

ミリ波分光計を用いた北極域・南極域における  
中層大気中の一酸化窒素分子変動の観測的研究

名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻  
後藤宏文

# 目次

第 1 章	イントロダクション	2
1.1	オゾンの重要性とオゾン減少	2
1.2	先行研究の結果と課題	2
1.3	本研究の目的と研究手法	7
第 2 章	ミリ波観測法	8
2.1	観測手法	8
2.1.1	観測手法の概観と観測装置	8
2.1.2	電波強度のキャリブレーション	11
2.1.3	光学的厚み	13
2.1.4	周波数スイッチング	18
2.2	観測場所	20
2.2.1	ノルウェー・トロムソでの観測 (69.35°N, 19.14°E)	20
2.2.2	南極・昭和基地での観測 (69.00°S, 39.85°E)	21
第 3 章	ミリ波観測解析手法	23
3.1	光学的厚みデータを用いたスクリーニング	23
3.2	NO スペクトルデータに含まれるノイズによるスクリーニング	24
3.3	光学的厚みデータの補正 (Tromsø)	25
3.4	NO スペクトルデータのベースラインの補正	29
3.5	NO 柱密度 (Column Density) の導出	32
第 4 章	結果	33
4.1	ノルウェー・トロムソでの解析結果	33
4.2	南極・昭和基地での解析結果	33
第 5 章	考察	35
5.1	SOFIE データによって導出された NO 柱密度との比較	35
5.2	高エネルギー電子の降り込みとの比較	35
第 6 章	まとめ	36
付録 A	SOFIE	39
付録 B	POES/MetOp	40

## 第2章 ミリ波観測法

2章では、我々が開発したミリ波分光計を用いた大気分子の観測手法について述べる。まず2.1節では観測手法の概観を紹介し、観測された電波強度のキャリブレーション方法、受信電波から分子スペクトルを抽出するために行う周波数スイッチング、下層大気の影響を評価し除去するための光学的厚みの測定について述べる。次に、本研究で使用したミリ波分光計について、2.2.1節でノルウェーのトロムソに設置した装置、2.2.2節で南極の昭和基地に設置された装置についてそれぞれ説明する。

### 2.1 観測手法

#### 2.1.1 観測手法の概観と観測装置

最初に、ミリ波分光法を用いた大気分子の観測手法について述べる。私たちのグループでは、観測の手法としてミリ波電波分光法による地上観測によって大気分子を観測している [5]。その模式図を図 2.1 に示す。ミリ波電波分光法では、観測対象の大気分子の回転遷移によって放射されるミリ波帯電波を受信し分光することで、電波放射スペクトルを観測している。しかし、図 2.1 に示す通り、電波を地上で観測すると、経路上にある下層大気の水蒸気や雲の影響を考慮する必要があることに注意しなければならない。この影響は、下層大気的光学的厚みを実際に計測することで、補正ができる。光学的厚みの測定方法の詳細は 2.1.3 節にて述べる。

ミリ波分光計を用いた大気観測装置の構成を図 2.2 に示し、例として南極の昭和基地に設置された大気観測装置の様子を図 2.3 に示す。図 2.2 に示すように、観測装置は主に以下の 4 つの部分に分かれている。

##### 1. 光学系

大気分子からの信号を集光し伝送するための複数の鏡と電磁ホーンによって構成される。また、回転鏡を用いることにより、強度キャリブレーションに用いる基準雑音信号として、常温黒体 (300 K) と冷却黒体 (77 K) からの放射も入力できるようになっている。大気分子からの信号とその信号のキャリブレーション (詳細は 2.1.2 節) で用いる常温黒体と冷却黒体の測定との切り替えを行う。PLM (光路長変調器: Path Length Modulator) は光学系にて発生する定常波を除去する役割がある。

##### 2. ヘテロダイン受信機

大気分子からの信号を局部発振器からの信号と SIS ミクサで混合する。大気分子からの電波は微弱であるため、信号処理に適切なレベルまで増幅しなければならない。しかし、本研究で

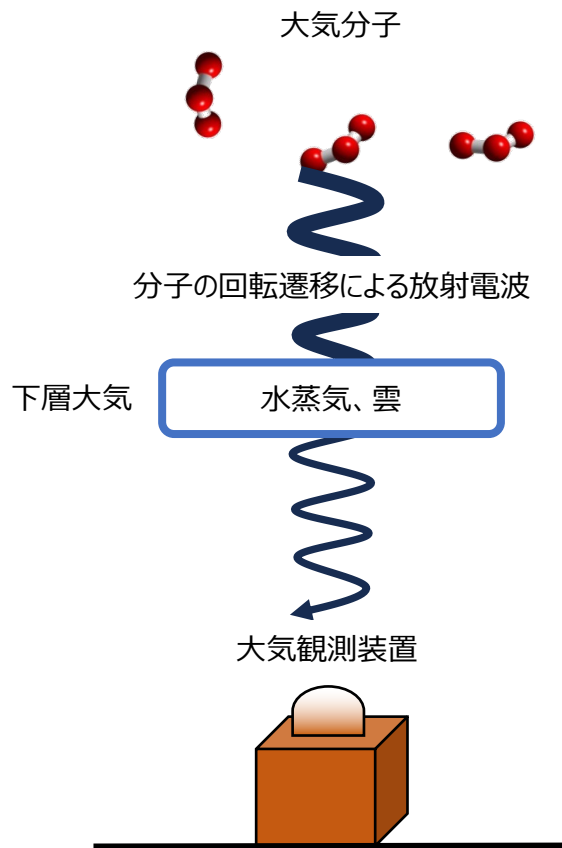


図 2.1: ミリ波電波分光法による地上観測の模式図

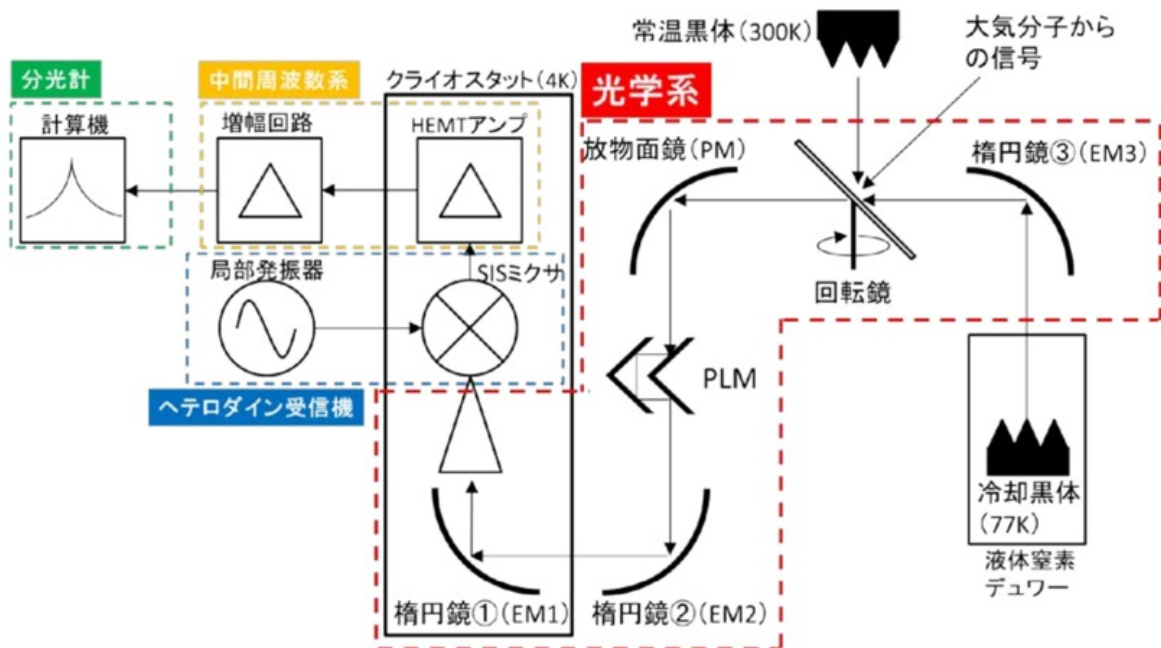


図 2.2: ミリ波大気観測装置の概略図 ([6] より引用)

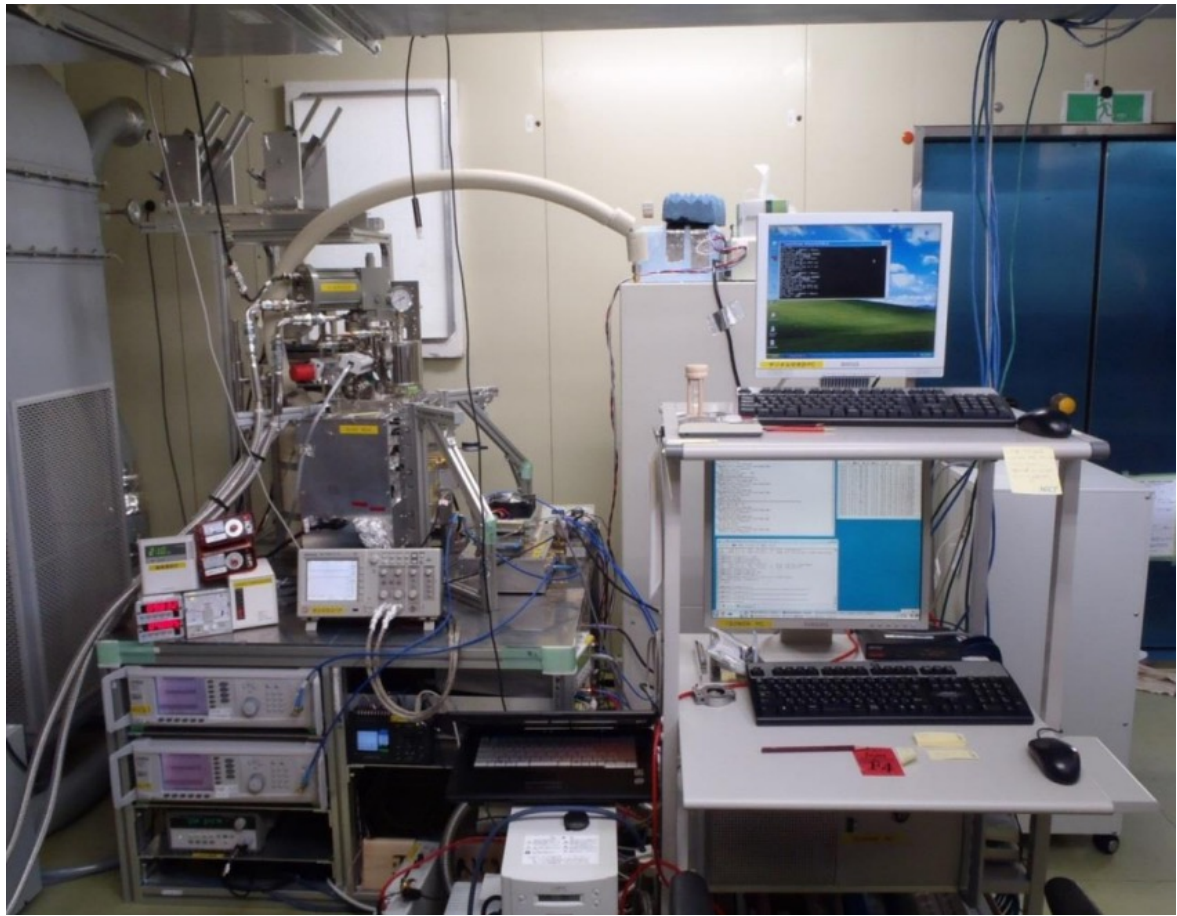


図 2.3: 南極の昭和基地に設置された観測装置（[7] より引用）

扱う電波の周波数（数百 GHz 程度）を直接増幅できる増幅器は、現在のところ実用レベルでは存在しない。そこで、受信した信号を SIS ミクサを用いて低い周波数（数 GHz 程度）に下げることにより、一般的なマイクロ波帯の HEMT アンプによって増幅する方法をとっている。このような受信方法をヘテロダイン方式と呼ぶ。

### 3. 中間周波数系

ミクサから出力された信号を後段の分光計にとって適切な周波数にさらに変換し、必要な電波強度レベルまで増幅する。

### 4. 分光計

入力信号を直接 A/D 変換して時系列データとして読み込み、それを高速フーリエ変換することにより大気分子の周波数スペクトルを得る。本研究で用いた大気分子のスペクトルデータを得るために使用された分光計は 16348 チャンネルの周波数スペクトルデータを出力する [6]。

ミリ波電波分光法による地上観測による最大の利点は、太陽光などの背景光源を必要としないため、昼夜を問わず連続的なモニタリングが可能なことである。これは、昼夜だけでなく白夜や極夜がある極地においても、その影響を受けずに連続観測することができる唯一の手法であることを意味している。以上より、連続的・長期的に観測を行うことが可能で、一地点において観測することにより自然起源や人為起源による長期的変動や短期的変動を観測することが可能であり、これが我々の研究グループがミリ波電波分光法による地上観測という世界的に見てもユニークな手法に力を入れている理由である。

## 2.1.2 電波強度のキャリブレーション

次に、観測された電波に対して黒体を用いて行う強度キャリブレーションの手法について述べる。一般的に電波領域の研究では、大気分子からの電波放射強度は、それと同等のエネルギーを放射する黒体の温度に換算して表す。ここでミリ波領域（周波数 30 – 300 GHz）においては、図 2.4 より Rayleigh-Jeans 近似が成り立つので、ほぼ Planck の放射式は以下のように表すことができる。

$$I_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT} - 1\right)} \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \left(\frac{h\nu}{kT}\right)^{-1} = \frac{2\nu^2}{c^2} kT \quad (2.1)$$

$I_\nu(T)$  : 電波強度、 $c$  : 光速、 $k$  : Boltzmann 定数、 $h$  : Planck 定数、 $\nu$  : 周波数、 $T$  : 黒体温度

この式から黒体温度と電波強度は比例の関係になるため、大気分子からの電波強度を黒体の温度に換算することが可能である。具体的には常温黒体（多くの場合室温の 300 K）と液体窒素で冷却された黒体（77 K）からの電波放射を受信機に入れることにより、受信電波強度を黒体の温度スケールリングする（これを強度較正あるいは強度キャリブレーションと呼ぶ）。これを図示すると、図 2.5 に示す直線が電波強度と黒体温度の対応を表す。また、この直線の  $y$  切片の値は受信機雑音の強度を表し、 $x$  切片の値の絶対値はこの強度を黒体温度で表した値となる。

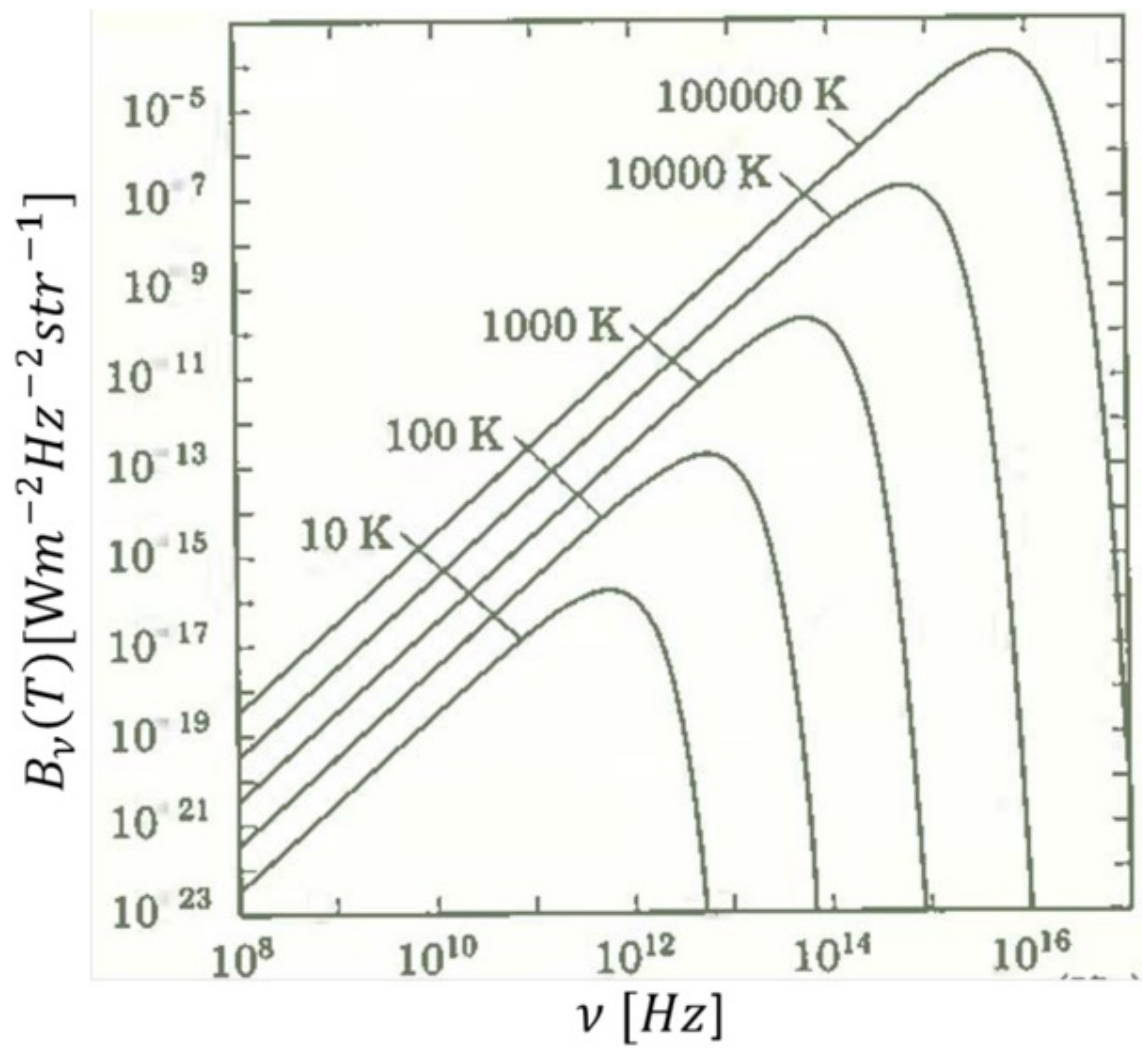


図 2.4: Planck の放射式 ( [6] より引用 )

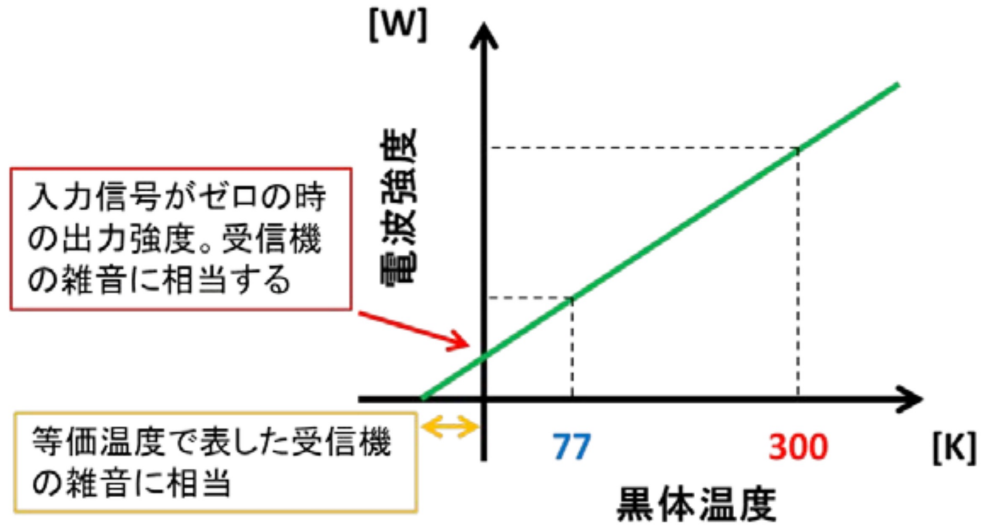


図 2.5: 電波強度のキャリブレーションの様子（[6] より引用）

### 2.1.3 光学的厚み

次に、受信された電波強度について、下層大気の影響の補正に用いる光学的厚みについて述べる。図 2.1 に示したように、成層圏よりも高い高度にある分子からの電波を地上で観測する際には、下層大気（主に対流圏）を通過してきた電波を観測することになる。そのため、下層大気に含まれる水蒸気や雲の放射および吸収の影響を考慮に入れる必要があり、光学的厚みという概念を導入する。

まず、光学的厚みとは何かということと、それがどのように電波強度に影響するかを述べる。図 2.6 のように、厚さ  $dx$  の大気層があり、図の左から強度  $T$  の電波が入射したときを考える。大気層で吸収および放射の影響を受けて、図の右に出てくる電波強度は  $T + dT$  で表される。このとき、吸収と自己放射を表す式は、 $\kappa$  を吸収係数、 $j$  を放射係数とすると

$$dT = -\kappa T dx + j dx \quad (2.2)$$

となる。次に光学的厚み（一般的に  $\tau$  で表す）を導入する。 $\tau$  は、

$$\tau = \int_0^x \kappa dx' + j dx \quad (2.3)$$

もしくは

$$d\tau = \kappa dx \quad (2.4)$$

と表され、これを用いて式 (2.2) を書き換えると

$$\frac{dT}{d\tau} = -T + \frac{j}{\kappa} \quad (2.5)$$



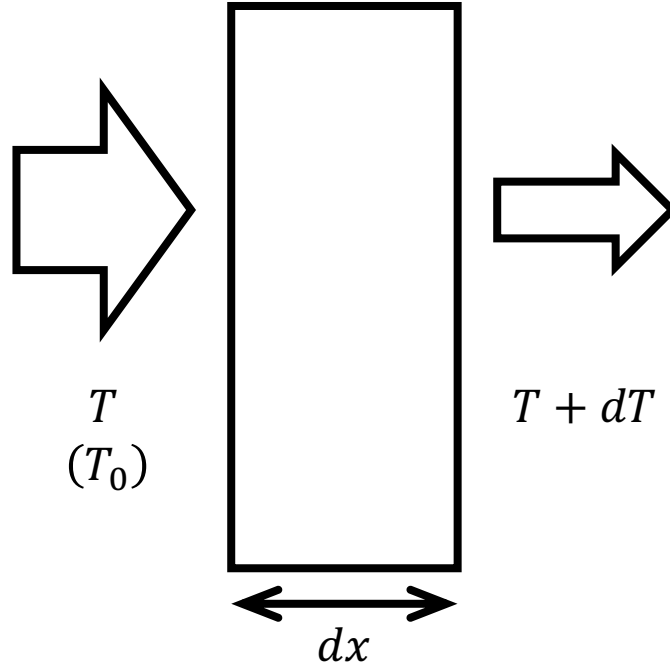


図 2.6: 厚さ  $dx$  の大気層を通過する電波強度の模式図

となる。次に、式 (2.5) の第 2 項において、熱平衡状態ではキルヒホッフの法則より

$$\frac{j}{\kappa} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT} - 1\right)} \equiv I_\nu = T_{\text{sky}} \quad (2.6)$$

$T_{\text{sky}}$  : 大気からの熱放射

が成り立つ。これを利用して式 (2.6) より式 (2.5) の解を求めると、

$$T = T_0 \exp(-\tau) + T_{\text{sky}} (1 - \exp(-\tau)) + T_{\text{sys}} \quad (2.7)$$

$T_0$  : 大気分子からの電波強度、 $T_{\text{sky}}$  : 受信機雑音

となる。これは、第 1 項が下層大気による電波吸収を考慮した（より上層にある）観測対象の分子からの電波強度、第 2 項は下層大気の熱放射を表している。実際の観測で得られるスペクトルデータとしては第 1 項が図 2.7 における橙色の成分、第 2 項が青色の成分に対応する（実際には青色の成分に第 3 項の受信機雑音も含まれるが、その詳細は 2.1.4 節にて述べる）。式 (2.7) の左辺  $T$  が観測値として直接的に得られる電波強度であるが、我々が知りたい値は、もともとの放射強度である  $T_0$  であるので、 $T_0$  を知るためには光学的厚みの補正が必要となるわけである。

次に、光学的厚みをどのように測定するかについて述べる。光学的厚みの測定は図 2.8 のように観測の間に定期的に行われており、たとえばトロムソの観測装置ではおよそ 5 分おきに測定されている。測定された光学的厚みの値は、直前に観測された電波強度のデータの補正に用いられる。光

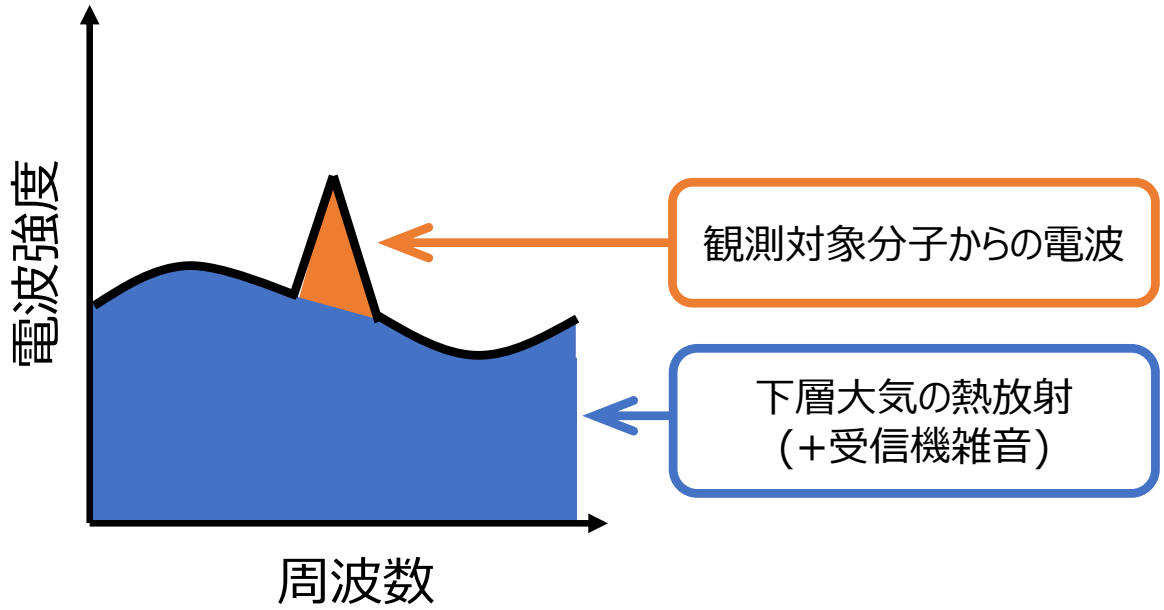


図 2.7: スペクトルデータの強度を決める要素

学的厚みの測定については Sky tipping と呼ばれる手法が用いられる。まず関係式として、以下の二式を用いる。

$$\begin{cases} T_z = T_{\text{sky}} \{1 - \exp(-\tau \sec z)\} + T_{\text{sys}} \\ T_{\text{obs.hot}} = T_{\text{hot}} + T_{\text{sys}} \end{cases} \quad (2.8)$$

$z$ : 観測する角度の天頂角

$T_z$ : 天頂角  $z$  での分子スペクトルを含まない周波数の信号強度

$T_{\text{obs.hot}}$ : 常温黒体を見たときの輝度温度

ここで、 $T_{\text{sky}} = T_{\text{hot}}$  と仮定し式 (2.8) の 2 式の差をとって両辺対数をとると

$$\ln(T_{\text{obs.hot}} - T_z) = \ln T_{\text{obs.hot}} - \tau \sec z \quad (2.9)$$

となる。この式は  $y = ax$  のような一次関数になっているため、左辺  $\ln(T_{\text{obs.hot}} - T_z)$  を縦軸、 $\sec z$  を横軸としたプロットを作成すると、図 2.9 のようになることがわかる（プロットデータは観測装置の回転鏡により  $z$  の値を変えている）。これらのプロットに対して一次の近似直線を引いたとき、その直線の傾きが光学的厚みに負の符号をつけたものと対応する。以上より、光学的厚みを観測的に求めることができる。

トロムソの観測装置で実際に測定している  $\sec z$  の値は、表 2.1 のようになっている。ここでは、それに対応した天頂角  $z$  と仰角の値も示す。

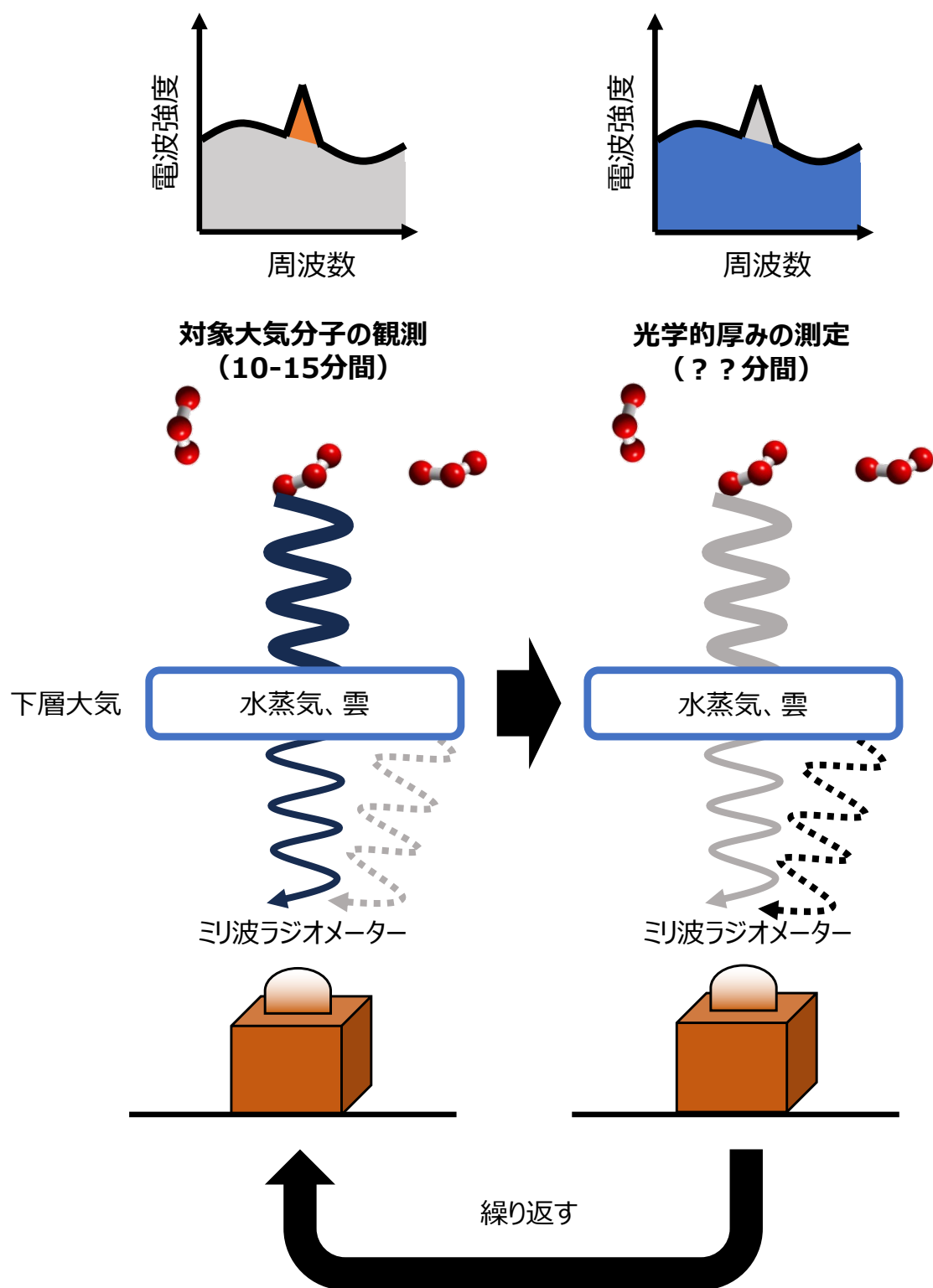


図 2.8: ミリ波観測と光学的厚み ( $\tau$ ) の測定の流れ

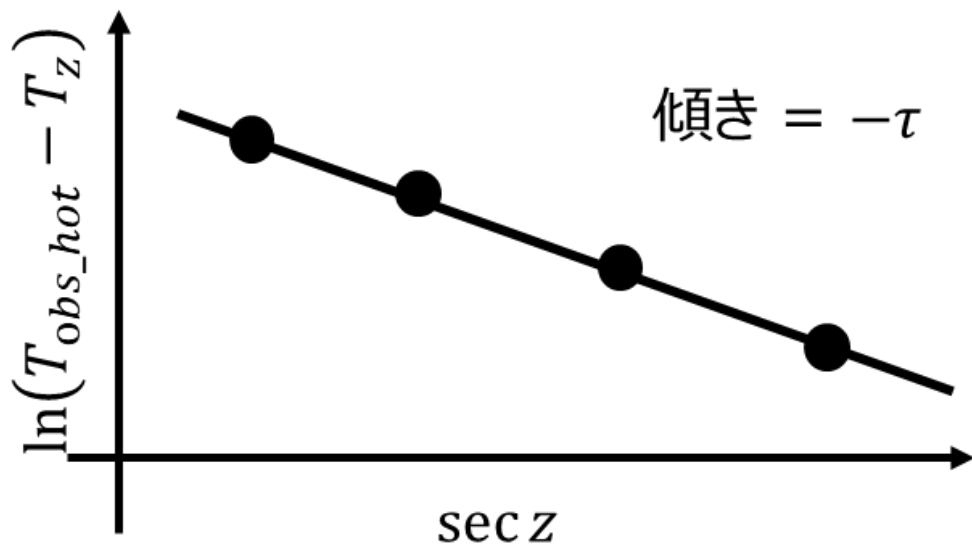


図 2.9: 光学的厚み  $\tau$  を求めるためのプロットデータの模式図

表 2.1:  $\sec z$  と天頂角  $z$  [deg] と仰角 [deg] との対応

$\sec z$	天頂角 $z$ [deg]	仰角 [deg]
1.46	47	43
1.83	57	33
2.28	64	26
2.79	69	21

#### 2.1.4 周波数スイッチング

観測されたスペクトルデータから対象の分子スペクトルのみを得るためには、大気の大気熱放射と観測装置の受信機雑音によるオフセット成分を除去する必要がある。このオフセットを除去するにはいくつかの手法が行われているが、本研究で使用する観測装置では、周波数スイッチング（以後FRSWとする）という手法を用いる。ただし、FRSWによるオフセット成分の除去はおおまかなものであるため、本研究のように弱いスペクトルを検出する必要がある場合には、さらに細かくオフセット成分を補正する処理が必要となる（詳細は3.4節で述べる）。本研究では、ハードウェアでのFRSWによるデータ取得に加えて、周波数折返し処理という解析方法を用いる。この手法を用いることで、オフセット成分を除去するとともに、スペクトルデータの信号対雑音比（S/N比）を向上させている。

まず、ハードウェア的に行われるFRSWについて説明する。ある周波数において最初に取得されるデータを図2.10（a）に示す。次に、局部発振器の周波数を $\Delta f$ ずらした状態でデータを取得する（図2.10（b））。これにより、分光計のチャンネル上では、異なるチャンネルに同じ分子からの輝線スペクトルが現れる2つのデータが得られる。その次に、解析では、まず（a）から（b）を差し引いたデータを作成する（図2.10（c））。これにより、（a）と（b）に共通に乗っていたオフセット成分が差し引かれる。さらに（c）を上下反転して、ずらした周波数 $\Delta f$ を戻した（d）を作成する。この（d）と（c）のデータを足し合わせて2で割る処理をする（周波数折返し処理）。（a）と（b）で取得された輝線スペクトルのデータは独立なものなので、この処理をすることによって、大気雑音や受信機雑音などのランダムなノイズ成分が低減し、S/N比としては $\sqrt{2}$ 倍向上する（図2.10（e））。そして、最終的に得られる分子スペクトルとしては、図2.10（e）中の黄色で囲まれたところのみを使う。

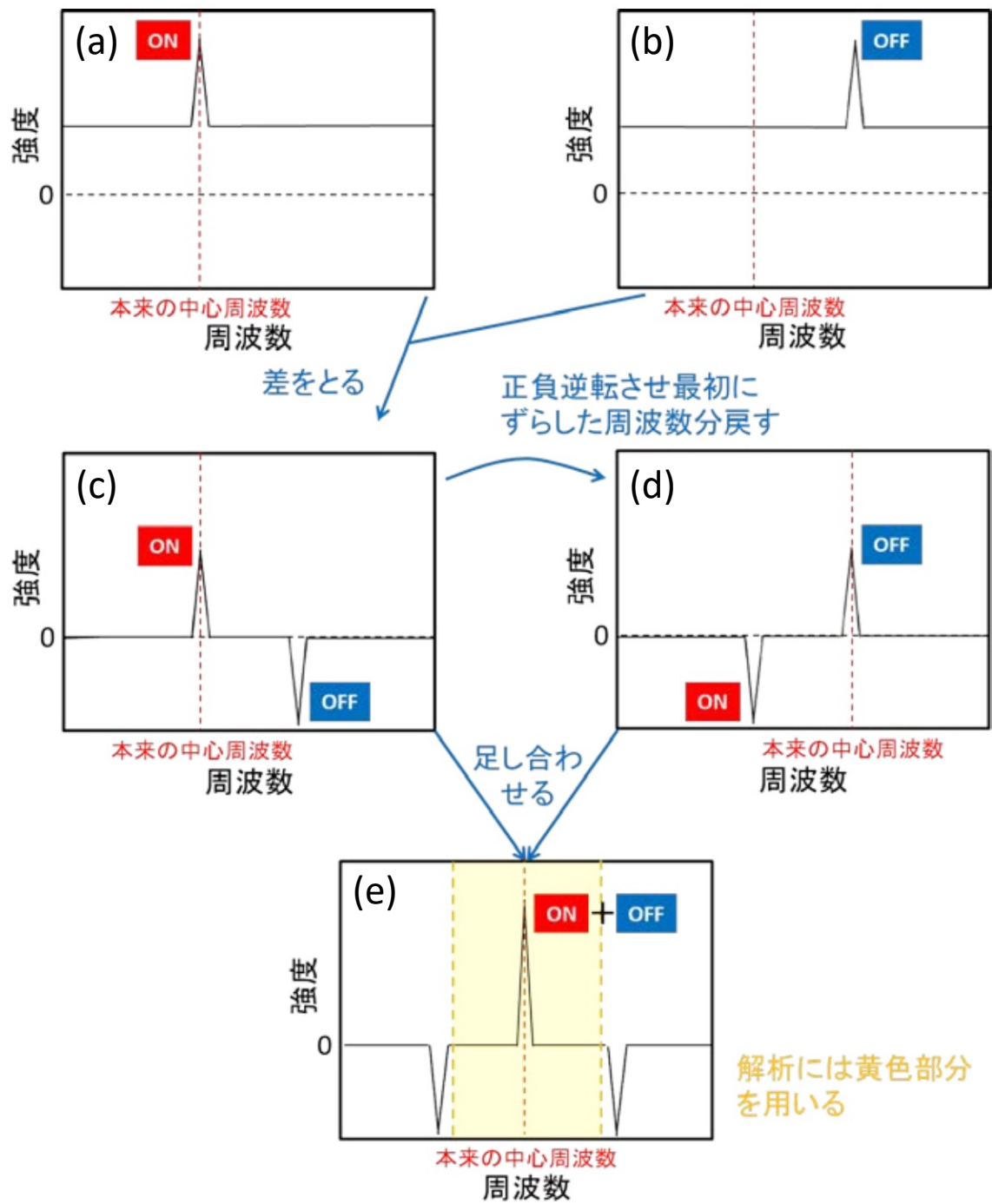


図 2.10: 周波数スイッチングと周波数折り返し処理の概要（[6] より引用）

## 2.2 観測場所

2.2 節では、解析に用いたノルウェーのトロムソと南極の昭和基地のミリ波分光計について、それぞれ観測を立ち上げた時期と設置されてきた分光計の概要を述べる。トロムソと昭和基地で設置された分光計の仕様を表 2.2 に示す。

表 2.2: トロムソ（1 段目）と昭和基地（2 段目）で設置された分光計の仕様

	期間	FrontEnd	BackEnd	観測対象の分子
単周波数分光計	2016 年 -	Double sideband PCTJ SIS mixer	FFT 分光計 帯域 $\sim 1$ GHz 分解能 $\sim 61$ kHz	NO, O <sub>3</sub> (切替観測)
多周波数分光計	2022 年 7 月 -	2 Single sideband series-array SIS mixers	FFT 分光計 帯域 $\sim 2.5$ GHz 分解能 $\sim 76$ kHz	NO, O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , HO <sub>2</sub> (同時観測)

### 2.2.1 ノルウェー・トロムソでの観測 (69.35°N, 19.14°E)

1.2 節で述べたように、NO のミリ波分光観測において、南極域の夏期には光化学反応の影響による NO の減少によって NO の短期変動の観測が困難になっているという課題がある。これは、季節が逆転する北極域において同様の観測を行い、両極域で NO の同時モニタリングをすることによって解決できる可能性がある。なぜなら、両極において日照時間の長さは真逆の関係になっており、一方の極が夏期（極域では白夜）ならもう一方の極は冬期（極夜）になるからである。つまり、光化学反応の影響を強く受ける夏期では原因の切り分けが難しいが、同時期にもう一方の極でデータを取得して比較することで、EPP による短期間変動を切り分けることができると考えた。

我々は、北極域での観測拠点としてノルウェーのトロムソにある EISCAT(European Incoherent Scatter) レーダー観測所に、2015 年から 2016 年にかけて新たな観測装置を設置した [6]。トロムソは南極の昭和基地とおおよそ地理緯度が同じであるため、大きな EPP が起きると同時に影響を受けると期待できる。また観測値として既存の観測所を利用することで、観測装置の設置や運用のために新たにインフラを整備する必要がないという利点があるほか、EISCAT レーダーの観測によって得られる電離圏の電子密度などのデータを用いることで、電子降り込みに関する情報と比較することができるということも重要である。しかし、トロムソではミリ波地上観測が行われたことが無く、とくに我々にとって、はじめての観測地である。そのため、周囲の電波環境や下層大気の状態、さらに新たに開発された観測装置の現地での特性などは明らかではなく、実際にどのような質のデータが取れるのかということの確認がまず必要であった。

本研究では、取得されるデータを科学研究に最大限に活用するために、データの傾向や特徴を精査した。そして、その傾向や特徴からデータのスクリーニング（特定の条件を設定し、全体の

データから解析に用いることができるデータのみを選別)を行った(詳細は3.1節と3.2節にて述べる)。今回は2018年12月26日～2019年3月10日の期間に行われたテスト観測データを用いた。

## 2.2.2 南極・昭和基地での観測 (69.00°S, 39.85°E)

南極の昭和基地では2011年に観測装置が立ち上げられ、現在まで観測が続けられている[4,8]。今回は2023年3月22日～2023年3月30日の観測データを用いた。昭和基地では、設置当初からO<sub>3</sub>とNOを切り替えることで、両分子のモニタリング観測が行われてきた。これらの同時観測を行うため、2020年に新たに多周波数分光計が設置され、2022年7月より定常観測を開始した[9,10]。一度に分光できる帯域幅は、従来の分光計と比較すると、1GHzから2.5GHzに広がった(表2.2)。帯域が広がったことにより、NO・O<sub>3</sub>・CO・NO<sub>2</sub>・HO<sub>2</sub>の5分子同時観測が実現しただけでなく、とくにNOについては輝線スペクトルの本数を増やすことができた。トロムソに設置されている分光計では、超微細構造線のうち2本の輝線スペクトルのみの観測であったが、昭和基地の新たな分光計では合計6本の輝線スペクトルを観測することができるようになった。

昭和基地で現在同時観測されている分子スペクトルの例を図2.11に示す。黒枠が6本のNOスペクトルを表し、そのうち赤枠で示したもののみがトロムソで観測されている2本のスペクトルである。それぞれの輝線スペクトルの静止周波数と遷移については、表2.3に示す。なお、NOスペクトルの静止周波数および線スペクトル強度係数は、NASAが提供しているJPL Catalog<sup>1)</sup>より調べた。線スペクトル強度係数は柱密度の導出に用いるパラメーターである(詳細は3.5節)。図

表 2.3: トロムソと昭和基地で観測される6本のNOの輝線スペクトル

周波数 [GHz]	観測可能		$J$	$P_{ul}$	$F$	IF 周波数 [MHz]	線スペクトル強度係数 $A$ [K <sup>-2</sup> MHz <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]
	Tromsø	Syowa					
250.436848	○		5/2 – 3/2	+ → -	7/2 – 5/2	1124.3	4.00 × 10 <sup>13</sup>
250.440659	○		5/2 – 3/2	+ → -	5/2 – 3/2	1128.2	6.35 × 10 <sup>13</sup>
250.448530	○		5/2 – 3/2	+ → -	3/2 – 1/2	1136.0	1.07 × 10 <sup>14</sup>
250.796436	○		5/2 – 3/2	- → +	7/2 – 5/2	1483.9	3.99 × 10 <sup>13</sup>
250.815954	○	○	5/2 – 3/2	- → +	5/2 – 3/2	1503.1	6.33 × 10 <sup>13</sup>
250.816954	○	○	5/2 – 3/2	- → +	3/2 – 1/2	1504.5	1.06 × 10 <sup>14</sup>

2.11を見ると、O<sub>3</sub>スペクトルと比較して、NOスペクトルはとても微弱である。そのため、取得された全スペクトルデータのうち、どのデータが解析に用いることができるかということをあらかじめスクリーニングして抽出することが重要となる。

1) <https://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catform.html>



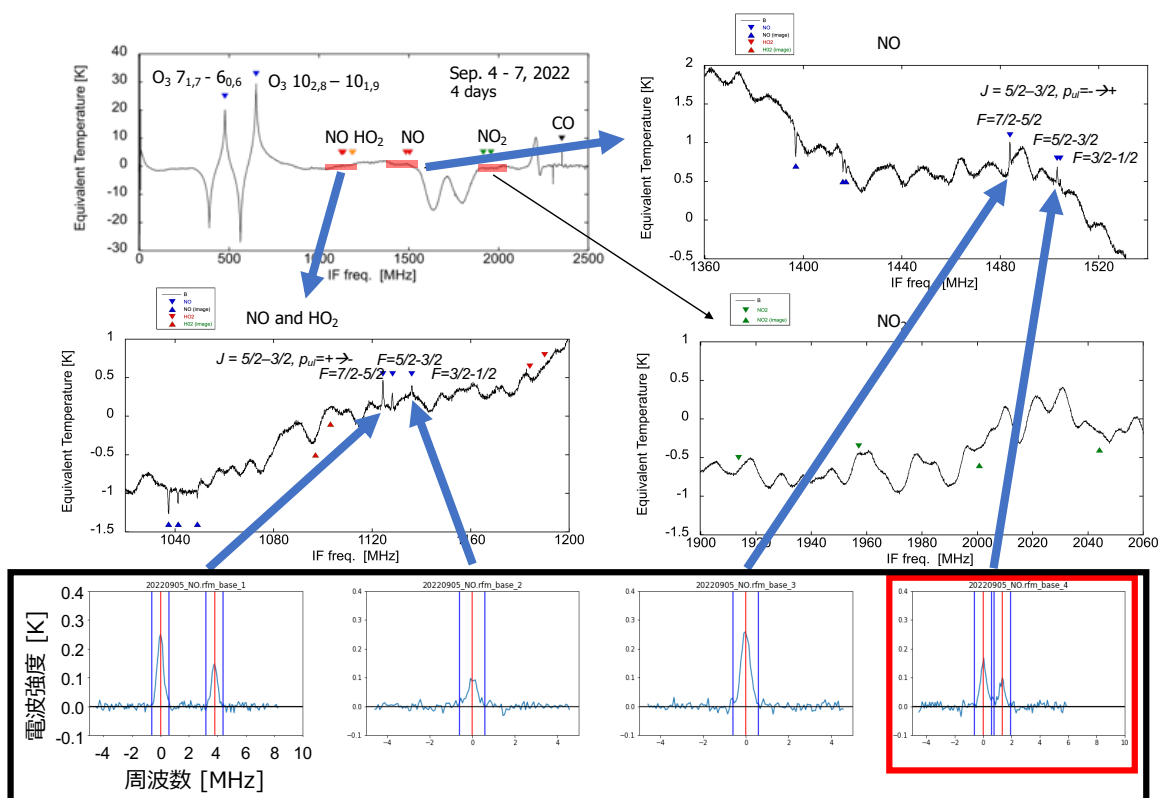


図 2.11: 昭和基地で現在観測されている 6 本の NO 輝線スペクトルの例

## 参考文献

- [1] Eugene Rozanov, M Calisto, T Egorova, T Peter, and W Schmutz. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surveys in geophysics*, Vol. 33, pp. 483–501, 2012.
- [2] A Seppälä, CE Randall, Mark A Clilverd, Eugene Rozanov, and CJ Rodger. Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 114, No. A10, 2009.
- [3] Manuel López-Puertas, B Funke, S Gil-López, T Von Clarmann, GP Stiller, M Höpfner, S Kellmann, H Fischer, and CH Jackman. Observation of NO<sub>x</sub> enhancement and ozone depletion in the northern and southern hemispheres after the october–november 2003 solar proton events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, No. A9, 2005.
- [4] Yasuko Isono, Akira Mizuno, Tomoo Nagahama, Yoshizumi Miyoshi, Takuji Nakamura, Ryuho Kataoka, Masaki Tsutsumi, Mitsumu K Ejiri, Hitoshi Fujiwara, Hiroyuki Maezawa, et al. Ground-based observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over antarctica in 2012–2013. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 119, No. 9, pp. 7745–7761, 2014.
- [5] A Mizuno, T Nagahama, A Morihira, H Ogawa, N Mizuno, Y Yonekura, H Yamamoto, H Nakane, and Y Fukui. Millimeter-wave radiometer for the measurement of stratospheric ClO using a superconductive (SIS) receiver installed in the southern hemisphere. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 23, No. 7, pp. 981–995, 2002.
- [6] 伊藤弘樹. ノルウェー・トロムソに向けたミリ波分光観測装置の開発～NO 分子両極域同時観測を目指して～. 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文, 2017.
- [7] 上村美久. 地上ミリ波観測装置による極域中間圏一酸化窒素の時間変動. 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文, 2014.
- [8] Yasuko Isono, Akira Mizuno, Tomoo Nagahama, Yoshizumi Miyoshi, Takuji Nakamura, Ryuho Kataoka, Masaki Tsutsumi, Mitsumu K Ejiri, Hitoshi Fujiwara, and Hiroyuki Maezawa. Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over antarctica associated with a magnetic storm in april 2012. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 7, pp. 2568–2574, 2014.
- [9] 岩田裕之. 南極昭和基地における中層大気多分子同時観測のためのミリ波分光観測装置フロントエンドの開発. 名古屋大学大学院 工学研究科 修士論文, 2019.
- [10] 小瀬垣貴彦. 南極昭和基地における中層大気多分子同時観測のためのミリ波分光観測装置フロントエンドの開発. 名古屋大学大学院 工学研究科 修士論文, 2020.
- [11] 後藤宏文. トロムソにおける一酸化窒素 (NO) スペクトルデータのスクリーニングとキャリブレーションに関する考察. 名古屋大学 工学部 卒業論文, 2021.