

# 修士論文

観測ロケット放出バリウム・ストロンチウムを用いた  
極域カusp領域におけるイオンドリフト・熱圏大気風の  
同時測定および風速解析手法の開発

Simultaneous observation of ion drift and thermospheric neutral wind in  
the polar cusp region using barium and strontium released from a sounding  
rocket with developing wind speed analysis method

---

報告者

学籍番号：1235130

氏名： 渡邊 太郎

---

指導教員

山本 真行 教授

---

令和3年2月5日

高知工科大学 電子・光工学コース

# 目次

第 1 章 序論 .....	3
1.1 背景 .....	3
1.2 目的 .....	6
第 2 章 共鳴散乱発光観測実験 .....	7
2.1 C-REX-1 について .....	7
2.2 観測ロケット実験概要 .....	8
2.3 光学観測システム .....	9
2.3.1 光学観測システムの構成および制御 .....	9
2.3.2 一般向けカメラの露光時間の検証 .....	11
2.3.3 バンドパスフィルタの分光透過特性の測定 .....	12
2.3.4 光学観測系における絶対感度特性の測定 .....	12
2.3.5 RAW 画像の変換 .....	13
2.4 地上観測 .....	14
2.5 イオンドリフトおよび中性大気風速の測定手法 .....	14
2.5.1 概要 .....	14
2.5.2 レンズ歪みが未知の場合のカメラの向きとレンズ歪みの推定 .....	17
2.5.3 画像座標から地平座標への変換テーブルの作成 .....	18
2.5.4 カメラの姿勢誤差およびレンズ歪み推定の評価とフィードバック .....	20
2.5.5 既知のレンズ歪みを適用する場合のカメラの向きの初期推定 .....	21
2.5.6 三角測量による発光雲の 3 次元位置の推定 .....	22
第 3 章 結果 .....	23
3.1 光学観測システム .....	23
3.1.1 一般向けカメラの露光時間の検証 .....	23
3.1.2 バンドパスフィルタの分光透過特性の測定 .....	23
3.1.3 絶対感度特性の測定 .....	24
3.2 打ち上げと地上観測 .....	26
3.2.1 ロケット実験概要 .....	26
3.2.2 地上観測 .....	26
3.3 イオンドリフトおよび中性大気風速の測定 .....	27
3.3.1 レンズ歪み .....	27
3.3.2 画像座標-地平座標変換テーブル .....	27
3.3.3 Ba/Sr 放出の 3 次元位置および時刻の推定 .....	31
3.3.4 発光雲の 3 次元位置推定とイオンドリフトおよび中性大気風速の測定 .....	32

<b>第 4 章 評価と考察</b> .....	<b>36</b>
4.1 光学観測システム.....	36
4.1.1 一般向けカメラの露光時間の考察.....	36
4.1.2 バンドパスフィルタの評価.....	37
4.1.3 絶対感度特性の評価.....	38
4.2 地上観測.....	39
4.3 イオンドリフトおよび中性大気風速とその測定手法.....	39
4.3.1 カメラの姿勢とレンズ歪みの推定および画像座標-地平座標変換.....	39
4.3.2 三角測量による Ba/Sr 放出および発光雲の 3 次元位置推定.....	39
<b>第 5 章 結論</b> .....	<b>42</b>
謝辞 .....	43
参考文献 .....	44
付録 A 観測システムの絶対感度特性プロット .....	46
付録 B バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 .....	49
付録 C 画像座標-地平座標変換テーブル.....	66

# 第1章 序論

## 1.1 背景

地球周辺の高度 2000 km までの宇宙空間は地球低軌道(LEO: Low Earth Orbit)と呼ばれ、通信や科学観測などを目的とした人工衛星が多数周回している。LEO では、米国 SpaceX 社による 1 万基を超える衛星により高速インターネット通信サービスを提供する計画「Starlink」など、携帯通信サービス等を目的とした多数の衛星コンステレーションが運用中もしくは計画・進行中であるほか、民間企業による衛星打ち上げサービスの展開などによって衛星事業への参入障壁が下がりつつあり、LEO の需要は増加していくとみられる。また、LEO 軌道高度域下部は熱圏(高度約 80 km 以上の大気(図 1.1))と重なっており、人工衛星は大気ドラッグの影響を受けるため軌道の維持・制御を要する。熱圏大気は太陽活動などによる極端紫外線(EUV)や X 線により密度と温度が大きく変動する。2000 年には、大気密度の増大によって X 線天文衛星「あすか」の姿勢が乱れ観測不能となり、翌年大気圏に突入し消滅した[2]。また 2009 年には、運用中の米国の通信衛星「Iridium 33」と運用終了していたとみられるロシアの軍事衛星「COSMOS 2251」が極域上空の軌道上で衝突した。このとき 2 つの衛星は最接近距離 584 m ですれ違うと予測されていた[3]が、熱圏大気の変動が予想以上であった。LEO における宇宙機の安全な運用には人工衛星や宇宙ごみを含む軌道上の物体の正確な軌道予測が必要であり、そのためには物体が飛翔する熱圏高度域の大気密度を正確に予測することが不可欠である。

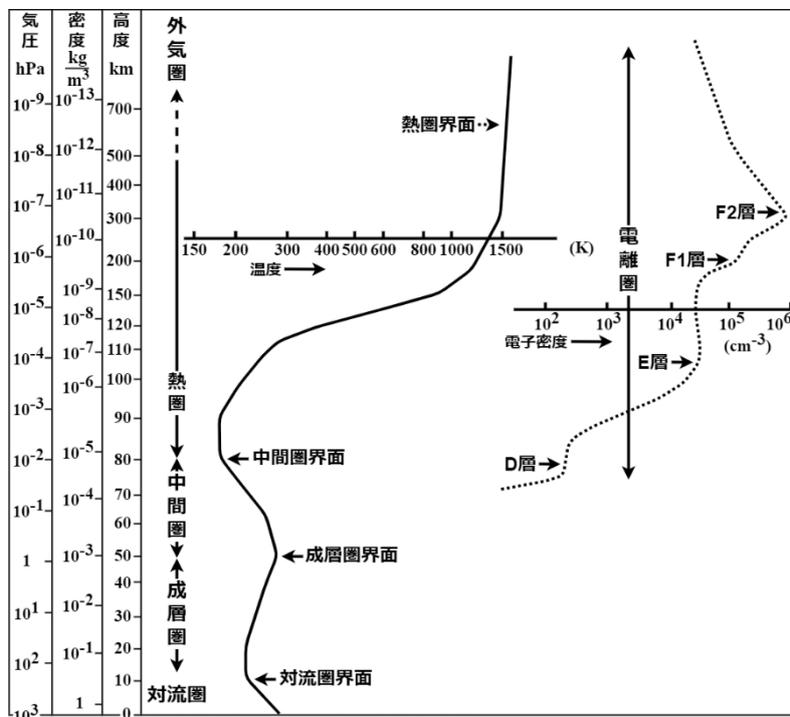


図 1.1 地球の大気構造(理科年表オフィシャルサイト[1]を改変)。熱圏では EUV や宇宙線によって大気の一部が電離してプラズマとなり電離圏を形成している。またこれらのエネルギー流入により熱圏の温度は高高度ほど高い。

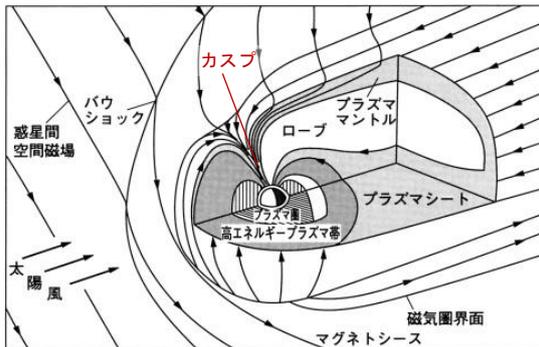


図 1.2 地球磁気圏の構造[4]。地球の両極域から伸びる磁力線が磁気圏を形成している。カスプ領域は、磁力線が両極域の地表から宇宙空間に対して開いている構造を指す。

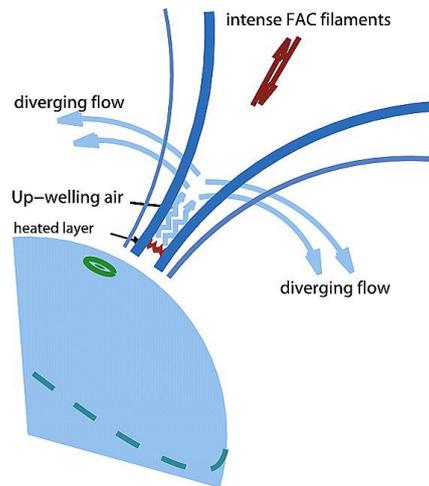


図 1.3 衛星観測から示唆されるカスプ領域における大気密度増大の概略図[5]。FAC の微細構造に結びつく小さいスケールの電場によるジュール加熱を主たる加熱源として中性大気が加熱され、噴水のような上昇流が生じ、高度 400 km 以上での大気密度増大を引き起こす。

現在に至るまで、人工衛星や観測ロケットによる観測とシミュレーションによって熱圏擾乱のメカニズムの解明が試みられている。Lühr et al. (2004)は、衛星観測によりカスプ領域(参照: 図 1.2)高度 400 km 付近での中性大気密度増大とそれに対応する強い沿磁力線電流(FAC: Field-Aligned Current)の微細構造を発見[5]、観測から示唆されるカスプにおける大気加熱とそれによって生じる上昇流に依る中性大気密度増大の構造を示した(図 1.3)。カスプとは、図 1.2 に示す地球磁気圏の磁力線構造が両極域の地表から宇宙空間に対して開いている構造を指し、この領域では太陽風のエネルギーが磁力線に沿って熱圏大気に直接流入できる。熱圏のように高高度ほど高い温度勾配の場合、上昇しようとする気塊は密度の低下に伴って周辺より温度が下がり沈降するため、外乱がなければ対流は起こらず成層する。カスプにおける上昇流はこの温度成層を破り大気を上空に運ぶことから、非常に強い力で駆動されていると考えられるが、その仕組みはこれまで明らかになっていない。

この現象について、シミュレーションによるアプローチにおいては、従来の全球的な大気循環モデルでは再現できない[6]、高緯度領域に限ったモデルでは再現できるものの平時と比して極端な条件を要する[7]などの困難がある一方、カスプ近傍の水平解像度 20 km の高解像度モデルにおいて微細スケールの電場揺らぎを再現することで、観測との一致度の高い中性大気密度増大が再現されることが示された[8]。Hurd and Larsen (2016)は観測ロケットから放出されたバリウムを用いて電場によるジュール加熱を見積もり、十分に大きい加熱を得られる可能性を示した[9]。しかし、当該研究では 30 年以上前にフィルムカメラを用いて観測されたデータを用いており、小さいスケールの電場について十分な議論ができるほ

どの精度を持たない。この議論を進めるためには少なくとも 100 km 以下の小さいスケールの電場揺らぎをより高い精度で計測することが必要になる。またジュール加熱は電場の 2 乗に比例するため、平均電場が小さくても局所変動成分が加熱に大きな役割を果たす。ジュール加熱はラグランジュ量であり、これまでの研究で一般的に用いられてきたレーダーのような、決まった領域をオイラー的に計測する装置での電場揺らぎの計測は難しく、場の流れを追跡可能なラグランジュ的な観測が必要である。

理論的なアプローチを観測的に裏付けるため、2014 年 11 月に国際共同観測ロケット実験 The Cusp Region Experiment (C-REX-1)を北極域で実施した。この実験では、バリウム(Ba)とストロンチウム(Sr)を観測ロケットから熱圏に放出した。EUV により Ba は短時間でイオン化する(Ba<sup>+</sup>)が、Sr は観測時間中ではほとんどイオン化せず中性を維持する。これらの Ba、Ba<sup>+</sup>、Sr ガスは太陽光を受け固有の波長で共鳴散乱を起こし、発光雲として観測が可能である。これらを 2 地点以上から光学観測することで 3 次元的な位置の時間変化を測定し、中性大気風速およびイオンドリフト速度を得る。C-REX-1 では観測ロケットの打ち上げおよび発光雲の観測には成功したものの、目的のカस्प領域に精確にガスを放出できず、中性大気密度上昇の解明につながるデータを得ることはできなかった。

C-REX-1 を補完するため、2019 年に 2 つの観測ロケット実験、The Cusp Region Experiment 2 (C-REX-2)および The Joint Japan-U.S. Cusp Heating Investigation (CHI)が計画された。C-REX-2 はノルウェーの Andøya Space Center (ASC)から、CHI はスバルバル諸島 Svalbard Rocket Range (SvalRak)からそれぞれ打ち上げ、Ba/Sr を広範囲に放出することでカस्पをより確実に捉える。

上空にガスを放出しその発光をトレーサとして熱圏観測を行う実験は、ケミカルリリース(Chemical Release)や宇宙花火実験と呼ばれ、日本国内でも、太陽光により共鳴散乱するリチウム(Li)や自己発光するトリメチルアルミニウム(TMA)を用いての観測が過去に実施されている。日本と米国はケミカルリリース実験において 1990 年代より協力関係にあり、ガス放出装置[e.g., 10]の供給や国内外での共同観測実験を実施してきた。国内では、2007 年にロケット実験 WIND を実施し夕方条件において Li を 3 回放出し Li 共鳴散乱光の観測に成功[11, 12]、2012 年には WIND-2 が実施され明け方条件における Li 共鳴散乱光の観測に一部成功した[11]。一方、2011 年には日米共同で米国 NASA Wallops Flight Facility(WFF)において昼間条件での Li 放出実験が実施されたものの、昼間の厳しい信号雑音比(SN: Signal to Noise Ratio)条件での Li 共鳴散乱光の観測はできなかった[14]。2013 年に再度 WFF で実施された実験では昼間条件において航空機を投入し Li 共鳴散乱光の観測に成功した[15]。同実験では中緯度電離圏におけるダイナモ現象についての成果を得た[16]。また同じく 2013 年に国内で実施された S-520-27 号および S-310-42 号によるロケット実験では、真夜中のほぼ満月の月明条件において TMA 発光および Li 共鳴散乱光の観測に成功している[15]。

C-REX-1、C-REX-2 および CHI の観測は日米共同でノルウェーの協力を得て実施された。日本チームでは、発光雲の光学観測における SN の改善を目的として固有発光波長をターゲット

ットした光学バンドパスフィルタ(BPF)が用いられてきており、C-REX-1においてもBPFを用いた観測を実施した。

## 1.2 目的

本研究では、C-REX-1の観測結果をふまえた一般向けカメラを用いた光学観測システムの構築、また一般向けカメラを科学観測に用いることを前提とした観測システムの光学的特性の測定、C-REX-2およびCHIによるBa<sup>+</sup>/Sr共鳴散乱発光雲の地上観測、3次元風速解析技術の確立および観測により得られた画像から中性大気風速およびイオンドリフト速度の解析を行うことを目的とする。

## 第2章 共鳴散乱発光観測実験

Ba/Sr を用いた共鳴散乱発光観測実験の概略図を図 2.1 に示す。観測ロケットから Ba/Sr を熱圏大気に放出すると、Ba は太陽 EUV によって短時間でイオン化し Ba<sup>+</sup>となるが、Sr は観測時間中ではほとんどイオン化しない。この違いを利用し、電磁場の影響を受けイオンドリフトを起こす Ba<sup>+</sup>と、中性大気の動きに引きずられる Ba/Sr を、共鳴散乱光という形で光学的に同時観測することができる。これらの主たる固有発光波長は、Ba が 553.4 nm、Ba<sup>+</sup>が 455.4 nm および 614.2 nm、Sr が 460.7 nm である。これらを 2 点以上の観測点から光学観測し、三角測量による 3 次元位置の時間変化からイオンドリフトと中性大気風を測定する。また共鳴散乱光を観測するためには、上空には太陽光があたり、かつ良い SN で観測するために地上は十分暗い必要がある。この条件を満たす時間を長く確保するため、またカスプと放出領域の位置関係の都合上、実験は極夜条件下の朝に行われる。

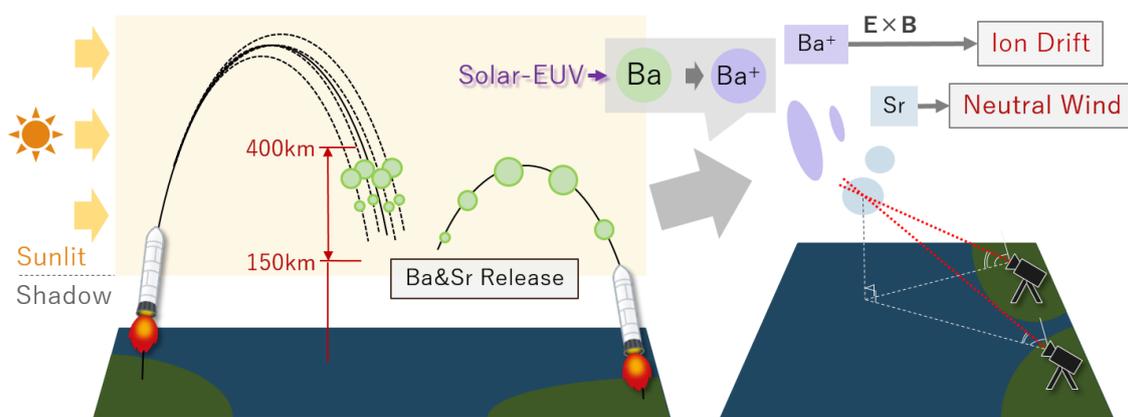


図 2.1 Ba/Sr を用いた共鳴散乱発光観測実験の概略図[17]。

### 2.1 C-REX-1 について

C-REX-1 は 2014 年 11 月 24 日 08:05 UT に ASC にて打上げが実施された観測ロケット実験である。ロケットには Ba/Sr ガスを放出する分離式小型キャニスター 24 個が搭載され、上昇中 6 回にわたり各 4 個ずつキャニスターを分離、降下中の高度 400 km から 150 km の間の高度 50 km 間隔の 6 つの高さに放出する計画で、このような小型キャニスターを多数放出する試みは学術実験としては初であった。打上げ自体は成功したものの、24 個のキャニスターすべての分離後、Ba/Sr ガス放出に成功したキャニスターは 10 個のみであった。

地上観測はスバル諸島 Ny-Åesund と Longyearbyen の 2 地点から行われた。光学観測機材には、赤外線(IR)カットフィルタを取り外したカメラ Canon EOS Kiss X4 に、中性大気トレーサとして Ba(553.4 nm)、イオントレーサとして Ba<sup>+</sup>(455.4 nm)それぞれの共鳴散乱光をターゲットとした半値幅 12 nm の BPF を像側に取り付けた広視野(FOV: Field of View = 110°)のテレセントリックレンズレンズを組み合わせたものを使用した。Ba<sup>+</sup>用の BPF は発光波長に近い Sr(460.7 nm)の光も一部透過する。また同時に、回折格子を取り付けたカメラ

を用いて発光雲のスペクトル観測を行った。

図 2.2 に BPF を用いた観測画像例、図 2.3 にスペクトル観測の解析結果[18]を示す。光学観測から判明した課題として、Ba の発光を中性大気トレーサとして観測すると、Ba のイオン化が急速なため観測可能時間が不十分なことに加えて、Ba の発光波長(554.3 nm)とオーロラの発光波長(557.7 nm)が近く分離ができないことがわかった。またスペクトル観測より Ba<sup>+</sup> の観測には、Sr の発光(460.7 nm)に近い 455.4 nm をターゲットとするよりも発光波長が他の発光と十分に離れている 614.2 nm をターゲットとする方が有効である可能性が示された。



図 2.2 C-REX-1 の観測画像例(Ny-Ålesund)。幅 12 nm の BPF(Ba<sup>+</sup>用: 455.4 nm)を用いたもの。画像中心部に縦に伸びる Ba<sup>+</sup>、その右下に球状の Sr が見られる。

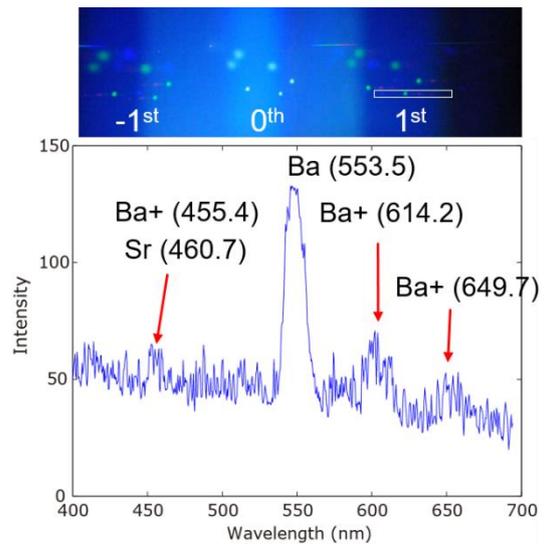


図 2.3 C-REX-1 の発光雲スペクトル[18]。

## 2.2 観測ロケット実験概要

C-REX-2 と CHI は 2019 年末に計画された観測ロケット実験である。2つの実験は打上げウインドウと観測リソースを共有する共同観測実験であり、観測は米国 Clemson 大学、米国 Alaska 大学、日本チーム(北海道情報大学、高知工科大学、観測協力: 国立極地研究所)により実施された。ウインドウは 2019 年 11 月 25 日から 12 月 9 日の 2 週間である。図 2.4 に実験の模式図を地図上にプロットして示す。C-REX-2 は Andøya の ASC から打上げられ、上昇中に小型分離式 Ba/Sr キャニスター 20 個を分離、下降中に高度 400 km から 200 km の 50 km 間隔の 5 つの高さに広範囲に渡って Ba/Sr を放出するよう計画された。CHI は Ny-Ålesund の SvalRak から打上げられ、高度 350 km から 190 km を上昇中および下降中に軌道に沿ってロケットから Ba/Sr を放出するよう計画された。地上観測はスバル諸島 Ny-Ålesund(NYA)と Longyearbyen(LYR)の 2 地点から行った。また、米国 Alaska 大学により航空機からの光学観測も行われた。打上げは、人工衛星による太陽風観測と地上レーダーや全天球カメラによる磁気圏と電離圏の監視により、カスプの位置が Ba/Sr の放出エリアに来るタイミングを見計らって実施した。

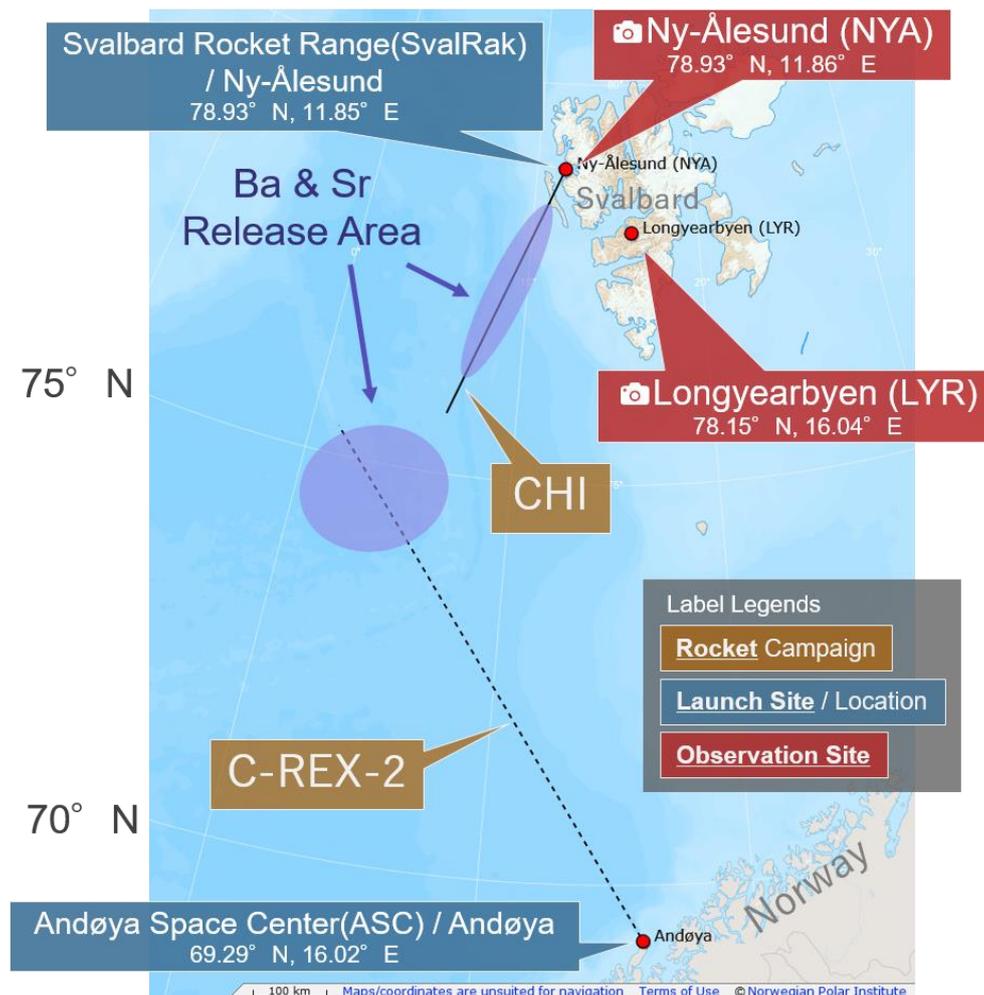


図 2.4 C-REX2 および CHI の軌道、射点(青ラベル)、観測点(赤ラベル)、Ba/Sr 放出予定領域(紫ハッチ)の位置関係。地図は TopoSvalbard[19]を改変。

## 2.3 光学観測システム

### 2.3.1 光学観測システムの構成および制御

2 地点観測から三角測量を行うためには各観測点での撮影時刻が一致している必要があるため、観測には、GNSS(Global Navigation Satellite System)を用いた時刻同期撮影とユーザー記述のスキriptによるカメラの露光制御および自動撮影が可能なソフトウェア Solar Eclipse Maestro を使用した。図 2.5 に光学観測システムの構成図、図 2.6 に光学系の構成を示す。観測は屋外で行なうが、冬季のため降雪や氷点下の外気に曝されることを考慮し、PC は屋内に設置した。カメラと時刻同期用の GNSS モジュールは屋外に設置し、USB で PC に接続する。

観測に用いたカメラは、高感度撮影が可能なこと、比較的安価であること、ソフトウェアにて制御可能であることを考慮し、一般向けモデルの Canon EOS Kiss X9i を使用した。カメラに使われている CMOS イメージセンサは赤外(IR)領域に感度を持つが、一般向けカメ

ラは色味を人の感覚に近づけるため IR カットフィルタが取り付けられている。このフィルタの特性は非公開であり、目的波長の感度低下の可能性を避けるため、実験には IR カットフィルタ除去改造を施した上で使用した。またレンズには、像側からの出射光の主光線が平行になるように設計された像側テレセントリックレンズを用いている。これは、入射角によって波長特性がシフトする光学多層膜を用いた BPF を用いているためである。このレンズは BPF を用いた狭帯域撮影を前提としており[11]、波長によって焦点距離が異なっている(図 2.7)。カメラの画像サイズは横 6000 px 縦 4000 px (画素: pixel)である。

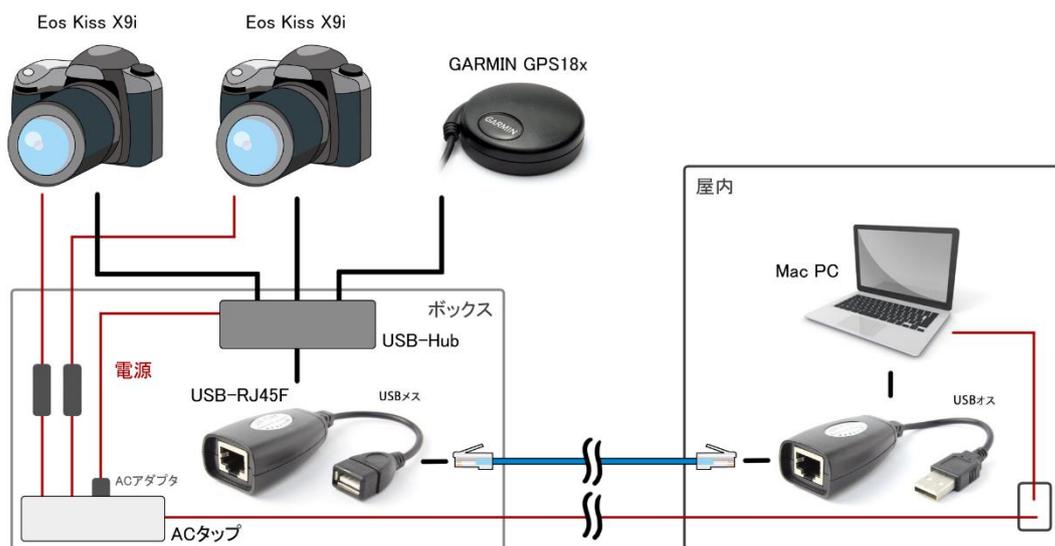


図 2.5 光学観測システム構成図。USB2.0 の最大伝送距離は 5 m であるため、Ethernet ケーブルを利用した USB エクステンダーを用いることで屋外に設置したカメラを屋内から遠隔制御可能にしている。ただし USB 給電はできなくなるため、USB ハブ等電源が必要になる USB 機器は外部電源が必要になる。カメラの電源にはバッテリーは使用せず、AC アダプタにより給電する。



図 2.6 カメラとその構成概略図。視野角(FOV)110 度の像側テレセントリックレンズの像側に BPF を取り付け、EF マウントリングを介して Canon EOS Kiss X9i に取り付けている。BPF とレンズの接続はねじ込み式になっており、このねじ込み量でフォーカス調整を行い、固定リングでフォーカスの固定を行う。

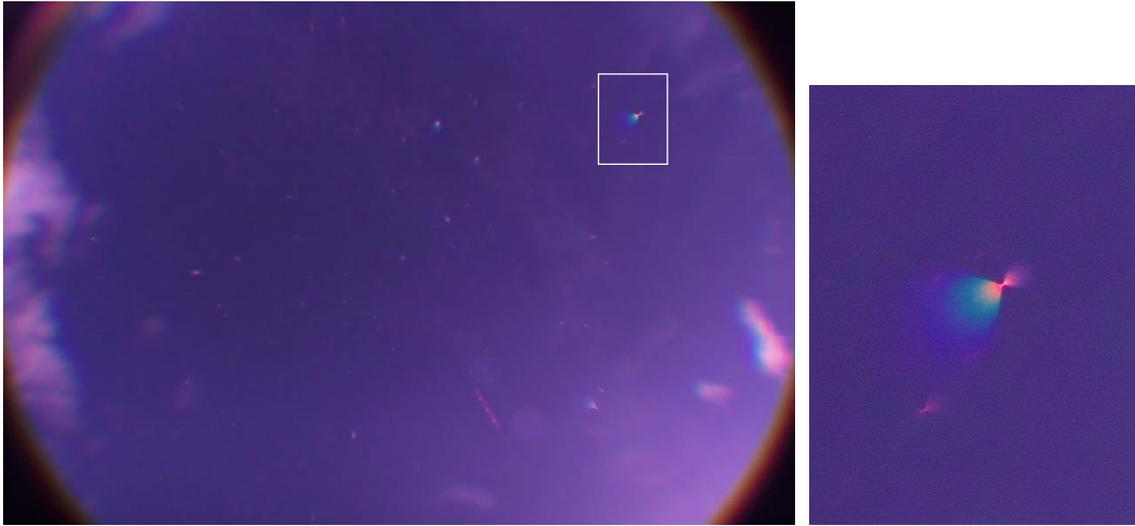


図 2.7 左)BPF なしの場合の撮影例。赤色(長波長)ほど像が外に膨らみ、青色(短波長)ほど中心に寄っている。右) 左図白枠部の拡大画像。色収差が大きく、特定の狭い波長域以外にはフォーカスが合わないことがわかる。

### 2.3.2 一般向けカメラの露光時間の検証

2.3.1 項で述べたとおり、本研究では観測に一般向けのデジタルカメラである Canon EOS Kiss X9i を使用している。観測では、記憶媒体への書き込み時間を考慮した上で可能な限り撮影間隔を狭めた一定間隔での撮影を記述したスクリプトを用いて観測を行うが、設定上の露光時間(以下、設定露光時間)と実際の露光時間(以下、実露光時間)にずれがあること、また特定の露光時間設定においてはずれが顕著であるなど設定によるずれ幅の違いがあることが判明した。時間分解能の向上に加えて後述する感度特性を議論する上でも、ずれの挙動を把握し正確な露光時間を調べる必要がある。

実露光時間を調べるため、カメラのフォーカルプレーンシャッターが開いている時間を動作音から 0.01 s 単位で測定した。またそれに先立ち、シャッター機構の動作を動画撮影および録音し、各動作と動作音との対応を調べた(図 2.8)。実露光時間測定条件は、露光設定との関係性を調べるため、2.3.4 項で述べる分光感度特性測定実験に準拠した条件(表 2.1)で、各条件 1 回ずつ測定した。手法の詳細については柿並 他 (2020)[20]も参照のこと。

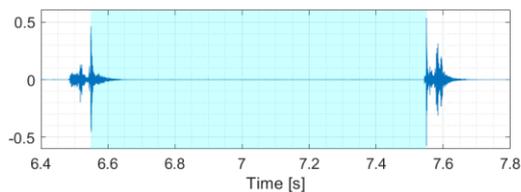


図 2.8 シャッター動作音の波形例。青色ハッチ部を実露光時間とした。

表 2.1 実露光時間測定の実施条件。2 項目の組み合わせすべての条件について測定を行った。

設定項目	設定値
ISO 感度	200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 25600
露光時間 (s)	1, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 15, 20, 30

### 2.3.3 バンドパスフィルタの分光透過特性の測定

C-REX-1 の観測結果を踏まえ、さらに今回は 2 機のロケット同時打上げにより多数の発光雲が重なり合う場合が想定しうることから、イオントレーサとして  $\text{Ba}^+$  の 614.2 nm、中性トレーサとして Sr の 460.7 nm の発光をそれぞれターゲット波長とし、 $\text{Ba}^+$  の 455.5 nm と Sr の 460.7 nm が分離可能なように半値幅 6 nm の BPF を新たに開発した。

この BPF の波長透過特性を測定するため、2019 年 8 月 28 日に国立極地研究所光学校正室の分光光度計 U-3300(図 2.9)を用いて校正実験を行った。予め何もセットしない状態で分光測定を行って測定器を校正した後、BPF をステージにセットし分光透過特性を測定する。分光測定範囲は概ねターゲット波長 $\pm 20$  nm とし、入射角が 0 度と 11 度(レンズからフィルタに入射しうる最大角度)の場合でそれぞれ測定した。

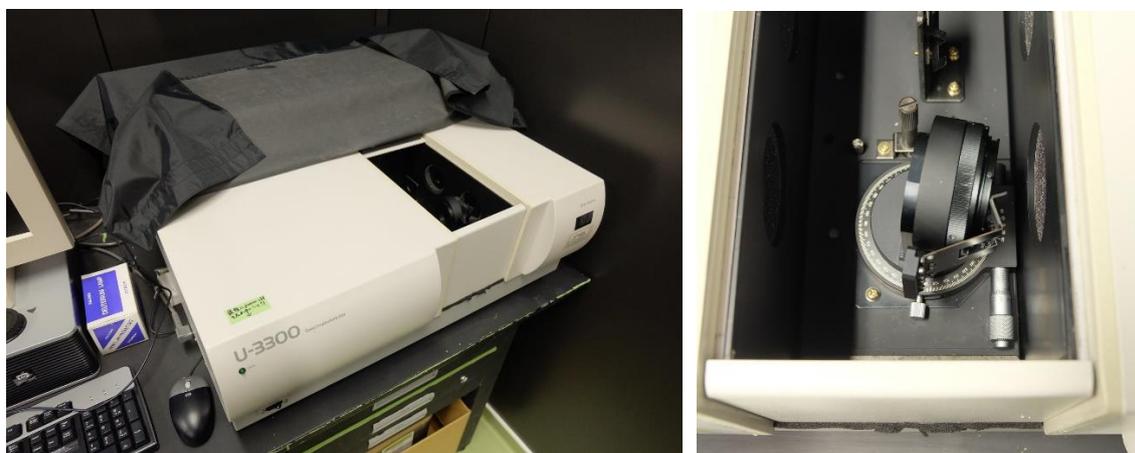


図 2.9 左) 分光光度計 U-3300 (国立極地研究所光学校正室内)。右) フィルタをステージにセットした状態。ステージは任意の角度に回転可能で、被測定物への入射角を変えての測定が可能。測定時はカバーを閉めて暗幕を掛け、部屋を暗くして外乱光を避ける必要がある。

### 2.3.4 光学観測系における絶対感度特性の測定

感度等露光条件の異なる画像の比較・解析や観測画像から発光雲の発光強度を測定するには、リファレンスとしてレンズとフィルタを含む光学観測系の絶対感度を測定し校正用データを得る必要がある。そのため、2019 年 8 月 28 日と 29 日の 2 日にわたり、国立極地研究所光学校正室の積分球を用いて測定実験を行った。積分球の外観と概念図を図 2.10 に示す。積分球は内部に均一かつ強度が既知の光を発生させることができ、これにより測定対象の光学測定装置の応答を定量的に測定できる。積分球の詳細については *Ogawa et al.* (2020)[21]も参照のこと。

実験条件を表 2.2 に示す。観測で使用する可能性のある露出設定について全ての組み合わせで測定を行った。また積分球の仕様上、分光放射輝度を 0 [ $\mu\text{W}/\text{Sr}/\text{m}^2/\text{nm}$ ]に設定することができないため、光源の電源を切り、レンズキャップを取り付けた状態での測定をもってその代わりとした。また、C-REX-1 で観測に用いた光学観測系において、露光時間-感度特

性が完全な線形ではなくわずかに歪む現象や、画像下部に減光が生じる[22]原因についても検証する。

表 2.2 絶対感度特性測定実験の実施条件

項目	設定値
分光放射輝度 [ $\mu\text{W}/\text{sr}/\text{m}^2/\text{nm}$ ]	0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2
ISO 感度	200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 25600
露光時間設定 [s]	1, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 15, 20, 30

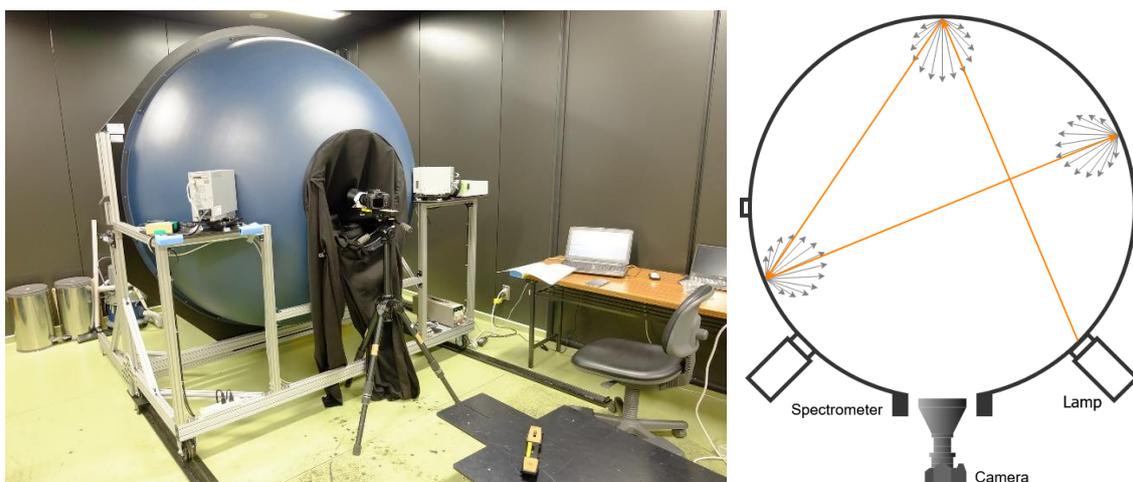


図 2.10 国立極地研究所光学校正室の積分球(左)とその概念図(右)。右) 光源(Lamp)からの光を積分球内部表面のコーティングによって繰り返し拡散反射させることで、空間的に均一な強度の光を発生させる。また分光光度計(Spectrometer)から得られる輝度を基に、光源前部に取り付けられているスリットの開度を調節し、指定波長における放射輝度が目標値と一致するように制御される。測定中は部屋を暗くする。

### 2.3.5 RAW 画像の変換

絶対感度特性の測定および発光雲観測では撮影画像を RAW 形式で保存している。RAW 形式とはイメージセンサから出力された値が未加工のまま記録されている画像形式であり、これを今回解析に用いる MATLAB で直接利用することはできないため、Adobe DNG Converter を用いて DNG(Digital Negative)形式に変換する[22, 23]。DNG 形式は TIFF/EP(Tagged Image File Format/Electronic Photography)形式として MATLAB で利用可能である。RAW 画像から、Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用 BPF を取り付けカメラによる画像では R(Red-Ch: Channel)の画素のみを、Sr(460.7 nm)用 BPF による画像では B(Blue-Ch)の画素のみをそれぞれ取り出し画像化した。この過程で画像サイズは横 3000 px 縦 2000 px となる。またこのとき、R または B のみの画像を 16 bit のグレースケール png 画像として保存するため、RAW 画像のメタデータの WhiteLevel と BlackLevel をそれぞれ上限と下限として、14 bit で記録されている RAW 画像の各画素の輝度値を 16 bit(0-65535)に再スケールしている[22]。RAW 形式とその変換方法についての詳細は渡邊 (2019)、Sumner (2014)を参照のこと[22, 23]。

## 2.4 地上観測

地上観測は、スバル諸島 Ny-Ålesund にある国立極地研究所 Rabben 観測所(78.92959° N, 11.86422° E, 標高 43 m)と、スバル諸島 Longyearbyen の Kjell Henriksen Observatory (78.14767° N, 16.04076° E, 標高 518 m)で実施した。なお、観測点の地理座標および標高は、カメラ設置位置と観測施設建物との位置関係を TopoSvalbard[19]の航空写真から確認したものである。

観測の詳細条件(露光時間、感度、撮影間隔、方位角・仰角)は現地での予備観測をもとに決定した。実験ウインドウが朝に設定されている関係上、時間経過による太陽高度の上昇に伴って背景光が明るくなるため、これによるサチュレーションを回避する必要がある。またイメージセンサは入射光を積分するため、長時間露光では移動する発光雲の形状が不正確となり、背景光との SN も悪くなる。さらに発光雲は暗いため可能な限り高感度かつ短時間露光が理想であるが、高感度ノイズによる SN の悪化も考慮する必要がある。撮影間隔については 2.3.2 項で計測した実露光時間を参考に、記憶媒体への書き込み時間等を考慮した長さに設定した。2 つの観測地点は北磁極に近く、国際標準地球磁場(IGRF-13)によると Ny-Ålesund における地磁気の伏角が約 82.6 度[24]と水平面に対してほぼ垂直であり、磁気コンパスにより十分な精度で水平方位を決定することは不可能であった。そのため、TopoSvalbard[19]を用いて、放出予測位置と観測点との位置関係から目標となる地形の特徴点を定め、観測方位を決定した。解析では背景に映る星を用いた精密計測を行う。決定した露光条件に従って観測用のスクリプトを作成し、当日カメラを屋外に設置した後、打上げ時刻が決定し次第スクリプト開始時刻を設定し観測を行った。

## 2.5 イオンドリフトおよび中性大気風速の測定手法

### 2.5.1 概要

観測画像からイオンドリフトおよび中性大気風速は、各観測地点からみた発光雲の地平座標の算出を行った後、三角測量によって発光雲の 3 次元位置を求めることによって算出する。先立って、この節で用いる用語を表 2.3 に示す。

はじめに観測画像から発光雲の地平座標の算出を行うため、カメラの視野を推定する必要がある。視野推定の精度は最終的に得られる発光雲の 3 次元位置推定の精度につながる重要な要素である。この視野推定の概念を説明する。カメラで撮影した星空の画像は天球の 2 次元への射影と捉えることができ、このとき画角の範囲内において、図 2.13 のようにカメラの視線方向から角度 $\psi$ にある天球上の任意点に対応する画像上の点が画像中心から距離 $r$ の位置にあるはずである。つまり、「画像上の画像中心からの距離 $r$ 」から「カメラの視線方向からの角度 $\psi$ 」に変換可能なはずであり、カメラの姿勢とレンズの歪みがわかればカメラの視野を推定できる。本研究では視野の中心から周辺部までを高精度に推定する手法を開発した。ここではまず、視野推定の結果として画像座標を地平座標に変換するテーブルを作成する。今回観測は計 4 台のカメラで行っており、また観測中にカメラの姿勢を変えて

いるため、カメラの姿勢全パターンに対して変換テーブルを作成する必要がある。変換テーブルの作成に必要なカメラの姿勢およびレンズ歪みは未知であり、既知の情報は観測画像の撮影時刻、観測地点の地理座標(緯度、経度、高度)である。そこでまず、カメラの姿勢 1 パターンについて、観測画像の背景に写った多数の星を用いてこのパターンにおけるカメラの姿勢とレンズ歪み推定を行い画像座標-地平座標変換テーブルを作成する。この過程では図 2.14 に示すように反復によって精密計測を行い、高精度な変換テーブルを得る。各過程の詳細は後述する。

今回観測に用いたカメラの構成は BPF 以外が共通しており、レンズ歪み関数は同じ波長域をもつ BPF を取り付けたカメラの観測画像に対して適用可能である。また異なる波長域の BPF を取り付けたカメラについても視野角自体は大きくは変わらないと考えられる。そのため、異なるカメラや姿勢のパターンに対しては既知のレンズ歪み関数を利用してまずカメラの向きを推定(図 2.14 緑文字の手順)した後に仮の変換テーブルを作成する。以降の手順は同様である。異なる BPF によるレンズ歪み関数を適用する場合は反復の過程でレンズ歪みを補正する。

視野推定が完了した後は、作成した画像座標-地平座標変換テーブルを用いてすべての観測画像に対して発光雲の画像座標を地平座標に変換し、発光雲の 3 次元位置を 2 地点の同時刻における地平座標を基に三角測量によって求め、その時間変化からイオンドリフトおよび中性大気風速を算出する。解析用ソフトウェアはMATLABを用いて開発した。MATLABで画像を取り扱う際の行列インデックスの仕様上、画像座標は $(y, x)$ のように縦軸、横軸の順で表記し、画像左上を原点とし下および右を正とする画像座標系となっている[25]。ここで、左上の画素の画像座標は $(0, 0)$ ではなく $(1, 1)$ である。

表 2.3 2.5 節で用いる用語の説明

用語	説明
地平座標(系)	観測点からみた北を基準とした方位角 $A$ および水平面からの仰角 $h$ による座標系。
地平座標ベクトル	観測点から任意の地平座標 $(A, h)$ へのベクトル。特筆無き場合は単位ベクトル。
画像座標(系)	画像平面上の画像左上を原点とする 2 次元直交座標系。 $(y, x)$ の順で表記し、下および右を正とする。左上の画素の座標は $(1, 1)$ である。図 2.11 参照。
画像中心	画像平面上における画像の中心、またはその画像座標。
カメラの向き	カメラの光軸と画像中心が一致しているとみなしたとき、画像中心が指す地平座標。方位角 $A$ 、仰角 $h$ の 2 成分で表される。
画像中心ベクトル	観測点からカメラの向きが指す地平座標へのベクトル。
カメラの姿勢	カメラの向きに加え、カメラの光軸を軸とした左右傾斜角を追加した値。方位角 $A$ 、仰角 $h$ 、左右傾斜角 $\varphi$ の 3 成分で表される。図 2.12 参照。

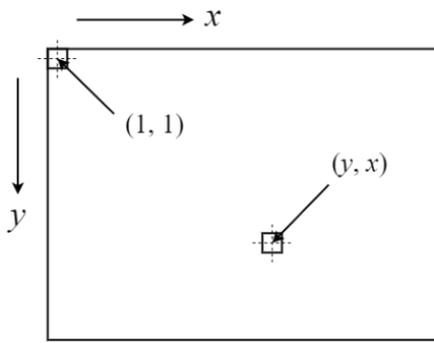


図 2.11 画像座標系

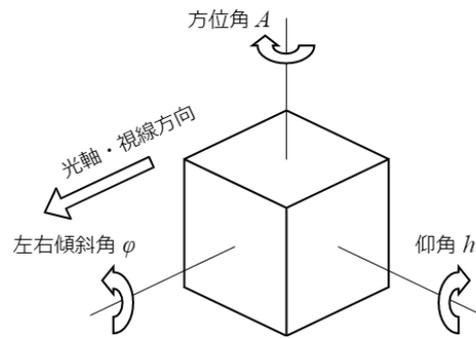


図 2.12 カメラの姿勢 3 成分

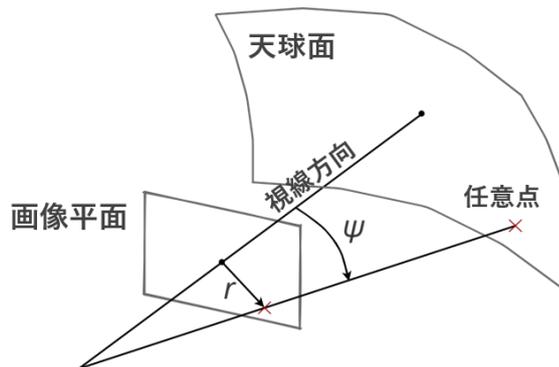


図 2.13 視野推定の基本概念図。天球上の任意点に対応する画像上の点は、視線方向から天球上の任意点への角度 $\psi$ に対応する画像上の画像中心からの距離 $r$ の位置にあるはずである。

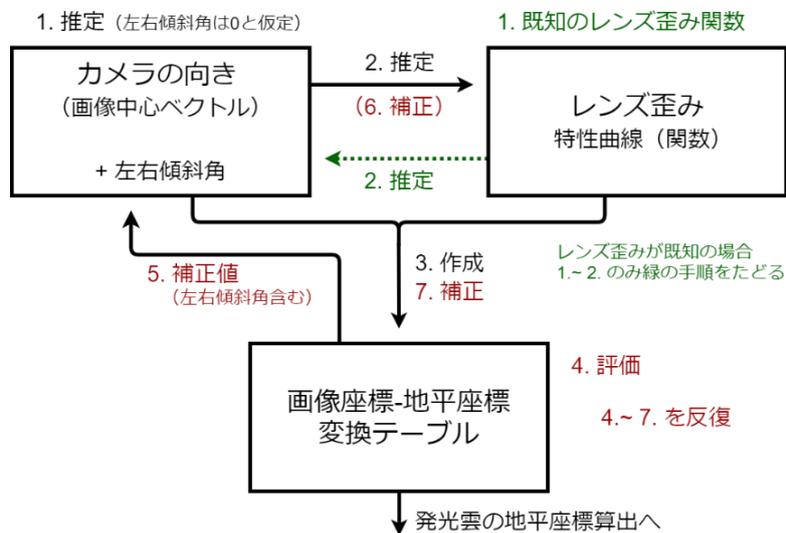


図 2.14 画像座標-地平座標変換テーブル作成の過程。観測画像に写った星を用いて、反復(iteration)により高精度なカメラの姿勢と変換テーブルを得る。はじめにカメラの向きを推定しこれを基にレンズ歪みを推定する。これらから変換テーブルを作成し、その評価によりカメラの姿勢を補正する。新たなカメラ姿勢を基にしたレンズ歪みの補正は精度の向上が期待できる場合のみ行い、精度を向上した変換テーブルを作成する。また既知のレンズ歪み関数が利用可能な場合は最初のみ緑文字の手順に沿い、以降は同様の手順でカメラの姿勢の推定および変換テーブルを作成する。

## 2.5.2 レンズ歪みが未知の場合のカメラの向きとレンズ歪みの推定

今回の実験では多数の発光雲が視野の中心部から周辺部まで広範囲に渡って放出されるため、視野のほぼ全域における歪みの補正が必要である。しかし、視野角 110 度の広視野角レンズを用いている点や、図 2.7 に示すように波長によって像の大きさが変わる点を考慮する必要があり、テストパターンを用いた歪み補正[e.g., 15]は煩雑になる。補正に星を用いることで観測時と同一条件での補正が可能で、かつ基準となる星は無限遠とみてよく、テストパターンを用いる際に生じる中心部と周辺部との距離の違いを考慮する必要がないため、比較的容易に補正ができる。ただし、十分な精度を得るには多数の星が視野全域に写っている必要がある。

はじめにカメラの視野中心が指す地平座標をおおまかに求める。手順を以下 1~7. に示す。

1. 観測画像上の星を視野全域から可能な限り均一にピックアップし、これらの画像座標  $(y_{star}, x_{star})$  と地平座標  $(A, h)$  を得る。観測点・観測日時における当該の星の地平座標は天文シミュレーションソフト「ステラナビゲータ 7」を用いて得る。
2. 画像上で画像中心  $(y_{center}, x_{center})$  からほぼ等距離にある星 3 つの組み合わせを探す。
3. 3 つの星への地平座標ベクトルとのなす角が等しくなる 1 つのベクトルを求め画像中心ベクトルとし、これの地平座標をカメラの向きとする。ただし、3 つの星と画像中心との画像上の距離は完全な等距離ではないため、3 つのなす角の差が最小となるベクトルを内点法による最適化により得る。
4. 1. でピックアップした星全てに対し、星の地平座標から 3. で求めたカメラの向きを示す画像中心ベクトルとのなす角を求める。
5. 各星への地平座標ベクトルと画像中心ベクトルのなす角に対する画像上の距離の比 (単位角度あたりの画像上の半径距離、以下、Radius-Angle Ratio) を、中心からの半径距離を横軸としてプロットする。
6. 最小二乗法により、Radius-Angle Ratio の累乗近似(式(1))を得る(図 2.15)。式(1)における  $x$  を図 2.15 における横軸(半径  $r$  (px)) とし、近似により定数  $a, b, c$  を得る。

$$f(x) = ax^b + c \quad (1)$$

7. 半径  $r = 0$  のときの近似関数の解を 1 として規格化し、1 からの増減率 (%) をレンズ歪み率とした(式(2))。

$$f_{distortion}(x) = f(x)/f(0) - 1 \quad (2)$$

この過程ではカメラの左右傾斜角は無視しており、またカメラの向きは 3 つの星への地平座標ベクトルとのなす角の差の最小化によって求まるベクトルとしているため誤差を含んでいる。そのため、ここで求まるカメラの向きおよびレンズ歪みは仮のものとし、左右傾斜角を含むより厳密なカメラの姿勢、および姿勢やフィルタなどが異なる条件でのカメラの姿勢の推定については 2.5.5 項で行う。また、以降レンズ歪み関数として利用するのは正規化したレンズ歪み率ではなく、6. で得た Radius-Angle Ratio の近似関数である。

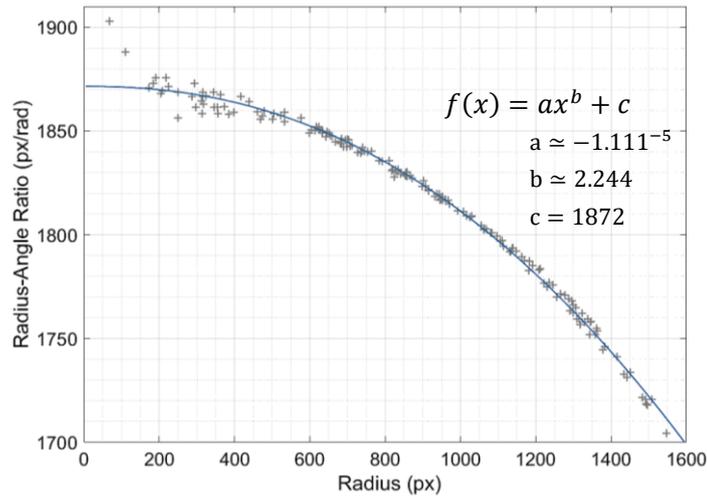


図 2.15 Radius-Angle Ratio のプロットとその累乗近似の例。中心部ほどばらつきが大きいのは、中心から各星への距離が小さくなるため、相対的に各星の画像座標のばらつきが大きくなるためである。レンズ歪みは中心部ほど小さく周辺に向かうほど大きくなることから、近似には累乗近似(式(1))を選択した。

### 2.5.3 画像座標から地平座標への変換テーブルの作成

2.5.2 項で求めたカメラの姿勢とレンズ歪み関数から、画像上の任意の点における地平座標を得るための変換テーブルを作成する。おおまかな手順を図 2.16 および以下 1.~4.に、詳細手順を図 2.17 に示す。

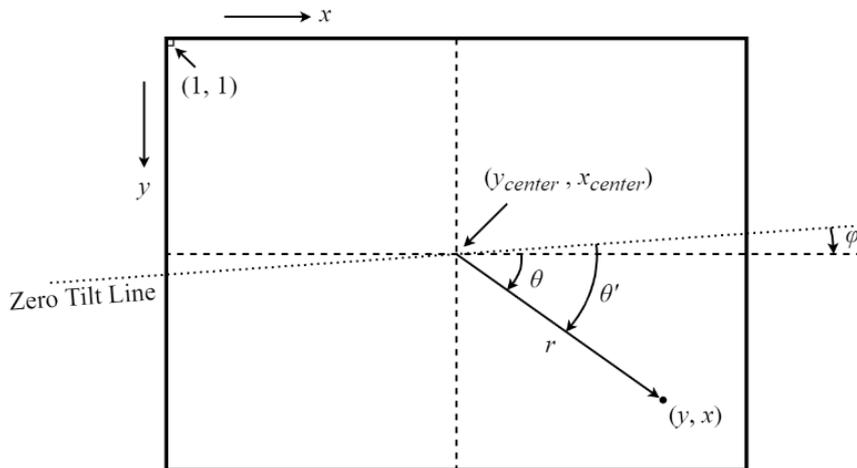


図 2.16 画像座標系 $(y, x)$ と画像中心を基準とした画像上の任意点の極座標 $(\theta, r)$ 。破線は画像中心を通る画像上の縦軸および横軸、点線はカメラの左右傾斜角 $\varphi$ の基準となる水平軸を示す。

1. 画像中心 $(y_{center}, x_{center})$ を基準とした「画像上の任意の点」の画像上の極座標 $(\theta \text{ (rad)}, r \text{ (px)})$ を求める(図 2.16)。
2.  $r$ を引数としたときの Radius-Angle Ratio の近似関数の解より、カメラの向きを指す画像中心ベクトルと「画像上の任意の点」が指す地平座標ベクトルがなす角 $\psi$ を得る。

3. 画像中心ベクトルを法線ベクトルとする画像平面上で、水平軸(水平面と画像平面の交線)から角度 $\theta' = \theta + \varphi$  (星の画像上の極座標角 $\theta$  + カメラの左右傾斜角 $\varphi$ )をなすベクトル $\vec{p}_{img}$ を得る(図 2.17 (a), (b))。
4. 画像中心ベクトル $\vec{c} = (A, h)$ を、 $\vec{c}$ と $\vec{p}_{img}$ の外積ベクトル $\vec{c} \times \vec{p}_{img}$ を軸に角度 $\psi$ だけ回転させることで得られるベクトル $\vec{p}_{horz} = (A', h')$ から、「画像上の任意の点」が指す地平座標を得る。ベクトルの回転は、各ベクトルを直交座標に変換した上で回転行列により行う。
5. 以上をすべての画素に対して行い、画像座標から地平座標への変換を行うテーブルを作成する。また、テーブルの画素間を線形内挿により補完する。

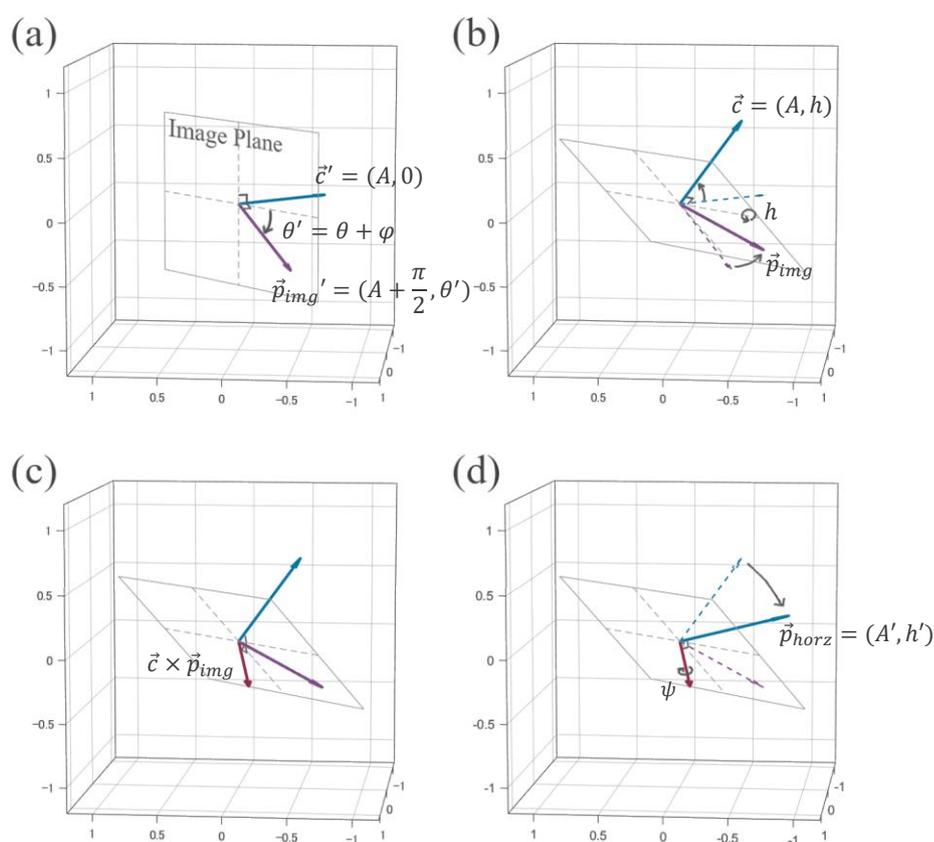


図 2.17 画像上の任意の点に対応する地平座標 $(A', h')$ を求める過程(各地平座標ベクトルの成分表記は地平座標系(方位角 $A$ 、仰角 $h$ ))。薄灰色の枠は画像平面(Image Plane)を示す。枠内の縦横の破線は図 2.16 における縦横の破線に対応する。(a)ここでの画像平面はカメラの方位ベクトル $\vec{c}'$ (青矢印)を法線ベクトルとする。 $\vec{p}_{img}'$ (紫矢印)は画像平面上における画像中心から「画像上の任意の点」へのベクトルを示し、水平軸(図 2.16 における点線)とは角度 $\theta'$ をなす。ただしこの図では、画像(カメラ)の傾きが $\varphi = 0$ の場合としている。(b) 水平軸を軸に $\vec{p}_{img}'$ (紫破線矢印)をカメラの仰角 $h$ だけ回転させ $\vec{p}_{img}$ (紫矢印)を得る。 $\vec{c}$ は画像中心ベクトルに対応する。(c)  $\vec{c}$ と $\vec{p}_{img}$ の外積 $\vec{c} \times \vec{p}_{img}$ (赤矢印)を得る。(d)  $\vec{c} \times \vec{p}_{img}$ を軸に $\vec{c}$ を $\psi$ だけ回転させ、カメラの傾きを考慮した「画像上の任意の点」の画像座標に対応する地平座標ベクトル $\vec{p}_{horz} = (A', h')$ を得る。

### 2.5.4 カメラの姿勢誤差およびレンズ歪み推定の評価とフィードバック

2.5.2 項で推定したカメラの姿勢とレンズ歪みを評価する。2.5.3 項で作成した画像座標-地平座標変換テーブルを用いて 2.5.2 項でピックアップした星 $n$ 個の地平座標に対応する画像座標への逆変換を行い、星の画像上の座標 $(x_{star}, y_{star})$ と逆変換を行った座標 $(x_{star}', y_{star}')$ を比較、具体的には、各星の画像上の座標と逆変換座標の直線距離の総和 $s$ (式(3))をみる。図 2.18 に比較例を示す。

$$s = \sum_{i=1}^n \sqrt{(y_{star_i} - y_{star'_i})^2 + (x_{star_i} - x_{star'_i})^2} \quad (3)$$

姿勢 3 成分の補正值 $(\Delta A, \Delta h, \Delta \varphi)$ を変数として、内点法による最適化を用いて $s$ の最小化を行い補正值を得る。ただし、局所最適解を回避するため初期値は手動で推定した補正值を与え、最適化を補正值の精度の追い込みに利用する。補正值の手動推定を行うために開発した GUI ツールを図 2.19 に示す。

$s$ の最小化後の補正值をカメラの姿勢に適用した後は図 2.14 に示す手順に従い、必要に応じてレンズ歪みの補正を行った後、再度変換テーブルを作成し、再び姿勢推定結果とレンズ歪みの評価を行う。姿勢の誤差が十分に小さくなるまでこれを繰り返し、最終的なカメラの姿勢、レンズ歪み関数(Radius-Angle Ratio)、画像座標-地平座標変換テーブルを得る。

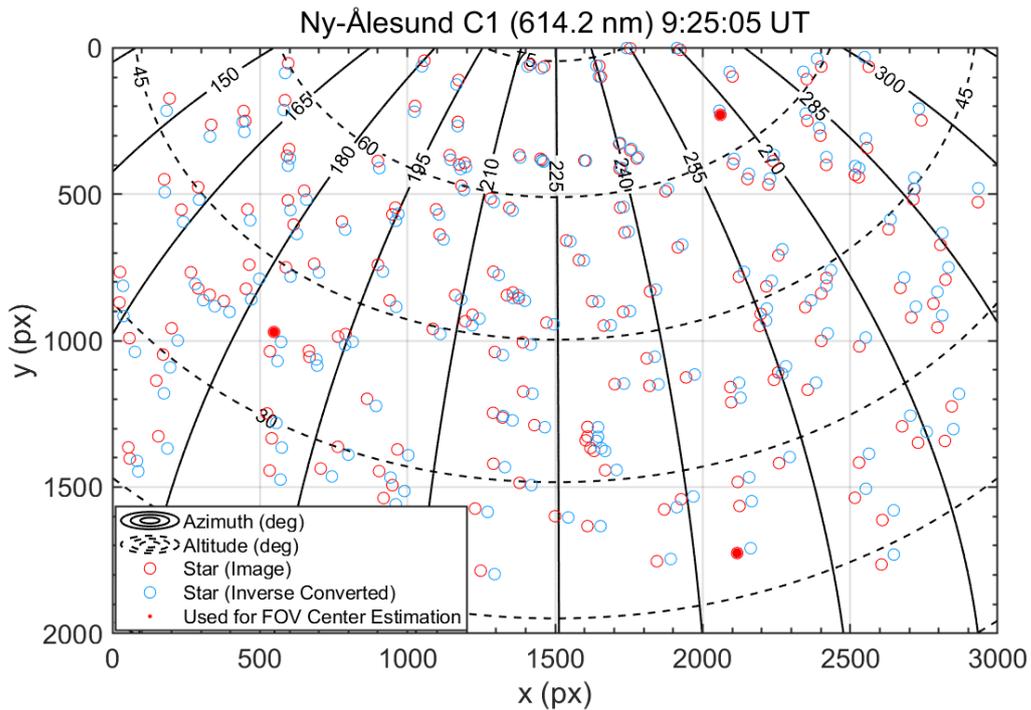


図 2.18 星の画像上の座標(橙丸)と変換テーブルを用いて星の地平座標から得た逆変換座標(青丸)の比較。黒実線が方位角、破線が仰角を表す。中実赤丸は 2.5.2 項の手順 2~3.でカメラの向きの仮推定に用いた星 3 個を示す。

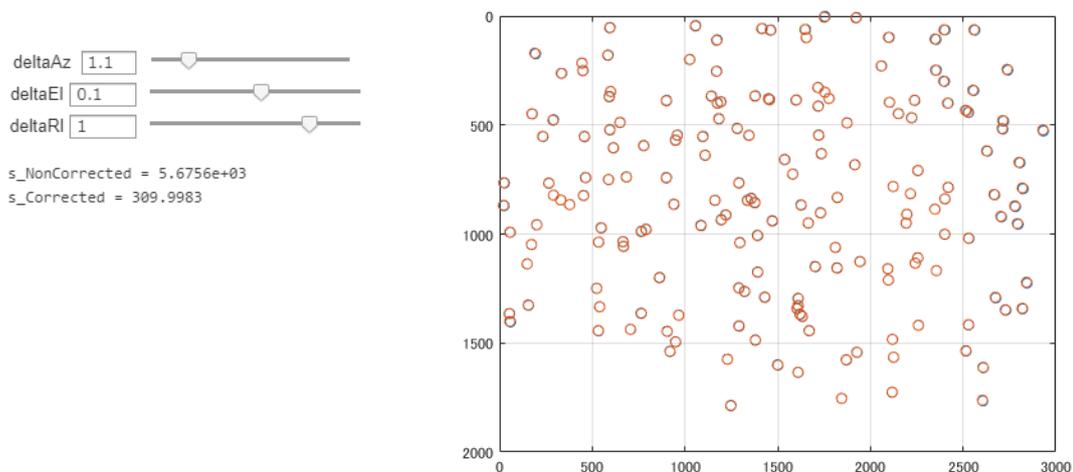


図 2.19 補正值の手動推定に用いるツール。補正前後の $s$ の値の大きさと散布図によりずれを比較し、 $s$ が小さくなるよう補正值を度数法で指定し再度比較を繰り返すことで、手作業で可能な範囲でずれの小さい姿勢の最適化初期値を得る。 $s_{NonCorrected}$ が補正前、 $s_{Corrected}$ が手動補正後の $s$ を示す。

### 2.5.5 既知のレンズ歪みを適用する場合のカメラの向きの初期推定

図 2.14 における緑文字の手順、既知のレンズ歪みを適用した場合の未知のカメラの向きの初期推定手法について説明する。測定もしくは 2.5.2 項で推定したレンズ歪み(Radius-Angle Ratio)を利用することで画像上の任意点の画像中心ベクトルとのなす角が得られるため、任意の星 3 つの組み合わせからカメラの向きを推定することが可能になる。ただし組み合わせによっては精度に欠けるため、統計的に処理を行う。手順を以下 1.~7.に示す。

1. 観測画像上の星をピックアップし、これらの画像座標( $y_{star}, x_{star}$ )と地平座標( $A, h$ )を得る。観測点・観測日時における当該の星の地平座標はステラナビゲータ 7 を用いて得る。
2. ピックアップした星のうちから 3 つを選ぶ組み合わせを列挙する。このときの組み合わせの数を $n$ とする。
3. 3 つの星への地平座標ベクトルと画像中心ベクトルとのそれぞれのなす角を既知のレンズ歪み関数(Radius-Angle Ratio)より得る。このとき、画像中心ベクトルは未知である。
4. 3.で得た星への地平座標ベクトルそれぞれとのなす角 3 つが一致するベクトルを求め、これの地平座標を得る。ただし、レンズ歪みや星のピックアップ時の画像座標の誤差によりなす角 3 つが一致する可能性は低いため、レンズ歪み関数から得たなす角との誤差の総和が最小となるベクトルを内点法による最適化によって求める。
5. 3.~4.を 2.で列挙した 3 つの星の組み合わせ $n$ 組全てについて行う。
6.  $n$ 組の組み合わせ全てから得られた地平座標の中央値を取り、これをカメラの向きとする。

レンズ歪みは既知であるため、レンズ歪みを推定する必要のあった 2.5.2 項よりピックアップする星の数は少なくてもよく、可能な限り視野全域から均一に、かつ 2.5.4 項でのカメラの姿勢誤差の評価に必要な数(20 個程度)があれば良い。また 4.における最適化の初期値は、2.で列挙した 3 つの星の組み合わせリストをランダムに並び替えた先頭の 100 組を試算したその中央値とした。

#### 2.5.6 三角測量による発光雲の 3 次元位置の推定

まず、観測画像から発光雲の特徴点をトレースして得た画像座標を、2.5.2 項～2.5.5 項の手順により作成した画像座標-地平座標変換テーブルを用いて地平座標に変換する。つぎに発光雲の地平座標が 2 地点分揃っている時刻における発光雲について三角測量を行う。各観測地点の地理座標(緯度、経度、標高)から発光雲の地平座標方向にそれぞれ伸ばした線分同士が最接近したときの両線分の最接近点の中点を発光雲の 3 次元位置とする。ただし処理を容易にするため、観測地点の地理座標と各観測地点からみた発光雲の地平座標を地心座標系(地球の中心を原点とした直交座標系)に変換した上で発光雲の地心座標系における 3 次元位置を算出し、最終的に地理座標に変換することで地理的な 3 次元位置を得る。Ba<sup>+</sup>と Sr それぞれの発光雲について、3 次元位置の時間変化を追跡することでイオンドリフトと中性大気風速を得る。ただし観測地点の座標は、2.4 節に示したそれぞれの観測地点の地理座標に、三脚に取り付けられたカメラの高さを 1 m として標高に足したものである。

### 第3章 結果

#### 3.1 光学観測システム

##### 3.1.1 一般向けカメラの露光時間の検証

測定の結果、同じ設定露光時間で感度設定のみを変えた場合、0.01 s単位の測定では実露光時間のばらつきはほぼ計測されず 0.01 s 未満であることが確認された。このことから露光時間は感度に対する依存性はないことがわかる。設定露光時間別 8 回の測定の平均露光時間を表 3.1 に示す。設定露光時間 8 s, 15 s, 30 s をみると、実露光時間は 8.01 s, 16.02 s, 32.04 s と、小数点第 2 位まで含めて 2 倍ずつ増加していることがわかる。また設定露光時間 13 s では実露光時間のほうが短くなっている。

##### 3.1.2 バンドパスフィルタの分光透過特性の測定

計測した Ba<sup>+</sup>用と Sr 用の半値幅 6 nm の BPF それぞれの分光透過特性を図 3.1 に示す。入射角により、特性が短波長側にシフトしている様子がわかる。また両フィルタとも入射角 0~11 度の範囲でターゲット波長の透過率が 95%を超えていることがわかった。

表 3.1 設定露光時間と実露光時間。実露光時間は、設定露光時間別に感度の異なる 8 回の計測を平均した値。

設定露光時間 (s)	計測露光時間 (s)
1	1.00
2	2.00
4	4.00
6	6.36
8	8.01
10	10.09
13	12.71
15	16.02
20	20.18
30	32.04

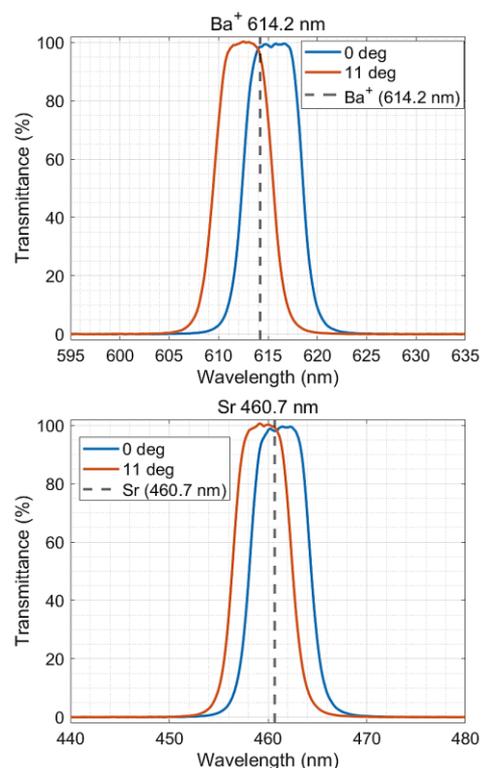


図 3.1 Ba<sup>+</sup>用(上)と Sr 用(下)の BPF それぞれの分光透過特性。青が入射角 0 度の場合、橙が入射角 11 度の場合の透過特性、破線が各フィルタのターゲット波長を示す。

### 3.1.3 絶対感度特性の測定

観測画像の中心から 600 px の範囲の輝度値を平均した値の露光時間-輝度値特性を図 3.2 および図 3.3 に示す。図 3.2 は設定露光時間を横軸に取ったプロットの一部、図 3.3 は 3.1.1 項より設定露光時間に対応する実露光時間を横軸に取ったプロットの一部である。縦軸は RAW ファイルのメタデータより得られる BlackLevel と WhiteLevel の差により規格化した輝度値である。実露光時間-輝度値特性の全てのプロットを付録 A に添付する。

渡邊 (2019)により報告した、C-REX-1 に用いられた観測システムにおける露光時間に対する輝度値のプロットにおいて、概ね比例関係にある特性が特定の露光時間において必ず歪む現象[22]が、設定露光時間を横軸に取るという点で同じ条件でプロットしている図 3.2 においても現れている。一方、図 3.3 実露光時間に対する露光時間のプロットではほぼ完全な比例関係にあることがわかる。

また渡邊 (2019)により、C-REX-1 に用いられた観測システムにおける感度特性測定において画像下部が暗くなる現象が報告されている[22]。これの由来を調査するために、カメラを水平にした場合と傾けた場合でそれぞれ撮影した画像を図 3.4 に示す。カメラを傾けた場合でもカメラの底面方向に減光が現れていることがわかる。

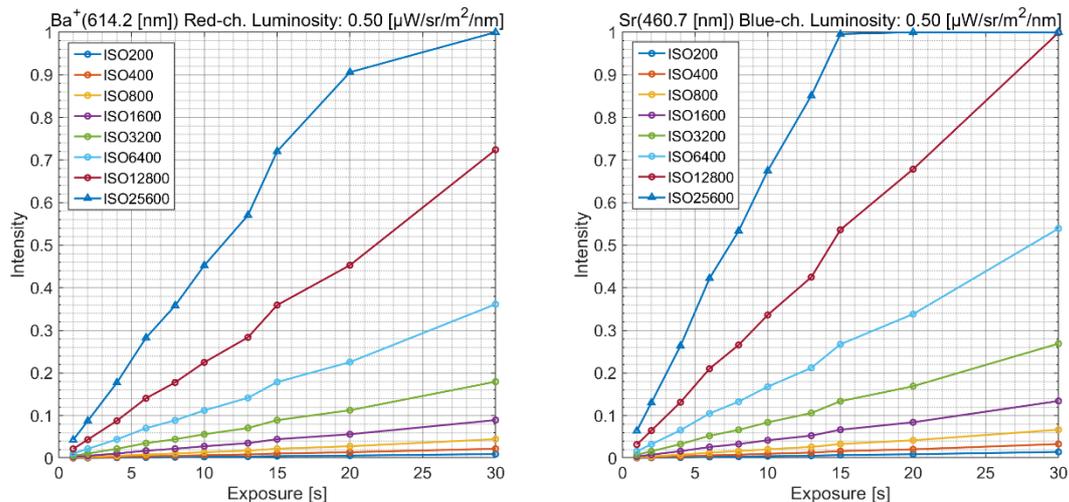


図 3.2 設定露光時間を横軸とした観測システムの露光時間-輝度値特性。

左) Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用 BPF 右) Sr(460.7 nm)用 BPF

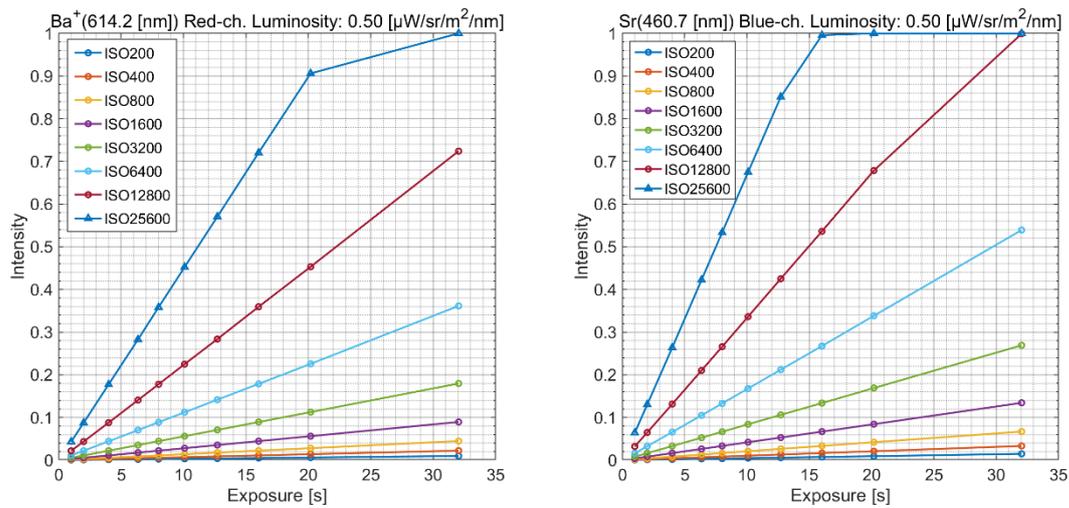


図 3.3 実露光時間を横軸とした観測システムの露光時間-輝度値特性。  
 左) Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用 BPF 右) Sr(460.7 nm)用 BPF

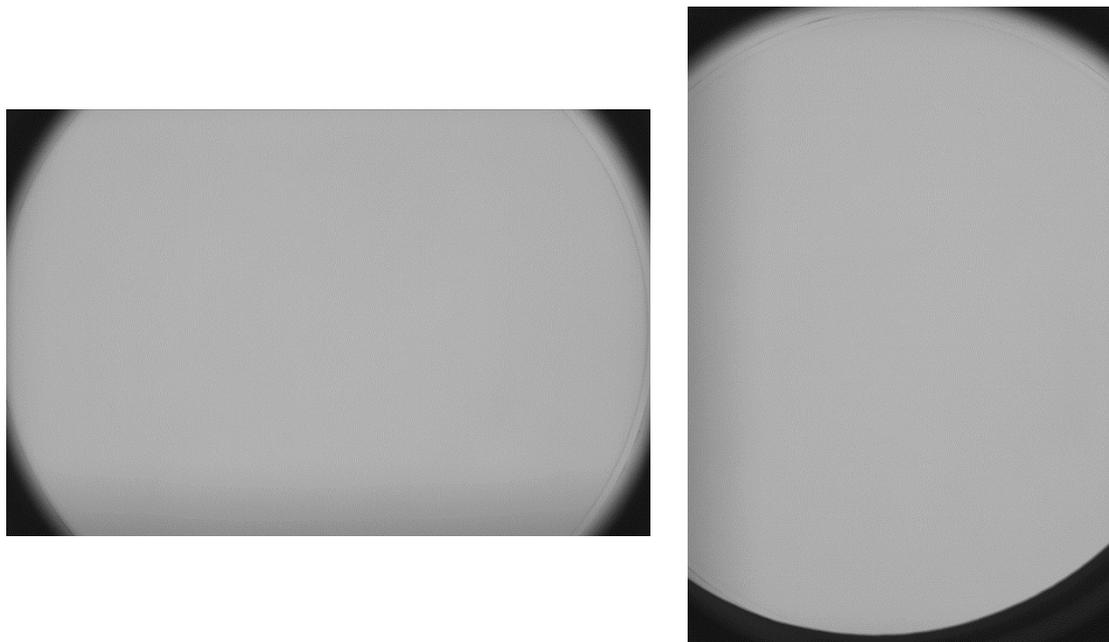


図 3.4 画像下部の減光の由来を調べるために撮影した画像。見やすさのため、画像編集により全体の露出を上げている。また、どちらとも図の下方向が床面方向である。左) カメラを水平にして撮影した画像、図の下方向がカメラの底面。右) カメラを右に約 90 度傾けて撮影した画像、図の左方向がカメラの底面。

## 3.2 打ち上げと地上観測

本節以降では、観測データやプロット上で Ny-Ålesund を NYA、Longyearbyen を LYR、Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用のカメラを C1、Sr(460.7 nm)用のカメラを C2 と表記する場合がある。

### 3.2.1 ロケット実験概要

打上げウインドウは 2019 年 11 月 25 日から 12 月 9 日に設定されていたが、天候不良、観測機材トラブルなどのほか、磁気圏の低活動状態が続いていた影響でカस्प領域が Ba/Sr 放出エリアを外れた高緯度側を通過する傾向にあったことなどを理由に、当初のウインドウ内で打上げ実施ができなかった。そのため打上げウインドウが C-REX-2 は 1 日、CHI は 3 日延長された。ウインドウ延長 1 日目、打上げの条件を満たしたため 2019 年 12 月 10 日 9:30 UT に Ny-Ålesund の SvalRak から CHI の観測ロケットが打ち上げられ、計 8 個全てのキャニスターからの Ba/Sr 放出に成功した。これについて米国 Alaska 大学の光学観測責任から、Ba<sup>+</sup>発光雲の動きからカस्पをつかめた可能性が高いとの見解を得られた。一方 C-REX-2 は、Ba/Sr 放出領域が CHI よりもわずかに低緯度に位置しており、打上げを実施してもカस्प領域に届かない可能性が高かったことから打上げは中止となり同時打上げは実現しなかった。また米国 Alaska 大学観測チームにより、航空機からの光学観測も実施された。

### 3.2.2 地上観測

日本チームは当初の打上げウインドウを前提とした移動日程を組んでおり、ウインドウ最終日(12 月 9 日)に Ny-Ålesund を離れる必要があったため、すべての機材準備を整えた上で延長ウインドウ初日は Ny-Ålesund での観測を米国 Clemson 大学の観測担当者に委託した。Longyearbyen での観測については日本チームが行った。

予備観測により、露光時間設定は 8 秒と 13 秒の交互とした。露光時間設定 1 サイクルの図解を図 3.5 に示す。放出の正確な時刻を測定するためには Ba/Sr 放出前後は撮影間隔を狭めるオペレーションが望まれたが、1 地点の観測を委託していることから観測の成立を優先し、一律に図 3.5 の設定とした。



図 3.5 撮影のサイクル。15 秒と 20 秒が交互に経過するごとに、それぞれ 8 秒と 13 秒の露光(Exposure)を行うサイクルを繰り返す。

CHI 打上げ後の観測結果として、Ba/Sr の放出と発光雲の約 25 分間に渡る観測に成功した。ただし、Longyearbyen の観測画像については、自動撮影スクリプトの不備のため一部欠落した撮影があるほか、観測中は薄雲がかかっている時間帯が多く、発光雲の観測はできた

ものの SN が低下する要因となった。また Longyearbyen の Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用カメラのフォーカスがずれており、星の像がわずかに膨張している。発光雲の移動が大きく、Ny-Ålesund では 2 回、Longyearbyen では 1 回、観測中の撮影と撮影の間にカメラの向きを手動調節している。図 3.6 に観測の様子、図 3.7 に観測画像の一例を示す。図 3.7 の全画像に Ba/Sr 放出の瞬間が写っていることがわかる Ba<sup>+</sup>は縦に伸長しながらそれぞれが移動している一方、Sr は球状に近い形で拡散し、見かけでは複数の放出が重なり合い大きな塊となっているように見えている。観測画像のうち打上げ以降から風速解析に用いた最後の画像までを付録 B に添付する。

Longyearbyen での撮影スクリプトの不備については、スクリプトの 2 回目以降の撮影設定の記述中にある、撮影設定を全て強制的にプログラムし直すか、ひとつ前の撮影設定と異なる部分だけをプログラムするかを選択する項目において、すべての撮影を前者の設定としていたことによるものであり、撮影間隔が足りず動作が不安定となっていた。撮影間隔を短縮したい場合は後者を選択する必要があった[26]。

### 3.3 イオンドリフトおよび中性大気風速の測定

#### 3.3.1 レンズ歪み

2.5.2 項に示す手法および反復の過程で得た Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用および Sr(460.7 nm)用カメラそれぞれのレンズ歪みの推定結果を図 3.8 に示す。Radius-Angle Ratio の値は、Sr 用カメラの値の方が全体的に小さい傾向となっている。また、歪み率は Sr 用カメラの方が大きくなっている。画像上での歪みの表れ方の参考として Ba<sup>+</sup>用カメラにおけるレンズ歪みパターンを図 3.9 に示す。

#### 3.3.2 画像座標-地平座標変換テーブル

作成した画像座標-地平座標変換テーブルの一部を図 3.7 に示す。全ての変換テーブルは付録 C に添付する。変換テーブルの精度評価の参考として、カメラの姿勢推定に用いた星の画像座標に対応した位置を赤丸、変換テーブルを用いて星の地平座標からの逆変換により得た位置を青丸で表示している。図 3.10 から、ほとんどの領域で青丸と赤丸がほぼ一致しているが、画像左右端の領域では青丸と赤丸にずれが生じていることがわかる。またレンズ歪みが既知の場合(図 3.10 下図)、カメラの姿勢推定に用いる星の数が少なく画面上で偏りがあるにもかかわらず高い精度で姿勢を推定できていることがわかる。



図 3.6 各地上観測地点における光学観測の様子。矢印のカメラが本研究で用いたカメラである。また観測中は観測所建屋の照明を消す。左) Ny-Ålesund、Rabben 観測所。右) Longyearbyen、Kjell Henriksen Observatory。建屋内の全天球カメラ等が磁気圏の監視に用いられた。

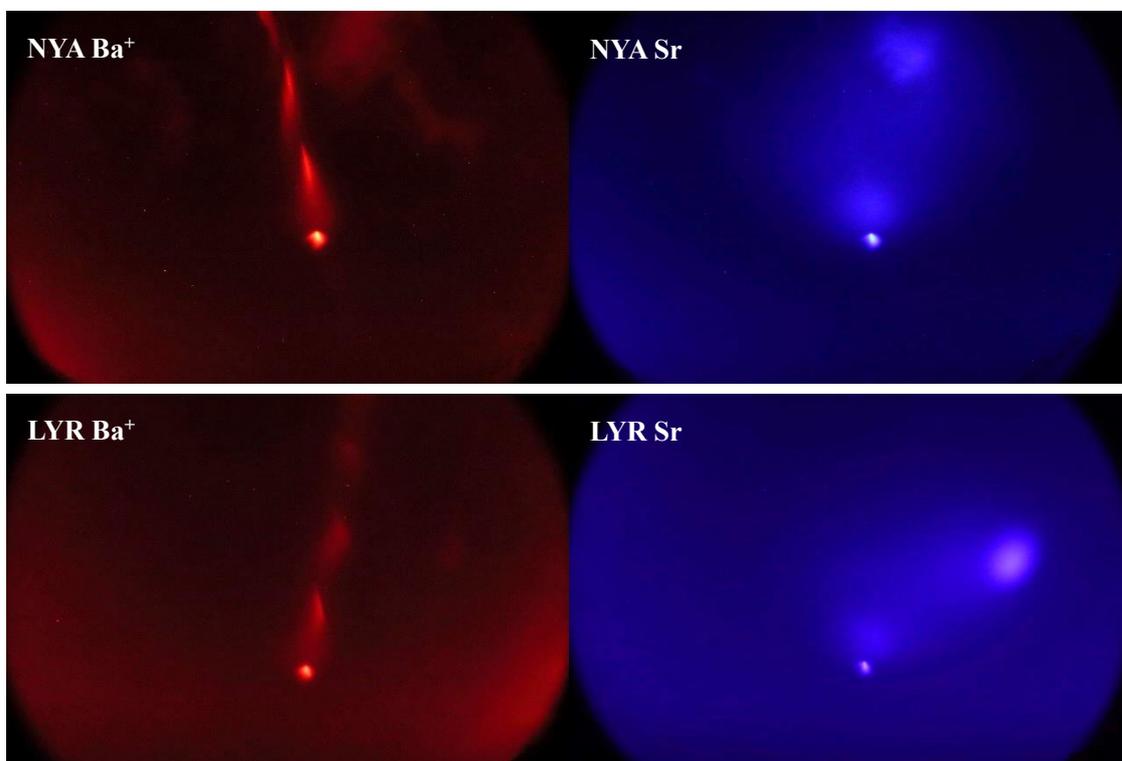


図 3.7 同一時刻に撮影された CHI の観測画像例。上段が Ny-Ålesund(NYA)から、下段が Longyearbyen(LYR)から、また左が Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用カメラ、右が Sr(460.7 nm)用カメラで撮影された画像である。Ba<sup>+</sup>/Sr 両者の発光が BPF によって分離できていることがわかる。

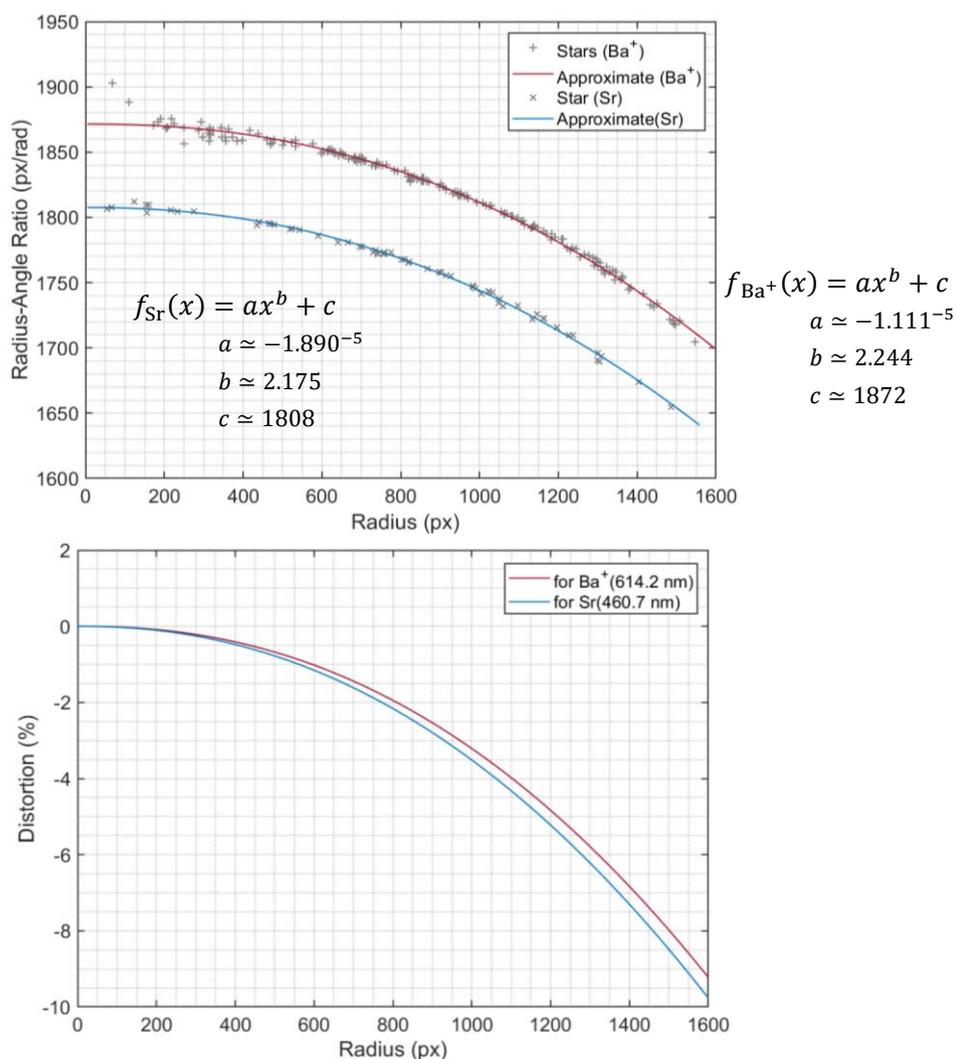


図 3.8 レンズ歪み推定結果。赤が Ba<sup>+</sup>用カメラ、青が Sr 用カメラのものを示す。上) Radius-Angle Ratio のプロット(式(1))。下) 2.5.2 項式(2)に示す方法で左図を正規化した歪み率のプロット。

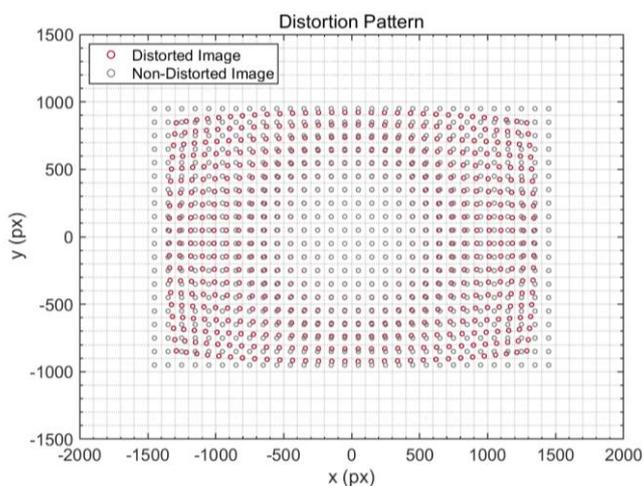


図 3.9 Ba<sup>+</sup>用カメラレンズの歪みパターン。ここでは原点を画像中心としている。

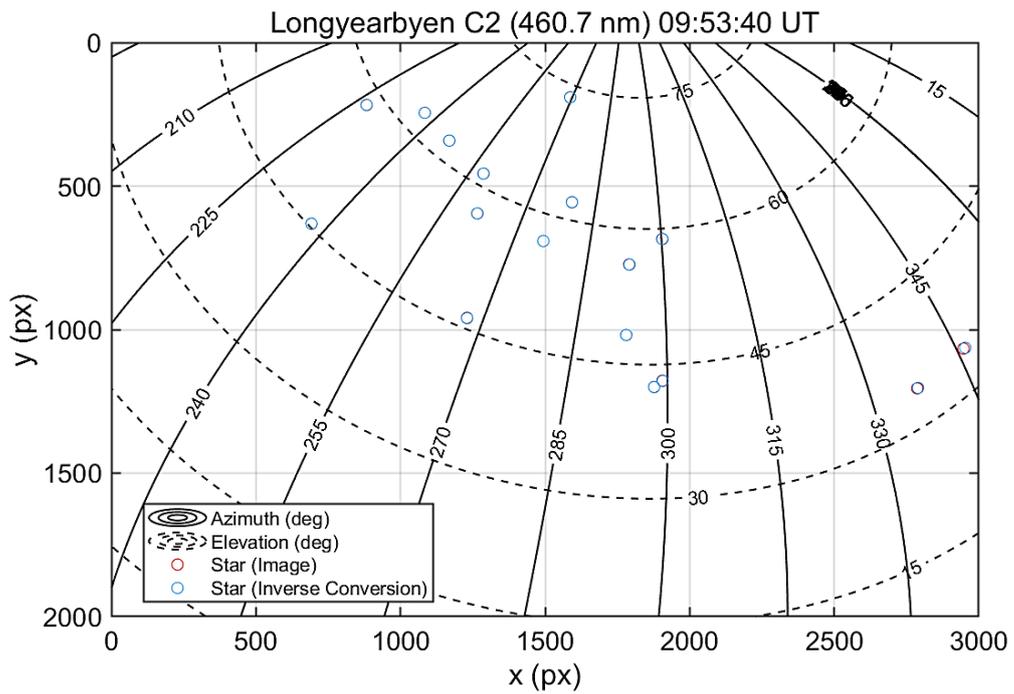
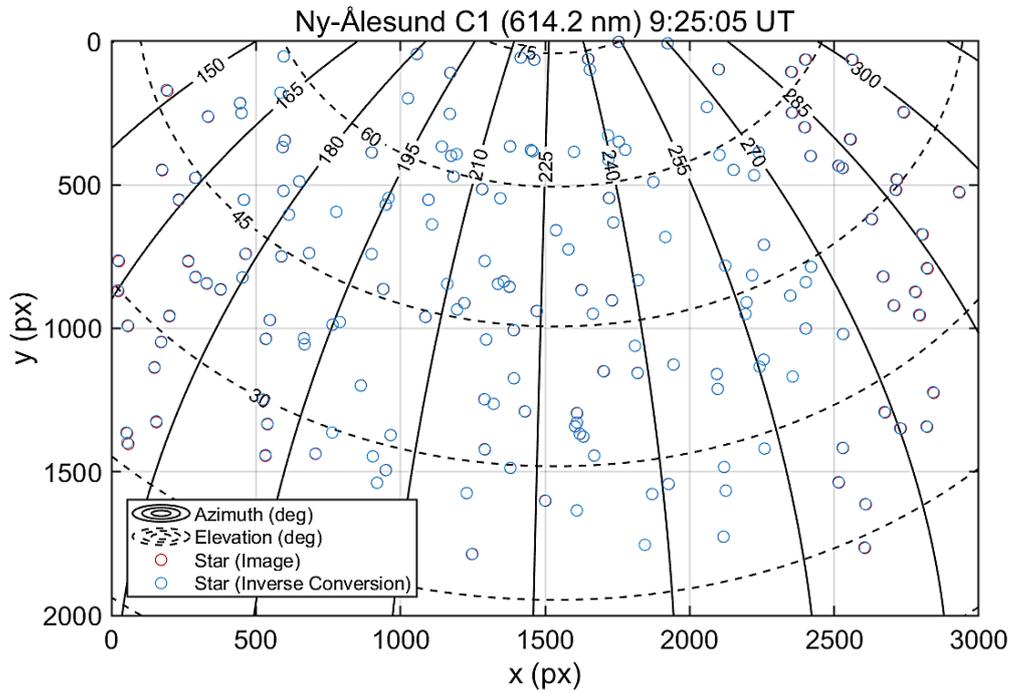


図 3.10 画像座標-地平座標変換テーブルの検証例。赤丸はカメラの姿勢推定に用いた星の画像座標に対応した位置、青丸は変換テーブルを用いて星の地平座標からの逆変換により得た位置を示す。ほとんどの領域で赤丸と青丸が重なっており、いるが、視野周辺部はずれが生じている。

### 3.3.3 Ba/Sr 放出の 3 次元位置および時刻の推定

3.3.2 項および付録 C の画像座標-地平座標変換テーブルを用いて、CHI の 2 地点観測画像のうち発光雲の各放出を初めに捉えた画像から三角測量により 3 次元放出位置の推定を行った。また推定には Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用カメラで撮影した画像を用いた(図 3.11)。画像の撮影時刻や推定放出高度は表 3.2 に示す。3.2.2 項で述べたように撮影間隔が長く時間分解能が十分ではないため、観測画像から正確な放出時刻の計測には至っていない。推定放出位置と CHI の軌道データを比較した結果については、#1, #8 を除いて概ね 4 km の差に収まっていることがわかる。

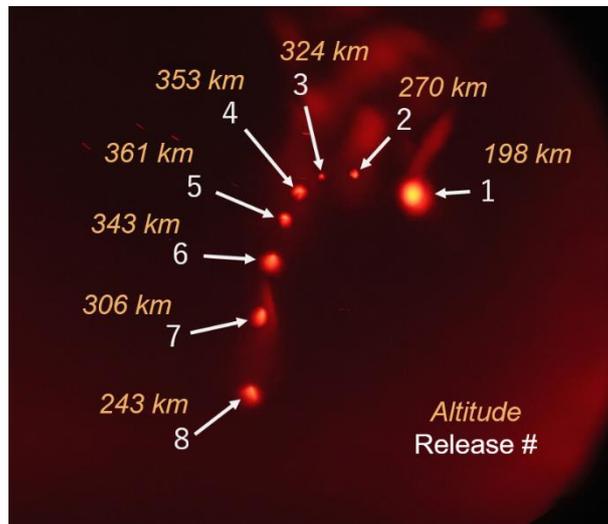


図 3.11 各キャニスターからの放出が確認された画像の比較明合成と三角測量による推定放出高度。軌道に沿うように Ba/Sr が放出されていることがわかる。

表 3.2 打上げ時刻 T=9:30 UT を基準とした Ba/Sr 放出の撮影時刻および三角測量による推定高度。グレーハッチ部は Clemson 大学 Larsen 教授から提供を受けたノミナル放出時刻およびノミナル放出時刻における CHI の軌道データの高度。

#	Time First Taken (T+mm:ss)	Exposure Config. (s)	Estimated Altitude (km)	Nominal Release Time (T+mm:ss)	CHI Vehicle Altitude (km)	3D Difference (km)	Altitudinal Difference (km)
#1	T+02:05	13	198.4	T+01:58	189.5	9.7	+8.9
#2	T+02:40	13	270.2	T+02:50	268.4	2.2	+1.8
#3	T+03:35	8	324.0	T+03:42	323.1	1.2	+0.9
#4	T+04:25	13	352.8	T+04:34	353.7	1.6	-0.9
#5	T+05:20	8	360.6	T+05:26	360.7	1.3	-0.1
#6	T+06:10	13	343.4	T+06:18	344.0	2.5	-0.6
#7	T+07:05	8	305.5	T+07:10	303.6	3.7	+1.9
#8	T+07:55	13	242.5	T+08:02	239.0	6.2	+3.5

### 3.3.4 発光雲の3次元位置推定とイオンドリフトおよび中性大気風速の測定

本論文では、電磁場に従って動く Ba<sup>+</sup>発光雲を Ion、中性大気に従って移動する Sr 発光雲を Neutral と表記し、各発光雲に放出順に#1~#8 の番号を振り表記する。

2 地点の観測画像から、3.3.2 項および付録 C の画像座標-地平座標変換テーブルを用いて各発光雲の各観測地点を基準とした地平座標を得た後、同時刻において 2 地点両方の地平座標が得られた発光雲について 3 次元位置を三角測量によって推定した。発光雲の水平移動を図 3.13 および図 3.15、高度変化を図 3.16、発光雲の水平・鉛直速度の測定結果を表 3.3 に示す。各図表に示される CHI の軌道情報(経度、緯度、高度)は米国 Clemson 大学 Larsen 教授の提供によるものである。ただし Larsen 教授によると、CHI はブースター段の燃焼終了後ペイロード部を観測ロケット本体から分離しており、Ba/Sr キャニスターを搭載したペイロード部は本体の僅かに前方を飛翔している。CHI の軌道情報は本体側の値であるため、実際の放出位置および高度は軌道情報の値とはわずかに異なっている(Larsen, 2021; 私信)。

はじめに Ion の水平移動について、図 3.13 および表 3.3 より Ion #3~5 は東北東(ENE)方向に水平速度およそ 900~1200 m/s で移動している一方、図 3.15 右図および表 3.3 より Ion #8 は北北東(NNE)方向に水平速度 171 m/s で移動しており、放出位置によって水平速度が大きく異なっていることに加え、移動方向もわずかに異なっていることがわかる。また、Ion #8 は途中で移動方向が東北東(ENE)に変わり、水平速度 377m/s へ加速している(Ion #8')。また図 3.15 左図に示すように Ion#5 は放出後 2 つに分かれて移動しており(Ion #5a, #5b)、図 3.17 の観測画像に示すようにそれぞれ異なる速度で移動していることがわかる。計測区間内の水平速度差は約 100 m/s である(表 3.3)。

つぎに Ion の高度変化について図 3.16 より、Ion#6~8 は放出直後のみロケットの運動方向への慣性の影響を受けるように大きく高度が下がっている。Ion #4~8 については、計測期間内での平均では大きな高度変化はなく水平に移動しているとみられる。ただし Ion #8, #8'については長い区間で見るとわずかに沈降しており、Ion #4~#6 については高度方向のばらつきが大きい。これらの発光雲とは対照的に、Ion #3 は測定可能な区間が放出から約 1 分と短いものの 50 秒の区間で連続的に約 18.5 km 上昇、垂直速度は 323 m/s と突出して大きな値となった(図 3.16、表 3.3)。

つぎに Neutral について図 3.12 および表 3.3 より、Neutral #1 は北西(NW)方向に水平速度 92 m/s、Neutral #8 は西(W)方向に水平速度 167 m/s で移動しており、両者では移動方向と速度が異なっている。また図 3.16 より、Neutral #1, #8 は緩やかに沈降している。両者とも観測点から遠ざかるように移動しており、後半では水平位置および高度のばらつきが大きくなっている。そのため、Longyearbyen の撮影欠落が起こる T+11:10 までを速度測定の間としてしている。ただし Neutral #1 について、図 3.16 におけるおよそ T+4 min から T+8 min にかけての欠落は、射点の至近で観測を行っていた Ny-Ålesund のカメラ視野内の手前側をロケット排煙が通過し発光雲が捉えられなかったためである。Longyearbyen の観測画像から移動速度や方向に変化はないと判断したため、欠落区間をまたいで移動速度算出を行った。

3次元位置の推定が行われていない発光雲について、Ion #1, #2 は Ny-Ålesund のカメラ視野の端で放出され、直後に観測地点の上空方向に向かって移動し視野を外れてしまったため放出位置のみが推定でき、移動速度の測定に至っていない。また Neutral #2~#7 は拡散が速く、図 3.7 に示すように発光雲同士が重なり合って写っていたため、それぞれの特徴点を見出す事ができず移動速度の測定に至っていない。

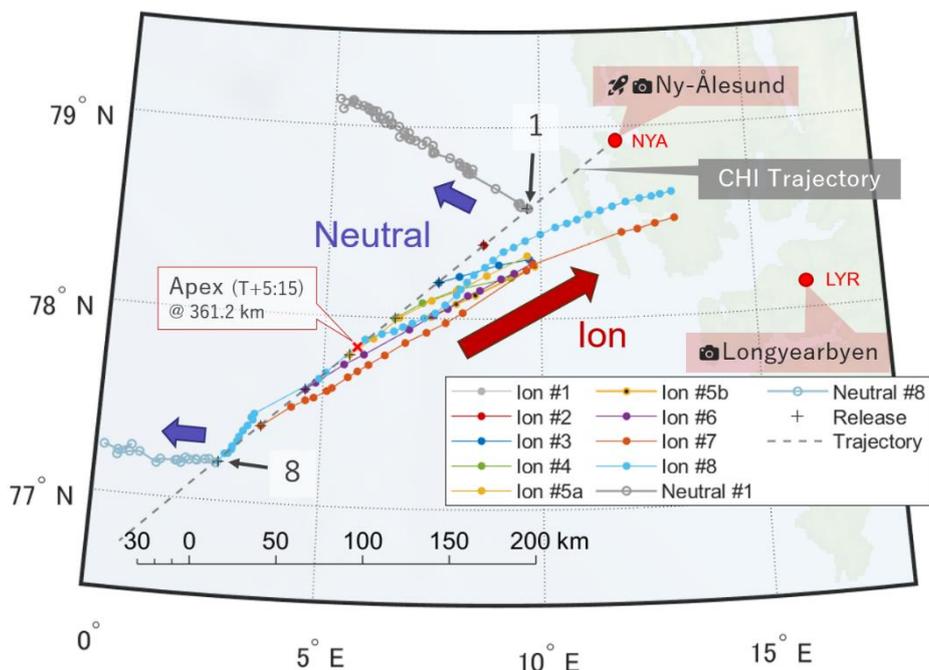


図 3.13 発光雲の放出(Release)位置および水平位置の変化、CHI の軌道(Trajectory)とその最高点(Apex)、観測地点(NYA, LYR)の位置関係。中実丸がイオン(Ba<sup>+</sup>)、中空丸が中性大気(Sr)である。おおまかな移動方向は、イオンが北東から東北東、中性大気が北西から西である。また中性大気の軌跡はばらつきが大きく位置推定精度が低いことがわかる。

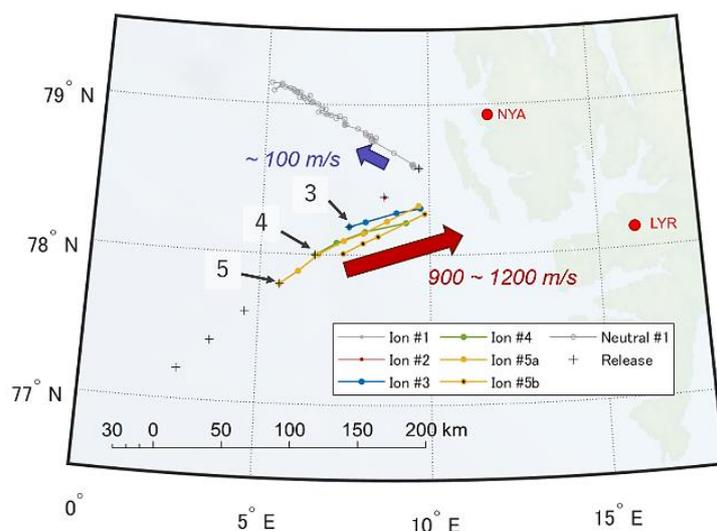


図 3.14 図 3.13 のうち#1~#5 について注目した図[17]。Ion #3~#5 が東北東、Neutral #1 が北西に移動している。Ion #1, #2 については発光雲が視野外に外れてしまったため、放出点以外は三角測量が行えていない。

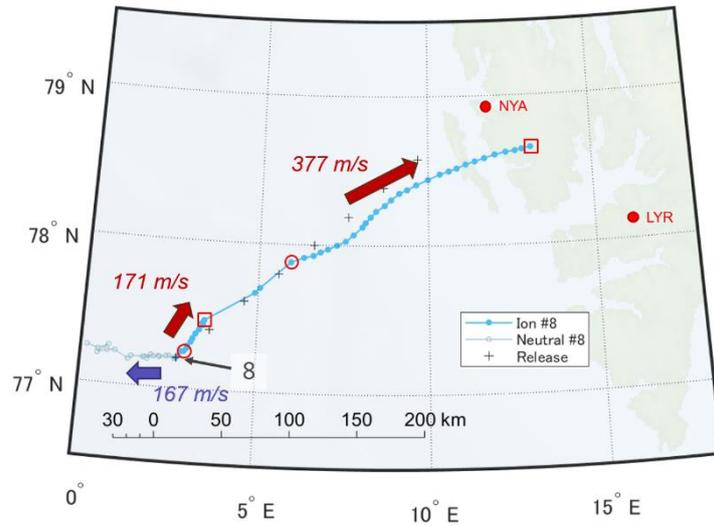


図 3.15 図 3.13 のうち#8 について注目した図。右) Ion #8 が北北東から東北東に、Neutral #8 が西に移動している。平均速度および方位は赤丸を始点、赤四角を終点とした区間で算出した。

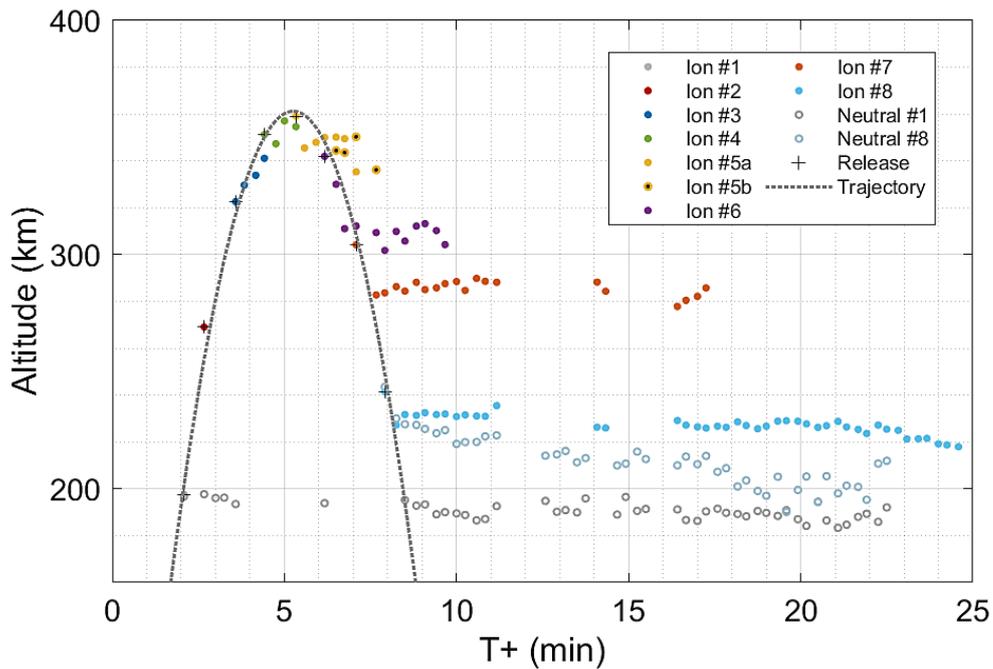


図 3.16 発光雲の高度の時間変化および放出位置と CHI の軌道高度。中実丸がイオン( $Ba^+$ )、中空丸が中性大気(Sr)。Ion #6~#8 は、放出直後はロケットの運動の影響を受けている様子がわかる。Ion #3 が約 1 分に渡って継続的に上昇している一方、Neutral #1, #8 は緩やかに沈降している。Ny-Alesund カメラ視野内のロケット排煙の通過と Longyearbyen カメラ撮影時の一部欠落のため、一部区間の三角測量が行えていない。

表 3.3 発光雲の移動方位および水平・垂直速度の測定結果。測定区間は一部を除き、放出後発光雲の初期拡散とロケット放出時の慣性運動が落ち着いてからトレースができなくなるまで、もしくは撮影の欠落以前(T+11:10 まで)としている。Ion #5 は 2 つに分かれて(#5a, #5b)移動しており、#5b について#5a と区別できる区間のみ測定した。Ion #8 は速度変化および撮影欠落の前後の 2 区間(#8, #8')で測定した。

#	Release Altitude (km)	Direction (deg.)	Direction	Horizontal (m/s)	Vertical (m/s)	Duration (s)	Duration Origin (T+mm:ss)	Duration Destination (T+mm:ss)
<b>Ion #3</b>	324.0	71.3	ENE	962	323	35	T+03:35	T+04:10
<b>#4</b>	352.8	67.2	ENE	1210	61	55	T+04:25	T+05:20
<b>#5a</b>	360.6	56.7	ENE	1017	57	70	T+05:35	T+06:45
<b>#5b</b>	-	60.7	ENE	901	-118	70	T+06:30	T+07:40
<b>#6</b>	343.4	56.9	ENE	663	-5	160	T+06:45	T+09:25
<b>#7</b>	305.5	55.7	NE	515	26	210	T+07:40	T+11:10
<b>#8</b>	242.5	28.2	NNE	171	24	160	T+08:30	T+11:10
<b>#8'</b>	-	58.9	ENE	377	-23	490	T+16:25	T+24:35
<b>Neutral #1</b>	198.4	308.0	NW	93	-10	510	T+02:40	T+11:10
<b>#8</b>	242.5	261.8	W	167	-42	175	T+08:15	T+11:10

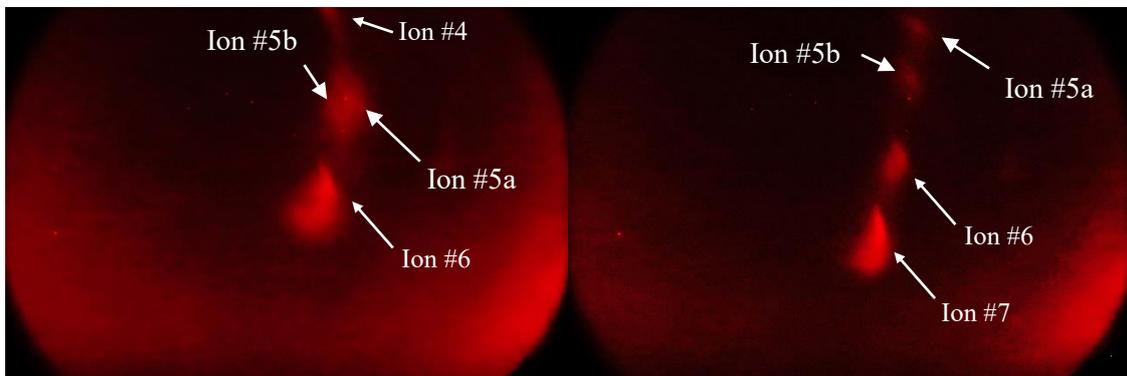


図 3.17 Ion #5 が 2 つに分かれて移動している様子(Longyearbyen)。放出直後から左図に至るまでの間も分かれて移動していたとみられるものの、区別して特徴点を見出すことはできなかった。

## 第4章 評価と考察

### 4.1 光学観測システム

#### 4.1.1 一般向けカメラの露光時間の考察

露光時間の法則について考察する。表 4.1 に設定露光時間、実露光時間とその対数値を示す。ここでは設定露光時間を  $S$ 、実露光時間を  $s$ 、その平均  $\bar{s}$  より  $n' = \log_2 \bar{s}$  とする。 $S = 8, 15, 30$  sにおける  $n'$  の小数部に共通する値  $0.0018$  を指数、2 を底とすると  $2^{0.0018} \approx 1.00125$  となる。一方、取りうる値が初項 0 かつ公差  $1/3$  の等差数列であり、 $n'/1.00125$  に最も近い値となるような  $n$  を定義する(表 4.1 右から 2 列目)。この  $n$  から  $2^n \times 1.00125$  を求めると、表 4.1 に示すように、測定値と揃えるために小数点第 3 位で四捨五入した場合に実露光時間平均  $\bar{s}$  とほぼ一致する値が得られる。

以上から、EOS Kiss X9i の、露光時間設定における実露光時間は式(4)に示す法則に従っていると考えられる。ただし 1 秒未満の短い露光時間設定については今回の露出条件街にあり、実測をしていないためこの法則性が適用可能かは明らかではない。この法則について、実露光時間は式(5)の法則性があると言いかえることができる。

$$s = 2^n \times 1.00125 \quad \left( n = 0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1, \dots \right) \quad (4)$$

$$n = \log_2(s/1.00125) \quad (5)$$

1.00125 という係数について、カメラの内部時刻の基準がずれているかもしくは何らかの意図があつての設定である可能性が考えられる。後者について、シャッター機構の動作中の露光量を補正するためだとした場合、補正は定数で達成できるため係数である必要はない。イメージセンサの露光特性の補正のためである可能性や、過去のフィルム時代のカメラ特性を意図的に反映させている可能性もあるが、仕様は公表されておらず真意は不明である。

表 4.1 EOS Kiss X9i の設定露光時間と実露光時間およびその対数値

設定露光時間 $S$ (s)	実露光時間平均 $\bar{s}$ (s), $n = 8$	$n' = \log_2 \bar{s}$	$n$	$2^n \times 1.00125$
1	1.00	0.0000	0	1.00125
2	2.00	1.0000	1	2.0025
4	4.00	2.0000	2	4.005
6	6.36	2.6690	2+2/3	6.35754
8	8.01	3.0018	3	8.01
10	10.09	3.3349	3+1/3	10.09196
13	12.71	3.6679	3+2/3	12.71508
15	16.02	4.0018	4	16.02
20	20.18	4.3349	4+1/3	20.18393
30	32.04	5.0018	5	32.04

#### 4.1.2 バンドパスフィルタの評価

3.1.2 項で測定した分光透過特性より、Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用と Sr(460.7 nm)用の半値幅 6 nm の BPF は、どちらも入射角 0~11 度の範囲でターゲット波長の透過率が 95%を超えていることから、実験に支障がない性能であることが確認できた。今回の観測に用いた 6 nm 幅の BPF と C-REX-1 の観測に用いた 12 nm 幅の BPF の分光透過特性(図 4.1)と観測画像(図 2.2、図 3.7 右図)を比較すると、波長が近い Ba<sup>+</sup>(455.4 nm)が発光している条件下で目的の Sr(460.7 nm)の発光を良く分離取得できていることがわかる。これらから、従来の Ba<sup>+</sup>(455.4 nm)および Ba(554.3 nm)の発光をターゲットとした観測よりも、ターゲット発光を Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)および Sr(460.7 nm)とし、これらを分離する 6 nm 幅の BPF を用いた今回の観測は Ba/Sr の組み合わせを用いたイオンと中性大気の流れの同時観測において有効だといえる。

一方、BPF を取り付けた状態で撮影した画像において、フォーカスが外れた青色の像と同時にフォーカスが合っているとみられる赤色の像が写っている例が見つかっている(図 4.2)。図 2.7 にも示すように、今回使用しているレンズは波長ごとにフォーカスが合う位置が異なる。図 4.2 にみられる赤色のフォーカスが合った像をイメージセンサの R 画素が BPF を通過した 460.7 nm 付近の光に反応したものと仮定した場合、青色の像同様フォーカスが外れて写るはずである。このことから今回開発した BPF、少なくとも Sr(460.7 nm)用 BPF については、3.1.2 項で測定した波長範囲外の光の一部を透過している可能性がある。発光雲観測に大きな支障はないものの、分光透過特性を精査するにはより広い波長域での分光透過特性の測定データが必要だと考える。

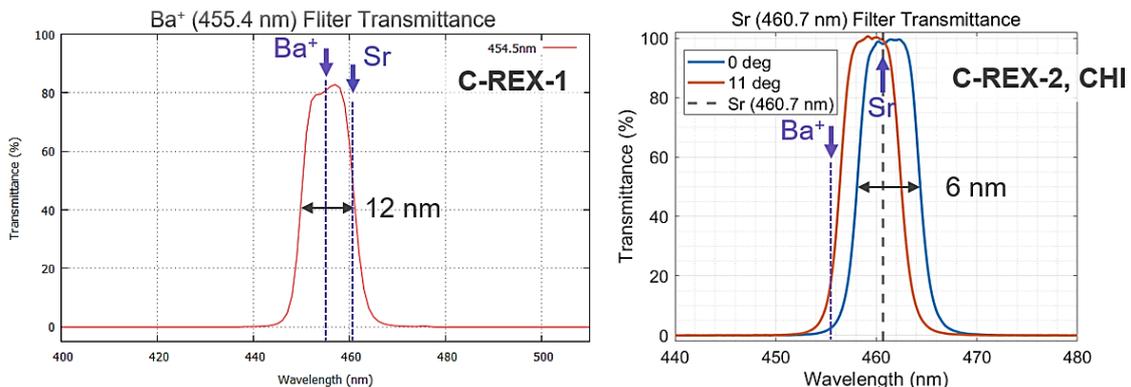


図 4.1 BPF の分光透過特性の比較。左) C-REX-1 の観測に使用された 12 nm 幅 Ba<sup>+</sup>(455.4 nm)用 BPF[18]。Sr(460.7 nm)の発光における透過率が Ba<sup>+</sup>に対して 60%程度あることがわかる。右) 新たに開発した 6 nm 幅 Sr(460.7 nm)用 BPF。Ba<sup>+</sup>の透過率を入射角 0 度では 5%未満、入射角 11 度でも 20%以下に抑えられている。

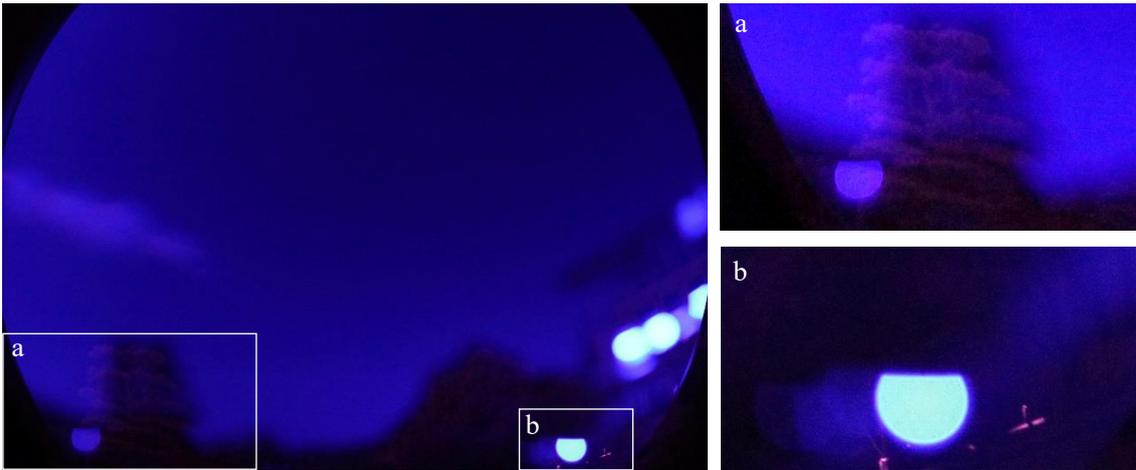


図 4.2 左) Sr(460.7 nm)用 BPF を取り付けられた状態でのフォーカス合わせのために撮影した画像。青色の像のフォーカスが外れているのに対して、赤色の像はフォーカスが合っているように見える。右 a) 左図白枠 a 部を拡大し明度を上げた画像。赤色の像は木の詳細な輪郭が確認できる。右 b) 左図白枠 b 部の拡大。青色の像では街灯らしき明かりのピントが外れているが、赤色の像では街灯の輪郭らしきものが確認できる。

#### 4.1.3 絶対感度特性の評価

3.1.1 項の実露光時間の測定値を基にした 3.1.3 項での実露光時間-輝度値特性のプロットにより輝度値が露光時間に対して比例関係にあることから、RAW 形式で記録される輝度値はイメージセンサの受光量を純粋に積分した値であると考えられる。これにより、露光時間が異なる画像において輝度を比較する場合、実露光時間の比に基づいた比較が可能となる。

感度特性測定実験において、カメラの向きに関わらず撮影した画像の下部が減光する現象については、カメラのミラーボックスの構造によるものと推測される。図 4.3 に示すようにミラーボックス下部にスロープ状の光路のクリアランスが取られている一方、上部は露光中に上がっているミラーが下側にせり出しているためスロープ状にはなっていない。これがイメージセンサ上端部に入射する光を一部遮り(図 4.3 右図)、いわゆるケラレが発生しているものと考えられる。画像上の減光と前述の構造との位置関係が上下逆となっているのは、レンズが結ぶ像が倒立しているためである。

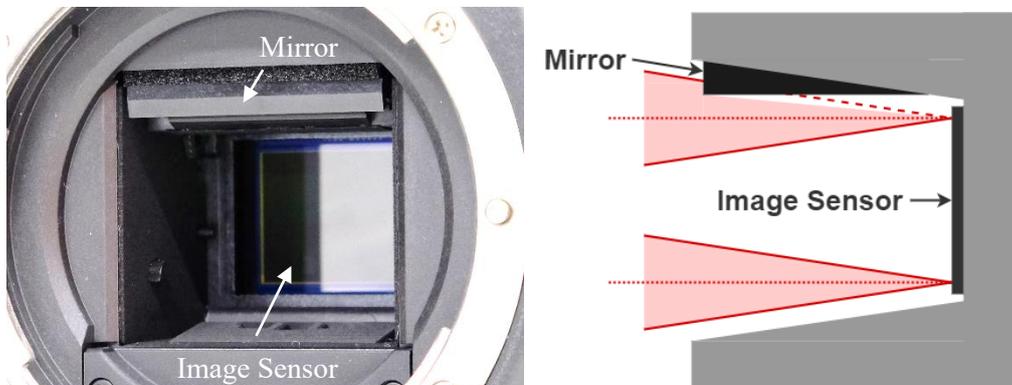


図 4.3 カメラのミラーボックス部(左)と、ミラーボックスを横から見た断面の模式図(右)。

## 4.2 地上観測

詳細は 4.3.2 節で述べるが、観測ロケット射点と光学観測地点のうちのひとつが極端に近く、発光雲放出がカメラの視野において重なり合って撮影されたほか、発光雲がすぐに視野の外に移動してしまい、一部の放出で今回の解析手法を発光雲の速度推定に適用できない結果となった。これについては、今回 C-REX-2 と CHI の同時打上げを想定しており、主な観測対象を Ba/Sr の放出数が多い C-REX-2 としていた一方、CHI のみが打ち上がる場合を詳細に検討しておらず、発光雲が観測地点の真上を通ることを予期していなかったことが原因として挙げられる。C-REX-1 の結果からある程度発光雲の移動方向は予測できたため、可能性のある各ケースに対して事前に観測条件をある程度検討しておくことが重要だといえる。

## 4.3 イオンドリフトおよび中性大気風速とその測定手法

### 4.3.1 カメラの姿勢とレンズ歪みの推定および画像座標-地平座標変換

図 3.10 より、ほとんどの領域で星の画像上の位置と星の地平座標から逆変換した位置がほぼ一致していることから、カメラの姿勢は高い精度で推定できているとみられる。画像周辺部ではずれが生じていることから、レンズ歪みの周辺部の近似精度が低い可能性、つまり 2.5.2 項の式(1)に示す累乗近似では今回用いたレンズの周辺部の歪みを近似できていない可能性がある。ただし、画像中心から放射方向以外の成分のずれは、星のピックアップ時の誤差など他に要因があることが考えられる。

付録 C に示すように、従来は大変な労力を要した視野の補正についてソフトウェアにより一部を自動化した今回のプロセスにより、多くの異なる撮影条件(カメラの姿勢、観測地、時刻)に対してほぼ同精度での補正ができた。ただしレンズ歪みの近似について、中心から指数関数的に歪みが大きくなるレンズについては本研究の手法で対応できるものの、複雑な歪みをもつレンズを正確に近似することはできないため、今後異なるレンズを用いて観測を行う場合にはこれが課題となる。また本研究ではレンズの光軸と画像中心が一致している前提としており、これにずれがある場合は想定していない。

### 4.3.2 三角測量による Ba/Sr 放出および発光雲の 3 次元位置推定

推定した放出位置について、3.3.3 項でも述べたとおり時間分解能が不十分なため観測画像からの正確な放出時刻の計測には至っていないが、表 3.2 に示す撮影時刻および露光時間の関係から、Ba/Sr 放出はタイマ設定時刻においてほぼノミナル通りに行われたと思われる。また、CHI の軌道データは観測ロケット本体のものであり、Ba/Sr キャニスターを搭載するペイロード部は本体よりわずかに前方を飛行しているために軌道データと単純に比較はできないが、表 3.2、図 3.13、図 3.16 における Ba/Sr の推定放出位置は約 $\pm 4$  km 程度の空間精度で得られたと考えられる。誤差が大きい Ion #1, #8 については、前者は表に示すように放出の瞬間は露光していなかったためにある程度拡散してから撮影された画像から放

出位置を推定しなければいけなかったため、後者は遠方ほど発光雲の地平座標誤差が大きくなることによるものであると考えられる。

3次元位置推定の全体的な傾向として、CHIが打ち上げられた SvalRak 射場と Ny-Ålesund の観測地点が数百 m 程度しか離れていないためにロケットの軌道方向と視線方向が概ね一致するような角度での観測となり、Ny-Ålesund における観測画像は複数の放出が一部重なり合い、さらに 4.2 節で触れたようにより遠方で Ba/Sr が放出される C-REX-2 の打上げを想定した視野設定をしていたため、前半に放出された Ba<sup>+</sup>発光雲(Ion)がすぐに視野を外れ、2地点観測による速度測定が成立する区間が短いかまったくないという結果となった。さらに、3.2.2 項および図 3.7 に示すように Ny-Ålesund では縦に伸長する Ba<sup>+</sup>発光雲を下から見る形となり、Longyearbyen と Ny-Ålesund の観測画像に共通する特徴点を見出すことが困難だったため、特に Ny-Ålesund から遠ざかる方向の誤差が大きくなっていると考えられる。その結果が Ion #4~#6 については高度方向のばらつきの大きさにつながっていると考えられる。

発光雲の放出位置によって Ion(Ba<sup>+</sup>)の移動速度が大きく異なっていることから、CHIが電磁氣的に異なる性質をもつ領域をまたいで飛翔し、かつ Ba/Sr をそこに放出した可能性を示唆している。Ion #5 が 2 つに分かれて移動した点についても、電磁氣的性質が異なる領域の境界付近で放出された可能性がある。ただし、3次元位置が推定できた点数の少なさや前述の Ny-Ålesund から遠ざかる方向の誤差が大きい可能性から、表 3.3 に示される特に垂直速度の値を基に Ion #5a, #5b の速度差を定量的に考察することは今回の結果からは難しいと考える。

Sr 発光雲(Neutral)のうち、Neutral #2~#7 の放出の拡散が速く、重なり合いにより特徴点が見いだせないことについては、Larsen 教授より CHI のペイロード部が 1 回目の Ba/Sr 放出の直後からタンブリング運動を起こし、それによりペイロード部の上部および底部(図 4.4)に搭載された Ba/Sr キャニスターからの放出の拡散を早めたこと、および高高度の大気密度の低さの 2 つの要因によるものである可能性の指摘を受けた(Larsen, 2021; 私信)。また 3次元位置の推定を行った Neutral #1, #8 においては、高度 400 km 以上で中性大気密度上昇を引き起こす上昇流を示唆する結果は得られていない。一方、イオンについては Ion #3 の 1 つのみかつ約 1 分間のみのトレース結果ではあるが、唯一上昇流を示唆する約 323 m/s の継続的な上昇を示す結果が得られた。これは、これまでの極域における観測ロケットによる Ba 放出実験ではみられない結果である。ただし、短い区間による測定結果であるため、観測ロケットの慣性運動の影響が残っている可能性は大きい。

今回の 3次元位置の推定手法は単純なものであり、あくまでこの結果は初期解析結果に過ぎない。今後この結果を精査、具体的には Ion #1, #2 や Neutral #2~#7 においてイオンや中性大気の上昇が見られないかを検証するため、航空機による同時観測画像を取り入れた解析、CHI の軌道データと Ba/Sr 放出位置から観測画像と一致するような各発光雲の移動速度を仮定したシミュレーションによりイオンドリフトや中性大気風速を見積もるといった手

法や、本研究で得た絶対感度特性を用いて Sr 発光雲の拡散を解析する等の手法でさらに詳細な解析を行う必要がある。

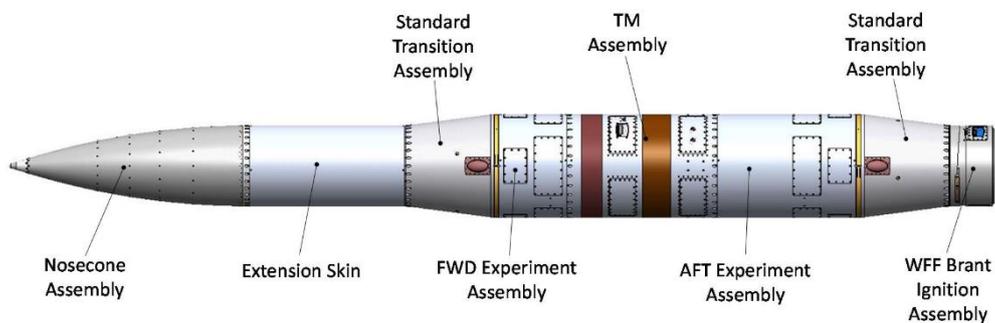


図 4.4 CHI のペイロード部のモデル図(Clemson 大学 Larsen 教授 提供)。

FWD/AFT Experiment Assembly に Ba/Sr キャニスターが搭載されていた。

## 第5章 結論

本研究では、地球の極域上空にあるカस्प領域における熱圏大気密度上昇のメカニズム解明のためノルウェーで実施された一連の国際ロケット地上同時観測キャンペーンに参画した。前回の C-REX-1 ロケット実験の観測結果をふまえ一般向けカメラを用いた光学観測システムを構築し、一般向けカメラを科学観測に用いることを前提とした光学的特性の測定、ロケット実験 CHI による Ba<sup>+</sup>/Sr 共鳴散乱発光雲の地上観測、3次元風速解析技術の確立、および観測により得られた画像からイオンドリフト速度および中性大気風速の解析をそれぞれ行った。

C-REX-1 の観測結果から今回は、Ba<sup>+</sup>/Sr の発光を分離しイオンドリフトと中性大気風速の分離観測を行うため、ターゲットの発光を Ba<sup>+</sup>(中心波長 614.2 nm)および Sr(同 460.7 nm)とした 6 nm 幅のバンドパスフィルタを開発した。このフィルタの分光透過特性の測定結果およびフィルタを用いた Ba/Sr 放出実験の観測から同フィルタが Ba<sup>+</sup>および Sr を分離できていることが確認でき、イオンと中性大気の同時観測における 6 nm 幅のバンドパスフィルタの有効性が示された。一方、露光時間の測定においてカメラの設定表示露光時間と実際の露光時間が異なること、また露光時間の測定結果を基に一般向けカメラの絶対感度特性の測定結果を解析した結果、RAW 形式で保存された画像について実際の露光時間に対して線形の感度特性が得られることがわかった。

次に、イオンドリフト速度および中性大気風速の測定・解析について述べる。発光雲の三角測量にあたって、カメラ視野、具体的にはカメラの姿勢とレンズ歪みを、観測画像の背景に写った多数の星を用いて高精度推定する手法および専用ソフトウェアを本研究により開発した。これにより、多くの異なる観測条件に対してほぼ同精度で視野の補正を行うことができた。また発光雲の三角測量では、概ね±4 km 以内の精度で放出位置の空間位置を決定することに成功し、その移動成分の検出によるイオンドリフト速度及び中性大気風速の測定の結果、高度 324 km に放出された Ion #3 と名付けた 1 点のみかつ約 1 分間のみのトレースではあるが、約 323 m/s のイオン上昇流を示唆する測定結果が得られた。これはこれまでの北極域における Ba 放出実験ではみられない結果である。またイオンと中性大気の同時観測からイオンは概ね東北東方向に 171~1210 m/s でドリフトし、中性大気風速は概ね西~北西方向に 93~167 m/s であったことがわかった。一方、上空放出の Sr による中性大気トレーサが速く拡散してしまったため熱圏大気密度上昇を引き起こす中性大気上昇流は確認できなかった。ただしこれは初期解析結果であり、今後航空機による観測画像を取り入れた解析、シミュレーションを併せた解析手法や絶対感度特性を用いた発光雲の拡散解析などにより、今回の手法では解析に用いることができなかった発光雲を解析に取り入れ、結果を精査する必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員でありいつもの確なご指導、ご鞭撻をくださいました高知工科大学 システム工学群 山本真行 教授に心から感謝申し上げます。また、副査を担当してくださいました高知工科大学 システム工学群 小林弘和 准教授と 田上周路 准教授、日本チームの観測を主導してくださいました北海道情報大学 情報メディア学部 柿並義宏 准教授、C-REX-2 の PI である米国 Alaska 大学 Mark Conde 教授、CHI の PI であり CHI の軌道データなどの提供や貴重な意見をくださいました米国 Clemson 大学 Miguel F. Larsen 名誉教授、Ny-Ålesund での観測委託を引き受けてくださいました米国 Clemson 大学 Michael Denz 氏、宿泊施設および観測拠点を提供してくださいました国立極地研究所、Svalbard 大学、Kings Bay 社、観測協力をしてくださいました国立極地研究所ニーオルスン基地スタッフ 松下隼士 氏(当時)、米国 Alaska 大学 Don Hampton 博士、北海道情報大学 経営情報学部 佐藤隆雄 講師、嘉賀雄一 氏(当時)、嘉賀多賀子 氏(当時)、国立極地研究所光学校正室を提供してくださいました、国立極地研究所ならびに国立極地研究所 研究教育系宙空圏研究グループ 江尻省 助教、そして研究の協力をしてくださいました、山本研究室の同期、後輩諸氏に心から感謝を申し上げます。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 理科年表オフィシャルサイト／気象部：超高層大気,  
[https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo\\_006.html](https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo_006.html), 2021 年 1 月参照.
- [2] JAXA, 「あすか」の落下について | 日本の宇宙開発の歴史 | ISAS,  
[https://www.isas.jaxa.jp/j/japan\\_s\\_history/chapter06/02/06.shtml](https://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter06/02/06.shtml), 2021 年 1 月参照.
- [3] Celestrak, Iridium 33/Cosmos 2251 Collision, <http://celestrak.com/events/collision/>,  
2021 年 1 月参照.
- [4] 小原隆博, 5. 磁気圏プラズマ, *プラズマ核融合学会誌*, **Vol. 82**, No. 11, pp. 756-761, 2006.
- [5] Lühr, H., M. Rother, W. Köhler, P. Ritter, L. Grunwaldt, Thermospheric up-welling in the cusp region: Evidence from CHAMP observations, *Geophys. Res. Lett.*, **Vol. 31**, L06805, 2004.
- [6] Schlegel, K., Lühr, H., St.-Maurice, J.-P., Crowley, G., Hackert, C., Thermospheric density structures over the polar regions observed with CHAMP, *Ann. Geophys.*, **Vol. 23**, pp. 1659-1672, 2005.
- [7] Deng, Y., T.J. Fuller-Rowell, A.J. Ridley, D. Knipp, R.E. Lopez, Theoretical study: Influence of different energy sources on the cusp neutral density enhancement, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **Vol. 118**, pp. 2340-2349, 2013.
- [8] Brinkman, D.G., R.L. Walterscheid, J.H. Clemmons, J.H. Hecht, High-resolution modeling of the cusp density anomaly: Response to particle and Joule heating under typical conditions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **Vol. 121**, pp. 2645-2661, 2016.
- [9] Hurd, L.D., and M.F. Larsen, Small-scale fluctuations in barium drifts at high latitudes and associated Joule heating effects, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **Vol. 121**, pp. 779–789, 2016.
- [10] 羽生宏人, 荒川聡, 阿部琢美, 吉田裕二, 山本真行, 渡部重十, 山本衛, リチウムガス噴射装置 (LES) の研究開発: ISAS-NASA 国際共同ミッション Daytime Dynamo Experiment 用機器製作, *宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR*, **10**, 011, 2011.
- [11] Habu, H., M.-Y. Yamamoto, S. Watanabe, M. F. Larsen, Rocket-borne Lithium ejection system for neutral wind measurement, *An Introduction to Space Instrumentation*, pp. 53-62, 2013.
- [12] 横山雄生, S-520-23 号ロケット放出 Li による共鳴散乱光の多地点観測と熱圏中性風の高精度解析, 平成 20 年度 高知工科大学大学院 特別研究報告, 2009.
- [13] 谷直道, WIND-2 ロケット実験による熱圏中性風の観測と初期解析, 平成 23 年度 高知工科大学 卒業研究報告, 2012.
- [14] 村上睦彦, 日米共同ロケットによる昼間下部熱圏リチウム共鳴散乱光の観測と絶対発光強度解析, 平成 23 年度 高知工科大学大学院 特別研究報告, 2012.
- [15] 木原大城, 観測ロケットより超高層大気中に放出したリチウム共鳴散乱光の航空機観測と昼間熱圏中性風測定手法の開発, 平成 26 年度 高知工科大学大学院 特別研究報告, 2015.

- [16] Pfaff, R., M. Larsen, T. Abe, H. Habu, J. Clemmons, H. Freudenreich, D. Rowland, T. Bullett, M.-Y. Yamamoto, S. Watanabe, Y. Kakinami, T. Yokoyama, J. Mabie, J. Klenzing, R. Bishop, R. Walterscheid, M. Yamamoto, Y. Yamazaki, N. Murphy, V. Angelopoulos, Daytime dynamo electrodynamic with spiral currents driven by strong winds revealed by vapor trails and sounding rocket probes. *Geophys. Res. Lett.*, **Vol. 47**, 2020.
- [17] Watanabe, T., M.-Y. Yamamoto, Y. Kakinami, M.F. Larsen, M. Conde, T. Sato, Y. Kaga, T. Kaga, Measurement of thermospheric neutral wind and ion drift velocities by using chemical releases of Ba/Sr operated by CHI rocket experiment, *AGU Fall Meeting 2020*, 2020.
- [18] 柿並義宏, 渡部重十, 山本真行, 木原大城, M. Conde, M.F. Larsen, カサブ領域でのバリウム・ストロンチウムを用いた熱圏風・プラズマドリフト計測, *第138回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会*, 2015.
- [19] Norwegian Polar Institute, TopoSvalbard, <https://toposvalbard.npolar.no/>, 2020年11月参照.
- [20] 柿並義宏, 渡邊太郎, 佐藤隆雄, 嘉賀雄一, 嘉賀多賀子, 山本真行, 宇宙花火実験で用いる光学フィルタ・観測システムの開発と検証, *北海道情報大学紀要*, **Vol. 32**, No. 1, pp. 75-84, 2020.
- [21] Ogawa, Y., A. Kadokura, M.K. Ejiri, Optical calibration system of NIPR for aurora and airglow observations, *Polar Science*, **Vol. 26**, 100570, 2020, doi:10.1016/j.polar.2020.100570.
- [22] 渡邊太郎, 北欧 Ba/Sr 放出ロケット実験に向けた人工発光雲座標の精密解析法の基礎開発, 平成30年度 高知工科大学 卒業研究報告, 2019.
- [23] Summer, R., Processing RAW Images in MATLAB, [http://www.rcsummer.net/raw\\_guide/RAWguide.pdf](http://www.rcsummer.net/raw_guide/RAWguide.pdf), 2014.
- [24] British Geological Survey, International Geomagnetic Reference Field (IGRF), 13th Generation Calculator, [http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/models\\_compass/igrf\\_calc.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html), 2021年1月参照.
- [25] MathWorks, MATLAB Documentation, <https://jp.mathworks.com/help/matlab/>, (R2020a, R2020b 参照), 2020年7月参照.
- [26] Jubier, X.M., Solar Eclipse Maestro Help, [http://xjubier.free.fr/en/site\\_pages/solar\\_eclipses/Solar\\_Eclipse\\_Maestro\\_Help/pgs2/btoc6.html](http://xjubier.free.fr/en/site_pages/solar_eclipses/Solar_Eclipse_Maestro_Help/pgs2/btoc6.html), 2021年2月参照.

## 付録 A 観測システムの絶対感度特性プロット

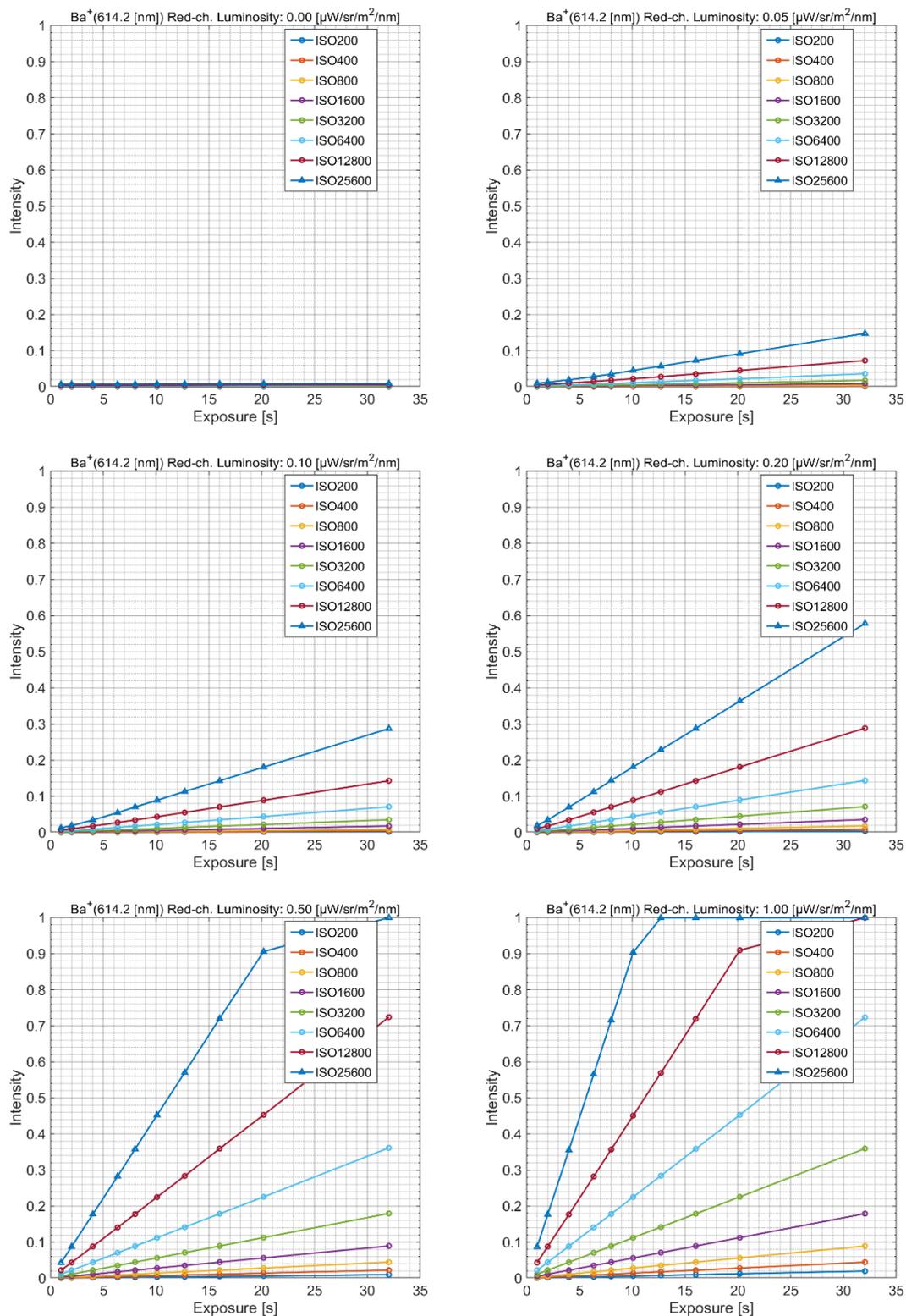


図 A.1 観測システムの実露光時間-輝度値特性 (続く)

(Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用 BPF、分光放射輝度設定: 0 ~ 1.00 μW/sr/m<sup>2</sup>/nm)

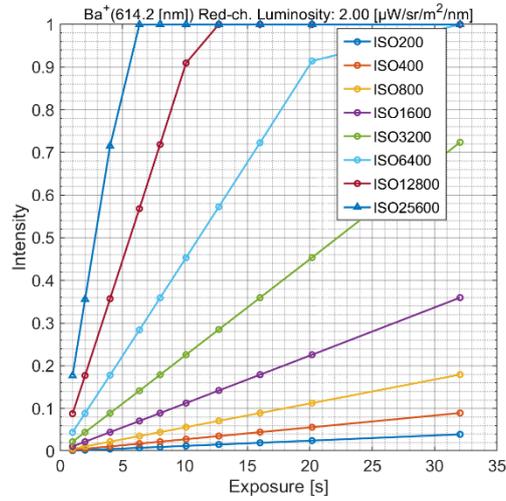


図 A.1 観測システムの実露光時間-輝度値特性 (続き)  
 (Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用 BPF、分光放射輝度設定: 2.00 μW/sr/m<sup>2</sup>/nm)

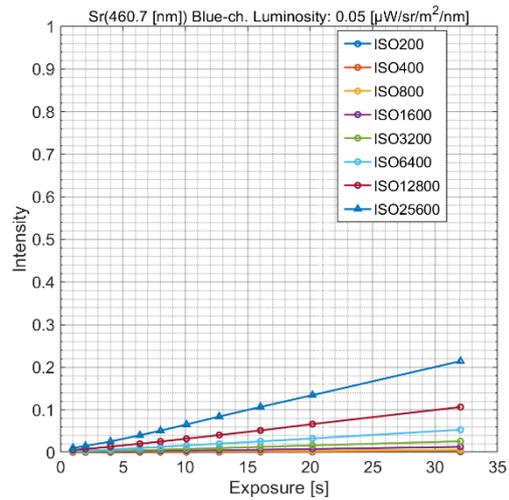
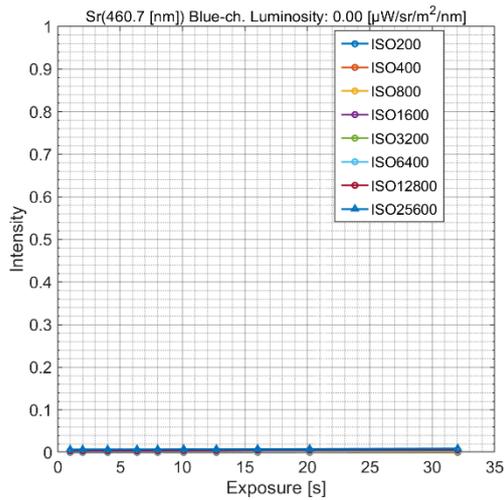


図 A.2 観測システムの実露光時間-輝度値特性 (続く)  
 (Sr(460.7 nm)用 BPF、分光放射輝度設定: 0 ~ 0.05 μW/sr/m<sup>2</sup>/nm)

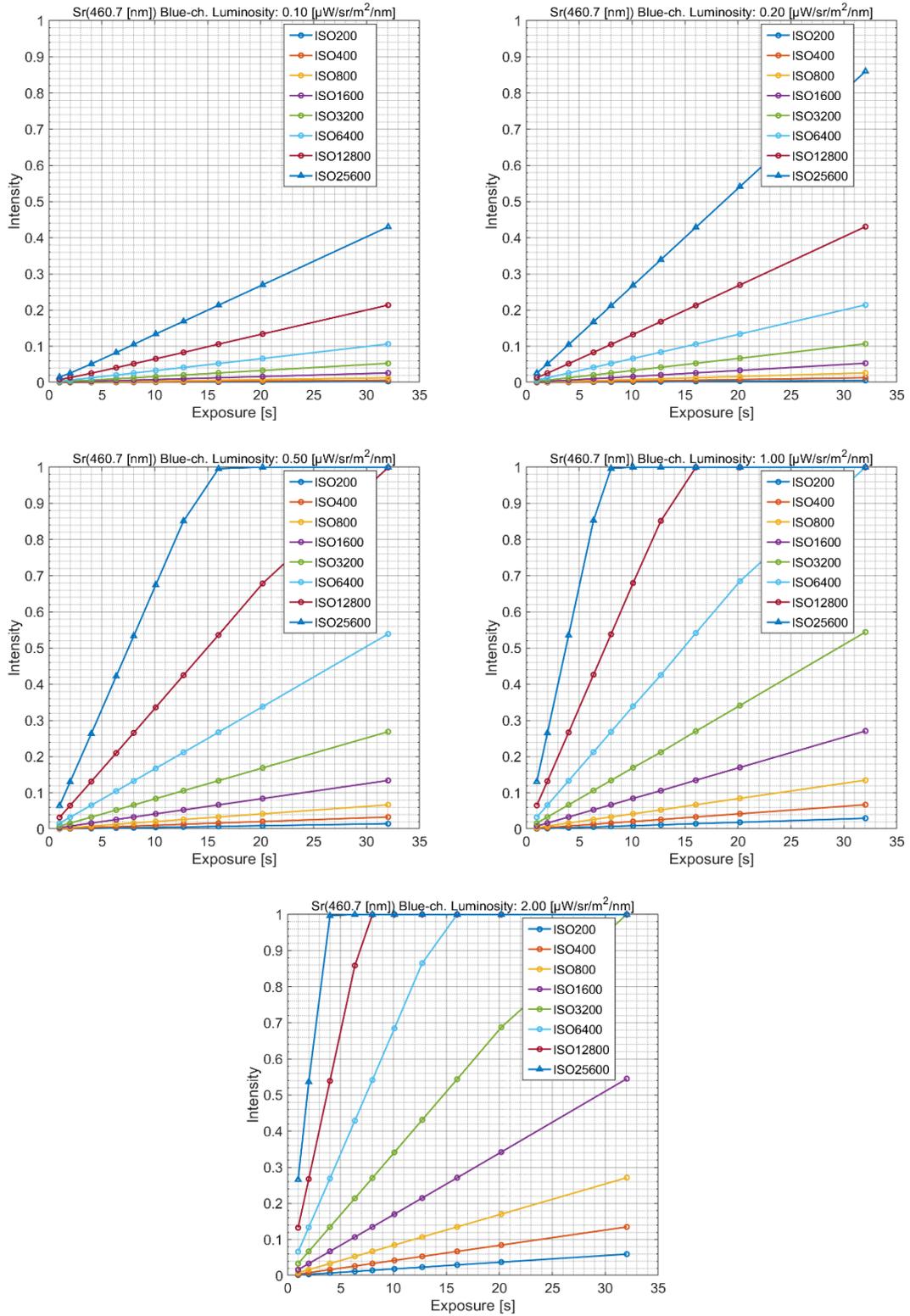


図 A.2 観測システムの実露光時間-輝度値特性 (続き)

(Sr(460.7 nm)用 BPF、分光放射輝度設定: 0.10 ~ 2.00  $\mu\text{W}/\text{sr}/\text{m}^2/\text{nm}$ )

付録 B バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Shot #	0207	0208	0209	0210	0211
UT	09:30:05	09:30:20	09:30:40	09:30:55	09:31:15
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Shot #	0212	0213	0214	0215	0216
UT	09:31:30	09:31:50	09:32:05	09:32:25	09:32:40
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

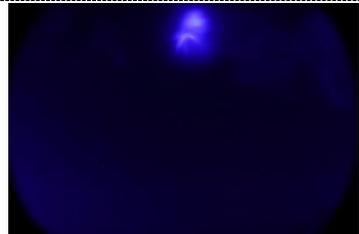
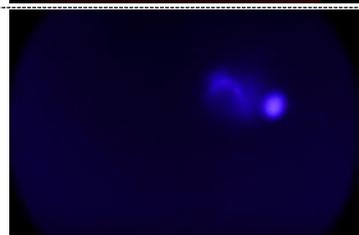
Shot #	0217	0218	0219	0220	0221
UT	09:33:00	09:33:15	09:33:35	09:33:50	09:34:10
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Shot #	0222	0223	0224	0225	0226
UT	09:34:25	09:34:45	09:35:00	09:35:20	09:35:35
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

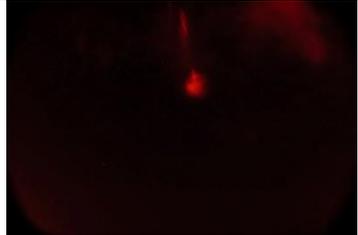
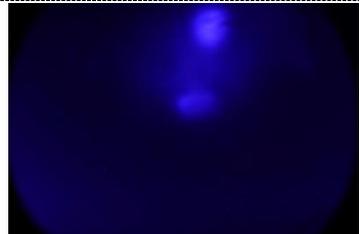
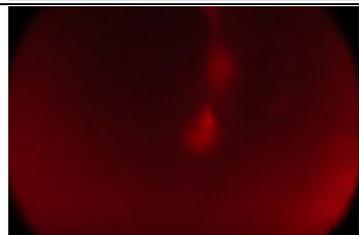
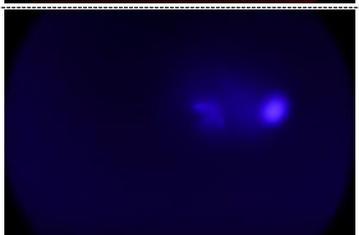
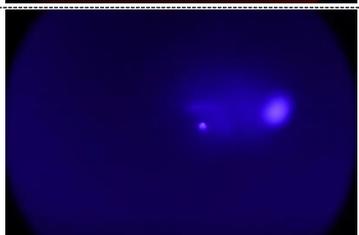
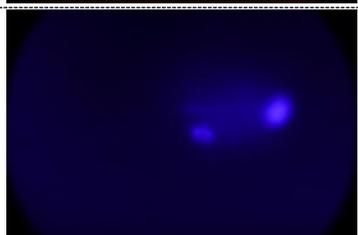
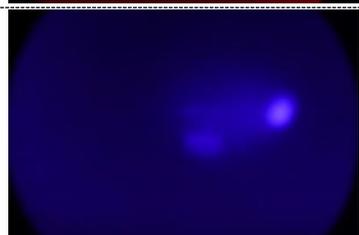
Shot #	0227	0228	0229	0230	0231
UT	09:35:55	09:36:10	09:36:30	09:36:45	09:37:05
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

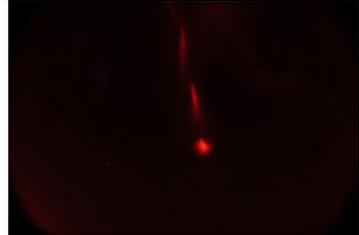
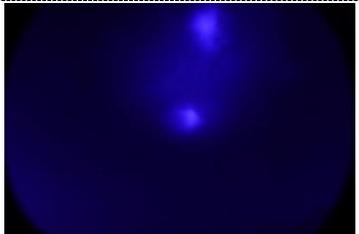
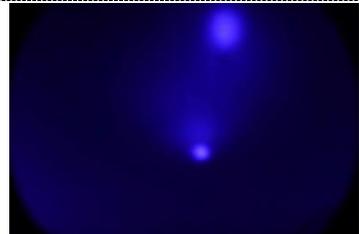
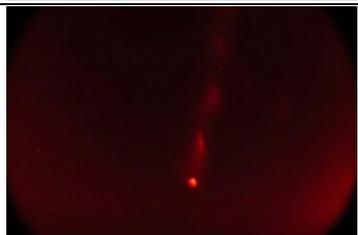
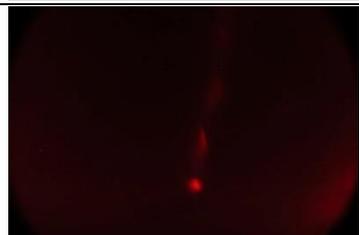
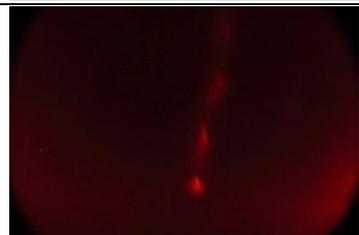
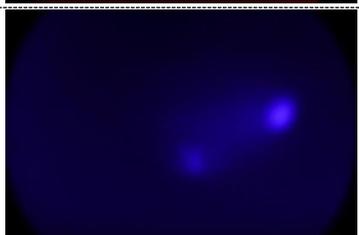
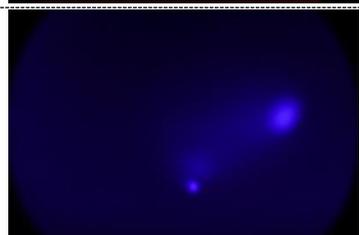
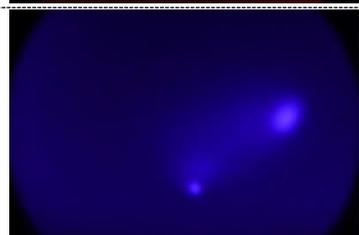
Shot #	0232	0233	0234	0235	0236
UT	09:37:20	09:37:40	09:37:55	09:38:15	09:38:30
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)	N/A				
Longyearbyen Sr(460.7 nm)	N/A				

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

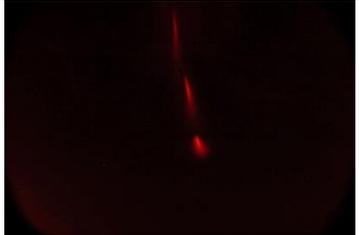
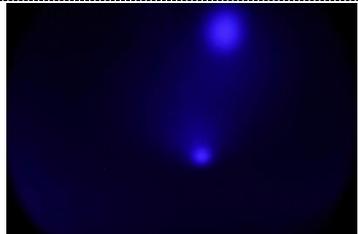
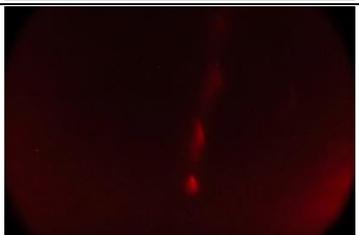
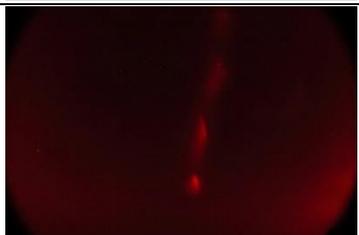
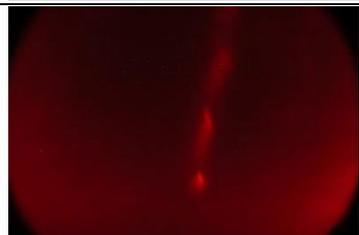
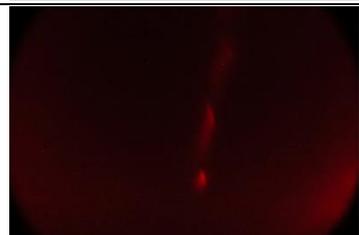
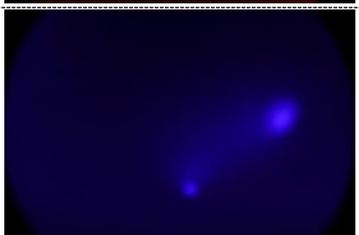
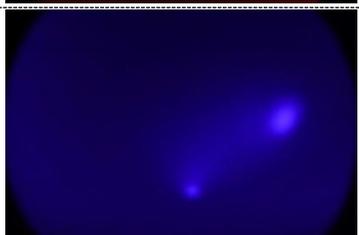
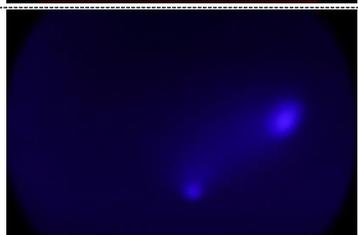
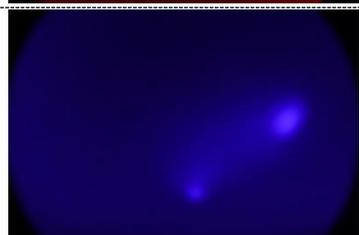
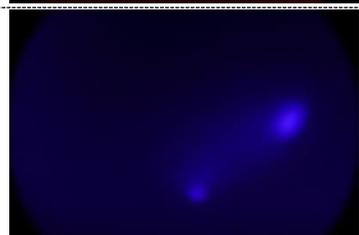
Shot #	0237	0238	0239	0240	0241
UT	09:38:50	09:39:05	09:39:25	09:39:40	09:40:00
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Ny-Ålesund は 0245 からカメラの向きが変わっている。

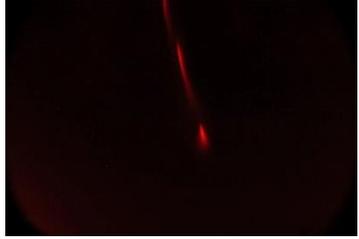
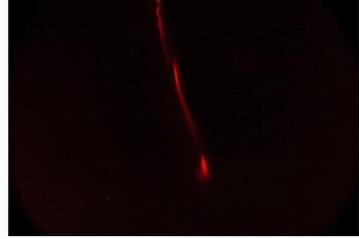
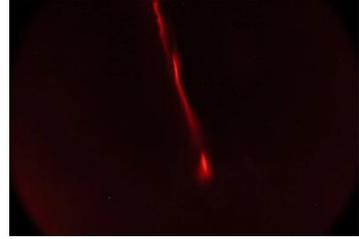
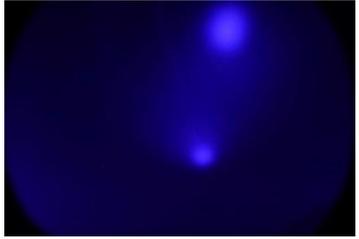
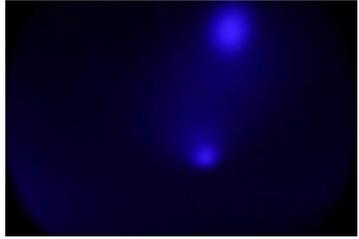
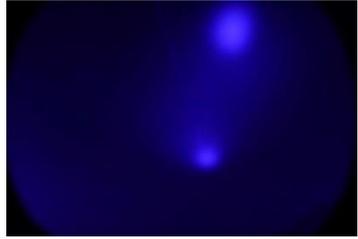
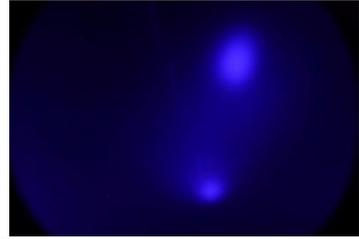
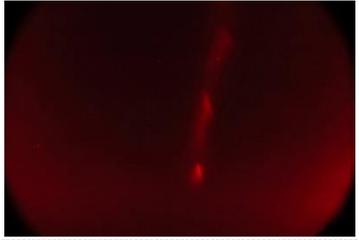
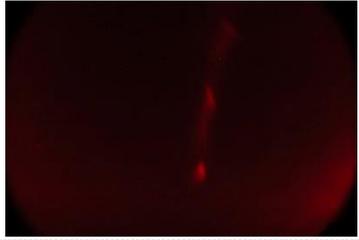
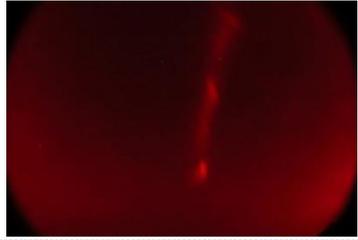
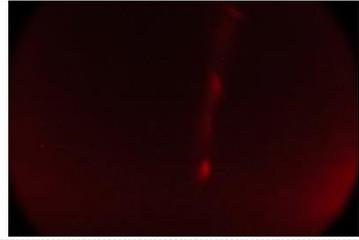
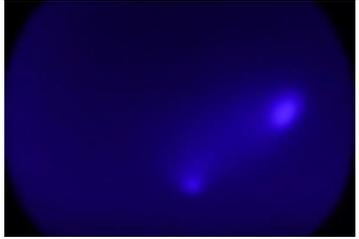
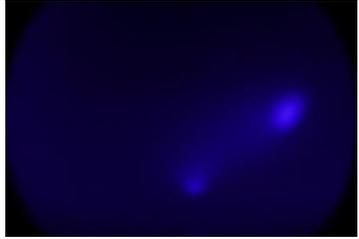
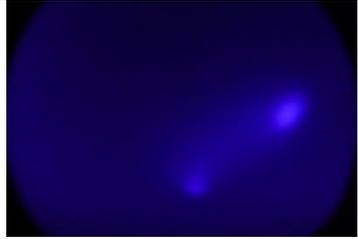
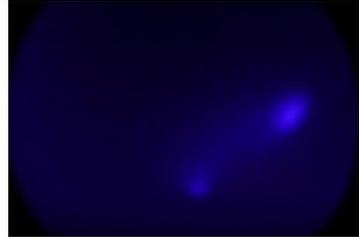
Shot #	0242	0243	0244	0245	0246
UT	09:40:15	09:40:35	09:40:50	09:41:10	09:41:25
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					N/A
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					N/A

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

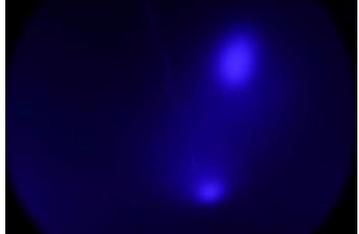
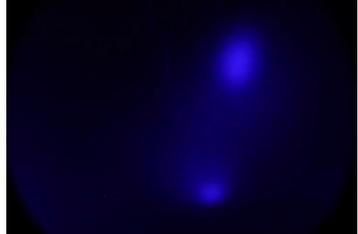
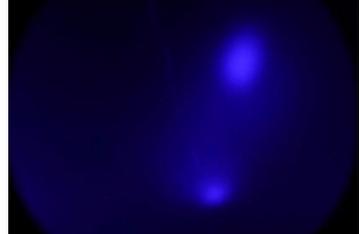
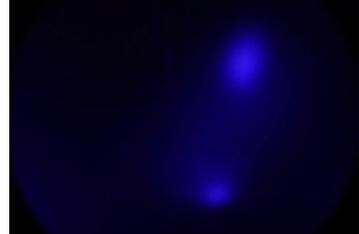
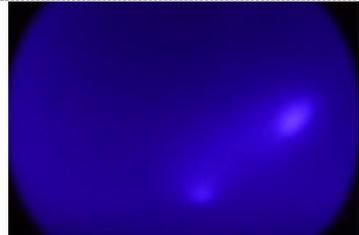
Shot #	0247	0248	0249	0250	0251
UT	09:41:45	09:42:00	09:42:20	09:42:35	09:42:55
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Longyearbyen Sr(460.7 nm)	N/A	N/A	N/A		

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

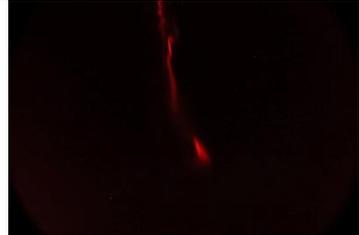
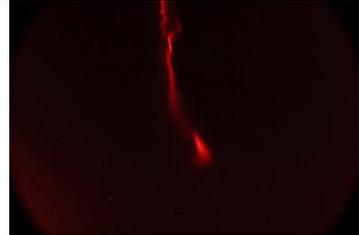
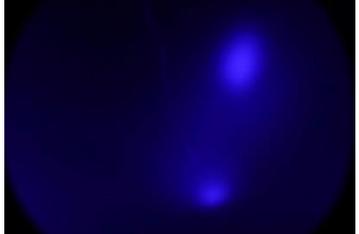
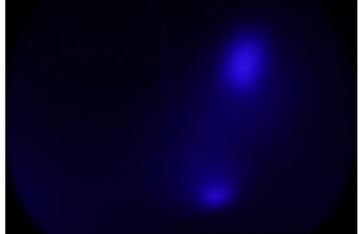
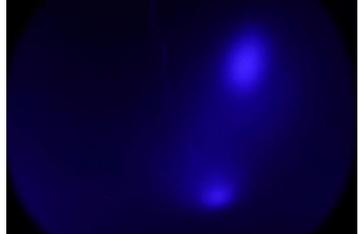
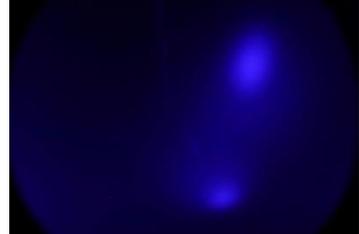
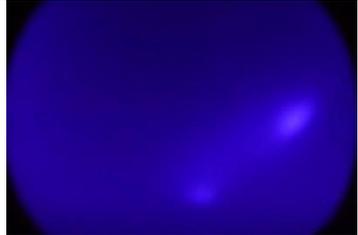
Shot #	0252	0253	0254	0255	0256
UT	09:43:10	09:43:30	09:43:45	09:44:05	09:44:20
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)	N/A	N/A	N/A		
Longyearbyen Sr(460.7 nm)				N/A	N/A

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Ny-Ålesund は 0257 からカメラの向きが変わっている。

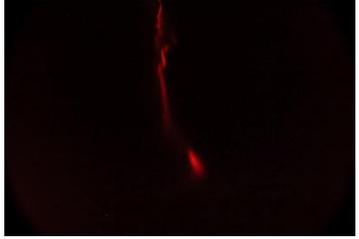
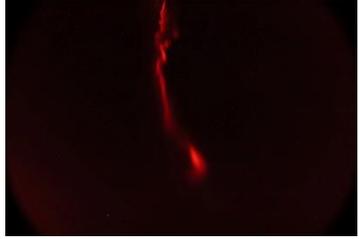
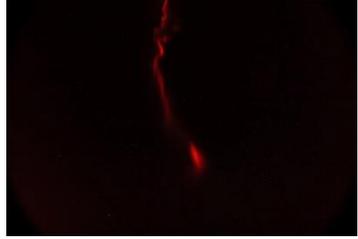
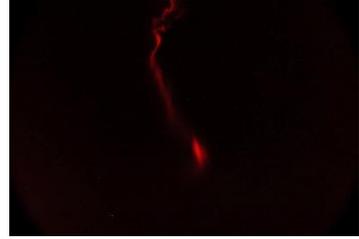
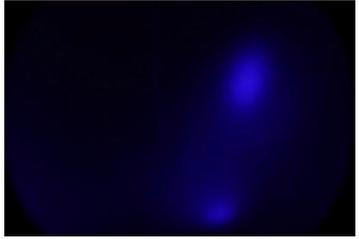
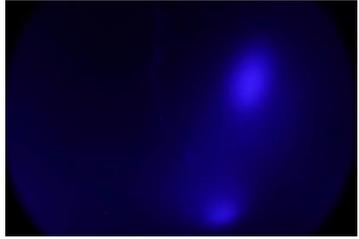
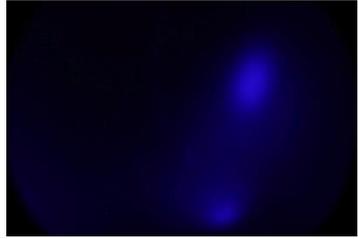
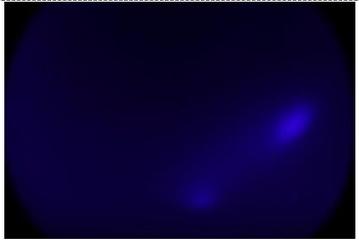
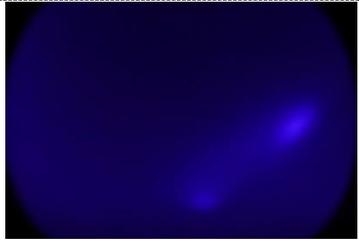
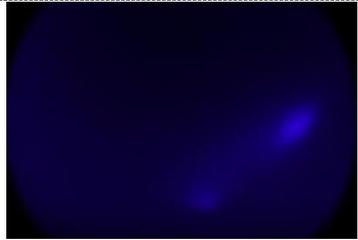
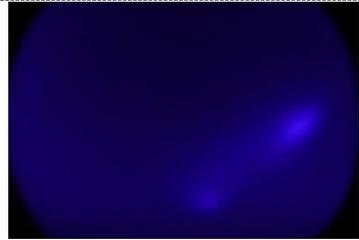
Shot #	0257	0258	0259	0260	0261
UT	09:44:40	09:44:55	09:45:15	09:45:30	09:45:50
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					N/A

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

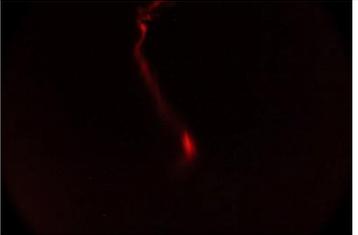
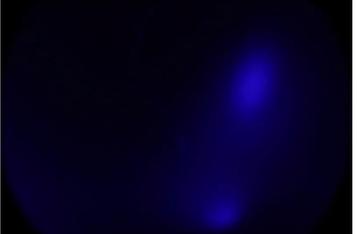
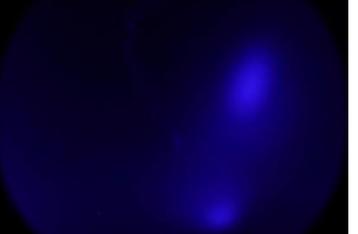
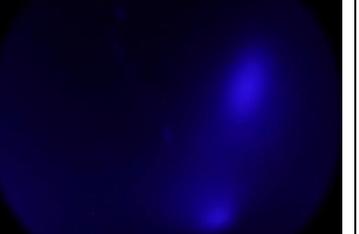
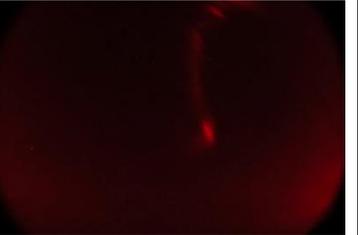
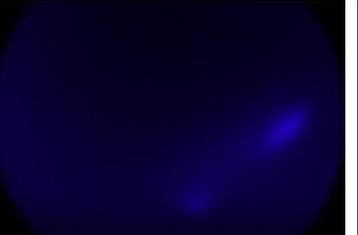
Shot #	0262	0263	0264	0265	0266
UT	09:46:05	09:46:25	09:46:40	09:47:00	09:47:15
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)	N/A				
Longyearbyen Sr(460.7 nm)	N/A				

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Longyearbyen は 0271 からカメラの向きが変わっている。

Shot #	0267	0268	0269	0270	0271
UT	09:47:35	09:47:50	09:48:10	09:48:25	09:48:45
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

Shot #	0272	0273	0274	0275	0276
UT	09:49:00	09:49:20	09:49:35	09:49:55	09:50:10
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

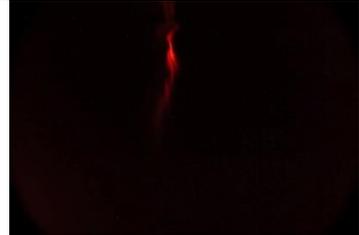
Shot #	0277	0278	0279	0280	0281
UT	09:50:30	09:50:45	09:51:05	09:51:20	09:51:40
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続く)

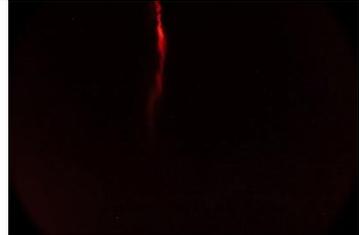
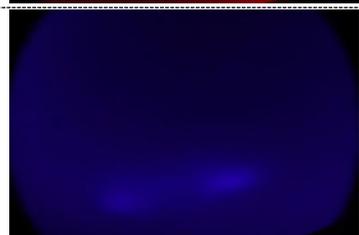
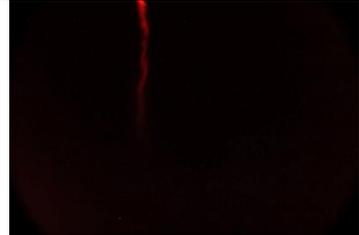
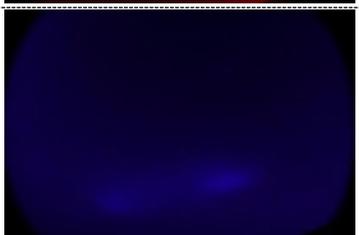
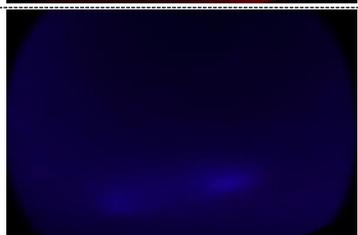
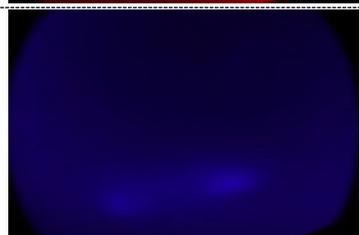
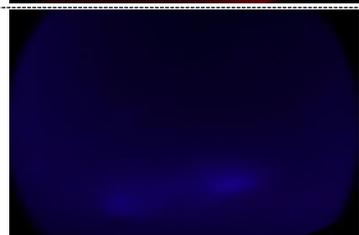
Shot #	0282	0283	0284	0285	0286
UT	09:51:55	09:52:15	09:52:30	09:52:50	09:53:05
Config.	13 s	8 s	13 s	8 s	13 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

表 B.1 バンドパスフィルタを用いたカメラによる CHI の観測画像 (続き)

Shot #	0287	0288	0289	0290	0291
UT	09:53:25	09:53:40	09:54:00	09:54:15	09:54:35
Config.	8 s	13 s	8 s	13 s	8 s
Ny-Ålesund Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Ny-Ålesund Sr(460.7 nm)					
Longyearbyen Ba <sup>+</sup> (614.2 nm)					
Longyearbyen Sr(460.7 nm)					

付録 C 画像座標-地平座標変換テーブル

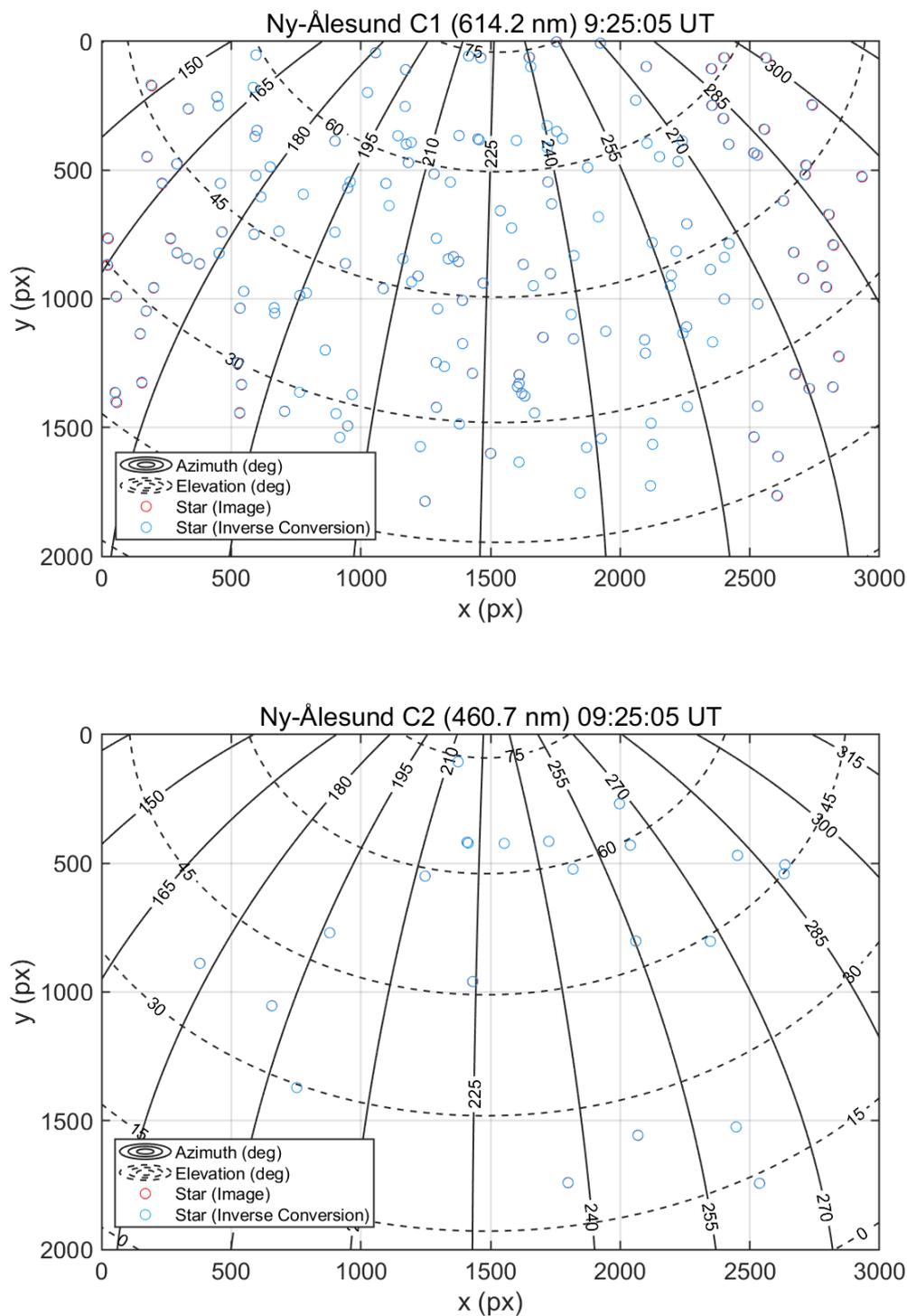


図 C.1 画像座標-地平座標変換テーブル (続く)

上) 未知であった  $\text{Ba}^+$ (614.2 nm)用カメラのレンズ歪みを推定するため、星が多数写った画像を選択し、可能な限り多数の星をカメラ姿勢およびレンズ歪み推定に用いた。

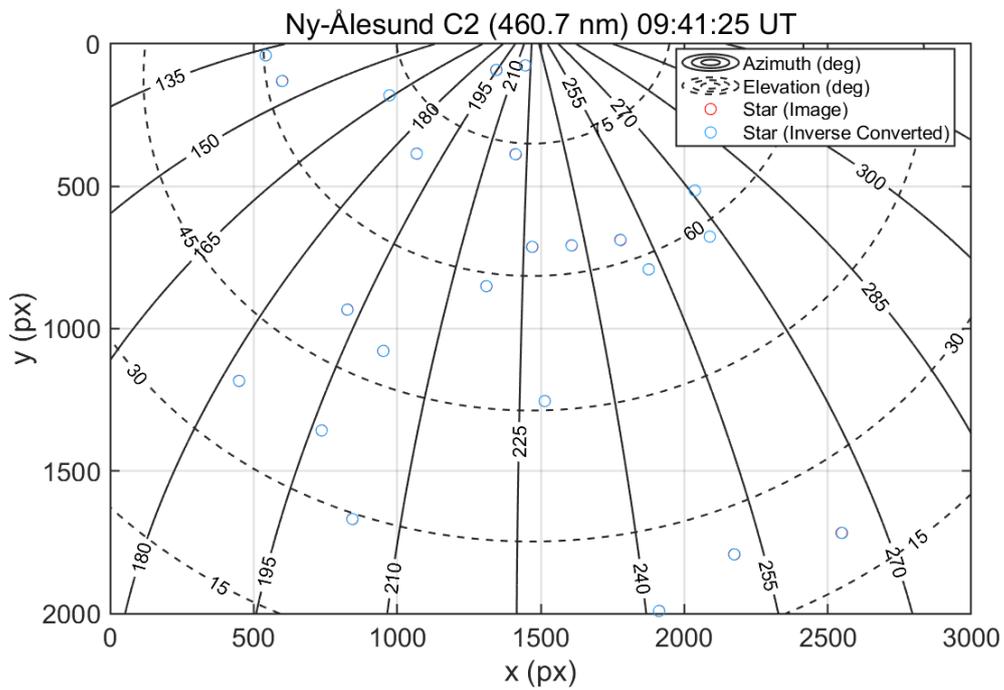
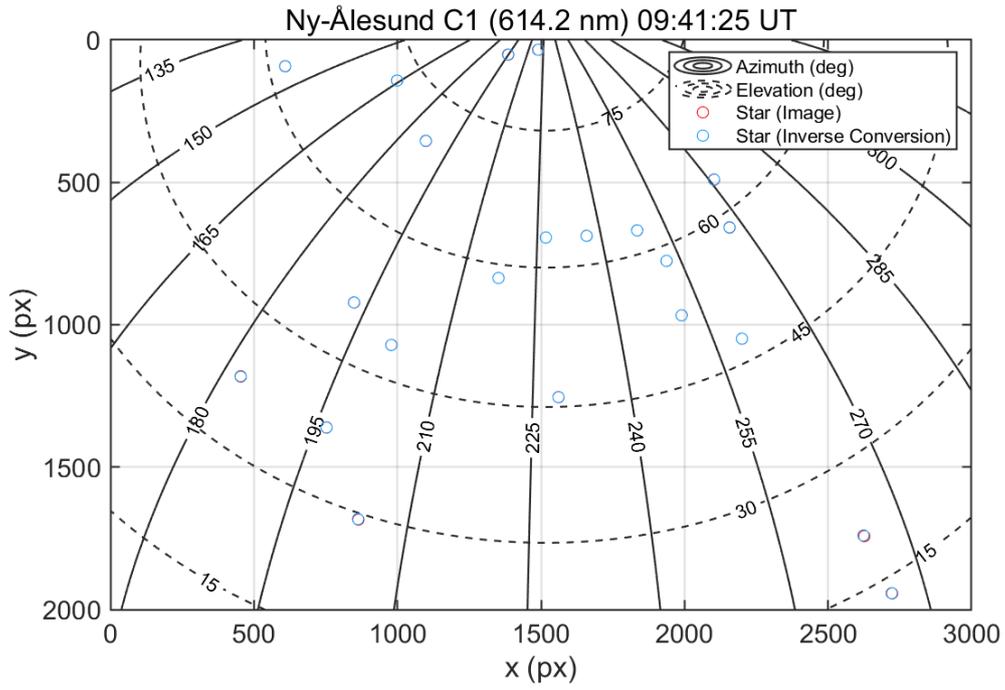


図 C.1 画像座標-地平座標変換テーブル (続き)

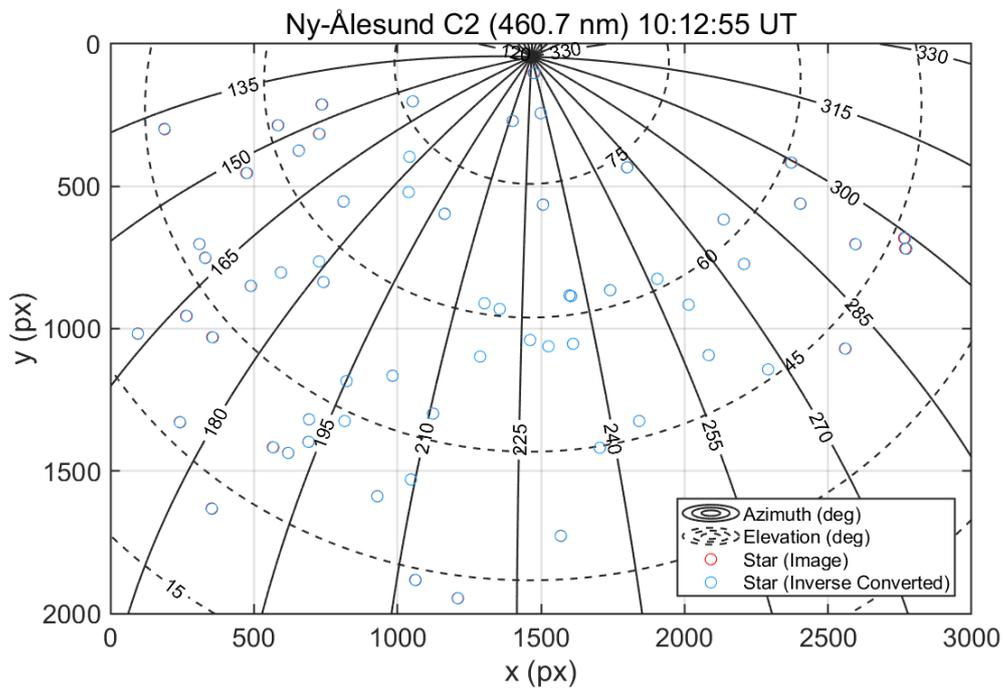
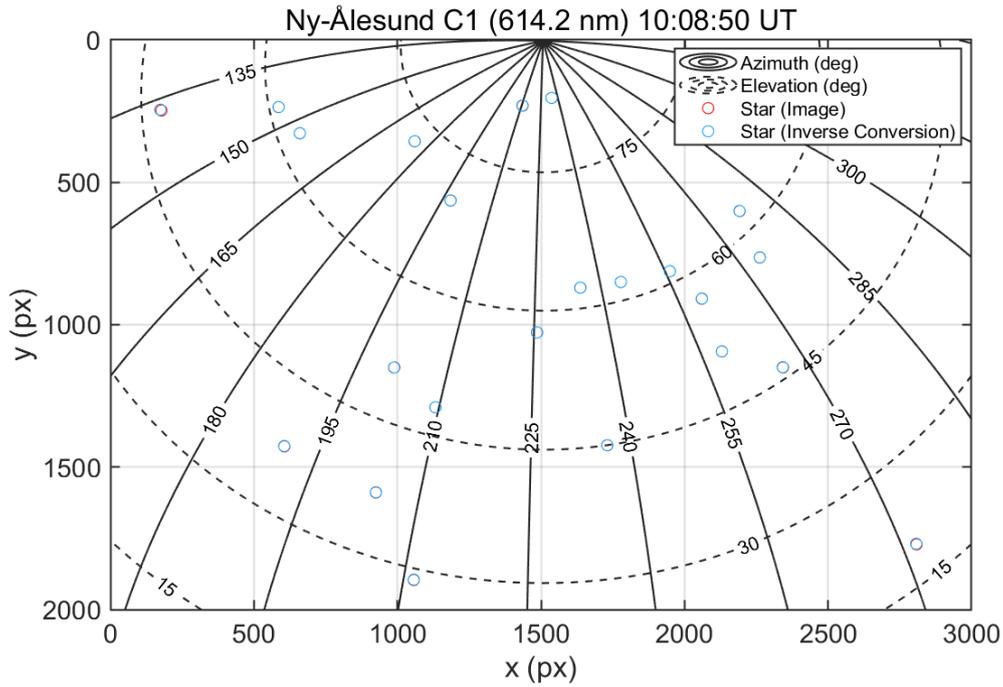


図 C.1 画像座標-地平座標変換テーブル (続く)

下) 未知であった Sr(614.2 nm)用カメラのレンズ歪を推定するため、星が多数写った画像を選択し、可能な限り多数の星をカメラ姿勢およびレンズ歪み推定に用いた。また、カメラ姿勢の初期推定に Ba<sup>+</sup>(614.2 nm)用カメラのレンズ歪みを用いた。

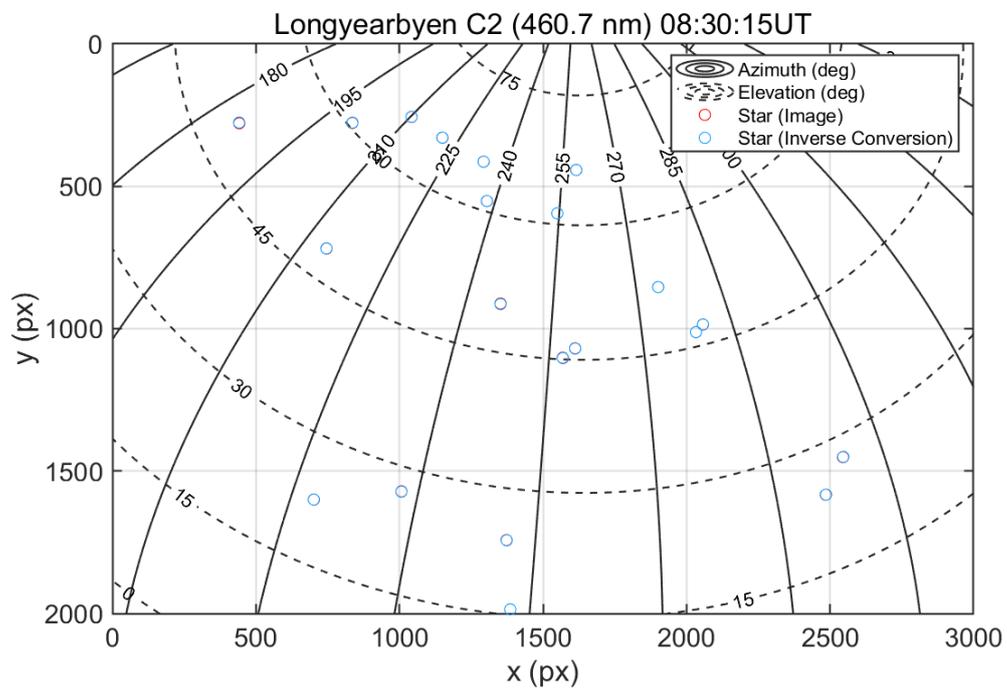
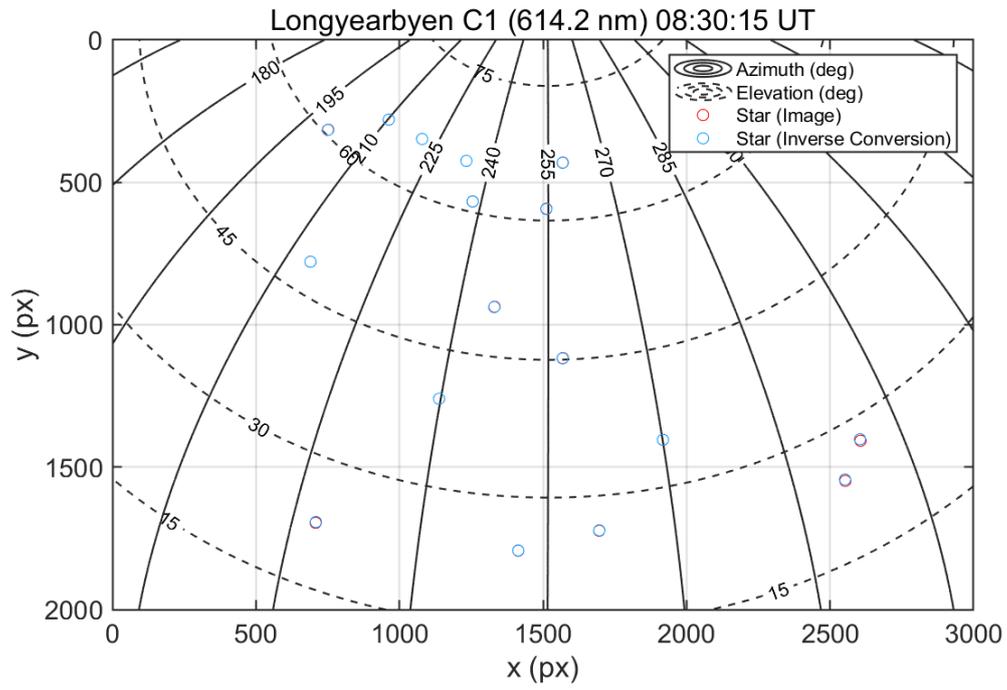


図 C.1 画像座標-地平座標変換テーブル (続く)

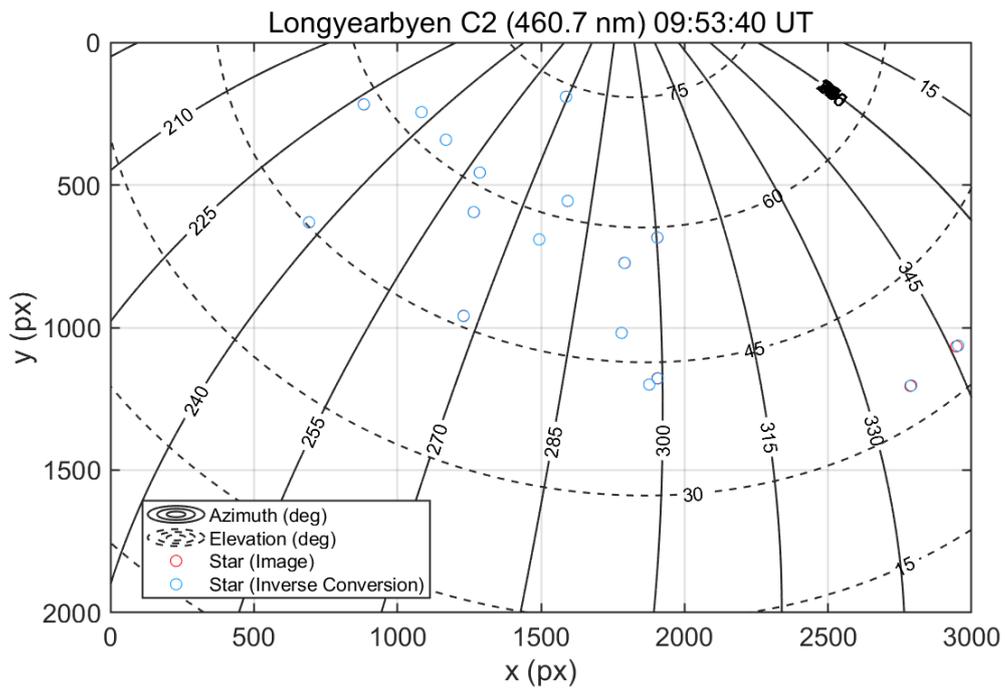
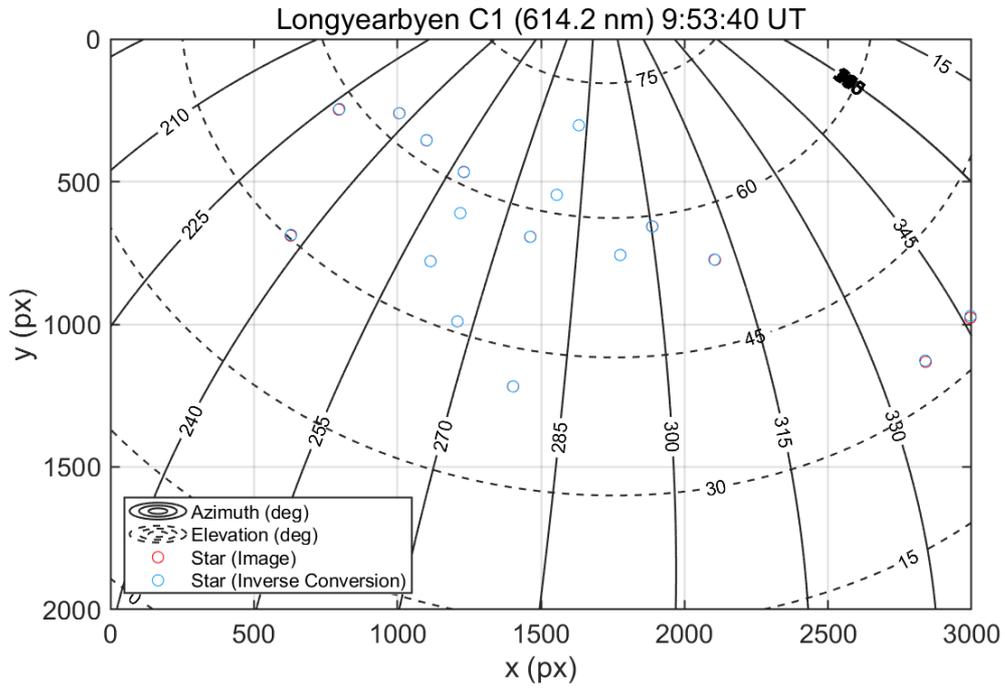


図 C.1 画像座標-地平座標変換テーブル (続き)