国立天文台報　第 6 巻, 67–78 (2003)

微速度撮影法による星野動画作成システムの開発

小澤　友彦 *1，矢動丸　泰 *1，尾久土　正己 *1，
田口　弘子 *2，市川　伸一，渡部　潤一

（2002 年 9 月 30 日受理）

Development of the Night Sky Movie System Using Time-lapse Cinematography

Tomohiko Ozawa*1, Yasushi Yadoumaru*1, Masami Okyudo*1, Hiroko Taguchi*2,
Shin-ichi Ichikawa and Jun-ichi Watanabe

Abstract

We develop a movie production system, which capture night starry sky using the time-lapse cinematography. Through several experiments, we found that the movies represent diurnal motion of stars successfully, and this system provides powerful materials for astronomical researches of meteors and meteor trails as well as astronomical education.

1. はじめに

自然への理解は，まず第一に自然を眺める事にはじまる．

現在，日本における総人口の 5 分の 1 は 100 万人以上の大都市に暮らし，10 万人以上の都市部に暮らすものは総人口の 6 割を超える[1)]．このように多くの人が生活する都会では，生活光や街灯などが空を照らし，夜空は非常に明るい．そのため，本来自然の姿として見られる天の川や無数の星を夜空で眺める事は，多くの人にとって困難な状況である．また現代の生活は，日中を中心に活動するため，星空を眺められる夜間の行動そのものが少ない．特に教育の第一線である学校は，活動の殆どを昼間に行うことから，本物の星空を対象とした実践的指導は難しい．このように現代の生活環境ならびに習慣から，多くの人にとって実際の星空を眺める機会は無いといえる．

このような状況を補うために，プラネタリウムに代表されるような人工的に星空を再現し観望する方法が，いろいろと講じられてきた．近年では，コンピュータグラフィックスなどの技術を用い，天文学の最先端の研究成果が紹介されるようになりつつある．しかし，本来もっとも身近にあるはずの美しい星空を捉えた映像は，まだまだ少なく，より多くの人が普通に目にすることができるものとするべきである．

なぜなら，実際の星空の映像には，映像の持つ強い現実感がある．自然の星空を眺めた際に感じられる現実感には，星が持つさまざまな色の違いや天の川をも含めた星の明るさの差異などが挙げられる．また星そのものではないが夜空を流れる雲の様子や横切る飛行機の光跡，遠景の街灯の明滅なども映像が持つ現実感に重要な要素となる．この要素を忠実に再現し高い現実感を持つ映像を得るには，天の川も捉える高い感度で自然の色を映し出すことと星や雲の動きを滑らかに表現することを兼ね備える必要がある．

以上に挙げられる条件を満たすことは，現状困難である．なせなら撮影対象とする星は暗く，これまでのビデオカメラなどでは撮影が困難なためである．ここ数年，安価で且つ高感度なビデオカメラも普及し始めているが，それらは主に白黒であり，これにより得られた映像ではまだ現実感が乏しい．また現在，NHK 放送技術研究所などを中心に開発が進められているスーパーハープカメラなどを用いる事で，美しい星空の撮影が十分可能ではある．しかしそれらも非常に高価であることから，業務用としてさえ，まだ標準的なものにはなっていない．その結果，このような性能を持つビデオカメラが美しい星空を捉える機会はきわめて稀であり[2)]，一般の人が星空の映像をごく普通に目にする機会を得

*1みさと天文台 (Misato Observatory)
*2早稲田実業学校 (Waseda Jitsugyo High School)

るには，まだまだ不十分と云わざるを得ないのが現状である．

このような星空の映像は，見た人にさまざまな情報をもたらす．例えば，星空の動画からは星の日周運動を追う事が出来る．星の日周運動は，太陽の日周運動と違い，天球上の一点に対象を絞らず，天球全体の動きを一度に捉える事が出来る．すなわち，高赤緯帯から低赤緯帯までの星の動きを一度に捉える事で，天球全体が回転するという理解につながる．この天球全体の回転は，相対的に地球が回転していることを連想させる．結果，天文学の最も基礎的な単元である地球の自転に対する認識を導き出すものとなる．以上のような自然現象の理解は，自分達が生活する地球やそれを包む宇宙全体に対する実感に裏付けられた理解を導き出し，地球観や宇宙観を育むもととなる．

そこで本研究では，まず現実感の高い星空の動画撮影をより安価な機器を用いて行い，撮影手法の確立を進める．そして得られた映像の配布手段を検討し公開すると共に，この撮影手法が教育関係者を中心に広く利用されることを目指す．第 2 章では，本研究にて開発されたシステムについて紹介する．第 3 章では，このシステムを用いて観測され，作成された結果を示すと同時に，観測から得られた同システム上の注意点などを記す．第 4 章では，得られた映像を公開するにあたり，用途に応じた映像配布の形態について，我々が現在採用しているメディアごとの特徴を示す．最後に 5 章において，このシステムが生み出す映像による教育的また天文学的な成果について，これまでの成果を簡単に紹介し，今後の展開について述べる．

2. 星野動画作成システム

星野の撮影には，高い感度を持つカメラが必要となる．しかし，現状において星空を撮影可能な感度を持つビデオカメラは，一般には入手不可能である．一方，星野を静止画として撮影することは，既に冷却 CCD を用いて一般的に行われている．ここで静止画の撮影が可能な機材を用いて，星野動画が得られるシステムの構築を進める．

テレビやビデオに代表される動画とは，1 秒当りおよそ 30 枚の静止画（フレーム）が，一定間隔且つ連続的に表示（撮影）されることで，人はそれを動きのある映像すなわち動画として認識する．ここで，動画中の被写体の動きに着目する．カメラの視野角に対し，被写体の 1 フレーム毎の移動量（角度）が小さいほどその動きは滑らかに見え，移動量が大きいほどその動きは滑らかさを失う．見方を変えれば，被写体の移動量が視野中において非常に小さければ，1 フレーム毎の表示（撮影）時間間隔を長くしても，その動画中に見る被写体の動きは滑らかである．

星野を広視野にて撮影する場合，その視野において最も代表的な移動運動は，星が示す日周運動となる．これは一日で天球を一周と，一般的なビデオカメラなどが動画として捉える被写体と比較すると，非常に緩やかなものである．被写体とする星の動きが非常に緩やかである事から，ここでは 1 フレーム毎の撮影間隔を長くできるといえる．

しかし，撮影において 1 フレームの間隔を長くするということは，撮影時間中に得られるフレーム数が減少する事となる．一晩あたりの観測時間を 12 時間とし，1 分あたり 1 枚のフレームを撮影する事とすれば，一晩に得られる星野の静止画は 720 枚となる．これを 1 秒当り 30 枚のフレーム速度で再生すると，得られる映像は 24 秒となる．撮影時間がより短いものとなれば，再生時間も比例し短くなる．映像をしっかりと見るために可能な限り長く連続した静止画を撮影する必要がある．よって，この撮影においては，通常夕刻から翌朝まで通して撮影することが重要となる．

以上から星野の日周運動を示す動画を製作するための元となる連続した静止画を，数十秒程度の露出時間で一晩中連続撮影し，得られた静止画を後日動画として編集することで本システムとした．システムの概要を図 2-1 に示す．

2.1 機材

天文教育ならびに啓蒙普及を目的としている為，撮影手法自体が広く用いられる必要がある．撮影手法を一般に広めるには，使用される機材の入手が容易であり，且つ比較的安価であることが重要である．加えて使用する機材そのものの取り扱いならびに管理が簡便である点も上げられる．星空を撮影する機材の選定において，もっとも重要な点は，その感度である．動画撮影を目的として使用されるビデオカメラでは，量子効率の高い CCD 素子を用いたものであっても目視できる明るさの星全てを捉える事すら困難であった．静止画撮影用の CCD を用いた場合，数秒から数十分の露出時間を掛けることで，目視不可能な程の非常に暗い星までも映像として捉えることができる．

天体の撮影では撮影対象が暗く，高い感度が求められるため量子効率の高い CCD 素子が頻繁に用いられる．CCD カメラによる撮影では，露出中に発生する熱ノイズを低く抑える目的から，通常 CCD

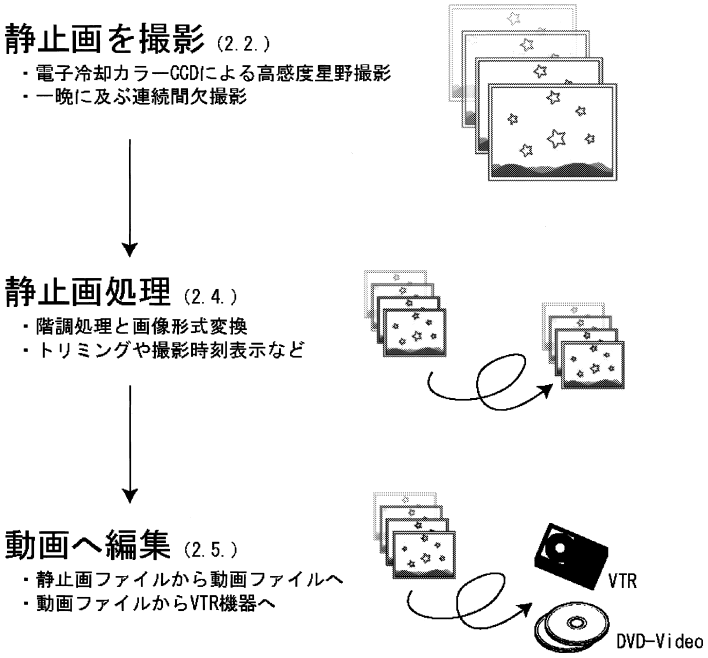

図 2-1.　作業の流れの概要を示す．星野の連続撮影，静止画の処理，動画化処理と進行する．

素子を冷却して使用する．冷却には液体窒素を用いるものがあるが，液体窒素の補充など使用上の手間がかかる．また，この液体窒素冷却の CCD カメラの場合，デュアー内に液体窒素を充填するため，一般的にデュアーが大きく取り扱いが不便となる．そこでデュアーが小型で，観測中に液体窒素等の補充が不要で且つ安価な電子冷却の CCD カメラを用いる事とする．

目的とする映像には，高い現実感が求められる．映像として高い現実感を得るならば，人の目が感じるカラー（光の三原色による合成）により再現される事が必須である．しかし，天体撮影に使用される多くの電子冷却 CCD カメラは，1 ピクセルの受光面積を大きくとるため，単色の CCD 素子を用いる事が多い．単色 CCD カメラによりカラー撮影を行うには，赤，緑，青 3 色のフィルターを時間ごとに交換し撮影する必要がある．星の日周運動を撮影した場合，フィルター毎で撮影時刻が違うと星の位置が異なる為，各フィルターの星像が重ならない．よって 3 色を同時に撮影する必要から，デジタルカメラやビデオカメラに用いられているカラーチップを搭載した冷却 CCD を使用する．

ここでは撮影手法そのものが広く教育関係者にも利用されることを目的としているところから，使用する機材は，一般に入手が容易で安価な機器とすべきである．よって使用する電子冷却カラー CCD として，Bitran 株式会社 (http://www.bitran.co.jp/) 製 BJ-31c を選定した（写真：図 2-2，性能表：表 2-1）．この CCD は，PC (DOS/V) とプリンタポート（ケーブル同梱）または USB にて接続される．

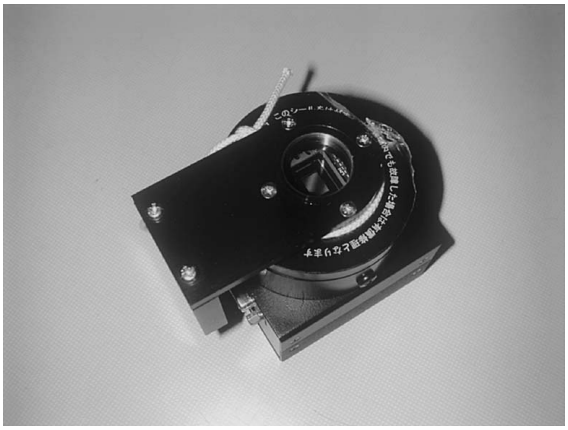

図 2-2.　今回使用した電子冷却カラー CCD カメラ（株）Bitran 製　BJ-31c である．

また CCD 制御ならびにデータ取得に必要なソフトウェア（Windows95, Windows98, WindowsME 対応）は，CCD 購入時に予め同梱されている．この CCD の機種選定の理由として，同梱されるソフトウェアにカメラの間欠撮影機能があることも重要な点である．実際の観測時においては，カメラ三脚等に電子冷却カラー CCD を固定し使用する．そのため，別売りの三脚取付金具を取り付けて使用する．以上の CCD カメラ（ソフトウェアを含む）の価格はおよそ 40 万円である．

CCD のマウントは C マウントであるため，使用するレンズには CCTV 用（一般的には工業用や監視用などと呼ばれる）レンズを使用した．該当するレンズは各社から市販されているが，今回は株式会社タムロン製，監視用単焦点レンズ 12FM35（図 2-3）を使用した．レンズの諸元を表 2-2 に示す．こ

表 2-1.　今回使用した電子冷却カラー CCD カメラの諸元

モデル	BJ-31c
CCD 素子	SONY ICX085AK
CCD サイズ（受光範囲）	8.6 mm × 6.9 mm
ピクセルサイズ	6.7 μm × 6.7 μm
ピクセル数	1,280 × 1,024
階調	16 Bit（65,535 階調）
冷却方法	空冷または水冷，1 段ペルチェ素子，ファン付き
シャッター	電子シャッター
シャッタースピード（パラレル接続時）	1/1,000，1/500，1/250，1/125，1/60，1/30，1/16，1/8，1/4，1/2，1〜30 分まで 0.5 秒単位で自由設定
転送方式	フルフレーム転送
レンズ取り付け	C マウント
電源	DC12V，2A
寸法	W79 × H90 × D92(mm)
重量	約 600 g

図 2-3.　今回使用したカメラレンズ（株)タムロン製 12FM35 である．

表 2-2.　今回使用したカメラレンズの諸元

モデル	12FM35
焦点距離	3.5 mm
絞り範囲	1.4〜Close
絞り制御	手動
焦点制御	手動
外寸	ϕ35 × 31(mm)
重量	66 g
レンズマウント	C マウント

のレンズは，単焦点（手動フォーカス）で手動アイリスとなっている．主な用途が監視用など広視野の確保が必要な用途であるため，3.5 mm，4.8 mm など焦点距離の短いものが多く用意されている．今回使用した電子冷却カラー CCD とレンズの組み合わせでは，対角 120 度ほどの画角を有し，星野中の複数の星座を同一視野に納めることができる．レンズの価格は，およそ 1 万 5 千円である．

2.2　データ形式

撮影により出力されるデータ形式は，CCD に同梱されているソフトウェアで設定される．ソフトウェア上で出力可能なデータ形式は，ソフトウェアオリジナルの形式と FITS (Flexible Image Transport System)[3]，BMP（ウィンドウズ BMP，24 ビット非圧縮)[4, 5]の 3 種類である．本研究では，以下に述べる二つの理由から FITS にて保存する事とした．まず第 1 の理由は，階調の深さである．このソフトウェアが出力する BMP 形式では 1 ピクセルあたりのビット数が 8 Bit であるのに対し，FITS は 16 Bit となっている．ここで使用する CCD が本来出力するデータは 16 Bit であることから，オリジナルのデータが持つ階調を残すため FITS を選択した．第 2 の理由は，観測状況における諸元等の自己記述性の高さとデータ構造が公開されている点である．FITS はそのファイル内部に，観測日時 (DATE-OBS)，露出時間 (EXPTIME) など，観測時のさまざまな情報が自己記述できるようになっている．また FITS のファイル構造は，厳格に定義[6]され，明瞭である．ソフトウェアオリジナルの形式では，内部のファイル構造が不明である為，独自のプログラムや他の画像処理ソフトウェアなどによる処理に障害が生じる．以上のことを踏まえ，静止画の保存形式は，FITS とした．

しかし FITS には，カラー (RGB) の概念は存在しない．そこでこのデータにおいては FITS が持つ，多次元データの管理が利用されている．具体的には 3 次元のデータ空間があり，第 1 次元 (NAXIS1)–第 2 次元 (NAXIS2) に通常の画像を入れ，残る 3 次元目 (NAXIS3) に R, G, B のカラーデータを割り当

てられている．これにより事実上カラー (RGB) のデータが 1 ファイルとして取り扱えるようになっている．

保存されるファイル名は，撮影時のソフトウェアの設定により，固定名ー連続番号．拡張子 (FTS) とする事が可能である．データの取得順位は，動画化処理にあたり必須な情報であるため，データファイル名の命名は以上のように行う．

FITS にて保存した場合，1 枚の画像はおよそ 7.8 MB の容量を持つ．1 晩分の観測データ量は，観測時間を 12 時間とし毎分 1 枚の撮影を行うと，12（時間）× 60（分）× 1（枚/分）× 7.8（MB/枚）から 5616 MB (5.6 GB) となる．現在，この非常に大量な観測データは，DVD-RAM（両面 9.4 GB）へ保存している．

2.3 観測要領

2.1 で述べた電子冷却 CCD カメラを屋外に設置し，静止画の撮影を試みるにあたり，想定される注意点は以下のとおりである．

撮影の際，その視野に大きく地上の風景を写しこむ事が重要である．星野の日周運動は，地上風景に対し星が移動してゆくことで，はじめて星の日周運動を実感するものである．もしも視野内に地上風景を入れず撮影すると，再生された動画において上下左右の感覚や視野範囲が捉えづらく，日周運動そのものの理解が妨げられる．また画角は基本的に実際の天球の下が映像視野においても下となるように撮影する．後処理で視野の向きを変えることも可能であるが，後処理の簡便性から予め視野の下辺が地平線と平行となるよう撮影を行う．

より詳細な注意としては，観測中の夜露などがある．広視野での撮影のため，屋外への機材設置となり，夜露によるレンズの曇りが考えられる．そこで対策として電気ヒーターなどを用いて曇りの防止を講じるべきである．

また開けた場所での撮影では，強風により三脚等のカメラ固定器具のズレが予想される．安定した映像を得るためには，長時間視野方向が変わらぬようカメラを強固に固定する必要がある．安定性を高める事から三脚などは，重量の重いものを選び，設置場所によっては，ワイヤーやペグなどを用いて地面へ固定するなどの対策を講じる．

2.4 階調処理と画像形式変換

観測にて得られた画像は，動画化へ向け処理を行う事となる．まずは，得られた画像を静止画として処理する．静止画のまま階調調整やカラーバランス調整，またトリミングや時刻表示の挿入処理などを行う．この処理の際に，撮影で得られた画像形式である FITS から動画化処理の際の入力形式である BMP に形式の変換も行う．ここでは，Windows のコマンドプロンプトかまたは UNIX にて動作する自作のプログラムを開発し，処理を行った．

2.2 で述べたように出力されるファイル形式には BMP 形式もあり，このファイル形式はそのまま動画化用のソフトウェアに読み込めるものである．撮影にて得られた画像をより安易に処理する事を考えれば，CCD からの出力を BMP とし本節の処理内容を省くべきである．しかし 2.2 にて述べたように CCD から得られる画質を維持し保管する目的から FITS 形式とし，階調処理とあわせて形式変換を行い BMP とした．FITS 形式は，1 ピクセル当たり RGB それぞれに対し 16 Bit (0〜65,535) の階調で表される．BMP は，RGB それぞれに対し 8 Bit (0〜255) の階調である為，この値の変換を行う．変換は FITS 画像で最も暗くすべき場所を BMP の 0，明るくすべき場所を BMP の 255 として変換する．

FITS から BMP への形式変換に当たり，同時に多様な処理を行う．現行可能な処理内容としては，以上に記述した階調調整（RGB 独立に階調調整を行う事でカラーバランスの調整に相当する）の他にトリミングや FITS ヘッダーから読み取った日付時刻表示の挿入，別画像の重ね書きなどが挙げられる．

この自作プログラムで特筆すべき点は，FITS ヘッダーにある撮影日時情報 (DATE-OBS, EXPTIME) を用いた日付時刻表示の挿入機能である．この情報は再生された動画において，実時間進行と再生速度の関係を明確にするものとなる．すなわちこの情報から，再生映像がどれほど変速されているかを見定めるのに有効な情報を与えるものとなる．

さてプログラムは実行時において，FITS 画像のあるディレクトリパス，変換後の BMP 画像の保存されるディレクトリパスならびに変換に必要な詳細情報（FITS ファイルの初期・終了番号，RGB ごとの階調値，トリミング範囲の座標値，日時情報の挿入処理の有無）が記述されたファイル名を入力する．プログラムが実行されると順次，FITS を BMP へと変換する．動作中のコマンドプロンプトウインドウの様子を図 2-4 に示す．

2.5 動画化処理ならびに VTR 機器への出力

これまでは撮影された星野の静止画を扱ってきたが，この段階で複数枚の静止画のファイルを 1 つの動画ファイルとして結びつける作業となる．この作業もまた，これまで処理を行ってきた PC 上にて

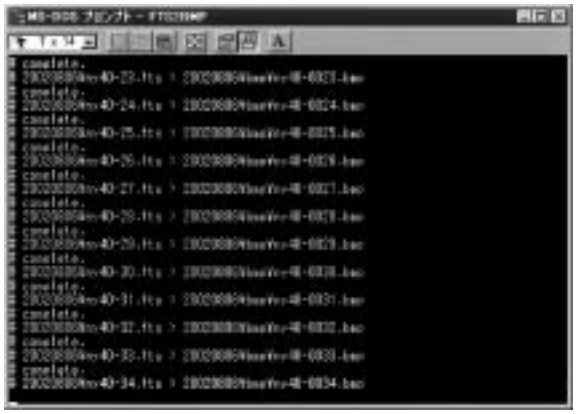

図 2-4. 静止画処理用自作ソフトウェア FTS2BMP 実行中のコマンドプロンプト画面．FITS 形式の画像を BMP 形式に変換すると共に，階調変更やトリミング，日時のオーバーレイ機能を持つ．一回の実行で，指定した複数枚の静止画に対する以上の処理を一度に行う．

行う．

今日の動画編集作業においては，動画の再生順位と関連せずに編集作業を進めるノンリニア編集と呼ばれる方法が広く普及しつつある．ノンリニア編集の作業の多くは，PC から専用高速計算機など幅広い計算機システム上において専用のソフトウェアを用いて行うものである．この動画編集用ソフトウェアを一般にノンリニア編集ソフトウェアと呼び，家庭にて使用される PC で使用できるものも数多く存在する．このようなノンリニア編集ソフトウェアの多くは，その入力素材として静止画を用いることが可能である．ここでは，この撮影手法がより広く普及する事に配慮し，一般への普及が進む PC の使用とマニュアル等が完備された市販のノンリニア編集ソフトウェアを用いることとする．

ノンリニア編集ソフトウェアとしては，Adobe 製 Premiere などがよく知られている．今回は，動画化の処理に当たり使用した PC，Sony VAIO PCG-N505AS (Intel Pentium II 400 MHz, Memory 128 MB) に同梱されていた Sony DVgate Assemble を用いて処理を行った．動画処理の詳細については，補足 A. を参照のこと．

さて, PC にて編集された動画ファイルのデジタルビデオ（以降, DV と呼ぶ）への出力について述べる．PC と DV の接続は, IEEE1394（i.LINK, FireWire と呼ばれる）準拠のケーブルにて行う．その為，PC ならびに DV の両方に IEEE1394 端子が必要である．上記の PC (Sony VAIO PCG-N505AS) は，この端子を持つ．出力する DV には，IEEE1394 端子がある Sony Digital Handycam DCR-PC100（およそ 15 万円）を使用した．PC 上の動画ファイルを IEEE1394 経由で DV カメラへ出力するには，専用のソフトウェアが必要である．このソフトウェアとして，上記の PC に同梱されていた Sony DVgate Motion を用いた．このソフトウェアによる映像の出力作業に関する詳細は，補足 B. を参照されたい．

以上に記述する一連の作業で，星野の日周運動の動画製作は完了する．

3. 星野動画作成の試験と結果

3.1 観測結果

以上の作業手順に従い撮影ならびに動画化処理を行った．ここでは，研究初期に行った星野動画作成作業について説明し，その結果を述べる．また，この作業において得られた作業上の注意点についても記述する．

これまでに行った撮影の各諸元を表 3-1 に記述する．

・2000 年 11 月 18 日

流れる雲の様子や日周運動により移り往く星の動きを滑らかに連続したものとして十分捕らえると同時に，その星の色などを明瞭に確認でき，非常に現実感の高い映像が得られた．しかし撮影途中に一度画角を大きく変更した為，一視野の映像としては短いものとなり，再生時において見苦しさが感じられる．

・2000 年 11 月 23 日

秋の空に掛かる天の川を捉え，目視に近い感度での撮影を実現した．しかし，この観測では露除けヒーターの設置をしなかった為，撮影中数度に渡りレンズの曇りが生じた．

・2001 年 1 月 16 日

はじめて都会の夜空を撮影した．結果は都会の夜空の明るさを実感させられるものとなり，地域環境ごとの空の様子を十分に映し出す映像が得られた．しかし，この観測中，CCD 制御兼データ取得用 PC に対してネットワーク経由でデータ転送を行うなどの作業をしており，その負荷から撮影間隔が不均等になる現象が生じた．また得られた静止画上に横に走るノイズが見られるなど，撮影中における他の作業が結果に悪影響を及ぼすものであることが分かった．

・2001 年 5 月 19 日

東の空から昇る夏の天の川を明瞭に捉えた（図 3-1）．一晩を通し，これまでに挙げたような問題も無く，撮影を行えた初めての映像といえる．画面左側の空が明るく映し出されるのは，遠方にある市街地の明りである．

表 3-1.　各観測における諸元
一晩における撮影枚数が非常に多いことがわかる

観測日時	撮影間隔	露出時間	枚数	場　所	HP 公開
2000 年 11 月 18 日	1 分	40 秒	631 枚	みさと天文台（和歌山県）	無
2000 年 11 月 23 日	1 分	40 秒	770 枚	みさと天文台（和歌山県）	有
2001 年 1 月 16 日	30 秒	10 秒	560 枚	国立天文台三鷹キャンパス（東京都三鷹市）	有
2001 年 5 月 19 日	1 分	40 秒	550 枚	みさと天文台（和歌山県）	有
2001 年 11 月 10 日	1 分	40 秒	550 枚	みさと天文台（和歌山県）	有

図 3-1.　ホームページで公開している動画の一例（2001 年 5 月 19 日に観測した静止画）．東の空を撮影した画像．中央を横に貫く帯状の雲が，夏の天の川である．

・2001 年 11 月 10 日

東の空から昇る冬の星座を捉えた映像である．前述の 2001 年 5 月 19 日の観測と同じ場所，同じ方向に設置して行った．両映像の比較から，季節の違いによる星座の違いが見て取れる．

3.2　注意点

2. 3 観測要領にて事前に挙げられていた注意点ならびに 3. 1 の試行により習得した注意点をここでまとめる．

・画角の決定について

動画中で星座を確認するには，星座がその視野中にある程度の間，留まっていることが必要である．よって，星座が視野中を長時間にわたり移動する程度の広視野での撮影が重要である．星の日周運動を方位などと関係付けるためには，撮影された映像の天地が一見して確認できるよう，視野中に必ず地上風景を入れる必要がある．また，映像中での上下の認識をより促すには，画面下部に地上を水平に入れることが最も適している．

・動画化からの要求について

映像が滑らかに見えるためには，撮影対象（星）の移動量が大きくならないよう画像の撮影間隔を短くし，より多くの静止画を撮影する事が重要である．なおかつ，夕方から翌朝までに渡るような長時間での観測を行い，より多くの画像を取得する必要がある．

・観測時の注意について

夜露によるレンズの曇りは，映像上の星像を消すこととなる．よって，事前に電気ヒーター等の夜露対策をしておくことが重要である．また，撮影中に画角が突然移動することは，見る側にとって映像内

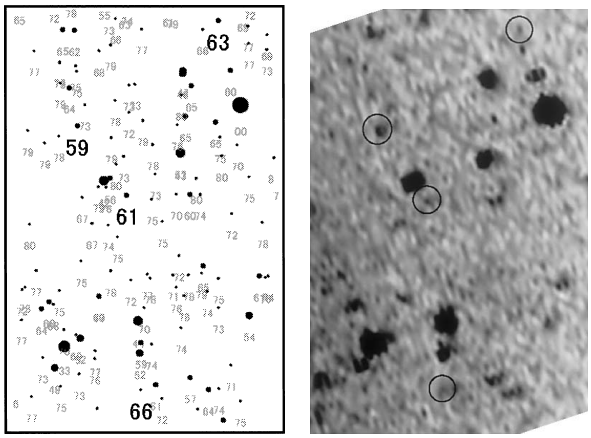

図 3-2. 右の写真は，図 3-1 に写ること座の領域を拡大したもの．左のプロットは，右の写真と同じ領域の星をプロットしたもの．数値を 0.1 倍した値が，その星の等級を示す．（ステラナビゲーター Ver. 6, GSC カタログ使用）

容の認識への妨げとなる．そこで，撮影中に画角が動かぬようカメラをしっかり固定する事は重要である．特に風が強いような場所での観測においては，ペグなどを用いて三脚を固定する必要が生じる．

CCD による映像の撮影には，PC に対し多大な負荷を与える．そのため，撮影中の PC において別の作業などを行うと撮影に必要な処理が滞り，指定した撮影間隔が変動するような結果をもたらす．これは映像中での星の動きを不連続にするため，撮影中は十分注意すべきである．

3.3 画像の評価

以上のデータの中から観測時において大きな問題も無く，撮影を行えた 2001 年 5 月 19 日のデータを用いて最微光星の確認を行った．図 3-1 に示す画像の中心部付近を拡大したものが，図 3-2（右図）である．またおよそ同一視野の星をプロット[7]したものが図 3-2（左図）である．図 3-2 では，確認の容易性から 4 つの星をマークしているが，星の並びなどからその他の多数星についても容易に同定ができる．図から判断される限界等級は，およそ 6.6 等級と読み取れる．一般に眼視で確認できる限界等級は，6 等級程度であるといわれる事から，肉眼で確認できる天の川を十分映し出すことが可能であると，以上の結果は示している．

3.4 既存の映像との比較

これまでに存在した映像の多くは，高感度ビデオカメラによるものである．高感度ビデオカメラは，その受光素子（機構）により，大きく 3 種類に分類される．ここでは，撮影可能な対象と，映像の広範な普及の観点から評価を行う．

1) スーパーハープ管

スーパーハープ管は，既に天の川や流れ星の映像を提供しており，ハイビジョンなどのハイクオリティな映像として取得する事が可能である．しかし，非常に高価且つ短命であり，また取り扱いが困難であるため，現状広く普及することは無く，そこから得られる映像が広まる頻度は少ない．

2) イメージインテンシファイアー

イメージインテンシファイアーによる映像からも，天の川や流れ星などを捉える事が可能である．イメージインテンシファイアーは，モノクロの増感素子であるが，近年それを 3 管併用することで，カラー映像を得る事が可能なものも存在する．しかし，スーパーハープ管程ではないが，イメージインテンシファイアーも高価な機器であるため，それを 3 管併用したカラー撮影可能な機材は非常に高価となり，広く普及することへの障害となる．

3) 高感度ビデオ CCD

機材は安価で，且つ取り扱いが非常に容易である．その為，流星群の観測などを中心に広く普及している．星座の形などを映し出すには十分な感度であるが，天の川を明瞭に映し出す程の感度は無い．

以上と比較し，本研究にて開発された撮影システムを評価する．本システムは，比較的安価な価格で市販されている電子冷却カラー CCD カメラを使用することで，広く一般に普及されることを研究の基本としている．また 1 枚の画像に対し長時間露出をかけることで，天の川など非常に淡く暗い対象を映し出すことも可能であるとともに，静止画における画質はハイビジョンに匹敵するクオリティを有する．この価格帯の機材を用いたシステムとして，非常に高感度且つ高画質であることは，本システムの優れている点といえよう．しかし，撮影されたデータは静止画であり，それを動画にする処理が発生するため，動画取得までの作業が煩雑な点が，今後の改良を要するところとなる．静止画から動画への処理を自動化することが今後重要な要件といえる．また映像取得の機会をより広げるには電子冷却カラー CCD は，まだ高価な機材とも考えられる．より安価で且つ広く普及したデジタルカメラ等での可能性を今後検討することも重要といえよう．

4. 映像の公開

以上のシステムにて得られた映像は，さまざまな方法で公開している．このような映像は，さまざまな用途での使用が考えられる．例えば，学校の日周

図 4-1.　動画や撮影方法など各種情報を公開しているホームページ.

運動などを中心とした授業において，地球の自転に起因した日周運動の理解を促す教材などがある．またプラネタリウムなどの番組にこのような映像を組み合わせる事で，対象とする天文現象をよりリアルに伝えることが可能となる．

個人で楽しむ，またより多くの人へ伝える為の素材としてなど，さまざまな用途が考えられる．同時に映像の伝達手段（媒体：メディア）にもさまざまな形態が考えられる．しかしそのメディアには固有の特徴があり，これを捉えなければ，本来目的とした現実感が失われることが危惧される．そこで我々は，現在可能な以下の 3 通りの方法で，映像の配布，公開を行うものとした．

ここでは我々が採用した 3 通りのメディアについて紹介し，それぞれの特徴について説明する．

4.1　VTR 機器

VTR 機器は，もっとも広く普及した動画メディアである．中でも VHS 規格の機器は，多くの学校や一般家庭にある．その為，再生機器の有無による映像閲覧の弊害が，起こりづらいといえる．しかし，アナログ機器故の繰り返し再生による画質の劣化や，テープメディア故の要求映像の頭出しに時間を要する点などから，今後，これ以上の普及は望めない．

デジタル化による映像劣化の低減や高速頭出し用メモリを搭載したメディアとして miniDV 規格がある．家庭用ビデオカメラの多くがこれを採用し，急速に広まりつつある．miniDV に記録された動画は，デジタルデータである為，ダビング（複製）による映像の劣化が皆無である点などから，民生用編集機器としても普及しつつあり，業務用 DV との互換性があることからマスコミ向けの配布メディアとして急速に需用が伸びている．

配布メディア製作の観点においては，VHS, miniDV ともにテープの複製に映像再生時間と同様の時間を要する為，単位時間当たりの製作効率が低い．また CD などのディスクメディアに比較してテープのオートチェンジャーは高価であることから，製作には多く人手と時間を要する．

4.2　インターネットによる映像配信

これまでインターネットでの映像配信では，データの転送速度の制限から映像を圧縮し，使用されていた．その為，空間成分として高周波成分の多い星空の映像では，画質劣化が激しく見るに耐えるものではなかった．しかし転送速度の急速な高速化により，その可能性は高まりつつある．またインターネットの有効利用という観点からも，映像圧縮などの配信技術は日々研究されている．

現状，都市部を中心に急速に普及している ADSL であれば，ビデオ CD 並みの画質の動画配信が十分可能である．また光ファイバーによる 100 MB の高速接続であれば，VHS かまたはそれ以上の高画質の映像を配信する事が可能である．また研究機関などを中心に接続されている 1 GB の超高速ネットワークにおいては，ハイビジョンなど現行テレビ（地上波）をはるかに超える画質での映像配信が可能となっている．

しかし配信側としては，ユーザのネットワーク環境の幅（通信速度）の広さから，どの程度の品質とした映像を準備するか，その判断は難しい．我々

は，一般の方を対象とし多くの方にご覧頂けるよう，比較的低速度な通信速度をインターネット配信の基準としている．具体的には，128 k ISDN から 1.5 M ADSL を対象とし，動画形式には Mpeg1 (1.4 Mbps) を採用している．これについては，今後ネットワークの普及ならびに通信速度の変化の動向を捉え，変更するものと考える．

ホームページ http://www.obs.jp/links/RealUniverse/index.html（図 4-1）

（映像ならびに撮影手法など，最新の研究成果はこのホームページにおいて公開している．）

4.3 新たな映像メディアによる利用

映像配信メディアとして急速な普及が進んでいるものに，DVD（DVD-Video 規格）がある．映像の形式は Mpeg2 または Mpeg1 であり，現行の VHS 並みの品質を確保している．CD 同様，デジタル記録された非接触型のメディアである為，繰り返し再生等による映像の劣化は無い．

さらに特筆すべきは，その再生形態の豊富さにある．ディスクメディアである為，頭出しや巻戻しが瞬時であることは言うまでもない．またプレーヤー側の機能を使用したプログラム再生や繰り返し再生が可能である．字幕，音声多重などの規格が規定されているだけでなく，マルチアングルといわれる新たな規格も導入されている．これは映像再生による時間進行において，同時に複数の映像（動画）を予め用意できるものである．その為，ユーザはあたかも自分でカメラを切り替えているようなことを実現する事ができる．ディスクに含まれる映像の選択には，メニューという概念から自由に選ぶ事ができるようユーザインターフェイスを構築できる．

この多様な再生形態を持つ DVD-Video は，DVD-R との互換性がある．（一部再生できないものも存在する．）その為，専用の DVD-Video 製作ソフトウェア（一般的には，DVD-Video オーサリングソフトウェアと呼ばれる）により，家庭用 PC に接続した DVD-R 機器を用いて DVD-Video の製作が可能である．メディアの複製には，DVD-R が有する高速焼付け機能を用いれば，再生時間の 1/2 から 1/4 の時間で行う事が可能である．（コピープロテクトが掛かっているソフトウェアメディアの複製は，不可能．）

5. 評価と今後の展開

今回得られた映像からは，滑らかに移り往く星の日周運動を十分に捉えることが出来た．これまで学校等，教育現場にて生徒自身が実感を持つには，長時間の夜間観測を行わなければならず，困難であった．しかし，本研究にて得られた映像からは，実際の夜空を捉えた映像としての現実感を持ち合わせながら，且つ授業では難しい夜間の，それも一晩に及ぶ現象を明瞭に示したものとなった．

また，広く一般の方が星野動画の映像を目にする機会を増やすために，このような映像の撮影を容易にし，教育関係者などを中心とした多く人がこの撮影手法を試みることが可能になる状況を構築する必要がある．今回用いた電子冷却カラー CCD は，約 40 万円とまだ高価であり，学校等教育機関が購入し撮影を試みる事は困難である．そこでより安価な機材，例えばデジタルカメラなどでの撮影を今後試みる必要がある．また撮影から階調処理，動画化編集を経て，VTR 機器へ出力される段階の短縮化を図る事も重要である．

得られた映像ならびに撮影手法は，これまでに無い視覚的資料をもたらすと考えられる．これらが天文教育の側面において，どのような有効性を示すかを調べる事は，天文教育の側面だけでなく，本研究の方向性を担う重要な要因である．そこで，教育的側面から本件の映像が持つ有効性を検証する予定である．

また，今回のシステムは，時間変化の緩慢な現象であればさまざまな対象に適応できる．例えば，小惑星の自転による変光や彗星中心核崩壊よる増光の様子などを撮影することも可能と考える．他には非常に暗い皆既月食中の月の様子なども十分に捉えられると考える．このように，対象が暗いことからこれまで動画の映像として対象にならなかった天体や天体現象の変化を捉えることが可能になったといえる．このような連続的な変化の様子を捉えることは，天文学の教育・普及の側面から重要と思われる．

実際，同システムを用い，2001 年 11 月 19 日未明のしし座流星群にて，1 時間を越える大流星痕を捕らえる事に成功した[8]．今後，このような科学的な見地からの同システムの有効性についても検討を進める事とする．

謝　　辞

映像利用の教育的見地について広範に渡るご指導を頂いた，国立天文台広報普及室の縣秀彦氏に対し感謝の意を表したい．大量のデータバックアップ作業に必要な機材についての情報提供など，国立天文台天文学データ解析計算センターの安田直樹氏には多方面にわたり御協力頂き大変感謝しております．京都府中小企業総合センターの松井洋泰氏

には，DVD-Video の製作において，多大なるご助言を頂いたこと，大変ありがたく思っております．インターネットでの動画の画質などについてアドバイスを頂いた同僚の豊増伸治氏，他みさと天文台の職員の皆様には，研究を進めてゆく上で多くのご援助を頂いた事を大変感謝いたします．また本研究に必要な技術面から教育面に渡る広い範囲において，様々なコメントをお寄せ頂いた研究グループ Real? Universe の皆様にこの場を借りて，お礼を申し上げたい．また，このような研究の場と機会を与えて頂いた和歌山県海草郡美里町の皆さんに感謝いたします．本当にありがとうございました．最後に本論文に対して，的確且つ非常に有意義なコメントを頂いた匿名の査読者の方に感謝いたします．

補　　足

A.　ノンリニア編集ソフト Sony DVgate Assemble について

DVgate Assemble は，本来いくつかの動画ファイルからその一部分を読み込み，一本の動画ファイルとして出力する動画編集用のソフトウェアである[9]．また同時に，入力ファイルとして静止画 (BMP，JPEG，GIF) を読み込み，動画ファイルとして出力する機能も有する．動画化作業の容易性を示すため，以下に DVgate Assemble による作業の行程を簡単に説明する．

DVgate Assemble の起動後，静止画のファイルを読み込む．ウインドウの左上にある [ADD] ボタン（またはメニューから［ファイル］→［追加］）を押し，［追加］のダイアログ（図 A-1）を開く．［ファイルの種類］から [BMP File(*.bmp)] を選択し，2. 4. にて製作された BMP ファイルを複数選択する．この際，一度に処理が可能なファイル数は，999 枚までである．ファイルの読み込みが終了すると図 A-2 のように読み込んだ画像のリストが表示される．また出力される動画ファイルの容量も表示される．読み込んだファイルの順位に誤りがある場合は，この画面上においてサムネイルのドラッグ&ドロップによる移動で修正を行う．この画面の右下にある [OUTPUT ALL] ボタン（またはメニューから［ファイル］→［出力］）を押すと，動画ファイルの出力となる．開いたウインドウにおいて動画ファイルの保存先やファイル名を指定し保存する．出力処理に必要な時間は，本論文で述べた PC において，200 フレーム（再生時において 6.7 秒）の出力におよそ 4 分である．

出力される動画ファイルの容量は，動画の再生時間の長さにおよそ比例する．6.7 秒分（200 フレーム）の動画の場合，およそ 24 MB である．この処理においては，PC 上のメモリを多量に消費し，CPU に大きな負荷がかかる．その為，他のソフトウェア等は，予め終了しておくべきである．

以上が動画ファイルの作成に要する手順の概要である．DVgate Assemble の取り扱いについては，Sony VAIO ホームページ内の DV に関するページ

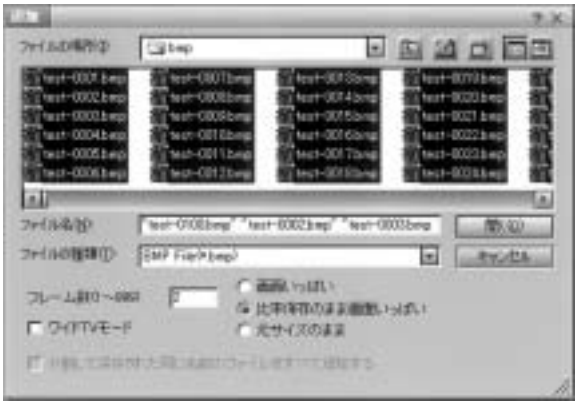

図 A-1.　Sony DVgate Assemble にて BMP 形式の画像を読み込むためのダイアログウィンドウ．中央下にある“フレーム数 (1〜999)”の指定枠にて読み込まれる静止画 1 枚あたり動画上でのフレーム数 (30 frame/sec) を指定する．30 と指定すると 1 枚の静止画が動画上では 1 秒表示される．

図 A-2.　Sony DVgate Assemble にて指定した静止画が読み込まれたことを示すダイアログボックス．静止画のサムネイルやファイル名などが表示され，読み込まれた静止画の順番などを確認できる．また，この画面上で静止画の順番などを入れ替える事も可能である．

図 B-1.　Sony DVgate Motion の起動後の様子．各ウィンドウは，プレビューモニター（左），DV カメラ等機器コントロールパネル（中央），入出力データエントリー（右）．このソフトウェアを用いて，PC 上の動画ファイルを DV カメラに転送する．

(http://www.vaio.sony.co.jp/DV) を参照されたい．

B.　PC からデジタルビデオ機器への映像出力について

動画ファイルの出力用ソフトウェアには，Sony DVgate Motion（以後，DVgate Motion と呼ぶ）を用いる．

DV の電源入力ならびに書き込み可能なテープが入った状態において，DVgate Motion の起動後の画面を図 B-1 に示す．このソフトウェアは，DV に対し画像データ（音声トラックを含む）の読み込み，書き出しが PC より行なえる．ソフトウェアの画面中央の MODE において入出力の切替を行う．DV へ動画ファイルを出力する場合は，[EXPORT-Auto] を選択する．出力する動画ファイルは，画面右側の［DVgate Motion-レコードリスト］ダイアログにて選択する．まず［レコードリスト］ダイアログ左上の [ADD] ボタン（またはメニューから［ファイル］→［追加］）を押し，［追加］ダイアログを開く．動画ファイルの選択が終了すると，DV 機器への出力となる．中央のダイアログの下方にある [RECORD ALL] ボタンを押しと［出力］ダイアログ（図 B-2）にて詳細の設定を行い，出力を開始する．出力に要する時間は，書き出す動画の再生時間とおよそ同じである．

図 B-2.　出力作業時に出現するウィンドウ．DV カメラへ出力される動画の前後へブランク（暗黒映像）挿入の指定を行う．

参考文献

1) 総務庁統計局統計調査部国勢統計課，「国勢調査報告速報シリーズ全国都道府県市区町村別人口（要計表による人口）」，平成 12 年度．
2) 株式会社シンフォレスト，「DVD NHK シリーズすばる望遠鏡世界一の天体望遠鏡が見た宇宙　Subaru Telescope」（映像資料）
3) 天文情報処理研究会，「FITS の手引き　第 4.1 版」，国立天文台天文学データ解析計算センター，2001．
4) 鈴木直美，「明解　インターネット時代の標準ファイルフォーマット事典」，インプレス，1998．
5) D. C. Kay, J. R. Levine 著, MbCD 訳，「グラフィックファイルフォーマットハンドブック」，アスキー出版．
6) 「NOST Definition of the Flexible Image Transport System (FITS) NOST 100–1.1」, NASA/Science Office of Standards and Technology (NOST), 1995.
7) 「StellaNavigator Ver. 6」, AstroArts Inc., 2002.
8) 矢動丸泰他，「微速度撮影法による動画で見るしし座流星群」，日本天文学会 2002 年春季年会（2002 年 3 月 28 日～30 日，茨城大学）（A28a）
9) Sony ホームページ（デジタルビデオ編集テクニック　DV スキルアップセミナー），http://www.vaio.sony.co.jp/Enjoy/Guide/Dv/index.html