

修 士 学 位 論 文

ASTE サイトにおける
赤外線雲モニタの開発

2007 年度
(平成 19 年度)

茨城大学大学院 理工学研究科

自然機能科学専攻

06NM219S

木村 渉

論文要旨

今日の天文学において、サブミリ波領域での観測は、可視光などでは見えなかった低温領域を観測することができ、星や銀河の形成過程などを知る上で非常に重要な意義を持っている。しかし、サブミリ波は大気中の水蒸気などによって吸収されるため、地上に届きにくい。よってサブミリ波の地上観測は、そのような大気による吸収が比較的少ない「大気の窓」と呼ばれる限られた波長帯でしか行うことができない。また、干渉計による観測においては、水蒸気などによる屈折の影響で位相の遅延が起ってしまうため、それを補正する技術(位相補償)が必要となる。近年ではこのような厳しい条件をクリアして観測を行うために、世界中で大型望遠鏡の建設や、干渉計・位相補償技術の開発、観測に適した場所の調査などが進められ、サブミリ波の地上観測が活発に行われるようになってきている。日本も野辺山に代表されるような電波観測の先端技術を多く開発しており、観測に適した場所であるチリの Pampa la Bola にサブミリ波望遠鏡「ASTE」、
「NANTEN2」を所有し、現在世界各国が共同で建設を進めている大型ミリ波・サブミリ波干渉計「ALMA」のプロジェクトにも参加している。

本論文は、上記のような水蒸気の影響をモニターするため、ASTE サイト環境調査モニタとして新たに開発した赤外線雲モニタについてまとめたものである。観測において、その時々
の天候状況に応じた観測スケジューリングを行い、適切に観測機器を運用していくことは現実問題として非常に重要である。ASTE のようにリモートでの観測を行う場合、サイトの天候状況などを詳しく知る必要がある。ASTE にも様々な環境モニタが配備されているが、雲をモニターする装置はなく、特に天候状況が肉眼や可視光カメラでは確認しにくい夜間には、雲の様子を知ることができなかった。昼夜問わず赤外線ですべて安定的に雲をモニターできる装置は非常に有用である。そこで今回この赤外線雲モニタを開発し、ASTE サイトでの設置・立ち上げを行った。この雲モニタは 2007 年夏までに茨城大学にて組み立て・動作試験を行ったのち、11 月に ASTE サイトに設置し、現在 ASTE の観測サポート用環境モニタとして運用している。

この赤外線雲モニタは、TAO 計画のサイト調査に使用された雲モニタを元に開発したもので、赤外線カメラにより $8\text{--}12\mu\text{m}$ の雲の熱放射をモニターする装置である。光学系にはカセグレン式の全天鏡を用い、一度のデータ取得(1 分程度)で天頂角 $0\text{--}70^\circ$ の全天マップが取得可能である。また、5 分に一度の自動データ取得により、雲の量・分布の時間変動をトレースし、リアルタイムでサイトの天候状況を知ることができる。さらに、データ取得の際に簡易解析を実行し、大気の放射率をその都度求める機能も備えている。これによって、雲の量を定量的に評価することができる。解析では、実験から求められたキャリブレーションカーブと、雲モニタに搭載された黒体温度標準のデータを用いて画像の輝度スケールを校正し、放射率を導出する。

今回特に ASTE 観測のための環境モニタとして動作させるにあたり、以下に示すよう二つの機能を新たに追加した。

(1) データ取得時に簡易解析を実行し、得られた画像と全天を 12 に区分した各天域毎の、雲の放射率及びその標準偏差をウェブサーバにアップロードする。これにより、ASTE の観測者が天候状態をリアルタイムで定量的に評価・モニタできる。さらに、曇っている方角がわかるので、ALMA などのダイナミック・スケジューリングでの活用へと発展させることも期待できる。

(2) 放射強度標準として、周辺温度の黒体に加え、新たにヒーター付きの hot load を搭載し、二温度標準による解析が可能となった。これにより雲放射率の定量化をより高精度に行うことが可能になると考えられる。

また本論文では、チリサイトで稼働開始後 9 日間のデータを用いて様々な手法で解析を行い、その結果を 220GHz τ モニターのデータと比較しつつ精度評価を行った。その結果、雲モニタで測定された赤外線における光学的厚み (τ) と 220GHz の τ との相関が見出され、雲をある程度定量的にモニターできることが示された。また、解析に適用するキャリブレーションカーブを適切に設定することで、より解析の精度を上げられる可能性も示した。今後はデータの蓄積とともに、気象データやミリ波水蒸気モニタ・衛星雲画像データなどとのより詳細な比較を行うことで、位相補償等への活用も期待されると考えられる。

目次

第1章	イントロダクション	3
1.1	サブミリ波天文学	3
1.2	ASTE 概要	4
1.3	雲モニタ概要	4
第2章	装置	6
2.1	ハードウェア概要	6
2.1.1	光学系	6
2.1.2	赤外線カメラ	7
2.1.3	黒体温度標準	8
2.1.4	温度計	9
2.1.5	制御 PC	9
2.2	ソフト概要	10
2.2.1	データ取得	10
2.2.2	簡易解析	11
2.2.3	モニター用ファイル作成	11
第3章	データ概要	12
3.1	データフォーマット	12
3.2	モニター用データ	14
3.2.1	モニターデータのアップロード	14
3.2.2	モニター画面	15
3.3	データバックアップ	16
3.3.1	雲モニタ制御 PC のデータ貯蔵	17
3.3.2	ASTE 計算機、NAS へのバックアップ	17
第4章	データ解析	19
4.1	生データ処理	19
4.1.1	誤差領域カット	19
4.1.2	各 <i>BR</i> 設定のデータの輝度スケーリング	21
4.1.3	画像つなぎ合わせ	22
4.2	キャリブレーションカーブの測定	23
4.3	一温度標準を用いた解析	28
4.3.1	解析手順	28
4.3.2	キャリブレーションカーブの補正	31
4.4	二温度標準を用いた解析	33

第 5 章	結果と考察	35
5.1	各手法による解析結果の比較	35
5.1.1	一温度解析	35
5.1.2	220GHz τ モニターデータとの比較	36
5.1.3	二温度解析	39
5.2	キャリブレーションカーブによる結果の違い	40
5.3	T_{sky} の考慮	41
第 6 章	まとめ	43
付 録 A	雲モニタコマンド各種	45
A.1	カメラ制御	45
A.2	温度計制御	45
A.3	ステータス管理	45
A.4	画像処理ソフト	47
A.5	基本スクリプト	48

第1章 イントロダクション

1.1 サブミリ波天文学

今日の電波天文学において、観測の占める割合は非常に大きく、観測によって明らかになることは多い。そんな中、サブミリ波 (周波数 300GHz 以上の電波) 領域での観測は、可視光などでは見えなかった低温領域を観測することができ、星や銀河の形成過程などを知る上で非常に重要な意義を持っている。しかし、サブミリ波は大気中の水蒸気などによって吸収されるため、地上に届きにくい。よってサブミリ波の地上観測は、そのような大気による吸収が比較的少ない「大気の窓」と呼ばれる限られた波長帯でしか行うことができない。また、干渉計による観測においては、水蒸気などによる屈折の影響で位相の遅延が起こってしまうため、それを補正する技術 (位相補償) が必要となる。

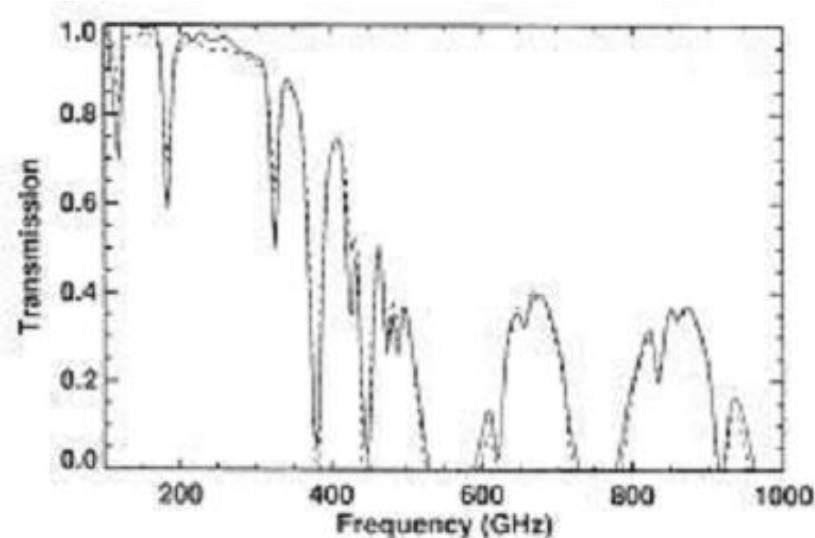


図 1.1: サブミリ波の大気透過率 (参考文献 [1])

図 1.1 は FTS¹で測定されたチリ北部アタカマ砂漠の標高 4800m に位置する Pampa la Bola の大気透過率を示すグラフである。この地方は、高地で乾燥しているため大気透過率が高く、「宇宙にもっとも近い場所」と呼ばれるほど観測に適した場所であるとされている。サブミリ波領域では、このような場所に来てようやく透過率 40% 程度の大気の窓がいくつか見られる程度であることが、図 1.1 から見て取れる。このように、サブミリ波観測はミリ波以上に厳しい条件下でのみ可能となっていることがわかる。近年ではこのような厳しい条件をクリアして観測を行うために、世界中で大型望遠鏡の建設や、干渉計・位相補償技術の開発、観測に適した場所の調査など

¹Fourier Transform Spectrometer の略称で、フーリエ変換分光計のことである。図 1.1 で実線と点線は、それぞれ異なる解析手法から計算された値を示す。

が進められ、サブミリ波の地上観測が活発に行われるようになってきている。日本も野辺山に代表されるような電波観測の先端技術を多く開発しており、チリの Pampa la Bola にサブミリ波望遠鏡「ASTE」、「NANTEN2」を所有し、現在世界各国が共同で建設を進めている大型ミリ波・サブミリ波干渉計「ALMA」のプロジェクトにも参加している。

1.2 ASTE 概要

Atacama Submillimeter Telescope Experiment(ASTE) はチリの Pampa la Bola に位置する(図 1.2 参照) 口径 10m のサブミリ波望遠鏡である。



図 1.2: ASTE サイト

アンデス山中の僻地にあるため、独自に発電機と衛星通信アンテナを持ち、機器の運用に必要な電力とネットワークを供給している。衛星回線を通じて日本からの遠隔操作もある程度可能となっているが、衛星通信帯域が狭いので、観測による取得データなどをネットワークで日本に転送することはできない。データは定期的に DVD などに吸い出され、日本へ持ち帰られる。

ASTE サイトの気象・大気の状態 (気温、風向、風速、気圧、湿度、水蒸気分圧、220 GHz 帯大気透過度など) やサイトの様子画像が随時モニターできるように、様々な環境モニターが配備されている。

1.3 雲モニタ概要

本論文は上記のような水蒸気の影響をモニターするため、ASTE サイト環境調査モニタとして新たに開発した赤外線雲モニタについてまとめたものである。観測において、その時々天候状況に応じた観測スケジューリングを行い、適切に観測機器を運用していくことは現実問題として非常に重要である。ASTE のようにリモートで観測を行う場合、サイトの天候状況などを詳しく知る必要がある。上記のように ASTE にも様々な環境モニタが配備されているが、雲をモニターする装置はなく、特に天候状況が肉眼や可視光カメラでは確認しにくい夜間には、雲の様子を知ることができなかった。昼夜問わず赤外線ですべての雲をモニターできる装置は非常に有用である。そこで今回この赤外線雲モニタを開発し、ASTE サイトでの設置・立ち上げを行った。この雲モニタは 2007 年夏までに茨城大学にて組み立て・動作試験を行ったのち、11 月に ASTE サイ

トに設置し、現在 ASTE の観測サポート用環境モニタとして運用している (図 1.3)。ASTE サイトにはいくつかのコンテナがあり、発電機の排煙や ASTE 望遠鏡本体が視野に入らないことを配慮した上で、発電機横のコンテナ上に雲モニタを設置した (図 1.4 参照)。

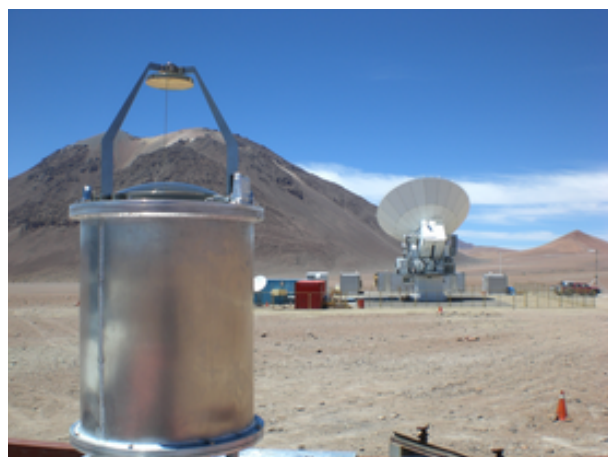


図 1.3: 雲モニタ (ASTE サイト)

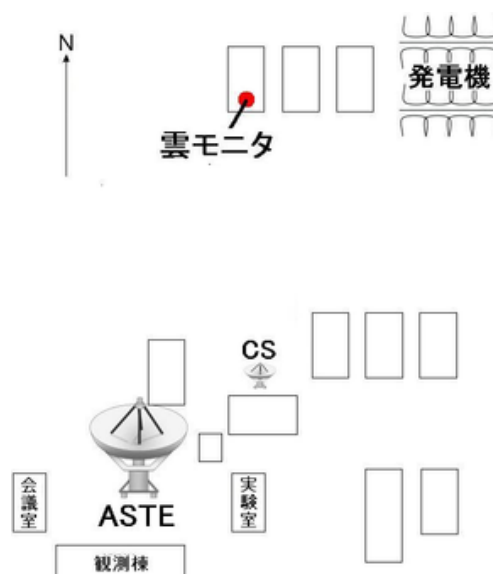


図 1.4: 雲モニタ設置場所

この赤外線雲モニタは、TAO 計画²のサイト調査に使用された雲モニタを元に開発したもので、赤外線カメラにより $8\text{--}12\mu\text{m}$ の雲の熱放射をモニタする装置である。光学系にはカセグレン式の全天鏡を用い、一度のデータ取得 (1 分程度) で天頂角 $0\text{--}70^\circ$ の全天マップが取得可能である。また、5 分に一度の自動データ取得により、雲の量・分布の時間変動をトレースし、リアルタイムでサイトの天候状況を知ることができる。

今回特に ASTE 観測のための環境モニタとして動作させるにあたり、以下に示すような二つの機能を新たに追加した。

(1) データ取得時に簡易解析を実行し、得られた画像と全天を 12 に区分した各天域毎の、雲の放射率及びその標準偏差をウェブサーバにアップロードする。これにより、ASTE の観測者が天候状態をリアルタイムでより定量的に評価・モニタできる。また、曇っている方向がわかるので、ALMA でのダイナミック・スケジューリング³への活用も期待される。

(2) 放射強度標準として、周辺温度の黒体に加え、新たにヒーター付きの hot load を搭載し、二温度標準による解析が可能となった。これにより雲放射率の定量化をより高精度に行うことが可能になると考えられる。今後はデータの蓄積とともに、気象データやミリ波水蒸気モニタ・衛星雲画像データなどとのより詳細な比較を行うことで、位相補償等への活用も期待されることが考えられる。

²The University of Tokyo Atacama Observatory の略称。東大天文センターを中心に、口径 6.5m の赤外望遠鏡をチリの標高 5600m 地点に建設しようとする計画。

³ALMA では、ある決まった順に天体を観測していくようなスケジューリングではなく、その時々天候状況に応じて、もっとも観測に適した天体を選んで観測するスケジューリング (ダイナミック・スケジューリング) が採用される予定となっている。

第2章 装置

2.1 ハードウェア概要

ここでは、雲モニタのハードウェアの詳細について記述する。装置全体の構成を図 2.1 に示した。

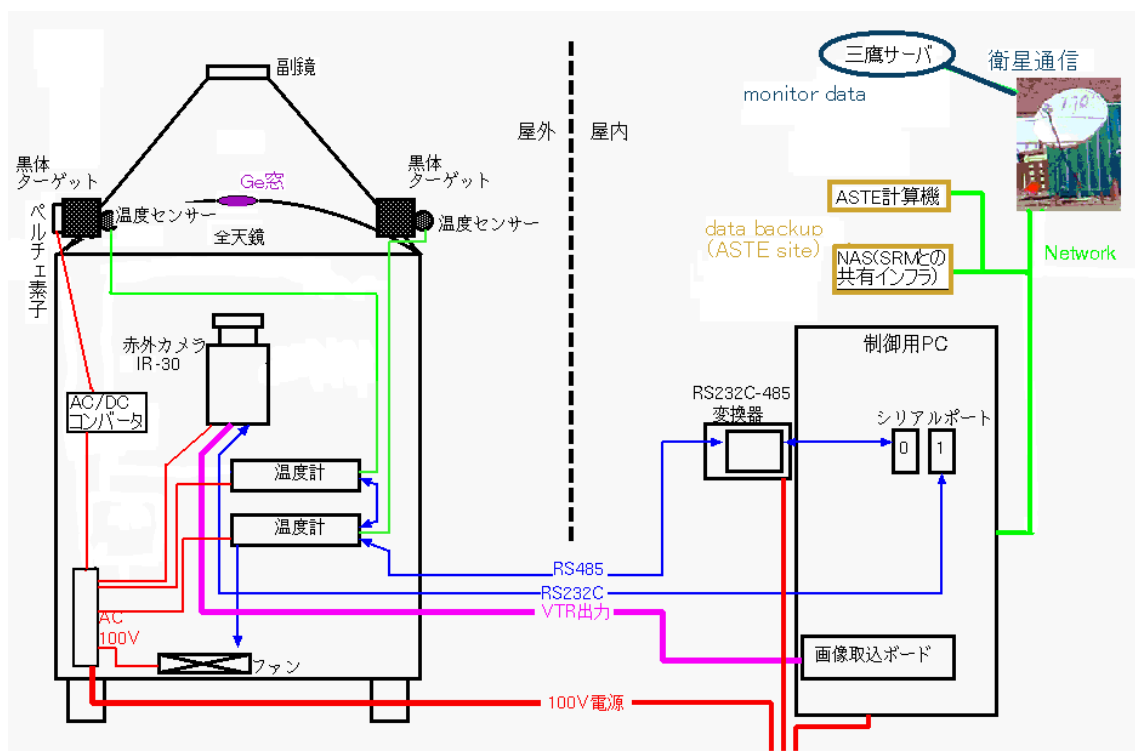


図 2.1: 装置概要

2.1.1 光学系

光学系には、主鏡と副鏡から成るカセグレンタイプの全天鏡 (国立天文台作成) を使用しており、天頂角 $0-70^{\circ}$ の天域を観測することができる (ただし、副鏡などで遮蔽されている領域は除く)。赤外で反射率が高い金でコーティングされた主鏡・副鏡は共に凸面鏡で、主鏡中央部には直径 40mm の入射窓がある (図 2.2)。窓の素材として中間赤外で透過率の高いゲルマニウム (Ge) を使用しており、その直下にカメラが搭載されている。カメラ感度波長帯 ($8-12\mu\text{m}$) における Ge 窓の透過率を、フーリエ分光器で測定した結果が図 2.3 である。 $8-12\mu\text{m}$ で平均した透過率は、 $\eta_{\text{Ge}} \approx 0.92$ となった。



図 2.2: 光学系

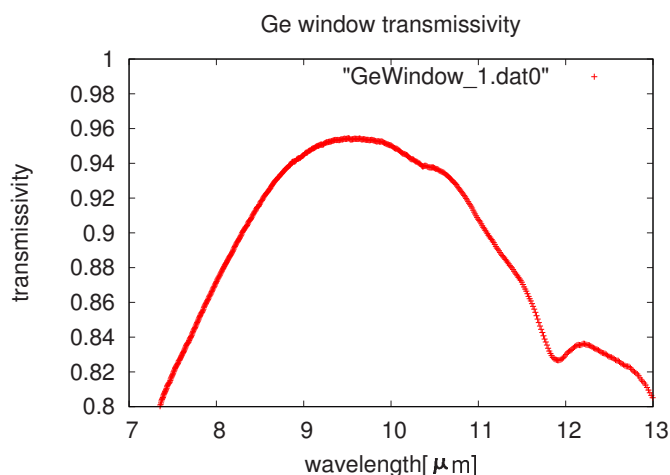


図 2.3: Ge 透過率測定結果

2.1.2 赤外線カメラ



図 2.4: 赤外線カメラ IR-30

日本アビオニクス製非冷却赤外線カメラ「IR-30」を使用した（図 2.4）。8-12 μm の波長帯に感度を持ち、マイクロボロメータ素子で検出するカメラである。内部には FPN¹除去のためのシャッターが搭載されている。また、非冷却カメラであるため、同じ条件で取得される画像でも、周辺温度によって画像全体の明るさが変わってくる（ゼロ点揺らぎ）。これを補正するために、黒体温度標準を装備した。黒体温度標準の詳細については次の小節にて記す。

出力はアナログビデオ出力で、制御 PC のビデオ取込ボードを介して画像データ (FITS 形式²) が取り込まれる。

¹Fixed Pattern Noise の略。カメラ内部の要因により生じる固定パターンノイズ。

²Flexible Image Transport System の略。ヘッダーと画像データで構成されているデータフォーマット。ヘッダー部分には観測時の状態や、画像データの形式についての情報が記されている。データフォーマット詳細は 3 章を参照。

画像取得などカメラの制御はRS232C経由で行われ、カメラのブライトネス・コントラストの調整や、FPN除去も行うことができる。ブライトネスを調整するパラメータを、本書では'BR'と記述する。BRの値は-20 - +20の41レベルで可変となっており、BRを高くすることで、より低い輝度感度での撮像が可能となる。カメラの出力データは8bit階調(256レベル)であるが、BRを変えて何度か撮像し、これをつなぎ合わせることで、8bitより広いダイナミックレンジの画像を得ることができる。

雲モニタでは、7つのBR設定($BR = -10, 0, 4, 8, 12, 16, 20$)で撮像を行うことで、実効的なダイナミックレンジは9bit以上となっている。これにより、薄い雲でも画像としてとらえることができる。

2.1.3 黒体温度標準

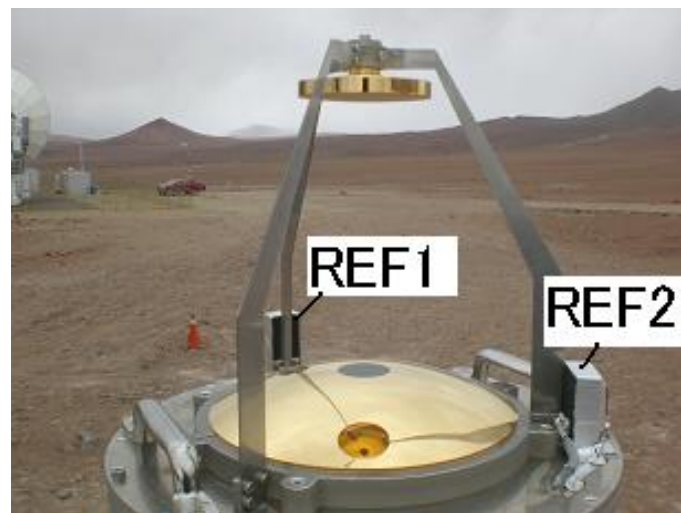


図 2.5: 黒体温度標準

解析の際に輝度の較正を行うための基準点として使用する。金属ブロックに黒体塗装したものを二つ(REF1, REF2)ミラー脇に搭載しており、その熱放射を常時モニターできる。今回新たに加えた REF2 の黒体を、ペルチェ素子(S.T.S 社製 T150-60-127)によるヒーターで常時加熱することで、二つの異なる温度の黒体を同時にモニターできるようにした。REF1 の温度は周辺温度に追随しており、二つの黒体の温度差は常に 1-2℃である。

また、温度標準の素材として適切なものの条件として、以下のことを考えた。

- 温度センサーが付いている部分と、画像に写っている部分が等温である必要があるので、黒体全体が均一の温度になりやすいような熱伝導率が高い物質。
- 黒体が外気温の影響を受けやすく細かく温度変化していると、それがノイズとなってしまう可能性があるため、それを防げるような比熱が高い物質。
- 安価で加工しやすい物質。

結果、これらの条件を満たしているアルミニウムを使用した。アルミニウムの熱伝導率³は $236[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ 、定圧モル熱容量⁴は $24.34[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$ である (参考文献 [2] 参照)。

2.1.4 温度計

解析の際用いる二つの黒体標準の温度を測定するための温度計として、OMRON 製 E5GN を二個使用した (図 2.6)。温度センサーは白金抵抗であり、 $(-199.9 - 500.0)^\circ\text{C}$ の測定が可能である。制御は RS485 経由で行う (ただし、図 2.1 のように制御 PC 前に RS232C コンバータを介す)。

また、簡単なリレー機能も持っており、ある設定温度以上 (以下) になると ON/OFF を切替えるスイッチが付属している。ここに装置内部を空冷するためのファンをつなぐことで、内部の温度が上昇した際に自動で冷却することも可能となっている。

2.1.5 制御 PC

SYSTEMWORKS 製 POWER MASTER G7222(HDD: 160GB, メモリ: 512MB) を使用した (図 2.7)。OS は Vine Linux 3.2(kernel 2.4.31) である。ビデオ取込ボードとして AOPEN 製 VA1000POWER(グラフィックチップ saa7133 を装備) を装着し、VIDEO4LINUX2 で制御して画像データを取得する。この PC は、雲モニタが設置されているコンテナ内の防塵箱の中に格納されている。



図 2.6: 温度計 E5GN



図 2.7: 制御 PC

³300K における値。

⁴273.15K における値。

2.2 ソフト概要

雲モニタ関連のコマンドは機能別にディレクトリ /home/weather/IR_MONITOR 以下に置かれている。雲モニタで必要な一連の動作

- 1、データ取得 ('GetimageW')
- ↓
- 2、簡易解析 ('ReducimageW')
- ↓
- 3、モニター用ファイル作成 ('Mkhtml')

は、ディレクトリ MONITOR/以下に置かれているコマンド'GetData'で実行される。'GetData'内で各スクリプトがコールされ、そのコールされたスクリプト内で、さらに下層レベルのコマンドをコールする (図 2.8 参照)。cron から 5 分毎にこの'GetData'が実行されることで、雲モニタの自動無人運転が可能となっている。

ここでは上記 1-3 の各過程でコールされるコマンドで、どのような処理が行われているのか説明する。各コマンド詳細については付録 A にまとめた。取得データフォーマットや、取扱いについての詳細は 3 章にて示す。

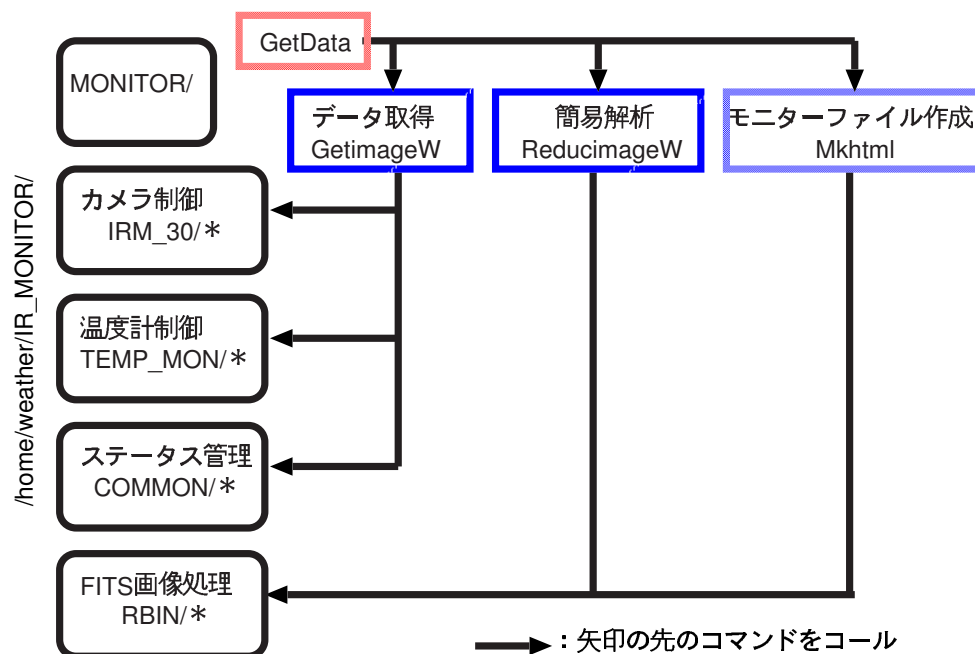


図 2.8: ソフト構成

2.2.1 データ取得

画像データや温度データを得るために、カメラと温度計を PC から制御する。また、それらの機器が正常に動作しているかどうかチェックする。データ取得の一連の操作は、コマンド'GetimageW'で実行される。それぞれの制御の動作内容は以下の通りである。

カメラ制御

雲モニタでは、*BR* 設定の変更→ノイズ除去→撮像、の順でカメラ制御を行う。この制御を *BR* を変えて繰り返し 7 回行う。

温度計制御

二つの温度計のセンサーが測る温度をそれぞれ読み取る。また、リレー機能を制御することにより、間接的にファンを制御することも可能である。

ステータス管理

カメラ・温度計との通信が正常に行われたかどうかをステータスファイルに記述する。ステータスファイルには、その他にも観測時の時刻、温度、カメラの設定など、各種パラメータが記述されており、その読み書きが可能となっている。FITS ヘッダーの一部も、このステータスファイルを元に記述される (ステータスファイルの詳細は付録 A 参照)。

2.2.2 簡易解析

得られた各 *BR* の画像データをつなぎ合わせ、簡易的に解析することで、最終的に放射率の次元の画像を生成し、雲の量を定量的に評価する。この解析の一連の操作はコマンド '*ReducimageW*' で実行される。解析手法の詳細については 4 章で述べる。

画像処理

簡易解析の過程で FITS データ処理ソフトを用い、画像データの各画素の値を読み取り、それらの値を足し合わせるなどの算術演算を行ったり、ヘッダー情報を読み書きするなどの操作を行う。

2.2.3 モニター用ファイル作成

解析後の FITS データから、モニター用の GIF 画像を生成し、各種パラメータを記述した HTML ファイルを生成する。各種パラメータは FITS ヘッダーから読み取られる。さらに、生成されたファイルをウェブサーバへアップロードすることで、ネットワーク上で閲覧可能となっている。コマンド '*Mkhtml*' で実行される。詳細は 3 章 2 節で述べる。

第3章 データ概要

3.1 データフォーマット

雲モニタで得られるデータは、天文データの標準フォーマットである FITS(Flexible Image Transport System) と呼ばれる形式の画像データになっている。FITS ファイルは ASCII テキストで書かれたヘッダーと画像データで構成されているデータフォーマットで、ヘッダー部分には一般的に画像データのフォーマットや、観測時の状態を示す情報が記述されている。雲モニタのヘッダー部分は以下のようにになっている。

```
*01: SIMPLE = T / Standard FITS format
*02: BITPIX = 8 / # of bits per pixel
*03: NAXIS = 2 / # of axis in data
*04: NAXIS1 = 220 / # of pixels/row
*05: NAXIS2 = 220 / # of rows
*06: BSCALE = 1.0 / Base-Scale
*07: BZERO = 0.0 / Base-Zero
*08: COMMENT = '----- TIME'
*09: DATE-UTC= '2007-12-01' / yyyy-mm-dd UTC
*10: UTC = '13:15:11.000' / HH:MM:SS.SSS UTC
*11: COMMENT = '----- CAMERA'
*12: EXP_COAD= 1.0 / Coadded Video Frames
*13: CAM_BRT = -10 / Camera Brightness
*14: CAM_CONT= 8 / Camera Contrast
*15: CAM_STAT= 'OK' / Camera Status
*16: COMMENT = '----- ENV'
*17: SITE = 'ASTE' / SITE
*18: TEMP_R1 = 18.500 / Temperature of Reference1(ambient)
*19: TEMP_R2 = 20.200 / Temperature of Reference2(warm)
*20: TEMP_R1S= 'OK' / TempMonitor Status Ref1
*21: TEMP_R2S= 'OK' / TempMonitor Status Ref2
*22: SHUTTER = 'OPEN' / Shutter Status
*23: FUN = 'ON' / Fun Status
*24: COMMENT = '----- FITS VERSION'
*25: FITSVER = '1.00' / FITS header VERSION
*26: END
```

*01-*05 は FITS データの骨格を記述するヘッダレコード、*26 はファイル終了を示す宣言文である。また、それ以外の行の記述内容は以下の通りである。

*01	基本 FITS の時には'T' と記述 基本 FITS に付加している他の FITS 要素 (拡張 FITS) の時には'F' と記述
*02	各画素のダイナミックレンジ
*03	画素の座標軸の本数
*04	各軸に沿った画素の数
*05	
*06	各画素の値が真の物理値と違う場合に値を変換する係数
*07	物理値 = BZERO + BSCALE × 各画素の値
*08	コメント行
*09	データ取得した年月日 (世界標準時)
*10	データ取得した時刻 (世界標準時)
*11	コメント行
*12	画像データの数
*13	カメラの輝度感度レベル <i>BR</i> の設定値
*14	カメラのコントラストレベルの設定値
*15	カメラの動作状態
*16	コメント行
*17	観測場所
*18	REF11(周辺温度) の温度
*19	REF2(加熱) の温度
*20	REF1 の温度計の動作状態
*21	REF2 の温度計の動作状態
*22	シャッターの状態 (本装置とは無関係)
*23	ファンの動作状態
*24	コメント行
*25	FITS ヘッダーのバージョン

これらのヘッダー情報は、解析 (ReducimageW) や、モニター用 HTML ファイル作成 (Mkhtml) などの際に読み込み、使用される。このヘッダー部分の後に、画像データが含まれている。雲モニターで取得される画像データの例を、図 3.1 に示した。上記のヘッダーにも見られるように、画像は 220×220 の画素からなり、各画素の値は 8bit 階調 (256 レベル) で表わされる。

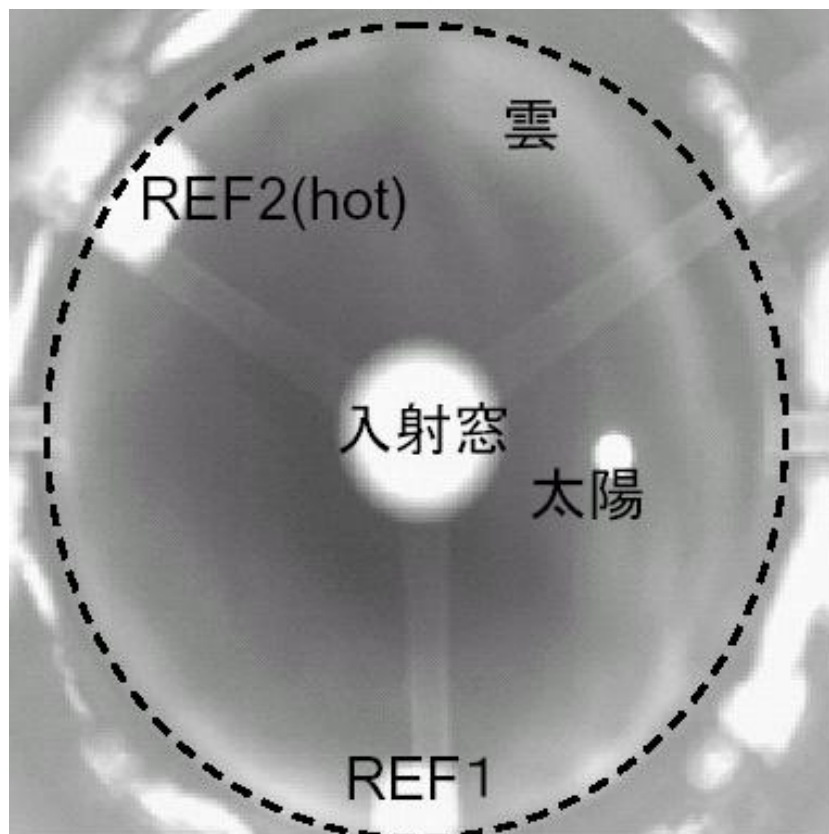


図 3.1: 画像データの例 (破線内が視野)

3.2 モニター用データ

3.2.1 モニターデータのアップロード

雲モニタのもっとも重要な機能は、ネットワーク上で観測サイトの雲の様子をリアルタイムでモニターすることである。それを実現するため、ここでは定期的に画像データをウェブサーバへとアップロードする方法を採用した。しかし、ASTE サイトから日本のウェブサーバへ転送するには、限られた容量の衛星回線を介す必要がある (図 3.3 参照)。日本からの ASTE のリモート操作 (観測時のコマンド通信など) に支障が出ないようにするため、転送データを必要最小量にとどめ、回線にかかる負荷を抑える必要があった。そこで、容量を圧縮した GIF 画像と HTML ファイルのみ (表 3.1 参照) をサーバへ転送し、転送先のサーバでそれらのファイルを元にモニター画面を構成する全てのファイルを生成することにした。転送するファイルサイズの合計は 96KB/hour 程度となっている。ASTE 側からの技術的要請として、衛星を介したデータ転送量は 180KB/hour 内に収めることが条件となっており、その範囲内に収めている。

転送場所	データ	サイズ
三鷹サーバ /home/astecm/	解析済み画像 (ICMD_年月日_時刻.R.gif)	5KB/5min
	HTML ファイル : index.html	3KB/5min

表 3.1: 転送するモニターデータ

3.2.2 モニター画面

サーバ側では「Mkgif」というコマンドがcronで毎分コールされており、転送されてきた上記ファイルをもとに、他の表示画像やHTMLファイルなど必要な全てのモニターファイルを生成する。図3.2はネットワーク上で見られる実際の雲モニタのモニター用ウェブページである。画像上では、分割された領域毎に放射率を表示し、一目で雲の量を定量的に評価できる。これは今回新たに加えた機能である。以下で図3.2中の各番号部分について説明する。

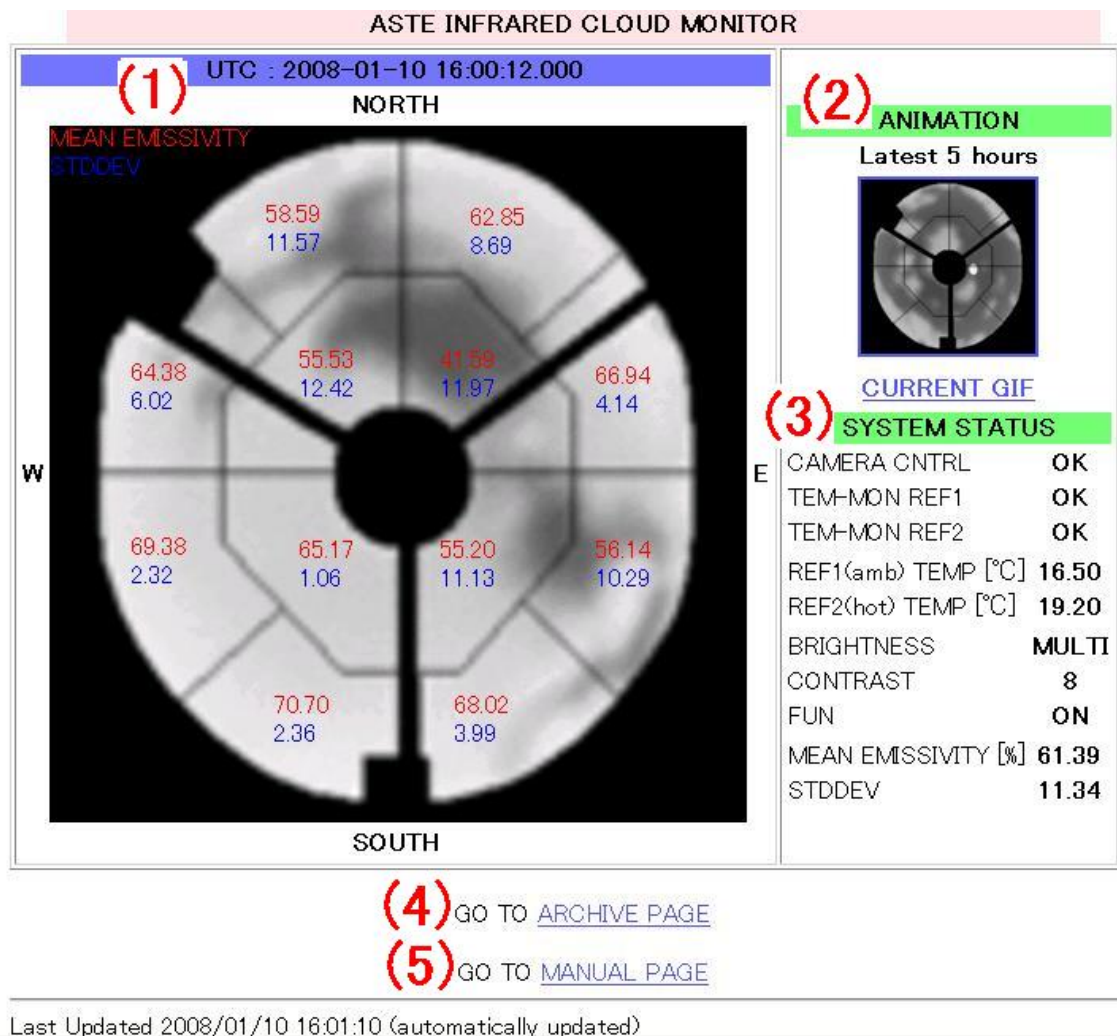


図 3.2: モニター画面

(1) 現在画像

取得された最新の画像を表示する。画像の取得時刻(世界標準時)や、画像の各方向が空のどの方向に対応しているかも表示されている。また、視野内を12領域に分割しており、各領域ごとに放射率の平均値(赤い数字)と標準偏差(青い数字)が表示されている。

(2) アニメーション

過去5時間に得られた画像をつなぎ合わせて生成されたアニメーション画像を表示している。雲の量・分布の時間変動を知ることができる。

(3) 各種状態パラメータ

観測時の状態を表示している。各パラメータの意味は以下のようになっている。

CAMERA CNTRL	カメラの動作状態
TEM-MON REF1	REF1(周辺温度) の温度計の動作状態
TEM-MON REF2	REF2(加熱) の温度計の動作状態
REF1(amb) TEMP	REF1 の温度
REF2(hot) TEMP	REF2 の温度
BRIGHTNESS	カメラの輝度感度レベル BR の設定値
CONTRAST	カメラのコントラストレベルの設定値 (1 – 10)
FUN	ファンの動作状態
MEAN EMISSIVITY	視野内全体で平均した放射率
STDDEV	視野内全体の放射率の標準偏差

(4) アーカイブデータ

過去数日の画像データ (GIF) が保存されているページへのリンクである。過去一ヶ月間の画像データをここに貯蔵する。

(5) マニュアル

雲モニタの簡易的なマニュアルと、各機器のマニュアルが置かれているページへのリンクである。

3.3 データバックアップ

サイト環境の定量的調査のため、より詳細な解析を行う必要がある。そのため上記のようなモニター用データとは別に、生データも全て保存され、定期的に日本に持ち帰られる (図 3.3 参照)。

雲モニタのデータは、雲モニタ制御 PC、ASTE 計算機、NAS¹の三ヶ所に常時保存されている。いくつかバックアップを取っておくことで、どこかでデータを失うなどのトラブルに備えた構成になっている。

¹Network Attached Storage の略。ネットワークに直接接続して使用するファイルサーバ専用機。今回使用した NAS は、ロジテック製 LHD-LAN320GE。

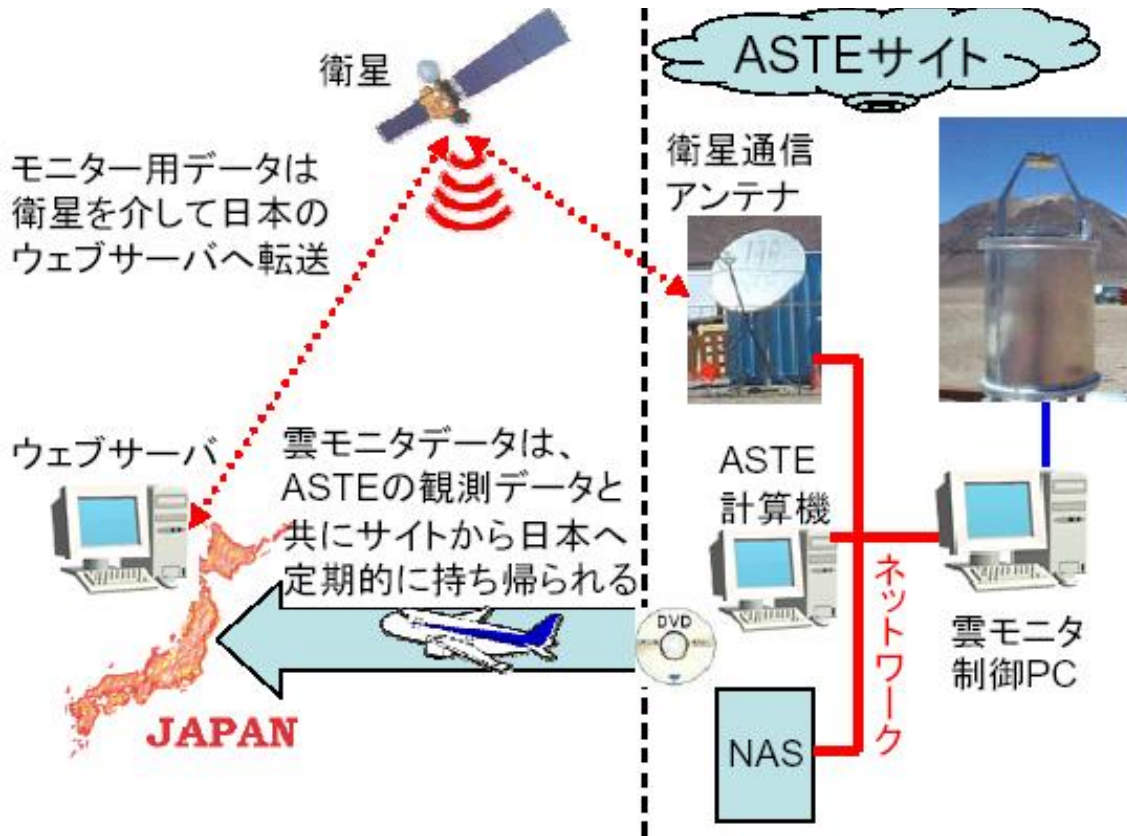


図 3.3: データ取得・貯蔵・運搬の流れ

3.3.1 雲モニタ制御 PC のデータ貯蔵

雲モニタの制御 PC には、7つの *BR* 設定で得られた生データと、それを簡易解析したデータが保存されていく。一つの FITS データがおよそ 52KB 程度である。また、一度のデータ取得で、生データ+解析データの合計 8つの FITS データが得られる。このデータ取得が5分に一度行われるので

$52[\text{KB}/\text{fits}] \times 8[\text{fits}] \times 12[\text{getdata}/\text{hour}] \times 24[\text{hour}] \div 120\text{MB}/\text{day}$
 の割合でデータが蓄積されていく (表 3.2 参照)。

3.3.2 ASTE 計算機、NAS へのバックアップ

一日分のデータを圧縮し、毎日 UT12時にコマンド'Autobackup'を cronでコールすることで転送される。保存されるデータの種類・サイズは、表 3.2に示した通りである。NASの容量は320GBなので、長期にわたりバックアップデータを貯蓄しておくことができる。一方、ASTE 計算機へ転送されたデータは、他の ASTE 観測データとともに、およそ一ヶ月に一度程度のペースで DVD などに吸い出し、物理的に日本へ持ち帰られる。こうして持ち帰られたデータを用いて、日本でより詳細なデータ解析を行うことができる。

バックアップ場所	データ	サイズ MB/day
雲モニタ PC /data/fts/年月日/ /data/log/年月日/	生データ (FITS $\times$ 7) ICMD_年月日_時刻_BR.fits	105
	解析データ (FITS) ICMD_年月日_時刻.R.fits	15
ASTE 計算機 /home2/cosmos3/aste/nro/cm/	生データ nama_年月日.afz	35
NAS /icmdata/	生データ+解析データ 年月日.afz	40

表 3.2: バックアップデータの種類・容量

(例)

2007 年 6 月 18 日 9 時 25 分に $BR = 8$ で取得された生データ名

/data/fts/20070618/ICMD_20070618_0925_008.fits

同時刻に得られた解析データ名

/data/log/20070618/ICMD_20070618_0925.R.fits

第4章 データ解析

雲モニタの生データは、7つのブライトネス設定で得られた FITS データである。これら 7 枚の FITS 画像の解析方法について説明する。

4.1 生データ処理

まずは、各 BR 設定で得られたデータのつなぎ合わせについて記す。

4.1.1 誤差領域カット

一度の撮像で取得される画像データのダイナミックレンジは 8 ビットであり、この一枚の画像データだけでは限定された雲しかとらえることができない。そこで、以下に示した例 (図 4.1) のように、カメラの BR 設定を変えて数枚の画像を取得し、それらを相互につなぎ合わせることで、より広いダイナミックレンジをカバーする。この図の例では、 $BR = 16$ 以上では輝度感度に対して空の放射が強いため、画像が真っ白になっているのがわかる。

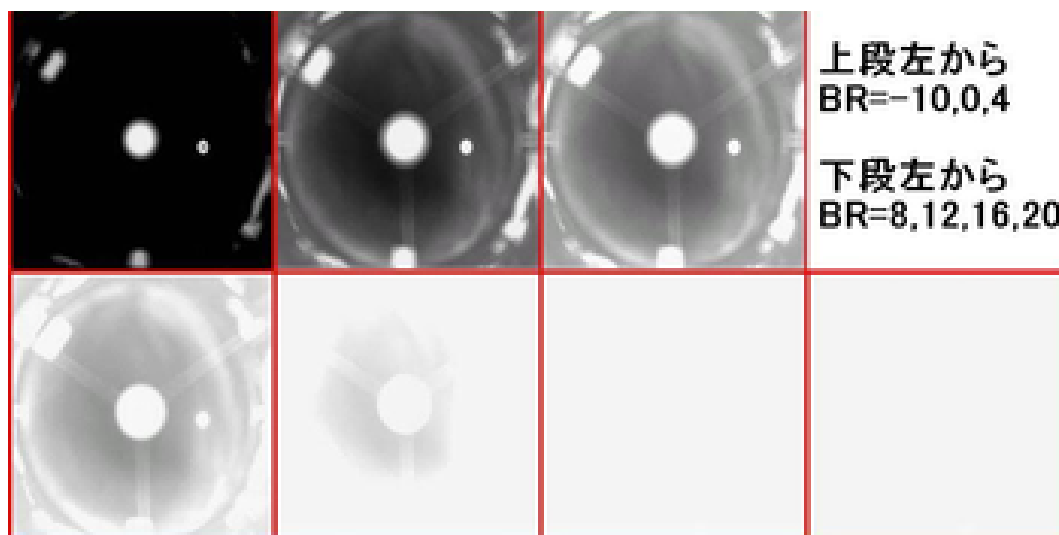


図 4.1: 各 BR 設定で得られる画像の例 (2007 年 12 月 02 日 13:25)

各 BR 設定で得られた取得画像データは 8bit 階調なので、各画素の値は 0-255 で表わされる。そのため、その範囲外 (0 以下または 255 以上) の値を持つ領域があっても、それらは 0 または 255 の値として扱われてしまう。誤差の範囲を考えると、この 0 や 255 のような「端」付近のデータは信用できないので、そのような値を持つ画素のデータは使用しない (図 4.2)。具体的には、値が

10 以下と 230 以上の箇所は 0、それ以外の箇所は 1 というマスク (図 4.3) を作成し、このマスクを生データにかけることで端付近の値を持つ画素データをカットする (図 4.4)。

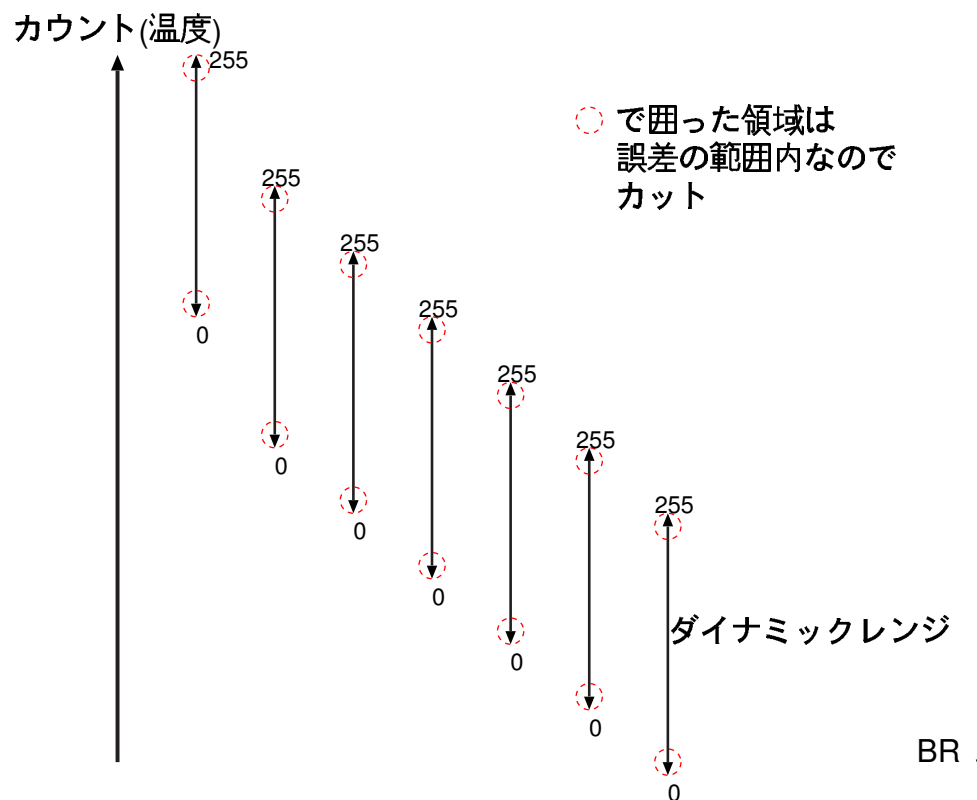


図 4.2: 誤差領域の切捨て



図 4.3: 10 以下 230 以上=0(黒部分) のマスク (BR= 8)

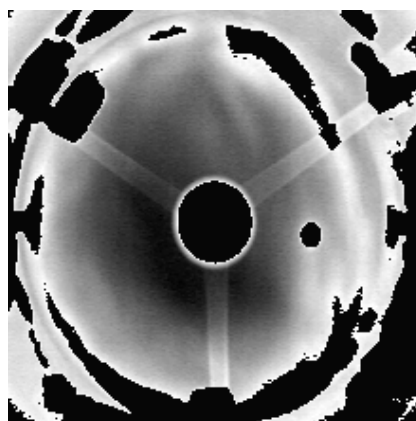


図 4.4: 生データ×マスク (BR= 8)

4.1.2 各 BR 設定のデータの輝度スケーリング

次に、上記のように誤差領域をカットした各 BR での取得データをつなぎ合わせる。そこでまずは、各 BR 設定で得られた値を、統一された輝度スケール上での数値データに換算する必要がある。そのために、ここでは ' $offBR$ ' というパラメータを導入する。この $offBR$ は、 BR を 1 上げると、各画素の値はいくら上がるかを意味するパラメータである (図 4.5)。 BR と BR' で同じものを撮像したとき、それぞれ $V(BR), V(BR')$ の値であったとすると、

$$offBR = \frac{V(BR) - V(BR')}{BR - BR'} \quad (4.1)$$

が成り立っている。この $offBR$ の導出は、雲モニタで取得された各 BR のデータを用いて行った (図 4.5)。ここでは例として、 $BR = 0, 4, 8, 12$ で、それぞれ $V_{00}, V_{04}, V_{08}, V_{12}$ の出力値を持つ画素を考える。

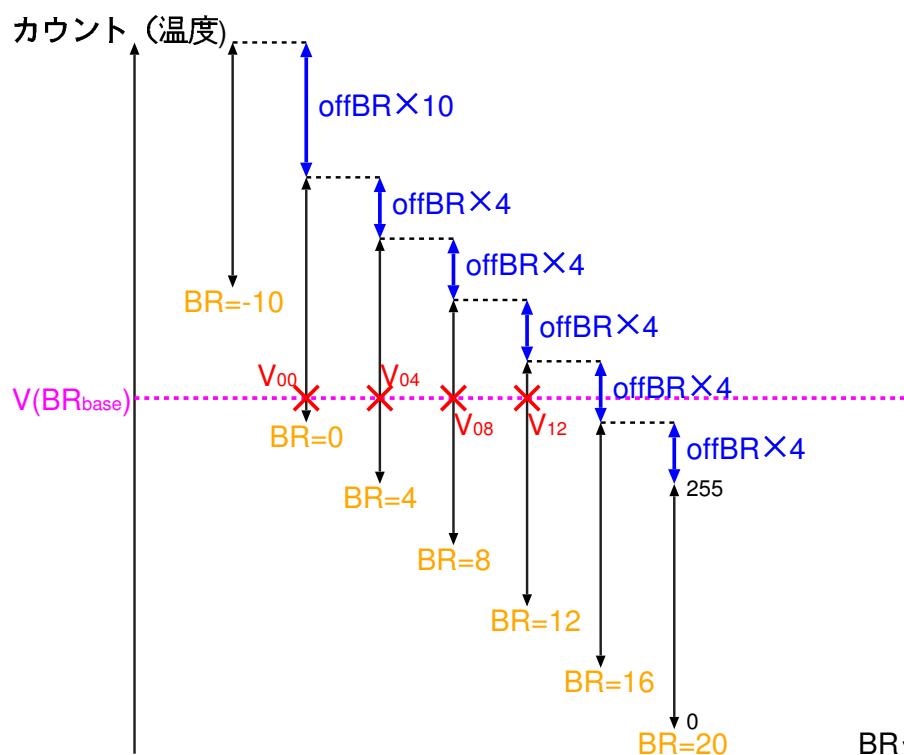


図 4.5: $offBR$ の意味

雲モニタの各 BR データは、連続的に (数秒間隔で) 取られた画像なので、各画像で空の様子 (雲量・分布・温度など) はほぼ変わらず、同じものを撮像したと考えられる。よって今の場合、式 (4.1) より

$$offBR = \frac{V_{12} - V_{08}}{12 - 8} = \frac{V_{08} - V_{04}}{8 - 4} = \frac{V_{04} - V_{00}}{4 - 0}$$

となり、 $offBR$ を求められる。このような計算を、変動が少ないと思われる時間的に連続した晴天画像を複数用いて行い、 $offBR$ を求めた。ただし、誤差を含むと思われる領域 (値が 10 以下、230 以上の画素) は計算に使用しない。また、様々な温度・ BR の画像を用いて $offBR$ の導出を

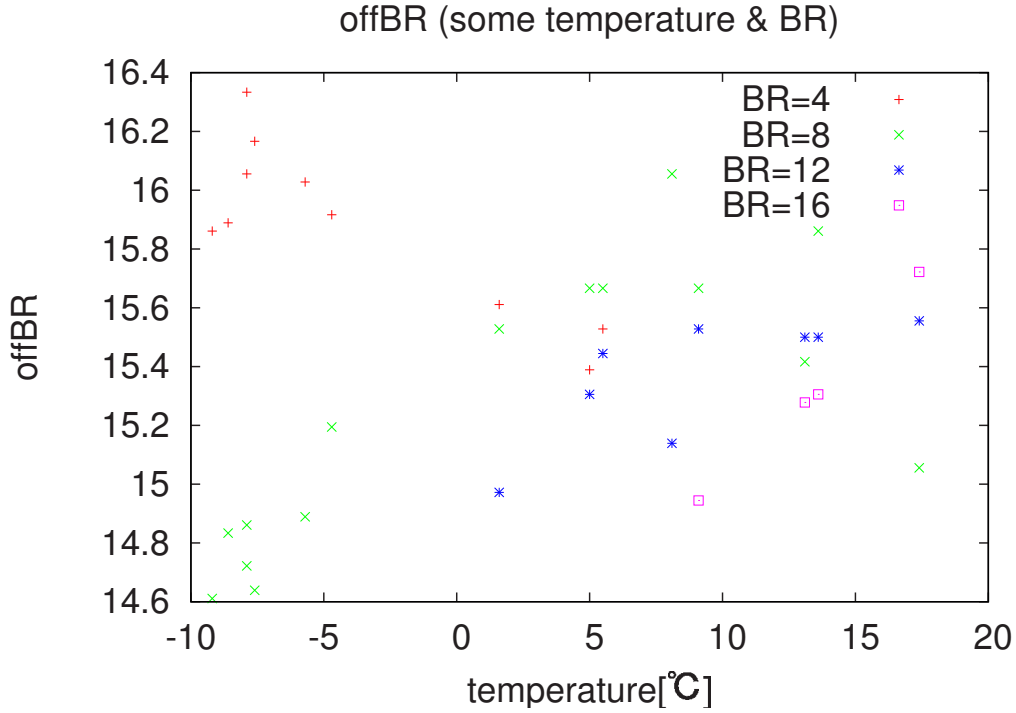


図 4.6: *offBR* の測定

試みたが、特に目立った温度依存性や *BR* 依存性は見られなかった (図 4.6)。求めた *offBR* は、14-16 の範囲内にほぼ収まっており、解析ではその平均値である '15' を用いた。

この *offBR* を用いて、 $BR = BR_{\text{base}}$ における値 0 の点を基準として各 *BR* 画像をつなぎ合わせる¹。この時、ある *BR* 設定で得られた出力値を $V(BR)$ 、 BR_{base} 基準に換算した値を $V(BR_{\text{base}})$ とすると、式 (4.1) より

$$V(BR_{\text{base}}) = V(BR) + (BR_{\text{base}} - BR) \times \text{offBR} \quad (4.2)$$

となる。これによって同一スケール上で各 *BR* 画像の値を扱うことができる。

4.1.3 画像つなぎ合わせ

次に、これらの画像を足し合わせていく。この時、図 4.5 などにも見られるように、複数の画像でダイナミックレンジが重なっている点に注意しなければならない。これらをそのまま足し合わせてしまうと、同じ箇所の値が何度も足し合わされてしまうことになる (図 4.7)。そこで、先に作成した各 *BR* 画像のマスクを用いる。マスク画像は、元の各 *BR* 画像において、誤差領域としてカットした画素を 0、それ以外の画素を 1 とした画像である。よって、マスクを全て足し合わせると、各画素がカウントされた (足し合わされた) 回数と等しい値を持つ (図 4.8)。そこで、各 *BR* で得られた画像を足し合わせて、マスクの和で割る処理を行う。これによって、足し合わせた回数分で全 *BR* 画像の和を割ることになり、正しく各 *BR* の画像をつなぎ合わせることができる (図 4.9)。

¹後で黒体温度標準を用いて正確なゼロ点合わせを行うので、ここでの基準点 (BR_{base}) は適当でよい。

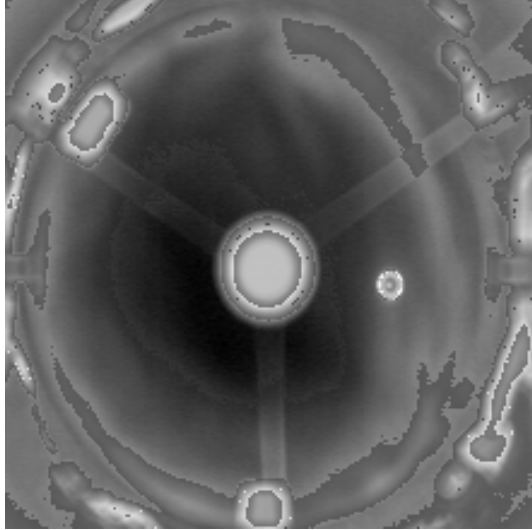


図 4.7: 足し合わせたデータ (BR_{base})

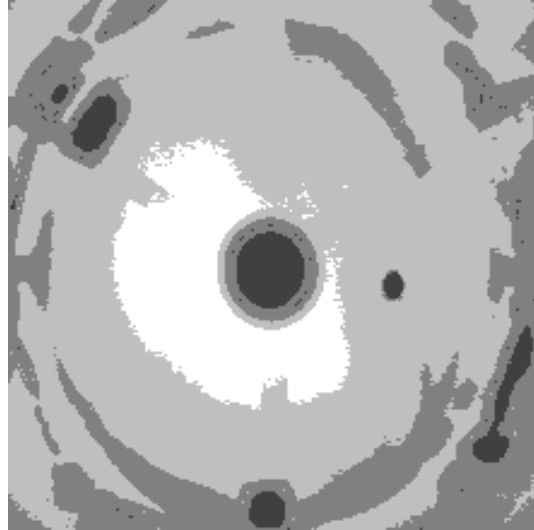


図 4.8: 足し合わせたマスク
レンジが重なった部分が、足し合わされた回数分の値を持っている (明るく見えている箇所)

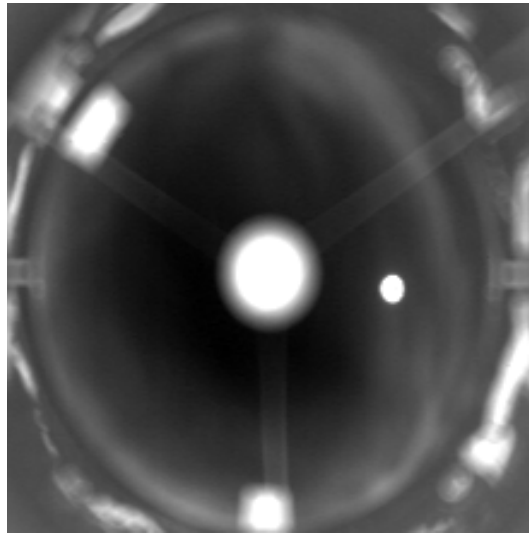


図 4.9: データと / マスクと (BR_{base})

4.2 キャリブレーションカーブの測定

上記のように画像を一枚につなぎ合わせた後、カメラのゼロ点揺らぎを補正し、放射率を求める解析を行う。この解析では、ある温度の黒体が、あるカウントで受かるというカメラの特性をあらかじめ実験室で測定しておき、そこで得られたキャリブレーションカーブ ($V_{\text{exp}}(T)$) を用いて輝度の較正を行い、放射率を求めている。実験からキャリブレーションカーブを求めるためには、複数の温度において黒体を撮像し、値を読み取り、プロットしていく必要がある。黒体は一定・一様温度を保つことが要される。今回の測定では、高温部と低温部に分けて測定した。

高温部 (40 - 60 °C) では、黒体炉 (CI SYSTEMS 製 SR 2-SA) を用いて測定を行った。今回使用した黒体炉の特性は、表 4.1 にまとめた。

使用口径	放射率	温度分解能	温度精度	温度安定性
22.2mm	0.99 ± 0.01	1 °C	± 2.5 °C ¹	± 0.25 °C ²

表 4.1: 黒体炉の特性

低温部 (−20 - +20 °C) では、ドライアイスを入れた銅製容器にものを撮像した。温度測定には雲モニタに装備された温度計を用い、温度センサーを容器に貼り付けて測定した。しかし、実験室環境 (25 °C前後) では 20 °C以下の低温で一定に保つのは難しく、水滴や霜も付着してしまうので、それによって多少精度が下がっている可能性がある。

各温度の黒体が画像内で 10-230 の値を持つように、適切な BR 設定で感度を合わせて撮像していく。こうして得られた各 BR のデータを、まずは $offBR = 15$ を用いてある基準となるゼロ点 ($BR_{caliv} = 20$) に基づくカウントに換算する。その後、gnuplot を用いてプロットし、適当な温度の関数で最小二乗法でフィッティングした。Ge 窓使用時と不使用の場合でそれぞれ測定した。以下にその結果を示す。

(1) Ge 窓使用

式 (4.3) のような 5 次の関数でフィッティングして求められた係数は以下のようなになった。図 4.10 の curve1 がその関数を表わしている。測定できた黒体温度の範囲は、250-340K 程度であった。

$$V_{\text{exp}}(T) = V_0 + aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 + eT^5 \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} V_0 &= 1.00296009390257 \\ a &= 0.911007012289979 \\ b &= -0.0260198281756954 \\ c &= 3.19784176679502 \times 10^{-05} \\ d &= 4.00214813719225 \times 10^{-07} \\ e &= -6.79224431015865 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

¹100-1000 °Cにおける温度誤差範囲。

²10 分間での温度揺らぎ幅。

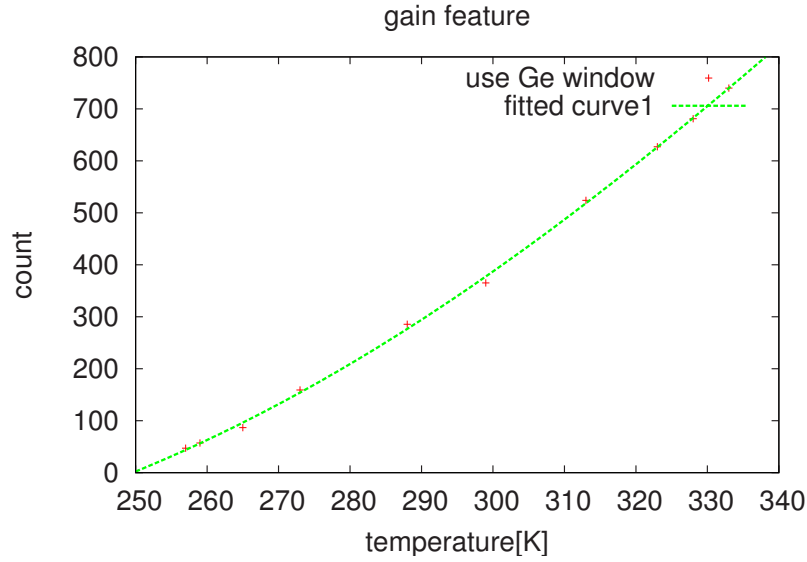


図 4.10: Ge 窓使用時の 5 次関数キャリブレーションカーブ (縦軸は BR_{caliv} 基準の値)

(2) Ge 窓不使用

5 次の関数でフィッティングして求めた係数は以下ようになった。図 4.11 の curve1 がその関数を表わしている。

$$\begin{aligned}
 V_0 &= -14298226.5426493 \\
 a &= 237349.607047635 \\
 b &= -1572.95111441904 \\
 c &= 5.20206738523799 \\
 d &= -0.00858582633158551 \\
 e &= 5.65789238551934 \times 10^{-06}
 \end{aligned}$$

図 4.11 に見られるように、低温領域でカウントの変化があまり見られなかった。そのため、5 次の関数フィットでは低温領域での傾きが急になってしまったので、より緩やかなカーブを描いた 4 次関数でのフィットも行った。4 次の関数 (式 (4.4)) でフィッティングして求めた係数は以下ようになった。図 4.11 の curve2 がその関数 ($V_{exp1}(T)$) を表わしている。

$$V_{exp}(T) = V_0 + aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= -491238.737924525 \\
 a &= 6757.39075054452 \\
 b &= -34.7360894750311 \\
 c &= 0.0790386954479888 \\
 d &= -6.70884107171548 \times 10^{-05}
 \end{aligned}$$

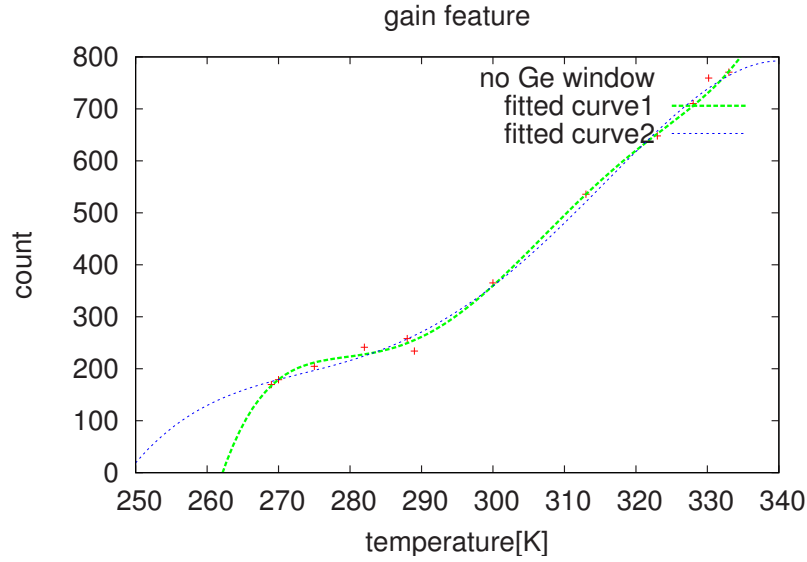


図 4.11: Ge 窓不使用時 (curve1 は 5 次関数、curve2 は 4 次関数フィット)

この結果は、物体温度を低温で一定・一様に保つことができていなかったため、正確なカウント特性が得られなかった可能性がある。しかし、カメラの故障により再度実験することができなかったため、次の (3) で示すように、Ge 窓の透過率を用いて Ge 窓不使用時のゲイン特性を計算から求めた。

(3) Ge 窓不使用 (calculated)

フーリエ分光器で測定された Ge 窓の放射率 ($\epsilon_{\text{Ge}} \approx 0.08$) を用い、(1) のデータから Ge 窓の透過・放射を考慮して、Ge 窓不使用時のゲイン特性を計算した。(1) で得られたカーブを $V_{\text{expA}}(T)$ 、今導出しようとしている Ge 窓不使用時のカーブを $V_{\text{expB}}(T)$ とすると、

$$\epsilon_{\text{Ge}} V_{\text{expB}}(T_{\text{Ge}}) + (1 - \epsilon_{\text{Ge}}) V_{\text{expB}}(T) = V_{\text{expA}}(T) \quad (4.5)$$

となっている。 $T = T_{\text{Ge}}$ のとき、 $V_{\text{expA}}(T_{\text{Ge}}) = V_{\text{expB}}(T_{\text{Ge}})$ なので

$$V_{\text{expB}}(T) = \frac{V_{\text{expA}}(T) - \epsilon_{\text{Ge}} V_{\text{expA}}(T_{\text{Ge}})}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})} \quad (4.6)$$

この実験を行ったときの周辺温度がおよそ 27 °C である。よって $T_{\text{Ge}} \approx 300$ K として計算し、各データ点をプロット・フィッティングしなおして Ge 窓不使用時のキャリブレーションカーブを導出した。

5 次の関数フィッティングにより求められた係数は以下のようになった。図 4.12 の $V_{\text{exp2}}(T)$ がそのフィッティングカーブである。このカーブは (2) で求めた Ge 窓なしの結果と高温部 (280K 以上) ではほぼ一致しており、全体的に $V_{\text{exp1}}(T)$ より直線に近いカーブを描いているのがわかる (図

4.12)。

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 2007652.07889584 \\
 a &= -34309.8798981645 \\
 b &= 233.994895661317 \\
 c &= -0.796287990010036 \\
 d &= 0.00135228207687047 \\
 e &= -9.16687927952955 \times 10^{-07}
 \end{aligned}$$

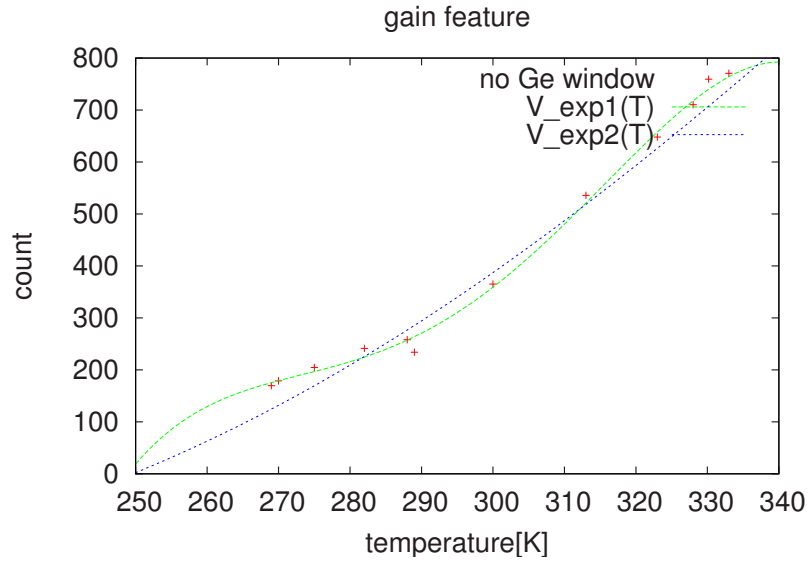


図 4.12: $V_{\text{exp1}}(T)$ と $V_{\text{exp2}}(T)$

また、解析結果を比較するため、式 (4.7) のような 8 次の関数でのフィッティング²も行った。以下がその結果である。図 4.13 のカーブがその関数 ($V_{\text{exp3}}(T)$) を表わしている。

$$V_{\text{exp}}(T) = V_0 + aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 + eT^5 + fT^6 + gT^7 + hT^8 \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= -7013557634.94077 \\
 a &= 190801890.791372 \\
 b &= -2267485.09338617 \\
 c &= 15374.8171447453 \\
 d &= -65.0579510497383 \\
 e &= 0.175921690360226 \\
 f &= -0.000296873447950787 \\
 g &= 2.8585324417875 \times 10^{-07} \\
 h &= -1.20242017192783 \times 10^{-10}
 \end{aligned}$$

²データ数が少なく、フィッティングに使用できる関数の最大の次数が 8 次であったため、8 次関数を使用した。

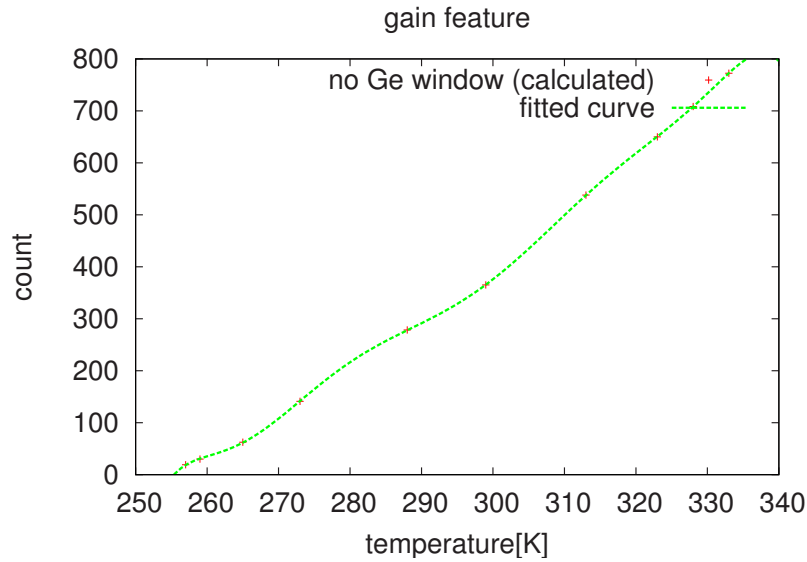


図 4.13: 計算から求めた 8 次関数キャリブレーションカーブ (no Ge window)

実際に ASTE サイトで稼働している雲モニタの簡易解析は、5 次の関数でフィットした $V_{\text{exp}2}(T)$ を用いて行っており、本書でも特に注記がない限り $V_{\text{exp}}(T) = V_{\text{exp}2}(T)$ として解析を行うこととする。しかし、この $V_{\text{exp}}(T)$ の値は、単に BR_{calib} 設定で得られた値であり、物理量の絶対値を意味するものではない。そこで、実際の雲を観測したデータに対しては、実験室で得られたキャリブレーションカーブを補正した $V'_{\text{exp}}(T)$ を用いて解析を行っている。補正方法などの詳細は後述する。また、各カーブ ($V_{\text{exp}1,2,3}(T)$) を用いた解析結果の違いについては、5 章 2 節で考察する。

4.3 一温度標準を用いた解析

次に、キャリブレーションカーブ $V'_{\text{exp}}(T)$ を用いて、先に生成された広ダイナミックレンジ画像の簡易解析を行う。この画像は、つなぎ合わせの際に設定した適当な BR_{base} に基づいた値を持っており、キャリブレーションカーブのスケール上の値と一致していない。またそれだけではなく、カメラの内的要因によるゼロ点揺らぎも含まれるため、各画像の持つ値は、それぞれ異なるゼロ点からのカウント値となってしまう。そこで、黒体温度標準の温度・カウントがキャリブレーションカーブ上に乗るように画像全体の値を補正し、常時あるゼロ点からのカウントとなるように処理する。これによって各画素の値は、常にキャリブレーションカーブと同じスケール上での値となり、カメラのゼロ点揺らぎも同時に補正することができる。その際には、わずかではあるが Ge 窓からの放射の差し引きも行う。そして、最終的に放射率の次元の画像を生成する。ここでは、周囲温度と等温の REF1 のみを用いた解析方法について述べる。

4.3.1 解析手順

最初に、本文中の各種パラメータの意味について記す。

$V_{\text{exp}}(T)$	実験室で得られた温度 (T) とカウント (V) の特性を、 T の 5 次の関数にフィットして得られた関数。Ge 窓不使用時に温度 T の黒体を撮像した時、実際に受かると予想されるカウント (BR_{calib} 基準の値)。
$V'_{\text{exp}}(T)$	ASTE サイトでの晴天画像を用いて $V_{\text{exp}}(T)$ のゼロ点や傾きを補正した温度-カウント特性。詳細は後述。
$V_{\text{pred}}(T)$	Ge 窓使用時に温度 T の黒体を撮像した時、受かると予想されるカウント。 ($= (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V_{\text{exp}}(T) + \epsilon_{\text{Ge}}V_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})$)
V_{ref}	実際に受かる黒体標準の検出カウント (BR_{base} 基準の値)。
V_{sky}	実際に受かる空 (雲) の検出カウント (BR_{base} 基準の値)。
ΔV	$V_{\text{exp}}(T)$ を基準にしたゼロ点補正項。カメラの内的要因によるゼロ点揺らぎ補正と、 BR_{base} 基準の値の BR_{calib} 基準の値への換算をするパラメータ。
ϵ_{Ge}	Ge 窓の放射率。フーリエ分光器で測定された値は $\epsilon_{\text{Ge}} \approx 0.08$ 。
ϵ_{sky}	空 (雲) の放射率。
T_{ref}	それぞれ黒体標準温度、空の温度、Ge 窓の温度。実際に測定しているのは
T_{sky}	T_{ref} だけなので、計算の際は Ge 窓の温度も外気温とほぼ等しく ($T_{\text{Ge}} \approx T_{\text{ref}}$)
T_{Ge}	、さらに地上温度と空の温度もほぼ等しい ($T_{\text{sky}} \approx T_{\text{ref}}$) と近似。

上記のように、全体の流れとしては

- 1、黒体温度標準を用いて ΔV を計算。
- ↓
- 2、画像全体から ΔV 、Ge 放射を差し引く。
- ↓
- 3、画像全体を $V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}})$ で割り、放射率の次元にする。

となっている。以下でその詳細を示す。

まず、黒体温度標準の温度から予想されるカウントを計算する。

$$V_{\text{pred}}(T_{\text{ref}}) = (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}}) \quad (4.8)$$

さらに、実際に受かった黒体のカウントと、予想カウントの差を ΔV として計算する。

$$\Delta V = V_{\text{ref}} - V_{\text{pred}}(T_{\text{ref}}) \quad (4.9)$$

この ΔV を画像全体から差し引くと

$$V_{\text{sky}} - \Delta V \quad (4.10)$$

$$= V_{\text{sky}} - V_{\text{ref}} + V_{\text{pred}}(T_{\text{ref}}) \quad (4.11)$$

$$= V_{\text{sky}} - V_{\text{ref}} + (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}}) \quad (4.12)$$

$$= \epsilon_{\text{sky}}(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}}) \quad (4.13)$$

となる。最後の式 (4.13) は、sky 温度から予想される sky のカウントである。

ここで、式 (4.12)=式 (4.13) の等式に注目する。両辺から Ge 放射 $\epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})$ を引くと

$$V_{\text{sky}} - V_{\text{ref}} + (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref}}) = \epsilon_{\text{sky}}(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}}) \quad (4.14)$$

この式の両辺を $X = (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}})$ で割ると、 ϵ_{sky} が求まることがわかる。つまり、 ΔV と Ge 放射を差し引いた画像を X で割ることで放射率の次元の画像を得ることができる。しかし、実際には $T_{\text{Ge}}, T_{\text{sky}}$ を測定することが困難なので、いずれも T_{ref} と等しい ($T_{\text{sky}} \approx T_{\text{Ge}} \approx T_{\text{ref}}$) と仮定して計算を行う。すると式 (4.14) より

$$\epsilon_{\text{sky}} = \frac{V_{\text{sky}} - V_{\text{ref}} + (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref}})}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref}})} \quad (4.15)$$

$$= 1 - \frac{V_{\text{ref}} - V_{\text{sky}}}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref}})} \quad (4.16)$$

こうして求まったものが、放射率の次元の画像となる (図 4.15)。この式を見てもわかるように、 $V_{\text{ref}} - V_{\text{sky}}$ という差を用いて計算しているため、ゼロ点揺らぎの影響を受けずに放射率を計算できるような解析法になっている。

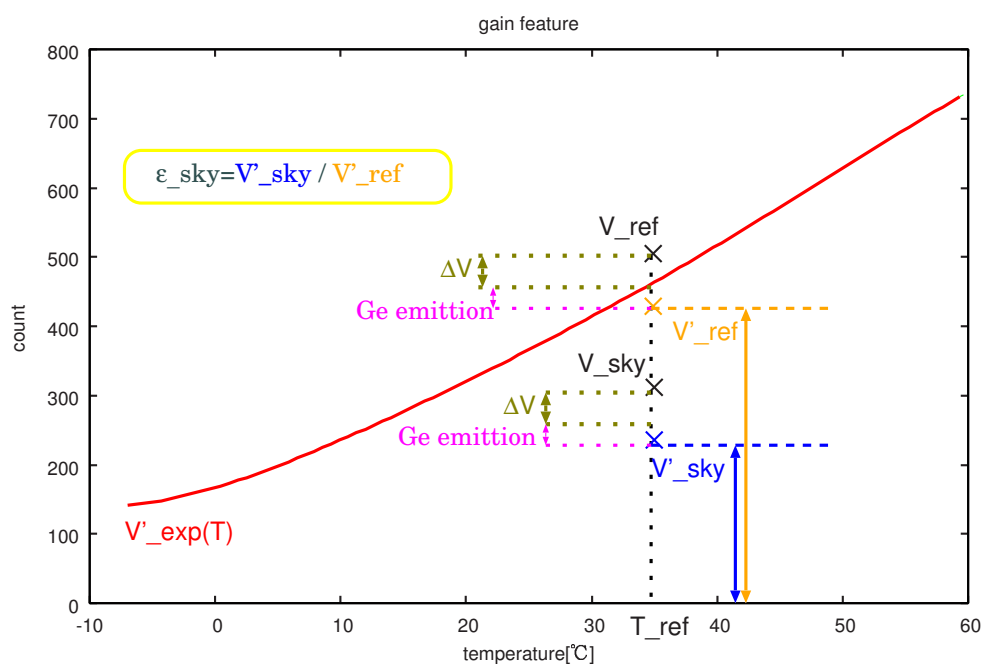


図 4.14: 一温度標準による解析

最後に、255 をかけ 8bit の画像にして、空以外の領域にマスクをかけ最終的なモニター画像となる (図 4.16)。

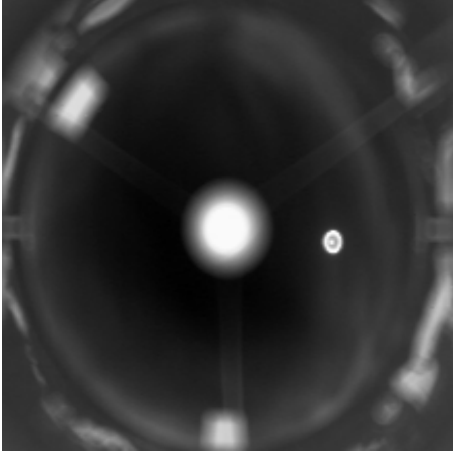


図 4.15: 放射率の次元の画像

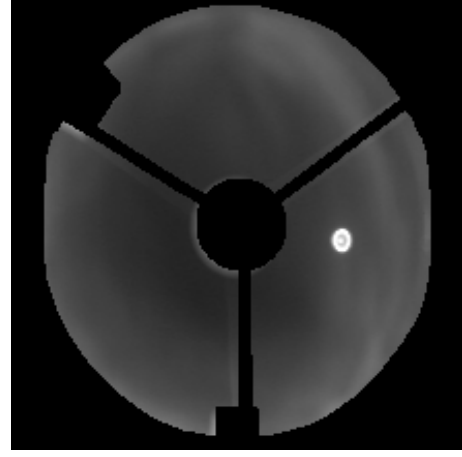


図 4.16: 放射率の次元の画像 (masked)

4.3.2 キャリブレーションカーブの補正

上記のように、解析で使用しているキャリブレーションカーブは、 $V_{\text{exp}}(T)$ を補正した $V'_{\text{exp}}(T)$ である。ここではその補正方法について記述する。

まずは晴天時の解析画像から天頂角 30° と 60° の方向の放射率 $\epsilon_{\text{sky}}(30), \epsilon_{\text{sky}}(60)$ を読み取り、それぞれを光学的厚み (τ_{30}, τ_{60}) に換算する。この時、図 4.17 のような平行平板大気モデルを仮定すると、

$$\sqrt{3} \times \tau_{30} - \tau_{60} = 0 \quad (4.17)$$

が成り立っているはずである。よってこの式 (4.17) が満たされていれば、その画像の放射率は正しい値であると考えられる。これを基準に $V'_{\text{exp}}(T) = x \times V_{\text{exp}}(T)$ として補正項 x を決定する。手順としてはまず $V_{\text{exp}}(T)$ を用いて晴天画像の解析を行う。そして得られた放射率の値を読み取り、式 (4.17) が成り立つように x を導出していく。以下でその詳細を示す。

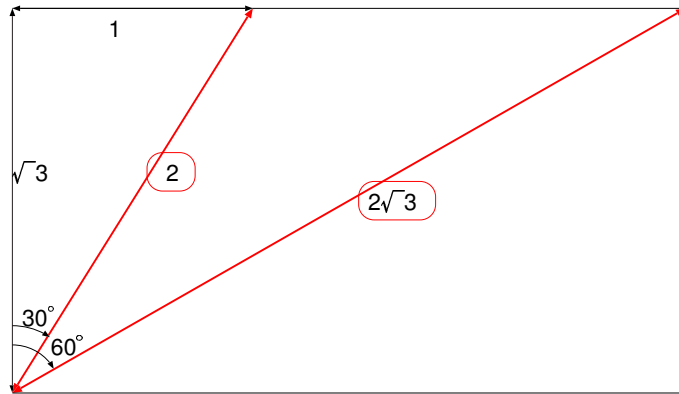


図 4.17: 平行平板大気モデルにおける各天頂角方向の大気の厚みの比

放射率と τ の関係式は以下の式の通りである。

$$\tau = \ln \left(\frac{1}{1 - \epsilon_{\text{sky}}} \right) \quad (4.18)$$

これに式 (4.16) を代入する。今 $V'_{\text{exp}}(T) = V_{\text{exp}}(T)$ なので

$$\tau = \ln \left(1 - \left(1 - \frac{V_{\text{ref}} - V_{\text{sky(fine)}}}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}}) V_{\text{exp}}(T_{\text{sky(fine)}})} \right) \right)^{-1} \quad (4.19)$$

$$= \ln \left(\frac{(1 - \epsilon_{\text{Ge}}) V_{\text{exp}}(T_{\text{sky(fine)}})}{V_{\text{ref}} - V_{\text{sky(fine)}}} \right) \quad (4.20)$$

ここで $V_{\text{exp}}(T)$ に x をかけて、正しい τ の値 ($= \tau'$) となるよう補正する。式 (4.18) = 式 (4.20) から

$$\tau' = \ln \left(\frac{x \times (1 - \epsilon_{\text{Ge}}) V_{\text{exp}}(T_{\text{sky(fine)}})}{V_{\text{ref}} - V_{\text{sky(fine)}}} \right) \quad (4.21)$$

$$= \ln \left(\frac{x}{1 - \epsilon_{\text{sky}}} \right) \quad (4.22)$$

これを式 (4.17) を代入すると

$$\sqrt{3} \times \ln \left(\frac{x}{1 - \epsilon_{\text{sky}(30)}} \right) - \ln \left(\frac{x}{1 - \epsilon_{\text{sky}(60)}} \right) = 0 \quad (4.23)$$

この方程式を二分法プログラムを用いて解き、求まった x を用いて $V_{\text{exp}}(T)$ を補正する。この x をどのように補正項として反映させるか次の二通りの手法を試みた。

手法 1 (M の決定)

x をそのまま補正項 M として使用する。 $V'_{\text{exp}}(T) = x \times V_{\text{exp}}(T) = M \times V_{\text{exp}}(T)$ とし、 $V_{\text{exp}}(T)$ のゼロ点と傾きを同時に補正する項を M とする。

手法 2 (α の決定)

上記の手法 1 で、 $V_{\text{exp}}(T)$ は実験から得られたカーブなので、基本的には $M \approx 1$ となるはずである。そこで、 $V'_{\text{exp}}(T)$ には、 M とゼロ点補正項 (α) の二つパラメータがあると考え、 $M = 1$ として α の値を求めるのに x を使用する。つまり、 $V'_{\text{exp}}(T) = x \times V_{\text{exp}}(T) = V_{\text{exp}}(T) + \alpha$ として α を求める。

※画像中の天頂角 30° 、 60° の位置は、それぞれの位置に印 (テープ) を付けた棒を用意し、それを撮像することで調べた (図 4.18, 4.19)。

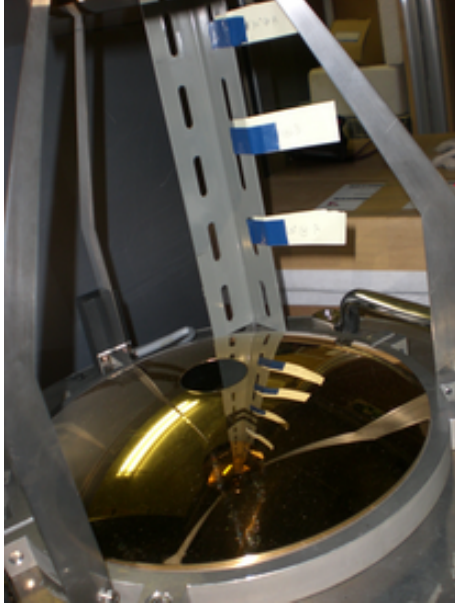


図 4.18: 画像中の位置対応調査

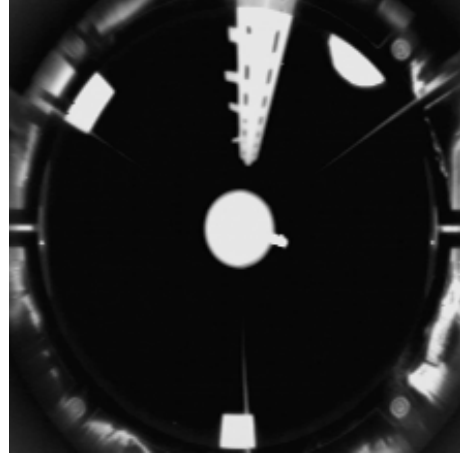


図 4.19: 画像中の位置対応

4.4 二温度標準を用いた解析

上記の周辺温度と等温の黒体 (ref1) のみでなく、ペルチェで加熱している黒体 (ref2) を用いることで、ゼロ点補正のみならず、ゲイン ($V'_{\text{exp}}(T)$ の傾き) の揺らぎも補正することが可能となる。ここで用いるキャリブレーションカーブは、上記手法2で求めた $V'_{\text{exp}}(T) = V_{\text{exp}}(T) + \alpha$ とし、これにゲイン補正項 M をかけることで、ゲインの揺らぎを補正する。上記の α の設定方法から、基本的に M は1付近で揺らぐものと予想し、この解析を試みた。

基本的な解析の流れは上記一温度標準の解析とほぼ同様である。具体的には以下のような計算を行う。

まず、黒体標準から期待されるカウントは

$$V_{\text{pred}}(T_{\text{ref1},2}) = M \times \{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref1},2}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})\} \quad (4.24)$$

となる。この期待されるカウントと、実際に検出されたカウント ($V_{\text{ref1},2}$) との差を ΔV として計算する。ref1 について考えると

$$\Delta V = V_{\text{ref1}} - V_{\text{pred}}(T_{\text{ref1}}) \quad (4.25)$$

$$= V_{\text{ref1}} - M \times \{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref1}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})\} \quad (4.26)$$

ref2 についても同様に

$$\Delta V = V_{\text{ref2}} - V_{\text{pred}}(T_{\text{ref2}}) \quad (4.27)$$

$$= V_{\text{ref2}} - M \times \{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref2}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})\} \quad (4.28)$$

これら式 (4.26),(4.28) の連立方程式より

$$M = \frac{V_{\text{ref2}} - V_{\text{ref1}}}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})(V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref2}}) - V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref1}}))} \quad (4.29)$$

と M が求まり、 ΔV も求まる。

それらの値を用い、実際に測定される空からの信号から、空の放射率 ϵ_{sky} を求める。
まず、実際に検出された空のカウント V_{sky} から、 ΔV を差し引いてやると

$$V_{\text{sky}} - \Delta V = V_{\text{sky}} - V_{\text{ref1}} + M \times \{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref1}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})\} \quad (4.30)$$

$$= M \times \{\epsilon_{\text{sky}}(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})\} \quad (4.31)$$

となる。最後の式は、sky 温度から予想される sky のカウントである。ここで、式 (4.30)=式 (4.31) の等式に注目する。

両辺から Ge 放射 $M\epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(T_{\text{Ge}})$ を引くと

$$V_{\text{sky}} - V_{\text{ref1}} + M \times (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{ref1}}) = M \times \epsilon_{\text{sky}}(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}}) \quad (4.32)$$

さらに、両辺を $X' = M \times (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}})$ で割ると右辺が放射率 ϵ_{sky} になることがわかる。
つまり、 ΔV と Ge 放射を差し引いた画像を X' で割ってやることで放射率の次元の画像を得ることができる。式 (4.32) を X' で割ると、 ϵ_{sky} は以下ようになる。

$$\epsilon_{\text{sky}} = 1 - \frac{V_{\text{ref1}} - V_{\text{sky}}}{M(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(T_{\text{sky}})} \quad (4.33)$$

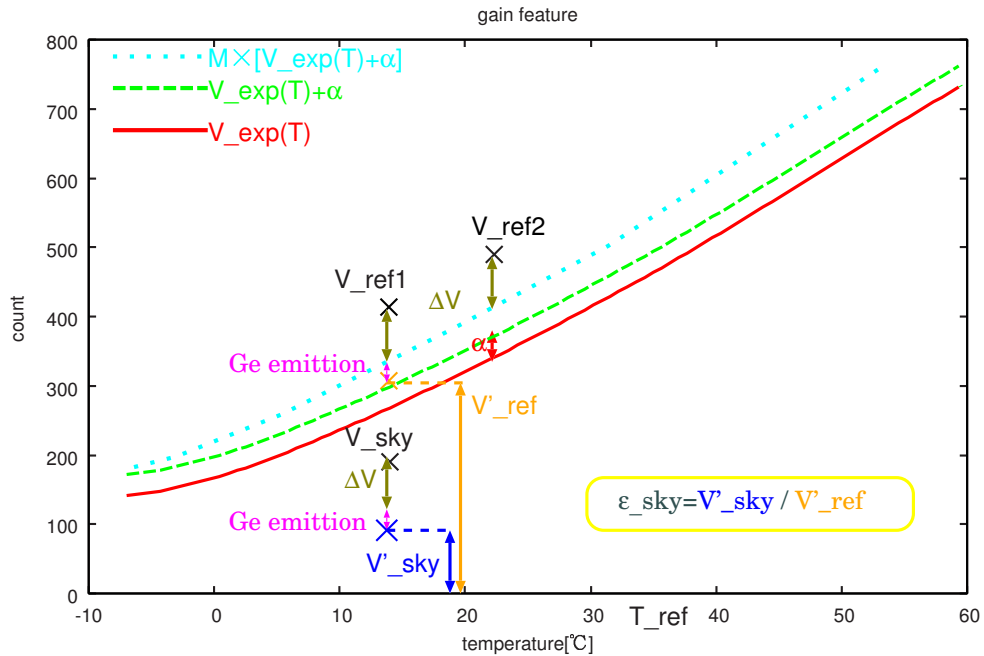


図 4.20: 二温度標準による解析

第5章 結果と考察

雲モニタが稼働し、データを蓄積し始めたのは2007年11月30日である。そこで、雲モニタの整備を行っていない時期に得られたデータ(2007年12月3-11日分)を用いて、様々な解析による結果を比較し、精度評価を行った。本章で用いている解析結果の値は全て、視野全体での平均値となっている。

5.1 各手法による解析結果の比較

5.1.1 一温度解析

まず、手法1と2の結果を比較した。それぞれのゼロ点(M, α)は、同じ晴天画像(2007年12月5日5:30のデータ)を用いて設定した。

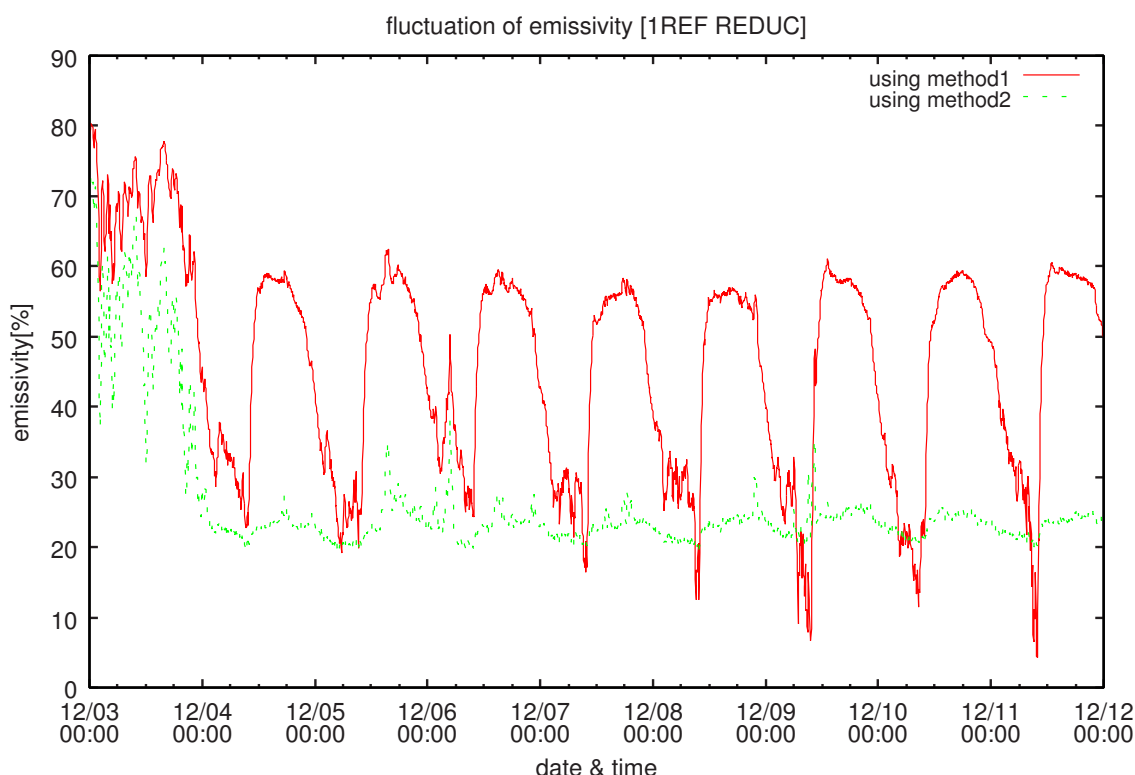


図 5.1: 一温度標準での解析結果

手法1と2の結果は、図5.1に見られるように、大きく異なる変動を示している。特に手法1では、キャリブレーションカーブの傾き M が大きいためか、温度変化(図5.2)に大きく依存した結

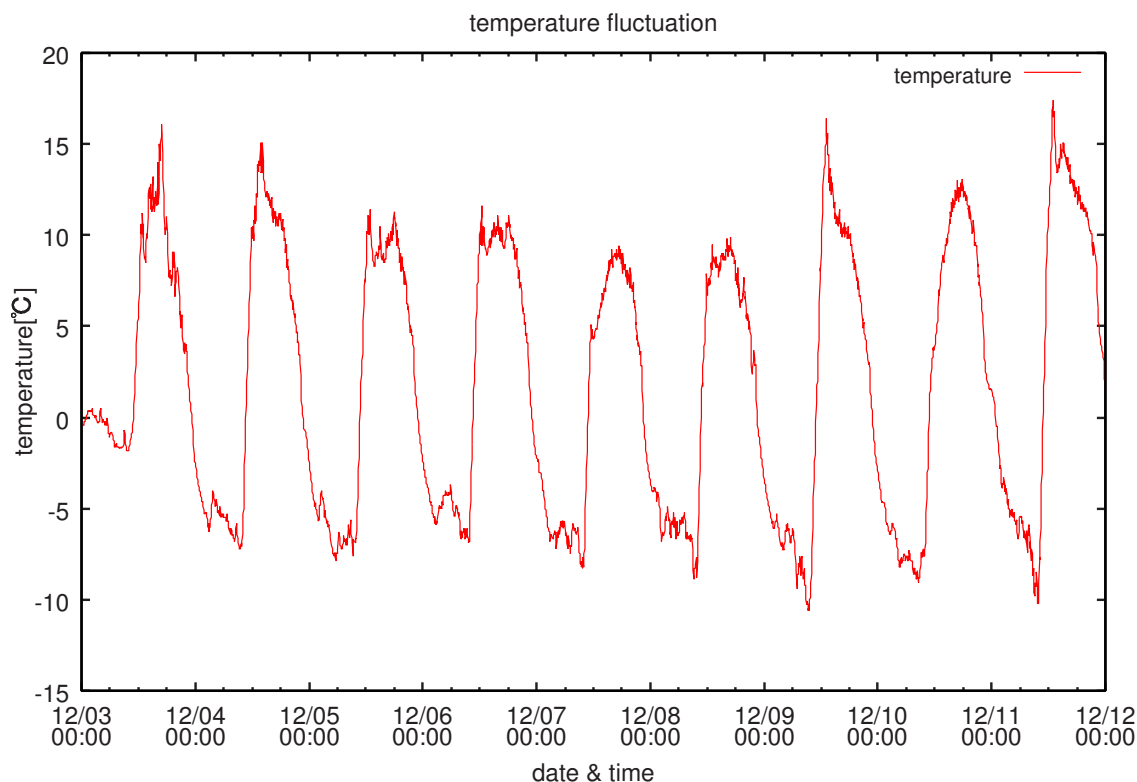


図 5.2: 地上温度 (REF1 の温度)

果となった。これは、気温の上昇に伴い雲の温度も上昇し、雲の熱放射が強くなったためという可能性も考えられる。よって、各結果の妥当性をより詳細に評価するためには、他データと比較して考察する必要がある。

5.1.2 220GHz τ モニターデータとの比較

上記の結果の妥当性を評価するために、ASTE サイトに設置されている 220GHz τ モニターのデータと比較し、電波データとの相関が見られるか調べた。この τ モニターは 220GHz 帯で、ある視線方向の大気的光学的厚み (τ) をモニターする装置である。雲モニターデータの持つ値は放射率 (ϵ) なので、式 (4.18) を用いて τ に変換してからプロットし、 τ モニターデータと比較した (図 5.3)。さらに図 5.4, 5.5 では、同時刻に得られた各データをプロットし、その相関関係を調査した。

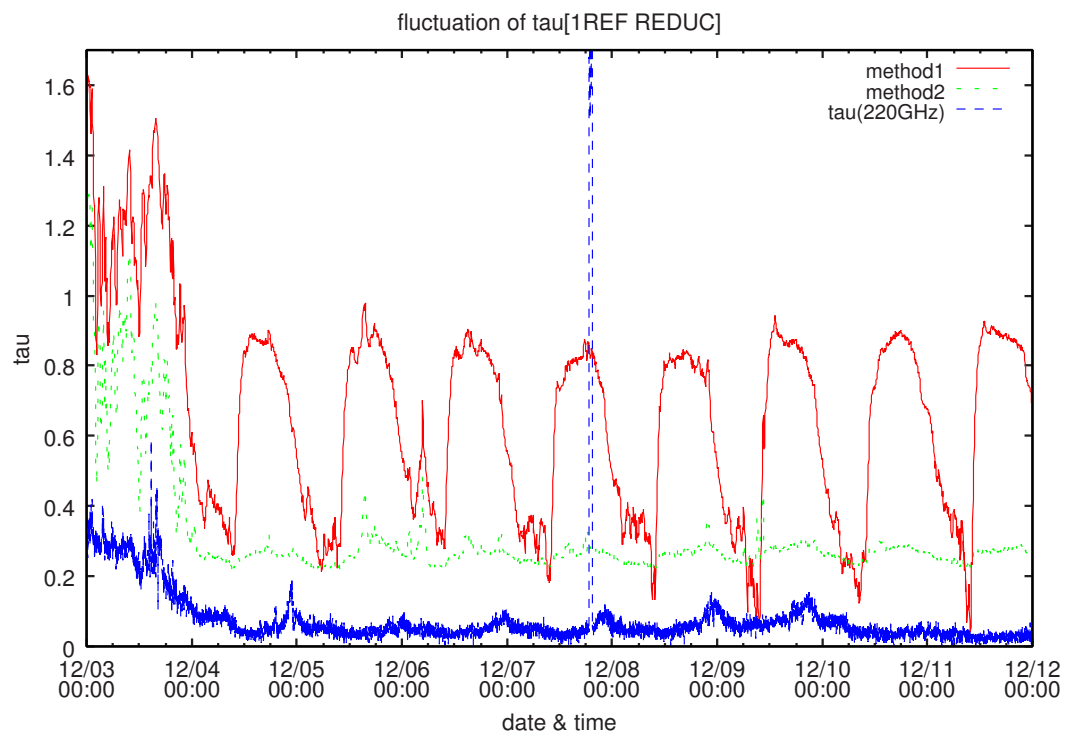


図 5.3: τ モニターデータとの比較

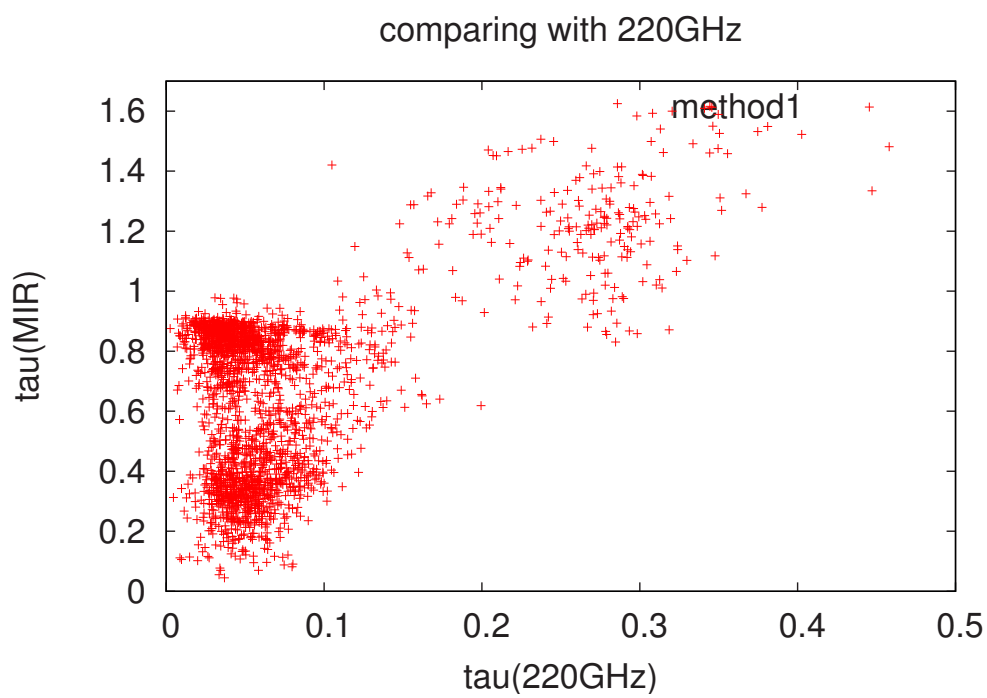


図 5.4: 手法 1 の結果と τ モニターデータの比較

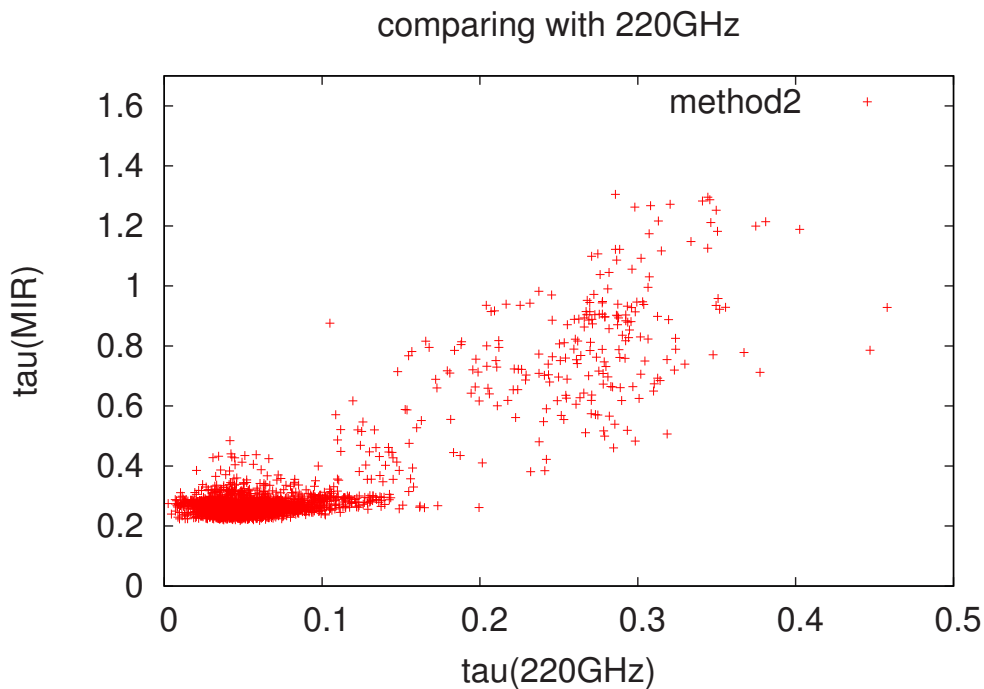


図 5.5: 手法 2 の結果と τ モニターデータの比較

図 5.3 からは、手法 2 の結果の方が τ モニターのデータとよりよい相関を示しているように見え、図 5.5 からもその傾向が見られる。一方、手法 1 の結果 (図 5.5) からも、 $\tau(220\text{GHz}) > 0.1$ ではある程度の相関が見られる。この結果を信頼すると、雲モニタによって、サブミリ波観測に適した天候か否かを正しく判断できることが期待される。しかし、今回の調査だけではデータ数が少ないため、今後のデータ蓄積を持ってこの結果の妥当性を正当に評価する必要がある。その際、以下のようなことを考慮しなければならない。

- 観測波長が異なるので、 τ モニターではとらえられない水 (液体) やオゾンなどの放射が、雲モニタではとらえられる。
- ある視線方向のみの大気を測定している τ モニターデータと、全天を測定している雲モニタデータを比較している。
- 装置そのものの精度が影響する可能性がある。

よってこれらは今後、他データや大気モデルとの比較により、さらに詳しく調査する必要がある。特に、ここで比較に用いた 220GHz 帯は大気が光学的に薄い周波数帯であるため、大気が光学的に厚い周波数帯のデータ (183GHz ラジオメータなど) との比較も行うべきである。

5.1.3 二温度解析

次に、二温度標準を用いた解析結果を示す (図 5.6)。ゼロ点 (α) は、一温度解析と同じ晴天画像 (2007 年 12 月 5 日 5:30 のデータ) を用いて設定した。

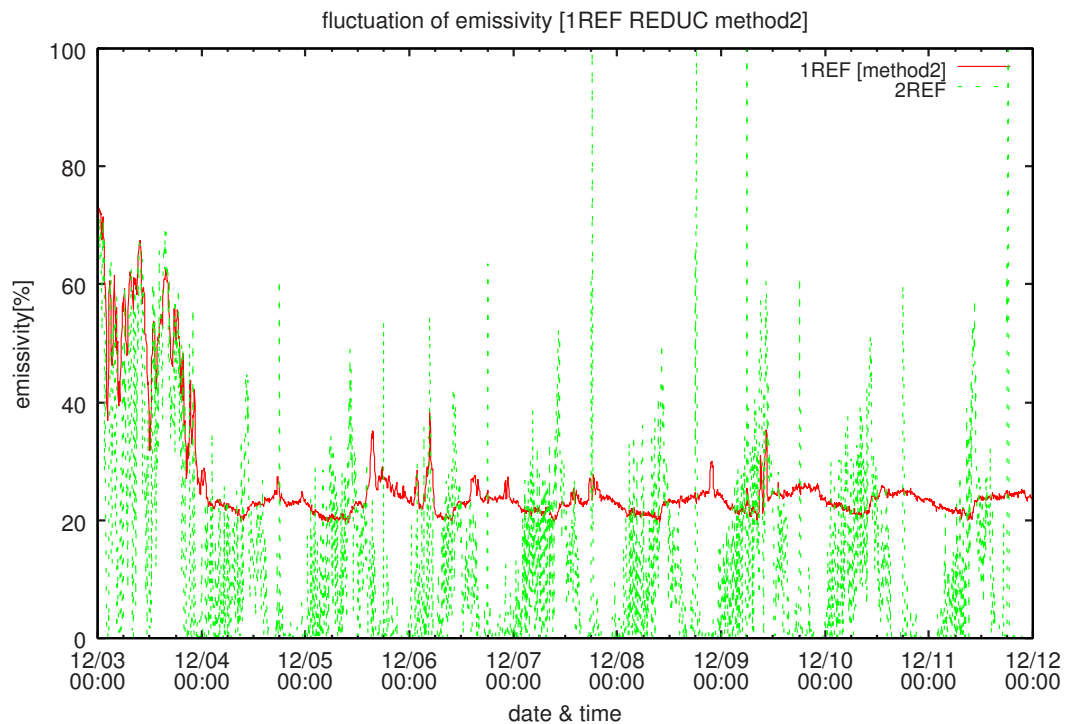


図 5.6: 二温度標準での解析結果

図 5.6 を見ると、一温度標準を用いた解析 (手法 2) の結果と比べ、大きくゆらいでいる。これは、図 5.7 にも見られるように、1 付近であると予想していた M の値のゆらぎが大きいためだと考えられる。

この要因として、以下のようなことが考えられる。

- $V_{\text{exp}}(T)$ の精度が低い (特に低温部)。
- 二つの REF の温度差が少な過ぎる。
- 温度センサー部分と、放射している部分の温度が異なる。

よって、晴天画像を用いてキャリブレーションカーブの精度を上げるなど工夫をし、二温度標準解析の手法を確立する必要がある。また、この解析の結果得られた M の平均値はおよそ 0.32 となり、ほとんどの時に $M < 1$ となっている。上記手法 2 では、 $M = 1$ としているが、 $M < 1$ の値に設定して α を決定することで、より精度を上げられる可能性があると考えられる。しかしその一方で、手法 1 で見られるように、やはり M の設定によって解析の精度を上げるのは困難であるとも考えられる。これについても今後蓄積されるデータを用いて調査していく必要がある。

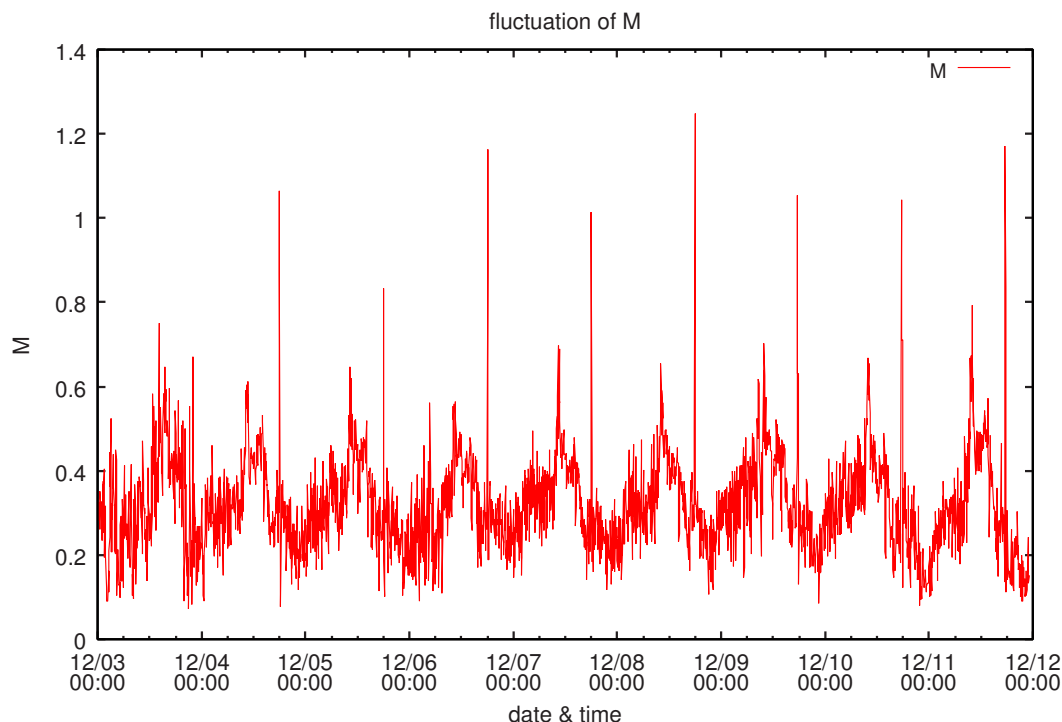


図 5.7: M の変動 (M の平均値 ≈ 0.32)

5.2 キャリブレーションカーブによる結果の違い

上記の解析では、基本的には T の 5 次の関数でフィッティングした V_{exp} を用いて解析していたが、ここでは 4 章 2 節で求めたキャリブレーションカーブ $V_{\text{exp1,2,3}}(T)$ を用いて解析した時の結果の違いを考察する。解析には手法 2 を用い、 α は各カーブを用いてそれぞれ設定した (上記と同じ晴天画像を使用)。解析結果は τ に変換し、 τ モニターデータと比較した (図 5.8)。

この図 5.8 を温度変化のグラフ (図 5.2) とともに見てみると、温度の高い時間帯に、各結果の差が顕著に現れている。特に $V_{\text{exp1}}(T)$ を用いた解析結果は、他の結果と大きく異なる。これはやはり、 $T < 20^\circ\text{C}$ の領域での $V_{\text{exp1}}(T)$ の測定誤差を反映した結果であると考えられる。それぞれのキャリブレーションカーブ、 $M \cdot \alpha$ の値の妥当性については、データの蓄積と共に、他データと比較して考察すべきである。

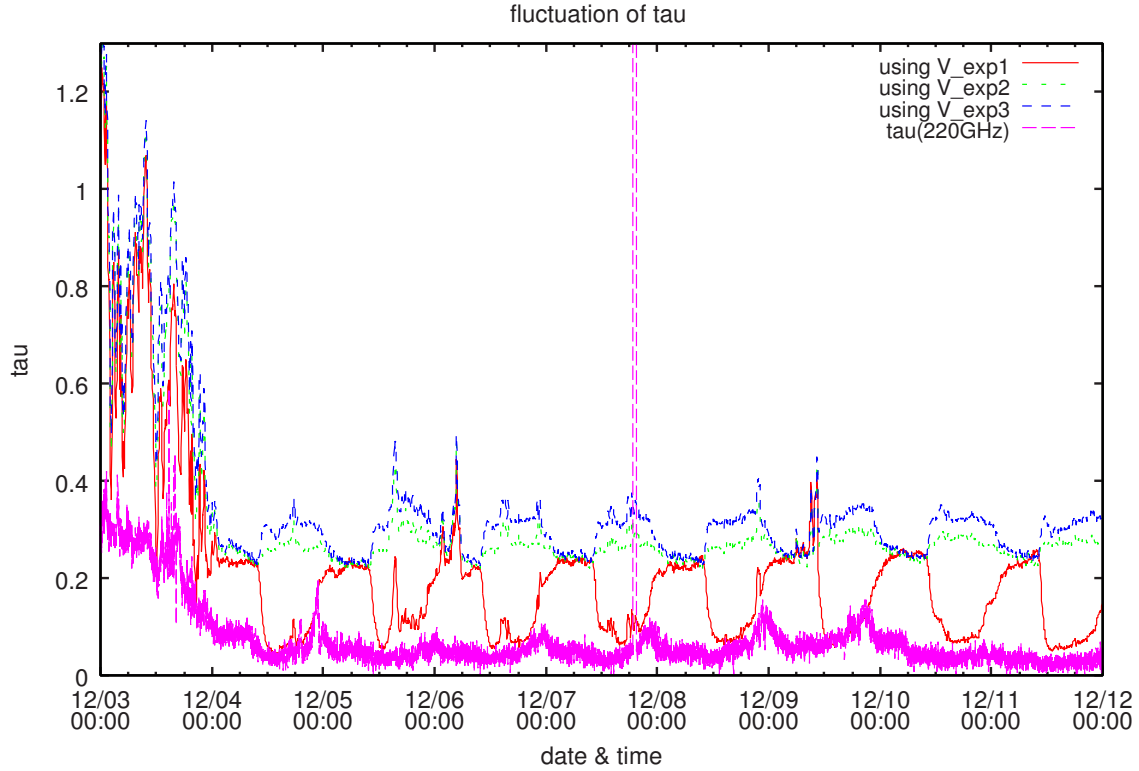


図 5.8: キャリブレーションカーブによる結果の違い (手法 2)

5.3 T_{sky} の考慮

解析の過程で $T_{\text{sky}} \approx T_{\text{refl}}$ という仮定を用いるが、実際には空の気温は地上の気温よりも低いはずである。そこで、 $T_{\text{sky}} \approx T_{\text{refl}} - T_x$ とし、 T_x に適当な値を入れて解析を行った。地表から高さ約 10km までの範囲 (対流圏) に雲が存在し、空気が乾燥状態なら標高が 100m 上がると 0.5°C 気温が下がると仮定する。ASTE サイトは標高約 5000m の乾燥地帯なので、サイトから 2km 上空と 3km 上空について、それぞれ $T_x = 10\text{K}$, 15K として解析を試みた (手法 2 のみ)。

この図 5.9 は、その結果を τ に変換して表わしたものである。このグラフを見てみると、 $T_x = 10$ と空の温度を低く設定した解析の方が、より変動が緩やかになっているようである。しかし、 $T_x = 15$ まで空の温度を低くしてしまうと、逆に変動が大きくなっているのがわかる。特に気温の高い時間帯で結果の違いが顕著に現れている (図 5.2 参照)。これは、解析に適用するキャリブレーションカーブにもよるだろうが、空の温度を適切な値に設定することで、より精度を上げられる可能性を示している。適切な空の温度設定についても今後データの蓄積を持って、他データと比較・考察していく必要がある。

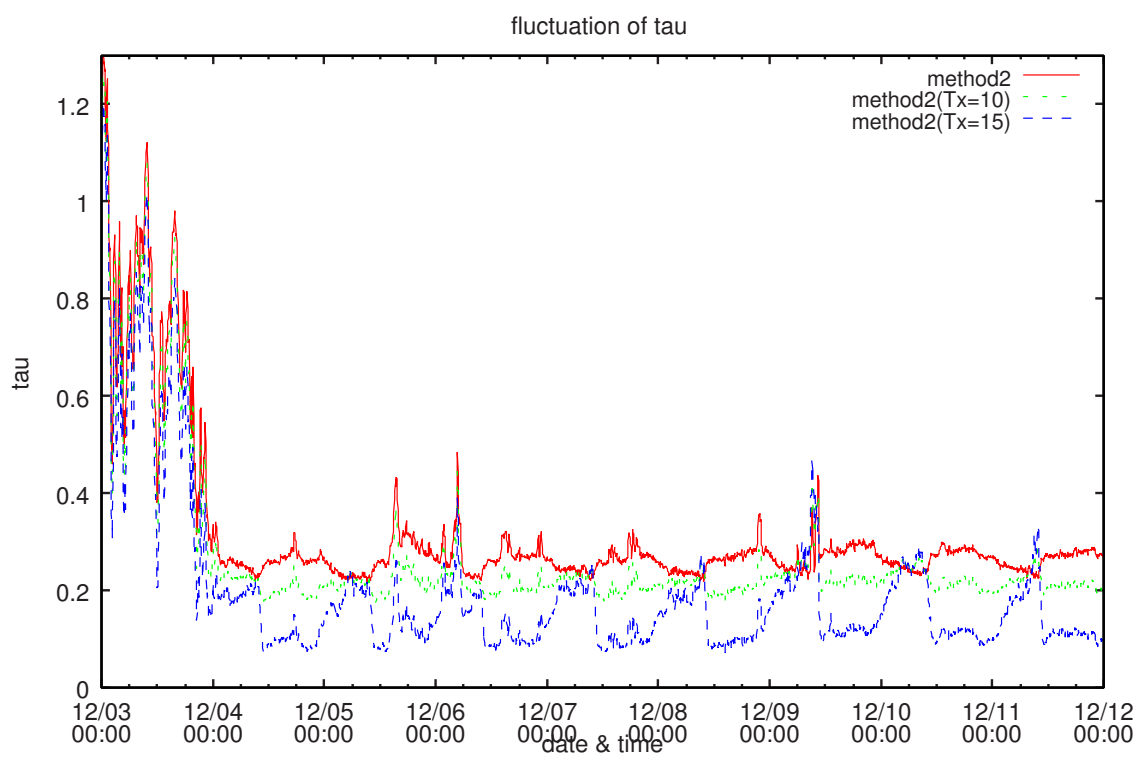


図 5.9: $T_{\text{sky}} \approx T_{\text{refl}} - T_x$ とした解析結果 (手法 2)

第6章 まとめ

8-12 μ m で雲をモニターする赤外線雲モニタは、雲の量・分布をリアルタイムで常時モニターする装置である。5分毎にデータ取得・簡易解析が実行され、放射率の次元の画像をウェブでモニターすることができる。現在 ASTE サイトに設置されており、観測サポート用モニタとして機能している。今回新たに追加したモニター機能として、方向別に雲の放射率を表示することができる。これにより、ALMA などでのダイナミックスケジューリングへの活用が期待されると考えられる。今後さらにモニター機能も改良し、利便性を追求していくべきである。

温度標準を用いた解析結果から、雲の量を定量的に議論することも可能である。一温度標準を用いての解析法では、220GHz τ モニターデータとの相関が見出され、雲モニタによる雲の定量化の妥当性が示されたと考えられる。また、どのようなキャリブレーションカーブを適用して解析を行うかによって結果が大きく変わることがわかった。適切な手法を用いてキャリブレーションカーブを補正することで、より解析の精度を上げられると考えられる。さらに、空の温度を適切に設定することで、より高精度の解析ができる可能性も見出すことができた。今後は適切な M, α, T_{sky} の組み合わせを決定し、より精度の高い解析を追求していくことができるだろう。しかしこれらの精度評価は、今後データを蓄積し、水蒸気モニターや衛星画像データなど、他の気象データと比較・考察しながら慎重に行うべきである。特に低温領域におけるゲイン特性については、より注意して考察すべきである。また、光学的に厚い電波領域における大気透過率測定結果との相関は得られるか、赤外でより明るい水やオゾンがどのように結果に反映されるかといった点についてはより詳細な議論が必要だと思われる。

また、今回新たに搭載した二温度標準を用いての解析法については、まだ不完全である。二つの温度標準は正常に機能しているので、今後蓄積するデータを用い、晴天画像を基準として揺らぎを抑えるなどの工夫をした上で、その解析手法を確立する必要がある。一方、二つの黒体の温度・カウントのデータは、適切なキャリブレーションカーブを決定するのに有用であると考えられる。そのためにも、今後のデータ蓄積は非常に重要だと考えられる。

謝辞

まずは、本研究にあたり、外部から飛びこみで入学してきた何もわからない私に、指導教官として一から御指導して下さい、全般にわたり様々な場面で力を貸して下さい茨城大学理学部 百瀬 宗武 様に深謝する。また、実験時などの際に相談させていただき、大変御世話になった同研究室の岡本 美子 様にも深謝する。そして、実験補助や、基礎勉強などで御世話になった同研究室の皆様にも深謝したい。特に、後輩の中川 裕貴 様には、実験や梱包を手伝っていただき、今後の雲モニタのデータ解析も担当していただくので、期待も込めて謝意を表す。

チリ ASTE サイトでの装置立ち上げ作業にあたり、装置の設置・運用のための利便の提供・補助、データの提供などで大変御世話になった国立天文台の 江澤元様、川辺良平様、山口伸行様、田村陽一様、奥田武志様、東大天文センターの田中邦彦様、河野孝太郎様、ASTE 秘書の Masao 様、他 ASTE・ALMA チームの皆様にも深謝する。

本研究のモデルとさせていただいた雲モニタの開発者である東大天文センターの宮田 隆志 様には、多くの相談にのっていただいただけでなく、実験機器を貸していただくなど大変御世話になったので、ここに深謝する。また、雲モニタの筐体部や光学系などを作成していただいた国立天文台 岡田 則夫 様にも深謝する。

赤外線カメラの修理や輸出にあたって御世話になった、国立天文台の松尾 宏 様、日本アビオニクスの大島 誠昭 様に感謝する。

最後に、私の研究活動に理解を示し、生活を支えてくださった両親に深謝する。

付 録 A 雲モニタコマンド各種

ここでは、雲モニタに使用されているコマンドについて説明する。以下に各ディレクトリごとにコマンドの概要を示す。

A.1 カメラ制御

/home/weather/IR_MONITOR/IRM_30 以下にあるカメラ制御用コマンド (C 言語) について、以下の表にまとめた。

ir30_getdata	引数にファイル名を指定し、画像を取得する。
ir30_doFPN	FPN(Fixed Pattern Noise) を除去する。
ir30_control_raw	通信規格に基づいた文字 (3 文字) を引数として指定し、送信することで、規格に基づく操作を行う。
ir30_setmode	カメラのコントラスト、ブライトネスを調整する。
ir30_init	カメラの諸設定を初期化する。

A.2 温度計制御

/home/weather/IR_MONITOR/TEMP_MON 以下にある温度計制御のコマンド (C 言語) について、以下の表にまとめた。

mon_fun	温度計からファンを制御する。ON・OFF の他に、ある設定温度以上になったらファンが稼働するように設定することも可能。
tempmon_control	測定温度・設定温度を読み取ったり、設定温度を変更したりできる。
tempmon_read	二つの温度計の測定温度・設定温度を読み取る。

A.3 ステータス管理

/home/weather/IR_MONITOR/COMMON 以下に置かれている。観測時の状況を記述するコマンド (C 言語) について説明する。

- stat_rw

ステータスファイル (icm_status.data) の読み書きをするコマンド。ステータスファイルは以下のような内容になっており、この情報を元に FITS のヘッダー部分が記述される。

```

*01: # ++++++ STATUS FILE  for Infrared Cloud Monitor
*02: #
*03: # ----- File
*04: LAST_DATA /tmp/_tmporary.fits
*05: CURRENT_DATA /data/fits/20071202/ICMD_20071202_1545
*06: REDUC_DATA /data/log/20071202/ICMD_20071202_1545.R.fits
*07: # ----- Camera Parameters
*08: CAM_BRIGHTNESS 20
*09: CAM_CONTRAST 8
*10: CAM_STAT OK
*11: # ----- about EXPOSURE
*12: COADD_FRAME 1
*13: EXP_DATE 2007-12-02-15:46:08
*14: EXP_TIME 1196621168
*15: # ----- MONITOR INFORMATION
*16: TEMP_REFERENCE1      9.600
*17: TEMP_REFERENCE2     11.700
*18: TEMP_REFERENCE1_STAT OK
*19: TEMP_REFERENCE2_STAT OK
*20: MON_SHUTTER OPEN
*21: MON_FUN ON
*22: TARG_REFERENCE1      99.000
*23: TARG_REFERENCE2     -99.000
*24: TEMP_READDATE 2007-12-02-15:45:00
*25: TEMP_READTIME 1196621100
*26: #----- Fine Image for WEB
*27: FINE_IMAGE IMG_20050515/ICMD_20050515_2300.R.gif
*28: # ----- SITE INFORMATION
*29: SITE ASTE

```

左端に記した行番号ごとの解説を次に示す。

*1-3	コメント行
*4	'ir30_getdata' で取得された最新の FITS ファイル名
*5	'GetimageW' で取得された最新の FITS ファイル名 (<i>BR</i> の値は省略されている)。
*6	'ReducimageW' で解析された最新の FITS ファイル名
*7	コメント行
*8	最新の画像取得時のカメラの <i>BR</i> 設定値
*9	最新の画像取得時のカメラのコントラスト設定値
*10	最新の画像取得時のカメラの動作状態
*11	コメント行
*12	取得される画像の数
*13	撮像日時
*14	撮像時刻
*15	コメント行
*16	周辺温度と等温の黒体温度標準 1 の温度
*17	加熱されたいる黒体温度標準 2 の温度
*18,*19	各温度計の動作状態
*20	シャッターの動作状態 (本装置とは無関係な記述)
*21	ファンの動作状態
*22,*23	各温度計のリレーを ON/OFF を切替える設定温度
*24	温度を読み取った日時
*25	温度を読み取った時刻
*26	コメント行
*27	モニターする際に基準とする晴天時の GIF 画像ファイル名
*28	コメント行
*29	観測場所

A.4 画像処理ソフト

/home/weather/IR_MONITOR/RBIN 以下に、FITS 画像を解析する際に使用するコマンド (C 言語) が置かれている。雲モニタで使用したコマンドについて以下の表にまとめた。

q_2val	画像データを閾値の上下で値を二値化する。
q_arith	FITS データの算術演算をする。
q_head	FITS データのヘッダーから指定キーワードのデータを取り出す。
q_list_stat	FITS データから矩形領域の平均、分散、ピクセル数を出す。
q_list_stat_mask	FITS データから矩形領域の平均、分散、ピクセル数を出す。 引数に MASK ファイルを指定することで、 MASK 領域のピクセルを無視して計算を行う。
m_chbitpixchar	画像データの形式 (BITPIX) を CHAR に変換する。入力ファイルに 0 以下か 255 以上の値がある場合、それぞれ 0、255 に変更される。
m_reject	画像データを閾値内とその外にわけ。引数として閾値の上限値と 下限値を指定し、上限以上または下限以下の値があった場合、 それらの値を上限値または下限値に変更する。

A.5 基本スクリプト

/home/weather/IR_MONITOR/MONITOR 以下に置かれている。いずれも perl で記述されたスクリプトであり、上記のような基本コマンドをコールし、雲モニタの自動運転に必要な一連の操作を実行する。以下で各スクリプトについて説明する。

(1)GetimageW	ブライツネスを変更しながら、画像 (FITS) を取得する。
(2)ReducimageW	GetimageW で取得した複数枚の画像をつなぎ、1 枚の画像にする。 さらに、最終的には放射率の画像にまで解析する。
(3)Mkhtml	モニター用の GIF ファイルと HTML ファイルを作成する。 作成したファイルはウェブサーバへ転送される。
(4)Cleanimage	ReducimageW,Mkhtml などの過程で生成した中間ファイルを消去する。 引数として full が与えられた場合、生データも消去する。
GetData	(1)+(2)+(3)+(4) の一連のデータ取得を行う。cron によってシステムから コールされる。引数=noarchive の場合は生データは残さない。 ログファイル (/data/log/年月日/icmlog_年月日) に観測のログを残す。
Init_all	システム初期化+セルフチェックを行う。システム不調時に実行する。
Pause_monitor	データ取得 (GetData) のコールを一時停止する。 引数=reset があれば、取得再開する。
Autobackup	データのバックアップを行う。データを afio+gz 圧縮し、 バックアップ先へ転送する。cron から毎日 12 時 (UTC) にコールされる。 エラー発生時のみ、ログファイル (/data/log/backuplog) に記述する。

参考文献

- [1] Hiroshi MATUO 他 著、FTS Measurements of Submillimeter-Wave Atmospheric Opacity at Pampa la Bola (PASJ)
- [2] 国立天文台編, 理科年表 (丸善)
- [3] 株式会社アंक 著、HTML タグ辞典 第6版 (翔泳社)
- [4] 結城 浩 著、新版 Perl 言語プログラミングレッスン [入門編] (ソフトバンク クリエイティブ株式会社)
- [5] Rybicki, Lightman 著、Radiative Processes in Astrophysics (WILEY-VCH)