

魚眼 CCD による夜間天候モニタリングシステム

中村 凌¹, 齊藤 保典², 富田 孝幸², 山崎 勝也³

¹信州大学工学部情報工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

²信州大学学術研究院(工学系) (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

³東京大学地震研究所 高エネルギー素粒子地球物理学研究センター (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

Night sky weather monitoring system using Fish-eye CCD

Ryo NAKAMURA¹, Yasunori SAITO², Takayuki TOMIDA² and Katsuya YAMAZAKI³

¹Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553, Nagano, Japan

²Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553, Nagano, Japan

³Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 1-1-1 Bunkyo-ku 113-0032, Tokyo, Japan

Telescope Array (TA) is international joint experiment observing ultra-high energy cosmic rays. TA employs fluorescence detection technique to observe cosmic rays. In this technique, the existence of cloud significantly affects quality of data. Therefore, cloud monitoring provides important information.

We are developing two methods for evaluating night sky weather with pictures taken by charge-coupled device (CCD) camera. One is evaluating the amount of cloud with pixels brightness. The other is counting the number of stars with contour detection technique. The results of these methods show clear inverse correlation, and we concluded both the analyses are reasonable methods for weather monitoring.

We discuss reliability of the star counting method. In order to verify the reliability, we compared the result with man counting number of stars. We found reasonable correlation between these two numbers. It shows usability of this method for night sky weather monitoring.

Key Words: Fish-eye, CCD camera, Weather monitoring, IR camera, Contour detection

1. はじめに

極高エネルギー宇宙線の起源,化学組成,宇宙空間での伝搬機構を解明することは宇宙高エネルギー現象を理解する上で非常に重要である.国際共同実験テレスコープアレイ (Telescope Array: TA)はこれらの解明と理解を目的として 2008 年から稼働している.TA 実験では大気蛍光望遠鏡と呼ばれる大型望遠鏡を使用して宇宙線による大気分子の蛍光発光を観測しているがこの観測手法では観測範囲内に雲があると雲による散乱,遮蔽によって観測に大きな影響を与えてしまうため天候観測が重要となってくる.本稿では現在 TA 実験で運用されている魚眼 CCD カメラを用いた夜間天候モニタリングシステムと新たに開発したデータ解析手法について述べる.

2. TA 実験

TA 実験はアメリカ合衆国ユタ州で 507 台の地表粒子検出機 (Surface Detector : SD)と 3 箇所 (Black Rock Mesa:BRM, Long Ridge:LR, Middle Drum:MD)に配置された合計 38 台の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector : FD)を使用して 2008 年

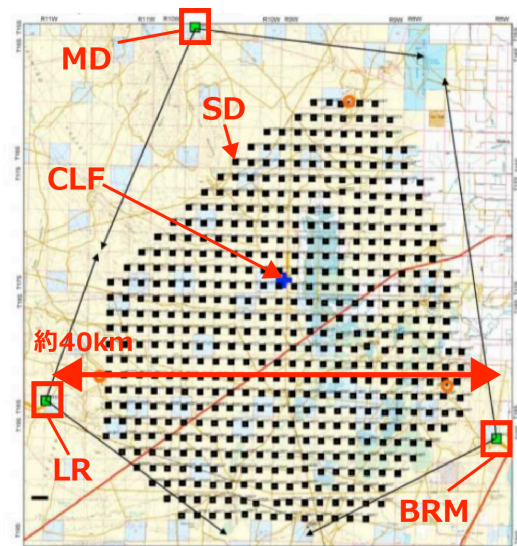


Fig.1 TA site detector map

から観測を継続している.設置場所は北緯 39 度,西経 113 度,平均標高 1400m の砂漠地帯である.Fig.1 に実験サイトの全体図を示す.

2.1 大気蛍光望遠鏡 (FD)

Fig.2 に FD ステーションの外観を示す⁽²⁾.FD は宇宙線二次粒子と大気分子との相互作用により



Fig.2 A FD appearance

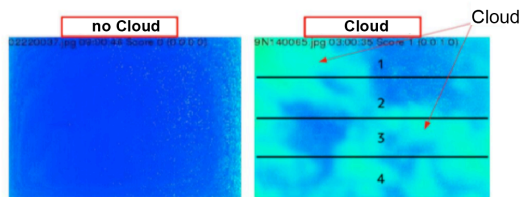


Fig.3 Images captured by IR camera

生じる蛍光光を1台あたり18枚の六角形の鏡で構成された球面鏡で集光し、光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)カメラで撮像する検出器である.FDのPMTカメラは16×16に並べた256本のPMTで構成されている.大気蛍光の発光スペクトルである波長300~400nmだけを通すようにするためPMTの光電面上にはBG3フィルタが取り付けられている.

2.2 赤外線(Infrared: IR)カメラ

蛍光発光点とFDの間に雲が存在する場合、雲は遮蔽物となりFDまで蛍光光が到達しないことや雲による散乱によって取得したデータにノイズが入ってしまうことがある.そのためIRカメラでFDの視野方向を撮影し、雲をモニタリングしている.カメラを自動で動かしながらFD1台の視野方向につき1枚、加えて天頂方向、水平方向の合計14枚撮像している.Fig.3に示すように雲がある場合は温度が高く見え、雲がない場合は温度が低く見える.TA実験に限らず雲の有無判定にはIRカメラが使用されることが多い.

しかしIRカメラは1台数百万円程度と非常に高価なので容易に設置できないこと、TA実験の運用方法では雨天時には回収する必要があるため完全自動運転が難しいこと、撮影はIRカメラを動かしながら行うため撮影時に故障が発生しやすいことなどTA実験において運用するにあたって欠点がある.そこでそのような欠点を回避できる新たなデバイスとして安価で耐久性のあるCCD



Fig.4 A CCD appearance

カメラを導入し、夜間天候モニタリングシステムとして運用することが期待されている.

3. CCD カメラ

IRカメラは高い精度で雲をモニタリングできるがTA実験では長期運用が難しいという結論になった.現在は実験の観測者が1時間毎にWEAT codeと呼ばれる人間の目を用いた手法で天候を判断している.そこで機械的に一様な基準かつ高頻度で天候を判定できるシステムを開発し観測時の指標の1つとすることで観測者の補助及びTA実験のデータ解析に使用する天候データの収集が夜間天候モニタリングシステム開発の目的である.

TA実験では2箇所のFDステーション(BRM,LR)に2010年8月からそれぞれ1台ずつ、TAサイト中央に位置するレーザー施設(CLF)に2011年12月から1台の合計3箇所の施設にCCDカメラが設置されている.Fig.4にCCDカメラの外観を示す.CCDカメラはWatec製WAT120N+,魚眼レンズはFUJINON製FE185C057HA-1を使用している.次にデバイスの規格について示す.

- 価格 : 本体6万円、レンズ23万円
- 画角 : 水平185度×垂直154度
- 撮影頻度 : 1分に1枚、8秒間露光
- 画像規格 : 縦720×横480ピクセル
- 画像容量 : 1枚あたり約350KB

カメラ本体とレンズはカバーを取り付けて雨風砂から防護されている.CCDカメラの故障によって撮影できなかった時期はほとんどないが記憶媒体の容量不足などによって現在までの稼働率は約90%となっている.このシステムの利点としてIRカメラよりも安価であること、魚眼レンズによって全方位視野を有すること、天候による影響が少なく耐久性が高いことが挙げられる.

4. データ解析

夜間天候モニタリングシステムはCCDカメラで撮影された画像を解析することで天候を判断する.天候判断には雲量と星の数の2種類の指標をそれぞれ用いた.Fig.5にCCDカメラで撮影された画像例を示す.

4.1 雲量スコア

雲量スコアは撮影された画像を9個の領域に分割し、その領域内でのピクセルの明るさを数値化したものである.雲があれば空は暗くなるので各領域の明るさから領域毎に天候を判断する手法である.Fig.6に雲量スコアの例を示す.領域の境界線は白線で表し、各領域内の雲量スコアを10点満点、中心部分のみは20点満点の合計100点満点としてスコア値が高いほど雲量が多いことを表す.

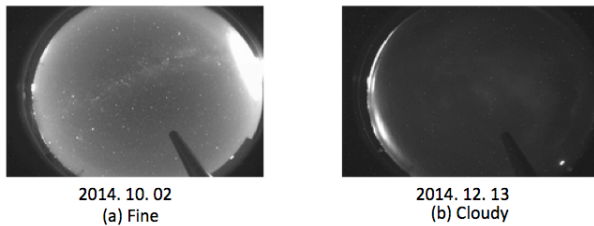


Fig.5 Night sky images captured by CCD camera

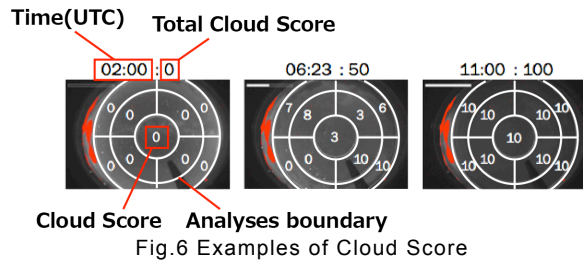


Fig.6 Examples of Cloud Score

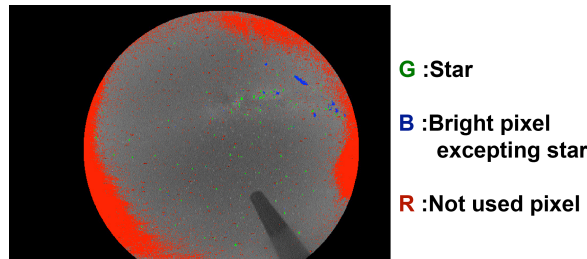


Fig.7 An example of star count analyses result

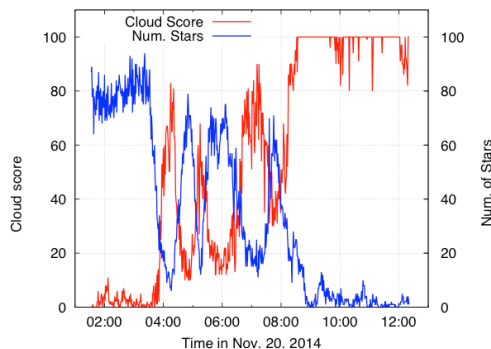


Fig.8 Comparison between Cloud Score and the number of stars

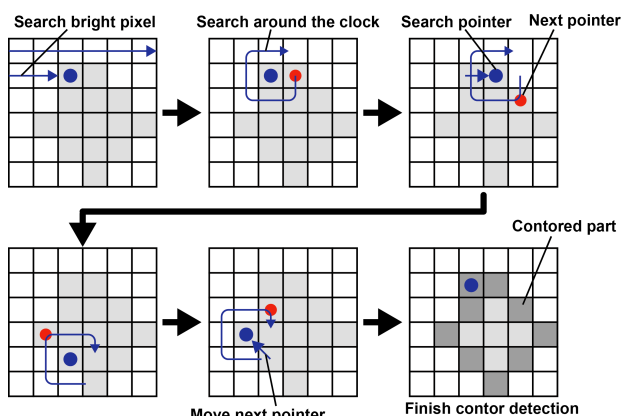


Fig.9 Procedure of contour detection

4.2 星カウント

星カウントは画像上の星を認識し数える手法である.画像中には街灯りや壊れて使えないピクセルがあり,間違えて星と認識する可能性があるため,事前に除去した.星の判定には輪郭検知法(5章参照)を用い,星は緑,星以外の明るいピクセルは青,街明かりが入るピクセル及び壊れて使えないピクセルは赤で塗りつぶした.Fig.7 に星カウントの例を示す.

4.3 両者の比較

雲量スコア,星カウントそれぞれの解析を 1 年分のデータに対して行った.曇りの日では雲量スコアが高く星の数が少ない,晴れの日では雲量スコアが低く星の数が多という逆相関が確認された.Fig.8 に例としてある一日の雲量スコアと星カウントとの比較を行なった結果を示す.このことから雲量を判定することと星の数をカウントすることは同等の天候判断指標であることがわかる.またそれぞれの解析手法の有用性が確認された.

5. 星の同定方法

画像中の明るいピクセル集団の輪郭を検知し,輪郭内と輪郭すべてのピクセルを1つの星と認識させる輪郭追跡アルゴリズムを用いて星の同定を行った.具体的な手順を Fig.9 に示す.

画像データを左上から右下まで順番に走査し,最初に検知した閾値を超える明るいピクセルを輪郭の追跡開始点とする.その点から時計回りに閾値を超える明るい点を走査し次の追跡点を決める.追跡点が最初の開始点に戻ったら輪郭追跡を終了し,1 つの星として認識する.図 9 中の青矢印は走査の方向,青丸は現在の追跡点,赤丸は次の追跡点を表す.

6. 目視との比較

解析ソフトで解析された星が本当に星であるか確かめる手法として目視との星カウントの比較を行った.ただし,実際に夜空を見て星をカウントすることは難しいため,CCD で撮影した画像内の星を目視でカウントすることを疑似 WEAT code とする.また,簡単のため領域を天頂方向に狭めてカウントを行った.目視でのカウントは開発者である筆者,解析ソフトについて少し理解のある同研究グループメンバー,解析ソフトについて全く知らない別研究メンバーの 3 人が行った.

解析ソフトは筆者がある 1 日のデータを使って目視カウントと相関が良くなるように明るさと星の輪郭ピクセル(クラスター)数の閾値を決めた.また,これに使用したデータは様々な星の数でのカウントを想定して一日の中で晴れと曇りがあるような日を使用した.Fig.10(a)にある 1 日のデー

タに対しての解析ソフトと目視カウントの結果を示す。

チューニングに使用したデータとは別のデータに対して前述の3人がそれぞれカウントを行った結果を Fig.10(b)~(d)に示す。これはカウントを行う人による個人差が傾向の違いとして表れている。特に Fig.10(d)はカウントを行った人が明るい星のみをカウントし、暗い星を見落としていることが見てとれる。

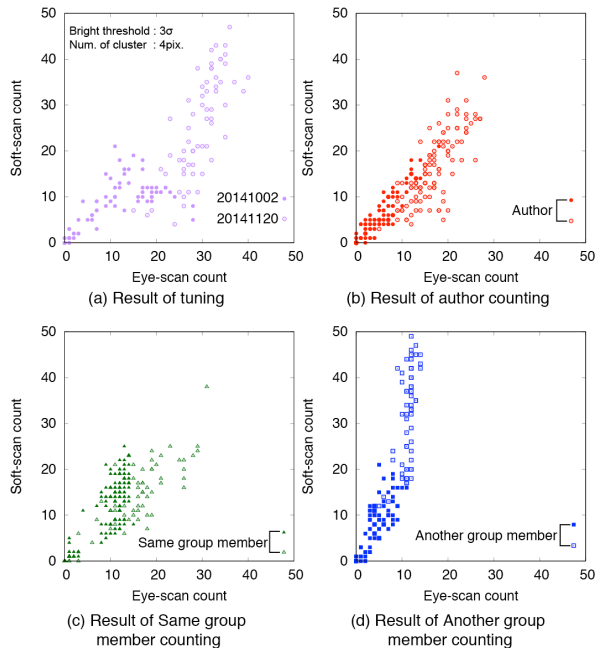


Fig.10 Result of counting stars

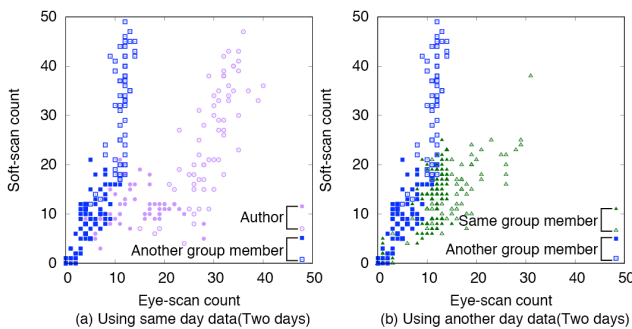


Fig.11 Difference of same day and another day

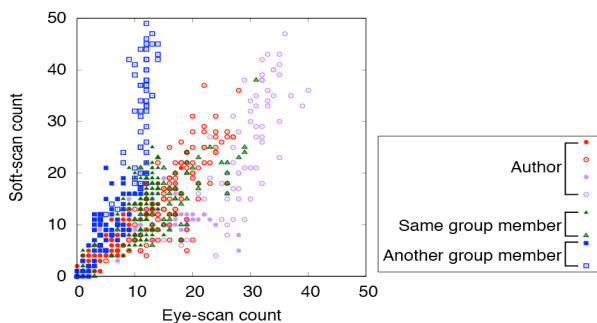


Fig.12 Result of all data

次に2日分の同一データに対して2人がそれぞれにカウントを行い、その結果を重ね合わせたものを Fig.11(a), 2日分の異なるデータに対して筆者以外の2人がカウントを行いその結果を重ね合わせたものを Fig.11(b)に示す。Fig.11(a)ではいずれかの値が 10 を超える場合にはカウント数に違いが出るが、いずれかの値が 10 以下になる様な場合には良い相関を示した。また、Fig.11(b)において異なる日のデータでの比較においてもいずれかの値が 10 以下になる様な場合にはカウント数は良い相関を示した。星の数が少ないということはそのときの天候は曇りなので曇りの日の判定はよく行えているということがわかる。

Fig.12 は全てのカウント結果を重ね合わせたものである。全体的に幅は広いが正の相関を取れている。以上のことから擬似 WEAT code に対して一定の相関を得られ、作成した解析ソフトでは星判定が可能であることを示した。

7. 議論

夜間天候モニタリングシステムとして魚眼 CCD を使用した天候解析ソフトを作成した。人間の目による判定との比較を行った結果、解析ソフトでも星判定が可能であることを示した。Fig.10 から分かるように目視によるカウントは個人差がある。一方で解析ソフトでは一様な基準でカウントをしているためこの様な個人差を排除できる。また、Fig.11 でのいずれかの値が 10 を超える場合にはカウント数に違いが出るという結果については、今回使用した目視によるカウント、解析ソフトによるカウントはどちらも真値ではないため解析ソフトが正しく動作していないという結論にはならない。よって今後は天体カタログ結果との比較による星検知の確からしさの確認や、レーザーなどを用いた天候判断との比較を行うことで解析ソフトの確実性をより確かなもの にしたい。

天候モニタリングは TA 実験に限らず宇宙開発などの他の領域においても重要な役割を担う¹³。本研究で開発を進める CCD による天候モニタリングシステムは、費用、耐久性、運用面から見て様々な場所での導入が容易であり、夜間の天候モニタリングを低コストで実現可能なシステムである。今後は、他領域での応用を想定して機能の充実を図る。

参考文献

- 1) T.Abu-Zayyad et. al, "The surface detector array of the Telescope Array experiment", 2012
- 2) H.Tokuno et. al, "New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment", 2012
- 3) "Optical Link Study Group (OLSG) Final Report (IOAG.T.OLSG.2012.V1)", 2012