

TDIモードによる静止デブリ観測の試み

○奥村真一郎、坂本 強、高橋典嗣（日本スペースガード協会）、
中屋秀彦（国立天文台）、工藤伸夫、廣瀬史子、松田郁未、染谷一徳、柳沢俊史、吉川 真（JAXA）、
田中 済（日本宇宙フォーラム）

TDI (Time Delay Integration) 方式とは、露光しながら CCD の電荷転送を行い、移動する撮影対象の速度・方向に対して電荷転送速度を一致させることにより移動対象を点状に撮像し、感度をあげる読み出し方式である。TDI 方式での天文観測は通常、望遠鏡を静止させ、恒星の日周運動にあわせて東から西に電荷転送を行う。一方、静止デブリは恒星の運動に対して天球上を逆向きに移動するので、TDI 方式の静止デブリ観測では、望遠鏡は日周運動に合わせて恒星を追尾させ、電荷転送速度を西から東に向かって日周運動の速度に同期させることにより、デブリを点像に撮像する。静止デブリ観測において、望遠鏡を静止させて撮影する場合と比べた TDI モード観測のメリットは、望遠鏡が常に天球上の同じ場所を見ているのを利用して位置測定用データを取得でき、長時間露出で恒星像が伸びてしまってもデブリの位置決定ができることである。われわれは美星スペースガードセンター1m望遠鏡を用いて、TDI モードによる静止デブリ観測の有効性について評価を進めている。その結果について報告する。

TDIモードによる 静止デブリ観測の試み

奥村真一郎、坂本 強、高橋典嗣
（日本スペースガード協会）、
中屋秀彦（国立天文台）、
工藤伸夫、廣瀬史子、松田郁未、染谷一徳、
柳沢俊史、吉川 真（JAXA）、
田中 済（日本宇宙フォーラム）

発表内容

- TDIモードについて
 - CCDにおける電荷転送について
 - TDIモード観測を可能にする条件
- TDIモード画像の例、特有のデータ処理
 - 位置測定画像
 - Image Subtraction法
- TDIモード観測での利点
- 軌道傾斜角をもつデブリへの対応
- 限界等級評価
- 他の観測方法(重ね合わせ法)との比較

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

TDIモードとは？

- TDI(Time Delay Integration)とは.....
露光しながら電荷転送を行い、一定速度で移動する対象の移動速度・方向に対してCCDの電荷転送速度・方向を一致させることにより、移動対象を点状に撮像し、高感度な観測を可能にするような特殊な読み出し方式。

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

CCDにおける電荷転送のしくみ

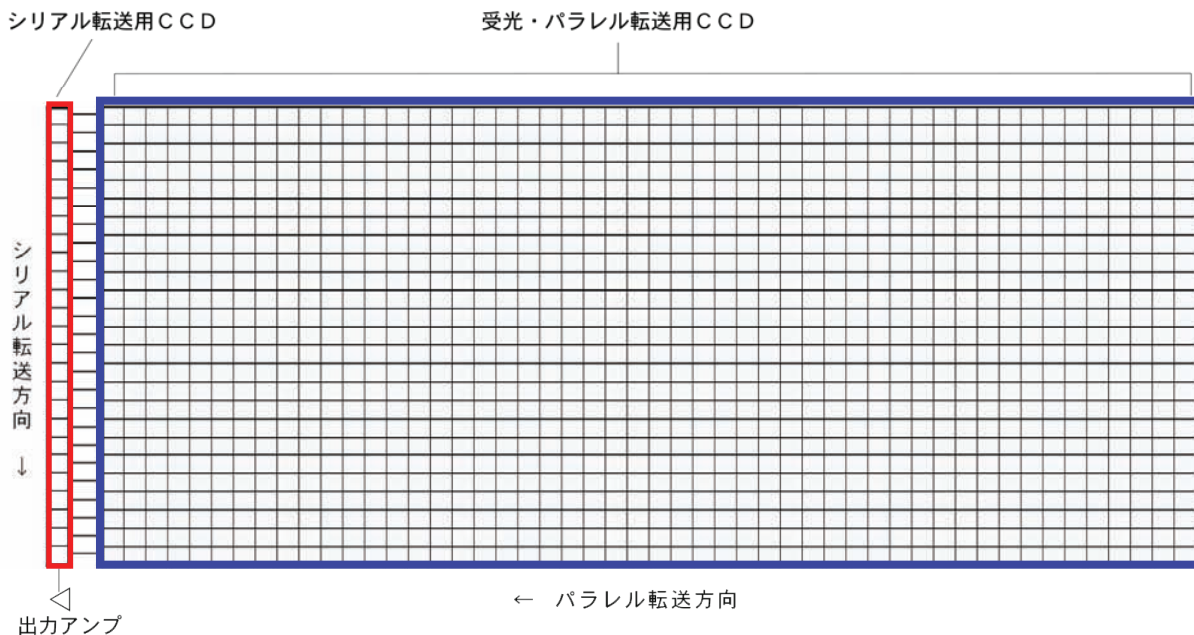
CCDでは電荷転送（いわゆるバケツリレー）により読み出しを行う

- ・ パラレル方向の転送
- ・ シリアル方向の転送

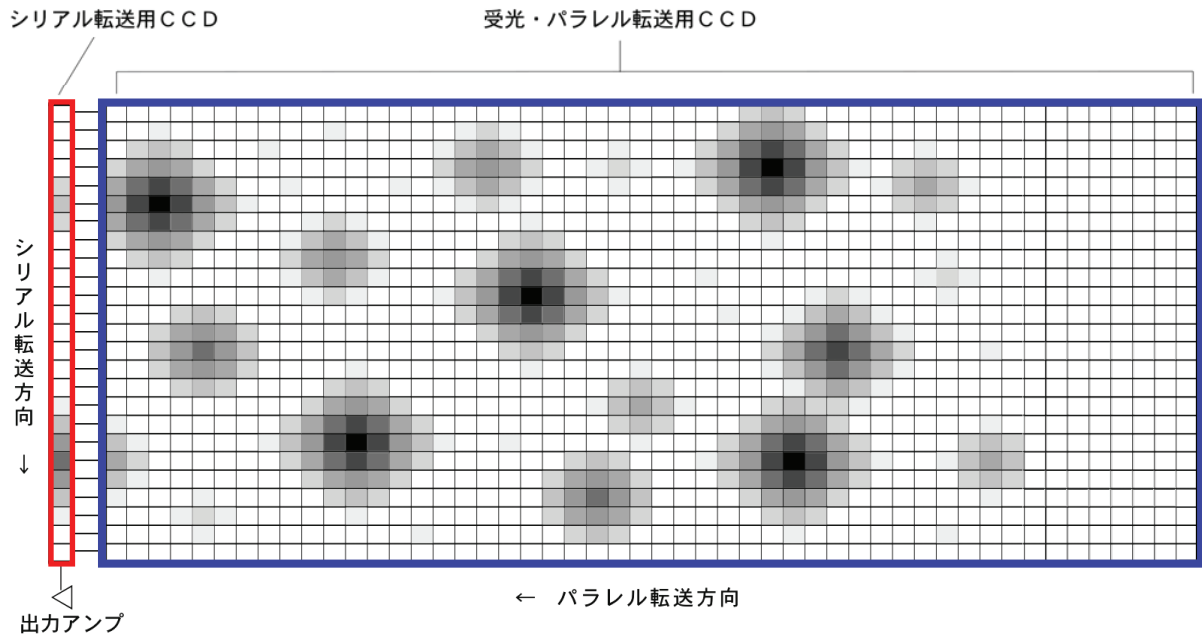
2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

CCDにおける電荷転送のしくみ



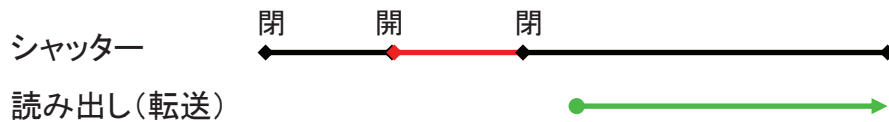
CCDにおける電荷転送のしくみ



通常読み出しとTDIの違い

- ・ 通常の読み出しシーケンス

シャッター開 → (露出) → シャッター閉 → 電荷転送



- ・ TDIの読みだしシーケンス

シャッター開・同時に電荷転送開始 → (電荷転送しながら露出) → シャッター閉、引き続き電荷転送



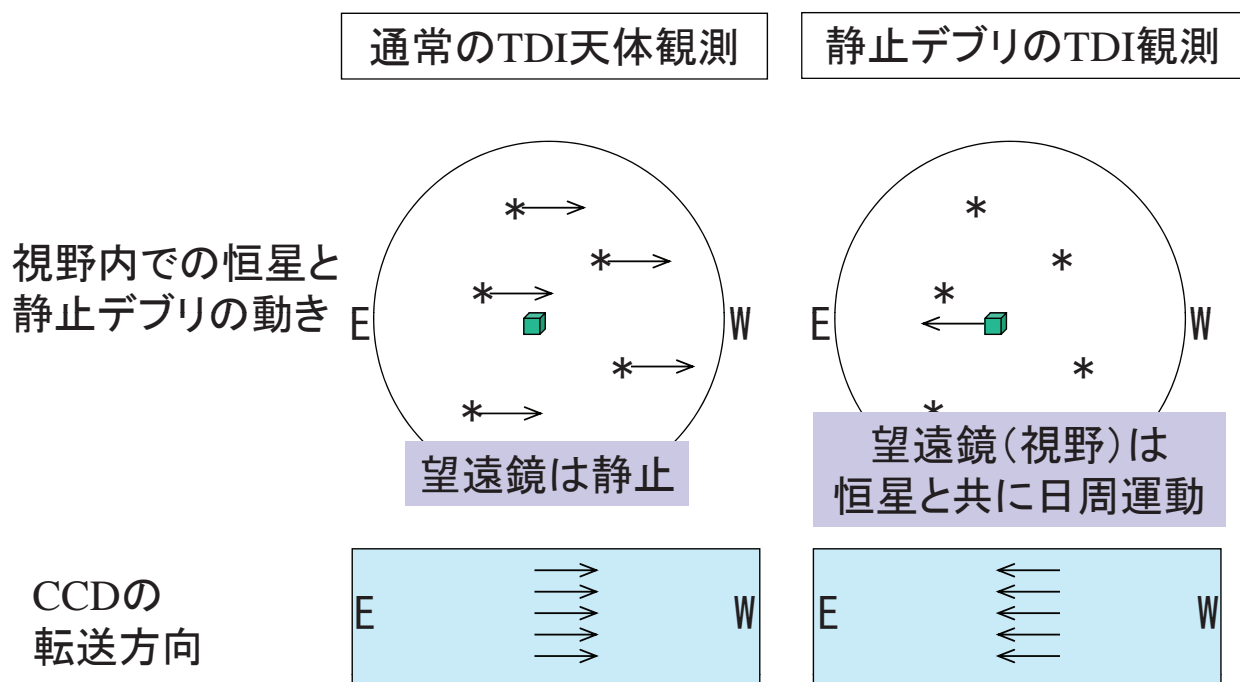
TDI観測を可能にするための条件

- ・ 移動天体が点状に撮像されること
 - a. パラレル方向(東西方向)の電荷転送速度と天体の移動速度が一致すること
 - b. シリアル方向(南北方向)に天体が移動しないこと
- ・ 必要な調査・調整作業
(赤道儀式望遠鏡、カセグレン焦点を仮定)
 - a. パラレル転送速度の調整
→ CCD制御のためのクロック信号を操作し、
移動速度に一致するよう調節
 - b. CCDの回転角の調整
→ 現在は東西方向に設定

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

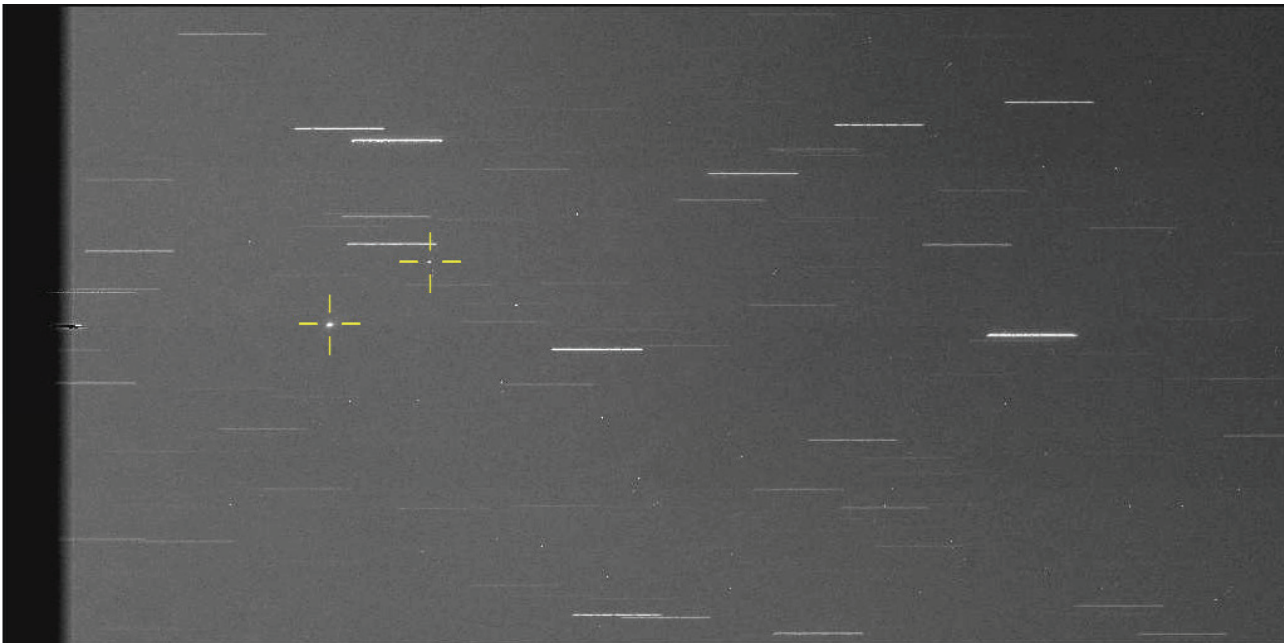
天体の動きと転送方向



2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

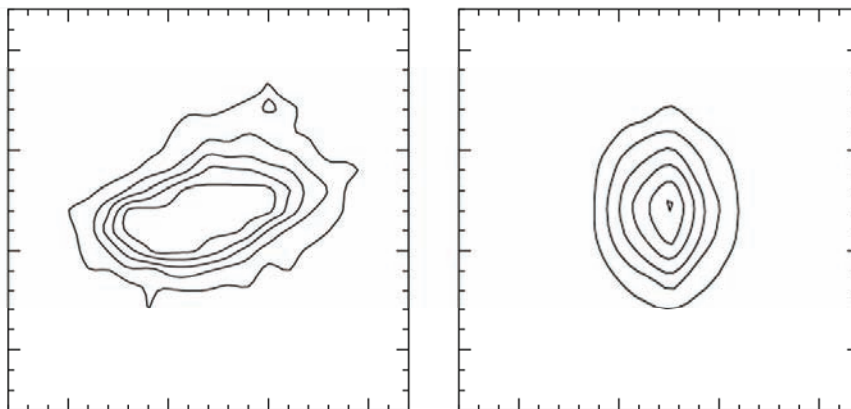
TDI観測画像



2010/12/16

TDI画像

電荷転送速度の微調節



左：調節前の静止デブリ像、
右：調節後の静止デブリ像。目盛りは1秒角。

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

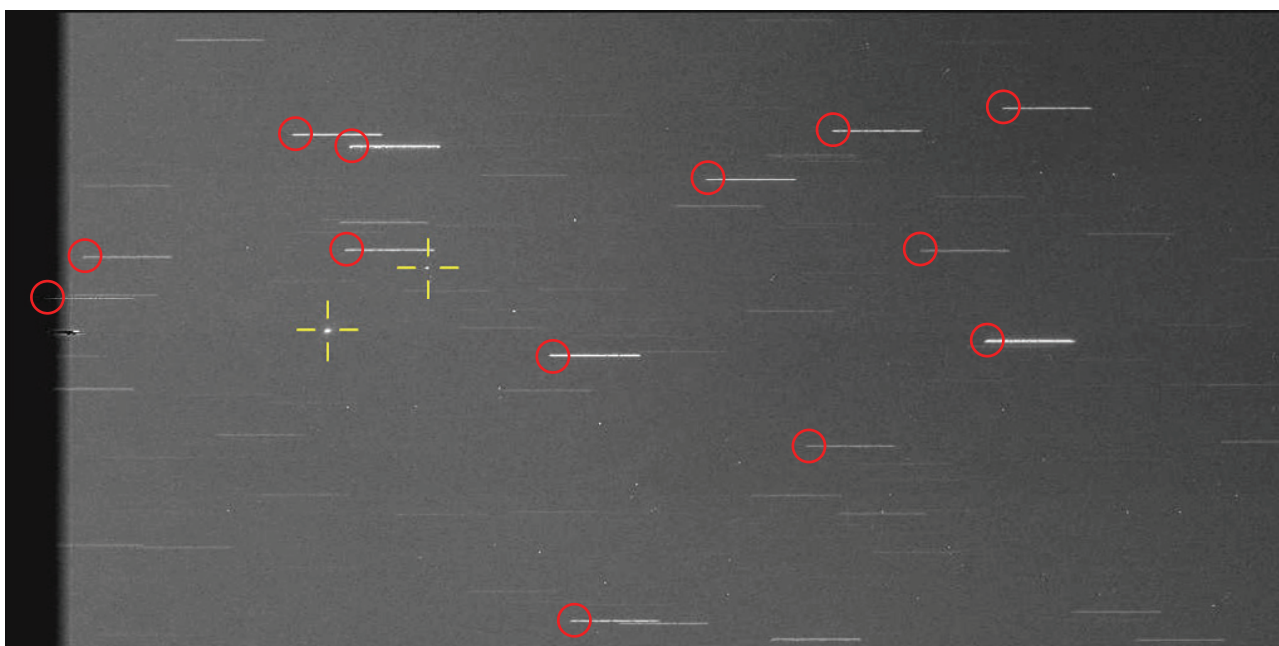
TDIデータ特有のデータ処理

- ・ 位置測定画像の利用
 - 長時間露出でもデブリの位置測定を可能にする。
- ・ Image Subtraction法
 - 画像同士の差し引きをすることにより暗電流、フラットなどのCCDの特性をキャンセルし、検出天体に対するS/N比を向上させるとともに視認性を向上させる。
 - 連続で取得した画像同士で引き算を実施すれば、背景の星を消し、移動天体(=デブリ)像をより高S/Nで検出できる可能性がある。また、背景の星と重なる場合でも測定が可能となる。

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

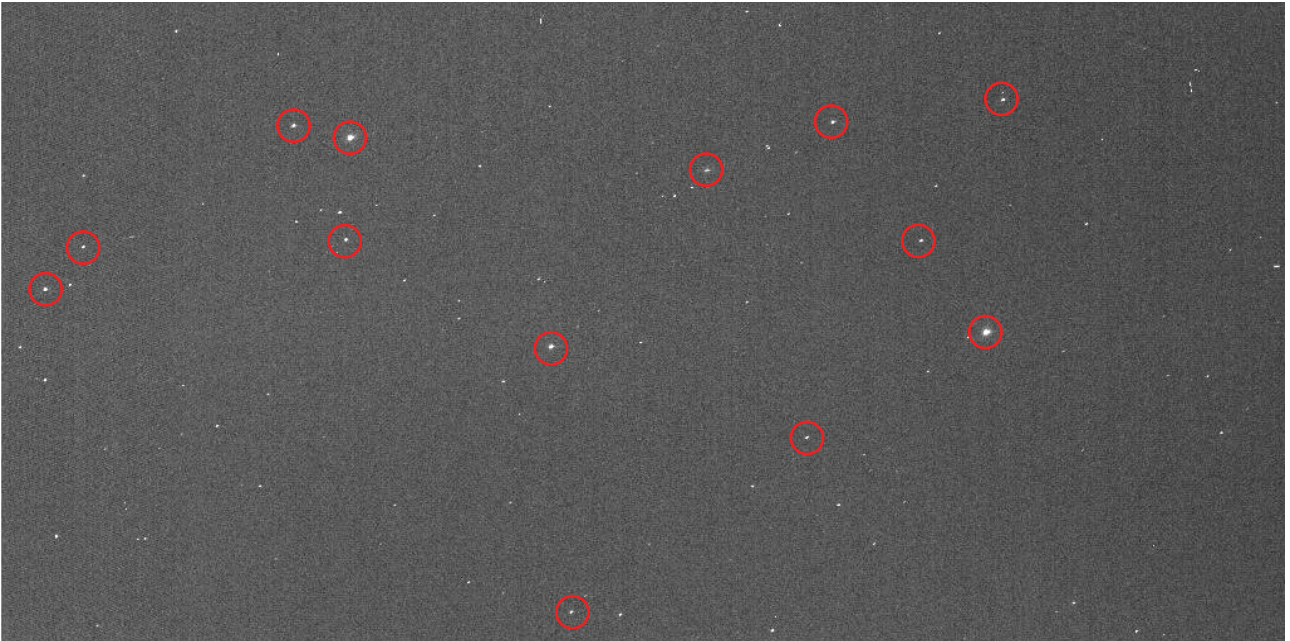
TDIデータ



2010/12/16

TDI画像

位置測定用データ



2010/12/16

位置測定用画像

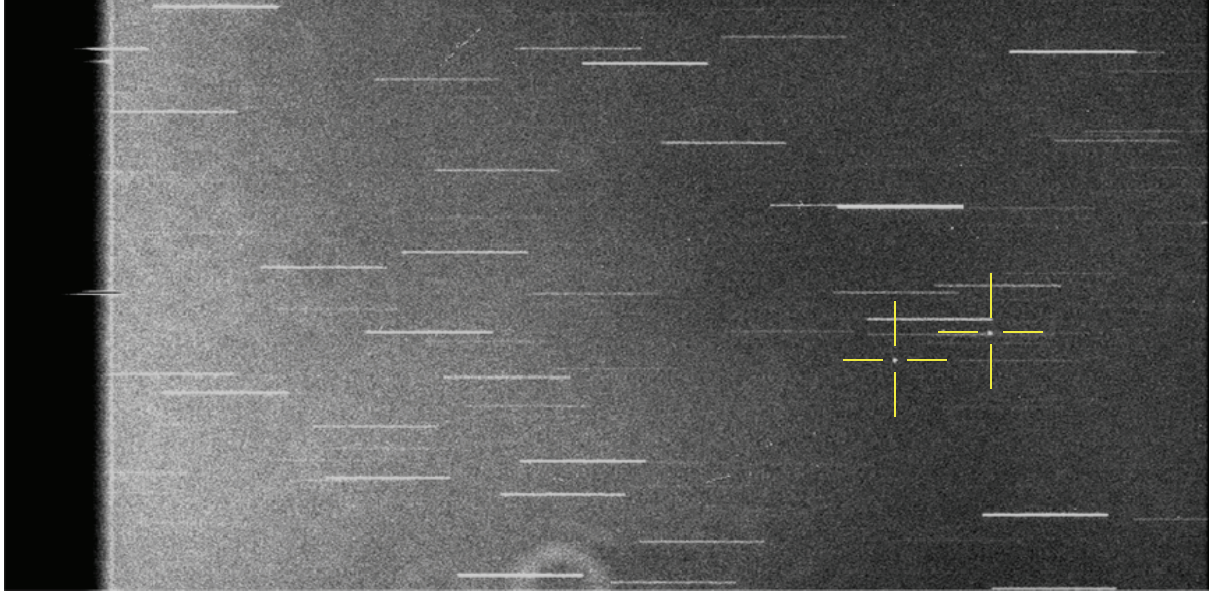
TDIデータ特有のデータ処理

- ・ 位置測定画像の利用
 - 長時間露出でもデブリの位置測定を可能にする。
- ・ Image Subtraction法
 - 画像同士の差し引きをすることにより暗電流、フラットなどのCCDの特性をキャンセルし、検出天体に対するS/N比を向上させるとともに視認性を向上させる。
 - 連続で取得した画像同士で引き算を実施すれば、背景の星を消し、移動天体(=デブリ)像をより高S/Nで検出できる可能性がある。また、背景の星と重なる場合でも測定が可能となる。

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

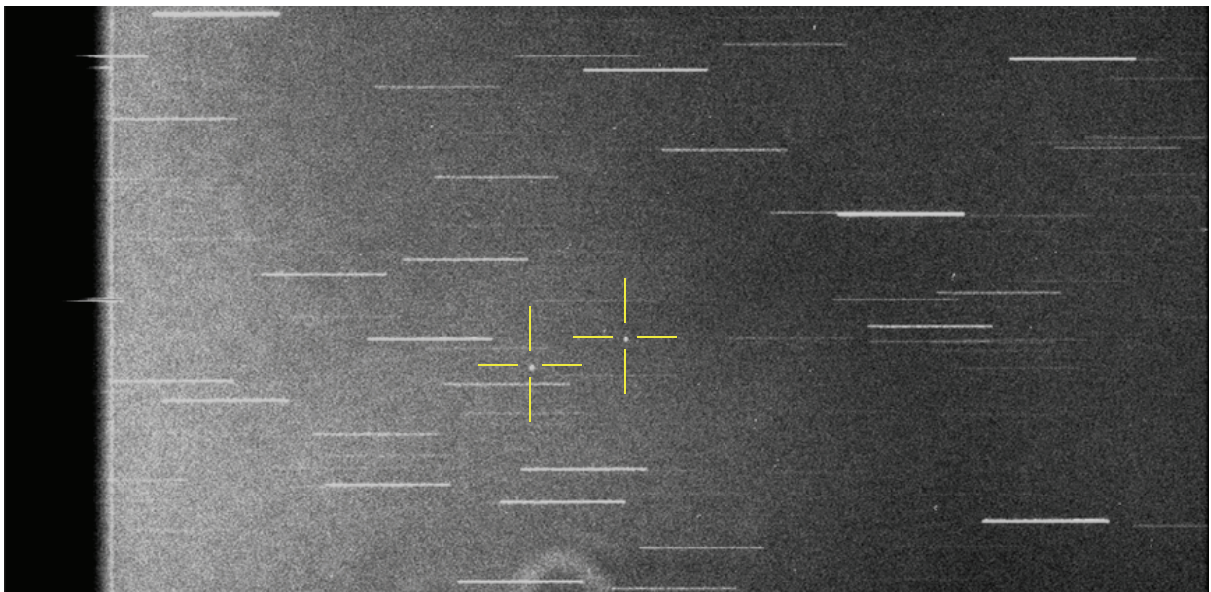
TDI Image 1



2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

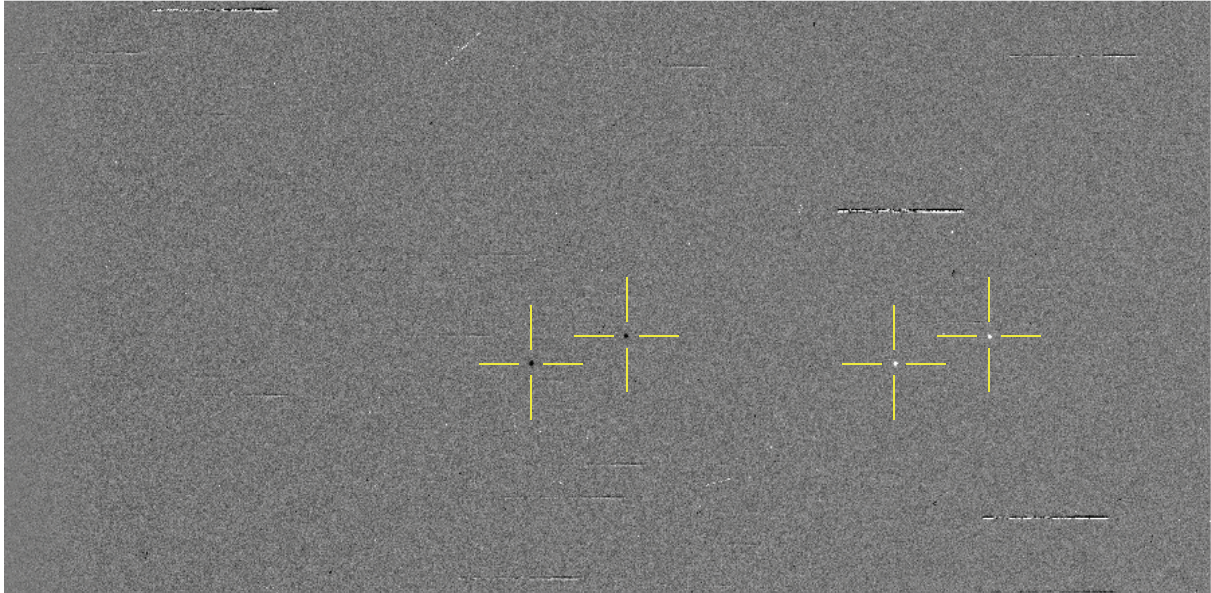
TDI Image 2



2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

Subtraction Image (Image1 - Image 2)



2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

TDI 観測の利点

- 通常のデブリ観測方法
(望遠鏡静止 or デブリの動きを追尾)と比べて
長い露出をかけても位置測定ができる。
(Image Subtraction法の適用、
位置測定用データの取得により)

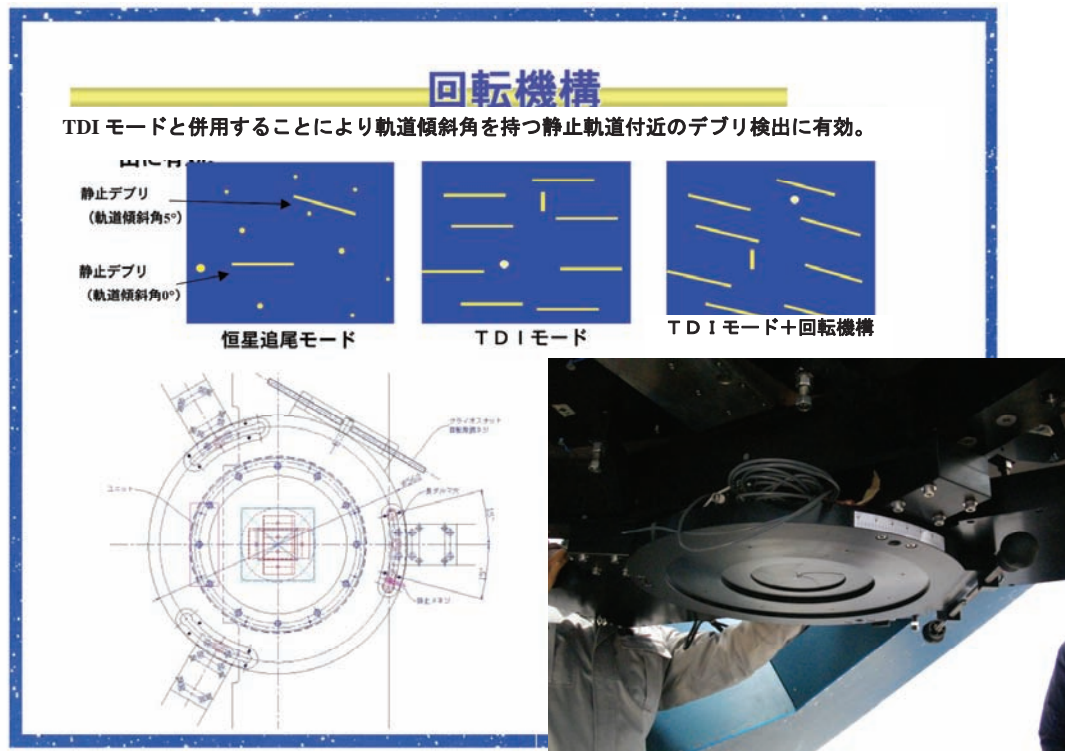


より暗い(=より小さい)デブリまで検出可能。

2010/12/16

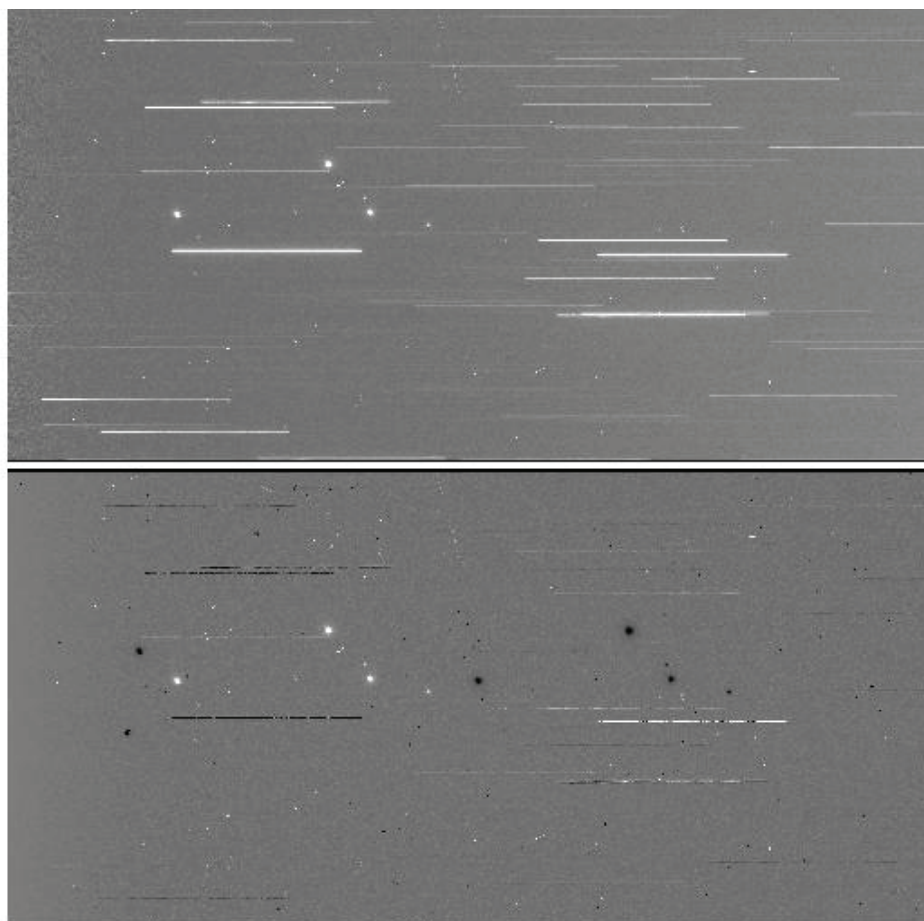
第4回スペースデブリワークショップ

カセグレンローターにより 軌道傾斜角をもつデブリにも対応



検出限界の評価

- TDIモードで静止デブリの観測データを取得
- 明るさのわかっている星(標準星)と出力を比較
- デブリの明るさが何等相当であるか評価
- 画像上でデブリのS/N比を算出
- $S/N=5$ となる明るさを算出、これを限界とする



2

検出限界の評価

- **結果**
60秒露出の時、限界等級はおよそ18.7等

他の観測方法(重ね合わせ法) との比較

	観測時間の オーバーヘッド (対時間効率)	様々な軌道 傾斜角への 対応	検出限界	位置 測定 精度
重ね合わせ法	×	○	○	?
TDI	○	×	○	?

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

まとめ

- TDI観測とは
→CCDの電荷転送速度を移動物体の速度にあわせ、
転送しながら露出してデータを取得する手法
- TDIによる静止デブリ観測の利点
→長い露出でも位置測定が可能
- 軌道傾斜角の大きい静止デブリにも対応可能
- BSGC1m鏡での観測では、18.7等程度の
デブリまで検出可能(60秒露出)
- 現在試験段階、徐々に通常の観測に組み込み予定

2010/12/16

第4回スペースデブリワークショップ

TDIモードによる静止デブリ観測の試み

奥村真一郎¹⁾・坂本 強¹⁾・高橋典嗣¹⁾・中屋秀彦²⁾・工藤伸夫³⁾・廣瀬史子³⁾・
松田郁未³⁾・染谷一徳³⁾・柳沢俊史³⁾・吉川 真³⁾・田中 濟⁴⁾

¹⁾ 日本スペースガード協会、²⁾ 国立天文台、³⁾ JAXA、⁴⁾ 日本宇宙フォーラム

Geostationary space debris observations by TDI mode

Shin-ichiro OKUMURA¹⁾, Tsuyoshi SAKAMOTO¹⁾, Noritsugu TAKAHASHI¹⁾, Hidehiko NAKAYA²⁾,
Nobuo KUDO³⁾, Chikako HIROSE³⁾, Ikumi MATSUDA³⁾, Kazunori SOMEYA³⁾,
Toshifumi YANAGISAWA³⁾, Makoto YOSHIKAWA³⁾, and Wataru TANAKA⁴⁾

Abstract

We are attempting the observations of geostationary space debris using TDI mode. In TDI-mode observations, the positions of geostationary space debris are able to be measured even if field stars appear as long horizontal streaks because of a long exposure. To make the best use of TDI mode, the use of the “image for a positional measurement” and the image subtraction method were examined. Detection limit for TDI observation was evaluated, and limiting magnitude is estimated to be 18.7 (60sec exposure, S/N~5).

Key Words: TDI (Time Delay Integration), GEO

1 はじめに

スペースデブリの光学観測において、暗いデブリを検出するための手法として良く用いられるのは、比較的短い露出時間の画像データを多数枚取得し、重ねることにより信号対ノイズ比を改善する重ね合わせ法である。重ね合わせ法は様々な移動方向、様々な移動速度のデブリに対して適応が可能であるという利点があるが、データ処理に高性能なCPUと多大な時間が必要であり、また実露出時間に対してCCDの読み出しに必要な時間の割合が多く、観測時の時間効率は良くない。

静止軌道帯の物体に限定されるが、暗い対象を観測するための手法としてTDIモードを応用した方法も適用可能である。TDI (Time Delay Integration) 方式とは、別名 Drift Scan方式とも言われており、露光しながらCCDの電荷転送を行い、電荷転送速度を移動する撮影対象の速度に同期させることにより検出感度をあげる読み出し方式である。

平成19~20年度にかけて、日本宇宙フォーラムと国立天文台の共同開発研究に基づき、美星スペースガードセンター（以下、BSGC）1m望遠鏡に搭載する新しいモザイクCCDカメラ「Volante」が開発された。このカメラはCCDの読み出しに国立天文台で開発された「Messia-V」と「MFront2」を使用しており、読み出し制御部分は自由にカスタマイズが可能であるため様々なパターンの電荷読み出しを実現出来る。

われわれはBSGC 1 m望遠鏡と「Volante」カメラを用いて、TDIモードを用いた静止デブリ観測の有効性について評価を進めている。その途中経過について報告する。

2 CCDにおける電荷転送とTDI

CCD (Charge Coupled Device) とは、日本語で「電荷結合素子」と言うように、電荷が素子間をバケツリレーの方式で転送されるような光センサのことを言う。2次元CCDの場合、光を受ける2次元の受光センサ部分と、読み出しの際に使われる1次元のシリアル転送（水平転送）用CCDから構成される（図1）。受光センサ部分の

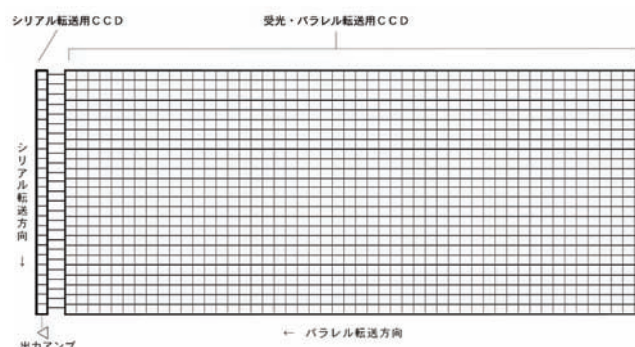


図1 CCDの構造。2次元の受光・パラレル転送用CCDと1次元のシリアル転送用CCDから成る。TDIモードでの実際の使われ方に合わせて縦と横を逆に図示しているの、図ではシリアル転送（水平転送）が縦方向、パラレル転送（垂直転送）が横方向の表示となっている。

電荷はシリアル転送用CCDに向かって1素子分（1列分）ずつ平行に転送される。この転送をパラレル転送（垂直転送）と言う。そのため2次元の受光センサ部分を別名パラレル転送用CCDとも言う。

パラレル転送により受光・パラレル転送CCDの左端にあった1列分の電荷がシリアル転送用CCDへ移動すると、次にシリアル転送により1列分の電荷を出力アンプへと転送し、順に電荷を読み出す。1列分の電荷の読み出しが完了すると、またパラレル転送により全体がシリアル転送用CCD側（図1で左方向）に1列分移動し、その際受光・パラレル転送CCDの左端の電荷がシリアル転送用CCDへ移る。このように、パラレル転送とシリアル転送を交互に繰り返すことによって全面の電荷を読み出す。通常読み出しは露出が終わった後、すなわちシャッターを閉じた後に読み出し（電荷転送）を開始するのであるが、TDIモードではあらかじめパラレル転送の速度を移動物体の速度に合わせた上で、露出をしながら電荷転送（読み出し）を行うことによって、移動物体を点状に撮像する。

3 静止デブリ観測におけるTDI

上述のように、TDIとは移動天体の移動速度とパラレル転送速度を同期させる読み出し方法である。通常天文観測にTDIモードを適用する場合には、望遠鏡を固定し東から西に向かって日周運動する天体（人工天体を除くほとんどすべての天体）の動きに合わせて、CCD受光面のイメージ上で東から西に向かって日周運動の速度に合わせたパラレル転送を行うことにより天体を点状に撮像する。一方、静止デブリは日周運動をする天体とは別の動きをする。静止デブリは恒星の運動に対して天球座標上を逆向きに移動するので、TDI方式を用いた静止デブリ観測では、望遠鏡は日周運動に合わせて恒星を追尾させておき、電荷転送方向は西から東に向かって、その速度は日周運動に同期させることにより静止デブリを点像に撮像するという手法を用いる（図2）。その結果、静止デブリは点状、恒星は線状に東から西に向かって伸びた画像データが得られることになる（図3）。これは望遠鏡を静止させ、通常読み出し方式で取得した画像とほとんど同じものであるが、通常では露出時間を長くすればするほど恒星像がそれだけ長く伸びるため、位置を測定するための基準座標を決める際に誤差が大きくなってしまふ。TDIモードによる観測では、その特性を生かすことによって露出時間を長くしても小さい誤差で座標系を決定することが可能である。TDI観測によるメリットを最大限に生かすための解析手法について以下で紹介する。

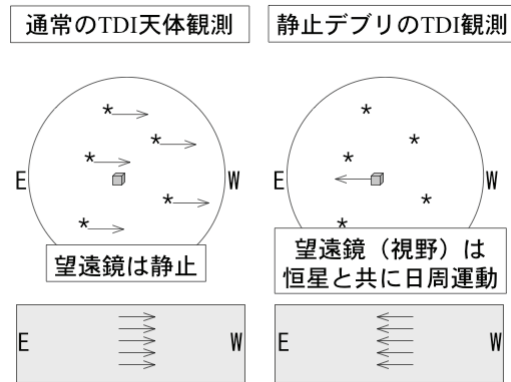


図2 通常の天体観測時と静止デブリ観測時での天体・デブリの移動方向とTDIモード時でのCCDの転送方向。円は望遠鏡の視野とその中の天体の動きを示す。E、Wはそれぞれ東と西。下段の長方形はCCDの受光面を表し、矢印は電荷の転送方向を示す。



図3 TDIモードで取得した静止デブリ画像の例。十字で示している、点状に写っているのが静止デブリ、線状に写っているのは背景の恒星。電荷転送方向は右から左。左端付近は相対的に露出時間が短くなるので暗くなっている。

4 TDI観測データ特有のデータ処理

4.1 位置測定用データの取得

TDIモードによる静止デブリ観測では、望遠鏡が恒星を追尾しているため背景に写る恒星が視野の中でいつも同じ位置にいる、という特徴がある。この特徴を利用すると、「位置測定用画像」を別途取得することにより、長時間露出のため座標を決める基準となる恒星像が長く伸びてしまっても精度を落とすことなく位置決定が可能となる。以下にその手順を示す。

- 1) TDI観測の前後に（あるいはTDI観測を長時間持続する場合には適宜途中で）「位置測定用画像」を取得する。TDIモード観測時と全く同じ読み出しパターンを使用し、なるべく短い露出（BSGCの場合、例えば0.2sec）で画像を取得する。
- 2) 「位置測定用画像」を利用して、天球座標とCCD上の座標との対応付けを行う。
- 3) 2)の座標関係を利用して、TDI画像に写っている静止物体の位置座標を決定する。

4) 時刻は、TDI画像の画像取得開始時（シャッターを開けた時刻）とし、3) で求めた位置座標とセットにして測定データとする。

図4にTDI画像と「位置測定用画像」の例を示す。TDI画像は図3と同じものである。背景の恒星はいつも同じ位置にいますので、シャッターを開いた時点での恒星の位置は、露出時間に因らずCCD上の同じ位置にいます。言い換えると、伸びた恒星像の「左端」は露出時間に因らずCCD上で同じ位置になる。短い露出でTDI画像を取得すれば恒星像は点状に近いものとなり、より正確に座標系を決定することができる。従って、「位置測定用画像」で決定した位置座標は、TDI観測画像の「シャッターを開いた時刻」におけるCCD上の位置座標と考えられる。これをもとに決定した座標系を用いて、各TDI画像において測定したデブリの位置は「シャッターを開いた時刻」での位置ということになる。

理論的には、「位置測定用画像」は一連の観測で1枚だけ取得すれば良いはずである。しかし、実際には望遠鏡のトラッキング誤差などがあるため、一定時間おきに取得することが望ましい。

4.2 「Image Subtraction (画像差し引き) 法」の適用

背景に写る恒星が視野の中でいつも同じ位置にいます、という特徴を利用して、Image Subtraction (画像差し引き) 法を適用すると、TDI画像に写った背景の恒星をうまく消去することができる。望遠鏡のトラッキング誤差や大気の状態の変化などを考慮し、なるべく近い時刻で撮った画像同士、つまり連続で取った前後の画像で引き算することが望ましい。図5は連続で取ったTDI画像とその差し引きをした画像の例である。差し引きをすることにより、背景の恒星を消すだけでなくバイアス、ダークなどCCDの特性をキャンセル出来、さらに光の当たり具合のムラも平らにすることが出来るのでデブリがより検出しやすくなる。さらに、デブリが恒星像と重なってしまった場合(図5上段、右上のデブリ)でも恒星像を消すことにより、位置の測定が可能となる。

5 軌道傾斜角をもつ静止デブリへの対応

静止デブリは大なり小なり、0でない軌道傾斜角を有する。軌道傾斜角がある場合、恒星時追尾をした望遠鏡での視野内の動きは、西から東でなく北東あるいは南東方向への動きとなる。「Volante」カメラは望遠鏡のカセグレン焦点に搭載されているが、望遠鏡に対する取り付け角度の調整機構を有するため、東西に対してプラスマイナス15°までの範囲で調整が可能である(図6)。

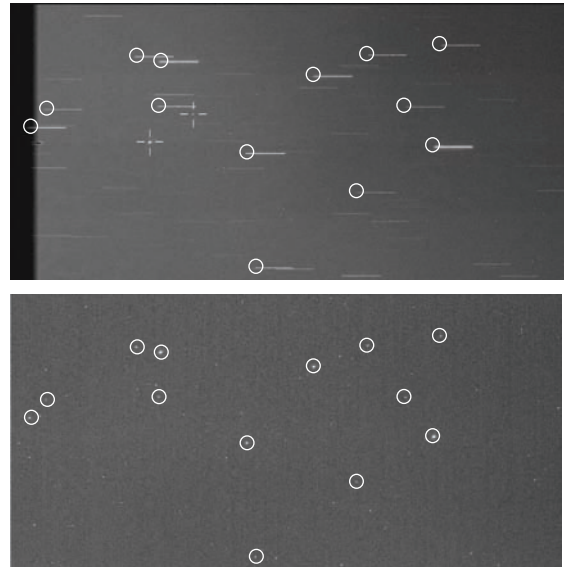


図4 位置測定用画像の例。上段はTDIモードで取得した画像、下段が位置測定用画像。位置測定用画像はTDI画像と同じセッティングの短時間露出で取得したものである。白丸で示した位置(恒星像の左端の位置)は露出時間に因らず一定の位置に来る。

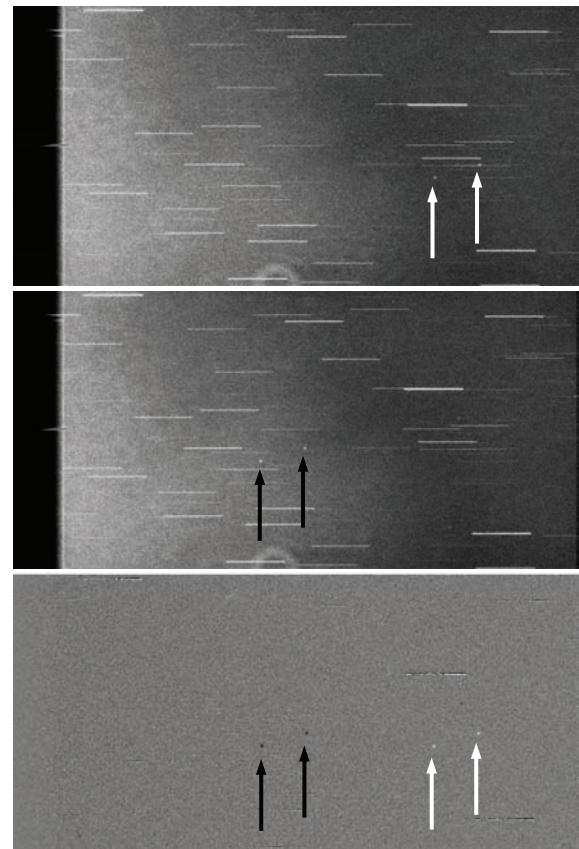


図5 上段：1枚目のTDI画像、中断：2枚目のTDI画像、下段：1枚目から2枚目を引き算した画像。引き算した画像では背景の恒星は消え、1枚目に写っていたデブリ(白矢印)はプラスの像として、2枚目に写っていたデブリ(黒矢印)はマイナスの像として見える。

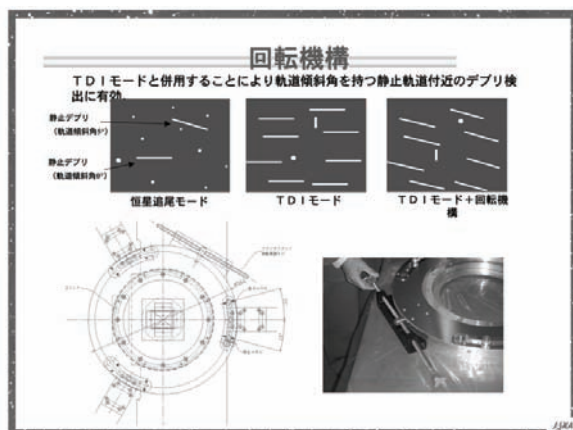


図6 カセグレン回転機構と軌道傾斜角をもつデブリへの対応。図はJAXA 柳沢俊史氏作成。

6 検出限界の評価

2010年9月4日、複数の宇宙物体が存在する方位218度、高度42度（赤緯 $-5^{\circ} 34'$ ）の位置に望遠鏡を向け、60秒露出で検出限界評価用のTDI画像を取得し、写っているデブリの画像上での信号対雑音比を算出した。同時に明るさのわかっている星（標準星）の観測データと比較を行い、評価用画像に写っているデブリが何等級相当であるか導出した。評価に使用したデブリについては、60秒露出でS/N~590、明るさは13.5等相当であった。ここからボグソンの式を用いて検出限界(=S/N~5となる等級、と定義)を求めると、およそ18.7等という値となった。静止軌道上のデブリの大きさに換算すると、反射率にもよるが20~50cm程度の大きさのデブリに相当する。

7 まとめ

以上、まとめると

- TDI観測とは、CCDの電荷転送速度を移動物体の速度にあわせ、転送しながら露出してデータを取得する手法である。
- TDIによる静止デブリ観測の利点は、長い露出でも位置測定が可能となることである。
- 軌道傾斜角の大きい静止デブリにも対応可能。
- BSGC 1 m鏡での観測では、60秒露出で18.7等程度のデブリまで検出可能であると推定される。静止軌道上で20~50cmの物体に相当する。

現在試験段階であり、今後は位置測定用画像を用いて位置決定するためのアルゴリズムの開発とその自動化を実施し、通常の観測に組み込む予定である。