

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3章 ミリ波観測解析手法

2章で述べたように、トロムソは我々にとっては観測自体がはじめての場所であり、昭和基地においては分光計を更新してからのはじめての観測である。そのため、それぞれ観測装置立ち上げ後に行われたテスト観測のデータを1つずつ精査した。また、2.2.2節の図2.11で示したようにNOの輝線スペクトルはとても微弱である。そのため、S/N比がよい状態で輝線スペクトルを抽出する必要がある。今回、NOの柱密度（Column Density）の導出をするにあたって、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）と電波強度の補正を行った。ミリ波分光に関する装置は市販されていないため観測装置は自作となっており、その関係でスクリーニング、電波強度の補正に関わるプログラムは自ら作成した。スクリーニングと電波強度の補正については、以下のようにそれぞれ2つの観点から行った。

- スクリーニング
 - 光学的厚みデータを用いたスクリーニング（3.1節）
 - 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（3.2節）
- 電波強度の補正
 - 光学的厚みデータの補正（3.3節）
 - NOスペクトルデータのベースラインの補正（3.4節）

3.1節と3.4節までのスクリーニングを行った結果、解析期間についてトロムソでは2019年1月23日～2019年2月4日と2019年2月17日～2019年2月20日、南極・昭和基地では2023年3月22日～2023年3月30日となった。3節では、それぞれの手法について上記のように順番に述べていき、最後の3.5節では柱密度の導出手法について述べる。

3.1 光学的厚みデータを用いたスクリーニング

2.1.3節で述べたように、ミリ波分光計を用いた地上観測では下層大気による影響を受けるため、光学的厚みの測定データを用いてこの影響を取り除く必要がある。したがって、光学的厚みの測定データは観測データに対して十分に安定していなければならない。図3.1に示しているデータは、トロムソの観測装置立ち上げ後行われたテスト観測に測定された光学的厚みの時間変化を表したものである。比較的値が安定している時期と、値が大きくばらついて安定していない時期がある（例として赤丸で示す）。この赤丸で示された時期は、光学的厚みの典型値（たとえば南極昭和基地ではおよそ0.1–0.4の範囲の値をとる）とは大きく外れている。さらに、このように短時間での値の変動が大きい場合は、それぞれ光学的厚みが測定された時間の間で下層大気の影響が一様でないことになる。そのため、測定された光学的厚みの値を用いて、光学的厚みが測定された時間の間に観

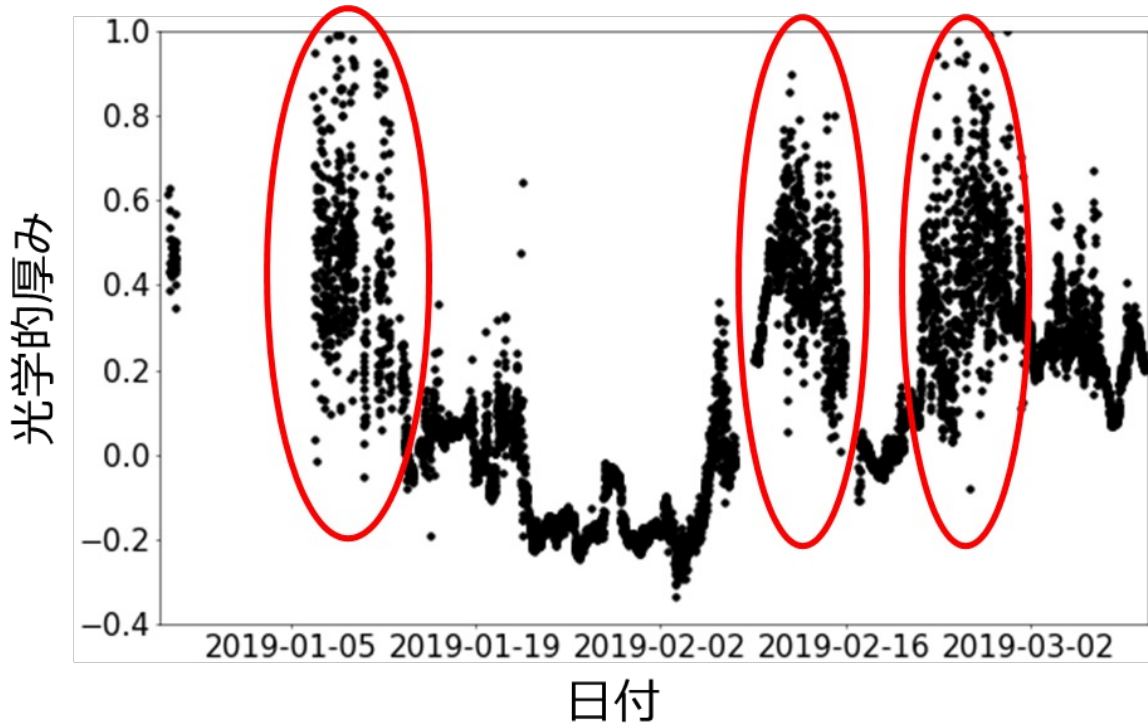


図 3.1: トロムソでの光学的厚み測定データの時間変化（[11] より引用）

測された電波強度の補正をするには適さないと考えられる。そこで、観測データの強度の補正に使用できる光学的厚みデータを判別するために、まず光学的厚みデータのスクリーニングを行うことを考える。このスクリーニングで残った期間の NO スペクトルデータを後の解析に用いることとする。判別方法としては、1 日ごとにデータを区切りそれぞれの日の範囲で分散を計算し、その分散が 0.005 以下の値の日をとるデータを使用することとし、これを観測データのスクリーニングの条件として使用した。この条件を設定することで、光学的厚みの変動が大きい日のデータを除去することができる。分散の閾値を 0.005 としたのは図 3.1 のデータを目視し、値が安定していると判断した 2019 年 1 月 23 日～2019 年 2 月 4 日の分散がいずれも 0.005 以下であったため、このように設定した [11]。南極・昭和基地の解析においても同条件でスクリーニングを行った。

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

NO スペクトルデータにおいて、解析に使うことのできない質の悪いデータを事前にスクリーニングすることを考える。トロムソの観測期間の全取得データを精査した結果、ノイズを含むスペクトルデータにおいて、スパイク状のノイズを含むデータと全体的にノイズを含むデータの 2 種類に大別できることがわかった [11]。スパイク状のノイズを含むデータと全体的にノイズを含むデータをそれぞれ判別する条件を考えることで、図 3.2(a) のような質の良いデータのみを抽出することを目指す。まず、NO スペクトルが存在する周波数を含むチャンネル 5000-10000 の範囲のデータに対

し 2 次曲線をフィッティングし、全体的にノイズがどれだけ含まれているか調べるために近似値に対する測定値の 2 乗平均誤差を計算した。ここではチャンネル 5000-10000 においてスペクトルデータの変動が二次関数的であったため、二次近似を用いている（図 3.2(a) の赤線）。これらの結

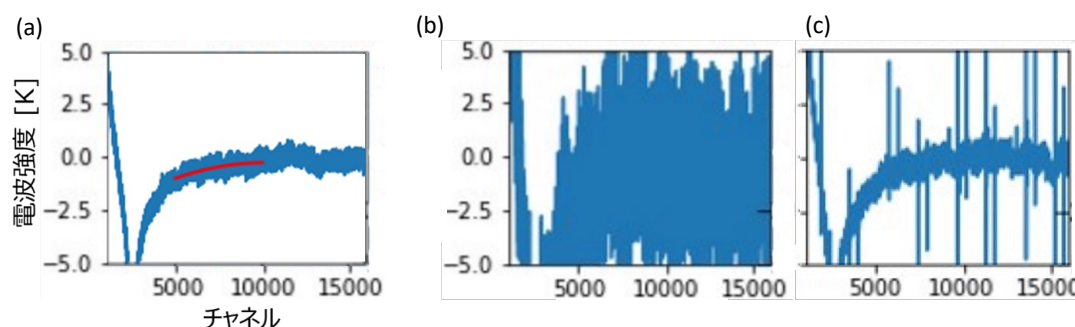


図 3.2: (a) 解析に用いるために望ましい生データの一例（5000 ch 以下のデータは 239.093279 GHz のオゾンの放射スペクトルデータが FRSW により反映された結果、赤線は 5000 – 10000 ch でのスペクトルデータの近似二次曲線を表す。）。(b)(c) スクリーニングしたいデータの例（(b) は全体的にノイズを含む例、(c) はスパイク状のノイズを含む例を表す）。

果から、スクリーニング条件としては以下 2 つを設定した [11]。

- 2 乗平均誤差の整数丸め値が 0 である
- チャンネル 5000-10000 で強度の絶対値が 5 K 以上の値を含まない

1 つ目の条件は、全体的にノイズを含むデータ（たとえば図 3.2(b)）を判別・除去することを意図しており、2 つ目の条件はスパイク状のノイズを含むデータ（たとえば図 3.2(c)）を除去することを意図している。設定したスクリーニング条件が妥当かどうかの検証は卒業研究 [11] にて行った。

3.3 光学的厚みデータの補正 (Tromsø)

3.1 節の述べたように、不安定な光学的厚みのデータを除去するスクリーニングの結果によって、トロムソの観測データにおいて図 3.3 のように期間 A（2019 年 1 月 23 日～2019 年 2 月 4 日）、期間 B（2019 年 2 月 17 日～2019 年 2 月 20 日）が残った。しかし、期間 A において光学的厚みが -0.2 付近の負の値をとっていることがわかった（図 3.3 の赤丸）。2 章で述べた光学的厚みの算出方法のことを考えると、下層大気的光学的厚みの値が負の値を取ることはない。そこでこの原因を調べたところ、光学的厚みを算出する際の各観測天頂角に対するプロットデータにおいて、もっとも観測天頂角が小さい（ $\sec z$ が 1 番小さい）ところのプロットデータが下に落ち込んでおり、それによって近似直線の傾きが変化してしまうことで、光学的厚みが負の値として計算されていることが分かった [11]。その模式図を図 3.4、実際の測定データ例を図 3.5 に示す。さらに、そのプロットデータの落ち込みの原因を調べたところ、ちょうど光学的厚みの値が負の値となっている期間の終

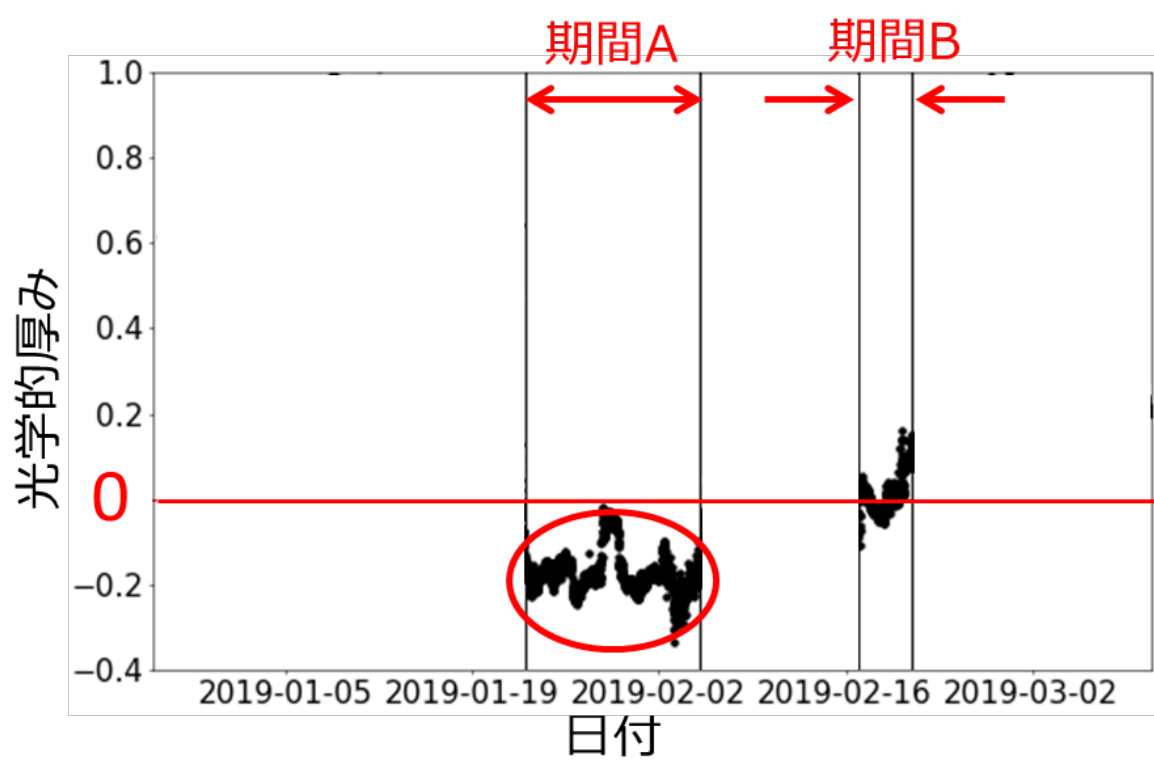


図 3.3: トロムソにおいて負の値をとる光学的厚み（[11] より引用）

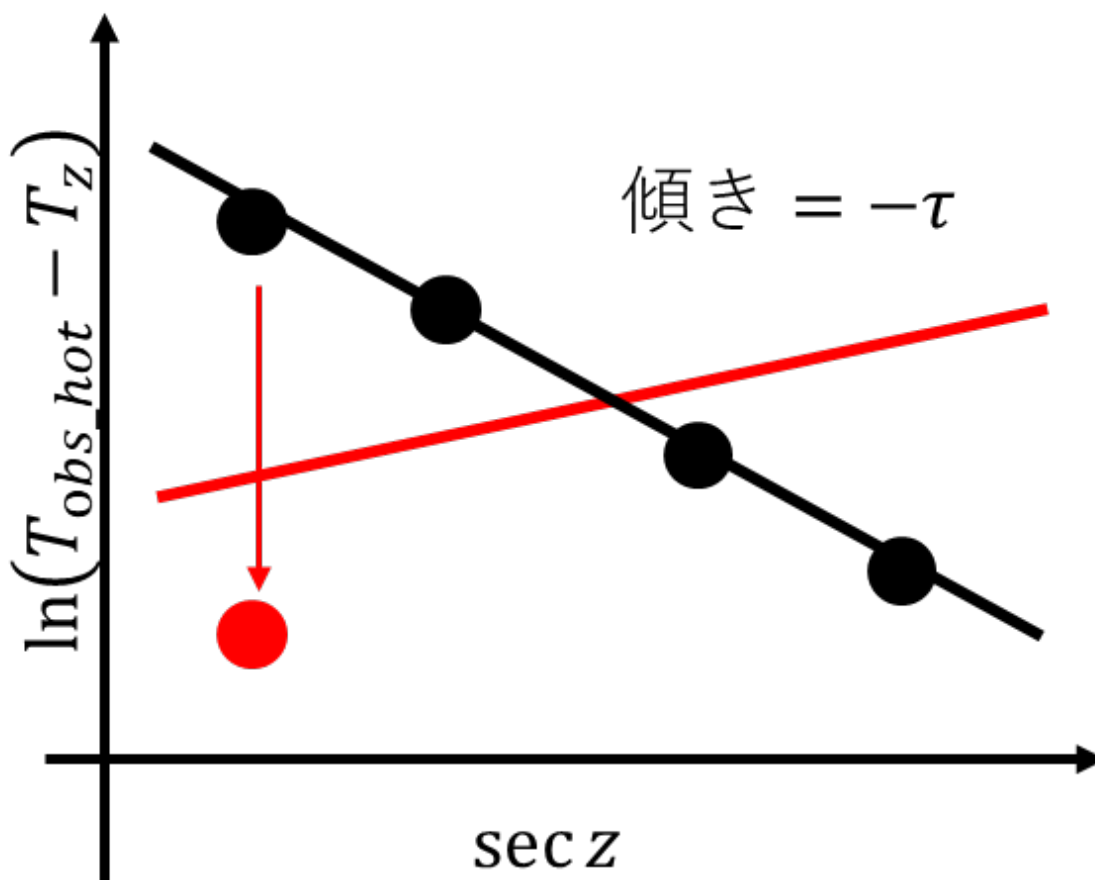


図 3.4: プロットデータの落ち込みによる光学的厚みの計算値の変化（プロットデータの落ち込みにより近似直線が黒線→赤線に変わり、直線の傾きが変わる） [11] より引用。

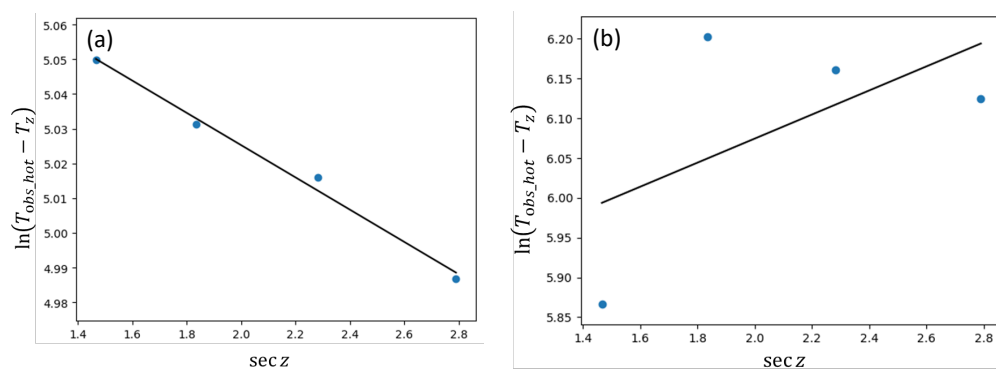


図 3.5: (a) 望ましいプロットデータの一例（2019 年 2 月 17 日 5 時 51 分頃測定）。(b) プロットデータが落ち込んだ実際のデータの一例。（2019 年 1 月 23 日 0 時 5 分頃測定）。黒線は近似直線を表す。 [11] より引用。

わりごろに、ミリ波観測装置のビームが通る側面の観測窓の上部に氷柱ができているのを見つけたという報告があり（図 3.6）、それが時期的に一致していることが分かった [11]。したがって、天頂



図 3.6: 側窓にできた氷柱（[11] より引用）

角がもっとも小さい角度で測定された電波強度に影響を与えた可能性があると考え、そのデータを用いずに光学的厚みを測定し直し、光学的厚みの補正を行った。設定した補正手法が妥当かどうかの検証は卒業研究 [11] にて行った。

3.4 NO スペクトルデータのベースラインの補正

3.1 節や 3.2 節によるスクリーニングで残った期間における NO スペクトルデータについて積分を行う（積分時間はトロムソでは 24 時間、南極・昭和基地では 12 時間）。これは昭和基地で行われた先行研究である Isono らによる研究 [4] より、1 日程度の積分をすることで十分な S/N 比で議論することができると考えたためである。そして、観測データに含まれている NO のスペクトルを検出するため、ベースラインの補正を行う。ここでは、スペクトルの両端におけるデータを用いてバックグラウンドのベースラインを近似から求め、それを元のスペクトルから差し引くことによって、FRSW で除去しきれなかったオフセット成分や周波数特性のうねりなどを除去した。ベースラインの補正の模式図を図 3.7 に示す。ベースラインの近似に用いるデータは、図 3.8 の赤色で

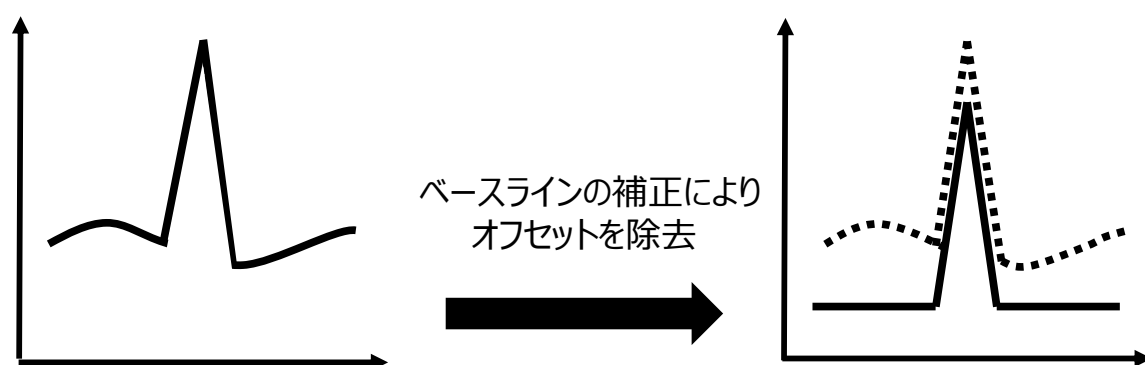


図 3.7: ベースライン近似を用いたベースラインの補正

示したスペクトルの両端のそれぞれ 5 MHz の範囲とした。この範囲は、対象とする NO の放射スペクトル成分が含まれないと考えられる。スペクトルデータのベースラインの特性の傾向が、図 3.9 示す赤い曲線のような三次関数的な形であったので、ここでは三次関数で近似を行うことにした。また、NO の各スペクトル幅は 1 MHz と仮定した。このように仮定したのは対象の時期の日ごとのデータにおいて、放射スペクトルである三角の山状の幅の大きさがどの日のデータにおいてもおよそ 1 MHz であることが確認できたためである（図 3.10 にあるデータの一例において、スペクトル幅がおよそ 1 MHz であることが確認できる）。

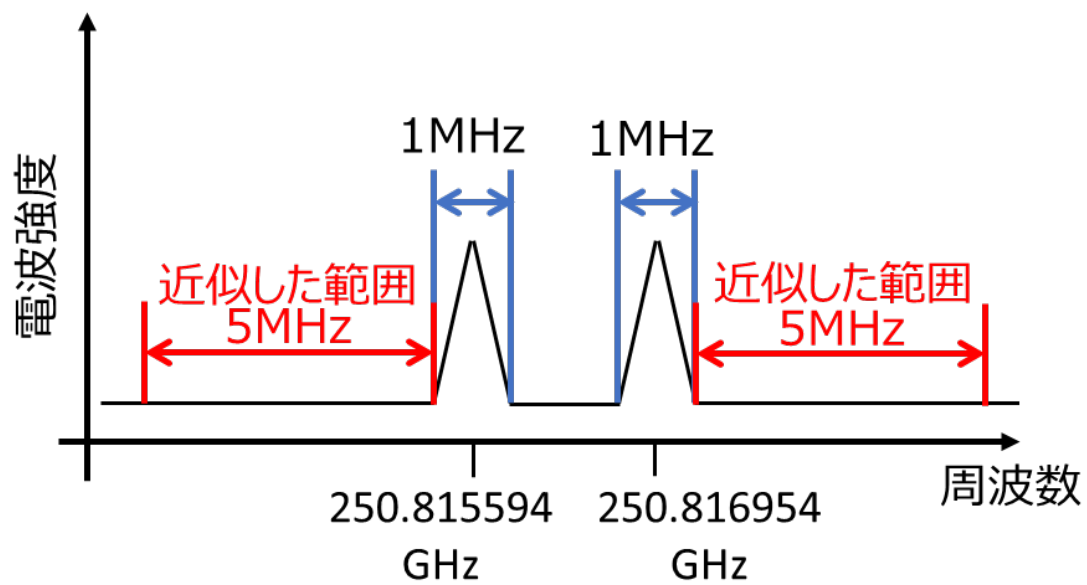


図 3.8: ベースラインを補正する元となる周波数の範囲（赤色で表示。青色は検出するスペクトルの幅を示している。例としてトロムソで用いた 2 本の輝線スペクトルの場合を示した。）

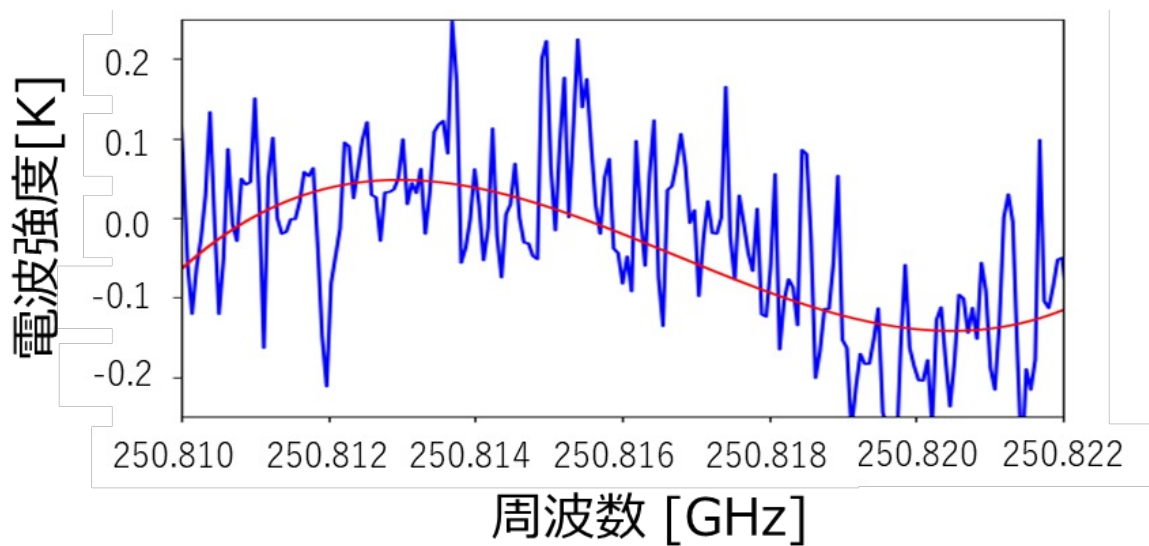


図 3.9: 三次関数的な形のベースライン（[11] より引用）

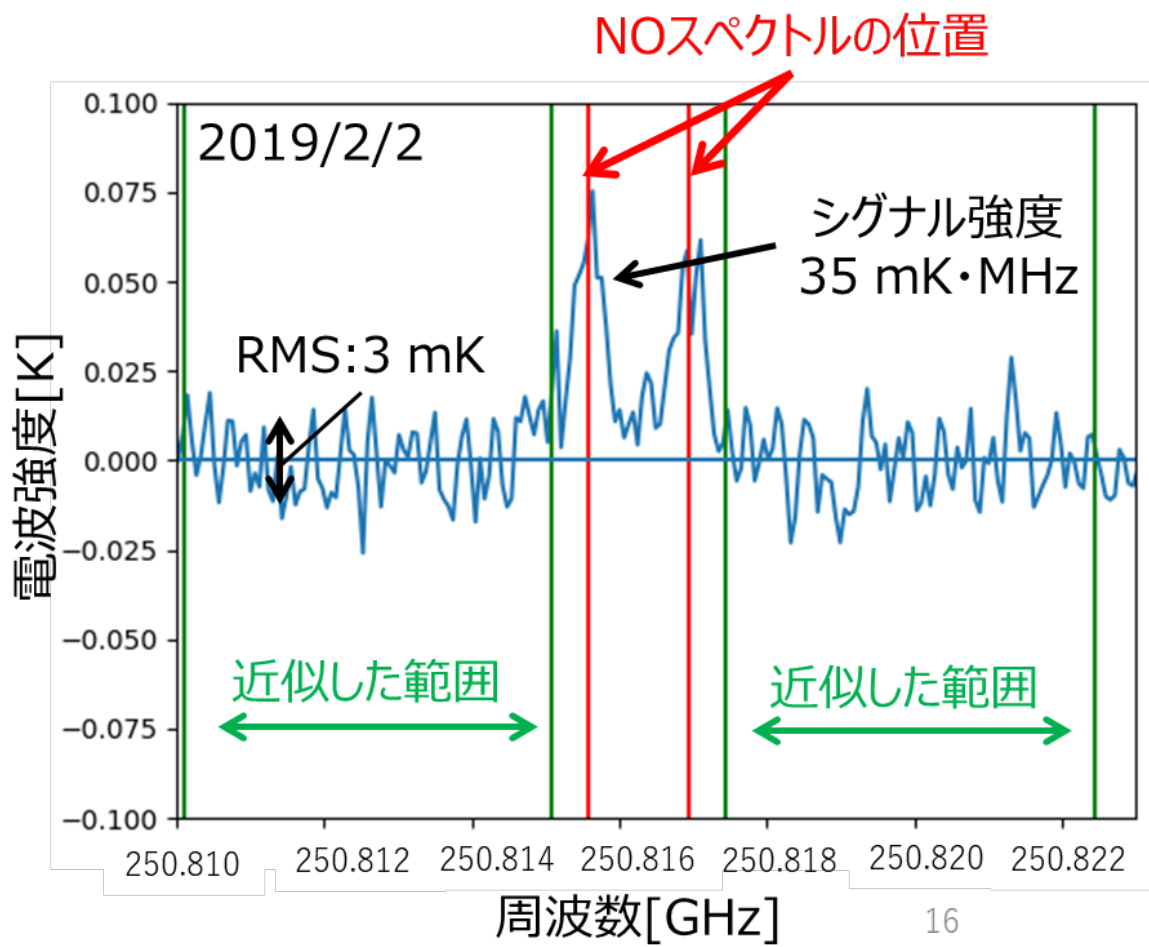


図 3.10: スペクトルの検出の一例（赤線は検出するスペクトルがある周波数の位置、緑線はベースライン近似に用いたスペクトルデータの範囲を示す。[11] より引用）

3.5 NO 柱密度 (Column Density) の導出

柱密度とは高度方向に密度を足し合わせたものであり、今回はスペクトルの線形から 70 km 以上に存在する NO 分子についてみたものとなる。柱密度の導出においては先行研究 [4] を参考にして行った。導出に用いた式は以下のようになる。

$$N_{\text{NO}} = A \times T_{\text{atm}} \times \int T_{\text{NO}} d\nu \quad (3.1)$$

N_{NO} : NO の柱密度 [cm^{-2}]、 A : 線スペクトル強度係数 [$\text{K}^{-2} \cdot \text{MHz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$]

T_{atm} : 大気温度 [K]、 $\int T_{\text{NO}} d\nu$: NO のスペクトル積分強度

線スペクトル強度係数は輝線スペクトルの強度を知るための分子パラメーターで分子・周波数ごとに決まる値となる。今回用いた NO の輝線スペクトルにおけるそれぞれの線スペクトル強度係数については 3 章の表 2.3 に記載している。大気温度については一様に 200 K と仮定し、NO が存在する領域においては光学的に薄いと仮定している。誤差については 3.4 節で述べたベースライン近似の際に用いた範囲での RMS (Root Mean Square) を用いて、式 3.1 と同様の方法で求めた。式を以下に示す。

$$N_{\text{NO}} = A \times T_{\text{atm}} \times \int T_{\text{rms}} d\nu \quad (3.2)$$

T_{rms} : RMS[K]

また、柱密度をプロットするにあたって、はじめに柱密度の導出はそれぞれの輝線スペクトルについて行い (式 3.1)、次に用いた輝線スペクトルの柱密度について平均を計算した。柱密度の平均については、それぞれの輝線スペクトルの柱密度を導出する際に用いた線スペクトル強度係数によって重み付けをした。線スペクトル強度係数による重み付けの平均の式を以下に示す。

$$N_{\text{avg}} = \sum_k \frac{N_k}{\varepsilon_k} \bigg/ \sum_k \frac{1}{\varepsilon_k} \quad (3.3)$$

N_{avg} : NO の平均柱密度、 N_k : 一つの輝線スペクトルから導出した柱密度

ε_k : 一つの輝線スペクトルから導出した柱密度の誤差

また、柱密度の誤差についても以下のように同様に重み付けによる平均を計算した。

$$\varepsilon_{\text{avg}} = \left(\sum_k \frac{1}{\varepsilon_k} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

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_x 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.