

偏光観測からみた星形成領域の幾何学と磁場

— 赤外 2 次元アレイとミリ波 —

田村 元 秀

〈Jet Propulsion Laboratory M/S 169-506 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109 USA〉

星形成は非球対称なプロセスである。その研究には偏光観測というテクニックが重要な情報を与えてくれる。現在、アレイ化の時代を迎えて日進月歩の発展を遂げつつある赤外線天文学の流れとからめながら、赤外偏光観測が教えてくれる原始星のまわりの構造を見よう。それらの構造と深い関係があると思われる磁場の情報を与える最新のミリ波の偏光観測についても紹介する。

1. そしてアリゾナへ

1988 年の 6 月、私はカリフォルニアからアリゾナに向う飛行機の中にいた。窓から見下ろす風景は、先程までの青々としたものから、いつの間にか赤茶けた砂漠一色に変わっていた。その物珍らしいが、いささか単調な景色に飽きかかった頃、砂漠の中に忽然と、街が現われ、そこに向かって機体は高度を下げていく。空港のゲートを出る。気温 48°C。建物もサボテンも陽炎でゆらいでいる。ここはアリゾナ州第 2 の都市ツーソンである。

その年の春に、私は上松における赤外線偏光観測で学位を取ったあと、学術振興研究員として野辺山に移ったところであった。当時、海外から聞こえてくる赤外線天文のニュースは私に強い衝撃を与えた。赤外線天文学が大きな変貌を遂げつつあることを感じた。

赤外線天文学は、波長約 1 μm (10^{-6}m) から 1 mm の電磁波を対象とする^{*1}。赤外の“目”となる検出器には大きく分けて、入射光子と検出器の物質中の電子との相互作用を利用するフォトン検出

器と、入射光子の吸収による温度変化を利用する熱型検出器とがある。可視光の天文学は、眼視観測→写真乾板/TV→CCDと発展してきたが、赤外線の場合は写真乾板に対応するものがなく、検出器は上の 2 つのタイプのいずれも単一素子であった。そのため、天体の 2 次元図を作るためには天空の一点一点ずつ、望遠鏡を動かしていくので、大変な手間と時間がかかる。この手の観測はその間に空の状態が変わったり望遠鏡が少しずつずれたりするので、広い領域を角度の 1~2 秒の精度で描くのはほとんど不可能である。分光観測になるとさらにもう 1 次元分よけいに時間がかかる。

'80 年代頃から赤外波長でも素子を 1 次元や 2 次元化する技術が進み、アメリカ・ヨーロッパですぐさま天文に応用され始めた。'87 年には、ハワイで第 1 回目の『Infrared Astronomy with Arrays』というタイトルのコンファレンスが開かれ、各国の赤外アレイ観測装置の開発状況と最初の天文学的成果が披露された。その集録が手元に届いた時、そのデータの質・量の著しい改善に驚くとともに、世界中のどこかでこのような観測が今実際に行なわれているのだと思うと、矢も楯もたまらない気持ちになった。そこでポストドクの職を何とかアメリカに求めていると、幸運なことに、マサチューセッツ大学のクライマン女史の援助

Motohide Tamura: Geometry of Star Forming Regions and Magnetic Fields from Polarimetry
— 2D Infrared Array Detectors and Millimeter-Wave Telescopes —

でアメリカ国立天文台のツーソン本部（キットピーク天文台）に滞在できることが決まり、野辺山をあとにあたふたとアメリカへ向った。

2. キットピークの赤外線観測機器

キットピークは、ハワイのマウナケア、チリのセロトロロと並ぶアメリカの天文学の観測拠点である。砂漠の中からとび出た高度2100mの頂きに、国立天文台の4mメイヨール望遠鏡、2.1m鏡、1.3m鏡（図1）、0.9m鏡、マクマス太陽望遠鏡を始めとしてアリゾナ大学の望遠鏡等大小約15台の望遠鏡群が並ぶ。年間観測可能夜率は65%、シーイングは平均1.5秒角。観測条件はマウ



図1 キットピーク国立天文台1.3m鏡と赤外アレイ分光器（山下卓也撮影）。

表1 キットピーク天文台の赤外アレイ観測装置

	材質	素子数	波長	使える望遠鏡
(a)赤外カメラ	InSb	62×58	1-5 μ m	4m, 2.1m, (1.3m)
(b)グレーティング分光器	InSb	62×58	1-5 μ m	4m, 2.1m, 1.3m
(c)多色同時赤外カメラ	PtSi	256×256	1-3 μ m	1.3m (4m) ×4バンド

ナケアよりやや劣るが、ツーソンの街から車でたった1時間半でアクセスできるので、観測装置の開発と維持の面からは非常に便利である。

このキットピーク天文台でも、近年、赤外観測の重要性が高まっている。'91年の秋冬の場合、4m鏡と2.1m鏡の約25%、1.3m鏡になると80%強が赤外観測に当てられている。その93%がアレイ検出器を用いた観測である。表1は、現在キットピークで使われているアレイ赤外観測装置の一覧である。各装置を少し詳しく見ていこう。

(a)はインジウムアンチモナイド(InSb)を材質*2に用いた62×58素子の赤外アレイカメラで、イギリスの“IRカム”と並んで第1世代の赤外カメラのエースである。波長1.25 μ m (Jバンド)、1.65 μ m (Hバンド)、2.2 μ m (Kバンド)などの広域フィルターの外、いくつかの狭域フィルターが内蔵されている。私が初めてキットピークに登って観測したのは、このカメラと1.3m鏡による銀河中心の撮像だった。リアルタイムで次々に2次元画面がモニター上に映される“ムービー”と呼ばれるモードで、望遠鏡を我々の銀河系の中心方向に向けると、可視では何も見えないが、モニター上にはパッと赤外線源のクラスターが現れる。ベックリンとノイゲバウアーが75年にパロマーの5m鏡と単一素子検出器を用いて描いた初めての高分解能のマップと比べると、モニター上のリアルタイムの映像の方が、同じ位の視野をカバーしつつ、より細かく暗い構造を明らかにして、優っている。この時の像は1ピクセル（画素）当たり1.3秒角。ちなみにそのベックリン氏とはごく最近、NASAの3m赤外線望遠鏡を使って銀河中心を再び観測する機会があった。その時の分解能は0.4秒角にも達した。赤外線天文学の発展をほとんど最初から見てこられた氏は、とても感慨深そうな様子だった。

表1に戻って、(b)は赤外分光器である。検出器は(a)の赤外カメラと同じ素子である。世界最初の2次元InSb天文用分光器であり、現在も活躍中

だが、詳細は本稿では割愛する。

(c)は'91年秋から観測に使われるようになったもので、256×256素子のプラチナム・シリサイド(PtSi)を4個使ったマルチバンド同時観測カメラである。この検出器はInSbと比べると量子効率(入射光子を出力に換える効率)が1桁ほど悪いが、優秀なシリコン技術の賜で、素子数が多く、一様性に優れたものが作れる。このカメラはビームスプリッターを用いて4バンド(J, H, Kバンドと3.5 μ mのLバンド)を同時に観測できるので、広い領域の観測となると、(a)の少素子カメラより全観測時間が短くて済む。実際、1.3mでは(a)のカメラは引退して(c)の多素子カメラが使われている。(a)のカメラは、素子を「ニクモス3」〔水銀・カドミウム・テルル(HgCdTe)を材質とする256×256素子のアレイ〕に交換される予定である。

3. 赤外線偏光撮像——原始星のまわりの構造に迫る

キットピークにきた私の目標は、これらの赤外カメラ・分光器を応用して、生まれつつある星(原始星)あるいは生まれたばかりの星や、それらの星が生まれる環境を、詳しく高分解能で観測することである。特に、大学院時代から続けてきた赤外線波長での偏光観測をアレイを利用してもっと効率化したいと思っていた。

波長・強度と共に電磁波を特徴づける性質—偏光—が、赤外でも重要な意味を持つことがわかったのは最近だった。'70年代の半ばから'80年代の始めにかけて、まずオリオン座の赤外線星BN天体が、赤外で10%以上に偏光しているのが発見され、ついで他の多くの赤外線星も大小の差はあれ1—20%の偏光を示すことがわかった。この観測には日本の京都大学上松1m赤外線望遠鏡が活躍した。これら赤外線星の多くは原始星もしくは生まれたばかりの若い星である。問題は、一体何が赤外線を偏らせているかである。1つの可能

性は反射による偏光である。もし若い星のまわりが球対称でなく、光の抜けやすい方向と抜けにくい方向があって、その抜けやすい方向に出た光が反射されて地球に届いたら、その光は偏光している。もう1つのアイデアは、原因は若い星のすぐ近くではなくて星の光が地球に届くまでの間の星間物質、特に、若い星が埋もれている暗黒星雲(星はこの暗黒星雲の一部が収縮して生まれた)の中を光が通り抜けてくる間に偏光してしまったというもの——これは可視光で星間偏光として知られているものと同じ原因である。つまり、暗黒星雲中に存在するダストが磁場によって整列させられていて、そのダストが通過光を1方向によりよく吸収するために通過光は偏光する。ダストはその長軸が磁場に垂直になるように揃いやすく、光もこの方向に吸収されやすいので、結局、透過光は、天球上で磁場と平行な方向に偏っているのが観測される。

この2つの可能性を区別するには、赤外線星の偏光を空間的にマッピングするとよいが、時はまだ単一素子の頃である。これは上松1m赤外線望遠鏡には荷が重すぎた。そこで、京都の赤外線グループの佐藤・長田・山下らは、偏光器をイギリスの3.8m赤外線望遠鏡(UKIRT)に持ち込み、大きな偏光を示す赤外線源の偏光マッピングを8~20秒角の低分解能で行った。すると赤外線星のまわりに非球対称に赤外星雲が広がっていて、その各点での偏光ベクトルは中心の赤外線星のまわりに花卉状のパターンを示した。偏光の大きさも次々に大きなものが見つかり、ついに、中川らによって100% (完全偏光)に近い天体まで見つかった。これは典型的な反射による偏光パターンなのである。つまり、赤外偏光観測は原始星や若い星のまわりが非球対称構造になっていることを明らかにした。

実はこの構造は、ほぼ同じ頃に電波の観測から明らかになってきた2つの現象と密接に結びついている。1つは分子双極流と呼ばれる原始星・若

い星から軸対称の2方向に吹き出す物質の流れと、もう1つはディスクと呼ばれる原始星・若い星をとり巻く円盤状・ドーナツ状の高密度ガスとダストの塊りである³⁾。マップされた赤外星雲はもっぱら分子双極流の方向に広がっている。若い星からの光は、ディスクに垂直な方向に吹き出した分子流の方向に抜けやすく、それが反射して我々に見えているのである(図2)。一般には、ディスクは真横からではなく斜めから眺めるので、ディスクの裏側になった赤外星雲は隠されてしまう。従って赤外星雲は電波のような双極にならず、単極の彗星のように片側に広がった扇形に見えることも多い。

一旦、この分子流と赤外(反射)星雲の関係がわかってしまうと今度は逆に、「赤外線で見えない分子流の形状を詳しく調べることができないか?」ということになる。分子流は電波で調べるのが普通だが、電波は波長が長いので分解能が得られない。1~2秒角の分解能を得るためには、時間のかかる干渉計観測が必要となる。しかし、赤外カメラを用いれば楽に1秒角の分解能で数分角の視野を観測できる。

そこで、キットピークで赤外線偏光撮像を行うべく、国立天文台赤外グループのギャットレイ氏やジョイス氏らと準備を進め、'89年5月には最初の観測に漕ぎ着けることができた。カメラは表1(a)のInSbカメラを用い、その入射窓の前にワイ

ヤーグリッド偏光子を固定し、さらに手前に波長板を置き、22.5度ずつ回転させる。これによって直線偏光が強度の変化に変換される。分解能と全視野は、2.1m鏡に取り付けると1ピクセル当り

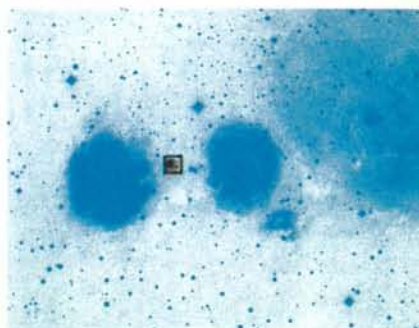


図3 a 可視光で見た星形成領域 S255 (パロマープレート)。枠で囲ったのが図3 bの赤外カメラの視野。

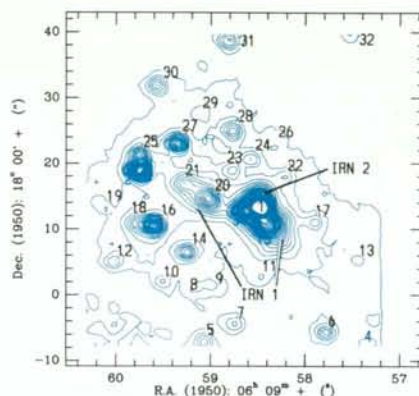
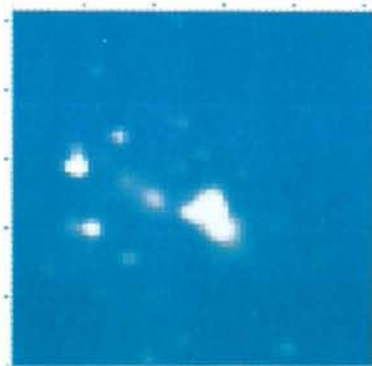


図3 b 波長 $2 \mu\text{m}$ でみた S255。赤外線星のクラスターと中心の明るい赤外星雲、さらに全体を包む淡い星雲が見える。

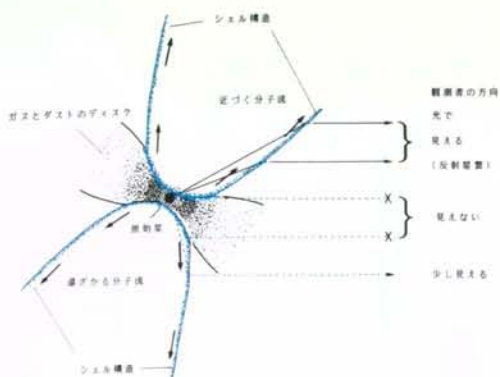


図2 原始星のまわりの構造の概念図(断面図)。

0.8 秒角と約 50 秒角, 1.3 m 鏡では 1.3 秒角と約 80 秒角とになる。

最初に狙った天体はシャープレス 255 (S 255) という重い星の形成領域である。可視光での写真 (図 3 a) に見られるような 2 つの HII 領域の間に、波長 $2 \mu\text{m}$ では約 30 個の星のクラスターと赤外星雲が現れた (図 3 b)。中心の明るい星雲は波長板の回転と共に著しく形が変わるのがリアルタイムで分かる! 偏光している証拠である。この観測の結果をベクトル図としたのが図 4 である (中心部を拡大)。IRN 1 と記した赤外星雲は、これまで知られていなかった弱い赤外線源 IRS 3 のまわりに双極状に広がっていて、50%にも偏光している。つまり、IRN 1 は IRS 3 に照らされた赤外双極反射星雲である。これまでよく知られていた明るい赤外線源 IRS 1 は中心星ではなかった。これはアレイによる高分解能観測で初めてわかった。恐らく、IRS 3 は非常に若い星で、分子流を赤外星雲の方向 (左上一右下) に吹き出していて、ディスクがそれに垂直方向に横たわっているのだろう。

アレイ観測で見逃してならない長所は、赤外線源の位置を極めて精度よく決められるようになったことである。これによって他波長のデータとの

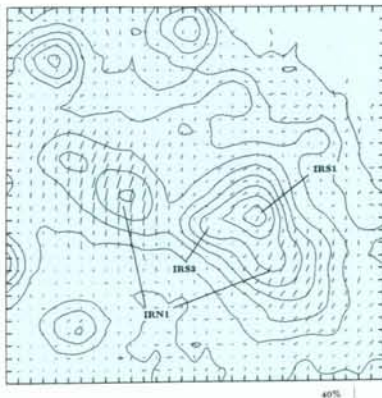


図 4 S255の赤外偏光ベクトル図 (中心領域の拡大図)。ベクトルの長さや方向が偏光の大きさと方向を表わす。コントアは強度を対数表示したもの。

正しい比較ができるようになった。

アレイ化のもう 1 つのメリットは観測効率の向上である。これによって、短い時間で多くの天体を観測することができ、1 天体ずつ重箱の隅をつつくような博物学的データを生み出さずに済む。我々は、S 255 のような原始星・若い星を約 20 天体ほど観測することができ、その結果、次のような共通点に気が付いた。

- 反射星雲にトレースされる分子流の形は基本的には双極構造になっていて、その中は空洞のシェル (殻) 状である。
- 分子流は原始星のすぐ根本からふくらんで広がっていて、明らかに光のジェットとはコリメーション (広がり方) が違う。
- 分子流の源は必ずしも従来知られていたその領域の明るい赤外線源とは限らない。
- 偏光のパターンや強度の変化から示されるように、赤外星雲を伴った原始星のまわりにはディスクが存在する。

上であげた S 255 やオリオンのような重い星の形成領域ではクラスターを形成していることが多く、赤外星雲も単なる反射星雲だけでなく、いろいろな原因で生じるので、偏光や分光の情報が不可欠である。一方、我々の太陽の卵のような軽い質量の原始星の場合は撮像だけでも分子流の形をトレースできる。ただし、明るさは重い原始星よりずっと暗いので、深い撮像が必要となる。そのような軽い原始星は、生みの親の暗黒星雲の中に深く埋もれていて、未だ核反応には至らず、まわりからの物質の落ち込み (アクリーション) でエネルギーを賄い、まわりを温めているとイメージされている。しかし、現在に至るまで、これが本物の原始星だというアクリーションの直接証拠が示された例は無い。これに近い天体の例はおうし座暗黒星雲のリング 1551 (L 1551) IRS 5 である。軽い原始星の構造と進化を調べるためには、このようなタイプの天体を数多く調べることが必要である。'83 年に打ち上げられた遠赤外線観測衛星ア

イラス (IRAS) は全天掃天観測を行なって、おうし座暗黒星雲にも数多くの低温天体を見つけていた。ただ IRAS の分解能は低く、天体の位置精度も良くないので、他波長でのフォローアップは遅れていた。これこそは赤外カメラの絶好の対象であった。そのいくつかの $2\ \mu\text{m}$ 像を表紙に示す。これらの天体は可視光では見えず、主系列には達していないが可視光で見える T タウリ型星⁴⁾よりもっと若い天体で、原始星の最有力候補である。その多くは、表紙のように、赤外星雲を伴っている (極端なものも中心星が $2\ \mu\text{m}$ でも見えず星雲しか認められない⁵⁾)。しかも、上で述べたように彗星状・双極状の形になっている。これは取りも直さず、これらの原始星候補に分子流とディスクが有ることを示している。原始星を特徴づけるものはアクリーションだが、同時に分子流のような質量放出も行なっていて、ディスクと双極流を伴った著しく非球対称 (軸対称) なシステムを構成しているらしい。

さて、もう 1 種類の偏光、即ち吸収による偏光は全く別の情報—暗黒星雲の内部の磁場の方向—を持っていることを述べた。これに関しては天文月報'86 年 7 月号の田村の記事に詳しい。アレイ検出器は、その視野中に入る星全部の偏光を同時に測れるので、その観測の効率も上げることができる。そこで我々は、表 1(c) の広視野の赤外カメラを用いたマルチバンド同時赤外偏光撮像のプロジェクトを始めた。このテスト観測は済み、近々、本観測もあるのでまた詳しく報告できる機会があると思う。

4. ミリ波のダストによる偏光——ディスクの磁場構造

前節の結果のように、原始星のまわりは非球対称な構造になっている。このような構造の大本は何なのか？ 非球対称性を作るものとして直ぐに思いつくのは回転と磁場であるが、回転はともかく、磁場となると観測はこれまで乏しかった。し

かし、前節の最後に述べた赤外線による偏光観測から星形成領域である暗黒星雲の内部の磁場の様子が明らかになり、可視光による偏光観測から暗黒星雲の外側の磁場の構造が分かり、一般星間空間から暗黒星雲内に至る磁場の連続的な構造が描けるようになってきた。それによると、おうし座の暗黒星雲のような質量の小さな星が生まれている場所では、暗黒星雲の収縮方向を磁場がコントロールしているようである。これは物質が磁場に沿った方向に動きやすいため、暗黒星雲の形は、天球上で、磁場に垂直な方向に雲の長軸がのびているのが見られる (図 5)。また、電波の分子流や光のジェットも、領域によっては、高い割合で磁場の方向に揃っている例がある。これらの事実は、星ができる過程で磁場が重要な役割を果たしている可能性を示している。原始星のディスクや双極流の方向も暗黒星雲内の磁場によって規定されているという描像は自然に思える。

それではもう一歩進んで、ディスクの中での磁場はどうなっているのだろうか。この情報は分子流や光ジェットの成因を考える上でも貴重である。では、どうすればディスク内の磁場の情報が得られるのだろうか？

観測上の困難は、ディスクは吸収が非常に大きいため可視光はもちろん近赤外でも見透せない点にある。たとえ見透せても、ディスクのサイズは小さいので、その背景にうまく星がある確率は小さい。よりよく見透すためには長波長を用いればよいが、波長が長くなると、偏光度は小さくなり、どんどん観測は困難になる。その上、 $3\ \mu\text{m}$ 以上の波長では、望遠鏡や大気の輻射も大きい。そのダストが磁場によって整列していると、ダストの熱輻射は偏光を示す。吸収の場合の磁場に対するダストの並び方を思い出すと、輻射される赤外線は今度は磁場と垂直な方向に偏っているのが分かる。この (遠) 赤外線の偏光を測ると、赤外線を輻射している領域自身の磁場の方向が決められる。この方法は星間偏光のような背景の光源は要

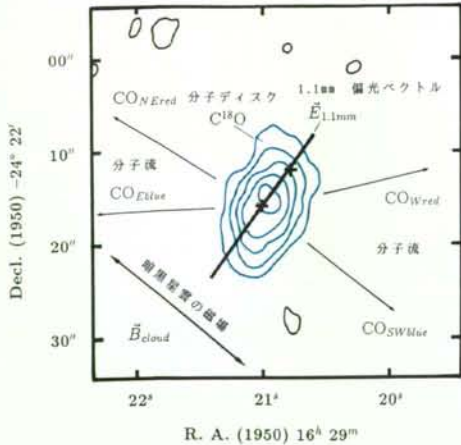


図6 蛇遣い座暗黒星雲の原始星候補IRAS16293-2422の波長1 mmのダストによる偏光と、 $C^{18}O$ ガスディスク・CO分子流・暗黒星雲の磁場 \vec{B}_{cloud} との関係。波長1 mmの偏光の結果は、ディスク内の磁場の方向が、天球上でこの偏光ベクトルに垂直な方向、即ち、左上-右下の方向であることを意味する。

これは原始星のまわりの約3000 AU(天文単位)というすぐ近くを見ている。最近の波長3 mmでの干渉計観測によれば、ミリ波はたった300 AU以内の所から出ているともいう。ともかくミリ波はディスクからのダスト輻射であることはまず間違いない。偏光の結果は、天球上に射影してみると、まるで生花で使う剣山のように、ディスクの中の磁場はディスク面を貫いているイメージを描かせる。

一方、この原始星を生んだ暗黒星雲内の磁場の方向は、近赤外での暗黒星雲の背景星の偏光観測から分かっている(図6中の \vec{B}_{cloud})。このように、波長1.1 mmから求めたディスク内の磁場の方向は暗黒星雲内の磁場の方向と変わらないことが分かった。

これらの結果は全く意外だった。というのは、分子流を説明する標準的な電磁流体力学モデルによれば、ディスクの回転によってねじられた磁場こそが分子流の原因なので、ディスクの中ではぐるぐる巻き込まれた磁場がディスク面に平行な成分として見えてくると予想していたからである。

もちろん、この結果はこの天体特有のものかも知れない。しかし、我々の最新のデータによれば、L 1551 IRS 5でも、ディスクの磁場、暗黒星雲の磁場、ディスク、分子流の4者の幾何学的関係は、ほぼこれと同じである。また、重い星の形成領域で最も良く研究されているオリオンKL天体も同じ関係を示すので、我々の見つけた関係が、ディスクと分子流の成因を考える上での基本的関係となるのかも知れない。今後も多くの原始星ディスクの磁場をミリ波偏光で求め、暗黒星雲の磁場を赤外アレイで効率良く決定し、ディスク・分子流の微細構造を赤外アレイなどで明らかにしていく必要があるだろう。

'88年に日本を離れて、もうすぐ4年の歳月が過ぎようとしている。この間、嵐のような変革の中で過せた幸運、そして、無名の一学生を迎え入れ、育ててくれたアメリカとその赤外線天文学の風土に感謝の念を禁じ得ない。

アリゾナ滞在中、公私共々お世話になったSusan KleinmannとIan Gatley一家に感謝します。本稿でふれたプロジェクトは以下の方々との共同によるものです: Bill Duncan, Ian Gatley, 林左絵子, Jim Hough, Dick Joyce, 関口真木, 周藤浩士, 上野宗孝, Bill Waller, Mike Werner, 山下卓也(敬称略)。本文に意見を頂いた中島紀, 岡田雅樹両氏に感謝します。

参考文献 と 注(*)

- * 1 波長1-5 μm を近赤外, 5-30 μm を中間赤外, 30-300 μm を遠赤外, 300 μm -1 mmをサブミリ波と分類することがある。
- * 2 可視のシリコンCCDと違って、赤外アレイはハイブリッドである。即ち、赤外線を検出する機能(ここではInSb)とマルチプレクサの機能(シリコン)が分けられている。
- 3) 天文月報'92年4月号EUREKAと'92年1・4月号シリーズ天体列伝参照。
- 4) 天文月報'92年9月号シリーズ天体列伝参照。
- * 5 表紙で、点状に見えている中心部も、実は反射星雲の一部にすぎず、中心星はまだ2 μm でも見えていないものがある(例: L 1551 LRS 5-図中段左端)。