

修 士 学 位 論 文

赤外線雲モニタデータを用いた
ASTE/ALMA サイトにおける
サブミリ波天文観測の環境評価

2008 年度
(平成 20 年度)

茨城大学大学院 理工学研究科
自然機能科学専攻
07NM219Y
中川 裕貴

要旨

電波天文観測では、可視光の観測よりも低温領域を観測でき、星や銀河の形成過程を知る重要な手がかりとなる。電波でも波長の短いサブミリ波観測では、他の電波よりも高い空間分解能が実現できる。しかし、サブミリ波は大気中の水などによる吸収の影響が大きく、大気透過率の低い領域でもある。さらに、干渉計の観測においても水蒸気の影響で位相遅延が起きるため、サブミリ波の地上観測を行う場合、水の影響の少ない乾燥した場所が適している。このようなサブミリ波観測に適した場所として、チリ高地、Pampa la Bola があげられる。現在はサブミリ波望遠鏡 ASTE、NANTEN2 が設置されており、大型ミリ波・サブミリ波干渉計「ALMA」も建設中である。

赤外線雲モニタは、大気中の雲の影響をモニターする環境調査モニタとして開発された。2007 年 11 月より ASTE サイトに設置され、稼働中である。雲モニタに搭載された赤外線カメラは、波長 $8\text{--}12\mu\text{m}$ の中間赤外線雲の熱放射を観測し、7 つの輝度応答設定で、天頂角 $0\text{--}70^\circ$ の全天画像を連続的に撮像する。撮像した 7 つの画像データを 1 セットとし、これらを解析することで、現在 (2009 年 2 月) も 5 分毎に大気の放射率を求め、雲の分布の時間変動をモニターしている。ASTE 望遠鏡はリモート観測で運用されており、観測者がいる遠隔地からでも、望遠鏡サイトの気象、大気の状態を把握できる必要がある。このために、ASTE サイトには複数の環境モニターが設置されており、雲モニタもそのひとつとして設置された。ASTE サイトの環境モニターは、ALMA の運用方法を検討するための基礎データを供給する装置としても期待されている。そこで、本研究では赤外線雲モニタのデータを用い、ASTE/ALMA サイトでのサブミリ波観測環境の調査と雲モニタの環境モニタとしての役割の評価を行った。

画像データの解析では、はじめに各輝度応答設定に対応する 7 枚の画像データを合成する。その後、雲モニタに搭載された黒体温度標準のデータと、実験より得られた較正曲線を用いて大気の放射率分布を求めている。これまでの解析に用いた較正曲線は、実験室内で黒体の温度を変化させ、画像データの出力値を測定した実験から、出力値を温度 T の関数として求めた。しかし、 $8\text{--}12\mu\text{m}$ の中間赤外線では、大気の温度に近い 300K 程度の場合のプランク関数はウィーンの変位則付近となるため、プランク関数が温度に比例するというレイリー・ジーンズ近似が適用できない。そのため、画像データの出力値は温度の関数ではなく、輻射エネルギーの関数に改善する必要がある。そこで、黒体の温度 T で波長 $8\text{--}12\mu\text{m}$ の範囲に含まれる輻射エネルギー $B(T)$ をプランク関数から求め、 $B(T)$ 関数として較正曲線を再度求めた。この較正曲線から放射率を求め、改善前と比較した結果、雲量の変化ではなく、温度変化に依存するような大気の放射率の変動を減少させることができた。

また、2008 年 3-8 月の雲モニタの光学的厚み ($\tau_{30\text{THz}}$) と、同じ ASTE サイトの環境モニタであるラジオメータ、MiSTI から測定された $\tau_{220\text{GHz}}$ 、 $\tau_{183\text{GHz}}$ とを比較した。比較結果から、MiSTI は常に水蒸気を、ラジオメータは晴天時 $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ の範囲では水蒸気を、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ では水蒸気と水滴を、雲モニタは $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の範囲では雲に含まれる水滴と氷をとらえていることが分かった。このような光学的厚みのデータ比較から、雲モニタを用いて電波での観測環境の調査が可能であると考えられる。曇の場合、雲モニタの画像データから雲量や雲の方向依存性を判断できる。これにより、ミリ波、サブミリ波の観測周波数の切り替えや、観測方向の選択など、その時点で少しでも良い条件での観測を行う判断材料になる。一方、晴天時は雲モニタから得られる大気的光学的厚みは変化しないため、ラジオメータや MiSTI から得られるデータから観測環境を判断する必要がある。そして、複数の周波数で観測が可能な ALMA での観測スケジューリングの判断材料としても期待できる。曇の場合、雲の影響の少ない低周波数での観測に切り替えるなど、雲モニタの画像データから天候に応じた観測計画を立てることが可能であると考えられる。

目次

第 1 章	序論	5
1.1	サブミリ波天文学	5
1.2	ASTE 望遠鏡とサイト環境調査モニタ	6
1.2.1	220GHz ラジオメータ	6
1.2.2	183GHz MiSTI (Millimeter Sky Transparency Imager)	7
第 2 章	赤外線雲モニタ	8
2.1	概要	8
2.2	光学系	8
2.3	赤外線カメラと取得される生画像データ	9
2.4	黒体温度標準に対する画像中のカウント数の変動	10
第 3 章	画像データの解析	12
3.1	画像合成	12
3.1.1	誤差領域のカット	14
3.1.2	異なる輝度応答設定データの換算	15
3.1.3	画像の合成	15
3.2	放射率の導出：一温度解析	16
3.3	較正曲線	19
3.3.1	較正曲線の改良	20
3.3.2	ASTE サイトで用いる較正曲線の微調整	24
第 4 章	画像データの解析結果	25
4.1	画像データの解析に用いたデータ	25
4.2	カメラの輝度温度の測定可能範囲	25
4.3	空の放射率 ϵ_{sky}	27
第 5 章	議論と考察	30
5.1	空の温度 (T_{sky}) の設定	30
5.1.1	$T_{\text{sky}} = T_{\text{REF1}} - T_x$ を仮定した解析	30
5.1.2	$T_{\text{sky}} = \text{一定}$ を仮定した解析	31
5.2	他波長データとの比較	32
5.2.1	雲モニタ (30THz) とラジオメータ (220GHz) データの比較	35
5.2.2	雲モニタ (30THz) と MiSTI(183GHz) データの比較	36
5.2.3	ラジオメータ (220GHz) と MiSTI(183GHz) データの比較	39
5.2.4	比較結果の考察	42
5.3	環境モニタの役割	43

第 6 章	まとめ	45
6.1	結論	45
6.2	今後の課題	46

第1章 序論

1.1 サブミリ波天文学

現在の宇宙観測は、天体から放射される様々な波長の電磁波を観測する。電磁波のなかでも、波長 0.1mm 以上の電波を観測するのが電波天文学である。さらに、電波の波長領域の中でも、波長 0.1-1mm のものをサブミリ波と呼ぶ。このサブミリ波領域で観測されるものとして、星が生まれる星間分子雲中に含まれる星間じん（ダスト）の熱放射や、星間分子雲中の分子の回転準位遷移に伴う放射が挙げられる。また、可視光ではとらえられない低温領域を観測でき、星間分子雲中の星形成過程、若い星周辺の原始惑星系円盤、銀河の形成過程などの研究で重要な波長領域である。一方で、サブミリ波観測は大気中の水の影響を受けやすい。雲などを形成する水滴（液相）、氷（固相）はサブミリ波を吸収する。さらに、干渉計を用いる観測では、大気中の水蒸気（気相）の不規則な分布によって、大気中の屈折率が変化し、電波経路長が揺らぐ。これが干渉計観測で出力されるビジビリティの位相の誤差の原因となり、位相ゆらぎと呼ばれる。よって、サブミリ波観測には水の影響の少ない、乾燥した場所が要求される。このようなサブミリ波観測に適した場所として、チリ高地、Pampa la Bola が挙げられる（図 1.1）。現在はサブミリ波望遠鏡「ASTE」、「NANTEN2」が設置されているほか、口径 12m のアンテナ 64 台を用い、最大基線長 10km で高分解能を実現できる、大型ミリ波・サブミリ波干渉計「ALMA」も建設中である。

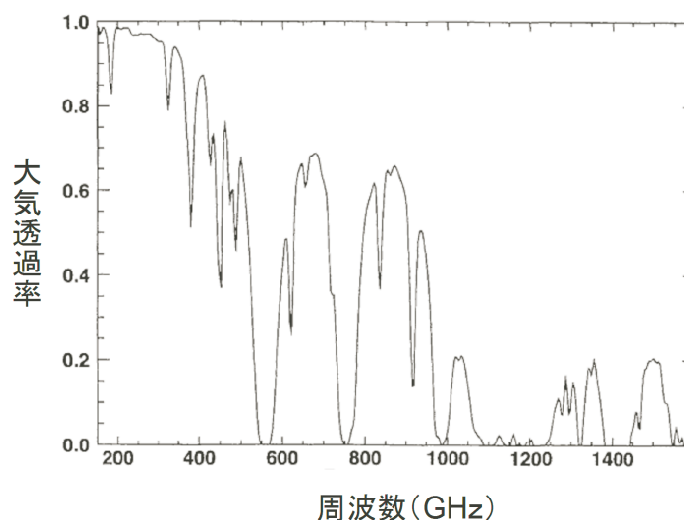


図 1.1: フーリエ分光器で測定された Pampa la Bola におけるサブミリ波大気透過率。(Matsuo et al.1998)

1.2 ASTE 望遠鏡とサイト環境調査モニタ

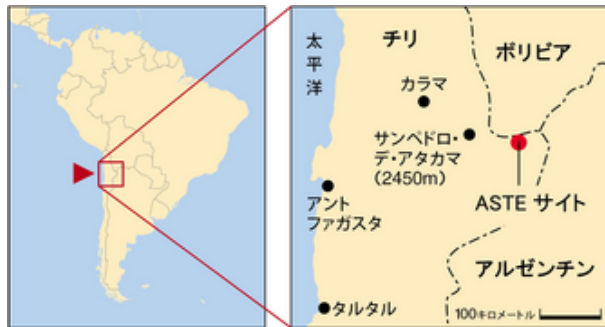


図 1.2: ASTE/ALMA サイト

<http://www.nro.nao.ac.jp/aste/abst/abstract.html>
より



図 1.3: ASTE 望遠鏡

ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 望遠鏡は口径 10m のサブミリ波望遠鏡で、チリ北部、標高 4800m のアタカマ砂漠に設置されている。サブミリ波天文学の推進と、観測装置や観測手法の開発の実証を目的として、2004 年から波長 0.87mm (周波数 350GHz) での本格的なサブミリ波天文観測が開始され、南天の天体を観測している。ASTE 望遠鏡はリモート観測で運用されており、観測者がいる遠隔地からでも望遠鏡サイトの気象や大気の状態を把握できる必要がある。そのため ASTE サイトには、サブミリ波の観測環境を調査するための複数の環境モニタが設置されており、赤外線雲モニタもその一つである。環境モニタの中でも、大気中の水 (気相、液相、固相) をとらえる観測装置として、赤外線雲モニタ、ラジオメータ、MiSTI が挙げられる。各装置の詳細については、赤外線雲モニタは §2.1、ラジオメータは §1.2.1、MiSTI は §1.2.2 で説明する。また、ASTE サイトの環境モニタは、ALMA の運用方法を検討するための基礎データを供給する装置としても期待されている。

1.2.1 220GHz ラジオメータ

220GHz ラジオメータは、国立天文台で開発され ASTE サイト南側のコンテナに設置されている。観測周波数 220GHz で 1 分毎に大気透過率を測定している。小口径のオフセットパラボラアンテナを用い、secZ 法により光学的厚み ($\tau_{220\text{GHz}}$) を算出する。secZ 法とは、天頂角 Z を変化させて数点を測定し、secZ に対する出力結果について回帰曲線を描くことで、天頂方向 $Z=0$ の時の光学的厚み $\tau_{220\text{GHz}}$ を求める方法である。



図 1.4: 220GHz ラジオメータ <http://www.nro.nao.ac.jp/alma/J/>より

1.2.2 183GHz MiSTI (Millimeter Sky Transparency Imager)

MiSTI は ASTE/ALMA におけるミリ波サブミリ波観測の絶対強度補正法の開発を目的とした小口径電波望遠鏡である。望遠鏡をスキャンすることで全天の大気中の水蒸気の放射を 183GHz でとらえ、大気の光学的厚み ($\tau_{183\text{GHz}}$) を測定する。1 時間に 1 回の頻度で、水蒸気分布の全天マップを取得している。

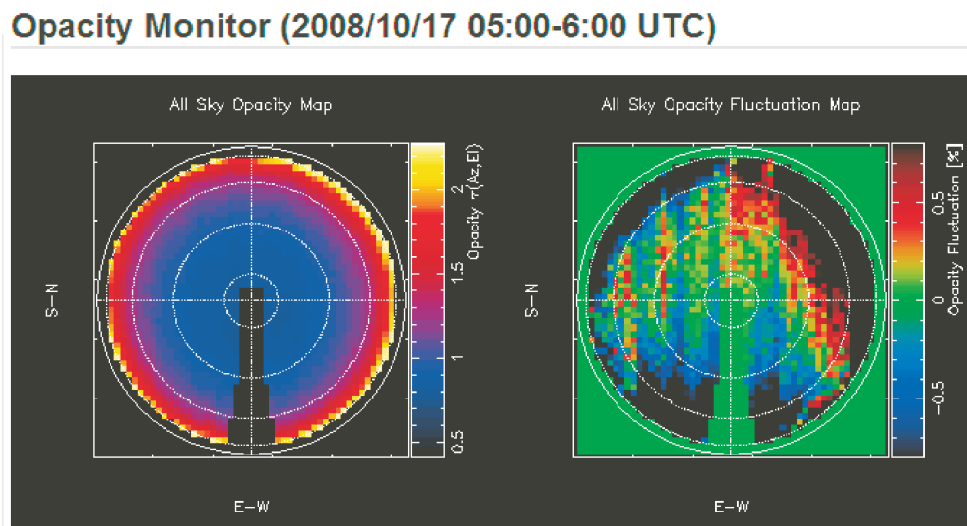


図 1.5: MiSTI のデータ。左図:光学的厚みの全天マップ。右図:光学的厚みのゆらぎ。

第2章 赤外線雲モニタ

サブミリ波観測において大気中の水による電波の吸収は観測環境を悪化させる原因となる。この章では、雲を観測するために開発された、赤外線雲モニタについて説明する。赤外線雲モニタは、直接水蒸気をとらえるものではないが、水滴や氷からなる雲をとらえることで、水蒸気の影響との関係を調査する。

2.1 概要

赤外線雲モニタは、大気中の雲の影響を調査する環境モニタとして開発され、2007年11月よりASTEサイトに設置され、稼動中である。波長 $8\text{--}12\mu\text{m}$ の中間赤外線で雲の熱放射を観測し、搭載された赤外線カメラの7つの輝度応答設定で、天頂角 $0\text{--}70^\circ$ の全天画像を連続的に撮像する。7つの画像データを1セットとし、これらを解析をすることで、現在(2009年2月)も大気の放射率を5分毎に求め、雲の分布の時間変動をモニターしている。以下では雲モニタと呼ぶ。



図 2.1: APEXサイトに設置された雲モニタ。後方の望遠鏡はAPEX望遠鏡。

2.2 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を使用し、副鏡などで遮へいされている領域は除いて天頂角 $0\text{--}70^\circ$ の範囲を観測することができる。主鏡の中央には中間赤外線透過

率の高いゲルマニウム (Ge) の入射窓がある (図 2.2)。8-12 μm のカメラ感度波長帯における Ge 窓の透過率は図 2.3 のとおりであり、本研究の解析においては 8-12 μm で平均した透過率の値 $\eta_{\text{Ge}} \approx 0.92$ を用いる。



図 2.2: 光学系。主鏡・副鏡ともに凸面鏡で赤外線反射率の高い金でコーティングされている。

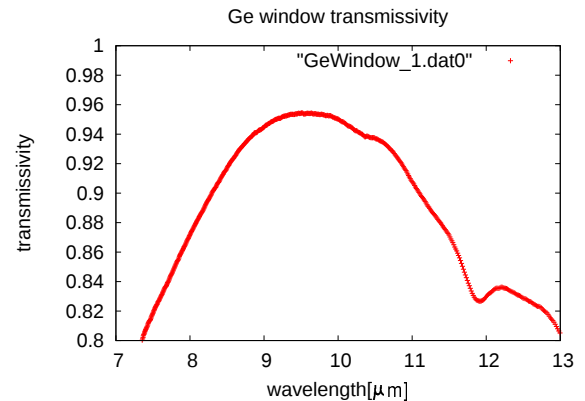


図 2.3: フーリエ分光器による Ge 透過率の測定結果。解析では波長 8-12 μm で平均した透過率の値 $\eta_{\text{Ge}} \approx 0.92$ を用いた。

2.3 赤外線カメラと取得される生画像データ

主鏡中央部の Ge 窓の下には、波長 8-12 μm の中間赤外線に感度を持つカメラが搭載されている。カメラの輝度応答は 41 段階で設定可能となっており、本論文ではその設定値を“BR”と記述する。BR は、カメラの絞りに相当するもので、入射する光量の調整を行う。- 20 - + 20 の整数であり、BR = + 20 が最も低輝度の変化に応答する設定 (絞りが開かれている) であるのに対し、BR = - 20 は最も高輝度の変化に応答する設定 (絞りが閉じられている) である。得られる生データは FITS 形式¹の画像データである。画素数は 220 × 220 で、各画素は 8bit 階調で 0-255 の値を持つ。複数の BR 設定で撮像し、画像をつなぎ合わせることでより広いダイナミックレンジの画像が合成可能となる。画像のつなぎ合わせについては、§3.1 で詳しく説明する。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。また、以下では画像中の各画素の値をカウント数と呼ぶ。

¹Flexible 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。

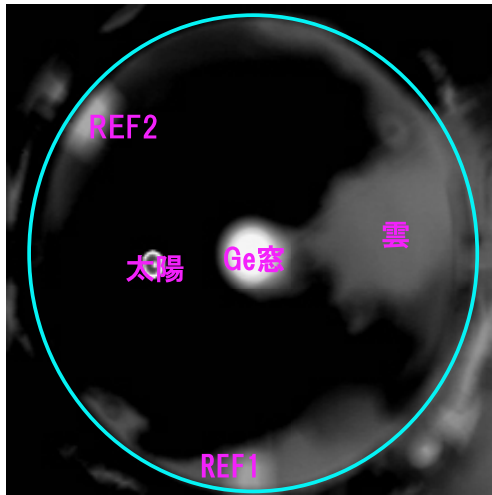


図 2.4: 2008 年 1 月 12 日 19:00 $BR=-10$ の画像データ

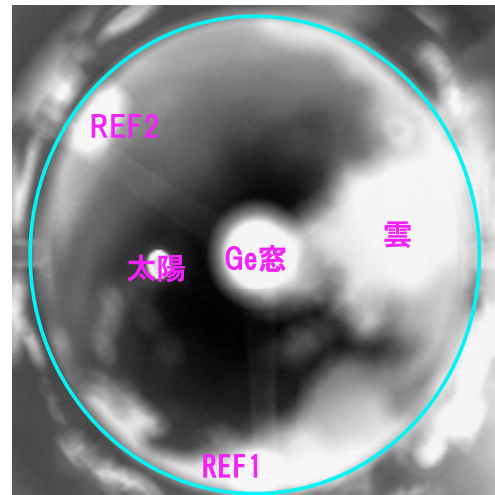


図 2.5: 2008 年 1 月 12 日 19:00 $BR=0$ の画像データ

図 2.4,2.5 は得られる画像データの例で、2008 年 1 月 12 日 19:00 の空を $BR = -10, 0$ の設定で撮像した画像である。白く見えるほど画像のカウント数が高く、黒く見えるほどカウント数は低い。1 枚の画像中においては、白部分の方が温度が高い。また、得られた画像データは、解析の際に画像合成を行い、最終的に放射率の次元の画像を生成する。

2.4 黒体温度標準に対する画像中のカウント数の変動

使用する赤外線カメラは非冷却カメラであるために、同じ条件 (撮像対象、 BR 設定) で撮像した場合でも、周囲の温度によって得られる画像の明るさが異なる (カメラのゼロ点揺らぎ)。このゼロ点揺らぎの補正のために、温度の異なる 2 つの黒体の主鏡脇に搭載されている (図 2.6)。REF1 の温度は周辺温度に等しく、REF2 はペルチェ素子により加熱されている。二つの黒体の温度差は常に 1-2 である。この黒体温度標準の熱放射を観測し、その出力カウント数を輝度の較正を行う際の基準点とする。

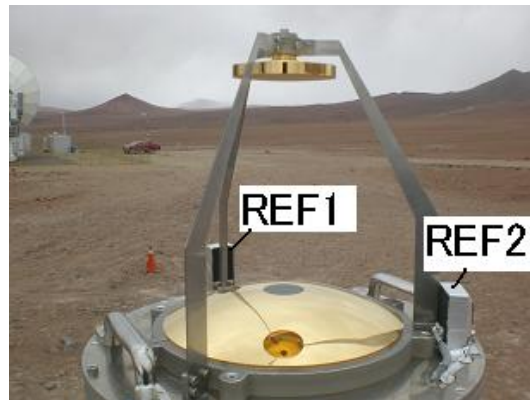


図 2.6: 2つの黒体温度標準。REF1は周囲と等温、REF2はペルチェ素子によって加熱されREF1より1-2 高温である。

黒体温度標準の温度に対するカウント数の精度を調べた。図 2.7 は 12 月と 3 月の REF1 の温度と画像のカウント数のグラフである。グラフから、REF1 のカウント数は温度だけに依存するのではなく、ばらつきが見られたり、黒体の温度が上がるにつれカウント数が下がるという傾向がある。これらがカメラの CCD のゼロ点揺らぎで、毎回の測定値で随時補正していくことが現実的であると示唆される。ゼロ点揺らぎの補正には、ここで得られた REF の温度とカウント数、§3.3 の較正曲線を用いる。詳しい方法は §3.2 で説明する。

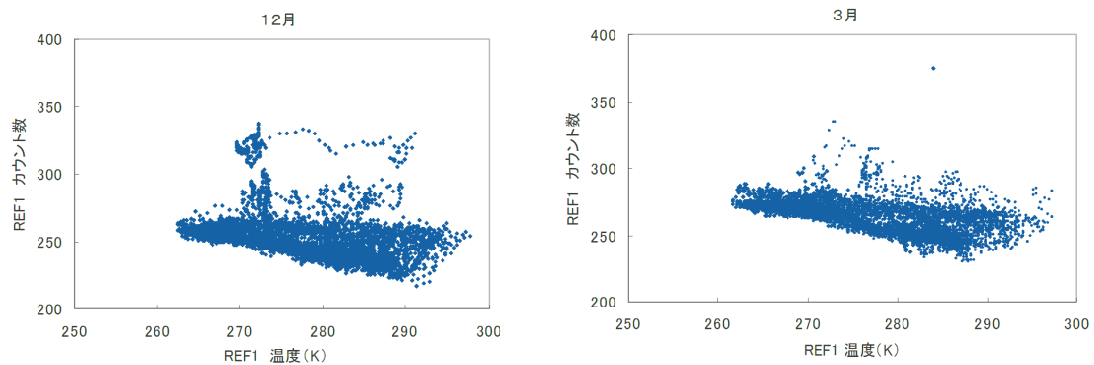


図 2.7: REF1 の温度とカウント数 (12,3 月)

第3章 画像データの解析

雲モニタの一度のデータ取得で得る生データは、7つの輝度応答 (BR) 設定で撮像された7枚の FITS 画像である。これらの画像を足しあわせ、雲モニタに搭載された黒体温度標準のデータと、実験より得られる較正曲線を用いて、大気の放射率を求めるまでの解析方法を説明する。

3.1 画像合成

一度のデータ取得では BR の設定値を変えながら7枚の画像を撮像する (図 3.1)。各 BR 設定の画像は数秒間隔で連続的に取られるため、各画像間の空の状態はほぼ変わらず、同じ雲の分布を撮像したと考える。すると、複数の輝度応答の画像を合成することで、1つの輝度応答でとらえられるものに比べ、より広いダイナミックレンジで雲をとらえることができる。ここでは生データとして得られた7枚の FITS 画像を一枚に合成する方法を詳述する。

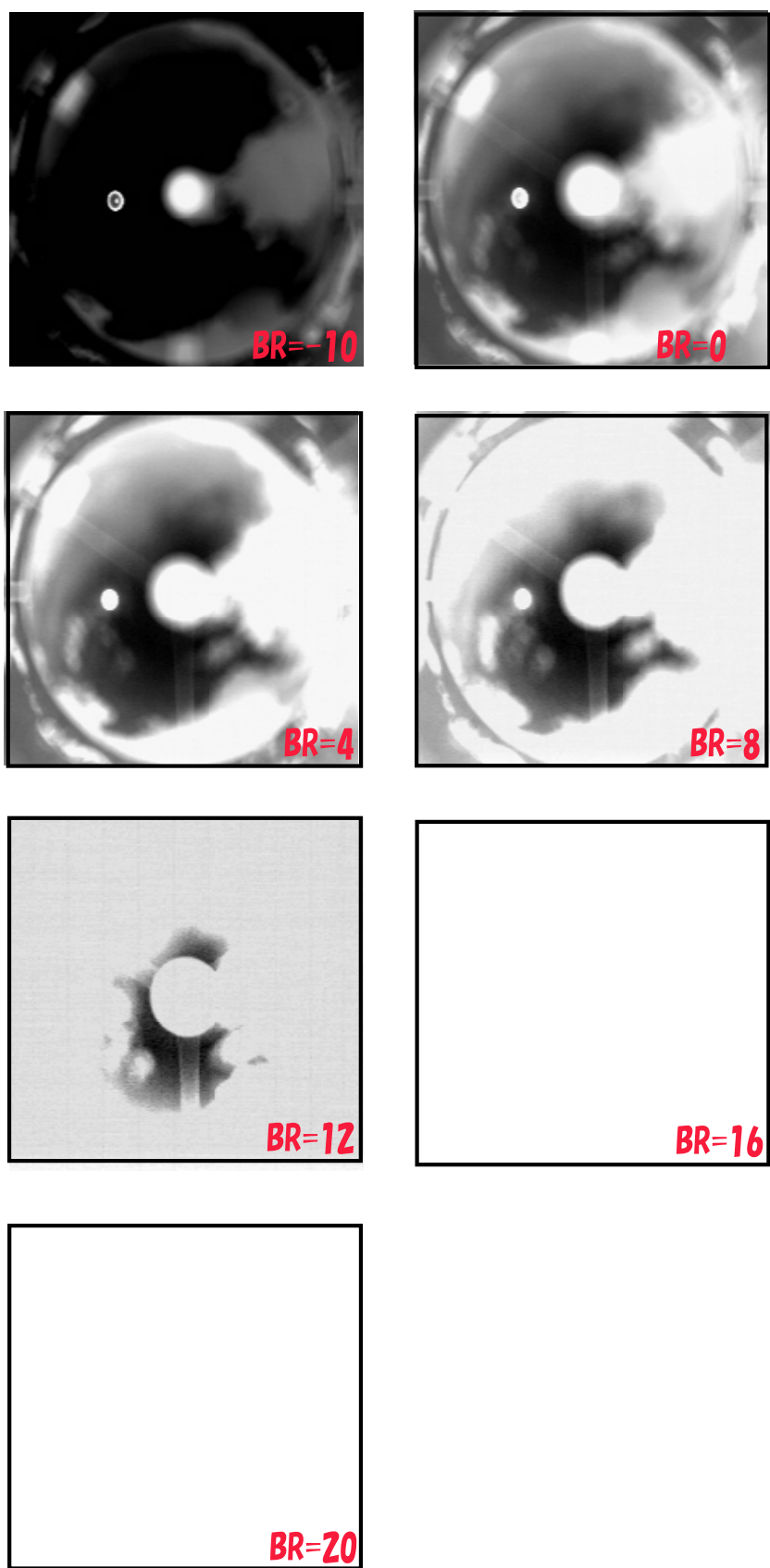


図 3.1: 7 つの輝度応答設定で得られた生の画像データ (2008 年 1 月 12 日 19:00)

3.1.1 誤差領域のカット

一枚の画像のダイナミックレンジは8ビット階調で、画像中の各画素は0-255の値で表される。しかし、撮像時の輝度感度ではとらえきれない、0以下や255以上に相当する値も、0または255の値として扱われている（図3.2）。このことから、0と255付近は信用できない値として、解析には使用しない。この使用しない領域を表すものとして、画像中で10以下と230以上の箇所は0、それ以外の箇所は1というマスクを作成した（図3.4）。このマスクを得られた生の画像データにかけることで、誤差の領域をカットした（図3.5）。

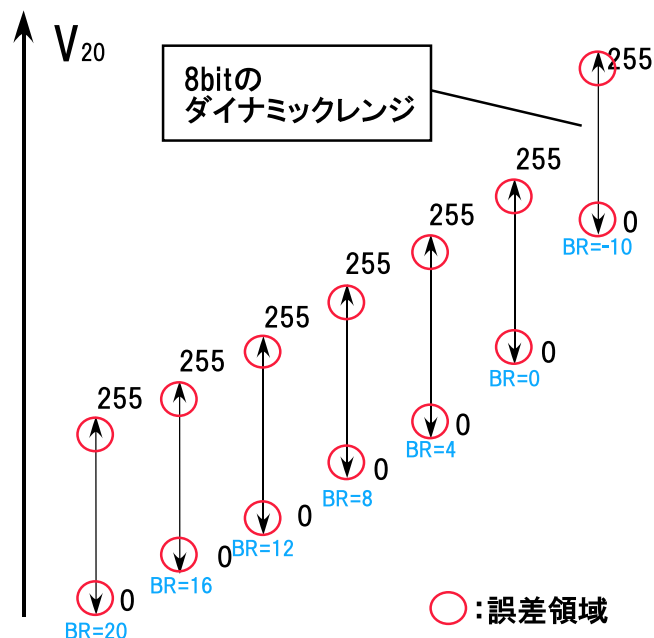


図 3.2: 各 BR 画像の誤差領域。 V_{20} は $offBR$ を適用し $BR=20$ を基準として換算したカウント数。

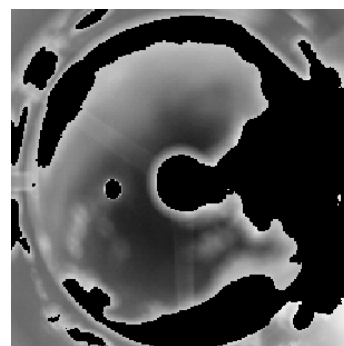
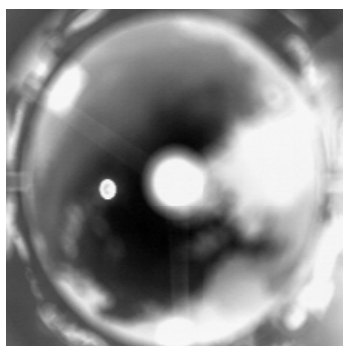


図 3.3: 生の画像データ ($BR=0$) 図 3.4: 0(黒部分),1(白部分) の値をもつマスク ($BR=0$) 図 3.5: 誤差領域カット後の画像
生のデータ × マスク ($BR=0$)

3.1.2 異なる輝度応答設定データの換算

各 BR 設定での画像を合成するためには、基準となる BR を定義し、各画像中のカウント数を基準にした BR 上での統一された値に換算する必要がある。本研究では $BR = 20$ を基準とし、換算後の値を V_{20} とする。 V_{20} への換算の際に “ $offBR$ ” というパラメータを用いる。このパラメータは、 BR の値を 1 変化させたときの、画像中のカウント数の変化量を表すものである。例えば、異なる輝度応答設定、 BR 、 $BR + 1$ で同じものを撮像したときのカウント数を $V(BR)$ 、 $V(BR + 1)$ とすると、 $offBR$ は、

$$offBR = \frac{V(BR + 1) - V(BR)}{(BR + 1) - BR} = V(BR + 1) - V(BR) \quad (3.1)$$

と表すことができる。このように表される $offBR$ は晴天画像や、様々な温度で黒体を撮像した各 BR 画像を用いて導出した。導出された $offBR$ を用いて、各 BR 設定で得られたカウント数を V_{20} に換算する。撮像時の BR 設定を BR 、カウント数を $V(BR)$ とすると、 $BR = 20$ に換算したカウント数 V_{20} は、

$$V_{20} = V(BR) + (20 - BR) \times offBR \quad (3.2)$$

で得られる。この値を用いて、各 BR 画像を扱う。各 BR 画像と $offBR$ の関係は図 3.6 に示した。

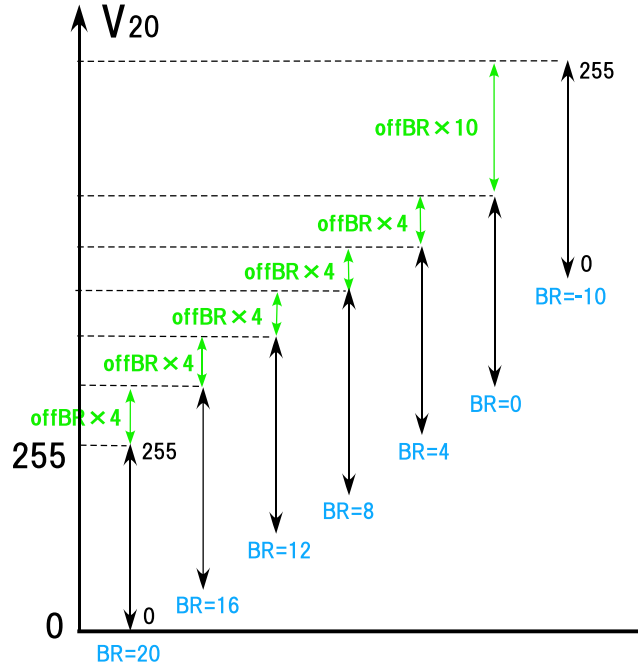


図 3.6: $offBR$ と各 BR 画像の関係

3.1.3 画像の合成

最後にこれまでに得た各 BR 設定の画像を足し合わせ、一枚のより広いダイナミックレンジの画像を作成する。ここで注意すべきことは、各画像のダイナミックレンジの範囲が重なっている点で

ある。換算後の値で表された各 BR 画像を単純に足してしまう (図 3.7) と、各画素によって複数回値を足し合わせてしまうことになるので、このようなことが起こらないよう、§3.1.1 誤差領域のカットで作成したマスク画像を用いる。このマスク画像は誤差領域として解析から省く画素を 0、解析に用いる画素を 1 とした画像だった。各 BR についてそれぞれマスクが作成されているので、これらのマスク画像をすべて足し合わせた値が、各 BR 画像を足し合わせる回数と等しい値となる (図 3.8)。足し合わせの手順としては、まず各 BR 画像を単純に足し合わせ、その後マスクの和の値で割る。そうすることで、各画素は足された回数分だけ割られ、画像の合成を正確に行うことが可能である (図 3.9)。ここで、ある時刻におけるより広いダイナミックレンジの画像が 1 枚作られる。この画像をもとに放射率分布の導出やより定量的な解析を進めていく。

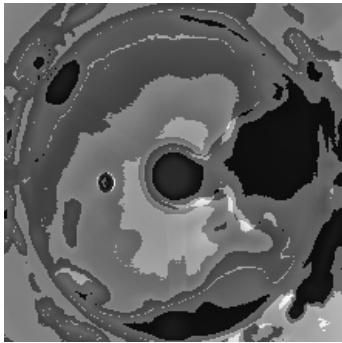


図 3.7: 足し合わせたデータ ($BR = 20$)

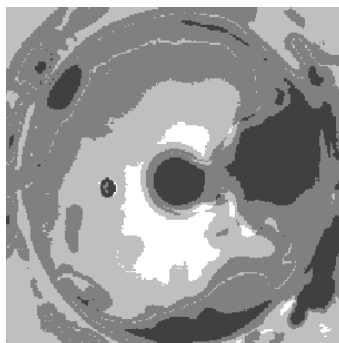


図 3.8: 足した回数の値を持つマスク。0-6 の値をもつ。

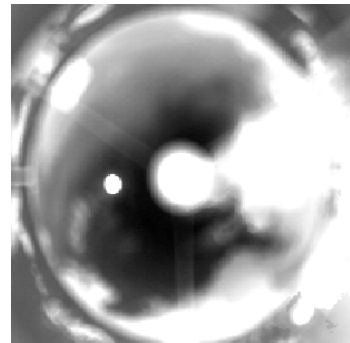


図 3.9: データ和/マスク和 ($BR = 20$)

3.2 放射率の導出：一温度解析

各 BR 画像の合成から得られた広いダイナミックレンジ画像と、較正曲線 $V_{\text{exp}}(B)$ から大気の放射率を求める方法を述べる。

一温度解析は、2 つある黒体温度標準のうち、周囲の温度と等温の REF1 のみを用いた解析方法である。得られた合成画像は $BR = 20$ を基準としたカウント数 V_{20} に換算されている。しかし、§2.4 にもあるように雲モニタに搭載されているカメラは、同じ BR 設定で同じものを撮影しても、異なる V_{20} をとる。 $V_{20} = 0$ と対応する輝度の値をゼロ点と呼ぶとすると、このゼロ点は撮像する度に変化してしまう (ゼロ点揺らぎ)。よって、常に一定のゼロ点を基準とした V_{20} に補正する必要がある。そこで用いるのが、雲モニタの鏡面のわきに搭載されている黒体温度標準と、画像の輝度の較正のための較正曲線である。この曲線は、実験室内で黒体の温度を変化させ、画像中の黒体の検出値 ($BR = 20$ の値に換算したもの) を測定した実験結果から導出したもので、これを基準として実際に ASTE サイトで得られるデータのゼロ点揺らぎの補正を行う。例えば、黒体温度標準が温度 T で黒体の輻射エネルギー $B(T)$ の時、較正曲線から予想されるカウント数と、実際の画像のカウント数の差を求め、画像全体からその値を差し引く。こうすることで、各画像は常に一定のゼロ点に基づく値をとることになり、カメラのゼロ点揺らぎを補正できる。また、この作業を行う際、影響はわずかではあるが Ge 窓の放射も考慮する。以下では、放射率導出までの手順を示す。用いるパラメータについては表 3.1、図 3.10 にまとめた。

表 3.1: 各種パラメータとその意味

変数	定義
$V_{\text{exp}}(B(T))$	実験室で得られた黒体の輻射エネルギー ($B(T)$) と画像のカウント数 (V) 特性を、 $B(T)$ の 1 次関数として得た較正曲線。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値 ($BR = 20$ 基準の値)。
$V'_{\text{exp}}(B(T))$	ASTE サイトでの晴天画像を用いて $V_{\text{exp}}(B(T))$ のゼロ点を補正した輻射エネルギー ($B(T)$)-画像のカウント数 (V) 特性。ASTE サイト使用する較正曲線。詳細は後述する。
$V_{\text{pred}}(B(T))$	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数。
V_{REF}	実際の黒体標準のカウント数 ($BR = 20$ 基準の値)。
V_{sky}	実際の空 (雲) のカウント数 ($BR = 20$ 基準の値)。
ΔV	$V_{\text{exp}}(B(T))$ を基準にしたゼロ点補正の項。カメラの内的要因によるゼロ点揺らぎの補正パラメータ。
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}	大気 (雲) の放射率。
T_{REF} T_{sky} T_{Ge}	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_{REF1} のみなので、計算の際は Ge 窓の温度も外気温とほぼ等しく ($T_{\text{Ge}} \approx T_{\text{REF1}}$)。さらに地上温度と空の温度もほぼ等しい ($T_{\text{sky}} \approx T_{\text{REF1}}$) と近似。

以下では、

$$V(B(T_x)) = V(B_x) \quad (3.3)$$

と表現する。例えば、

$$V_{\text{exp}}(B(T_{\text{sky}})) = V_{\text{exp}}(B_{\text{sky}}) \quad (3.4)$$

である。

放射率導出の具体的な手順としては、はじめに黒体温度標準の温度から受かると予想される値 $V_{\text{pred}}(B_{\text{REF1}})$ を計算する。次に、ASTE サイトにおける較正曲線 $V'_{\text{exp}}(B)$ から求められる、REF1 の予想される値は、Ge 窓も考慮すると、

$$V_{\text{pred}}(B_{\text{REF1}}) = (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{REF1}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(B_{\text{Ge}}) \quad (3.5)$$

と表される。次に、実際に取得した画像データ中の REF1 の検出値と、予想される値の差 ΔV を求める。

$$\Delta V = V_{\text{REF1}} - V_{\text{pred}}(B_{\text{REF1}}). \quad (3.6)$$

求めた ΔV を空の画像 (V_{sky}) 全体から差し引くと、

$$V_{\text{sky}} - \Delta V = V_{\text{sky}} - V_{\text{REF1}} + V_{\text{pred}}(B_{\text{REF1}}) \quad (3.7)$$

$$= V_{\text{sky}} - V_{\text{REF1}} + (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{REF1}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(B_{\text{Ge}}) \quad (3.8)$$

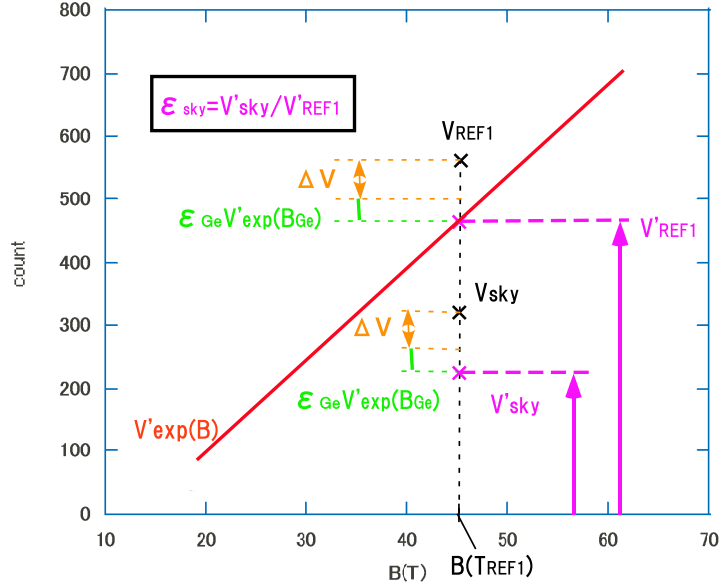


図 3.10: 一温度標準による解析。横軸 $B(T)$ 、縦軸 V_{20}

ここで、式 (3.5) と式 (3.7) より式 (3.8) をえた。

一方、空の温度の黒体輻射エネルギーから予想される空の値は、

$$V_{\text{sky}} - \Delta V = \epsilon_{\text{sky}}(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{sky}}) + \epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(B_{\text{Ge}}) \quad (3.9)$$

となるので、式 (3.8)=式 (3.9) とおき、両辺から $\epsilon_{\text{Ge}}V'_{\text{exp}}(B_{\text{Ge}})$ を差し引くと、

$$V_{\text{sky}} - V_{\text{REF1}} + (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{REF1}}) = \epsilon_{\text{sky}}(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{sky}}) \quad (3.10)$$

となる。この両辺を $(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{sky}})$ で割ることにより、 ϵ_{sky} が求められる。つまり、 ΔV と Ge 放射を差し引いた画像を $(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{sky}})$ で割ることで放射率の次元の画像が得られる。しかし、実際には $T_{\text{Ge}}, T_{\text{sky}}$ の測定は困難なため、どちらも T_{REF1} と等しいと仮定 ($T_{\text{sky}} \approx T_{\text{Ge}} \approx T_{\text{REF1}}$) して計算する。すると式 (3.10) から、

$$\epsilon_{\text{sky}} = \frac{V_{\text{sky}} - V_{\text{REF1}} + (1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{REF1}})}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{REF1}})} \quad (3.11)$$

$$= 1 - \frac{V_{\text{REF1}} - V_{\text{sky}}}{(1 - \epsilon_{\text{Ge}})V'_{\text{exp}}(B_{\text{REF1}})} \quad (3.12)$$

が得られる。式 3.12 から分かるが、放射率の導出には、 $V_{\text{REF1}} - V_{\text{sky}}$ という差を用いて計算を行うため、ゼロ点揺らぎ ΔV の影響を受けないで計算できるような解析法である。また、式 3.12 で得られた画像は放射率の次元をもち、0-1 の値をとる。この画像全体に 255 をかけて 8bit の画像を作成したものが図 3.11 で各画素は 0-255 の値をとる。最後に空以外の領域にマスクをかけて最終的なモニター画像を生成する (図 3.12)。

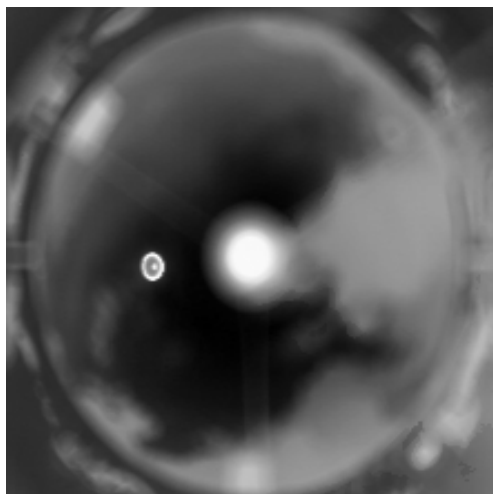


図 3.11: 放射率の次元の画像

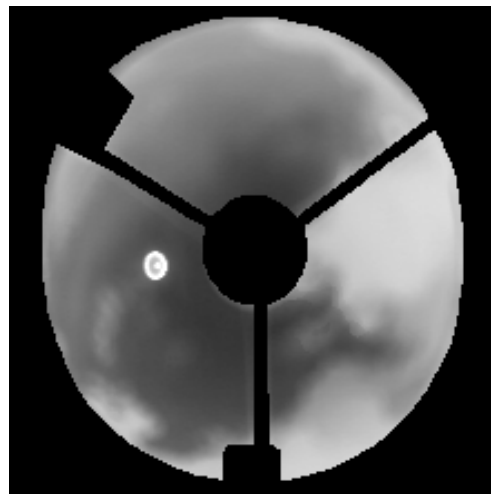


図 3.12: マスクをかけた放射率の次元の画像

3.3 較正曲線

較正曲線を導出する際に用いる元データは、実験室内で黒体の温度を変化させて撮像した画像データのカウンタ数 ($BR = 20$ の値に換算した V_{20}) である。これを基準として、実際に ASTE サイトで得られる画像データのゼロ点揺らぎの補正を行う。手順としてはまず、実験室内で得られた黒体の輻射エネルギー $B(T)$ とカウンタ数 V_{20} のデータ点を取り、曲線化する。これにより、任意の $B(T)$ の関数として実験室における較正曲線 $V_{\text{exp}}(B)$ を得る。次に晴天画像を用いて ASTE サイトで扱う較正曲線 $V'_{\text{exp}}(B)$ への補正を行う。実験では、高温部 ($40 - 60$) では各温度に設定した黒体炉を、低温部 ($-20 - +20$) では銅製容器に入れたドライアイス撮像した。ここでは、黒体が各温度で 10-230 のカウンタ数をとる画像になるよう、適切な BR 設定で撮像し、得られた画像データは異なる BR 設定であるので、 $offBR = 15$ として $BR = 20$ の値 V_{20} に換算する。換算した値から較正曲線を導出するが、2007 年 11 月以降の解析に用いていた較正曲線は、温度 T の関数として求めていた。しかし、 $8-12\mu\text{m}$ の中間赤外線では、大気の温度に近い 300K 程度の場合のプランク関数はウィーンの変位則付近となるため、プランク関数が温度に比例するというレイリー・ジーンズ近似が適用できず、温度は黒体輻射のエネルギーに比例しない。そのため、画像データのカウンタ数は温度の関数ではなく、輻射エネルギーの関数に改善する必要があった。そこで、黒体の温度 T で波長 $8-12\mu\text{m}$ の範囲に含まれる輻射エネルギー $B(T)$ をプランク関数から求め、 $B(T)$ 関数として較正曲線を再度求めた。

3.3.1 較正曲線の改良

改良前の較正曲線は、ある温度 T の黒体があるカウント数で測定されるとして、次のように導出されていた。まず、実験室内において、黒体を複数の温度に変化させて撮像し、温度に対するカウント数を読み取る。次に、雲モニタには Ge 窓があるので、ここでは Ge 窓の放射率 ($\epsilon_{\text{Ge}} \approx 0.08$) を考慮し、Ge 窓を使用しない場合のカウント数を計算から求め、プロットした。プロットした結果を温度の関数で最小二乗法でフィッティングし、温度 T の関数として Ge 窓不使用時の較正曲線 $V_{\text{exp}}(T)$ を導出した (木村 渉 修士論文 2007)。図 3.13 はその結果で、 $V_{\text{exp1}}(T)$ は 8 次、 $V_{\text{exp2}}(T)$ は 5 次の関数フィッティングより得た較正曲線である。これまでの解析では、 $V_{\text{exp2}}(T)$ を用いていた。

$$V_{\text{exp2}}(T) = V_0 + aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 + eT^5 \quad (3.13)$$

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

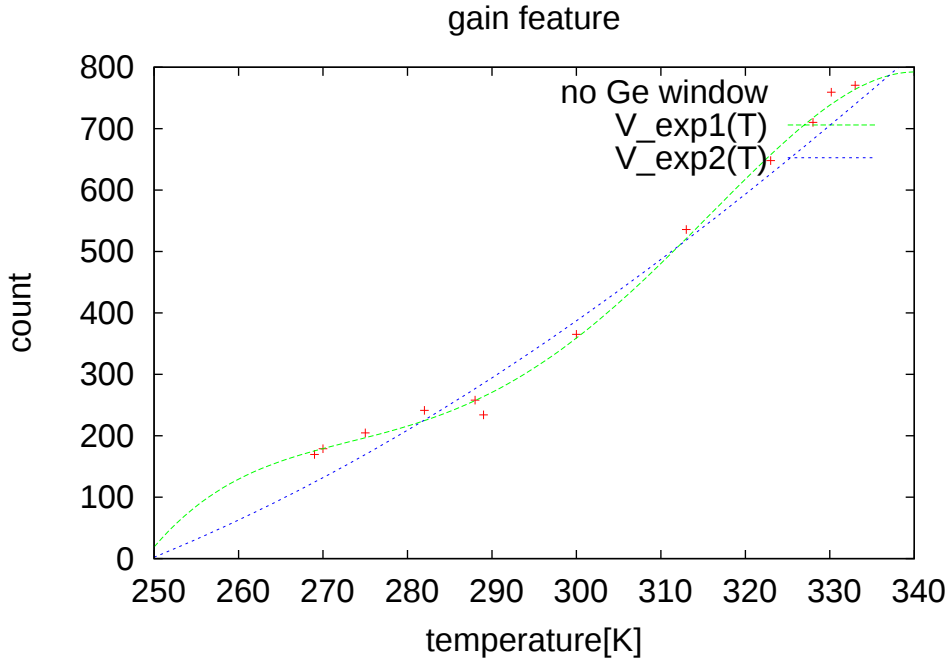


図 3.13: 温度の関数として求めた較正曲線 $V_{\text{exp1,2}}(T)$

しかし、上記の方法では、 $V_{\text{exp2}}(T)$ を実験測定点から任意の T の関数として較正曲線を求める際に、仮定する関数形によって結果として得られる大気の放射率に大きな差が生じてしまうという問題点があった。

そこでより自然な仮定として、温度 T に対するカウント数ではなく、温度 T で波長 $8\text{-}12\mu\text{m}$ の範囲に含まれる黒体の輻射エネルギー $B(T)$ の関数として較正曲線を求めた。ここで $B(T)$ は、

$$\begin{aligned} B(T) &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_{\lambda} d\lambda \\ &= \int_{8\mu\text{m}}^{12\mu\text{m}} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \{\exp(hc/\lambda kT) - 1\}^{-1} d\lambda \end{aligned} \quad (3.14)$$

で表すことができる。 $B(T)$ の単位は $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1}]$ 、 h はプランク定数、 c は光速、 λ は波長、 k はボルツマン定数である。ただし、雲モニタには Ge 窓がついているので、Ge 窓の放射 ($\epsilon_{\text{Ge}} = 0.08$) も考慮する必要がある。すると、カメラが受ける輻射エネルギー $B(T)$ は

$$B(T) = 0.92B(T_{\text{sky}}) + 0.08B(T_{\text{Ge}}) \quad (3.15)$$

と表せる。ここで T_{sky} は空の温度 (K)、 T_{Ge} は Ge 窓の温度 (K) とし、実験時の室温は 27°C であったので、 $T_{\text{Ge}} = 300(\text{K})$ として計算した。これより求められた $B(T)$ の値とカウント数をプロットした。

表 3.2: カメラの受ける黒体放射に対するカウント数

黒体の温度 T_{sky} (K)	$B(T)$	カウント数 (V_{20})
257.15	18.72	47
259.15	19.42	57
265.15	21.63	86.6
273.15	24.88	159
288.15	31.90	285.5
299.15	37.85	365
313.15	46.45	524
323.15	53.29	627
328.15	56.94	681
333.15	60.74	740

すると、カウント数は実は $B(T)$ にほぼ比例する形で得られていたことが明らかになった。そして、プロットの結果から 1 次の関数で回帰曲線を描き (図 3.14)、以下の係数を得た。

$$V_{\text{exp}}(B) = V_0 + aB(T) \quad (3.16)$$

$$V_0 = -261.27$$

$$a = 16.633$$

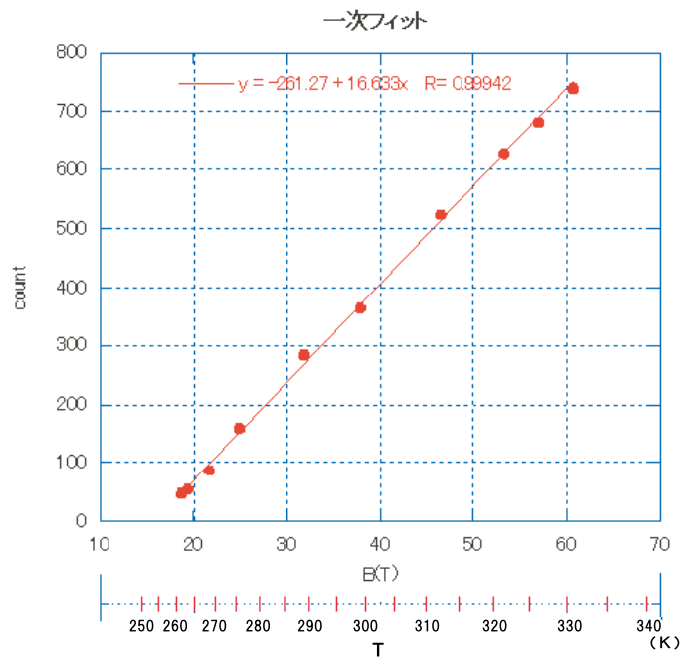


図 3.14: 1 次関数の回帰曲線を求めたグラフ

上記の方法で求めた 2 つの較正曲線のどちらがより適切かを探るため、2007 年 12 月 2-9 日のデータを用いて一温度標準解析より大気放射率を求め、比較した結果を図 3.15 に示す。赤線は温度の関数として求めた較正曲線 $V_{\text{exp}}(T)$ 、青線は輻射エネルギーの関数として求めた較正曲線 $V_{\text{exp}}(B(T))$ を用いて放射率を導出した。全体としては放射率の最大値、最小値に大きな差はない。しかし、 $V_{\text{exp}}(B(T))$ から導出した放射率は、 $V_{\text{exp}}(T)$ の結果に比べて雲量の変化ではなく、1 日の温度変化 (図 3.16) に依存するような放射率の変動を減少させることができた。特に 12/4 以降の毎日 12:00(UTC) 以降の放射率の結果において顕著に表れている。よって、較正曲線は $B(T)$ の関数として求めた方が、より適切であると判断し、本研究の解析では、輻射エネルギー $B(T)$ の関数として求めた較正曲線を用いる。

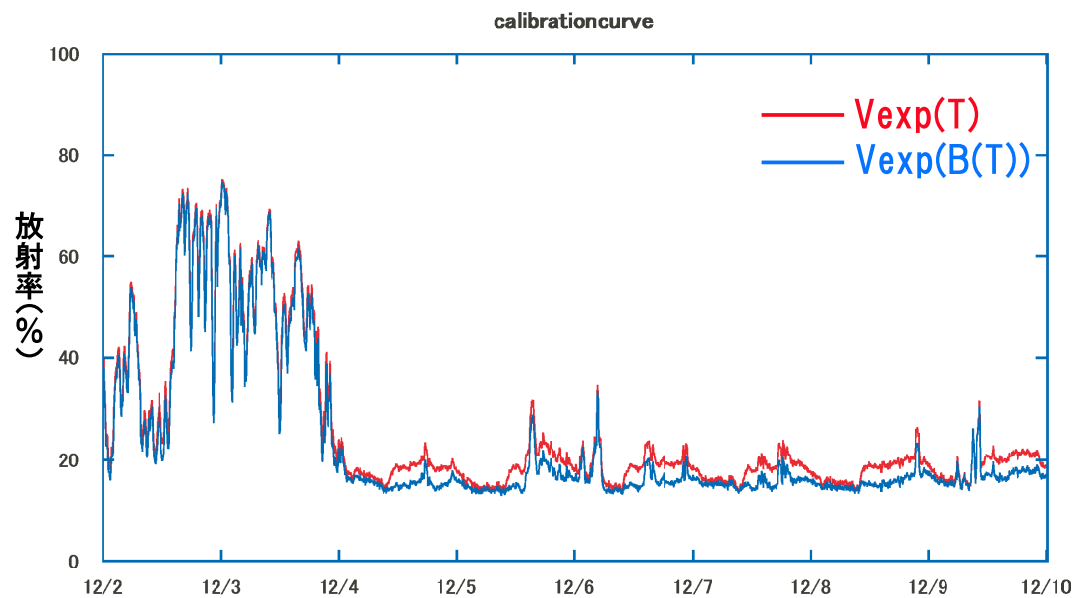


図 3.15: 較正曲線の違いによる大気放射率の違い。横軸は世界標準時 (UTC) で表示している。チリ時間は (標準時 - 4 h)

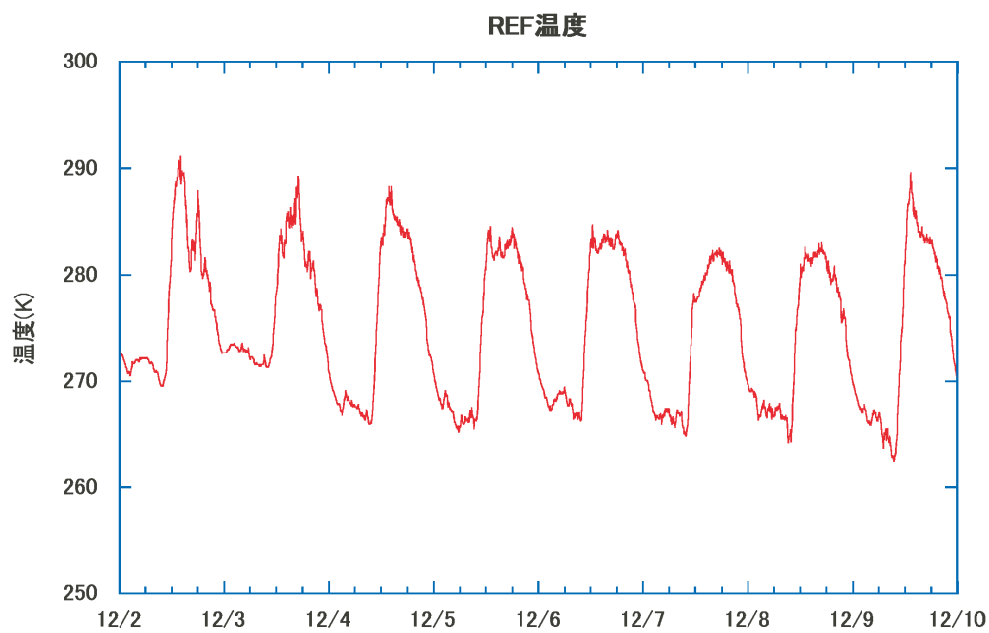


図 3.16: REF の温度変化。横軸は世界標準時。この時期のチリの日の出 - 11:30、日の入り - 21:35(UTC)

3.3.2 ASTE サイトで用いる較正曲線の微調整

ASTE サイトにおける解析では、導出した $V_{\text{exp}2}(B)$ をさらに補正した $V'_{\text{exp}}(B)$ を較正曲線として用いている。これは、平行平板大気モデルを仮定した時、晴天時のある二方向の放射率から求めた光学的厚みの比がもっともらしい値をとるよう補正する方法である。平行平板大気モデルとは図 3.17 のように本来は球面である大気を、平板であると仮定したものである。

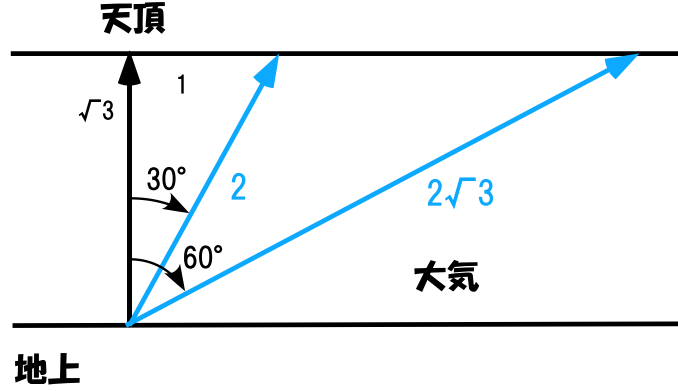


図 3.17: 平行平板大気モデル 天頂角方向の大気の厚みの比

はじめに、晴天時の解析画像から天頂角 30° と 60° の方向の放射率 $\epsilon_{\text{sky}}(30), \epsilon_{\text{sky}}(60)$ の値を読み取る。次に、それぞれの放射率を光学的厚み τ_{30}, τ_{60} に換算する。この換算では、放射率と光学的厚みの関係式、

$$\tau = \ln \left(\frac{1}{1 - \epsilon_{\text{sky}}} \right) \quad (3.17)$$

を用いる。ここで得た光学的厚みは、平行平板大気モデルを仮定した時、

$$\sqrt{3} \times \tau_{30} - \tau_{60} = 0 \quad (3.18)$$

という関係が成り立つはずであるが、実験室で得た $V_{\text{exp}}(B)$ から求めた光学的厚みはこれを満たさない。よって、この関係式を満たす放射率の結果が出るよう、較正曲線を補正する。 $V'_{\text{exp}}(B)$ 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 の値を求めた。つまり、

$$V'_{\text{exp}}(B) = MV_{\text{exp}2}(B) + \alpha \quad (3.19)$$

$$= V_{\text{exp}2}(B) + \alpha \quad (3.20)$$

として α を求めて、 $V_{\text{exp}2}(B)$ に α を加えることで、実際に解析に用いる較正曲線 $V'_{\text{exp}}(B)$ を得る。

第4章 画像データの解析結果

輻射エネルギーの関数として求めた較正曲線 $V_{\text{exp}}(B(T))$ を用いて画像データの解析を行い、大気の放射率を導出した。本章では解析に用いたデータの期間、カメラが測定できる輝度温度の範囲、長期的な大気の放射率の導出結果について説明する。

4.1 画像データの解析に用いたデータ

雲モニタのデータは、ASTE サイトの停電などで欠けている期間はあるものの、2007 年 11 月の稼働時から、現在 (2009 年 2 月) もデータを取得し、蓄積している。蓄積されたデータから、較正曲線の導出時の比較 (図 3.15) には 2007 年 12 月 2-9 日、解析には乾燥しサブミリ波観測に適したチリの秋から冬にあたる 2008 年 3-9 月のデータを用いた。

- * データを用いた期間：2007/12/2 - 9、2008/3/4 - 9/30
- * 欠測期間：2008/6/4 18:20 - 6/7 16:00 , 7/15 8:05 - 20:30 , 8/6 14:35 - 8/7 18:25
- * 注意事項：2008/5/5,9/6 は雲モニタ鏡面の清掃を行った。
清掃前後で約 10 %の放射率の低下が見られた。

4.2 カメラの輝度温度の測定可能範囲

測定した空の放射率の変化には、大気の変化だけでなくカメラ自体の特性も影響する。そのため大気の放射率について議論や考察を進める前に以下のようなカメラの特性を調査した。

カメラの輝度応答設定 (BR 値) は $BR = -20 - +20$ の 41 のレベル設定が可能で、 $BR = +20$ が最も低輝度の変化に応答し、 $BR = -20$ が最も高輝度の変化に応答する。この BR 設定の範囲は、輝度温度でどれくらいの温度範囲を撮像できているのかを見積もった。各 BR 画像は 8bit 階調で 0-255 の値を取り、異なる BR 画像のカウント数の V_{20} への換算パラメータ $offBR = 15$ とした時、 $BR = -20 - +20$ で測定できるカウント数 V_{20} は、0-855 の値をとる。式 (3.16) の較正曲線から得られるカウント数は、 V_{20} の値であるので、 $V_{\text{exp}}(B) = 0-855$ が雲モニタで測定可能なカウント数であり、輝度温度の範囲で表現することができる。まず、式 (3.16) より、 $V_{\text{exp}}(B) = 0-855$ の値をとる $B(T)$ の範囲を求める。次に、式 (3.14) より、得られた $B(T)$ の範囲に対応する温度の範囲を求める。これにより、雲モニタで測定可能な輝度温度の範囲は、 $T = 253-338(\text{K})$ であることが分かった。また、現在は $BR = (-10 - +20)$ に設定されているので、黒体としては $T = 253-327(\text{K})$ が雲モニタの測定可能な輝度温度範囲である。

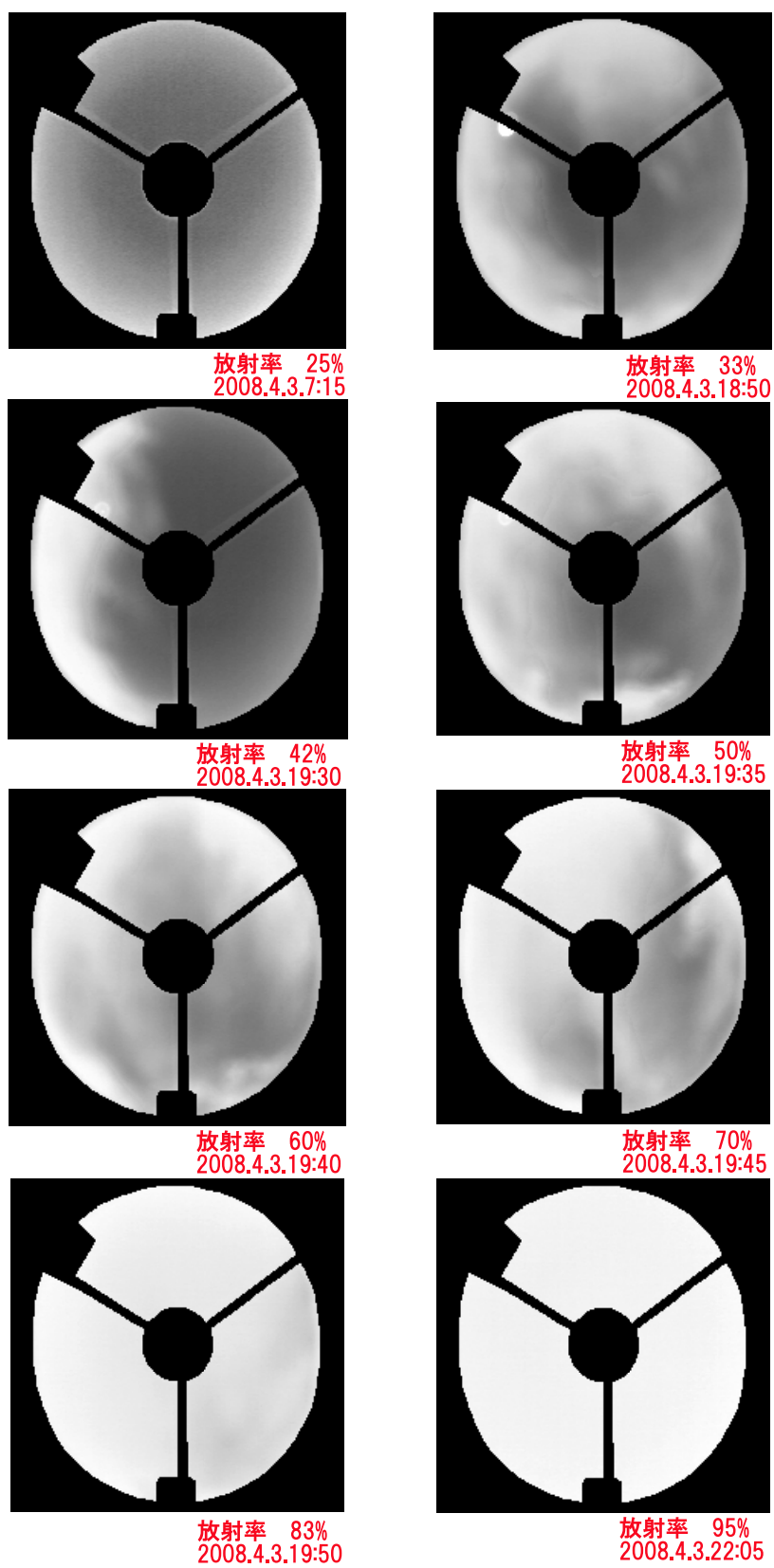


図 4.1: 雲モニタでとらえた典型的な空の様子と放射率との対応

4.3 空の放射率 ϵ_{sky}

一温度解析により、チリの秋から冬にあたる 2008 年 3-9 月の雲モニタのデータから ASTE サイトにおける空の放射率を求めた。解析では放射率の次元の画像データを作成するので、画像の各画素ごとに放射率を求められるが、ここでは画像中の天頂方向（天頂角 $Z = 0 - 30^\circ$ ）に相当する範囲の放射率の平均値を求め、その画像の放射率として扱う。図 4.1 は雲モニタで得られた放射率の次元の画像と、天頂方向の放射率の平均値との対応を示したものである。晴天時の放射率は約 20 % 前後の値をとる。晴天時にも常に測定される約 20 % の放射率は、上空のオゾンの放射をとらえていると考えられる。放射率 30 % を超えると雲が出現し始め、60 % を超えたあたりからはモニタ画面全体が雲に覆われる。また、図 4.2-4.8 は月ごとの放射率の時間変動をプロットしたものである。

解析を行った 3-9 月はチリの秋～冬の時期で、4 月以降は晴天の日が多く、特に 7-9 月は、他の月に比べ晴天が多い。図 4.1 左上は晴天画像であるが天頂角が大きくなるにつれ値が大きく（白く）なっているのが分かる。これは図 3.17 の平行平板大気モデルを仮定したとき、天頂角が大きくなるにつれ、大気の厚みも増し、放射率が大きくなるからである。また、5 月 5 日（図 4.4、4.8）、9 月 6 日に見られる放射率の変化は鏡面の清掃によるもので、前後で 10 % ほど放射率が低下した。清掃後の値は 12 月前半の値（雲モニタが稼動し始めた時期）と同程度となっており、鏡面にほこりが徐々に積もり、晴天時の放射率が高くなっていく様子が分かる。

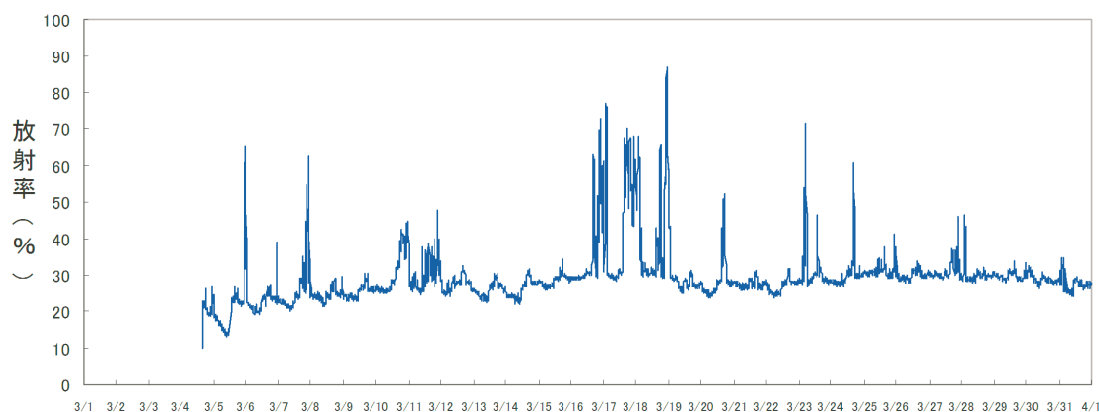


図 4.2: 3 月の放射率の変化

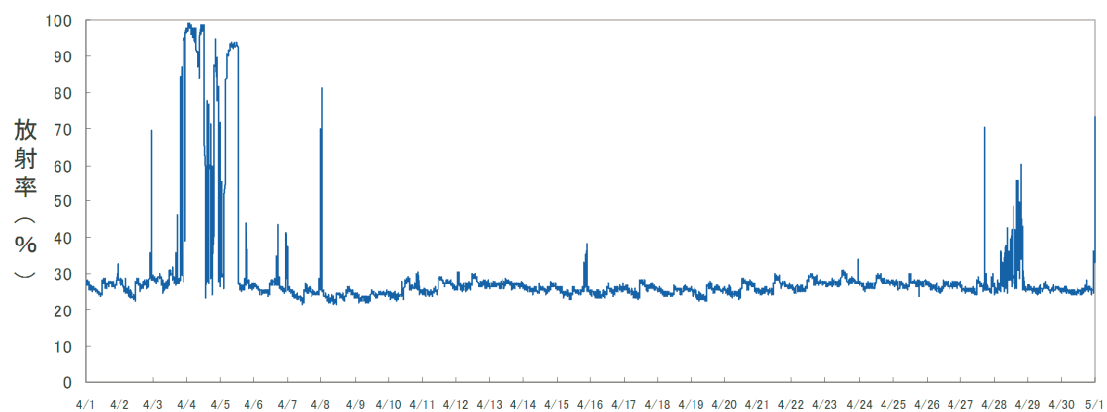


図 4.3: 4 月の放射率の変化

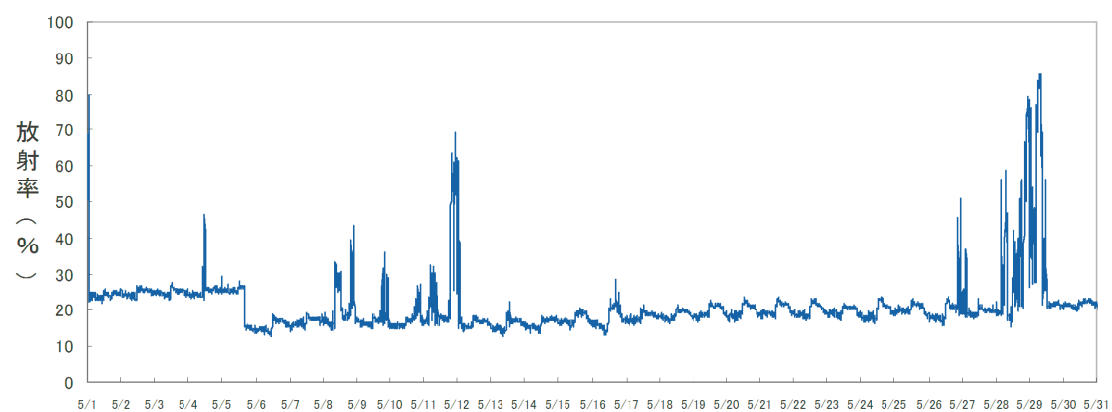


図 4.4: 5 月の放射率の変化

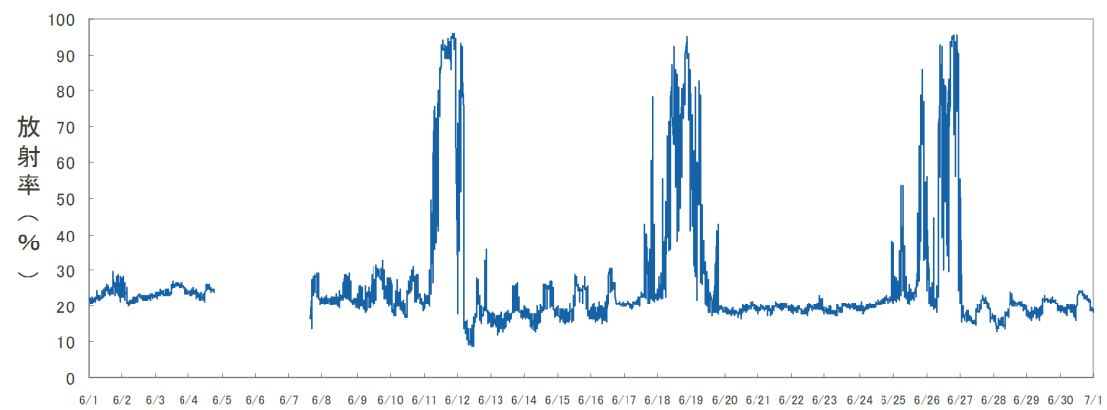


図 4.5: 6 月の放射率の変化

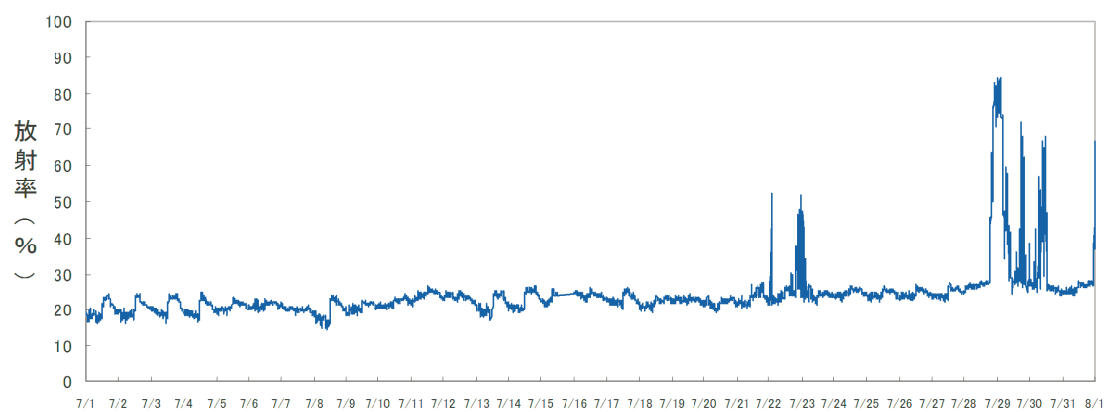


図 4.6: 7月の放射率の変化

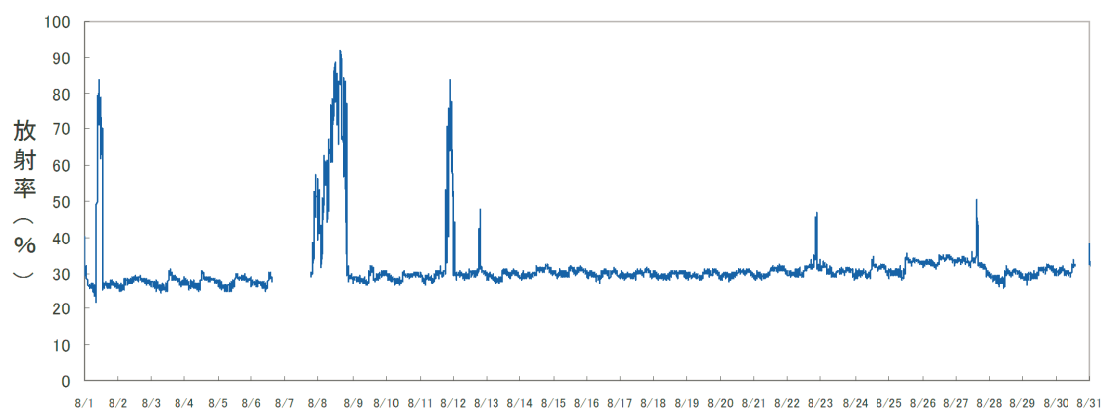


図 4.7: 8月の放射率の変化

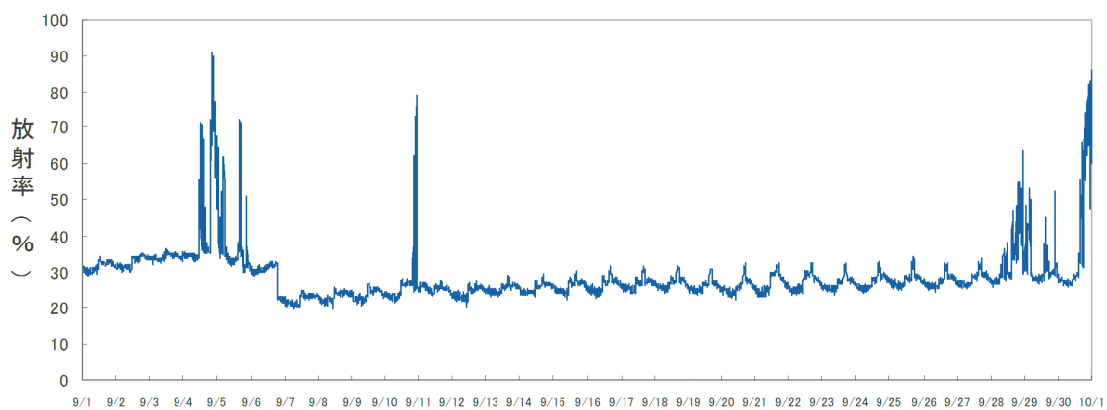


図 4.8: 9月の放射率の変化

第5章 議論と考察

本章では、まず直接測定することのできない空の温度 T_{sky} の設定方法について議論する。次に、雲モニタで測定された大気の光学的厚みと、電波領域における大気の光学的厚みの測定結果とを比較し、その考察を行った。最後に環境モニタの役割についても議論する。

5.1 空の温度 (T_{sky}) の設定

§3.3 で放射率を導出する際、空の温度 T_{sky} を $T_{\text{sky}} \approx T_{\text{REF1}}$ と仮定し解析を進めていたが、実際には空の気温は地上の気温よりも低い可能性がある。以下では温度差を考慮し、 T_{sky} の値の設定を変えることが、解析結果へどのように反映されるのかを考察する。用いたデータは 2007/12/2-9 の期間で、天気は 12/2-3、12/5 14:00-12/6 6:00、12/9 6:00-12:00 は曇り、それ以外は晴れであった。

5.1.1 $T_{\text{sky}} = T_{\text{REF1}} - T_x$ を仮定した解析

雲の存在する高度は地表から高さ約 10km までの対流圏である。乾燥大気の場合、高度が 100m 上がるとすると、気温が 0.5 °C 下がると仮定する。ASTE サイトは標高 4800m の乾燥地帯であるため、高度 100m 上昇につき、気温 0.5 °C 低下とし、ASTE サイトから 1-3km 上空に雲が存在する場合を考えた。雲モニタの設置されている地上と上空の温度差を T_x とすると、上空の温度 T_{sky} は、

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{REF1}} - T_x \quad (5.1)$$

と表せ、上空 1-3km の場合、 $T_x = 5, 10, 15(\text{K})$ として一温度解析を行った。

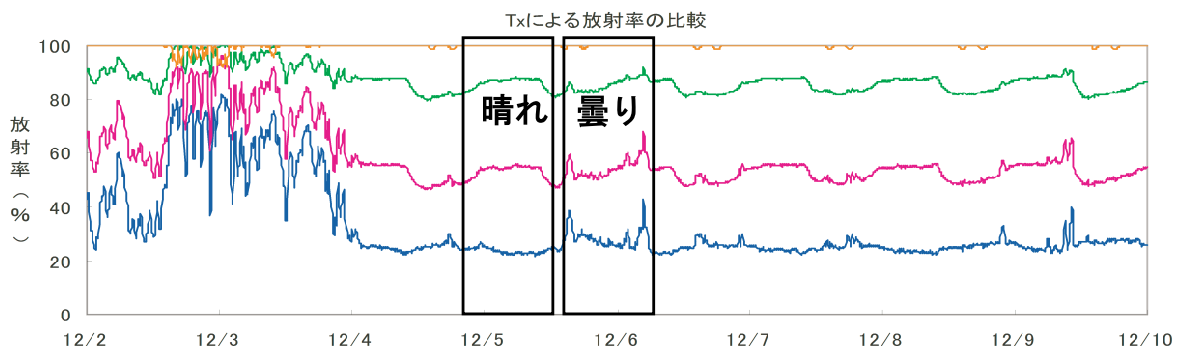


図 5.1: T_x 設定による結果の違い。 T_x を 5,10,15(K) と変化させ結果を比較したもの。青線: $T_x=0(\text{K})$, 紫線: $T_x=5(\text{K})$, 緑線: $T_x=10(\text{K})$, 橙線: $T_x=15(\text{K})$

図 5.1 は T_x を 5,10,15(K) と変化させたときの解析結果のグラフである。青線は $T_x = 0$ 、つまり $T_{\text{sky}} = T_{\text{ref1}}$ を仮定した時の結果である。画像データと比較した場合、晴天時は放射率は低い値で安

定的で、曇りの時は放射率が高く、雲量の変化に伴って値が変動している。一方、紫線、緑線、橙線は、晴天時の放射率の値が安定し、雲量の変化に伴う放射率の変動は見られるが、長期の時間変動を見た場合、晴天時に放射率が高く、曇りの時は放射率が低くなるという結果となった。ただしこれは、解析を行う際には §3.3 の手順に従い、解析時に扱う補正後の較正曲線 $V'_{\text{exp}}(B(T))$ を導出する際にも T_x を考慮した上での結果である。

次に、大気モデルを用いて放射率の値について比較をした。図 5.2 は、ASTE サイトにおける大気透過率のモデル計算の結果である。大気モデルから赤外線領域の大気透過率を計算するソフトである ATRAN を引用して計算した。標高 4800m、波長 7-13 μm 、天頂角 $Z = 0$ を仮定している。雲モニタと同じ波長領域である 8-12 μm の大気透過率の平均は約 0.9 となり、放射率に直すと、放射率 (%) = (1 - 大気透過率) × 100 より、約 10 % という結果となった。平行平板大気モデルを仮定すると、天頂角が大きくなるにつれて大気の厚みは大きくなり、大気透過率は低くなる。つまり、今考えている雲モニタの場合は、天頂角 $Z = 30^\circ$ までの平均をとっているので、放射率は 10 % よりも大きくなる。青線の晴天時の放射率は約 20 % であるが、§4.3、図 4.4 で示したように、鏡面の清掃後は晴天時の放射率の値が約 10 数%まで下がることが分かっている。

以上のことを考慮すると、上空の温度 $T_{\text{sky}} = T_{\text{REF1}} - T_x$ と仮定した場合、 $T_x = 0$ で、 $T_{\text{sky}} = T_{\text{REF1}}$ の仮定が妥当であると考えられる。

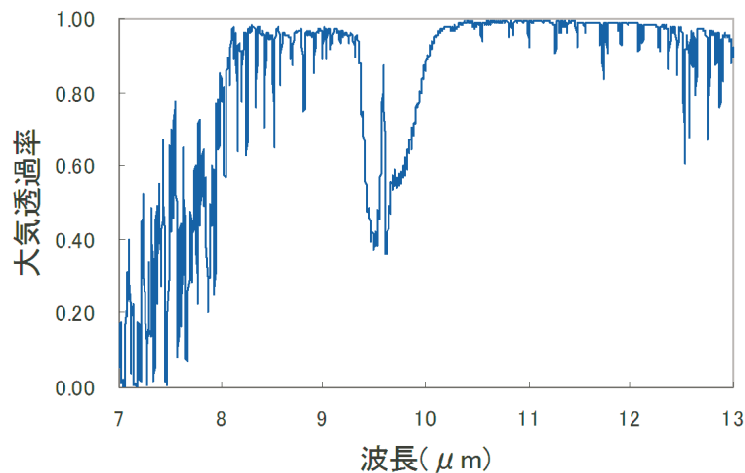


図 5.2: ATRAN による大気透過率の計算結果。高度 4800m、波長域 7-13 μm 、天頂角 $Z = 0$ 方向を仮定した。8-12 μm の平均は 0.9 となった。

5.1.2 $T_{\text{sky}} = \text{一定}$ を仮定した解析

次に、対流圏の最上層、あるいは成層圏での吸収が主の場合、地上の温度はあまり関係しないかもしれないので、上空の温度を地上の温度から求めるのではなく、 T_{sky} を一定と仮定して解析を行った。12 月 2-9 日までの地上の温度の平均は 275K 程度で、昼夜で $\pm 10(\text{K})$ ほどの温度変化が見られた。以下では、上空の温度 $T_{\text{sky}} = 270, 265, 260, 255, 250(\text{K})$ の一定の値に固定して一温度解析を行った。

図 5.3 はその結果である。すべての結果において、晴天時の放射率は低く、曇りの時は放射率が高く、雲量の変化による変動もある。しかし、青線は放射率の値だけを見ても晴れと曇りの区別が

はっきりとできるのに対し、青線以外の結果は晴天時の放射率が安定せず、放射率の値だけでは晴れと曇りの判別がつかない。よって、上空の温度 T_{sky} を一定とする解析方法は使用しない。

以上のことから一温度解析においては $T_{\text{sky}} \approx T_{\text{REF1}}$ と仮定し解析を行った。

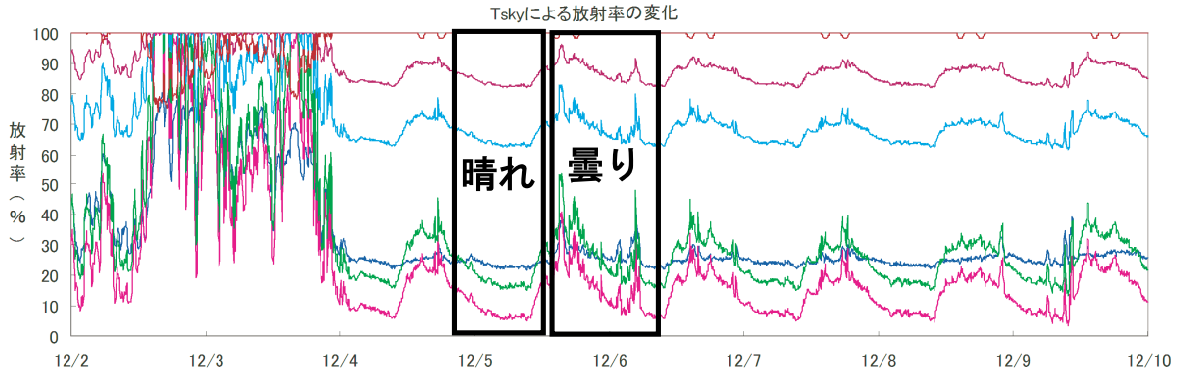


図 5.3: T_{sky} 一定とした結果。青線: $T_{\text{sky}}=T_{\text{ref1}}$, 桃線: $T_{\text{sky}}=270(\text{K})$, 緑線: $T_{\text{sky}}=265(\text{K})$, 水色線: $T_{\text{sky}}=260(\text{K})$, 紫線: $T_{\text{sky}}=255(\text{K})$, 橙線: $T_{\text{sky}}=250(\text{K})$

5.2 他波長データとの比較

ASTE サイトに設置されている環境調査モニタのうち、220GHz ラジオメータと 183GHz MiSTI データより得られた電波での光学的厚み ($\tau_{220\text{GHz}}$, $\tau_{183\text{GHz}}$) と雲モニタデータより得られた光学的厚み ($\tau_{30\text{THz}}$) との比較を行った。雲モニタは放射率の値が解析から得られるので、式 (3.17) を用いて $\tau_{30\text{THz}}$ を導出した。用いたデータの期間は、

- * 雲モニタ : 2008/3/7 ~ 6/4, 6/7 ~ 8/6, 8/8 ~ 8/31
- * ラジオメータ : 2008/3/7 ~ 6/4, 6/7 ~ 8/6, 8/8 ~ 8/31
- * MiSTI : 2008/3/11 ~ 4/22, 5/2 ~ 7/15, 7/25 ~ 8/6

である。図 5.4-5.9 は 2008 年 3-8 月の期間に 3 つの装置から得られた光学的厚みの時間変化である。青線が雲モニタ ($\tau_{30\text{THz}}$)、赤線がラジオメータ ($\tau_{220\text{GHz}}$)、緑線が MiSTI ($\tau_{183\text{GHz}}$) の結果を示す。画像データで比較すると、 $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ では晴天、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ では雲が出現し始める。 $\tau_{30\text{THz}}$ の値は雲の有無を反映し、短い期間で値が変動するのに対して、 $\tau_{220\text{GHz}}$ 、 $\tau_{183\text{GHz}}$ は数日にわたってゆっくりと値が変動している。また、 $\tau_{30\text{THz}}$ は雲の有無により値の変化量が大きいのにに対して、 $\tau_{220\text{GHz}}$ は値の変動が小さい。さらに、ラジオメータは天頂方向のみを測定しているために水蒸気や雲をとらえきれない場合があると考えられる。 $\tau_{183\text{GHz}}$ については、大きく変動している部分は水蒸気量の変化を敏感にとらえていると考えられる。

以下では、ラジオメータと MiSTI のデータを用いて、雲モニタによって晴天であると判断できる $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ と、雲が出ている $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の場合について比較した。

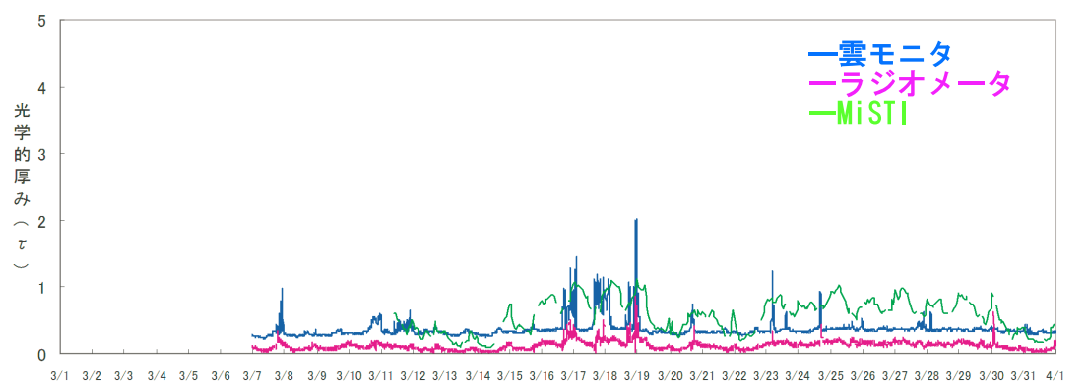


図 5.4: 3月の光学的厚み

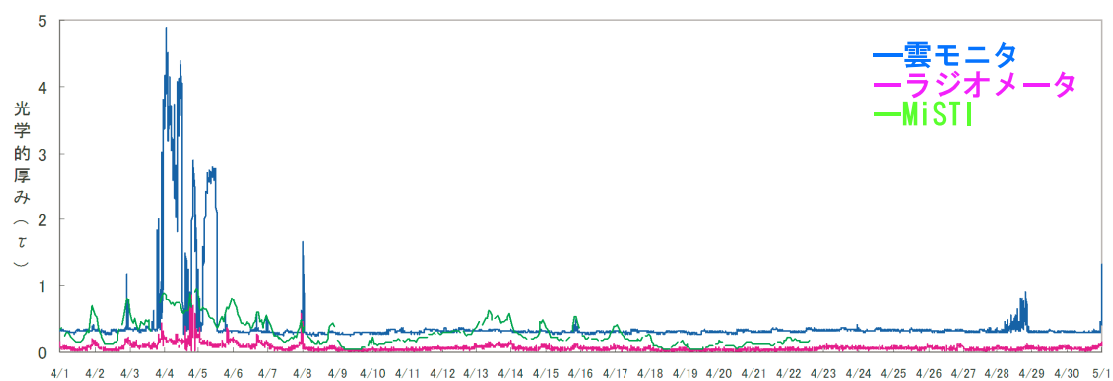


図 5.5: 4月の光学的厚み

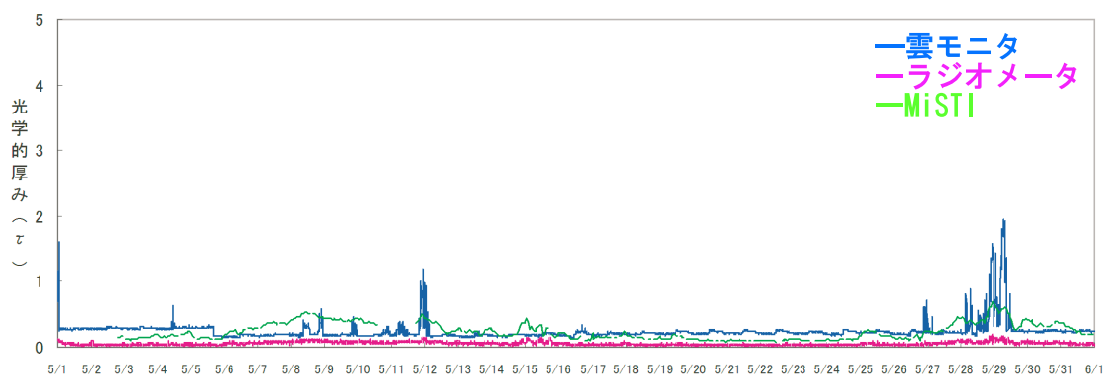


図 5.6: 5月の光学的厚み

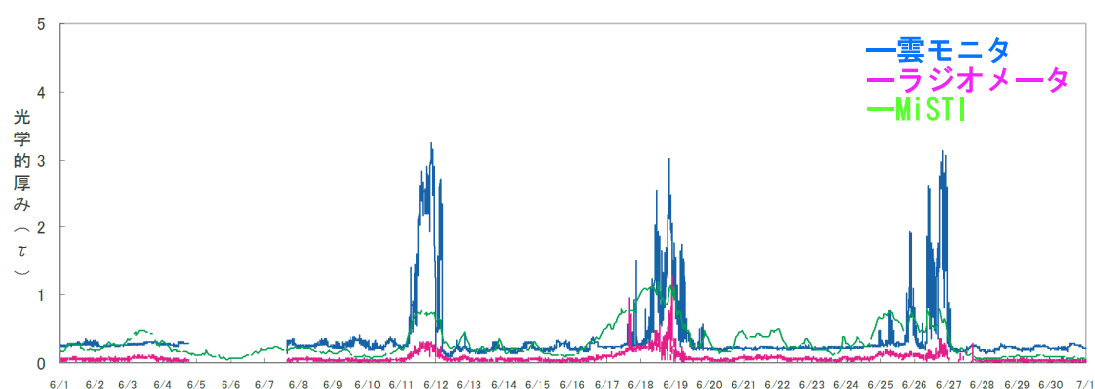


図 5.7: 6月の光学的厚み

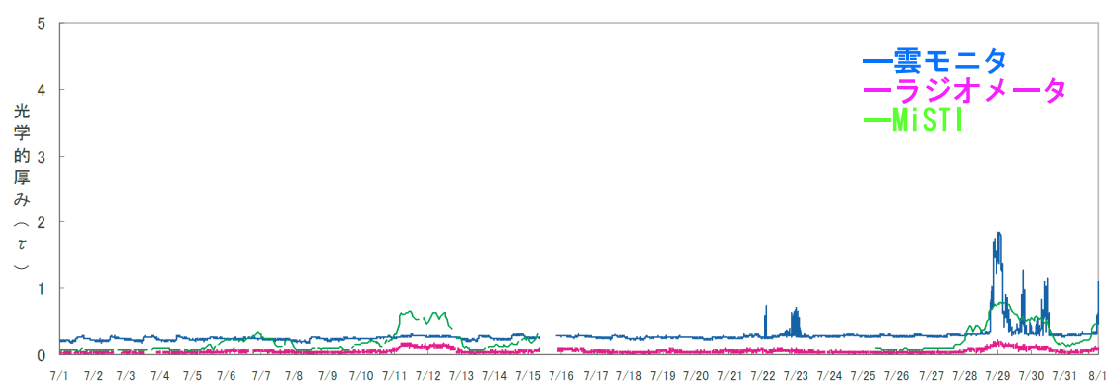


図 5.8: 7月の光学的厚み

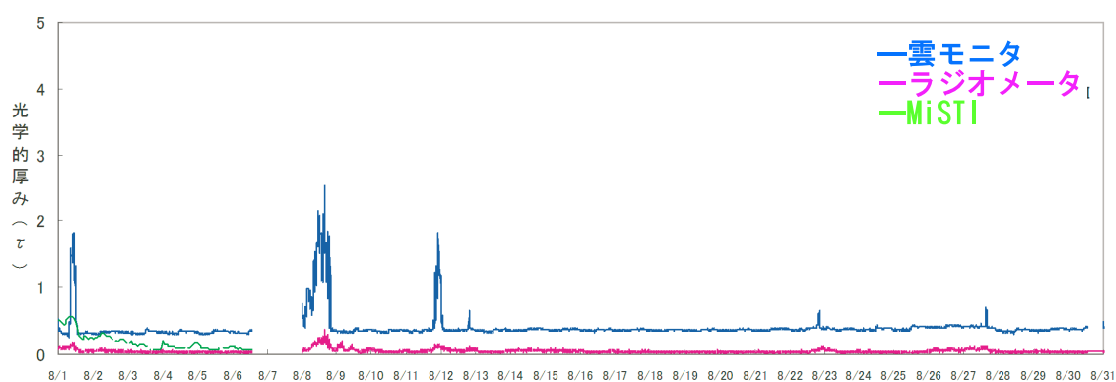


図 5.9: 8月の光学的厚み

5.2.1 雲モニタ (30THz) とラジオメータ (220GHz) データの比較

図 5.10 は横軸に $\tau_{30\text{THz}}$ 、縦軸に $\tau_{220\text{GHz}}$ の 3-8 月のデータをプロットしたもので、図 5.11-5.16 は月別にプロットしたものである。5、7、8 月に顕著に現れているが、晴天時の場合、ほぼ $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ であり、ラジオメータの $\tau_{220\text{GHz}}$ のみが変化する。一方、雲の存在する $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の場合、 $\tau_{30\text{THz}}$ の変化に対して $\tau_{220\text{GHz}}$ の変化は小さい。また、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ の範囲には弱いながらも緩やかな相関が見られる。そこで、5、7、8 月については線形フィットを行ったが、ばらつきが大きくそれぞれのプロットから得た傾きは異なる値となった。

また、これらのグラフを見ると、 $\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ では $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ となっているため晴天と判断でき、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ では晴天と曇りのどちらの天候の場合もあり得ると予想できる。

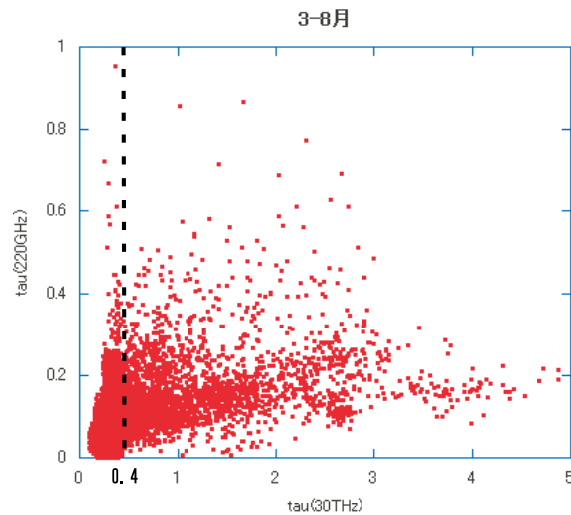


図 5.10: $\tau_{30\text{THz}}$ と $\tau_{220\text{GHz}}$

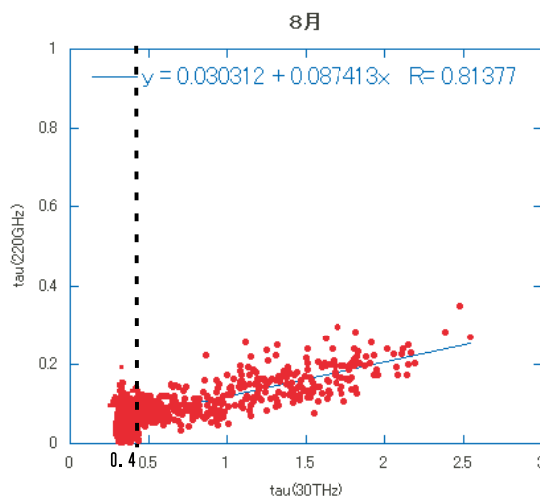


図 5.11: 3 月の τ の比較

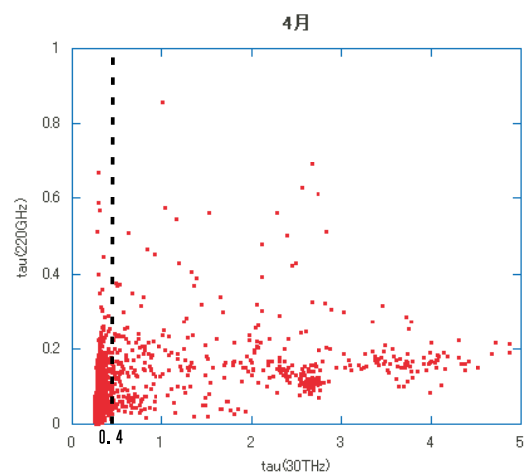


図 5.12: 4 月の τ の比較

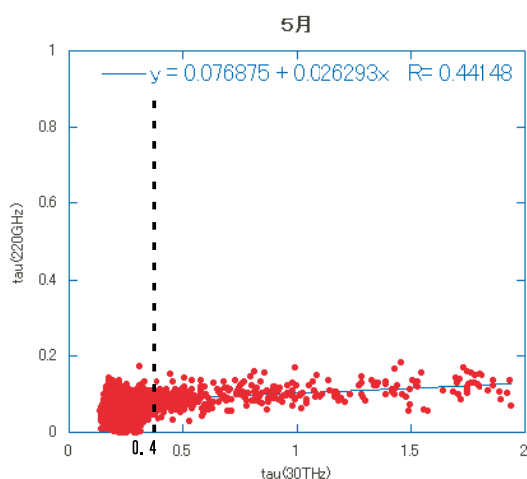


図 5.13: 5月の τ の比較

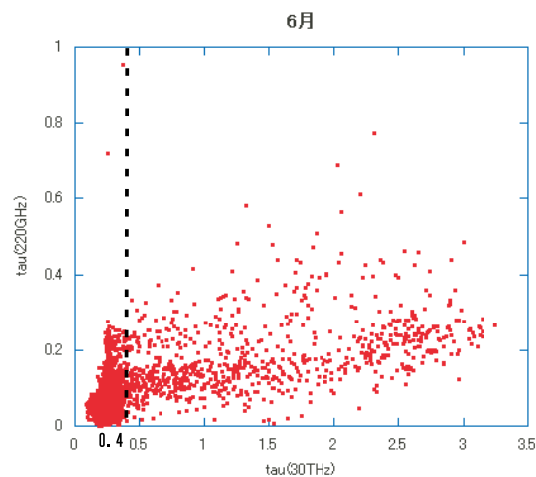


図 5.14: 6月の τ の比較

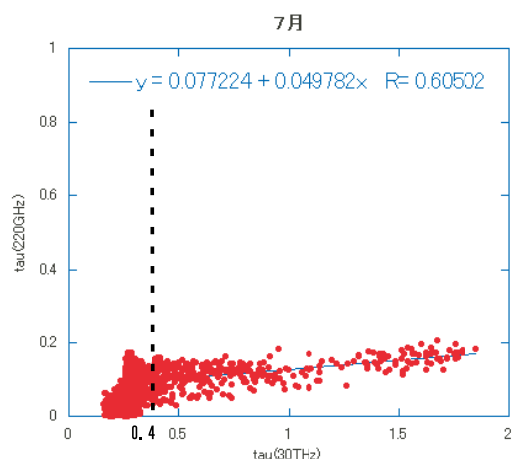


図 5.15: 7月の τ の比較

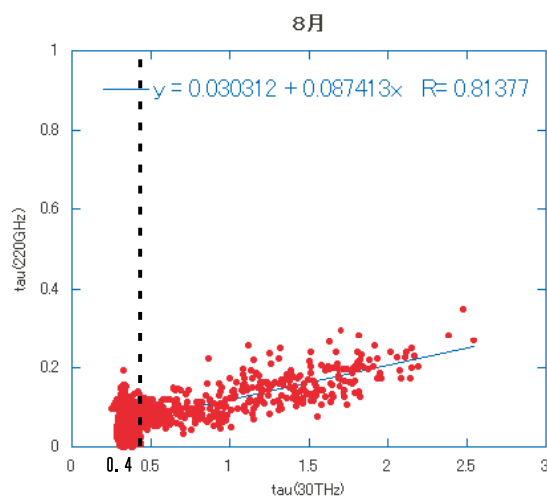


図 5.16: 8月の τ の比較

5.2.2 雲モニタ (30THz) と MiSTI(183GHz) データの比較

図 5.17 は横軸に $\tau_{30\text{THz}}$ 、縦軸に $\tau_{183\text{GHz}}$ の 3-8 月のデータをプロットしたものである。図 5.18、図 5.19 では $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ の晴天時と $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の曇りの日に分けてプロットし、線形フィッティングを行った。また、図 5.20-5.25 は比較結果を月別にプロットしたものである。 $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ の時、雲がないので $\tau_{30\text{THz}}$ は変化せず、 $0.2 < \tau_{30\text{THz}} < 0.4$ で $\tau_{183\text{GHz}}$ のみが変わり、急にプロットが立ち上がる。また、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ 、 $0.4 < \tau_{183\text{GHz}}$ の範囲では値がばらつく。今回の比較の場合、雲のある日のデータが少なかったため、今後さらに曇りの日の $\tau_{30\text{THz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$ のデータを蓄積し、相関が見られるかどうか探りたい。

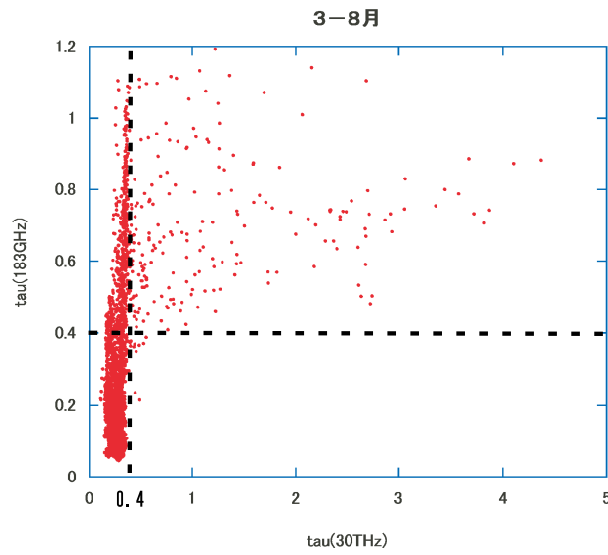


図 5.17: $\tau_{30\text{THz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$

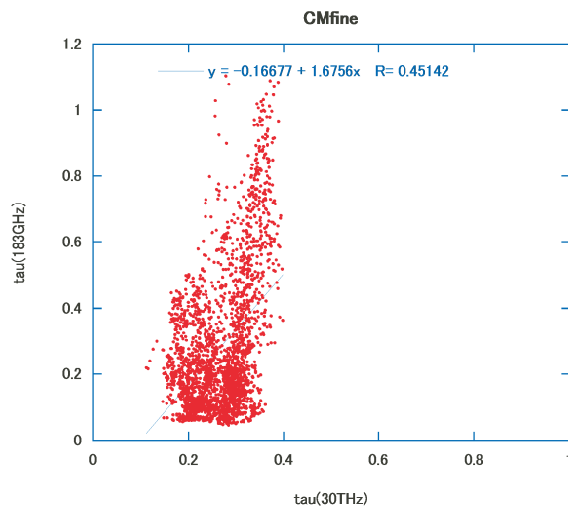


図 5.18: 晴れの日 ($\tau_{30\text{THz}} < 0.4$) の $\tau_{30\text{THz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$

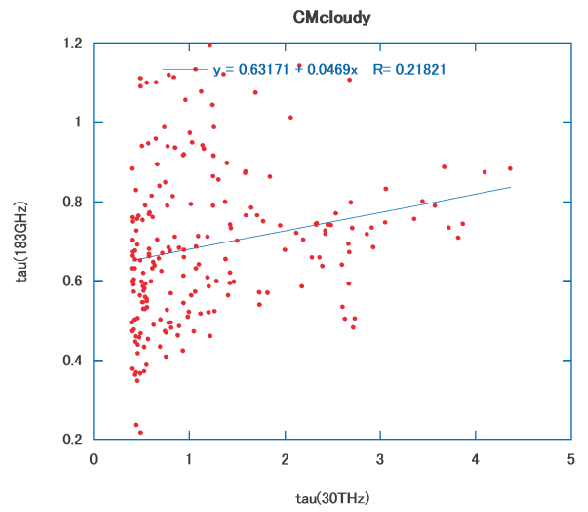


図 5.19: 曇りの日 ($0.4 < \tau_{30\text{THz}}$) の $\tau_{30\text{THz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$

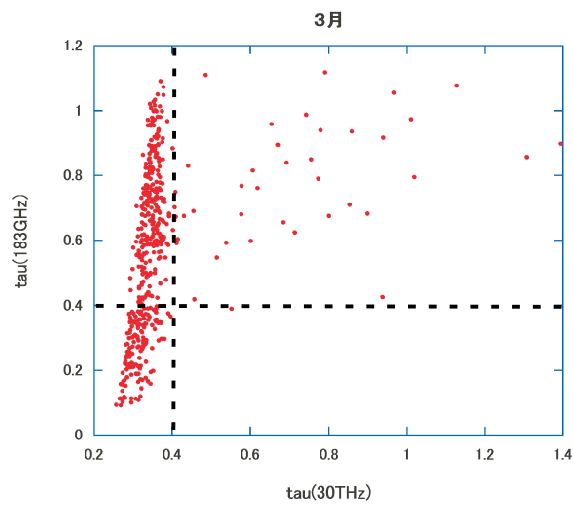


図 5.20: 3月の τ の比較

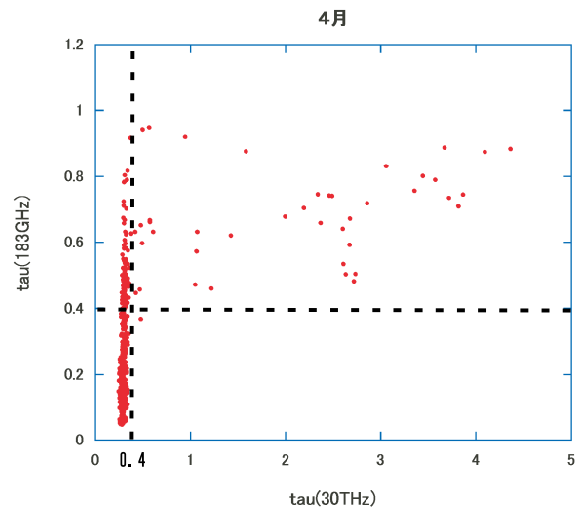


図 5.21: 4月の τ の比較

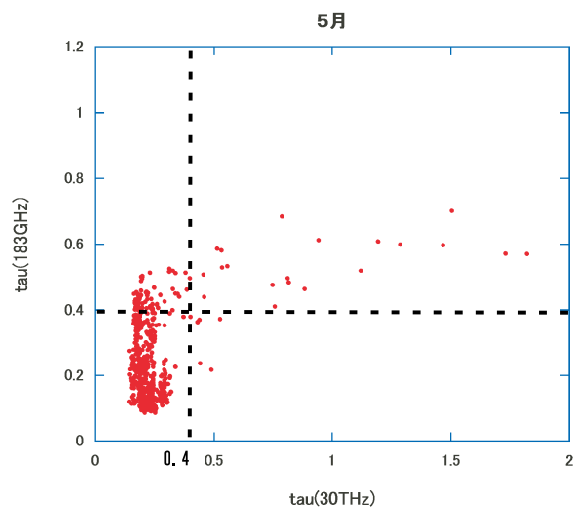


図 5.22: 5月の τ の比較

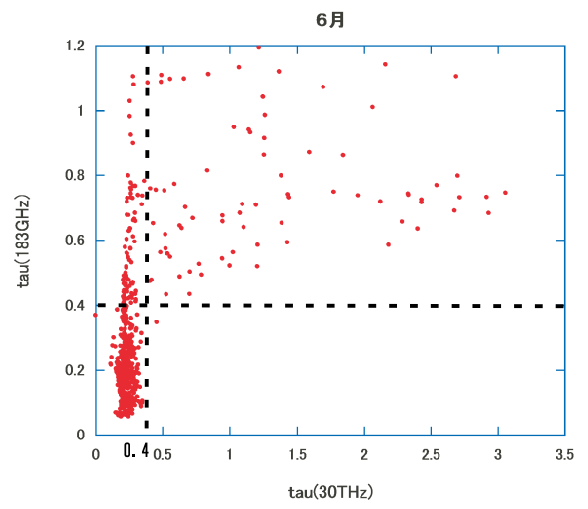


図 5.23: 6月の τ の比較

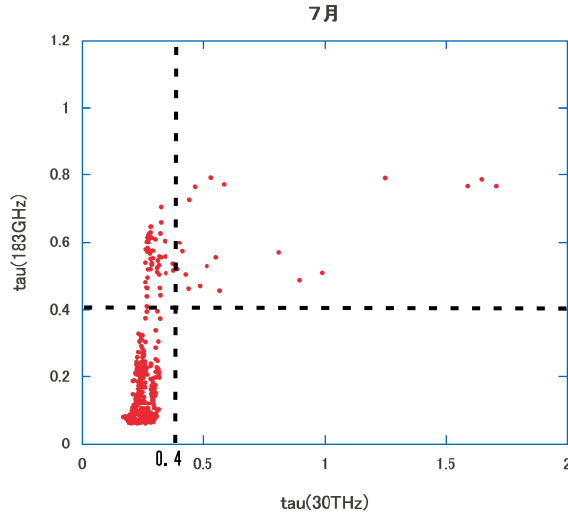


図 5.24: 7月の τ の比較

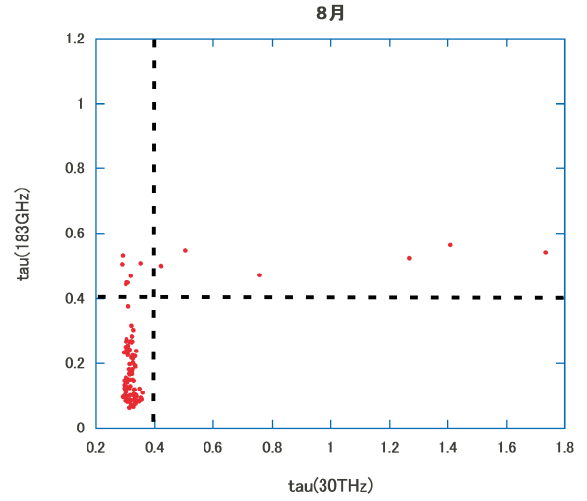


図 5.25: 8月の τ の比較

5.2.3 ラジオメータ (220GHz) と MiSTI(183GHz) データの比較

図 5.26 は横軸に $\tau_{220\text{GHz}}$ 、縦軸に $\tau_{183\text{GHz}}$ の 3-8 月のデータをプロットしたもので、 $\tau_{220\text{GHz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$ の間には比例関係がみられた。次に、晴天時と曇りの日の比較を行った。§5.2.1 の雲モニタとラジオメータの比較から、 $\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ では晴天であることが予測でき、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ では晴天と曇りのどちらの天候もあり得ることが分かっている。このことから、 $\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ を晴天時、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ は晴天も含むが曇りであると考え、 $\tau_{220\text{GHz}} = 0.05$ の前後で範囲を分け、それぞれについて再度線形フィットを行った (図 5.27、図 5.28)。図 5.27 の晴天時の線形フィットより、 $\tau_{220\text{GHz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$ の関係式、

$$\tau_{183\text{GHz}} = -0.071751 + 5.518 \times \tau_{220\text{GHz}} \quad (5.2)$$

が得られた。つまり、毎分取得されるラジオメータの $\tau_{220\text{GHz}}$ から、40 分毎にしか得られない MiSTI の $\tau_{183\text{GHz}}$ の値を予測することが可能である。

また、図 5.29-5.34 は月別にプロットしたもので、これらについても $\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ (赤点) と $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ (青点) の範囲に分けて線形フィットを行った。フィッティングによって得られた式は $\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ が赤字、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ が青字で表示した。月別に見ても、 $\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ では傾きが 4.6–6.0 となり、図 5.27 と大きな差はない。 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ についても、図 5.28 と大きな差はなかった。これらの比較を行ったところ、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}} < 0.1$ 付近から、 $\tau_{220\text{GHz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$ の相関にばらつきが大きくなる傾向にあることがわかった。

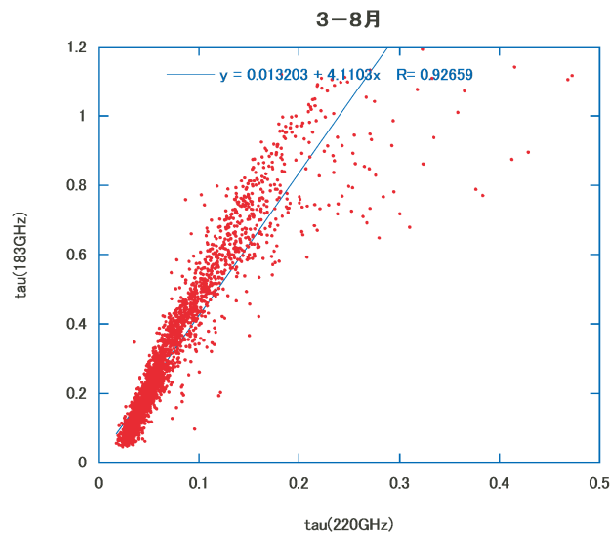


図 5.26: $\tau_{220\text{GHz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$

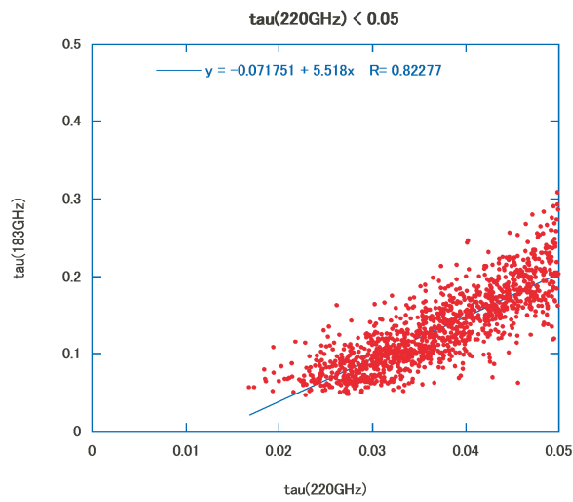


図 5.27: ばらつきの少ない $\tau_{220\text{GHz}}$
< 0.05 の τ の比較

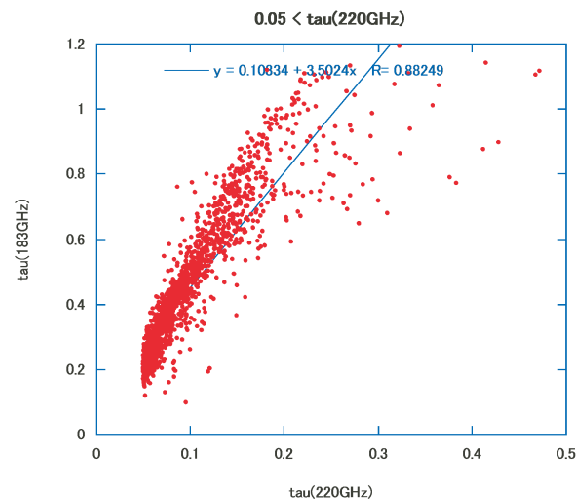


図 5.28: ばらつきが生じ始める $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ の τ の比較

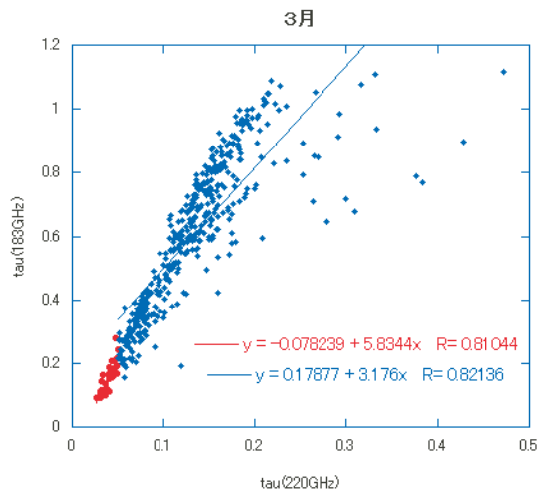


図 5.29: 3月の τ の比較

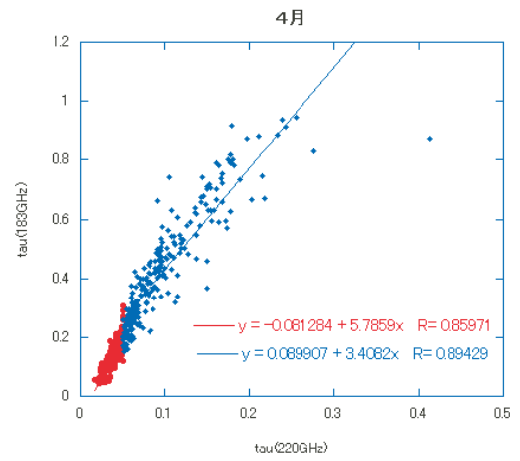


図 5.30: 4月の τ の比較

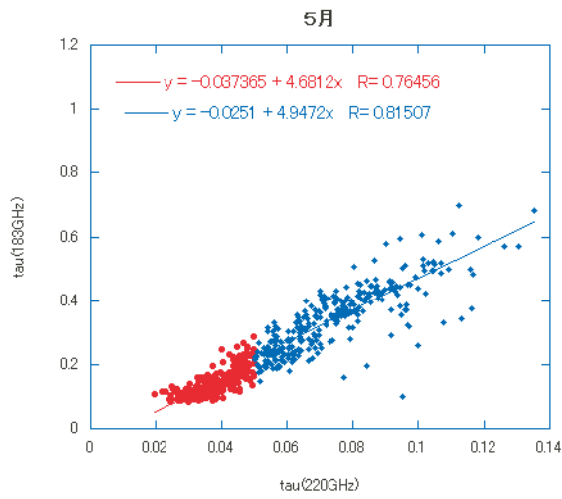


図 5.31: 5月の τ の比較

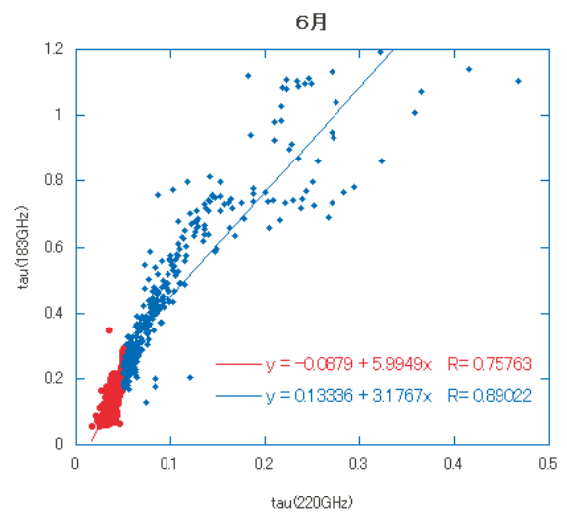


図 5.32: 6月の τ の比較

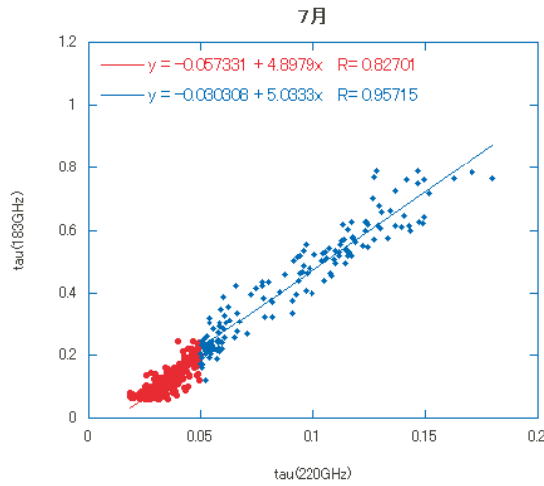


図 5.33: 7月の τ の比較

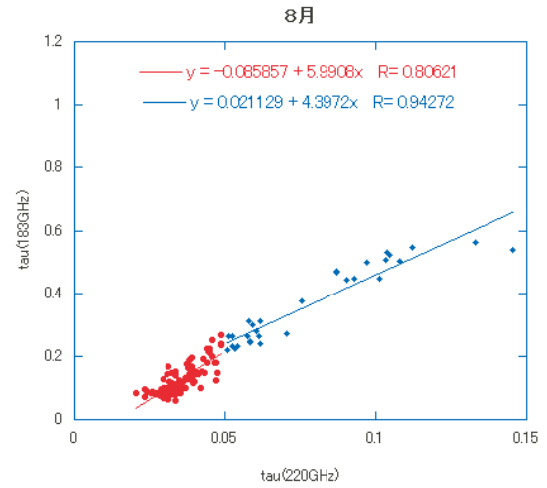


図 5.34: 8月の τ の比較

5.2.4 比較結果の考察

図 5.35 は水蒸気の柱密度が $2\text{g}/\text{cm}^2$ の場合と、乾燥大気 (NoH_2O) の場合の大気の不透明度を示す。183GHz には非常に強い水蒸気の吸収線が存在する。MiSTI では 183GHz でこの吸収線をとらえるので、水蒸気の影響が強く出る。220GHz 付近では、183GHz のピークも落ち着き、水蒸気の連続波成分だけでなく、さらに水滴の放射が加わる場合、ラジオメータでは水蒸気だけでなく水滴の放射もとらえると考えられる。

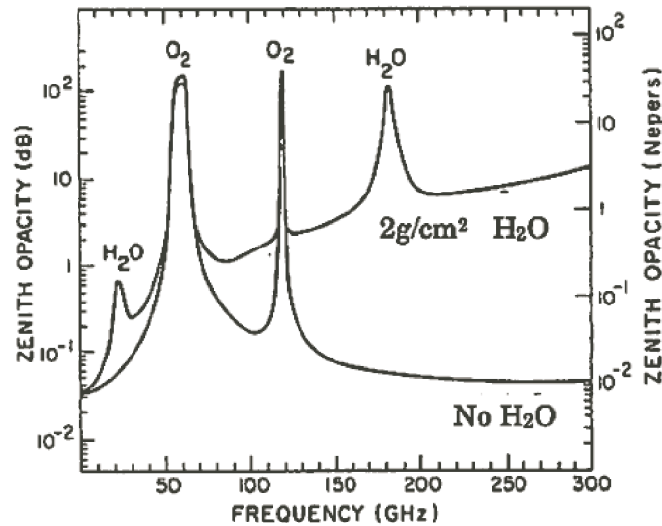


図 5.35: 水蒸気の柱密度が $2\text{g}/\text{cm}^2$ の場合と、乾燥大気 (NoH_2O) の場合の大気の不透明度

雲モニタとラジオメータ

$\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ では、晴天のためラジオメータが水蒸気の放射をとらえることで、 $\tau_{220\text{GHz}}$ のみが変わる

する。一方、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の場合、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ の範囲で緩やかな相関がみられた。これは、雲モニタが上空の雲（水滴、氷）を、ラジオメータは水蒸気に加えて、雲の中の水滴の放射をとらえており、どちらも水滴をとらえていることから緩やかな相関が得られたと考えられる。しかし、それぞれの装置では雲モニタで氷、ラジオメータで水蒸気という異なるものもとらえており、上空に存在する量はそれぞれ変化するので緩やかな相関があったとしても傾きは同じ値にはならないと考えられる。

雲モニタと MiSTI

$\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ は、晴天のため MiSTI が水蒸気の放射をとらえることで、 $\tau_{183\text{GHz}}$ のみが変わる。また、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ 、 $0.4 < \tau_{183\text{GHz}}$ の範囲では値がばらつく。この範囲では雲が存在することで、雲モニタが雲中の水滴や氷を、MiSTI では水蒸気というそれぞれ別のものもとらえているため、値がばらつき、相関がなくなると考えられる。

ラジオメータと MiSTI

$\tau_{220\text{GHz}} < 0.05$ 、 $\tau_{183\text{GHz}} < 0.4$ の範囲では比例関係が見られ、どちらも水蒸気をとらえていると考えられる。一方、 $0.4 < \tau_{183\text{GHz}}$ 、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ の範囲では相関はあるが、値がばらつく。この範囲では MiSTI は水蒸気のみをとらえているが、ラジオメータが水蒸気だけでなく雲中の水滴からの放射もとらえたことが原因であると考えられる。

また、月別のプロットでは、 $0.05 < \tau_{220\text{GHz}}$ でばらつきが見え始めたとき、このばらつきは $\tau_{220\text{GHz}}$ の大きくなる方向にばらつく傾向がみられる。これは $\tau_{220\text{GHz}}$ が水蒸気に加え水滴の放射をとらえることで光学的厚みが大きくなるからであると考えられる。

以上のことから、MiSTI は常に水蒸気を、ラジオメータは晴天時 $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ の範囲では水蒸気を、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ では水蒸気と水滴を、雲モニタは $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の範囲では雲に含まれる水滴と氷をとらえていることが分かった。

5.3 環境モニタの役割

以上より、各環境モニタの役割は以下のようにまとめられる。

- * 雲モニタ：8 – 12 μm の赤外線では雲の放射をとらえる。5 分毎に全天の雲の画像を更新する。
- * ラジオメータ：220GHz で水蒸気や水滴の放射をとらえる。毎分天頂方向のみを測定する。
- * MiSTI：183GHz で水蒸気の放射をとらえる。1 時間毎に水蒸気分布の全天マップを作成する。

ラジオメータ MiSTI と比較して、雲モニタでは短時間に全天の大気的光学的厚みを測定することができる。雲モニタの観測波長は赤外線であるが、上記の光学的厚みのデータ比較から電波での観測環境の調査が可能である。曇の場合、雲モニタの画像データから雲量や雲の方向依存性を判断できる。これにより、ミリ波、サブミリ波の観測周波数の切り替えや、観測方向の選択など、その時点で少しでも良い条件での観測を行う判断材料になる。また、ラジオメータとの比較で緩やかな相関が見られたことから、ミリ波観測の場合は観測条件の善し悪しを判断できる。しかし、サブミリ波のような厳しい観測環境の判断には使用できないと考えられる。一方、晴天時は雲が存在しない

ため、雲モニタから得られる大気の光学的厚みは変化しない。そのため、晴天時はラジオメータや MiSTI から得られるデータから観測環境を判断する必要がある。

また、雲モニタは赤外線カメラによって昼夜問わず雲を観測でき、天候の予測や、観測機器の運用の判断材料として有力である。現在も ASTE サイトでの観測時の天候判断に貢献しており、特に積雪時は雲の変動から天候を予測し、望遠鏡の鏡面に雪が積もらないような装置の運用が可能である。

そして、複数の周波数で観測が可能な ALMA での観測スケジュールリングの判断材料としても期待できる。曇の場合、雲の影響の少ない低周波数での観測に切り替えるなど、雲モニタの画像データから天候に応じた観測計画を立てることが可能であると考えられる。

第6章 まとめ

6.1 結論

赤外線雲モニタは、サブミリ波観測の環境調査モニタとして開発され、2007年11月よりASTEサイトで稼働中である。8-12 μm の中間赤外線で雲の熱放射をモニターし、5分に1度、天頂角0-70°の全天画像を7つの輝度応答設定で撮像する。得られた画像データの解析を行い、リアルタイムで大気の放射率を求め、雲の分布の時間変動をモニターしている。

本研究では赤外線雲モニタのデータを用い、ASTE/ALMAサイトでのサブミリ波観測環境の調査、雲モニタの環境モニタとしての評価を行った。具体的には(1)較正曲線の改良、(2)220GHzラジオメータ、183GHzMiSTIデータとの比較を行った。

解析では、較正曲線の改良を行った。これまでの簡易解析に用いた較正曲線は、実験室内で黒体の温度を変化させ、画像データのカウンタ数を測定した実験結果から、カウンタ数を温度 T の関数として求めていた。しかし、8-12 μm の中間赤外線では、大気の温度に近い300K程度の場合のプランク関数はウィーンの変位則付近となるため、プランク関数が温度に比例するというレイリー・ジーンズ近似が適用できない。そのため、画像データの出力値は温度の関数ではなく、輻射エネルギーの関数に改善する必要がある。そこで、黒体の温度 T で波長8-12 μm の範囲に含まれる輻射エネルギー $B(T)$ をプランク関数から求め、 $B(T)$ 関数として較正曲線を再度求めた。改良前と比較すると、この較正曲線から求めた放射率は、雲量の変化ではなく、1日の温度変化に依存するような放射率の変動を減少させることができた。よって、 $B(T)$ の関数として求めた較正曲線の方が、より適当であると判断し、今後の解析に用いる。

次に、2008年3-8月の雲モニタの光学的厚み($\tau_{30\text{THz}}$)と、同じASTEサイトの環境モニタであるラジオメータ、MiSTIから測定された $\tau_{220\text{GHz}}$ 、 $\tau_{183\text{GHz}}$ とを比較した。比較結果から、MiSTIは常に水蒸気を、ラジオメータは晴天時 $\tau_{30\text{THz}} < 0.4$ の範囲では水蒸気を、 $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ では水蒸気と水滴を、雲モニタは $0.4 < \tau_{30\text{THz}}$ の範囲では雲に含まれる水滴と氷をとらえていることが分かった。

このような光学的厚みのデータ比較から、雲モニタを用いて電波での観測環境の調査が可能であると考えられる。曇の場合、雲モニタの画像データから雲量や雲の方向依存性を判断できる。これにより、ミリ波、サブミリ波の観測周波数の切り替えや、観測方向の選択など、その時点で少しでも良い条件での観測を行う判断材料になる。一方、晴天時は雲が存在しないため、雲モニタから得られる大気の光学的厚みは変化しない。そのため、晴天時はラジオメータやMiSTIから得られるデータから観測環境を判断する必要がある。

また、雲モニタは赤外線カメラによって昼夜問わず雲を観測でき、天候の予測や、観測機器の運用の判断材料として有力である。特に積雪時は雲の変動から天候を予測し、望遠鏡の鏡面に雪が積もらないように装置の運用が可能である。

そして、複数の周波数で観測が可能なALMAでの観測スケジューリングの判断材料としても期待できる。曇の場合、雲の影響の少ない低周波数での観測に切り替えるなど、雲モニタの画像データから天候に応じた観測計画を立てることが可能であると考えられる。

6.2 今後の課題

- (1) 2つの黒体温度標準の取り扱い：1つは加熱により高温となってるが、常温の黒体と温度差が小さい。今後解析に用いるためには、より温度差のある高温に保つ必要がある。
- (2) ASTE 観測時の環境モニタ用のウェブページの整備：リアルタイムで雲の様子をモニターしているウェブページ上でも、本論文で行った一温度解析の結果を表示する必要がある。
- (3) MiSTI との悪天候時のデータの比較： $\tau_{30\text{THz}}$ と $\tau_{183\text{GHz}}$ との関係をより詳細に調査したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方にご指導とご協力を賜りました。

指導教員である百瀬宗武先生には、電波天文学の基礎からこの論文を書き上げるまで、3年間辛抱強くかつ親身にご指導いただきました。昨年度雲モニタを開発された木村渉様には雲モニタの引継ぎから解析を進めるにあたり、たくさんのご助言をいただきました。東京大学の田村陽一様には、MiSTIのデータ提供やデータ解析の進め方について、有益なご助言とご協力をいただきました。ASTEチーム、ALMA推進室の皆様には、ASTEサイトでの雲モニタの管理やデータ提供などで大変お世話になりました。同研究室の岡本美子先生には赤外線天文学の基礎、観測装置についてご指導いただき、本研究を進める中で有益なご助言をいただきました。

皆様のご支援なしに、本論文を書き上げることはできませんでした。ここにお名前を記し、感謝の意を表します。

最後に、研究生生活を支えてくれた家族に感謝します。

参考文献

- [1] Hiroshi MATSUO, Akihiro SAKAMOTO, Satoki MATSUSHITA, 1998, “FTS Measurements of Submillimeter-Wave Atmospheric Opacity at Pampa la Bola ”, Publ.Astron.Soc.Japan 50,359-366
- [2] Satoki MATSUSHITA, Hiroshi MATSUO, Juan R.PARDO, Simon J.E.RADFORD, 1999, “FTS Measurements of Submillimeter-Wave Atmospheric Opacity at Pampa la Bola : Supra-Terahertz Windows and Model Fitting”, Publ.Astron.Soc.Japan 51,603-610 and Plate24
- [3] Satoki MATSUSHITA, Hiroshi MATSUO, 1998, “FTS Measurements of Submillimeter-Wave Atmospheric Opacity at Pampa la Bola : Water Vapor, Liquid Water, and 183 GHz Water Vapor Line Opacities”, Publ.Astron.Soc.Japan 1
- [4] Kristen Rohlfs, T.L.Wilson, “Tools of Radio Astronomy”, Springer
- [5] George B.Rybicki, Alan P.Lightman, “Radiative Processes in Astrophysics” , Wiley-Interscience
- [6] 深沢千尋, “すぐわかる Perl”, 技術評論社
- [7] 木村渉, 2007, 修士論文 “ASTE サイトにおける赤外線雲モニタの開発”, 茨城大学