めることができた。しかし、本観測は 10 月 23 日に撮れたデータのみだったため本来は数回、同じ観測対象を観測し、より多くのデータを取り、より正確な結果を出すことが望ましい。天文の研究では、観測すればかならずデータがとれるというものではなく、天候や時期に大きく左右されるということも今回の研究でよくわかった。なので、より早く解析方法や観測の手順を理解し、より長い期間をみて観測を行うことが望ましい。

また、今回は可視光測光によってタイプを考察し 2000LN19 は C 型である可能性が高いことがわかったが、より正確に調べるために赤外線を用いて小惑星の熱放射を調べ、アルベドの値を求めることが好ましい。アルベドとは反射率のことで、C 型タイプであれば 0.03、E 型タイプであれば 0.33 と大きく差があるのでこのアルベドを調べる研究を行えば、よりタイプの確率が高くなると考える。

6.謝辭

今回卒業論文に際して、様々な方にお世話になった。

データ取得の際には、北海道大学の大学院生の中尾さんに非常にお世話になった。また、ピリカ望遠鏡の使い方の講座をわざわざ開いていただき、指導していただいた北海道大学の渡辺誠先生。小惑星の観測についてや天文の知識などを教えていただいた、なよろ市立天文台の職員の佐野さんや渡辺さんにも感謝しています。また、本研究をするにあたって、天文ゼミのみんなの協力や励ましがあつたから最後まで行うことができた。

今回の研究を行うにあたって、最初から最後まで熱心に指導して下さった指導教官の関口先生のも大変お世話になった。大学の業務や講義等で忙しい中、我々のような天文学に関してはまだまだ未熟な学生に対して、指導を行い暖かな目で見守って下さったことにとても感謝している。

様々な方々の協力によって今回の研究、論文執筆ができたことをとても感謝している。拙い論文ではあるが、今後の天文学研究室の学生の学習や研究の参考になれば幸いである。

参考文献

参考文献

- ・ MAS シリーズ現代の天文学9 太陽系と惑星
渡辺潤一・井田茂・佐々木昌編 日本評論社
- ・ 京都工房講義資料 (IRAF の使い方について)

参考 URL

- ・ http://www.geocities.jp/t_shimizu2003/earth_histy_1_1_m.html
- ・ <http://www.f-space.co.jp/~m-kudou/kudohmichiko/elem1.htm>
- ・ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Asteroid>
- ・ http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_027.html
- ・ <http://www.astroarts.co.jp/news/2011/10/14akari/index-j.shtml>
- ・ http://atsites.jp/yoshitoharada/2045_asteroid.html
- ・ <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbwobs.cgi>
- ・ <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2000LN19>
- ・ www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/workshop2006/hase.pdf