

多点単色光オーロラ観測画像の  
トモグラフィ再構成解析に関する研究

1999年2月

浦島 智

# 内容梗概

オーロラは、古来よりその美しさで人々を惹き付けてきた。オーロラに関する研究も古くから行なわれてきているが、現在においても、例えばオーロラ発光の素過程に関する研究やオーロラカーテンの厚さに関する研究、オーロラ粒子のエネルギー分布に関する研究など、多くの種類の研究がなされている。

一方、トモグラフィとは投影から対象の物理量の分布を推定する技術のことである。画像として撮影されるオーロラは、カメラに対する光路に沿った発光強度分布の総和であり、これはトモグラフィにおける投影と考えることができる。

本研究は、複数の観測点から同時に観測されたオーロラ画像を用いて、元のオーロラの3次元的な発光構造を再構成することを目的とし、再構成の計算機シミュレーションと実際の観測画像からの再構成を両輪として、より信頼性に富み、より柔軟性のあるオーロラ解析手法の確立を目指すものである。本研究によって得られるオーロラ発光強度分布は、上記の様々なオーロラ研究に対して貢献するものと考えている。

これまで、オーロラを複数地点から光学的に観測し、その構造を推定する研究は幾つかなされてきているが、観測点数が2点から3点とそれほど多いものではないため、再構成手法に関して強力な制約を必要としたり、再構成を行うオーロラの位置・形状に関して大きな制限があるなどしている。また、実際のオーロラ観測に基づく条件で、複数の再構成手法を比較・検討した研究はない。

これに対して本研究では、ALIS(Auroral Large Imaging System) 観測網を利用した国際共同多点観測を行なうことにより、最大6点というこれまでに比べ多くの観測点による同時観測画像を得て、オーロラ再構成を行なっている。この再構成で用いられている手法は、新しく提案したものも含めた複数の再構成手法の中から、実際の観測をモデルとする計算機シミュレーションによって選択したもので、より弱い制約を課しながら、より信頼性のあるオーロラ再構成結果が得られるものとなっている。

第1章では、本論文の背景や目的を述べると共にこれまでの類似の研究について触れ、最後に論文の構成について述べている。

第2章では、ALIS 観測網とそれを構成するカメラシステムの詳細について述べた後、得られた画像を再構成するにあたり必要となる前処理として、カメラ方向と感度の較正手法について述べている。

第3章では、まずセルモデルによるオーロラ発光構造表現のモデル化を行なった後、空間的な発光分布と画像の各画素のグレイレベルとの関係を、線積分投影とボリューム投影という二つの投影法で定式化している。そして、オーロラ再構成手法として検討を行なう

複数の手法について、その特徴とともに説明している。この中で、再構成に制約を加える方法として、 $p$ -近似と呼ぶオーロラが磁力線に沿うという性質を利用した方法を新たに提案している。また、再構成を行なう際に信頼性のない領域を含めないようにするための、再構成領域の選択を行なう方法を新たに提案している。

第4章では、計算機シミュレーションにより、オーロラトモグラフィにもっとも適した再構成手法の選択と、オーロラの位置や観測点配置の再構成への影響の検討を行なっている。まず、再構成シミュレーションの手順と再構成結果の評価方法を説明した後、2次元及び3次元の分布に対する種々の再構成シミュレーションを行ない、検討した結果、SIRT法に $p$ -近似を加えたものを再構成手法として選択することにした。また、ALISの6点の観測点の中から幾つかの観測点の組合せを選び、再構成シミュレーションを行うことにより、観測点配置の再構成結果への影響を検討している。

第5章では、実際にALIS観測網を利用して得られた観測画像からオーロラ再構成を行なっている。計4回の観測期間中に得られた多点同時観測画像は、オーロラの位置・形状、画像の数や画像を取得した観測点の配置などに様々な違いのあるものである。これらがそれぞれの再構成結果の信頼性に及ぼす影響に関しては、次の章でのシミュレーションによって検討している。幾つかの再構成結果では、多少のアーティファクト(不自然な発光)が出ているが、発光強度最大となる高度や沿磁力線発光強度プロファイルの形状などは、これまでのオーロラの発光に関する知見にいずれも十分に一致するものである。

第6章では、前章の実際の観測画像からの再構成に基づいたオーロラモデルと観測時と同様の観測点配置による再構成の計算機シミュレーションを行なっている。このシミュレーションから、前章における再構成結果に対する信頼性に関して、単層のアーチからなるようなオーロラに対しては、非常に高い信頼性があり、多層からなるような複雑な形状のオーロラに対しても、一部に誤差が大きくなる可能性があるため注意を要する部分があるが、十分な信頼性が得られていることを確かめている。

第7章では、オーロラトモグラフィ観測における将来的な発展について検討を行なっている。観測点数の増加、光学的方法以外の観測手段との同時観測、観測からトモグラフィ結果を得るまでの過程の完全自動化は、いずれも今後の課題であるが、十分に可能であり望ましいものと判断している。

第8章では、本研究で得られた内容をまとめている。

本研究では、オーロラトモグラフィに関して、再構成手法を中心として観測から再構成結果に至るまでの手法の検討を行ない、また実際のオーロラの発光強度分布を提示している。対象とするオーロラ構造や観測点配置にもよるが、シミュレーションにより再構成された発光強度分布は十分な信頼性を持つことを確かめており、オーロラトモグラフィの実用性と可能性を示している。

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	本論文の目的	3
1.3	本論文の構成	5
<b>2</b>	<b>オーロラ観測システムとその較正</b>	<b>7</b>
2.1	前書き	7
2.2	観測機器とその配置	7
2.2.1	ALIS 観測網	7
2.2.2	共同観測における観測機器とその配置	10
2.3	カメラ方向の較正	14
2.3.1	恒星を用いた方向較正手法	14
2.3.2	実際の方向較正例	17
2.4	カメラ感度の較正	18
2.4.1	相対感度較正と周辺減光の補正	20
2.4.2	積分球標準光源を用いた感度較正手法	21
2.4.3	実際の感度較正例	24
2.5	結び	27
<b>3</b>	<b>オーロラ再構成手法</b>	<b>29</b>
3.1	前書き	29
3.2	セルモデル	29
3.3	投影	30
3.3.1	線積分投影	31
3.3.2	ボリューム投影	32
3.4	再構成手法の説明	33
3.4.1	MART 法	34
3.4.2	SIRT 法	34
3.4.3	疑似逆マトリクス	35
3.4.4	フィルタ付き逆投影法	36
3.4.5	p-近似	37

3.5	再構成領域の選択	39
3.6	結び	41
<b>4</b>	<b>計算機シミュレーションによる再構成手法の検討</b>	<b>43</b>
4.1	前書き	43
4.2	シミュレーション手順	43
4.3	再構成結果等の表示方法	46
4.4	2次元でのシミュレーションによる各手法間の比較	48
4.5	p-近似による再構成の改善	54
4.6	ノイズの影響	56
4.7	セルの形状・投影法による影響	59
4.8	MART 法・SIRT 法における緩和係数の影響	61
4.9	3次元でのシミュレーションによる再構成手法の検討	62
4.10	観測点配置による影響	67
4.11	まとめ	71
<b>5</b>	<b>ALIS によるトモグラフィキャンペーン観測画像とその再構成</b>	<b>73</b>
5.1	前書き	73
5.2	第1回の観測と再構成	73
5.2.1	1995年3月26日19時9分30秒のオーロラ	74
5.2.2	1995年3月26日20時26分10秒の2層のオーロラ	76
5.2.3	1995年3月26日23時40分30秒の複雑な形状のオーロラ	79
5.3	第2回の観測と再構成	80
5.3.1	1995年12月21日21時14分50秒の近接した2層のオーロラ	80
5.3.2	1995年12月21日21時31分20秒の複雑な形状のオーロラ	85
5.4	第3回の観測と再構成	90
5.4.1	1997年2月9日18時29分40秒の多層のオーロラ	90
5.4.2	1997年2月9日18時31分30秒の青色(427.8nm)のオーロラ	91
5.4.3	1997年2月9日19時46分0秒の単層のオーロラ	95
5.5	第4回の観測と再構成	98
5.5.1	1998年3月1日20時2分0秒と10秒の2種類の波長のオーロラ	100
5.6	まとめ	103
<b>6</b>	<b>個々の状況に対応したシミュレーションによる検討</b>	<b>107</b>
6.1	前書き	107
6.2	シンプルなアークの場合	107
6.2.1	1997年2月9日19時46分0秒のオーロラをモデルとするシミュレーション	108
6.2.2	1995年3月26日19時9分30秒のオーロラをモデルとするシミュレーション	110

6.3	複数の層のアークの場合	113
6.3.1	1995年3月26日20時26分10秒のオーロラをモデルとするシミュレーション	113
6.3.2	1995年12月21日21時14分50秒のオーロラをモデルとするシミュレーション	116
6.3.3	1997年2月9日18時29分40秒のオーロラをモデルとするシミュレーション	118
6.4	複雑なフォールドを持つアークの場合	122
6.4.1	1995年12月21日21時31分20秒のオーロラをモデルとするシミュレーション	122
6.5	まとめ	124
7	オーラトモグラフィの将来的な展望	127
7.1	新たな観測点とその影響	127
7.2	他の観測システムとの共同観測	129
7.3	自動化への考察	130
7.4	まとめ	132
8	結論	133
	謝辞	137
	参考文献	139
	本研究に関する発表	143



# Chapter 1

## 序論

### 1.1 研究の背景

オーロラは、太陽と地球磁気圏の結合系に起因する壮大な電磁気現象の内、数少ない可視現象である。したがって、オーロラの研究はその生成の物理過程の解明だけでなく、太陽地球電磁気系の研究にも意義をもつものである。

オーロラは極地方の高層大気にオーロラ粒子が衝突し、励起された高層大気が発光する現象である。その波長は発光する粒子の種類によって様々であるが、代表的なオーロラの波長として、酸素原子の 557.7nm(緑色)、630nm(赤色)、窒素分子イオンの 427.8nm(青紫色)などがある。オーロラの高度は波長によって異なるが、例えば 557.7nm の場合は 110km ぐらい、630nm の場合は 200~400km ぐらいとされている。形状に関しても様々な種類があり、観測に基づいて表 1.1 に示すような分類も行なわれている [1]。オーロラが発光は高層大気とオーロラ粒子の衝突によって起こるため、オーロラが発光形状は大気分布とオーロラ粒子のエネルギー分布の両方に関係する。大気分布に関しては既に幾つかの観測に基づいたモデルが存在し、オーロラ粒子のエネルギーを決定する加速機構についても、衛星による観測が行なわれている。しかしながら、オーロラ粒子の加速機構の詳細については今だ不明な部分もあり、オーロラ発光の素過程などに関しても完全には解明されていない事柄も多い。

一方、近年の計算機能力の向上は、これまで不可能とされてきた莫大な量の計算をごく短時間で行なうことを可能にした。1917 年に Radon によって示されたトモグラフィの可能性は、この計算機能力の向上により広く実用化され、医療用 X 線 CT スキャナのように一般的に用いられるようになってきている [2]。トモグラフィとは、投影から対象の物理量の分布を推定する技術のことであり、医療用 X 線 CT スキャナの場合は X 線強度の減衰を投影として、これから X 線吸収係数という物理量の分布を求め、X 線吸収係数の違いによって骨や内臓などを画像化している。トモグラフィの技術は医療分野以外の地震学の分野や海洋学の分野にも応用され、地球物理学の分野でも Raymund らの電離圏トモグラフィ [3] のような例がある。

このような中で、我々はトモグラフィ技術をオーロラに対して適用することを考えた。画

表 1.1: オーロラの種類

Main morphological feature	Secondary morphological feature	Temporal feature	Vortex feature
<b>Auroral arc</b> one dimension is significantly larger than the other	Non-diffuse Diffuse Multiple(2,3,...) Rayed Striated Corona Dark aurora Enhanced Partly clouds Intensity(IBC I-IV)	Active Quiet Pulsating	Spiral (e.g. WTS, omega, torch) Fold Curl
<b>Fragmental auroral structure</b>	Non-diffuse Diffuse Multiple(2,3,...) Rayed Striated Corona Dark aurora Enhanced Partly clouds Intensity(IBC I-IV)	Active Quiet Pulsating	Fold Curl
<b>Diffuse aurora</b> covering a larger region	Dark aurora Partly clouds Intensity(IBC I-IV)	Pulsating	
<b>Unidentified aurora</b>			

像として撮影されるオーロラは、カメラに対する光路に沿った発光強度分布の総和であり、これはトモグラフィにおける投影と考えることができる。そして同一のオーロラに対する複数の方向の画像があれば、これにトモグラフィの手法を適用できるのではないかということである。しかしながら、医療用 X 線 CT スキャナでは対象の投影が多数かつ自由にとれるのに対し、オーロラの場合は対象が超高層での自然現象であり時間的にも変化するため、それほど多くの方向の投影を取得することはできない。その一方で生体を対象とする医療用 X 線 CT スキャナの場合に比べて、オーロラはそれほど複雑な構造ではないと考えられ、またある程度の構造に関する制約を加えることもできる。このような条件の違いにより、あらためて手法の段階から検討する必要があるものの、適当な手法を用いることによりオーロラの画像から、その空間的な発光強度分布を推定できると考える。

## 1.2 本論文の目的

本論文における研究の目的は、複数の観測点から観測された単色光オーロラ画像を用いて、元のオーロラの発光強度分布を推定することである。

再構成された発光強度分布により、例えば、ディフューズグローの広がりや多層構造などの可能性も含めて数 10km から数 100m 以下とも言われているオーロラカーテンの厚さに関する研究 [4] に対して貢献することができる。また、オーロラ発光の素過程に関する研究 [5] に対して近接した時間もしくは同時刻の 557.7nm 及び 427.8nm の沿磁力線発光強度プロファイルを推定された分布から取り出し、それらの比較を行なうことにより、この素過程についての手がかりとなることも期待できる。さらに、沿磁力線発光強度プロファイルを抽出し、オーロラ粒子のエネルギーを推定することや、連続した時間の複数の分布から、渦構造などのダイナミクスを調べることといった多様な応用が考えられる。

地表からの光学的な観測によりオーロラの構造を推定する研究は、C. Störmer によるものや、Stenbaek-Nielsen ら [6] によるもの、また Kaila [8, 9] による 3 角測量を用いたオーロラの下縁等の高度推定の発展と考えて良い。これらの研究では、オーロラアークの厚みが十分に薄いと仮定し、アークの下縁が明確であることを利用して高度推定を行っており、この結果はオーロラ粒子のエネルギーの推定などに用いられている。例えば、Brown らは約 10km 離れた 2 点にカメラを設置し、3 角測量によりオーロラの上縁や下縁の高度を測定した [7] が、パルセーティングオーロラの高度方向の厚みは比較的薄いのではないかという興味深い結果を得ている。

これまで行なわれてきたオーロラ発光強度分布の推定の研究としては、Romick らは磁気的子午線上に 226km 離れた二つのスキャンニングフォトメータを並べ、オーロラが薄いシート上であるという仮定や定められた適当な関数で表すことができるという仮定の元に、それらのデータから鉛直面上のオーロラの発光強度を計算している [10]。また Vallance Jones らは磁気的子午線に互いに約 125km 離れた 3 点のフォトメータの値から、代数的な方法を用いて鉛直面上のオーロラの発光強度を計算し、観測と同期して打ち上げられた観測用ロケットから得られたデータと比較している [11]。Frey らは 23km 離れた 2 点に光電増倍管つき CCD カメラを持つ観測点をおき、代数的な方法を用いてそれらのデータから 3 次元の発光強度分布を計算している [12]。Nygrén らは、約 200km 離れた 2 点のオーロラ用 TV カメラの画像から、2 次元の発光強度分布を計算している [13]。また、Aso らはアイスランドの約 90km 離れた 2 点に光電増倍管つき CCD カメラを持つ観測点をおき、得られた画像からアークの構造などの解析を行なっている [14, 15, 16]。

これらの観測と解析において、スキャンニングフォトメータを用いたものは最大で 3 点の観測点を用いているが、その性質上 1 次元のデータしか得られず、解析した結果も 2 次元の平面上の発光強度分布となる。またカメラを用いて観測した場合は得られるデータが画像であるため、3 次元の発光強度分布を推定することが可能であるが、観測点数が 2 点しかないため、妥当な結果を得るためにはオーロラの形状に関する非常に強い制約を必要としている。

オーロラ再構成手法に関しては、上記の多くの研究で、それぞれが用いている再構成手法に関しての計算機シミュレーションによる検討を行なっているが、複数の手法間の比較

などは行なっていない。計算機シミュレーションによるオーロラ再構成手法の検討では、Semeter らによる 4 点観測を想定した 2 次元の分布の再構成シミュレーション [21] があるが、これはチャップマン関数を利用した初期値を用いた制約の強い方法のみの検討である。また、Gustavsson は複数の手法の検討を行なっている [22] が、オーロラの性質を再構成手法に加えるようなことはしておらず、また観測点 14 点という非常に多くの観測点がある場合のシミュレーションしかしていない。

これらの研究に対し、本論文ではより多い 3 点以上の観測点からの CCD カメラを用いた観測画像を元にオーロラの形状を推定しようとしている。観測点数が増えることによりオーロラの構造に関する情報が増え、より制約の少ない条件でより正確なオーロラ発光強度分布を推定することができるからである。またこの 3 点以上の観測点が同一直線上にあるわけではないため、3 次元の分布に対する再構成を行なっている。これは観測点配置の自由度を上げると同時に、広い範囲でのオーロラ発光強度分布の推定を可能にしている。

本論文ではこれまでの研究に比べてより多くの観測点からの画像を用いているが、それでも観測条件の厳しさから、取得し得るオーロラの画像数や方向に関して、医療用 X 線 CT などの場合に比べ非常に限られたものとなっている。画像数すなわち投影数は再構成結果の厳密さに影響を与え [17]、投影方向の制限もまた再構成結果に影響を与える [18] ため、オーロラ画像から発光強度分布を求めようとする、不良設定逆問題と呼ばれる種類の問題を解くことになる。このような不良設定逆問題に対しては、エントロピー最大や最小 2 乗平均といった適当な制約を明示的に含めて解く方法 [19] や解法に暗に制約が含まれる方法 [20] が用いられているが、オーロラの場合にはそういった一般に用いられる制約以外にも、その発光原理から考えられるオーロラ特有の性質を発光強度分布の制約として解析手法に加えることが考えられる。本論文では、自由度の大きい 3 次元の分布を再構成しようとしていること、医療用 X 線 CT などの場合に比べれば画像数が多いとはいえ不良設定問題であることから、再構成手法の中にオーロラ発光構造に関するある程度の制約を加えることが必要であると考え、オーロラ特有の性質を用いた比較的弱い制約を用いながら、十分実用的な手法を新しく提案している。また、よりオーロラトモグラフィに適した再構成手法を探索するため、提案した手法も含めた複数のオーロラ再構成手法を計算機シミュレーションによって比較・検討している。

オーロラの光学的な観測は地上からの観測以外にも、人工衛星によるものやロケットによる観測 [23] も行なわれている。人工衛星やロケットによるオーロラ観測は、地上からの観測と異なり天候に左右されることなく観測することができる上、条件さえ揃えばオーロラ粒子のエネルギー等についても同時に観測ができる。しかしながら、複数の衛星やロケットによる観測は実際上難しく、一つの衛星もしくはロケットが移動することにより複数の画像を得てトモグラフィ解析を行なうことも考えられるが、かなりステイブルなオーロラでなければ衛星もしくはロケットのみによるトモグラフィ観測は難しいと考える。これに対し、地上からの観測では天候には左右されるものの、比較的複数の観測点を設置しやすく、継続的な観測が行ないやすいという利点がある。筆者は 1995 年より行なわれているスウェーデン北部に設置された多点観測網を利用した国際共同観測に参加しており、本論文ではそこで得られたデータを利用している。

本論文ではオーロラの観測からオーロラ発光強度分布を得るまでの手順の検討と、その中で特に重要な再構成手法の提案と検討を行なっている。また、実際の画像からの再構成をしてその結果を提示し、シミュレーションを通して再構成結果の検討を行なっている。さらに、これらを通してより良い再構成結果を得るための考察も行ない、オーロラトモグラフィの実用性と可能性について示している。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成について以下に述べる。

第2章では、オーロラトモグラフィに用いる画像を取得するオーロラ観測システムを説明し、取得した画像を再構成するための前処理となる過程について方法と具体例を述べる。

第3章では、オーロラとその画像の関係のモデル化についてと、画像からオーロラを再構成する手法を述べる。また、再構成領域の選択手法について説明する。

第4章では、計算機内でモデルオーロラを作り、その画像から再構成を行なうシミュレーションによって、再構成手法や観測点配置などに対して全般的な検討を行なう。

第5章では、複数の観測期間中に実際にトモグラフィ観測されたオーロラ画像を示し、その画像からの再構成結果を示す。

第6章では、前章の再構成結果を参考にモデルオーロラを作り再構成を行なうシミュレーションにより、前章の結果の個別の信頼性について検討する。

第7章では、将来的なオーロラ観測システムの発展がオーロラトモグラフィに対して与える影響や、望ましい観測システムについて考察し、それらを今後の課題として述べる。

最後に、第8章で本論文をまとめ、これまでの研究結果について整理する。



# Chapter 2

## オーロラ観測システムとその較正

### 2.1 前書き

本章では、オーロラトモグラフィのための観測画像の取得から、解析に用いるための前処理までの方法と手順について説明する。

まず、オーロラ多点観測画像を取得するための観測システムや観測期間等について述べ、次に、得られた画像の方向や感度に関する較正法について述べることにする。これにより、実際に観測されたオーロラ画像のトモグラフィ解析で必要となる、カメラのある画素に対応する実空間中の視線方向や、その画素値とカメラに入射する光の量との関係を知ることができるようになる。

### 2.2 観測機器とその配置

我々は、京都大学・国立極地研究所・スウェーデンスペース物理研究所 (IRF) による、単色光オーロラトモグラフィのための国際共同観測を、ALIS (Auroral Large Imaging System)[24, 25] と呼ばれる観測網の観測点を利用して、1995 年より 1998 年春までに計 4 回行ってきた。以下にその詳細を述べる。

#### 2.2.1 ALIS 観測網

ALIS とは、スウェーデン北部に設置された多点観測網である。各観測点は無人で遠隔コントロールされており、装備された干渉フィルタ付き冷却 CCD カメラにより、画像による光学的な観測を行なうことができる。

もともとの ALIS の目的の一つは、これまでスキャンニングフォトメータにより行なわれてきたオーロラの輝度の測定を、CCD を用いることにより、また多点で観測することにより、広域にわたり行なうことである。また、トモグラフィ手法により 3 次元的なオーロラ構造を推定するために、多点同時観測画像を取得することも、当初からの目的の一つで

表 2.1: ALIS 観測点の位置

観測点番号	観測地点名	地理的緯度	地理的経度	地理的高度
1	Kiruna	67°50'26.6"N	20°24'40.0"E	425m
2	Merasjärvi	67°32'50.7"N	21°55'12.3"E	300m
3	Silkkimuotka	68°01'47.0"N	21°41'13.4"E	385m
4	Tjautjas	67°20'02.4"N	20°45'23.2"E	470m
5	Abisko	68°21'06.5"N	18°49'35.0"E	360m
6	Nikkaluokta	67°51'09.7"N	19°00'25.7"E	470m

ある。さらに、その後オーロラ研究以外の PSC(Polar-Stratospheric Clouds) の観測や流星痕の観測も、ALIS 観測網の目的の一部に加えられている [26]。

ALIS 観測点への CCD カメラの設置は 1995 年から開始され、1999 年迄に計 6 点に CCD カメラが設置されている。ALIS の観測点配置を図 2.1 に示す。実線で描かれた円錐の頂点の部分が、1999 年迄に設置された観測点の位置を示している。設置された観測点については、GPS を利用することにより正確な地理的位置が測定されているため、これを表 2.1 に示す。また、図 2.1 中の点線で描かれた円錐は、将来の観測点設置予定位置を示している。

ALIS の各観測点には、図 2.2 に示すような、縦横約 2m、高さ約 2.5m の無人観測小屋が設置され、上部の透明なドームを通してオーロラ観測を行なっている。観測小屋内部には、商用電源が供給されており、電源管理・温度管理を行なうハウスキーピングユニットと、カメラ等のコントロールやデータの蓄積を行なうステーションコンピュータが設置されている。また、Kiruna にあるコントロールセンターと電話線でつながっており、観測画像を縮小したクイックルック画像の送信や、遠隔からのハウスキーピングユニットやステーションコンピュータを操作を行なうことができる。観測の同期のため、各観測点に設置した GPS を用いて時刻合わせを行なっているが、GPS の受信ができない場合や GPS が備え付けられていない場合には、電話回線を利用したコントロールセンターとの時刻同期を行なうこともできる。

オーロラトモグラフィ画像を取得するための冷却 CCD カメラシステムは、ステーションコンピュータによりコントロールされ、取得された画像もステーションコンピュータ内のハードディスクに収められる。この画像データは量が多いため、現在のところ人間が定期的に直接観測点に赴き、コントロールセンターにデータを持ち帰っている。カメラシステムの詳細については、次の小節で述べることにする。

ALIS の観測点は、無人観測機器の汎用プラットフォームとなるように設計されており、既に幾つかの観測点には CCD カメラシステムの他に Pulsation magnetometer も備えられている。また、分光器やその他フォトメータなどを装備することも、将来の計画として考えられている。

ALIS の無人観測点は、Kiruna のスウェーデンスペース物理研究所 (IRF) 内のコントロールセンターから制御される。ALIS の観測者は、図 2.3 に示すようなグラフィカルな画面を

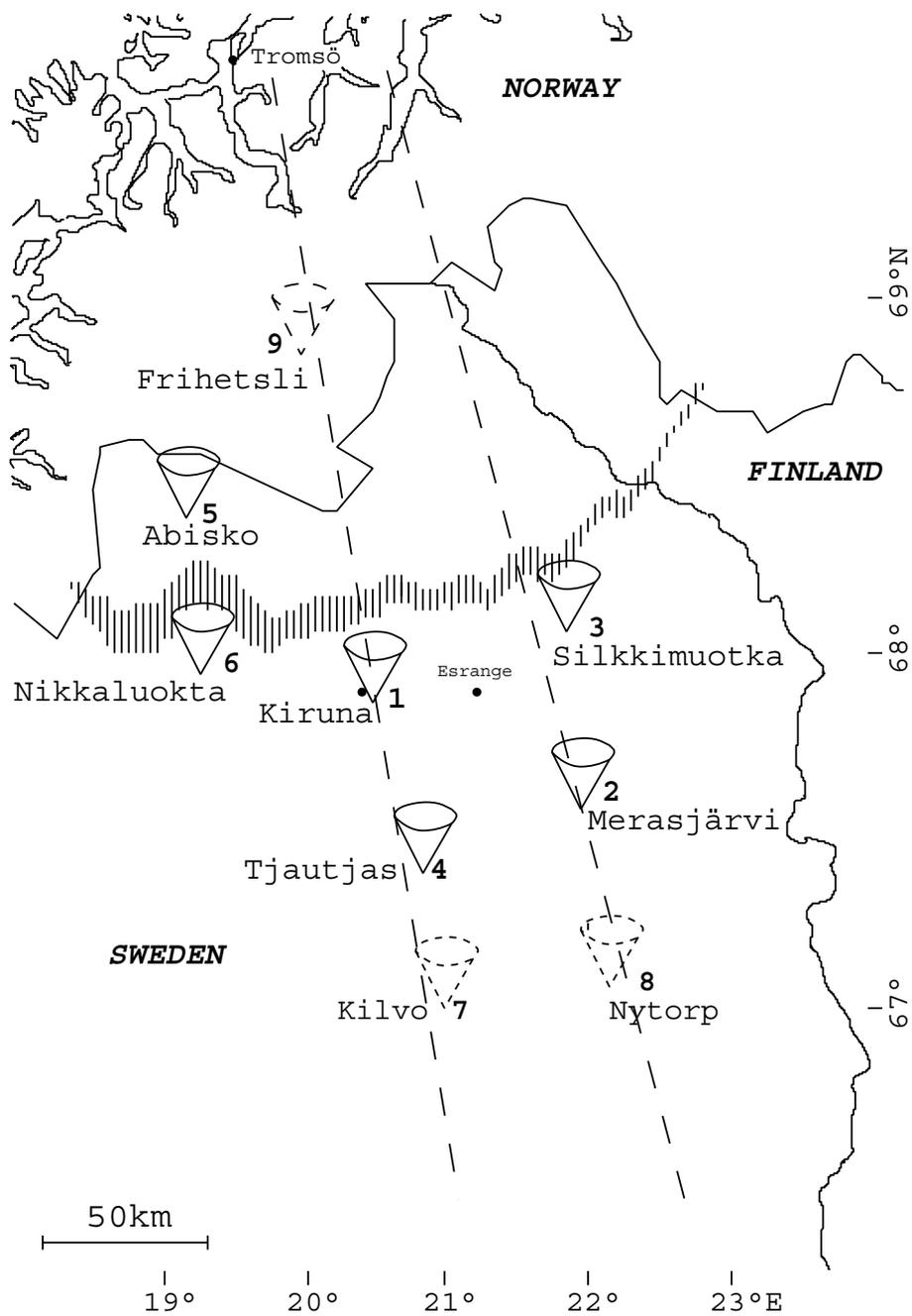


図 2.1: ALIS における観測点配置



図 2.2: Abisko の観測点 (上部の透明なドームを通してカメラが見える)

通じて、各観測点のクイックルック画像を見ながら観測網の操作を行なうことができる。この操作用ソフトウェアは、TCP/IP でコントロールセンター内の ALIS 制御プログラムと通信を行なっているため、認証を行なえば、インターネットを経由した ALIS 観測網の操作が可能となっている。また、電話回線が不調の場合であっても、あらかじめ各観測点にコマンドを送り込むことにより、各観測点のステーションコンピュータによる観測も可能である。

### 2.2.2 共同観測における観測機器とその配置

スウェーデン北部における共同観測は、1998 年春までに計 4 回行なわれている。ALIS の観測点の拡充と、日本から持ち込まれたオーロラ観測カメラシステムの有無により、それぞれの観測期間で用いたカメラシステムの構成が異なるものとなっている。

第 1 回の 1995 年 3 月の観測 [27, 28] においては、スウェーデン側の ALIS の観測点 3 点に日本より持ち込まれた ICCD(Image-intensified CCD) カメラを利用する 2 点を加えて、合計 5 点の観測点による観測が行なわれた。また、第 2 回の 1995 年 12 月の観測においては、ALIS の観測点が 4 点に増強され、日本側のカメラ 2 点を加えて、合計 6 点の観測点による観測が行なわれた。第 3 回の 1997 年 2 月の観測 [29] では、ALIS の観測点は 5 点に増えたが、日本よりカメラを持ち込むことはせず、5 点の観測点による観測が行なわれた。第 4 回の 1998 年 2 月の観測では、これに日本より持ち込まれた ALIS のカメラと同様の冷却 CCD によるカメラの観測点 1 点を加えた、計 6 点の観測点による観測が行なわれた。

第 1 回と第 2 回の観測において日本から持ち込まれたカメラシステムは、マイクロチャ



図 2.3: 観測制御プログラム PARSIFAL の画面

ネルプレートによる光電増倍管付 CCDTV カメラを利用した有人の観測システムで、機械的に交換可能な干渉フィルタ (パングロ及び 427.8nm, 557.7nm, 630nm が選択可能) と ND フィルタを備え、画角が約 90°で、512×512, 8bit の画像を取得することができる。この場合、分解能としては計算上 100km 先で約 0.3km となる。カメラから出力される信号は NTSC であり、30frame/s で画像が出力されているが、ノイズを減らすため、画像を取り込む前に ImageΣ という画像処理装置であらかじめ設定したフレーム数の画像の積分を行なっている。この画像の積分は (積分フレーム数/30) 秒の露光と等価であり、以降日本の ICCD カメラの場合は露光時間で積分フレーム数を表すことにする。このカメラシステムは、マイクロチャンネルプレート電圧の設定、フィルタ等の交換、カメラ方向の設定などのため、有人を前提とするカメラシステムである。またこのカメラシステムは、ALIS の観測システムのステーションコンピュータに接続されており、またモデムを介して IRF のコントロールセンターに縮小された画像を送り出すことができる。ただしコントロールセンターからの制御は行なわないものとした。

それ以外の ALIS のカメラシステムは、冷却 CCD を利用した無人の自動観測システムで、干渉フィルタ (パングロおよび 427.8nm, 557.7nm, 630nm その他が選択可能) を備え、画角が約 60°で、1024×1024, 16bit の画像を取得することができる。ただし、具体的な配置は後に述べるが、第 3 回観測の 1 つの観測点と第 4 回観測の 2 つの観測点に置かれたカメラシステムは、約 90°の画角を持っている。この場合、分解能としては計算上 100km 先で、それぞれ約 0.1km (画角約 60°の場合)、約 0.15km (画角約 90°の場合) となる。また、この ALIS のカメラシステムでは CCD のリードアウトノイズを減らすため、CCD を 4 つの領域に分割しそれぞれを並行して読み出している。さらに、binning という近傍の画素値を CCD 上でまとめる動作を行なうことにより、解像度は下がるが感度を上げることができる。このカメラは機械式シャッターを備えており、CCD の露光時間を自由に変更することができる。このシステムはモデムを介して IRF のコントロールセンターに接続しており、そこから画像取り込みのタイミング等に関するコントロールを受けている。第 4 回の観測において日本から持ち込まれたカメラもこのタイプのカメラで、これに関しては各フィルタの特性や絶対的な感度に関する特性も調べられている。1998 年春の観測では、すべてのカメラシステムのカメラ方向は遠隔操作が可能となっているが、一時期、一部のカメラにカメラ方向を遠隔から操作するための駆動機構が装備されておらず、その場合あらかじめ設定された方向にカメラ方向は固定されていた。

図 2.4 にこれらのカメラシステムのブロック図を示す。ALIS のカメラシステムは無人観測を行なうため、カメラのコントロールやカメラ方向のドライブ機構のあるものについてはカメラ方向のコントロールを電話回線から MODEM とステーションコンピュータである IBM/PC マシンを通して行なっており、これらが重要な位置を占めている。しかし、日本側のカメラシステムでは有人観測のため、カメラのコントロールは PC9801NX/C や各コントロールボックスを通じて行なっている。そのため、観測地点のステーションコンピュータや MODEM 等は IRF のコントロールセンターに現在の観測状況を伝えるためだけにあり、コントロールセンターとの接続はそれほど重要ではない。

これまでの共同観測では、表 2.2 に示す地点にそれぞれの種類の観測用カメラシステムが置かれた。これらのカメラシステムは、有人のものは手動で、無人で駆動装置のついてい

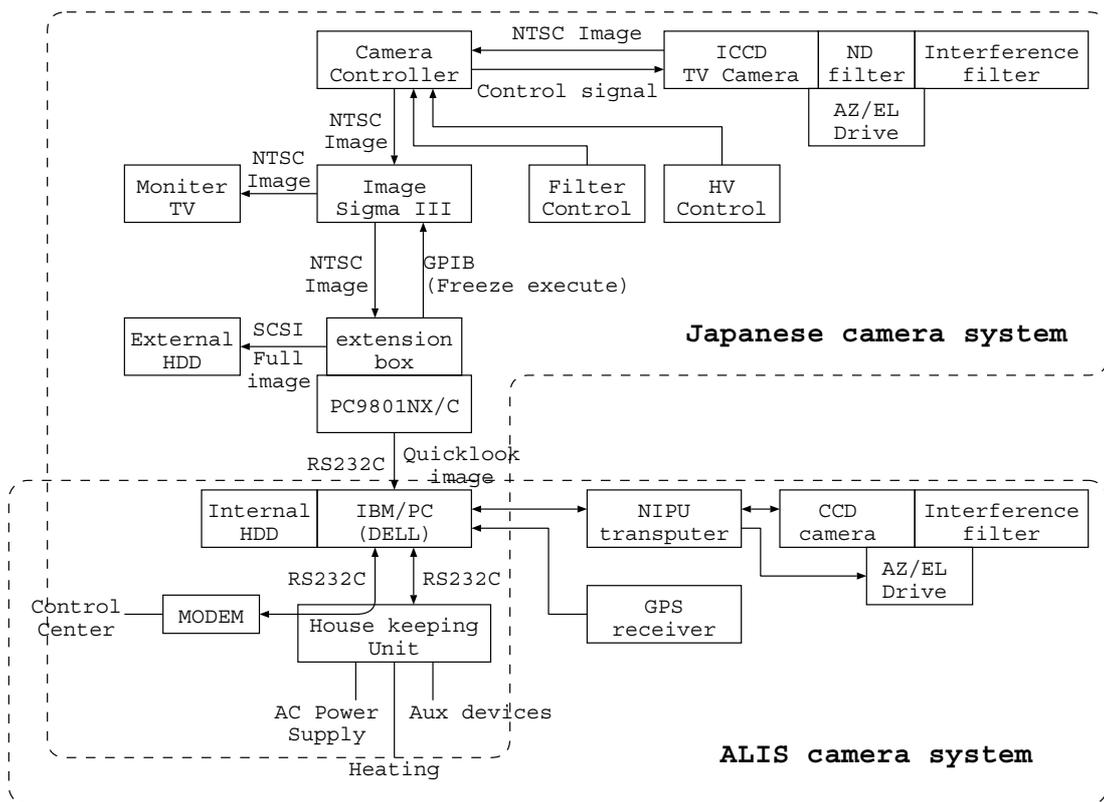


図 2.4: カメラシステムのブロック図

表 2.2: 各共同観測における観測点配置とカメラタイプ

	第 1 回観測	第 2 回観測	第 3 回観測	第 4 回観測
1.Kiruna	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>
2.Merasjärvi	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	×	A <sub>2</sub>
3.Silkkimuotka	×	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>
4.Tjautjas	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>
5.Abisko	B	B	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>
6.Nikkaluokta	B	B	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>

A<sub>1</sub>: 冷却 CCD カメラ (画角約 60°), A<sub>2</sub>: 冷却 CCD カメラ (画角約 90°),

B: 光電増倍管付 CCD カメラ, ×: カメラなし

るものはリモートコントロールによりその方向を設定される。また、無人で駆動装置のついていないものは、点検やデータ回収のため観測点を訪れる際などに、あらかじめ定められた方向を向くように設定される。トモグラフィ観測に先立ち、オーロラの出現する高度における core(Kiruna 上空を中心とする領域), south(core より約 50km 南), north(core より約 50km 北), EISCAT(north より約 50km 北) の 4 つの空間領域を設定し、これらの領域で共通視野領域が最大となるように、あらかじめそれぞれの観測点のカメラ方向の計算を行なっている。これに基づき、オーロラの出現状況などに応じて 4 つの内のいずれかの方向にカメラ方向は設定される。

オーロラは自然現象であり、観測は雲などの天候に左右される。そのため、観測期間中に目標の空間領域にオーロラが出現しており、多くの観測点の天候が晴れであるという状況はそれほど多くはなかった。しかし、数回に渡る観測期間中においては、十分な数のオーロラトモグラフィ用の同時観測画像を手に入れることができた。これ以降で用いられる観測画像は、ここで述べた複数回の共同観測によって得られたものである。

## 2.3 カメラ方向の較正

カメラの大まかな方向は駆動機構や手動により設定される。しかし、オーロラトモグラフィではより細かく各画素が実空間でどの方向を向いているのかについて正確に知る必要がある。

我々は、恒星の画像からカメラモデルを定め、画素とその方向の関係を求めている。以下にその手法と実例を示す [14]。

### 2.3.1 恒星を用いた方向較正手法

我々は、観測直前や直後等のオーロラの観測を行なわない時に、観測時とカメラ方向を変えないままでフィルタをパンクロに切替え、恒星の画像を取得している。また干渉フィ

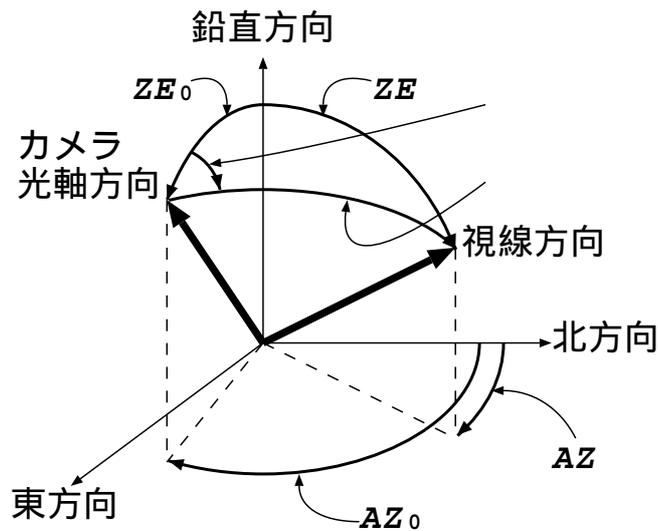


図 2.5: 地平座標 ( $AZ, ZE$ ) とカメラ光軸極座標 ( $\theta, \phi$ ) の関係

ルタを使用中でも、オーロラや露光時間等の状況により恒星が画像中に認められることもある。画像を取得した位置・時刻が分かれば、その地点における恒星の方向は一意に定まる。これを利用して、カメラに対しモデルを設定し、そのパラメータを恒星の対応によって調整することにより、画像全体の各画素の方向の対応づけを求めることができる。

まず、画素の座標系と視線方向の座標系に2つの座標系を加え以下の4つの座標系を設定する。

1. 地平座標 ( $AZ, ZE$ )

各観測点位置での視線方向を表すために用いる。方位角  $AZ$  は、地理的北を  $0^\circ$  とし、東、南、西と回る向きにそれぞれ、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  であり、天頂角  $ZE$  は、その観測点の天頂を  $0^\circ$  とし、地平線、天底でそれぞれ  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  である。

2. カメラ光軸極座標 ( $\theta, \phi$ )

カメラから見た視線方向を表すために用いる。 $\theta$  はカメラの光軸と視線のなす角であり、 $\phi$  は天頂方向を  $0^\circ$  とし、カメラから光軸方向を見て反時計回りを正とする。図 2.5 に地平座標との関係を図示する。

3. ピンホールモデル平面座標 ( $XP, YP$ )

カメラの仮想スクリーン上の位置を表すために用いる。

4. 画像座標 ( $i, j$ )

画像上の座標を表すために用いる。画像の左上を原点とする。

表 2.3: カメラ特性の候補

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
$f(\theta)$	$\sin(\theta)$	$2 \sin(\theta/2)$	$\theta$	$2 \tan(\theta/2)$	$\tan(\theta)$	$(2 \tan \theta + \theta)/3$

これらの座標系の内、1 から 2 への変換は球面三角法により求めることができる。カメラの光軸方向を地平座標で表したものを  $(AZ_0, ZE_0)$  とすると、

$$\begin{cases} \theta = \cos^{-1}(\cos ZE_0 \cos ZE + \sin ZE_0 \sin ZE \cos(AZ_0 - AZ)) \\ \phi = \tan^{-1} \left( \frac{\sin ZE \sin(AZ_0 - AZ)}{\sin ZE_0 \cos ZE - \cos ZE_0 \sin ZE \cos(AZ_0 - AZ)} \right) \end{cases} \quad (2.1)$$

となる。

2 から 3 への変換は、それぞれのカメラのカメラ特性  $f(\theta)$  を定めることにより、

$$\begin{cases} XP = f(\theta) \cos \phi \\ YP = f(\theta) \sin \phi \end{cases} \quad (2.2)$$

となる。第 1 回・第 2 回の観測で日本から持ち込んだカメラでは等立体角射影の  $f(\theta) = 2 \sin(\theta/2)$  であり、その他のカメラでは、 $f(\theta) = (2 \tan \theta + \theta)/3$  もしくは、 $f(\theta) = \tan \theta$  である。これらの特性は、正射影  $f(\theta) = \sin \theta$  等の一般的なカメラ特性などから表 2.3 に示す幾つかのカメラ特性の候補を挙げ、その中から方向較正の誤差が最も少なくなる特性を選んだものである。

3 から 4 への変換では、通常一次式によって

$$\begin{cases} i = A_{11}XP + A_{12}YP + A_{13} \\ j = A_{21}XP + A_{22}YP + A_{23} \end{cases} \quad (2.3)$$

のように表される。

これらの式の中で、 $AZ_0, ZE_0, A_{11} \sim A_{23}$  が未知数である。そのため、画像中の恒星の位置と実際の方向とのピンホール座標上での誤差を評価関数として、非線形最小二乗法により  $AZ_0, ZE_0$  を求める。またこの時  $A_{11} \sim A_{23}$  も、非線形最小二乗法の  $AZ_0, ZE_0$  の各試行毎に最小二乗法によって求めている。

式 (2.3) は必要に応じて 2 次以上の多項式とすることにより、レンズ特性のより複雑なゆがみなどに対応することや、方向較正における誤差をいくらでも小さくすることができるが、多項式の次数が大きくなると、画像中の恒星の写っていない領域であり得ない方向と画素の対応づけを行なうなど、大きな誤差を生む可能性がある。しかし、これまでのカメラに対する方向較正では、方向較正において画像中の恒星位置と時刻等から計算される恒星位置との誤差は 1 次の多項式で十分に小さくなり、2 次以上にする必要はなかった。このことはまた、表 2.3 から選ばれた関数でカメラ特性が十分に表されているということでもある。

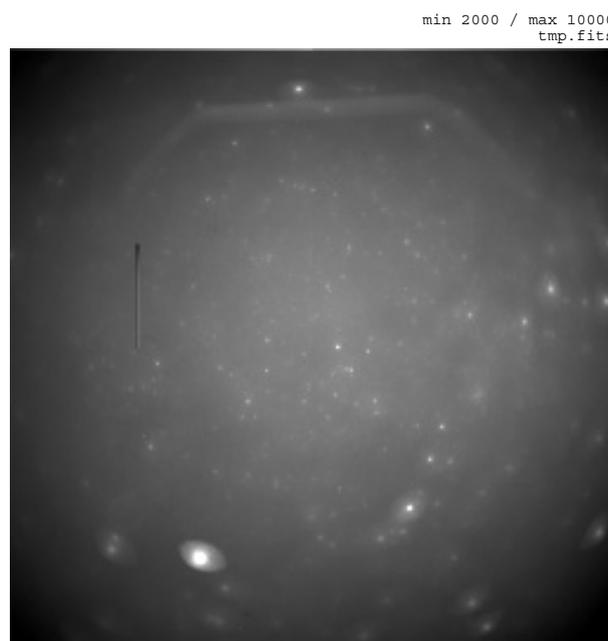


図 2.6: 方向較正用恒星画像

以上のようにして、画像中の恒星位置と実際の恒星方向の対応からカメラの方向構成を行ない、地平座標で表される視線方向からそれに対応する画素を求めたり、式 (2.1)~式 (2.3) の逆変換により画素の位置から視線方向を求めたりすることができるようになる。

### 2.3.2 実際の方向較正例

ここでは具体的な例をあげて、恒星画像を用いた方向較正について述べる。

まず、図 2.6 に複数の恒星が写されている  $512 \times 512$  画素の画像を示す。この画像は、パンクロのフィルタを用い、1997 年 1 月 1 日 20 時 19 分 30 秒から 4 秒間露光したものである。画像中の輝点が恒星である。

この画像から、マニュアルで恒星の候補となる大体の位置を入力し、それを初期値として近傍の画素に対してガウス関数をフィッティングすることにより、サブピクセル単位で画像中の恒星と思われる位置を同定する。図 2.7 には、図 2.6 の画像からサブピクセル単位で同定された 17 個の恒星と思われる点が示されている。今回は単一の画像を使用しているが、必要に応じて複数の時刻の画像を用いるなどして画像全体にほぼ一様に恒星と思われる輝点が存在するようにしている。

画像を取得する際のカメラの大体の方向は分かっており、観測点位置と画像を取得した時間は正確に分かっているため、プラネタリウムプログラムを使って同時刻同方向の恒星の配置を表示する。これを図 2.8 に示す。これらの恒星の赤経赤緯は、THE BRIGHT STAR CATALOGUE 第 4 改定版 [30] もしくはその機械可読版における 2000 年の恒星の位置を利

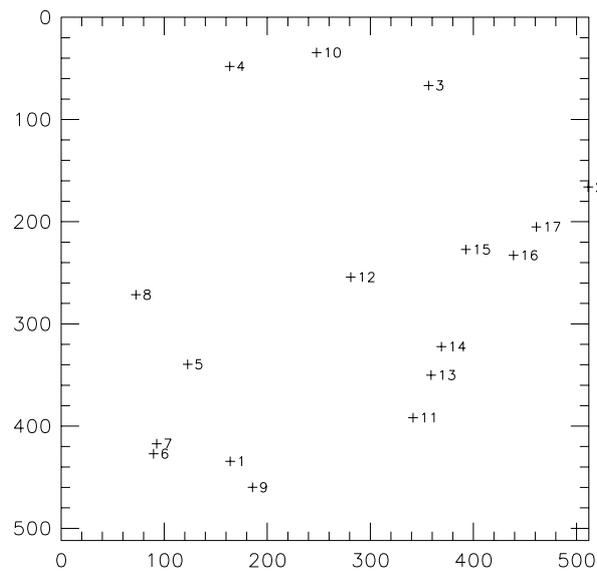


図 2.7: 画像から同定した恒星の位置

用した。固有運動・歳差・章動・視差・光行差・極運動・大気差による恒星方向のずれは、もっとも大きい歳差による方向のずれでも5年で最大 $0.07^\circ$ 程で、無視できるものである。

プラネタリウムプログラムで表示された恒星の配置から、画像上で位置の同定された恒星と思われる輝点がどの恒星であるかの対応を人手によりつけ、前小節で説明した座標変換の各係数を非線形最小二乗法で求める。もし、この対応が間違っている場合には、非線形最小二乗法における誤差が非常に大きくなるため、

図 2.9に、そうして求められた方向に関する較正結果を示す。この時、画像面での誤差は平均 $0.12$ ピクセルと十分小さな値となっている。これは実空間における視線方向の誤差に換算すると $0.014^\circ$ 程度となる。

実際の観測では、観測点は複数存在しカメラ方向も複数の設定をするため、それぞれに対して以上の手順を繰り返す必要がある。これらの場合にも、対応づけをした恒星の画像面上での位置の誤差は最大でも $0.6$ pixel以下と十分小さな値になっている。また、恒星の対応が間違っている場合はこの誤差が非常に大きくなるため容易に知ることができる。

## 2.4 カメラ感度の較正

トモグラフィの手法を利用してオーロラの発光強度分布を形状として求めるためには、相対的なカメラ間の感度較正と個々のカメラの周辺減光等の補正のみを行えば十分である。ただし、オーロラの発光強度を絶対値として求めるためには、画素のグレイレベルと輝度の絶対値との対応を求める必要がある。

本節では、相対的な感度較正とカメラ方向較正結果を利用した周辺減光の補正について



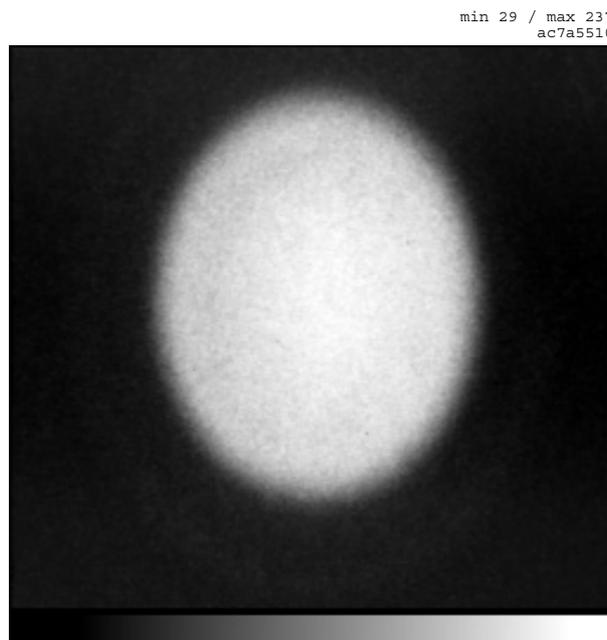


図 2.10: 燐光の画像 (第 2 回共同観測、Abisko の画像)

述べた後、積分球標準光源を用いた絶対感度較正について述べる。

### 2.4.1 相対感度較正と周辺減光の補正

まずカメラ間の相対感度の較正について述べる。

放射性物質と蛍光物質を混ぜて直径 10cm ほどの円盤状とした燐光と呼ばれる発光体を用い、これを中央に写るようにして、相対感度較正を行なう複数のカメラで図 2.10 のような画像を取得する。また同時に入射光のない画像も取得する。燐光は時間的に安定した発光をしているため、燐光の画像と入射光のない画像の画素値の差がカメラの相対的な感度となる。実際の再構成の際にはこれを基本として、さらに再構成結果と画像との関係を利用して再構成時の誤差が少なくなるようにカメラ間の相対感度の補正をしている。

次に、一つのカメラに対する周辺減光の補正について述べる。

周辺減光とは、前節の図 2.6 の恒星以外の背景において見られるような、同様の輝度を持つ対象を写しているにも関わらず、画像中央付近に比べ周辺で画素値がかなり小さくなるような現象のことである。

まず、前節で述べたような方向に関する較正が適切に行なわれているものとする。カメラ光軸極座標  $(\theta, \phi)$  方向から来た光は、レンズの開口面積により  $\cos \theta$  の減衰を受けた後、 $f(\theta)$  のレンズ特性による変換を受けて CCD 面に落ちる。 $f(\theta)$  のレンズ特性では、 $d\theta \sin \theta d\phi$  の微小立体角が  $f'(\theta) d\theta f(\theta) d\phi$  に比例する CCD 面の微小面積に対応することから、同一輝度

に対してどの程度画素値が小さくなるかを示す周辺減光特性 $\epsilon(\theta)$ は、光軸方向を1として、

$$\epsilon(\theta) = \frac{\sin \theta \cos \theta}{f(\theta)f'(\theta)} \quad (2.4)$$

となる。但し、 $f'(\theta)$ は $f(\theta)$ を $\theta$ で微分したものである。

この式から、例えばレンズ特性が $2 \sin(\theta/2)$ の時は周辺減光特性は $\cos(\theta)$ となり、レンズ特性が $(2 \tan \theta + \theta)/3$ の時は、

$$\epsilon(\theta) = \frac{9 \sin \theta \cos \theta}{(2 \tan \theta + \theta) \left( \frac{2}{\cos^2 \theta} + 1 \right)} \quad (2.5)$$

となる。ただし、実際の再構成ではこのような理想的な周辺減光特性と少々異なる場合があるため、レンズ特性が $(2 \tan \theta + \theta)/3$ の時に $\epsilon(\theta) = \cos^7 \theta$ といった修正を行なう場合がある。

### 2.4.2 積分球標準光源を用いた感度較正手法

積分球標準光源は、ほぼ完全拡散面である内壁を持つ球に対して調整された光束を入射することにより、球内部でほぼすべての方向の放射輝度が等しくなるという性質を持つものである。

国立極地研究所に導入された積分球標準光源 (OL462)[31] は、

- 積分球  
直径約 2m、内壁が Optron2(Optronic 社製、BaSO<sub>4</sub> を成分とする) でコーティングされ、較正する機器用の Port と光源モニター受光器が取り付けられている。
- コントローラ  
積分球標準光源をコントロールするもので、光源の On/Off、積分球内面の分光放射輝度の調整を行なう。
- 光源  
150W のハロゲンタングステン電球と出射スリットが取り付けられている。
- モニタ受光器  
高感度 Si-Photodiode に極大通過波長 630nm、FWHM(半値全幅:透過率が最大透過率の半分以上の波長幅)30nm の干渉フィルタが取り付けられており、積分球内面の分光放射輝度を測定する。

という構成からなっている。これを図 2.11 に示す。

この装置は波長 300nm-1000nm の範囲で使用可能であり、 $0.3 \sim 10^4 \text{R/sr nm}$  (at 630nm) の範囲で分光放射輝度を調整可能である。ただし、R は照度の単位レイリー ( $1\text{R} = 10^6 \text{photons/s cm}^2$ ) であり、sr は立体角の単位である。また、立体角  $2\pi$  の範囲内で  $\pm 5\%$  の均整度、立体角  $\pi$  の範囲内で  $\pm 1\%$  の均整度を持っている。さらに、この積分球は National Institute of

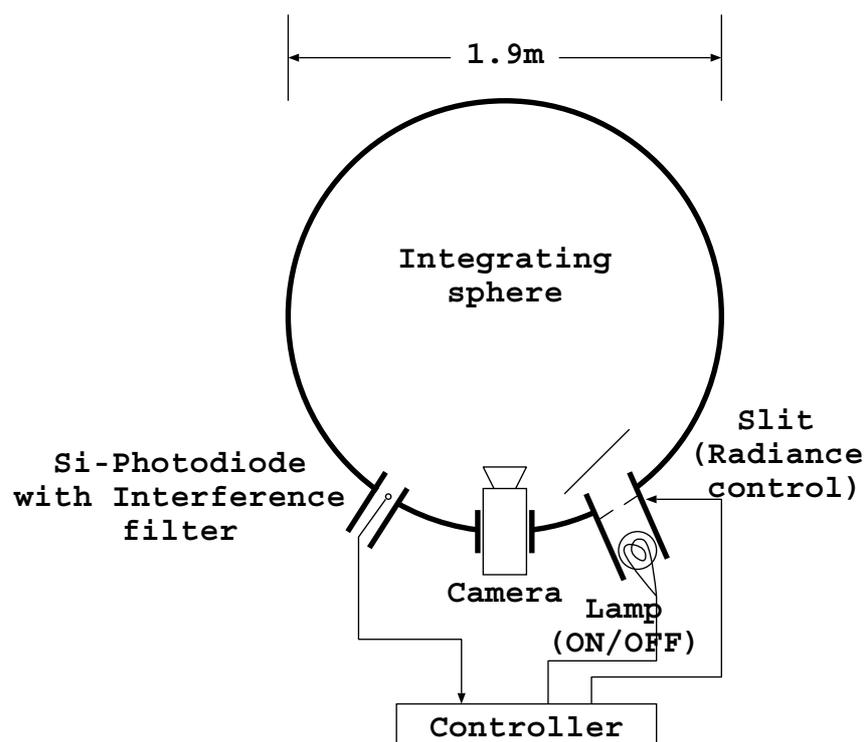


図 2.11: 積分球標準光源

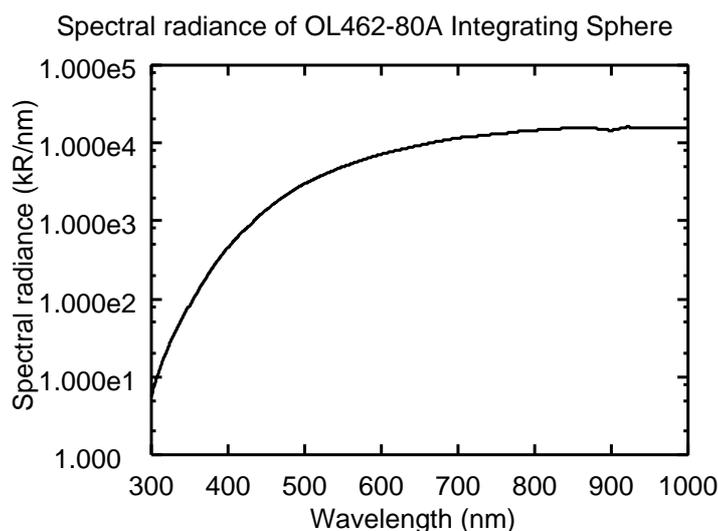


図 2.12: 積分球標準光源の分光特性

Standards and Technology, USA トレーサブルの積分球光源 (OL455, Optronics) を光源として較正された、分光放射輝度計 (OL750, Optronics) によって較正されており、630nm の分光放射輝度が  $2.000 \times 10^{-6} \text{W/sr m}^2 \text{ nm}$  のときの、光源の分光放射輝度特性が波長 0.1nm 毎に測定されている。この分光特性を図 2.12 に示す。これらの特徴から、この装置はオーロラ観測用カメラの感度較正に対して十分な性能を持つものと考えている。

積分球を使った較正において、画素のグレイレベルと積分球内部の 630nm における分光放射強度との関係に影響を与える要素として、

- 630nm の分光放射輝度  $L_0[\text{photon}/\text{m}^2 \text{ s nm sr}]$  を代表値とする積分球内部の放射輝度
- 入射光の放射輝度の波長特性  $l(\lambda)[\%]$  ( $l(630\text{nm})=100\%$  とする)
- 露光時間  $t[\text{s}]$
- フィルタ特性  $\eta(\lambda)[\%]$
- CCD の量子効率
- レンズの口径・周辺減光・口径蝕
- 各 CCD セルの感度差
- AD 変換器とその周辺回路の特性
- CCD の暗電流
- 露光時間のずれ

- その他ノイズ

が考えられる。

ノイズ・量子化誤差及び温度変化を無視し、フィルタの波長幅内で CCD の量子効率は変わらないものとし、画素  $i$  に対応する CCD セルの面積は十分に微小であるとする。レンズ口径・周辺減光・口径蝕・CCD の量子効率・CCD セルの感度差・AD 変換の感度をまとめて  $A_i[\text{m}^2 \text{count}/\text{photon}]$  と置き、暗電流によるオフセットを  $B_i[\text{count}/\text{s}]$ 、露光時間のずれなどによる影響を  $C_i[\text{m}^2 \text{s count}/\text{photon}]$ 、AD 変換器のオフセットを  $D_i[\text{count}]$  と置く。すると、グレイレベル  $g_i[\text{count}]$  は一つのフィルタに対して、

$$g_i = (tA_i + C_i)L_0 \int l(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda \int_{\Omega_i} d\Omega + tB_i + D_i \quad (2.6)$$

と表すことができる。ただし、 $\Omega_i$  は画素  $i$  が空間に張る張る錐状の領域を示し、積分はその立体角に対して行なう。また、積分球の内壁は完全拡散面で均一な輝度を持つものとする。

実際のオーロラの場合は、発光が等方的で吸収散乱はないものとし、オーロラの波長特性は  $\lambda_0$  のデルタ関数であるとして、

$$g_i = (tA_i + C_i) \int_{\Omega_i} \frac{L(\mathbf{r})}{4\pi|\mathbf{r}|^2} dV \eta(\lambda_0) + tB_i + D_i \quad (2.7)$$

と表すことができる。ただし、 $L(\mathbf{r})[\text{photon}/\text{m}^3 \text{s}]$  は、波長  $\lambda_0$  のオーロラのカメラを原点とする位置  $\mathbf{r}$  での発光強度である。また、積分は画素の張る錐状の空間に対して行なう。

式 (2.6), (2.7) の対応によって、オーロラ観測画像に適用できる感度キャリブレーションを行なうことができる。具体的な手順は、次の 2.4.3 節で示すことにする。

### 2.4.3 実際の感度較正例

オーロラ画像の絶対感度較正の具体的な手順は次のようになる。

1. 各フィルタについて、積分球を使い、 $t, L_0$  を変化させた較正画像をとる。
2.  $t, L_0$  それぞれに対して一次となる関数を、較正画像で各画素毎に最小二乗法でフィッティングすることにより、4 つの係数を求めることができる。それらは式 (2.6) に関する  $(A_i \int l(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda \int_{\Omega_i} d\Omega)$ ,  $B_i$ ,  $(C_i \int l(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda \int_{\Omega_i} d\Omega)$ ,  $D_i$  に対応するものである。
3. フィルタ特性表より  $\eta(\lambda_0)$  を、また光源特性表とフィルタ特性表より  $\int l(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda$  を求める。
4. 式 (2.7) に対して、これらを用いることにより、オーロラ観測画像の画素  $i$  のグレイレベルが  $g_i$  のとき、そのセルの方向からの輝度は、

$$\frac{\int_{\Omega_i} \frac{L(\mathbf{r})}{4\pi|\mathbf{r}|^2} dV}{\int_{\Omega_i} d\Omega} = \frac{g_i - tB_i - D_i}{(tA_i + C_i) \left( \int l(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda \int_{\Omega_i} d\Omega \right)} \frac{\int l(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda}{\eta(\lambda_0)} \quad (2.8)$$

と表すことができる。

表 2.4: フィルタを通過する光の量

オーロラ波長 (nm)	フィルタ減衰率	フィルタ波長 (nm)	入射光 (R/sr)*
427.8	0.4762	428.5	155.074
557.7	0.5805	559.0	813.610
630.0	0.8452	631.0	2242.768

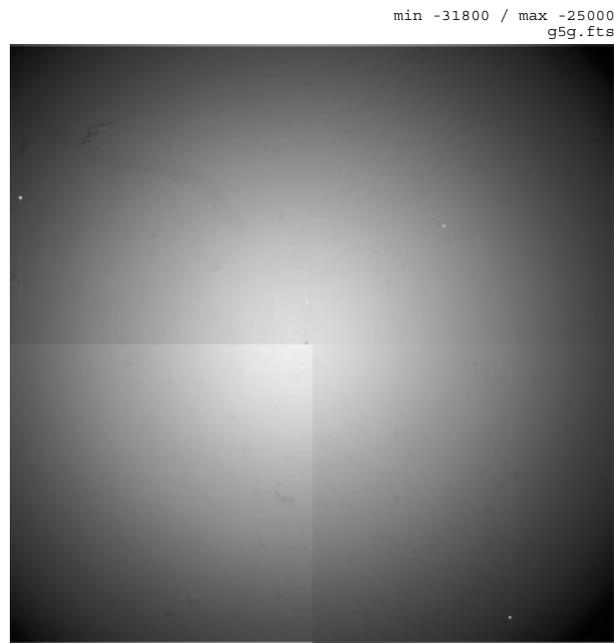
(630nm の分光放射強度が  $2.000 \times 10^{-6} [\text{W}/\text{sr m}^2 \text{ nm}]$  のとき)

また、ALIS で用いられているカメラでは、いくつかの CCD セルをまとめて (binning) 一つの画素として扱うことより感度をあげることができるが、この場合は  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  を対応する CCD セルに対して足し合わせ、 $D_i$  は平均をとることにより同様に画素値に対応する輝度を求めることができる。

1997 年 12 月に一つのカメラに対する前述の積分球を用いた較正画像の取得が行なわれた。この画像の一例を図 2.13 に示す。画像の隅が暗くなっているのは周辺減光等によるもので、画像の中央から縦横の十字にグレイレベルの差が見られるのは、画像を 4 分割してそれぞれ領域に含まれる CCD セルを担当している 4 つの AD 変換器の特性の差によるものと思われる。このカメラは第 4 回の共同観測において Merasjärvi で使用されたものである。露光時間は 0~10s、630nm の分光放射強度は  $0 \sim 10^{-5} [\text{W}/\text{sr m}^2 \text{ nm}]$  の間で変化させ、通過波長幅約 4nm、中心波長 428.5nm, 559nm, 631nm, 845.5nm の各波長のフィルタに対して較正画像を取得した。

これら画像の各画素毎に最小二乗法を適用しそこから得られた各係数は、フィルタの波長毎に値の大きさの違いはあっても、分布としてはほぼ同様なものとなった。例として 559nm のフィルタを使った場合の各係数の画像を図 2.14(a)~(d) に示す。(a) の CCD のオフセットに相当する画像中に見られる縦筋は、CCD セルの欠陥とそれによって引き起こされた画素の欠陥を示している。(b) の暗電流に関する画像は全体に 2 ~ 5 程度の画素値で、実際のオーロラ画像においては 1 ~ 3 秒程度の露光時間で 500 ~ 5000 ほどのダイナミックレンジを持つことが多いため、無視してもそれほどの影響はないものと思われる。また、(c) の積分球の放射輝度に依存し露光時間に関係しない項の画像は、(d) の感度に相当する画像とほぼ同様の分布をしている。(c) と (d) の画像の比はほぼ均一に 45ms 程となり、露光時間に関してわずかなずれが生じているものと思われる。右端の画像を見ると四隅の数十画素が中央付近の 1/100 程度の感度となっており、それらの画素については感度のないものとして扱う必要があると思われる。これらの各係数はノイズの影響を低減するため、欠陥を除いた後スムージングを掛けてから感度較正に利用する。

さらに、オーロラの代表的な波長 427.8nm(窒素分子イオン), 557.7nm(酸素原子), 630nm(酸素原子) に対して、フィルタ特性表より求めたフィルタの透過率及び、フィルタ特性表と積分球光源分光放射輝度特性表より求めた、630nm の分光放射輝度が  $2.000 \times 10^{-6} \text{W}/\text{sr m}^2 \text{ nm}$  ( $=6.343 \times 10^{12} \text{photons}/\text{s sr m}^2 \text{ nm}$ ) のときのフィルタを通過する単位時間単位面積単位立体角当りの光子数を R/sr で表したものを表 2.4 に示す。



(フィルタ: 559nm, 露光時間: 10s, 分光放射輝度:  $9.853 \times 10^{-7} \text{W/sr m}^2 \text{ nm}$  (630nm))

図 2.13: 積分球内壁を撮った校正画像例

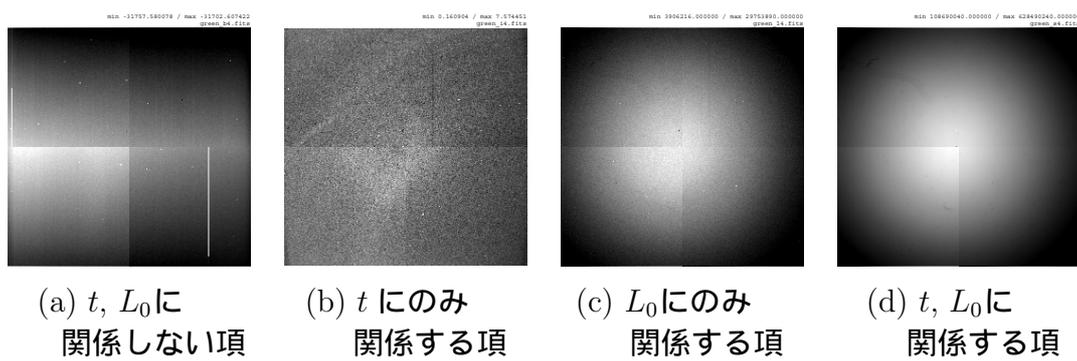


図 2.14: 校正画像から得られた各画素に対する係数を画像化したもの

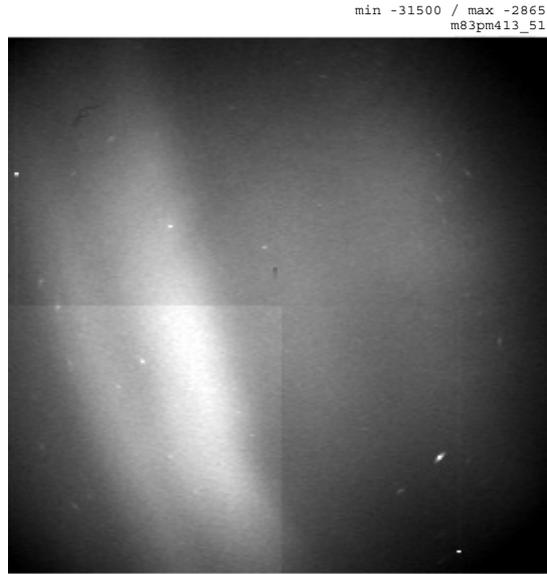


図 2.15: 630nm の観測画像例

例として、これらの数値から図 2.15 に示す 630nm のオーロラ画像のある画素に対応する方向の輝度を求めてみる。この画像は、2 秒間露光しており、 $4 \times 4$  の binning をして撮られているため  $256 \times 256$  のサイズである。オーロラのもっとも明るそうな点 (90,152) の画素値  $-28624$  count に対して、較正画像から得られた  $(A_i \int l(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \int_{\Omega_i} d\Omega)$ ,  $B_i$ ,  $(C_i \int l(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \int_{\Omega_i} d\Omega)$ ,  $D_i$  の各係数は、 $1.2893 \times 10^9$  count  $\text{m}^2 \text{sr nm/Ws}$ ,  $1.3978$  count/s,  $5.5135 \times 10^7$  count  $\text{m}^2 \text{sr nm/W}$ ,  $-31711$  count である。binning を行なう領域でそれほど値が変わらないとして、これらの値から、

$$\begin{aligned}
 & \frac{-28624[\text{count}] - 2[\text{s}] \times 1.3978[\text{count/s}] \times 16 - (-31711)[\text{count}]}{2[\text{s}] \times 1.2893 \times 10^9[\text{count m}^2 \text{sr nm/Ws}] \times 16 + 5.5135 \times 10^7[\text{count m}^2 \text{sr nm/W}] \times 16} \\
 & \cdot \frac{2242.768[\text{R/sr}]}{2.000 \times 10^{-6}[\text{W/sr m}^2 \text{ nm}] \times 0.8452} \\
 & = 95.786 \text{R/sr}
 \end{aligned}$$

のようにして輝度を求めることができた。これを全画素に対して行なうことにより、図 2.16 の様な絶対感度較正のなされた画像を得ることができる。

## 2.5 結び

本章では、オーロラの観測と、観測された画像の較正について述べた。

オーロラの観測の節では、オーロラトモグラフィで必要となる同期した複数方向からの画像を取得するシステムについて述べ、そのシステムから取得される画像の性質についても触れた。



図 2.16: 絶対感度較正された観測画像例

観測された画像の較正については、画素とその方向の較正の節と画素値と輝度の較正の節の二つに分けて述べた。方向に関する較正の節では、恒星の画像中の位置とその実際の方向の対応を利用した構成手法とその実際の手順について述べた。また、輝度に関する較正の節では、カメラ間の相対的な感度較正と、カメラ内の各画素の相対的な感度較正について述べた後、積分球標準光源を用いた各画素値の絶対的な感度の較正法を新たに定式化し、その実際の手順について述べた。

以上のようにして、各観測点の画像の範囲内で、空間中のどの方向からどの程度の光が来るのかを知ることができるようになった。

# Chapter 3

## オーロラ再構成手法

### 3.1 前書き

本章では、較正された多点観測画像からオーロラの発光強度分布を求めるまでの方法について説明する。

まずオーロラを空間的な発光強度分布として計算機上で表すためのモデルについて述べた後、その空間発光強度分布から画像への対応をとる方法、すなわち投影法について述べる。そして、いくつかの種類のオーロラ再構成手法について述べた後、再構成領域の制限法について述べることにする。

### 3.2 セルモデル

我々は、オーロラの発光強度分布を計算機上で表現するために、セルモデルという空間の発光強度分布を離散的に表すモデルを使用している。これは、空間を一定の大きさの領域に区切り、区切られた領域の一つ一つにその領域全体の発光強度として一つの値を与えて、オーロラの発光構造を表そうというものである。

具体的には、図 3.1 に示すように、地表のある 1 地点の鉛直方向を  $z$  軸とし水平面内の回転は任意とする  $xyz$  直交座標系において、それぞれの軸に対して一定の範囲をとるにより定まる直方体の領域を考え、これをセル全体の領域とする。そして、それぞれの軸の範囲を適当な数で均等に分割することにより定まる小直方体を一つのセルとする。この一つのセルは一つの発光強度の値を持ち、セル内で発光強度は均一であるとしている。また、直方体のセルの場合とほぼ同じであるが、 $z$  軸の方向を磁力線とほぼ同じ向きに傾けた斜四角柱のセルを用いる場合もある。

この方法はパラメータ数が多くなるものの、自由度が高くどのような発光形状でも表すことができるという特徴がある。

このセルモデルによる方法とは別に、適当なパラメータ数の少ない関数を組み合わせることによりオーロラの発光形状を表す方法もある。逆問題の解法として、このような関数のパラメータを求める方法は一般的に用いられている。しかし、オーロラトモグラフィに

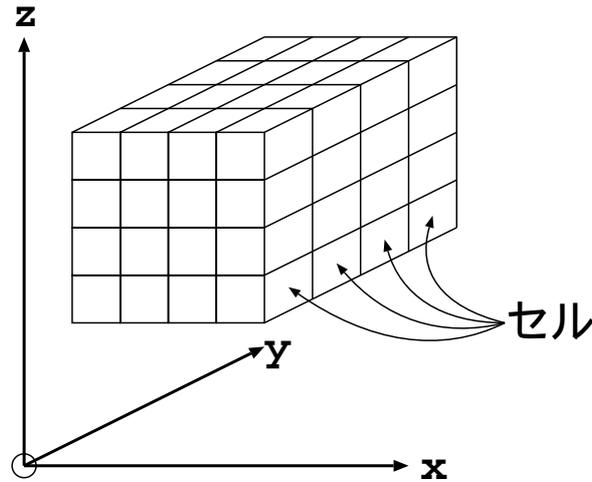


図 3.1: セルモデル (直方体セル)

対しては、先見的知識を利用してパラメータ数の少ない関数を設定すると、それがオーロラの発光形状の強い制約となるため、自由な発光形状を表すには向かなくなる。先見的知識を用いないスプライン関数のような関数を用いることもできるが、セルモデルとほぼ同数のパラメータ数が必要になると予想されるため、本論文では関数による発光形状の再構成には用いていない。

### 3.3 投影

オーロラの画像から、元のオーロラの発光強度分布を再構成するためには、画像と発光強度分布の対応をとる必要がある。オーロラ画像はオーロラ発光強度分布の投影であり、この投影の式は適当な仮定を置くことにより求めることができる。

大気や雲による減衰・散乱を無視し、画像中のある画素  $i$  の画素値  $g_i$  は較正されたものであり、そのまま画素  $i$  の視線方向の放射輝度を表すものとする。オーロラは超高層の現象であるため、画素  $i$  が空間に張る領域  $\Omega_i$  は、錐状の形状であるとみなせる。この錐状の領域  $\Omega_i$  で、カメラを原点とする位置  $r$  のオーロラの発光強度  $L(r)$  を積分し、領域  $\Omega_i$  の立体角で割ることにより、画素値 (=放射輝度)  $g_i$  は求められ、

$$g_i = \frac{\int_{\Omega_i} \frac{L(r)}{4\pi|r|^2} dV}{\int_{\Omega_i} d\Omega} \quad (3.1)$$

と表される。これが理想的な空間発光強度分布から画像への投影を表す式である。

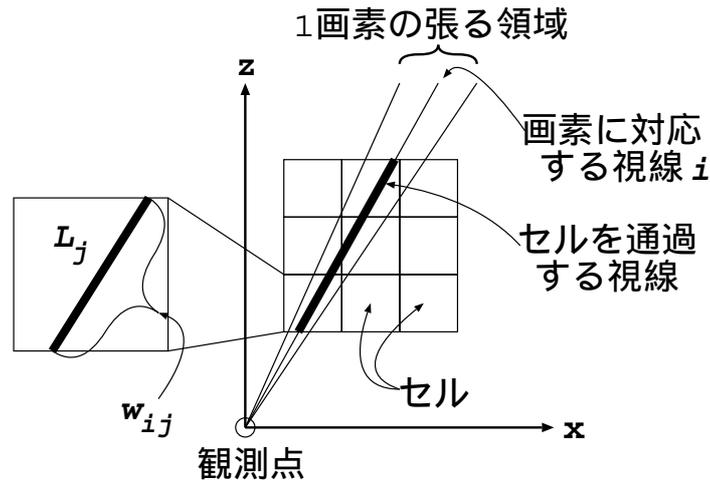


図 3.2: 線積分投影

この式 (3.1) をセルモデルに用いるためには、セルと画素の張る錐状の領域との交わりを求める必要がある。しかし、オーロラトモグラフィの際に厳密な交わりの計算を行なうのは、時間的・容量的なコストが掛かり過ぎると判断したため、より簡単に計算するための線積分投影とボリューム投影という二つの近似投影方式を考えた。

### 3.3.1 線積分投影

この方法では、発光強度の積分を行なう錐状の領域の立体角が十分小さいという仮定をおく。するとその領域内の  $|r|$  が一定の位置において、 $L(r)$  が一定とみなすことができる。そこで、 $r$  をカメラからの距離、画素  $i$  に対応する視線上の  $L(r)$  を  $L_i(r)$  とすると、

$$\begin{aligned} g_i &= \int_{\Omega_i} \frac{L(\mathbf{r})}{4\pi|\mathbf{r}|^2} dV / \int_{\Omega_i} d\Omega \simeq \int_{\Omega_i} \frac{L_i(r)}{4\pi r^2} dV / \int_{\Omega_i} d\Omega \\ &= \int_{\Omega_i} \int_0^\infty \frac{L_i(r)}{4\pi r^2} r^2 dr d\Omega / \int_{\Omega_i} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \int L_i(r) dr \end{aligned} \quad (3.2)$$

のようになり、画素値  $g_i$  を画素  $i$  に対応する視線上の線積分により表すことができる。

そして、セルモデルにおいて、 $w_{ij}$  を画素  $i$  に対応する視線と  $j$  番目のセルとの交わる距離とすると、

$$g_i \simeq \frac{1}{4\pi} \int L_i(r) dr \simeq \frac{1}{4\pi} \sum_j w_{ij} L_j \quad (3.3)$$

と書くことができる。これを図 3.2 に図示する。但し、 $j$  番目のセルの値を  $L_j$  としている。

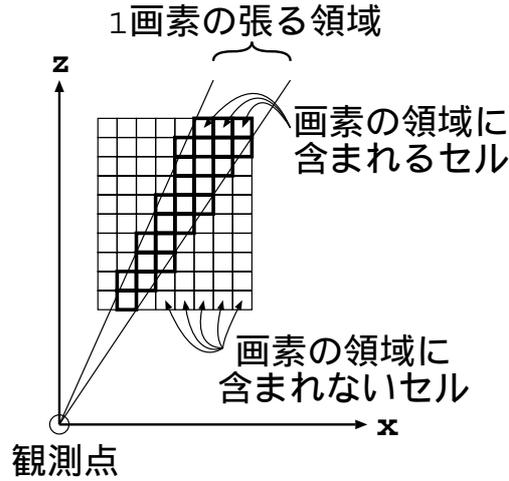


図 3.3: ボリューム投影

### 3.3.2 ボリューム投影

この方法では、画素の張る錐状の領域に比べて、セルの大きさが十分に小さいと仮定する。すると、図 3.3に示すように、錐状の領域に対して完全に含まれるセルと含まれないセルの二つにセルを分け、一部が錐状の領域に含まれるセルは存在しないものとする事ができる。そこで画素値  $g_i$  は、

$$g_i = \int_{\Omega_i} \frac{L(\mathbf{r})}{4\pi|\mathbf{r}|^2} dV / \int_{\Omega_i} d\Omega \simeq \frac{T}{4\pi \int_{\Omega_i} d\Omega} \sum_{j \in \Omega_i} \frac{L_j}{r_{ij}^2} \quad (3.4)$$

と表すことができる。ただし、 $T$ は一つのセルの体積を表し、総和は画素  $i$  の張る錐状の領域に含まれるセルについてのみ行なわれる。

さらに、

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{T}{(r_{ij})^2 \int_{\Omega_i} d\Omega} & (\text{セルが含まれる時}) \\ 0 & (\text{セルが含まれない時}) \end{cases} \quad (3.5)$$

のようにおけば、

$$g_i \simeq \frac{1}{4\pi} \sum_j w_{ij} L_j \quad (3.6)$$

と式 (3.3) と同様な形で表すことができる。

ボリューム投影を用いる場合、再構成において再構成結果の解像度を確保するため十分な数の画素を用い、その画素の張る錐状の領域を十分近似できる細かさでセルを配置すると、膨大な数のセルが必要となる。そこで、これを回避するため一つのセルをサブセルに分割することにする。つまり、発光強度を保持するセルの数は最小限にとどめて、仮想的に一つのセルが複数のサブセルに分割されるものとする。そして、分割されたサブセルは

同一の発光強度と均一な大きさを持ち、体積は分割数分の1となるとして、画素が張る錐状の領域へ含まれるか含まれないかの判別をこのサブセルの単位で行なうことにする。これによって、少ないセル数で適切に画素値への投影を行なうことができるようになる。

### 3.4 再構成手法の説明

前節で述べた投影手法は、3次元の分布である空間的な発光強度分布から、2次元の分布である画像を得るものである。これは順問題と呼ばれる種類の問題であり、空間発光強度分布が与えられれば画像は必ず求めることができ、一意かつ安定である。これに対して、本節で述べるオーロラトモグラフィにおける再構成手法は、複数の2次元の分布である画像から、3次元の分布である空間的な発光強度分布を再構成するものである。これは逆問題と呼ばれる種類の問題で、与えられる複数画像の状況によりこれを満たす空間発光強度分布の存在、一意性、安定性は保証されなくなり、難しい問題となる。

ある対象の投影から元の構造を推定する方法は、大きく代数的な手法と解析的な手法とに分けることができる。本節では、オーロラトモグラフィに適用可能かつ代数的な手法としてMART法、SIRT法、疑似逆マトリクス法を、同じく解析的な手法としてフィルタ付き逆投影法を説明する [32]。

この他にも、解析的な手法として、3次元の分布に対してそれを囲む球面上のあらゆる位置に観測点があり、平行な投影ではなくコーンビームの投影が得られている場合の再構成手法を公式化したPeyrinらの手法 [33] や、工藤らが示したシングルスキャン方式 (対象を囲む円周上に観測点を動かす方式) や、直交2重スキャン方式 (対象を囲む互いに直交する2つの円周上に観測点を動かす方式)、ヘリカルスキャン方式 (対象を囲んでつるまき螺旋状に観測点を動かす方式) で得られた錐状の投影から3次元の再構成を行なうトモグラフィ手法 [34, 35, 36] などがある。しかし、これらはX線CTのような非常に多数の観測点が存在する場合に対する手法であり、簡単なシミュレーションの結果オーロラトモグラフィに適さないと考えられたため、ここでは用いないことにした。また、代数的な手法で、パラメータ数のそれほど多くない関数を用いてオーロラを表し、観測画像に適合するようにパラメータを調整することにより元のオーロラの構造を推定しようとするモデル関数法 [37] という手法もあるが、3.2節でも述べたようにパラメータ数が少なければ関数の形状が再構成されるオーロラ発光構造を強く制限し、自由な発光形状が表し難く、パラメータ数が多ければ計算コストが大きくなり過ぎ、セルモデルの場合と比べてメリットがないと考えたためここでは用いないことにした。

また、対象をオーロラと限定することにより、磁力線に沿った発光といったオーロラ特有の性質を再構成の際に組み入れることが考えられる。そのために新たに提案した手法についてもここで説明する。

### 3.4.1 MART 法

MART 法とは、Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique の略で、ART[38, 39](Algebraic Reconstruction Technique) 法の一形態である。これは初期値から、

$$\widetilde{L}_j^{(k+1)} = \widetilde{L}_j^{(k)} \left( \frac{g_i}{\widetilde{g}_i^{(k)}} \right)^{\lambda \frac{w_{ij}}{\max_i(w_{ij})}} \quad (3.7)$$

で表される乗法的なセルの値の更新を各画素  $i$  に対し繰り返す手法である。但し、

$i$ :	画素 (もしくは対応する視線) の番号	$j$ :	セルの番号
$k$ :	更新回数	$g_i$ :	観測された画素値
$\widetilde{g}_i$ :	再構成されたセルから求められた画素値	$\widetilde{L}_j$ :	再構成されたセルの値
$w_{ij}$ :	視線 $i$ の画素値に対してセル $j$ が寄与する重み	$\lambda$ :	緩和係数

である。この更新により、 $g_i$  が  $\widetilde{g}_i^{(k)}$  よりも大きければこの視線に関わるセルの値が大きくなるように更新され、逆に  $g_i$  が  $\widetilde{g}_i^{(k)}$  よりも小さければ、この視線に関わるセルの値が小さくなるように更新される。この更新により、投影が画像に近づくようにセルの値が変更されていく。再構成に用いるすべての画素に対する更新をもって 1 回の反復とする。

緩和係数  $\lambda$  は MART 法の繰り返しにおける収束の速さを決める係数で、次章の 4.8 節で示すように、あまり大きな値にすると発散してしまう。本論文では、余裕のある値として 0.8 ~ 1.0 の値を使うことにした。

### 3.4.2 SIRT 法

乗法的 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 法は初期値から、

$$\widetilde{L}_j^{(k+1)} = \widetilde{L}_j^{(k)} \prod_i \left( \frac{g_i}{\widetilde{g}_i^{(k)}} \right)^{\lambda \frac{w_{ij}}{\sum_i w_{ij}}} \quad (3.8)$$

という更新を一つ一つのセルに対し行うものである。そして、すべてのセルについての更新をもって、一回の反復とする。

この乗法的 SIRT 法は、MART 法と似た方法であるが、一つのセルの値を更新する際にそのセルに関わるすべての画素値を同時に勘案して更新値を定めるという違いがある。これにより平均化の作用が生まれ、MART 法に比べてランダムノイズに強いという性質が期待される。

この乗法的な SIRT 法の他にも、Gilbert[40] の提案した、

$$\widetilde{L}_j^{(k+1)} = \widetilde{L}_j^{(k)} + \sum_i \frac{(g_i - \widetilde{g}_i^{(k)}) w_{ij}}{\sum_i w_{ij} \sum_j w_{ij}} \quad (3.9)$$

と表される加法的な SIRT 法や

$$\widetilde{L}_j^{(k+1)} = \widetilde{L}_j^{(k)} \left( \frac{\sum_i g_i w_{ij}}{\sum_i \widetilde{g}_i^{(k)} w_{ij}} \right) \quad (3.10)$$

と表される加法的な平均をとりセルの値を乗法的に更新する SIRT 法などがあるが、これらの SIRT 法を簡単なシミュレーションで比較した結果、収束の速度などから見て、最初に示した乗法的な SIRT 法を採用することにした。以降単に SIRT 法という場合、この式 (3.8) の乗法的 SIRT 法を指すことにする。

緩和係数  $\lambda$  については、次章の 4.8 節における結果から、MART 法の場合と同様に 0.8 ~ 1.0 の値を使うことにした。

### 3.4.3 疑似逆マトリクス

式 (3.3), (3.6) から、 $1/4\pi$  の項を左辺に移して、 $\frac{1}{4\pi}g_i$  を新しい  $g_i$  とし、再構成に用いる視線の数を  $m$ 、未知セルの数を  $n$  として、

$$\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_m)^T \quad (3.11)$$

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mn} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{L} = (L_1, L_2, \dots, L_n)^T \quad (3.13)$$

とおくと、

$$\mathbf{g} = \mathbf{wL} \quad (3.14)$$

のように書ける。ただし添字  $T$  は転置行列を表す。

この式は画像の情報が十分以上あるような  $m \geq n$  の場合、一般化逆行列を用いて、

$$\tilde{\mathbf{L}} = (\mathbf{w}^T \mathbf{w})^{-1} \mathbf{w}^T \mathbf{g} \quad (3.15)$$

のように解くことができる。しかし、本論文の場合、それほど多くの観測点が取れないため情報が十分でなく、解が不定である可能性もある。

そこで、式 (3.14) を満たすという条件を、

$$E = \sum_i (g_i - \sum_j w_{ij} \tilde{L}_j)^2 \quad (3.16)$$

として表されるエネルギー関数  $E$  を最小化するという問題に置き換えれば、少なくとも一つの解にたどり着くことができるはずである。

また、このエネルギー関数  $E$  に他の制約条件を入れることもできる。今回は、特定のセルに不必要に強い発光強度を与えないための条件として、

$$e = - \sum_j \left( \frac{\tilde{L}_j}{\sum_{j'} \tilde{L}_{j'}} \log_n \left( \frac{\tilde{L}_j}{\sum_{j'} \tilde{L}_{j'}} \right) \right) \quad (3.17)$$

で表されるエントロピー  $e$  を用いる。  $e$  は  $0 \sim 1$  の値を取り、偏りが大きいほど  $0$  に近い値を取り、分布が一様の際は  $1$  となる。  $W$  を重みのパラメータとして、エントロピー  $e$  を用いて、

$$E = \sum_i (g_i - \sum_j w_{ij} \tilde{L}_j)^2 + W(1 - e)^2 \quad (3.18)$$

のようにエネルギー関数を書けば、セルの投影が画像と等しくなるという条件の他に、エントロピーを最大化するという条件が入ることになる [41]。

ここではこの最小化問題を解くために、Levenberg-Marquardt 法 [42] を用いることにした。また、発光強度を表すセルの値  $L_j$  が  $0$  より小さくなることは有り得ないので、解の探索の際にセルの値が負となる試行を禁止することにより、セルの値が更新により  $0$  より小さくならないようにしている。

この方法は、エントロピー最大化のような制約を再構成結果に入れるのが非常に簡単であるという利点がある。しかし、セルの数すなわち未知数の数が多いため、計算量や計算時に使用するメモリ量が非常に大きくなる。このため計算機能力の都合上、現在のところ比較的セル数が少なくすむ 2 次元での場合にしか使用できない。また、この方法も初期値を必要とする。

### 3.4.4 フィルタ付き逆投影法

Radon によって数学的にラドン逆変換の厳密解が示されて以来、多くのアルゴリズムが提案されてきた。ここでは解析的な手法の一つとして、フィルタ付き逆投影法と呼ばれる方法について説明する。

この方法は、

$$\tilde{L}_j = \sum_i \frac{g_i w_{ij}}{\sum_{j'} w_{ij'} \sum_{i'} w_{i'j}} \quad (3.19)$$

のようにして、投影データを逆投影したものに対して、フーリエ変換を施し、波数空間上でフィルタ関数  $H(S)$  を掛けた後、フーリエ逆変換で元に戻す方法である。2 次元の投影に対して、フィルタ関数  $H(S)$  は Shepp-Logan のフィルタ関数、

$$H(\rho) = \begin{cases} \frac{2S_H}{\pi} \left| \sin \left( \frac{\pi S}{2S_H} \right) \right| & |S| \leq S_H \\ 0 & |S| > S_H \end{cases} \quad (3.20)$$

を用いる。  $S_H$  は遮断波数であり、投影サンプリング間隔で決まるナイキスト波数  $S_N$  より小さくしている。このフィルタ関数は、あらゆる方向からの均一な投影を対象とするものであるが、本論文ではそのまま用いることにした。

今回、このフィルタ付き逆投影はセル全体に対して行われるが、結果は視線の横切るセルのみで示し、評価される。

この手法は繰り返し法と異なり、計算量も比較的少ない方法である。しかし、もともとあらゆる方向からの投影が得られることを前提として、再構成結果を得る方法であるため、今回のような投影の方向が限られる条件下では、十分に信頼できる結果が得られない恐れがある。

### 3.4.5 p-近似

これまでに述べた再構成手法では画像からの情報のみを用いて発光強度を推定しており、オーロラの特性を利用していない。p-近似 (proximity average approximation) とは、オーロラが磁力線に沿うという性質を再構成の発光強度分布に制約として付加するために新たに提案する方法であり、オーロラの磁力線に沿ったプロファイルが近傍で似通ったものであるという仮定に基づいている。

鉛直方向を  $z$  軸とした  $xyz$  直交座標系に対して、 $z$  軸を磁力線方向を傾けた  $x'y'z'$  座標系を考える。その座標系で、再構成された発光強度分布が  $L(x', y', z')$  と表される時、水平面内の近傍を  $\Delta x'$ ,  $\Delta y'$  で表すとして、p-近似は、

$$\tilde{L}^{(k+1)}(x', y', z') = \frac{\int_{-\Delta x'}^{\Delta x'} \int_{-\Delta y'}^{\Delta y'} \tilde{L}^{(k)}(x' + u, y' + v, z') du dv \int_0^{\infty} \tilde{L}^{(k)}(x', y', w) dw}{\int_{-\Delta x'}^{\Delta x'} \int_{-\Delta y'}^{\Delta y'} \int_0^{\infty} \tilde{L}^{(k)}(x' + u, y' + v, w) dudvdw} \quad (3.21)$$

という更新で表される。

この方法は、セルモデルに対して図 3.4 に示すように、

1. あるセルに対して、そのセルの中心を通る磁力線に沿ったプロファイルと、その近傍のセルに対する同様なプロファイルを取り出す。
2. それらを平均化した新しいプロファイルを作成する。
3. そのセルに対する磁力線に沿ったプロファイルの積分値と、新しいプロファイルの積分値が等しくなるように、新しいプロファイル全体の大きさを調整する。
4. 大きさを調整した新しいプロファイルの、そのセルと等しい高さの値を、新しいセルの値とする。

という手順で、セル値の再配分をそれぞれのセルに対して行うものである。

これにより、p-近似を行う前のセルの値の分布にできるだけ近い形で、磁力線に沿ったプロファイルの形状が平均化され、セルの値の分布がより磁力線に沿う形になる。

p-近似はセル値の分布に一定の偏りを与える修正法で、その投影が画像と等しくなるかは考えていない。したがって、たとえ p-近似前のセルの値が画像の条件を満たしていたとしても、p-近似後のセルの値は条件を満たさなくなる。そこで、図 3.5 に示すように、他の MART 法・乗法的 SIRT 法や擬似逆マトリクス法のような手法による再構成結果に対して p-近似を用い、その結果を初期値として再び MART 法等の再構成手法を用いる。この繰り返しにより、磁力線に沿ったプロファイル形状が近傍で似通ったものとなりながら、画像の条件をも満たすような解にセルの分布が漸近する。

p-近似という方法は繰り返し法と共にしか使えないが、比較的弱い仮定で磁力線に沿う性質を導入でき、また平均化の過程で画像のノイズの影響を少なくすることが期待される。

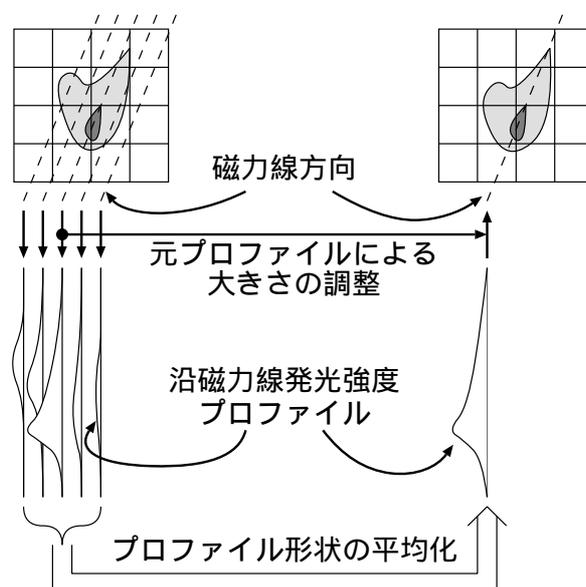


図 3.4: p-近似の説明

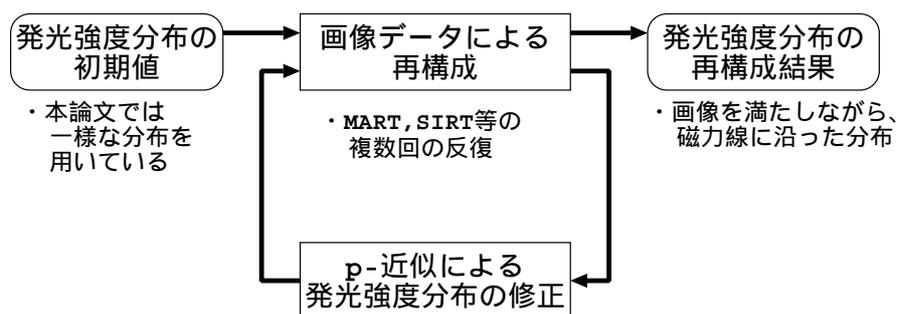


図 3.5: p-近似の再構成手法への組み入れ

## 3.5 再構成領域の選択

ここでは、再構成に用いる画像中の範囲と再構成される空間の領域を制限する方法について述べる。

もともと何 1000km にも広がることのあるオーロラを、地上からの、しかも全天カメラでないカメラですべてとらえることはできない。そういった意味でオーロラの再構成される範囲は限定されるが、さらに再構成される領域でより正確な発光強度分布を得るために、以下のような制限を加える。

まず、2次元の平面内の分布で考えてみる。図 3.6に示すように、A, B の 2 点の観測点があり、弧で示す範囲が画角で、観測点から伸びる実線で挟まれた範囲を観測しているとす。これに対して図中の (1) のような位置にオーロラがあるとする。このオーロラは、東西に伸びるカーテン状のオーロラを南北に断ち切った断面を模擬している。(1) のオーロラのみ存在する場合には、発光の範囲は 2 つのカメラによって限定することができる。しかし、図中の (2) や (3) のような位置にオーロラがある場合には、これらのオーロラは一つのカメラからしか見えておらず、カメラからの視線に沿った奥行き方向の分布の情報は存在しないため、発光の範囲を限定することができない。(2) や (3) の場合のような、1 つのカメラからしか見えていない領域に発光があり、その発光範囲を限定することのできないオーロラをゴーストオーロラと呼ぶ。

このゴーストオーロラを避けるため、例えば図 3.6の (2) もしくは (3) のどちらかのオーロラのみ存在する場合には再構成を行なわないことにする。また、例えば (1) と (2) の両方のオーロラがある場合には、A から伸びる点線で示すように (1) のオーロラのみを含むように A からの範囲を限定し、再構成は (1) のオーロラに対してのみ行なうことにする。すると、(2) のオーロラの再構成はできないが、(1) のオーロラに関しては単独の場合と同様の再構成ができる。しかし、図 3.6の (1) と (3) の両方のオーロラが存在する様な場合、B から伸びる一点鎖線で示すように、(1) と (3) のオーロラが重なりあって観測されてしまい、これらを分離することはできない。(1) のオーロラに比べて (3) の非常に発光が弱いなど、(3) のオーロラの影響が無視できる場合はそのまま再構成を行なうが、そうでない場合は何か特別な制約を課すことができない限り再構成はできないものとする。

次に 3次元の場合について考えてみる。アーク状オーロラの場合、地平線の端から天空を横切って別の地平線の端に向かうように発光し、実質上一つの方向には無限長である対象として扱う必要があることが多い。この無限長となる方向に沿わない 2 つの観測点に対しては、それらの観測点のなす一つのエピポーラ平面上で発光が有限の範囲に収まり、先ほど述べた 2次元の場合と同様に扱うことができる。この限定された範囲をもつエピポーラ平面の集合で、図 3.7に太線の範囲で示すような共通視野領域を設定すれば、この領域の発光はすべて 2 つのカメラから観測されており、その部分のデータには領域外の発光は含まれないことになる。

また、3点以上の観測点がある場合には、そのうちの任意の 2 点に対して以上に述べたような再構成領域と画像の範囲の制限を行ない、それらの和をとることにする。これにより複数の観測点からの画像を使った再構成において、一つの観測点からしか観測されない領域が再構成結果に含まれることを排除することができる。

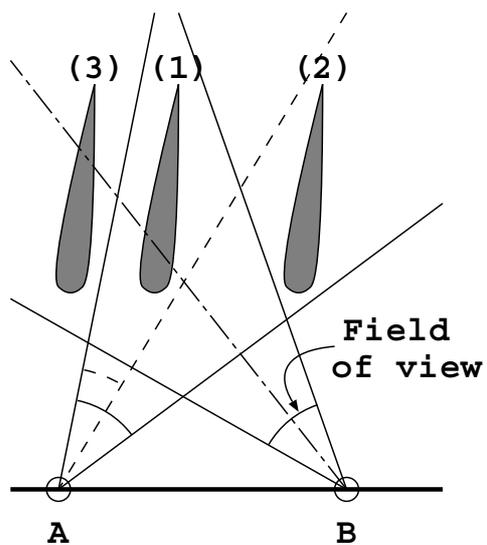


図 3.6: ゴーストオーロラ

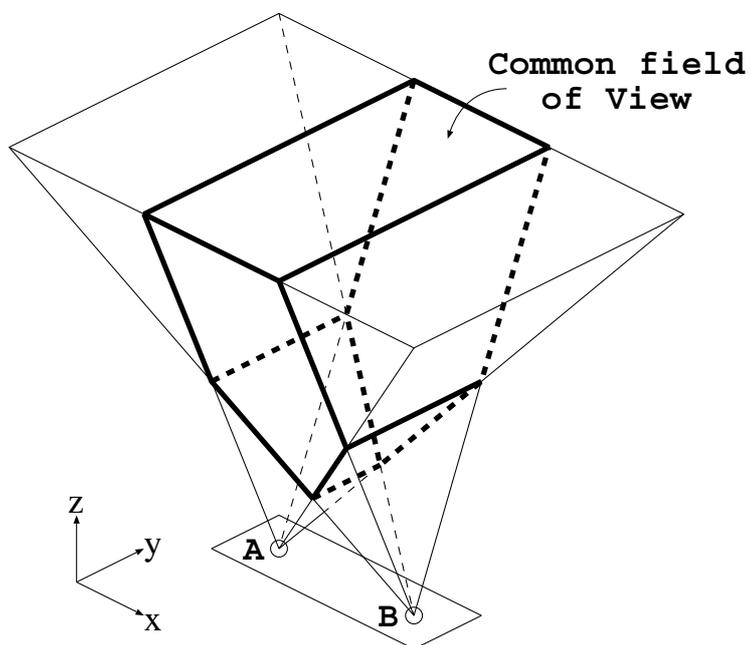


図 3.7: 三次元空間内での共通視野領域

もちろん、このような画像の領域と再構成領域の制限を行なわなくても再構成を行なうことはできる。しかし、再構成領域に信頼性のほとんどない領域が生じるため、これを排除しなければ結果を正当に評価することができなくなる可能性がある。それならば、最初からそのような領域が生まれないように制限を加えるのが妥当であると考え、以降の再構成においてはすべてこの再構成領域の制限を行なうこととする。

## 3.6 結び

本章では、投影から元の分布を再構成する手法について述べた。これらの再構成手法の中で、SIRT法は Gilbert の提案した方法に独自の修正を加えた方法であり、 $p$ -近似は新たに提案する方法である。ここで述べた投影や再構成の複数の方法にはそれぞれの長所と短所があるが、次の章でそれらを明らかにすると共にオーロラトモグラフィに適した方法を探ることとする。

また、再構成領域の選択に関しては、新たに提案するものであるが、以降の再構成においてもこれを適用することによって生じる不都合は全くなく、信頼性のない再構成領域を排除することができるため、有効な方法であると考えられる。



# Chapter 4

## 計算機シミュレーションによる再構成手法の検討

### 4.1 前書き

本章では、前章で述べた手法を用いてオーロラ再構成の計算機シミュレーションを行なう。まず、シミュレーションの手順等について述べた後、さまざまなシミュレーションを行ないオーロラトモグラフィに適した手法について検討する。また、観測点の配置や数を変化させた場合の再構成のシミュレーションを行ない、どのように再構成に影響するかについても検討を行なう。

### 4.2 シミュレーション手順

再構成のシミュレーションは、次のような手順で行なわれる。

1. モデルオーロラの作成
2. 投影による疑似観測画像の生成
3. サンプリング (画像範囲の限定)
4. 再構成解析
5. 再構成結果とモデルオーロラとの比較

図 4.1 に、この再構成シミュレーション手順を、実際の観測画像から再構成手順と比較して図示する。実際の画像からの再構成と同じ手順にするため、シミュレーションにおいても再構成解析時は画像のみのデータを使い、モデルオーロラのデータは画像を生成する時と再構成結果を検討するためにのみ用いている。

まず、モデルオーロラの作成について述べる。

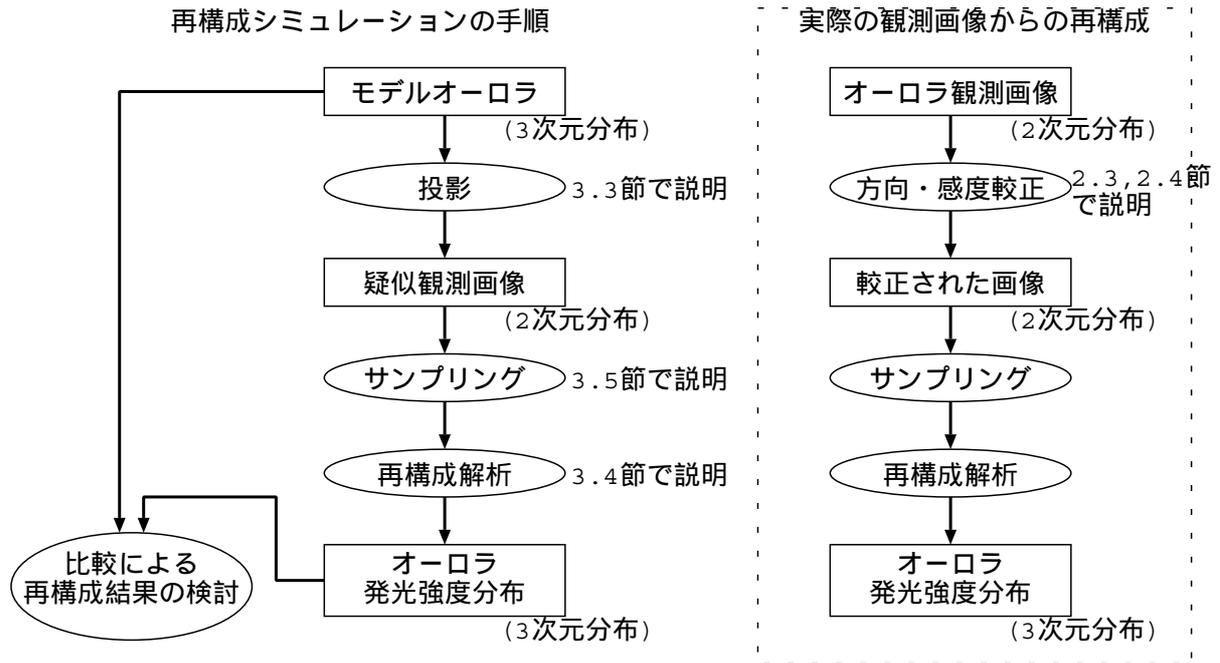


図 4.1: 再構成シミュレーションの手順

図 4.2に示すような、 $z$ 軸を磁力線方向を傾けた  $(x', y', z')$  座標系を考える。 $x$  方向を南、 $y$  方向を東、 $z$  軸を鉛直方向とする  $xyz$  直交座標系に対してこの  $(x', y', z')$  座標系は、

$$x' = x + z \tan \theta \cos \phi \quad (4.1)$$

$$y' = y - z \tan \theta \sin \phi \quad (4.2)$$

$$z' = z \quad (4.3)$$

と表される。ただし、 $(\theta, \phi)$  は、磁力線方向を地平座標で表したものである。これらの座標系の原点は、本論文では適当な地上の観測点としている。モデルオーロラをできるだけ簡単な数式で表すため、モデルオーロラの空間発光強度分布を表す Luminosity 関数  $L(x, y, z)$  をこの  $x'y'z'$  座標系で、

$$L(x, y, z) = L(x', y', z') = L_{\text{horizontal}}(x', y') L_{\text{altitude}}(z') \quad (4.4)$$

のように、水平方向の分布を表す関数  $L_{\text{horizontal}}(x', y')$  と磁力線に沿った方向の分布を表す関数  $L_{\text{altitude}}(z')$  に分解する。

水平方向の関数は、例えばカーテン状をしたアークオーロラの場合、

$$L_{\text{horizontal}}(x', y') = A \exp\left(-\frac{x'^2}{\sigma^2}\right) \quad (4.5)$$

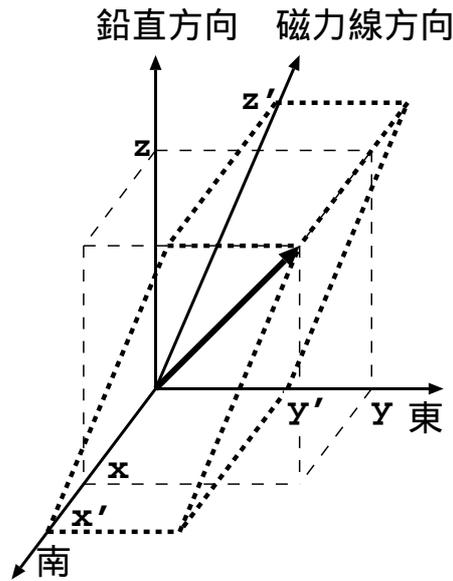


図 4.2:  $(x, y, z)$  座標系と  $(x', y', z')$  座標系の関係

の様に単純な一定強度で直線状の形状を持つものから、適当な 2 つのスプライン関数  $\text{spline}_A(y')$ ,  $\text{spline}_B(y')$  を用いて、

$$L_{\text{horizontal}}(x', y') = \text{spline}_A(y') \exp\left(-\frac{(x' - \text{spline}_B(y'))^2}{\sigma^2}\right) \quad (4.6)$$

の様に強度と位置に関して多少の複雑さを持たせたもの、さらに変形や回転を掛けるなどして、より複雑な形状を持たせたものなどを用いている。

磁力線に沿った分布を表す関数は、チャップマン型の関数を元に Banks ら [43] の計算に適合するように変形した関数、

$$L_{\text{altitude}}(z') = \begin{cases} \exp\{1 - p_2(z' - p_1) - \exp(-p_2(z' - p_1))\} & (z' < p_1) \\ \exp\{-\sqrt{p_3(z' - p_1)}(1 - \exp(-\kappa p_3(z' - p_1)))\} & (z' \geq p_1) \end{cases} \quad (4.7)$$

を用いる。ただし、

- $p_1$ : オーロラの最大発光強度となる高度
- $p_2, p_2$ : オーロラの上下の幅のパラメータ
- $\kappa$ : Banks らの計算結果に合わせるための定数

である。

次に疑似観測画像の生成について述べる。

まず空間にセルを設定し、各セルの値をモデルオーロラの Luminosity 関数により設定する。また適当な観測点を設定し、これまでの観測で得られたカメラ特性やそれを模擬し

たものを用いて画素とそれが指す視線の対応を定める。そして設定されたセルを式 (3.3), (3.6) に従って各画素に投影する。その際、必要に応じてバイアスとして一定値を加えたり、式 (2.4) 等による周辺減光を掛けたりする。また、ノイズを加えることもある。

サンプリングの段階では、3.5節で述べたように画像の利用する領域を制限し、その領域中の画素値をその画素の指す視線方向と対応付けしながら取り出す。その際、画素値の数が多くなり過ぎないように、再構成に十分なだけの数の画素値を間引いて取り出している。

再構成では、サンプリングで取り出した画素値を用いて、3.4節で述べた方法を用いて再構成する。この時 3.5節に述べたようにして再構成を行なうセルの領域も制限する。

最後に、再構成結果とモデルオーロラとの比較について述べる。

これは、シミュレーションなどにおいて再構成した結果を評価し、用いた手法がどの程度の信頼性を持つのかなどについて検討するためのものである。再構成結果の評価については次の二つの指標を用いる。一つは、モデルから得られた画素値  $g_i$  と再構成結果から得られた対応する画素値  $\tilde{g}_i$  とを用いて、

$$R_{es} = \sqrt{\frac{\sum (\tilde{g}_i - g_i)^2}{\sum g_i^2}} \quad (4.8)$$

と表されるグレイレベル残差  $R_{es}$  である。もう一つは、再構成したセルの値  $\tilde{L}_j$  とモデルオーロラから取り出した対応するセルの値  $L_j$  とを用いて、

$$C_{or} = \frac{\sum_j \tilde{L}_j L_j \sum_j 1 - \sum_j \tilde{L}_j \sum_j L_j}{\sqrt{\sum_j \tilde{L}_j^2 \sum_j 1 - (\sum_j \tilde{L}_j)^2} \sqrt{\sum_j L_j^2 \sum_j 1 - (\sum_j L_j)^2}} \quad (4.9)$$

と表されるセル相関  $C_{or}$  である。

グレイレベル残差  $R_{es}$  は 0 に近いほど再構成されたセル分布の観測点への投影が観測画像に近いことを示し、セル相関  $C_{or}$  は 1 に近いほど再構成されたセルの分布がモデルオーロラに近いことを示す。

以降の再構成のシミュレーションはすべてこの手順で行ない、その評価はセル相関やグレイレベル残差と次の章で述べるような発光強度分布をグラフ化・画像化したもので行なうことにする。

### 4.3 再構成結果等の表示方法

再構成された結果は、2次元もしくは3次元の分布となる。2次元の場合は良いが、3次元の場合は紙上にそのまま表すことはできない。そこで、3次元の発光強度分布を断面図もしくは適当な方向への投影で表すことにする。

例として、水平方向の分布関数を、

$$L_{\text{horizontal}}(x', y') = \exp\left(-\frac{(x' - \frac{y'^2}{500.0} - 20.0)^2}{3.0^2}\right) \quad (4.10)$$

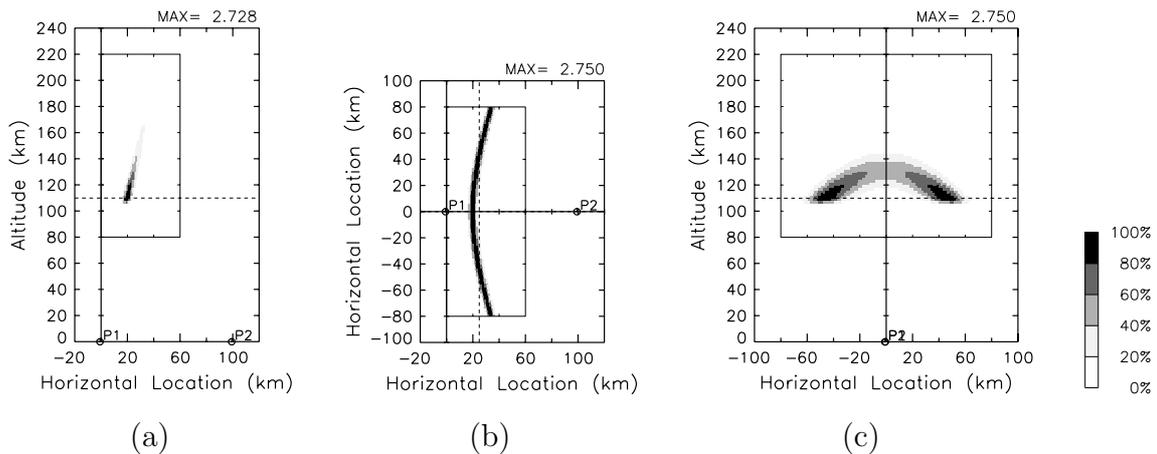


図 4.3: 断面図の説明

とし、磁力線方向の関数を式 (4.7) で、 $p_1 = 110.0$ ,  $p_2 = 4.0$ ,  $p_3 = 35.0$  とした Luminosity 関数の値を、 $x$  軸が  $0 \sim 60\text{km}$ ,  $y$  軸が  $-80 \sim 80\text{km}$ ,  $z$  軸が  $80 \sim 220\text{km}$  の範囲を  $60 \times 100 \times 70$  に分割したセルに代入し、断面図で表したものを図 4.3 に示す。

この図 4.3 は、ある観測点 P1 を原点とする  $(x, y, z)$  直交座標系で  $(25, 0, 110)$  と表される位置を通る、互いに直交する 3 つの平面上の発光強度分布を、その平面上の最大発光強度を 100% とする濃淡で表したものである。それぞれ図中の内側の細線で描かれた長方形がセルを設定した範囲を示している。図 4.3(a) と (c) は鉛直面で横方向の点線は (b) が交わる位置を示す。(b) は水平面であり、この図では軸と重なっている横方向の点線が (a) と交わる位置を、縦方向の点線が (c) と交わる位置を示している。また、それぞれの図の P1 などと書かれている点は、観測点の位置をそれぞれの平面に垂直に投影したものである。セルは鉛直軸に対して回転することがあるため常に正しいわけではないが、多くの場合 (a) の左側が北、(b) の左側が北で上が東、(c) の左側が西となっている。

2次元の分布を濃淡図で表す場合は (a) のタイプのみを示し、3次元の分布の場合にも (c) のタイプを省略することがある。

また、同じモデルオーロラを視覚的に表現するために、適当な方向への遠近のある投影図で表すと、図 4.4 のようになる。この投影で仮定したカメラの方向特性は  $\tan \theta$  であるが、周辺減光はないものとした。図中には、領域制限前のセルの範囲を直方体の色の薄いワイヤフレームで示しており、この直方体の下側の面をなすワイヤフレームから伸びるように、地理的北の方向を指す矢印と N のマークを描いている。

この図 4.4 において、(a) は上から見下ろしたものの、(b) は南側から見上げたものの、(c) は西側から見上げたものである。緩く弧を描く単層のアーチ状のオーロラが表されていることが分かる。また、(a) の上方、(b) の下方、(c) の左方に地理的北を示す矢印の方向は向いており、矢印の接する面がセルの下側の水平面である。

断面図は、その表示した面上の発光強度分布の様子は良く分かるが全体の分布を掴み難

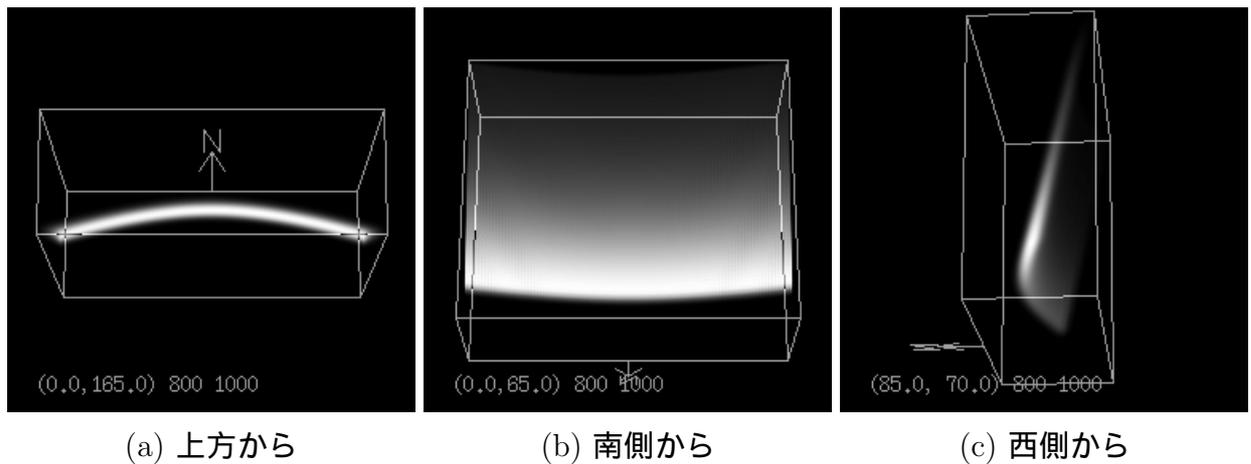


図 4.4: 各方向から見た投影図の例

く、投影図では、全体は様子は分かりやすいが複数のオーロラが重なった場合などに細かい分布の様子が分かり難くなることがある。以降においては、これらの表示法を適宜選択していくことにする。

#### 4.4 2次元でのシミュレーションによる各手法間の比較

ここでは、鉛直エピソード平面を想定した2次元の分布に対して複数の手法による再構成のシミュレーションを行ない、4.2節で述べた評価法によりオーラトモグラフィに適した手法を選択することにする。3次元の分布に対する再構成に比べて、2次元の分布の場合は少ない時間と計算機容量で再構成を行なうことができるため、このような比較に適している。

まず、図 4.5に示すような3種類の位置にあるアーク状のオーロラ断面を模擬した分布に対して、直線上に並んだ3点の観測点で観測した場合を考える。これらのモデルオーロラは、観測点に対する位置こそ異なるが、すべて同じ構造をしており、発光強度が最大となる高度は110kmとなっている。このモデルオーロラの発光強度の値を収める一つのセルの大きさは2km×2kmとした。配置Aは観測点の一つの磁気天頂にオーロラが出現する場合で、その観測点からの画像によりオーロラカーテンの厚さを特定することができるため、もっとも良い再構成が期待される。配置Bはオーロラを貫く磁力線のフットポイントが観測点によって挟み込まれるようになっている場合で、オーロラカーテンの両側からデータが取得できるため、比較的良い再構成が期待される。配置Cはオーロラを貫く磁力線のフットポイントが観測点群から外れたところにある場合で、オーロラカーテンの片側からしかデータが取得できないため、他の場合ほど良い再構成は期待できない。

2次元のセル値の分布から1次元の画像に相当するデータを生成する投影手法としては、線積分投影を用いることにした。配置A~Cの各分布は、図 4.5中でP1~P3と示した位置

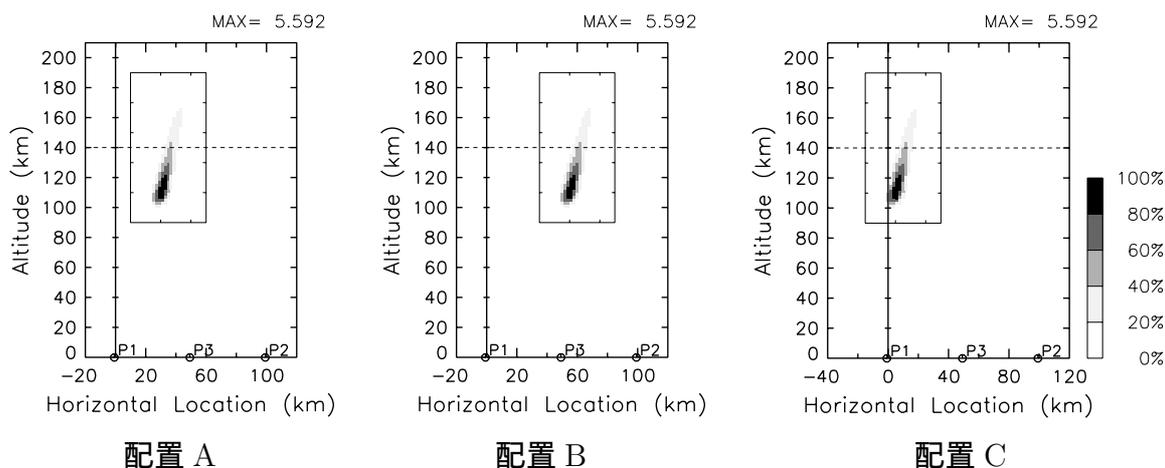


図 4.5: 再構成に用いるオーロラモデルと観測点

にある 3 つの観測点から、 $0.2^\circ$ 毎に投影がサンプリングされた。このデータからモデルの場合と同じ  $2\text{km} \times 2\text{km}$  のセルを用いて再構成を行なった。

再構成には、次の 6 種類の方法を用いた。

1. フィルタ付き逆投影法。式 (3.20) におけるフィルタの遮断波数  $S_H$  は  $0.2(\text{km}^{-1})$  とした。
2. MART 法。緩和係数  $\lambda$  は、0.8 とした。
3. SIRT 法。緩和係数  $\lambda$  は、0.8 とした。
4. 擬似逆マトリクス法。エントロピーの制約はいれない。「制約なし」と表記する。
5. 擬似逆マトリクス法。エントロピーの制約をいれ、重み  $W$  を  $10^3$  とした。「制約-中」と表記する。
6. 擬似逆マトリクス法。エントロピーの制約をいれ、重み  $W$  を  $10^5$  とした。「制約-強」と表記する。

最後の 2 つの方法における重み  $W$  は、式 (3.18) においてエントロピー最大の条件をグレイレベル一致の条件に対してバランス取らせるための係数で、この値が大きいほどエントロピーをより大きくする方向へセルの値が更新されることになる。

これらの 6 種類の方法の内、フィルタ付き逆投影法以外の方法は繰り返し法であるため、セルの初期値を必要とし、ある程度の反復を行った後にこれを打ち切らねばならない。ここでは、初期値としてセルには均一な値 (具体的には 1.0) を与え、32 回の反復の後に打ち切ることとした。

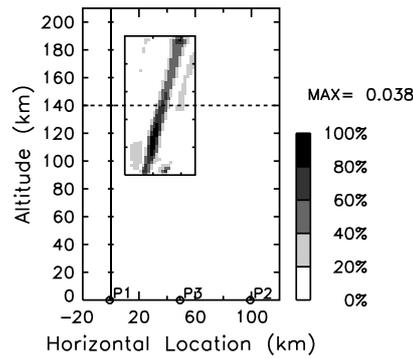


図 4.6: フィルタ付き逆投影法による再構成結果 (配置 A)

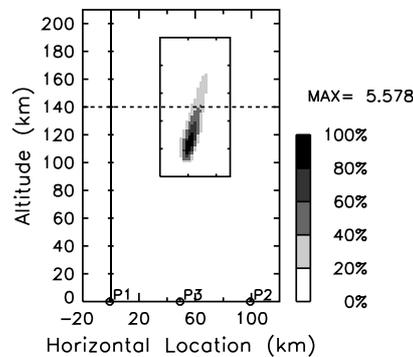


図 4.7: MART 法による再構成結果 (配置 B)

再構成結果の内、例として配置 A でのフィルタ付き逆投影法の結果を図 4.6に、配置 B での MART 法の 32 回の繰り返し後の結果を図 4.7に、配置 C での擬似逆マトリクス法 (制約-中) の結果を図 4.8にそれぞれ示す。また、各配置別に反復回数-セル相関を再構成手法毎にグラフにしたものを図 4.9に、各配置別に反復中のグレイレベル残差-セル相関をグラフにしたものを図 4.10に、各配置-再構成後のセル相関をグラフにしたものを図 4.11にそれぞれ示す。ただし図 4.9, 4.10 では縦軸のスケールがそれぞれ異なっている。

図 4.6~4.8の再構成結果の濃淡図による表示を、図 4.5の対応するモデルの図と比較すると、図 4.6、図 4.8、図 4.7の順に後のものほどモデルと相似なものとなっているが、これは図 4.11から読み取ることのできるセル相関値と対応していることが分かる。またここでは示さないが、グレイレベル残差についても同様に、モデルオーロラから得られる疑似観測画像と再構成されたオーロラから得られる疑似観測画像との相似性に対応していることが分かっている。よって本節では、これらグレイレベル残差とセル相関の値もしくはそのグラフのみで議論を行うことにする。

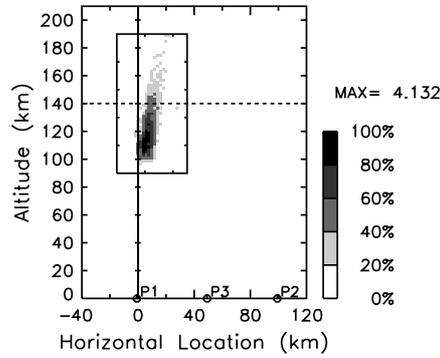


図 4.8: 擬似逆マトリクス法 (制約なし) による再構成結果 (配置 C)

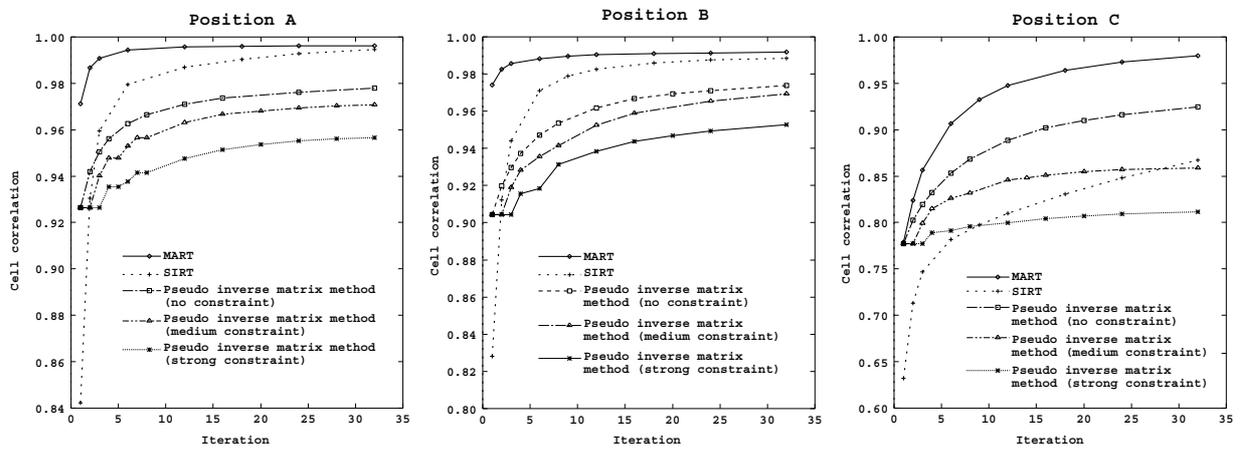


図 4.9: 配置 A, B, C での反復回数-セル相関の関係

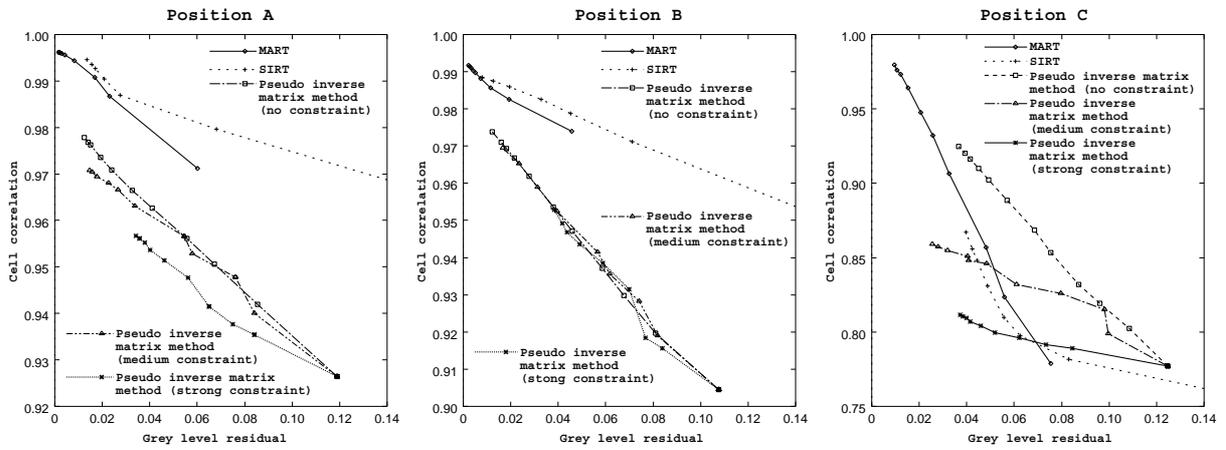


図 4.10: 配置 A, B, C でのグレイレベル残差-セル相関の関係

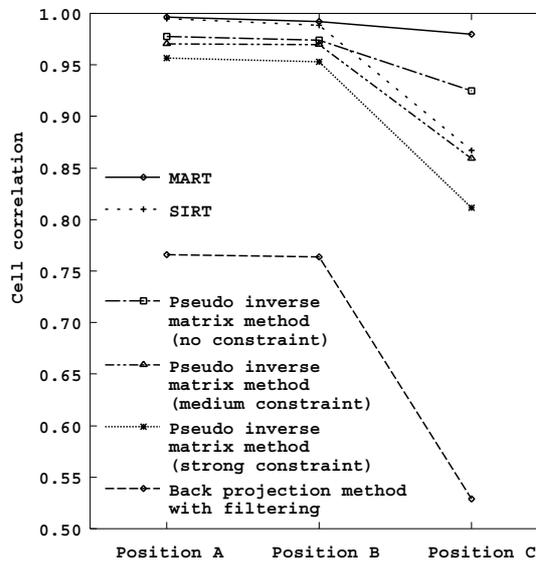


図 4.11: 配置による再構成結果の違い

まず、図 4.9の反復回数-セル相関のグラフは、繰り返し法の収束の様子を示している。反復回数の少ない時点でセル相関が大きくなるものほど収束が速いものであり、計算時間の観点からは収束が速い方が望ましいといえる。

配置 A と配置 B では大体似通った傾向を示し、MART 法は非常に収束が速いが、それに対して他の方法は収束により多くの反復回数を必要としている。また、全体に配置 A より配置 B の方が、収束が遅くなっている。配置 C に関しては、どの方法も 32 回の繰り返し回数ではまだ十分に収束しているとはいえないが、そのなかでも特に SIRT 法の収束が遅くなっている。これは、配置 C ではオーロラのカーテンの片側からしかデータがなく、オーロラの形状に関する決定的な情報を欠いているためと思われる。

次に、図 4.10のグレイレベル残差-セル相関のグラフからは、繰り返しに対してグレイレベル残差を小さくしていく各再構成手法の軌跡を外挿し、グレイレベル残差が 0 となるところでセル相関がどのような値となるかを見ることによって、その手法を用いて多くの反復を行った場合にどの程度の再構成ができるかを類推することができる。

MART 法と SIRT 法は似通った再構成手法であるためか、どの配置でも同じような軌跡をたどっている。配置 B ではどの手法も大体同じセル相関の値へと向かっているが、配置 A では、MART 法・SIRT 法が擬似逆マトリクス法より幾分セル相関値の大きいところに向かっている。これは、MART 法・SIRT 法の性質がシミュレーションに用いたモデルの性質と合致したためと思われる。配置 C では、MART 法・SIRT 法・擬似逆マトリクス法(制約なし)のグレイレベル残差-セル相関のグラフの軌跡が、同じようなセル相関値へと向かっているのに対し、擬似逆マトリクス法の制約-中・強がそれぞれ別のセル相関値へと向かっていることが示されている。これは、情報量が少ないため解が一意に定まらず、多様なセルの値を解として持つことができるためと考えられる。

最後に、図 4.11に示す配置別セル相関のグラフは、本章のシミュレーションにおける各再構成手法の結果の良否を示している。セル相関値が大きい方が、モデルオーロラと再構成されたオーロラが相似であり、望ましい結果が得られていると判断できる。

これも、配置 A と配置 B は大体似通った傾向を示し、MART 法・SIRT 法がもっとも良く、次に擬似逆マトリクス法の制約なし・制約-中が続き、少し擬似逆マトリクス法の制約-強がそれより下回った値となっている。フィルタ付き逆投影法は、他に比べてかなり小さなセル相関値となっている。配置 C では、各手法間のセル相関値の違いが大きい。また、MART 法は他に比べて非常に良い値となっているが、SIRT 法は擬似逆マトリクス法の制約なしを下回っている。ただ、先に述べたように、これは SIRT 法の収束が遅いためであり、より多くの反復を行えば、擬似逆マトリクス法とほぼ等しいセル相関となると考えている。配置 C でも、フィルタ付き逆投影法は他に比べてさらに小さいセル相関値となっている。擬似逆マトリクス法の中では、全体として制約なしがもっとも良く、制約-中、制約-強の順となっているが、これはエントロピーを大きくするという制約が今回のモデルのような磁力線に沿う発光強度分布に対しては、必ずしも適合しないということによると考えられる。

全体としてみると、MART 法がもっとも良い結果を与え、SIRT 法がこれに続いている。また、擬似逆マトリクス法は、エントロピーによる制約がない場合、多数回の反復後には MART 法と同等程度の再構成結果を得ることができそうであるが、収束するには非常に多

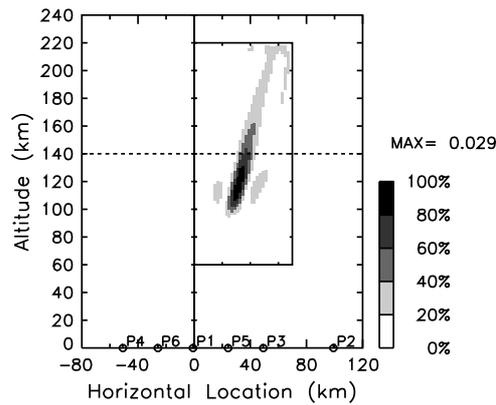


図 4.12: 観測点を 6 点に増やした場合のフィルタ付き逆投影法による再構成結果

くの繰り返しを必要とするようである。

フィルタ付き逆投影法では、他に比べてあまり良い結果が得られていない。これは、今回のような観測点数の少ない場合に多数の方向への投影を必要とする手法を適用したからである。図 4.12 に示すように、観測点数を増やせば結果はかなり改善されることが分かる。ただ、図に示したような 6 点の観測点からのデータを用いた場合にも、セル相関は 0.91 程度とそれほど高い値とはならなかったことから、このフィルタ付き逆投影法はオーロラモグラフィに対して今のところ実用的ではないと考える。

また、観測点とオーロラの位置関係が再構成に重要な影響を与えることも確認された。

## 4.5 p-近似による再構成の改善

p-近似とは、3.4.5 節で述べた沿磁力線発光強度分布のプロファイル形状を近傍で平均化することにより、発光強度分布が磁力線に沿うようなセルの値の再配分を行なう手法である。この節では、反復演算により再構成を行なう手法に p-近似という手法を合わせて用いた場合に、どの程度再構成結果が改善されるのか、また p-近似を組み合わせる再構成手法間での結果の違いなどについて検討することにする。

前節と同様に 2 次元の分布に対する再構成のシミュレーションを行なう。モデルと観測点の配置は配置 A と配置 C とを用いることにした。これは、前節において配置 A と配置 B との間で結果にそれほど大きな違いがなかったことによる。サンプルも同様に  $0.2^\circ$  毎にとり、セルの設定も同様とした。

再構成を行う手法は、MART 法、SIRT 法、擬似逆マトリクス法 (制約なし)、擬似逆マトリクス法 (制約-強) にそれぞれ p-近似を組み合わせる 4 種類の手法とした。どの方法においても、6 回の繰り返し法毎に 1 回 p-近似を行い、繰り返し法と p-近似の合計が 27 回となったところで再構成を打ち切った。また、p-近似で磁力線に沿ったプロファイルの平均化を行う水平方向の幅は  $\pm 3$  セル分、つまり 1 セルの大きさが  $2\text{km} \times 2\text{km}$  のこの再構成シ

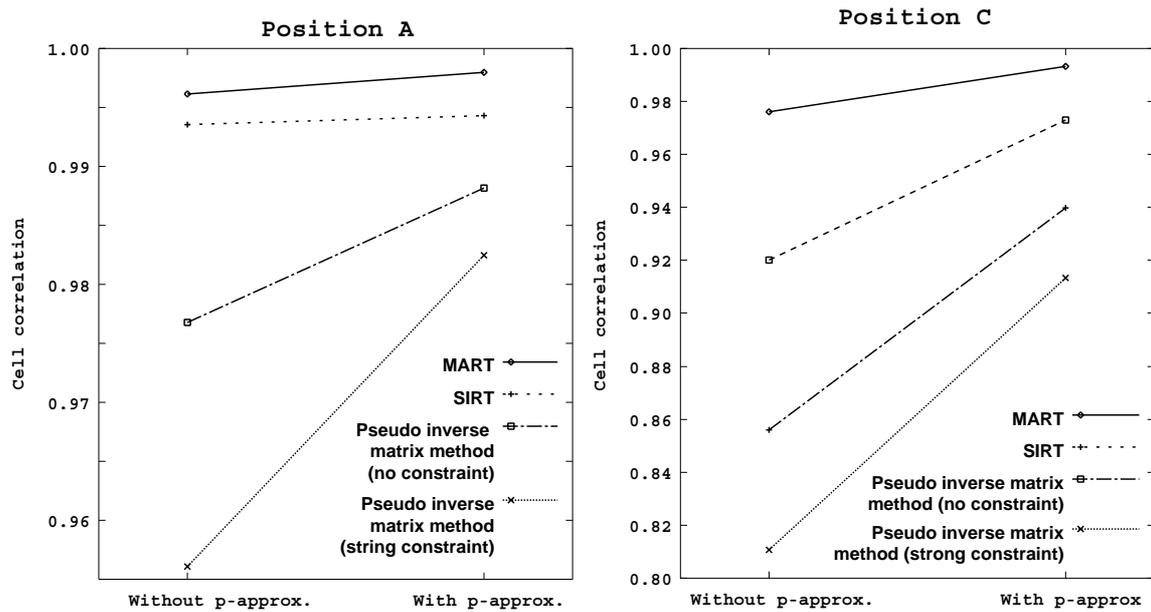


図 4.13: 配置 A, C での p-近似の有無によるセル相関の違い

ミュレーションでは $\pm 6\text{km}$ の範囲とした。

配置別に、p-近似を行った場合と行わない場合について、27回目のセル値の更新後のセル相関値を比較したグラフを図 4.13に示す。

これを見ると、配置 A, C 共に、どの再構成法においても、p-近似を用いた方が用いない場合よりもセル相関値が大きく、良い結果となっている。これは、モデルが p-近似の仮定に適合した形状をしているためである。また、大体において p-近似を用いない場合の結果が良くないものの方が、p-近似による改善が大きいことも分かる。また、配置 A と配置 C とでは、配置 C の場合の方が p-近似による改善が大きい。これは配置 C の場合再構成に必要な画像からの情報があまり多くないため、p-近似によって加わった制約が大きく効いてくる結果と思われる。ただ、どちらの配置においても 4つの手法のセル相関値の大きさの順序は、p-近似を加えた場合と p-近似を加えない場合とで変化がない。これは、p-近似と MART 法や SIRT 法・疑似逆マトリクス法のいずれかの再構成手法との組み合わせに特に適したものや、逆に特に不適な組み合わせがないことを示していると考えられる。

全体として、p-近似は近傍における磁力線方向プロファイル形状の平均化を行なうのみで、それほど強い制約を加える方法ではないにも関わらず、磁力線に沿うという性質を加えて再構成の結果を改善する上で、かなり効果的な方法であるといえる。また、p-近似は再構成結果を改善するのは、モデルの発光強度分布が p-近似の仮定する近傍における沿磁力線発光強度プロファイル形状の類似という制約に適合するものであるためであるが、実際の再構成においても p-近似でおいた仮定は十分成り立ち、その発光形状も p-近似に適合するものと考えている。

## 4.6 ノイズの影響

これまでシミュレーションでは、観測画像データにはノイズがないものとして投影データを作成し、再構成の結果の検討を行ってきた。この場合、セル相関値に現れるモデルオーロラと再構成結果の差、すなわち誤差は純粹に再構成手法に起因するものである。つまり、画像による情報のみでは発光構造に関する情報が不足する場合に、再構成手法に含まれる制約、例えば ART 法ならば初期値に最も近い解を選ぶという制約が、モデルオーロラの発光強度分布に対し適合しないことによって誤差が生じることになる。

しかし、実際の画像の画素値には通常ノイズが含まれている。この場合、複数の画素が持つ情報間に矛盾が生じるなどして、再構成される発光強度分布が厳密には不能となる可能性や、解の不安定性により再構成される発光強度分布に大きな違いが生じる可能性などが考えられる。

本節では、再構成に用いるデータにノイズを加えて再構成シミュレーションを行い、ノイズのない場合の結果と比較することにより、各手法に対して再構成結果がどの程度の影響をノイズから受けるかを明らかにする。

モデルオーロラの形状と位置、観測点の配置に関してはこれまでの設定を引き継ぎ、特に配置 A についてのみシミュレーションを行うことにした。再構成するデータは、平均 0、標準偏差 4.83 の正規分布ノイズを元のグレイレベルに加算した後、四捨五入で整数化 (256 段階) することによってノイズを加えたものとする。

実際に観測された画像において、雲やオーロラなどが写っていない小さな領域では入射する光は均一で、領域内のグレイレベルの差はノイズによって生じていると考えられる。そして、その領域内のグレイレベルの標準偏差により、画像に乗るノイズの大きさを知ることができると考えられる。例として、図 4.14 で示すように、実際の観測に使われた ICCD カメラの画像の比較的平坦な画素値を持つ部分より  $32 \times 32$  画素を取り出し、そのグレイレベルの標準偏差を取ると 3.80 となる。また、図 4.15 に示すように、冷却 CCD カメラの画像から同様に  $32 \times 32$  画素を取り出すと、そのグレイレベルの標準偏差は 14.46 となるが、実際の観測画像からの再構成時と同様に、ICCD カメラの画像に合わせて  $2 \times 2$  画素をまとめて  $512 \times 512$  画素に縮小し、(この画像に関しては 0.24 倍して) 256 段階にグレイレベルを変換した場合には、ノイズが画素毎に独立であれば標準偏差は  $14.64 \times 0.24 / \sqrt{2 \times 2} = 1.74$  となる。これら画像の小領域の標準偏差と比較して、本節のシミュレーションで投影データに加えたノイズの標準偏差の値 4.83 は十分に大きい。このことから、本節のシミュレーションのノイズはこれまでの我々の観測で取得された実際の画像に加わっているノイズより強いものであると言える。

再構成を行なう手法は、MART 法、SIRT 法及び擬似逆マトリクス法 (制約なしと制約強) とした。また、これらの方法に前節と同様に p-近似を加えた場合についてもシミュレーションを行った。いずれの再構成手法においても、繰り返し回数は 27 回とした。

ノイズを加えない場合と加えた場合、p-近似を加えた場合と加えない場合について、それぞれの方法でのセル相関値をグラフにしたものを図 4.16 に示す。

これを見ると、ノイズの有無によるセル相関値の違いから、MART 法と擬似逆マトリクス法 (制約なし) がノイズに弱く、SIRT 法はわずかに影響を受けるが、擬似逆マトリクス

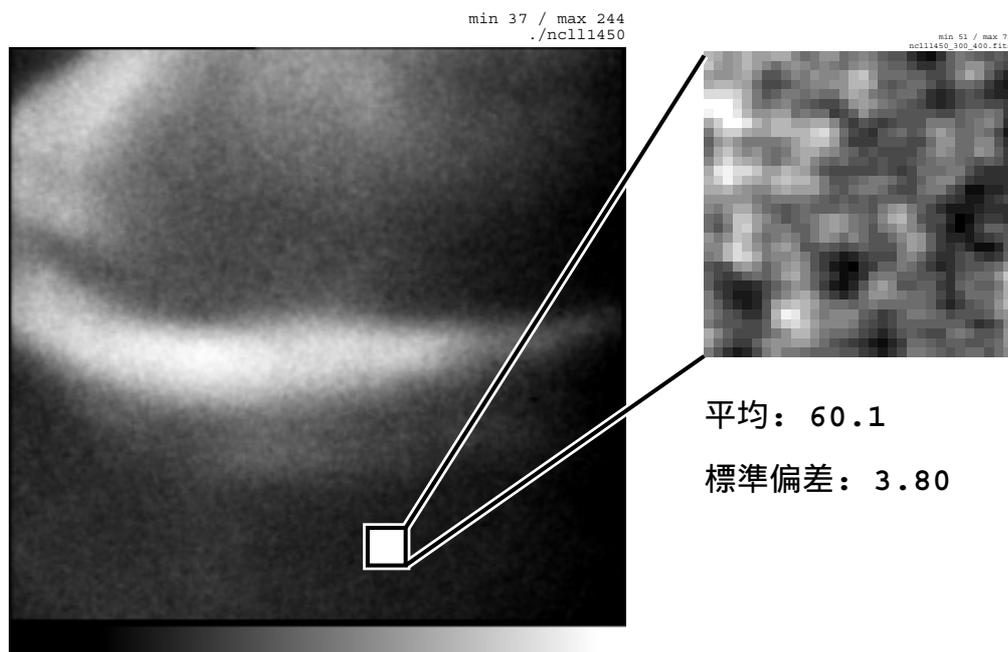


図 4.14: ICCD カメラ画像のノイズ

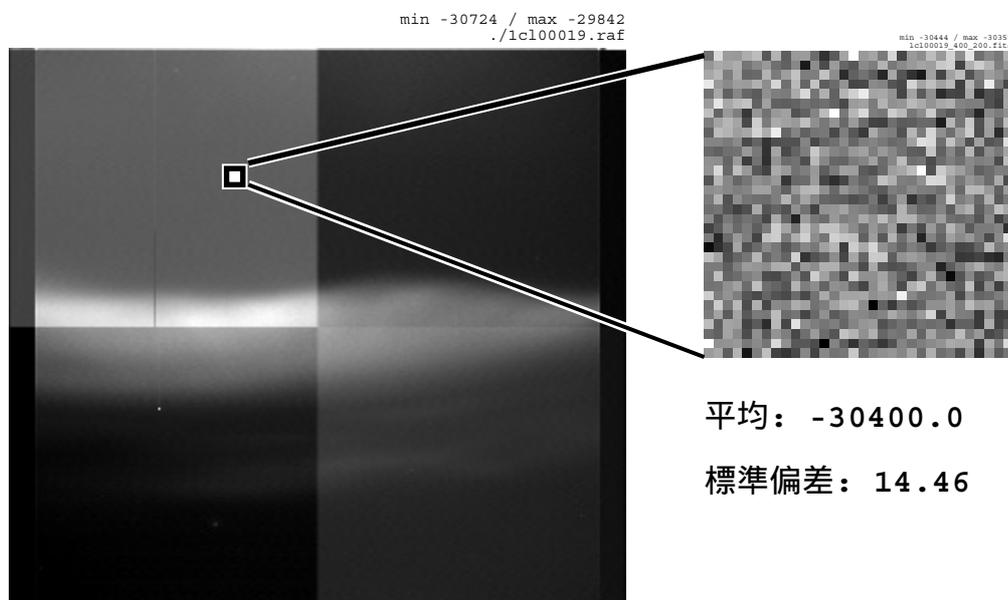


図 4.15: 冷却 CCD カメラ画像のノイズ

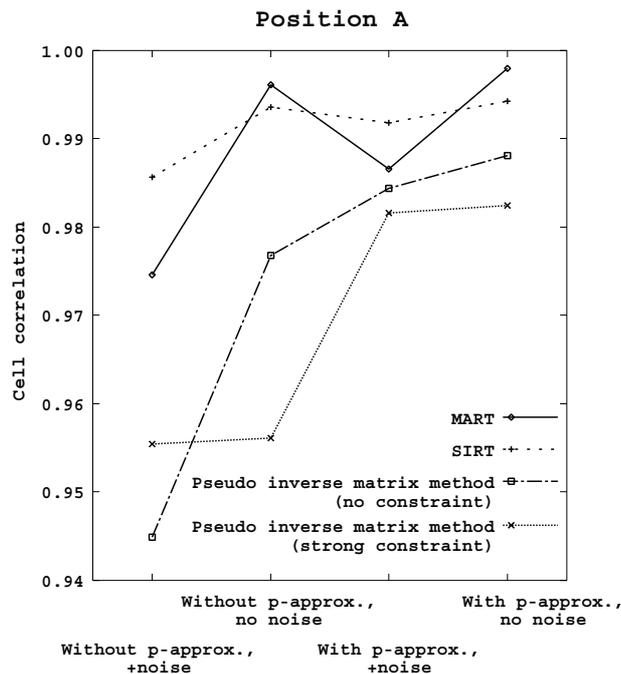


図 4.16: p-近似のある場合と無い場合でのノイズによるセル相関への影響

法 (制約-強) はノイズを加えてもセル相関がほとんど変わらずノイズの影響を受けにくいことが分かる。これは、MART 法と擬似逆マトリクス法 (制約なし) が、ノイズの加わったデータをそのまま再構成しようとするのに対して、SIRT 法ではセル値の更新の際に投影の影響を平均化する作用があり、これがノイズの影響を減らす効果となるためであると思われる。また擬似逆マトリクス法 (制約-強) では、エントロピー最大化という制約がノイズの影響を抑制する効果があるためと思われる。

また全体に、p-近似を加えた場合のノイズによるセル相関の減少は、p-近似を加えない場合よりも小さく、p-近似に伴う平均化の作用によってノイズの影響が軽減されていることも分かる。

ここで、特に MART 法と SIRT 法の反復回数-セル相関のグラフを図 4.17 に示す。これを見ると SIRT 法が、反復に対してセル相関が単調増加しているのに対し、MART 法では、約 8 回目の反復を最大として、その後わずかながらセル相関が減少している。これは、MART 法ではノイズの影響を押さえるためには、ある程度の反復回数で繰り返しを打ち切る必要があるということを示している。このシミュレーション以外の場合にどの時点で MART 法の反復を打ち切るべきかは必ずしも明らかではないが、セル相関値の減少はそれほど急なものではないためそれほど正確に決定する必要もないと考える。

図 4.17 に示したノイズを加えたデータに対する MART 法による再構成のシミュレーションで、ある程度以上の反復回数でセル相関が減少に転じる理由は、ノイズによって解の不安定性が増幅されたり、データに矛盾が生じたりするためと考えている。つまり、反復回

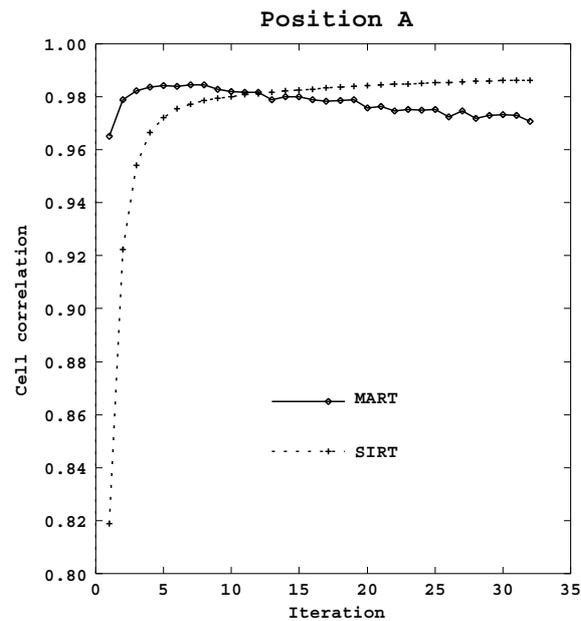


図 4.17: ノイズを加えた場合のセル相関の推移 (MART 法と SIRT 法の場合)

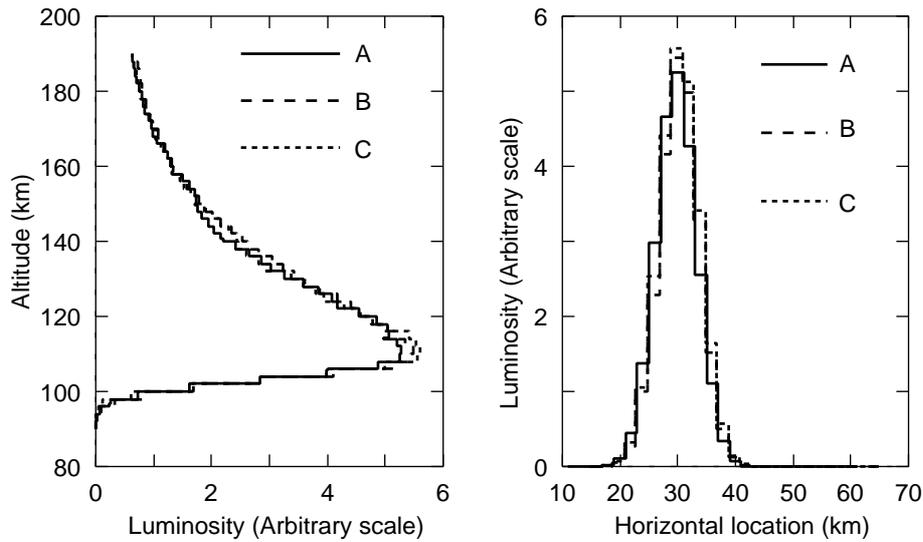
数が少ない時は、モデルから得られたノイズの含まれた投影すなわち画素のグレイレベルと再構成途中のセルから得られるグレイレベルとの差のほとんどは、モデルの発光強度分布と再構成された発光強度分布が大きく異なることに起因するものであるが、反復が進むとモデルの発光強度分布と再構成された発光強度分布の差は小さくなり、相対的にグレイレベルの差の多くはノイズに起因するものになる。このノイズ成分も満たすような再構成を行なおうとすると、例えばノイズに起因する隣接したグレイレベルの違いをそれらの視線の経路の微妙な違いで満たすために、経路上のセルの値を不自然に変化させるなどの必要性が出てくるため、結果としてある程度以上の反復回数でモデルとの差が大きくなってしまうものと考えている。

全体としてノイズが加わった場合には、MART 法よりも SIRT 法の方が良い結果を与えること、また擬似逆マトリクス法 (制約-強) はノイズには強いものの、もとのノイズのない場合の結果があまり良くないため、結果としては他に劣る再構成結果となることが分かった。

## 4.7 セルの形状・投影法による影響

本節では 2 次元のモデルを用いて、セルの形状や投影法が再構成結果に与える影響について調べることにする。

これまでの 2 次元の発光強度分布の再構成シミュレーションにおいては、すべて線積分投影法と正方形のセルを用いてきたが、再構成時には線積分投影法の代わりにボリューム投影法を、長方形もしくは直方体のセルの代わりに並行四辺形もしくは斜四角柱のセルを



磁力線方向プロファイル

水平方向プロファイル

- A: 線積分投影+長方形セル
- B: 線積分投影+並行四辺形セル
- C: ボリューム投影+並行四辺形セル

図 4.18: セル形状・投影法による結果の違い

用いることもできる。これらの投影手法とセル形状の違いは、計算時間にはそれなりの影響を及ぼすものの、本質的に再構成結果には影響を及ぼさないはずである。

これを確かめるため、配置 A のモデルオーロラと観測点の配置に対し、これまでのような線積分投影法による投影と長方形のセルを用いた場合、線積分投影法と並行四辺形のセルを用いた場合、ボリューム投影法と並行四辺形のセルを用いた場合の 3 種類の場合について再構成のシミュレーションを行なった。再構成手法は、SIRT 法と  $p$ -近似を組み合わせたものとした。また、並行四辺形のセルを用いる場合は、水平方向・磁力線方向で構成される並行四辺形を用いた。磁力線に沿った平行四辺形セルの場合、 $p$ -近似の計算を非常に簡便で高速なものすることができる。ボリューム投影法を用いる場合は、セルの面積は線積分投影法の場合と同じとし、サブボクセルとして一つのボクセルを  $5 \times 4$  個に分割することにした。

再構成された結果は、いずれの場合にもセル相関が 0.995 以上でほぼ等しく、ここには示さないが濃淡図で見ても違いが分からないほど同様な分布となった。さらに詳しく見るため、モデルの発光強度最大となる点に相当する位置を通る磁力線方向と水平方向の発光強度のプロファイルを図 4.18 に示す。これを見ても、いずれのセル形状・投影法の場合にも、わずかな差はあるもののほぼ等しい発光強度プロファイルとなっていることが分かる。これらのことから、再構成手法が同じであれば投影法やセル形状の違いによらずほぼ等しい結果が得られることが確かめられた。

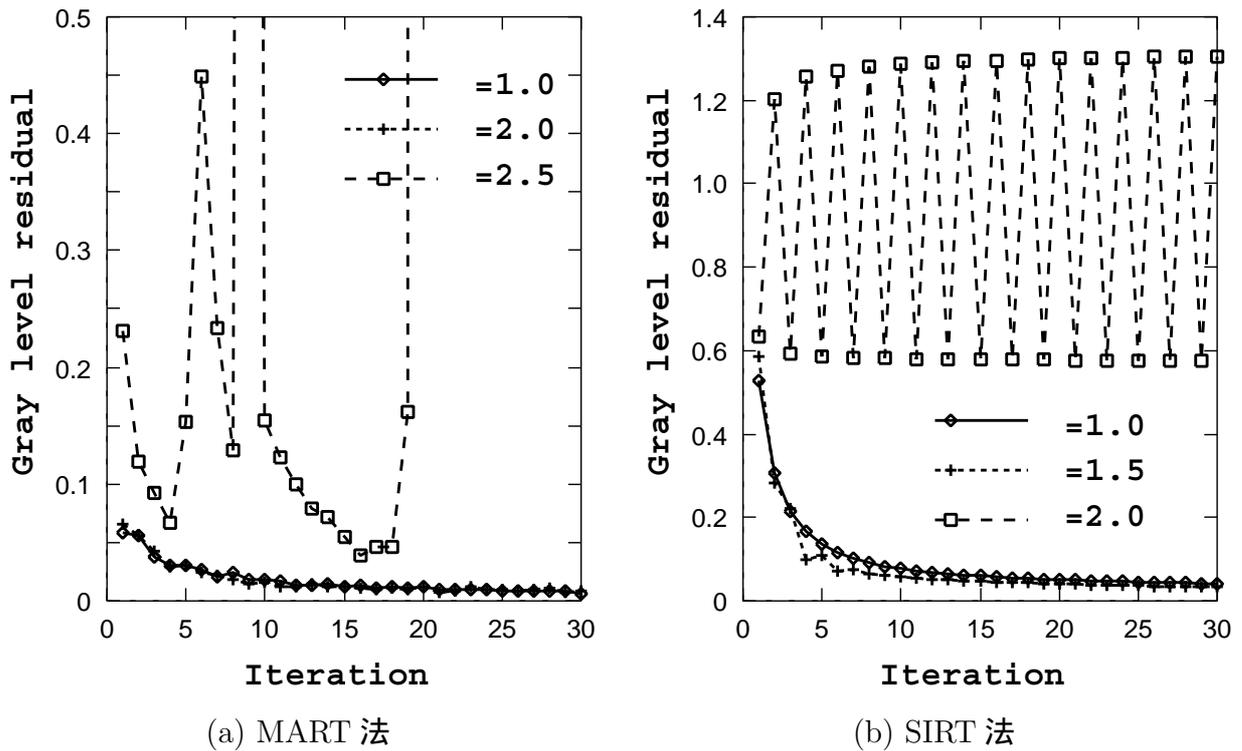


図 4.19: 緩和係数の違いによる収束への影響

## 4.8 MART 法・SIRT 法における緩和係数の影響

本節では、MART 法の式 (3.7) や SIRT 法の式 (3.8) における緩和係数  $\lambda$  の値について検討する。

この緩和係数  $\lambda$  は、MART 法及び SIRT 法においてセルの値の更新に影響を及ぼし、収束の速さを決める係数である。緩和係数  $\lambda$  は、ある程度までは大きい値の方が収束が速くなるが、ある程度以上の大きさになると MART もしくは SIRT 法の繰り返しによって再構成結果が収束せず発散するようになる。またあまり小さな値では収束が遅くなってしまう。

ここでは、配置 A のモデルオーロラと観測点配置を用いて、幾つかの緩和係数の値に対して MART 法もしくは SIRT 法のみで再構成を行なうシミュレーションを行なった。この時の MART 法と SIRT 法の場合の反復回数-グレイレベル残差のグラフを、図 4.19(a), (b) にそれぞれ示す。

これらのグラフから、MART 法においては  $\lambda = 1.0$  と  $\lambda = 2.0$  の場合、また SIRT 法においては  $\lambda = 1.0$  と  $\lambda = 1.5$  の場合には、グレイレベル残差は発散はしておらず、緩和係数の違いに対してそれぞれの方法の収束の速度はそれほど大きな違いがないことが分かる。しかし、MART 法では  $\lambda = 2.5$  の場合に、また SIRT 法では  $\lambda = 2.0$  の場合にはグレイレベル残差が発散している。グレイレベル残差が発散しているということは、再構成されたセル

の値も発散しているということでもある。これらのことから、このシミュレーションにおける収束と発散を分ける緩和係数の閾値は、MART 法では 2.0 と 2.5 の間、SIRT 法では 1.5 と 2.0 の間にあると思われる。

再構成結果が収束しなくなる緩和係数の閾値は、観測やノイズの状況などによって変化すると考えられるため、あまり正確に求めても意味はないものとする。これらの再構成結果が発散する緩和係数の値から十分な余裕をとりながら、あまり収束が遅くならない程度の値として、本論文における MART 法・SIRT 法の緩和係数 $\lambda$ の値は 0.8 ~ 1.0 と設定している。

## 4.9 3次元でのシミュレーションによる再構成手法の検討

本節では、3次元の発光強度分布に対する再構成のシミュレーションを行うことにする。

3次元の発光強度分布を扱う場合、鉛直面上の発光強度分布などの2次元の分布を再構成する場合と異なり、観測点がすべて面内にある必要から観測点がほぼ直線状に並んでいるといった制約をおく必要もなく、観測点位置やモデルオーロラの位置や形状などに関して非常に自由度が高くなる。ただ、その分考慮すべきパラメータが多数存在することになり、網羅的にシミュレーションを行なうことが非常に難しい。例えば、図 2.1 で示した 1998 年春の時点で使用可能な ALIS の 6 点の観測点から、3 点以上の観測点の組合せを選ぶと 22 通りの組合せが考えられる。また、表 1.1 のオーロラ分類の中で、アークそれもシングルアークとマルチプルアークのみを選んだとしても、アークの数・それぞれアークの位置・それぞれのアークのフォールドやカールなどのボルテクス構造などについて、多様なモデルオーロラが考えられる。

そこで、本節では実際の観測結果の一例をモデルとして、それを元に製作したモデルオーロラを再構成するシミュレーションを行い、再構成結果の評価を行うことにする。実際の観測画像からの再構成結果を検討するための個々の観測状況に沿った再構成シミュレーションは、6章で行なうことにする。

本節では、1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒 (UT) のスウェーデンにおける 4 点同時観測を元にして、磁力線方向や観測点位置を設定し、その時刻の画像からの解析結果に近い適当な位置形状のモデルオーロラを設定した。このモデルオーロラは、基本的に東西方向に伸びるアークであるが、Kiruna を想定した原点の上空付近でフォールドがあり、原点から東西に離れるにつれて発光強度が弱くなる、やや複雑な形状のアークとなっている。基本的に解析時には  $-x$  方向を北とするのだが、ここではセルの設定の都合上  $-x$  方向から時計回りに約  $15^\circ$  水平に回転した方向を、地理的北としている。また、観測点は Kiruna, Merasjärvi, Tjautjas, Nikkaluokta を想定した 4 点の観測点を設定した。

このモデルの三面図を図 4.20 に示す。この図は左から順に、大まかな南北方向の  $x$  方向に沿った鉛直断面、大まかな東西方向の  $y$  方向に沿った鉛直断面及び水平断面である。このオーロラと観測点の配置を配置 D とする。また、三面図のみでは全体の様子を掴みにくいため、セル全体の中心から斜め上方に 800km 離れた位置より遠近法で見た投影図を図

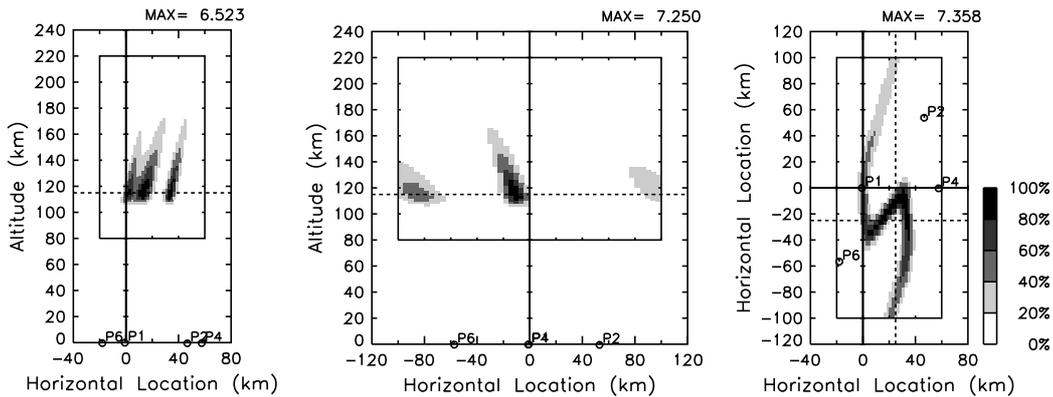


図 4.20: モデルオーロラの三面図 (配置 D)

4.21(a), (b) に示す。投影図の左下の数字は、視点から見た画像中心の指す方向をセルに対する方位の角度と天頂角で示したものである。セルを  $15^\circ$  回転させているため、図 4.21(a) の (45, 135) の場合、視点はセル全体の中心から見て南から西寄り  $30^\circ$ 、水平から  $45^\circ$  上方にあり、逆に言えば、画像は北から東寄り  $30^\circ$  の方角から、水平から  $45^\circ$  下方を見下ろしたものである。また、図 4.21(b) の (225, 135) の場合は、視点はセル全体の中心から見て北から東寄り  $30^\circ$ 、水平から  $45^\circ$  上方にあり、図 4.21(a) とは方位として逆の方向からセルを見下ろしていることになる。この図 4.21 より、オーロラカーテンの逆 Z 字のようなフォールドの様子が見て取れる。このモデルは、観測点がオーロラを貫く磁力線のフットポイント付近にあり、良好な再構成が期待できる。

この配置 D として設定したモデルオーロラを線積分投影法により投影して各観測点からの観測データを生成し、MART 法、SIRT 法及びそれらに  $p$ -近似を加えた場合の、計 4 種類の再構成法で再構成を行なうシミュレーションを行った。各再構成法の繰り返し回数は 34 回に固定し、 $p$ -近似は MART 法もしくは SIRT 法を 6 回行う毎に 1 回行うものとした。

ゴーストオーロラを避けるため、3.5 節で述べたように投影されたデータを用いる範囲を限定した。また、それによって定まる共通視野領域に含まれるセルに均一な初期値を与え、再構成を行う範囲とした。つまり、図 4.22 に三面図で示す初期値の範囲は、3.5 節に述べた再構成を行う領域の制限が行なわれた範囲でもある。図中で黒く塗られた以外の部分では、モデルオーロラの発光強度値が 0 でなかったとしても再構成は行なわない。

一例として、この配置 D に対し MART 法と  $p$ -近似で再構成のシミュレーションを行った結果の三面図を図 4.23 に、モデルと同じ場所からの投影図を図 4.24 に示す。モデルオーロラの場合の図 4.20, 4.21 と比較してほぼ同じ形状となっており、非常に良い再構成ができていることが分かる。三面図の中央の図の左右の部分、右側の図の上下の部分の発光が出ておらず、投影図でもそれに相当する部分が出ていないが、これは図 4.22 で示した初期値の範囲を外れており、再構成を行わない範囲となっているからである。

また、同じモデルオーロラを 50km ほど北に平行移動して、図 4.25 に示す三面図の位置

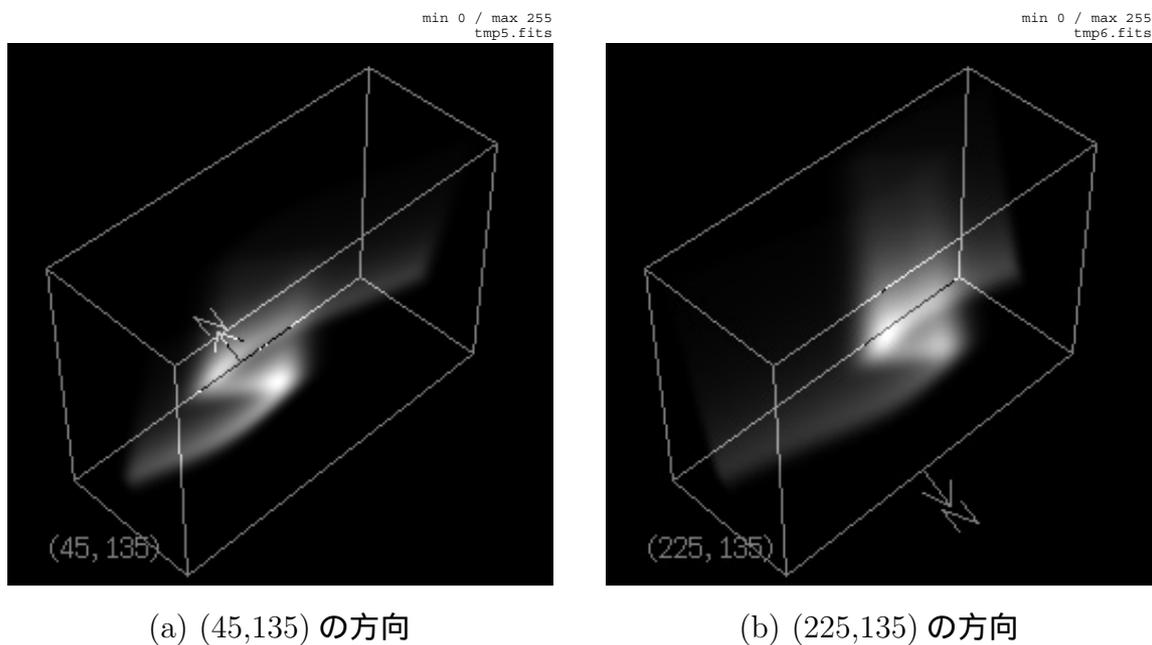


図 4.21: モデルオーロラの投影図 (配置 D)

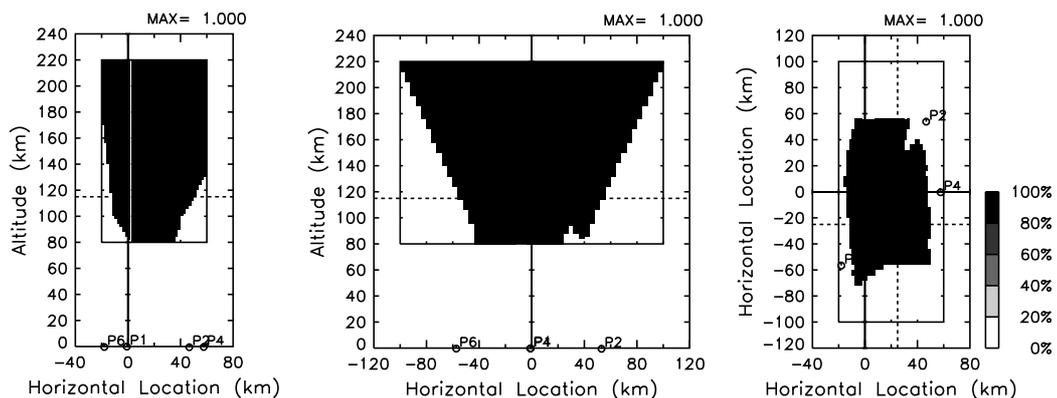


図 4.22: 再構成の初期値 (配置 D)

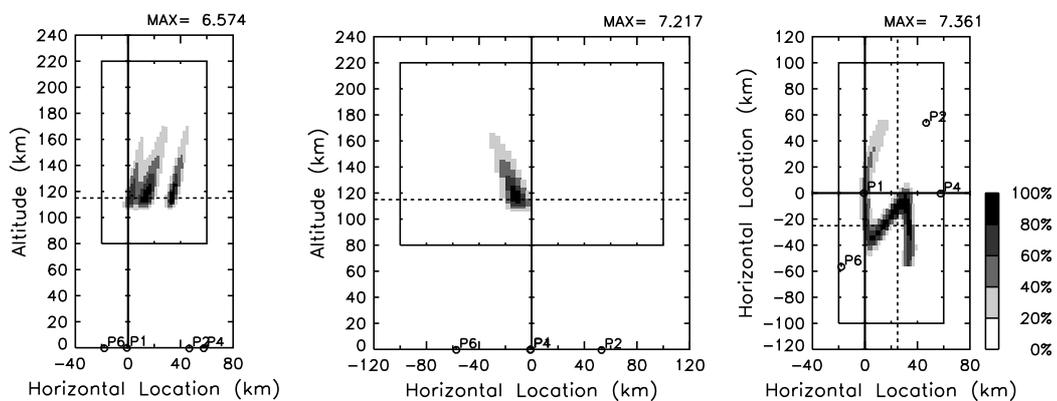
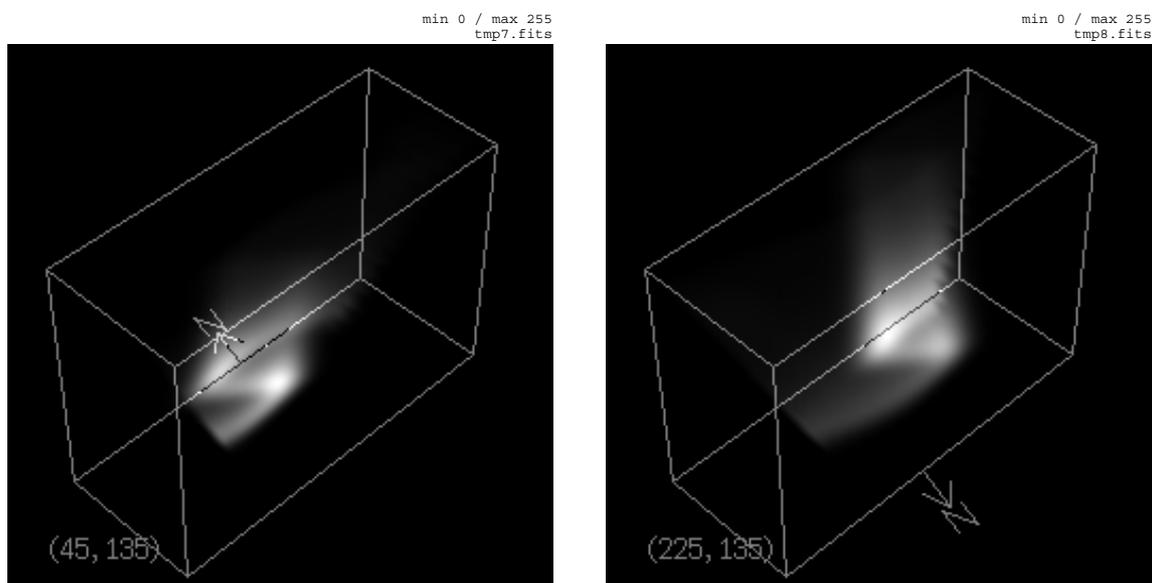


図 4.23: MART 法+p-近似による再構成結果 (配置 D)



(a) (45,135) の方向

(b) (225,135) の方向

図 4.24: MART 法+p-近似による再構成結果の投影 (配置 D)

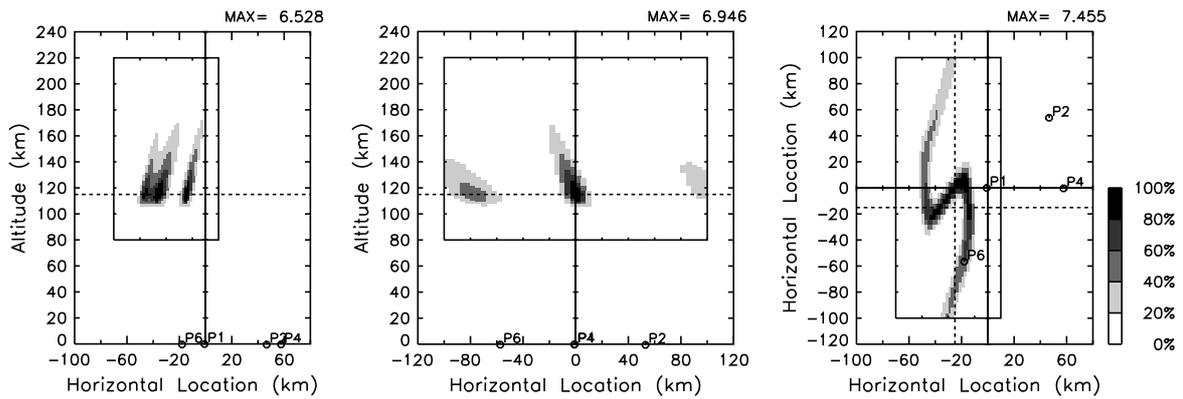


図 4.25: モデルオーロラの三面図 (配置 E)

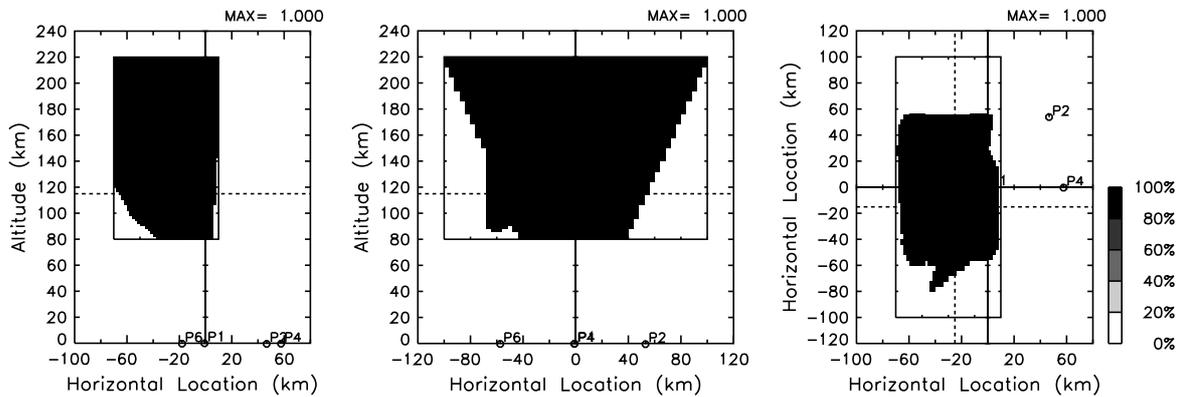


図 4.26: 再構成の初期値 (配置 E)

においた場合を配置 E とした。ただし観測点配置は、配置 D の場合と同じである。このモデルオーロラは、観測点群の上空からやや北に外れた位置にあるためオーロラカーテンの厚みに関する情報が少なく、再構成は幾分難しいものになると思われる。配置 D の場合と同様に配置 E に対しても、計 4 種類の方法で再構成シミュレーションを行った。この時の初期値、すなわち再構成を行う範囲を図 4.26 に示す。配置 E の範囲は配置 D の場合に比べて限定し難いため、1 割ほど初期値を与える範囲が大きくなっている。

一例として、配置 E の SIRT 法と p-近似による再構成シミュレーションの結果の三面図を図 4.27 に示す。大まかな形状は出ているものの、モデルオーロラの場合の図 4.25 と比べて、図 4.27 左側の鉛直断面の図では 3 層に分かれた細かい多層構造が出ていなかったり、右側の水平面の図では再構成範囲に含まれるにも関わらず、図中の北側から上方へ伸びる部分が消失しているなど、細かな発光強度分布に違いが出ていることが分かる。ただし、

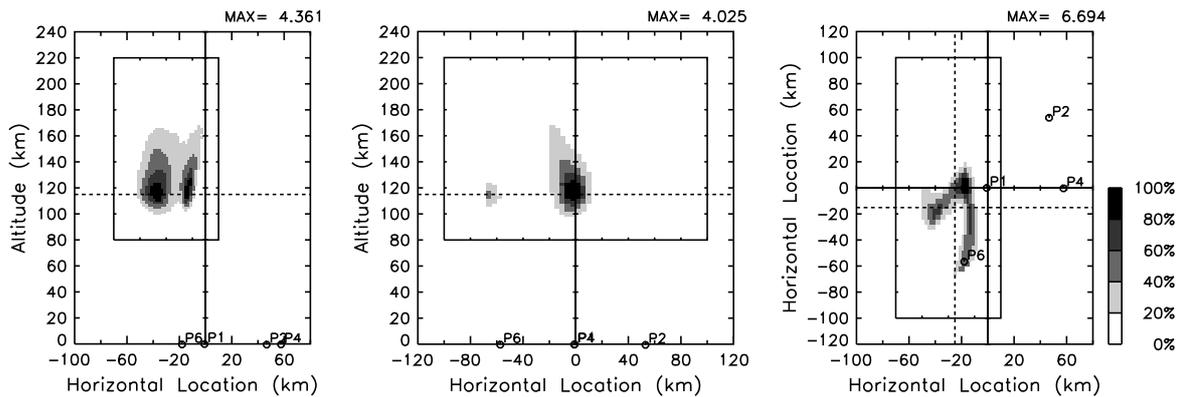


図 4.27: SIRT 法+p-近似による再構成結果 (配置 E)

南側の東方 (水平断面では下方) に伸びるアーチは正しく再構成されている。

以上に述べた配置 D, E のそれぞれの場合に対して、各種再構成手法による再構成結果のセル相関値をグラフにしたものを、図 4.28 に示す。

この図 4.28 を見ると、いずれの再構成手法に対しても配置 D の場合の方が配置 E の場合よりセル相関値が大きく、観測点群上空にオーロラが近い方がより良い再構成結果が得られることが分かる。配置 D、配置 E のどちらにおいても MART 法の方が SIRT 法よりもセル相関値が大きいが、これは本節の再構成シミュレーションではノイズを加えていないためと思われる。より細かく MART 法と SIRT 法の再構成結果の差を見ると、配置 D の場合に比べて配置 E のように観測点群の上空から離れた位置にオーロラがある場合に、セル相関値の差が大きくなっている。また、このモデルオーロラは p-近似の近傍における沿磁力線発光強度プロファイルの相似という制約を満たしているのだが、p-近似によって再構成結果が改善されていることも図 4.28 のグラフから読みとれる。

これらのことは、2次元の再構成シミュレーションの場合の配置 A と配置 C をそれぞれ配置 D と配置 E に対応させると、2次元の再構成シミュレーションに対しても同じことが言える。つまり、3次元の再構成シミュレーションでも2次元のシミュレーションの場合と同じ傾向をもち、2次元で得られた知見は3次元の場合にも当てはまるということである。

## 4.10 観測点配置による影響

本章では、ALIS の観測点から適当な数の観測点の組み合わせを選び、その組合せに含まれる観測点の画像のみを用いた再構成のシミュレーションを行なうことによって、良い再構成を行なうための望ましい観測点配置について検討することにする。

オーロラのモデルは、図 4.29 に示すような中央に強い発光を持つ曲がった形状のアーチ状のオーロラである。このモデルは磁力線方向にセルの形状を傾けた斜四角柱状のセルを

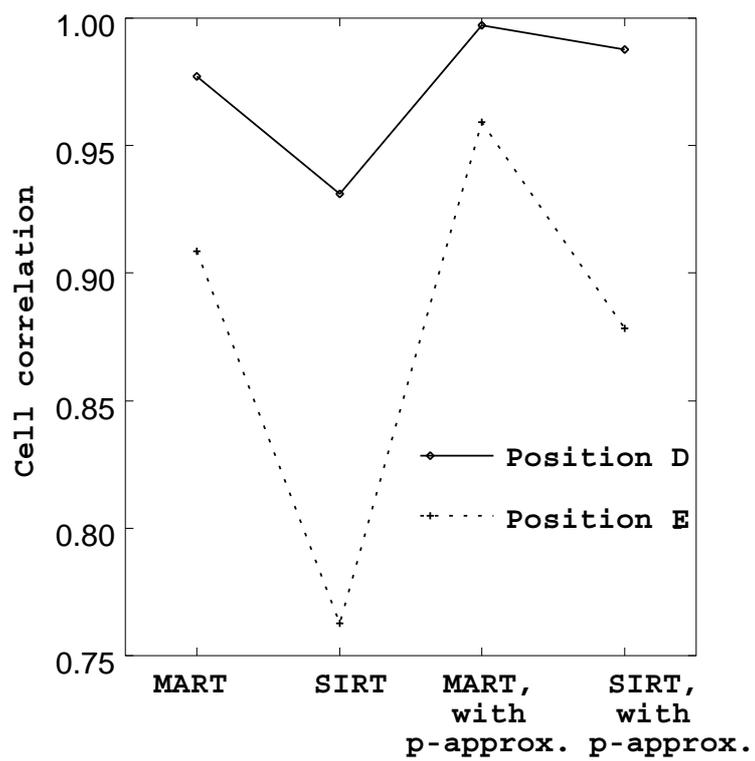


図 4.28: 3次元での再構成のセル相関 (MART 法と SIRT 法, p-近似の有無による違い)

用いて表され、これからポリウム投影法を用いて疑似観測画像を生成した。一つのセルである斜四角柱は底面が $2 \times 4$ km、高さ 2km のものである。ポリウム投影に際しては、このセルを  $5 \times 4 \times 3$  個のサブボクセルに分割した。

シミュレーションを行なった観測点の組み合わせは、第 2 章の図 2.1 の実線の円錐で示された 1998 年春の時点で ALIS で稼働している 6 点の観測点の中から、あまり観測点の範囲が東西に広がらないような組合せを選びながら、2~6 点の範囲でとった。再構成は SIRT 法及び SIRT 法に  $p$ -近似を組み合わせた手法で行なった。再構成する際には、2 つ以上の観測点による共通視野領域ができるだけ広くなるように、また共通視野領域のセルができるだけ多くの観測点から見られるようにしながら、3.5 節で説明した領域の制限を行なっている。再構成した結果のセル相関をグラフにしたものが、図 4.30 である。各節点を矢印で示す括弧中の数字は、その再構成に用いた観測点の番号の組み合わせで、図 2.1 中の番号と対応している。

全体として、観測点数が多い方がセル相関が高く、良い再構成ができることが分かる。しかし細かく見ると、必ずしも観測点数が増えればセル相関が高くなるというわけではない。例えば、図 4.30 の横軸で (C) と振られた観測点の組み合わせと (D) の組み合わせとでは、(D) の方が観測点数は増えているが、SIRT 法のみでの再構成の場合はセル相関はかえって減少しており、SIRT 法+ $p$ -近似の場合もセル相関はほとんど増えていない。これは、観測点数が増えたことにより 2 点程度の観測点からしか見られていない共通視野領域が増え、観測点数が増えることによる画像というデータの増加よりも再構成領域の増加によるセルの数というパラメータの増加が勝り、全体としてセル相関の値を下げてしまったものと思われる。

また SIRT 法のみによる再構成の場合、同じ観測点数であっても図 4.30 の (D), (E) に対する (F) や、(G) に対する (H) の様に、北に離れておりオーロラを他の観測点とは違った角度から見ることでできる 5 番の観測点 (Abisko) が含まれている場合にセル相関が高くなっていることが分かる。

$p$ -近似を加えた場合にも、観測点数が 3 点の (C) と 4 点の (D) ではセル相関がさほど変わらないが、同じ 4 点の (D) と (E) では (E) のほうがセル相関が高くなっているといった、観測点数の増加がそのままセル相関値の増加につながるという例があるが、そのセル相関値の違いは SIRT 法のみの場合とやや傾向が異なっている。ただ、観測点配置の違いによるセル相関値の差異は SIRT 法のみの場合ほどはっきりとしているわけではない。これは、 $p$ -近似による制約が少ない数の観測点からしか見られていない共通視野領域に対しては相対的により強く効くことによって、セル相関値の差異を少なくし、観測点数が増加しているにも関わらずセル相関が減少することを防止しているのではないかと考えられる。

結局、より良い再構成のためには観測点数が多い方が望ましいと言える。しかし、同じ観測点数でも観測点配置によって再構成結果に差が生じ、オーロラアークが東西に伸びる傾向があることを考えると、アークを多様な方向から見るためには南北に広がった観測点配置の方が有利であると考えられるため、同じ観測点数の場合には南北方向により広がった観測点配置の方がより望ましいものと言える。

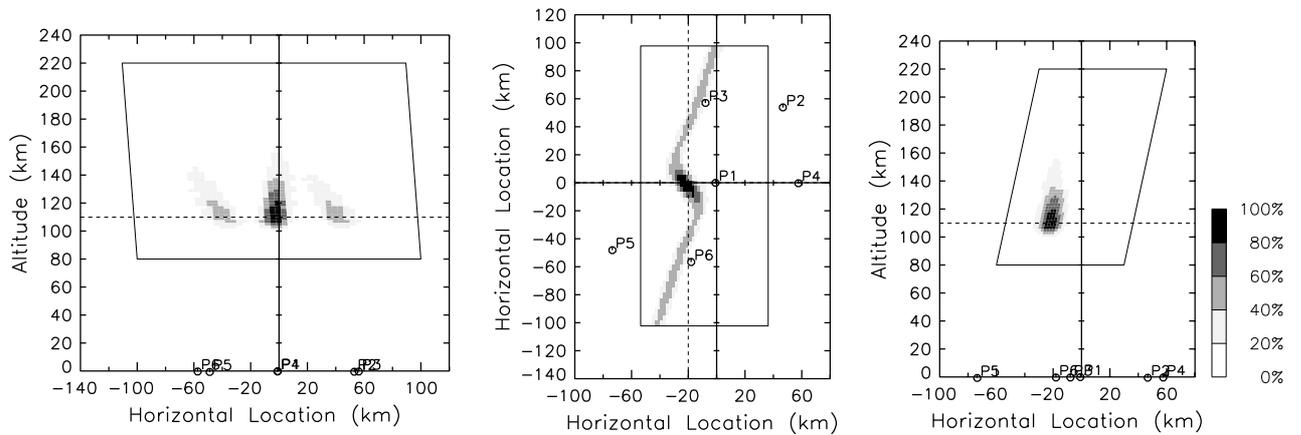


図 4.29: 観測点配置の影響のシミュレーションに用いたモデルオーロラ

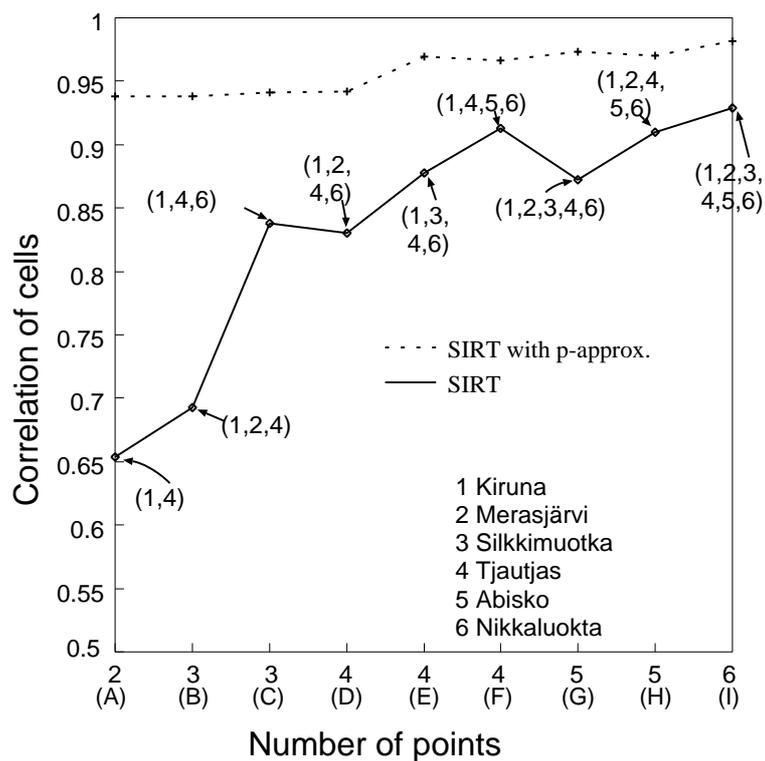


図 4.30: 観測点配置の再構成結果への影響

## 4.11 まとめ

本章では、オーロラ再構成の計算機シミュレーションにより、再構成手法・オーロラや投影のモデル化の方法・観測点配置に関する検討を行なった。

複数のオーロラ再構成手法間の比較・検討はこれまであまり行なわれて来なかったが、本章におけるシミュレーションにより、再構成手法に関しては、MART法・SIRT法もしくはそれに $p$ -近似を加えたものが適していることが新たに分かった。しかし、MART法がSIRT法に比べてランダムノイズに弱いことが示され、実際に観測される画像には多少のノイズが含まれていることから、SIRT法もしくはSIRT法に $p$ -近似を加えたものが、オーロラの再構成に適していると考えられる。

また、オーロラを表現するセルの形状や、セルの値からオーロラ画像を作り出す投影方式は再構成結果にそれほどの影響を与えないことを確かめた。

観測点配置に関しては、オーロラと観測点の位置関係が再構成に大きな影響をもつこと、オーロラを挟む形で観測点群があることが望ましいこと、オーロラが東西に伸びる傾向があることを考慮すると東西よりは南北に広がった観測点配置の方が望ましいことなどが分かった。ただし、実際の観測において設置された観測点は固定されており、局地的な気象条件の差で同時観測ができなくなることによって、使用可能な観測点配置が変化するものである。気象条件は操作できないが、これらの結果は観測データが蓄積された時の再構成を行なう画像選択の重要な基準の一つとなるものである。



# Chapter 5

## ALIS によるトモグラフィキャンペーン観測画像とその再構成

### 5.1 前書き

本章においては、1995年から1998年まで計4回行なわれたALIS-JAPAN国際共同観測により取得されたオーロラ単色光同時観測画像を用いて、実際にオーロラの空間的な発光強度分布の再構成を行なうことにする。

これまでのシミュレーションによって得られた知見を元に、観測された画像の中からある程度以上の数の観測点から同時観測された観測画像組を選びだし、再構成手法にはSIRT法と $p$ -近似を用いて再構成を行なう。

実際に観測を行なうことにより、そして観測された画像からの再構成を行なうことにより、オーロラの解明に役立つ結果を提供すると共に、これまでに論じてきた方法が実際のオーロラ再構成に役立つことを確認することができる。

本章の再構成結果は、他の種類の直接的な同時計測結果が存在しないため、そのまま評価することはできない。しかし、個々の再構成に基づいて、計算機シミュレーションを行なうことにより、同様の観測状況における再構成結果の検討を行なうことはできる。この計算機シミュレーションによる再構成結果の検討については、次章でまとめて述べることにする。

### 5.2 第1回の観測と再構成

第1回のALIS-JAPAN共同観測は、1995年の2月の終わりから3月の終わりまでの約1ヶ月間行なわれた。この期間は例年にならぬほどの悪天候が続き観測可能な時間はほとんどなかったが、観測期間の終了間際に幾つかのオーロラ多点観測画像を取得することができた。

観測は、ALIS側の3点に日本から持ち込まれたカメラシステムを使う2点を加えた計5点の観測点で行なわれたが、局地的な気象条件の違いや同期した画像取得の失敗などの理由により、同時観測画像数がそれよりも少ない場合も存在する。

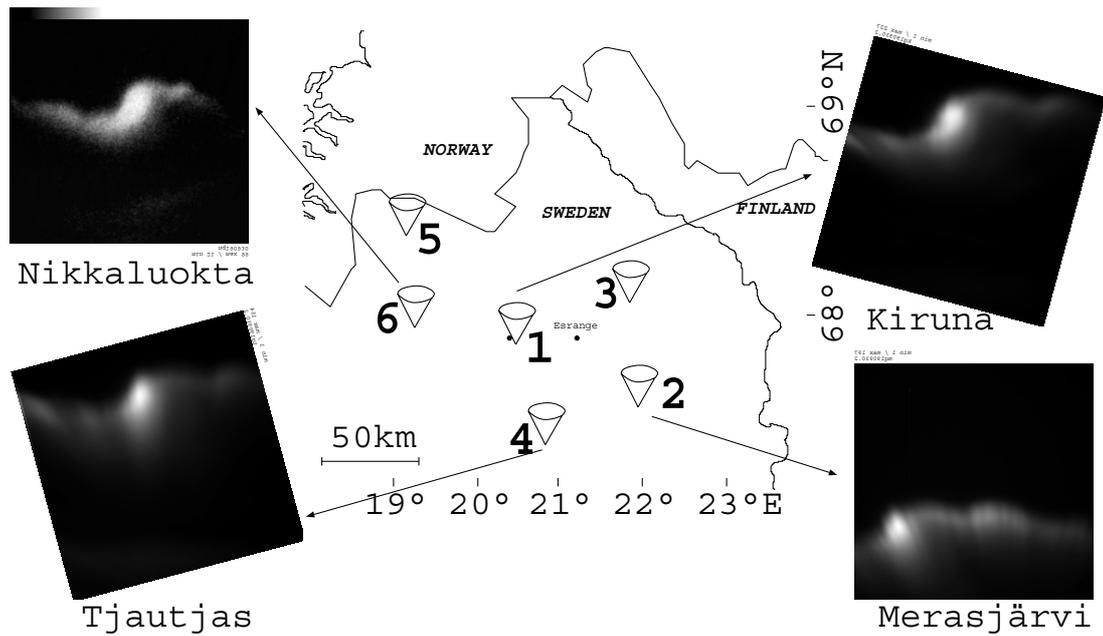


図 5.1: 1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒 (UT) の 4 点観測画像

以下に、第 1 回の ALIS-JAPAN 共同観測における同時観測画像とその再構成結果を示す。

### 5.2.1 1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒のオーロラ

まず、1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒 (UT) に得られた 4 点同時観測画像 (557.7nm) を、観測点配置の地図と合わせて図 5.1 に示す。この図では上を地理的北方向とし、画像は方向を合わせるために反転した後、適当な回転を施している。これらの画像の内、ALIS 側のカメラシステムで得られた 3 つの観測画像は 5 秒の露光を、日本側のカメラでとられた観測画像は 1 秒の露光 (画像処理装置による積分) を行なったものである。

高度 115km の球面を設定し、この 4 点同時観測画像を投影すると、図 5.2 の様になる。画像間のグレイレベルの差は見易くなるように調整しており、画像の重なる部分ではそれぞれの画像の平均をとっている。図中には画像の他に、投影した画像の枠を湾曲した四角形で描き、短い線と数字で緯度経度の刻みを、小円と数字で観測点の位置を描いている。縦方向が北緯で示す緯度方向、横方向が東経で示す経度方向としている。

この様に、オーロラ発光強度が最大となると思われる高度にオーロラ同時観測画像を投影することにより、各画像の違いは平均化され、大まかなオーロラの形状を示すことができる。また、複数の画像中のオーロラが大体良く重なることから、カメラ方向の較正がうまくできており同一のオーロラを観測していることも確認できる。

図 5.2 からは、画像の枠の重なり合いを見ることにより、オーロラアークの強く発光している部分を含む領域が複数の観測点から観測されていること、1, 2, 4, 6 の番号の振られた

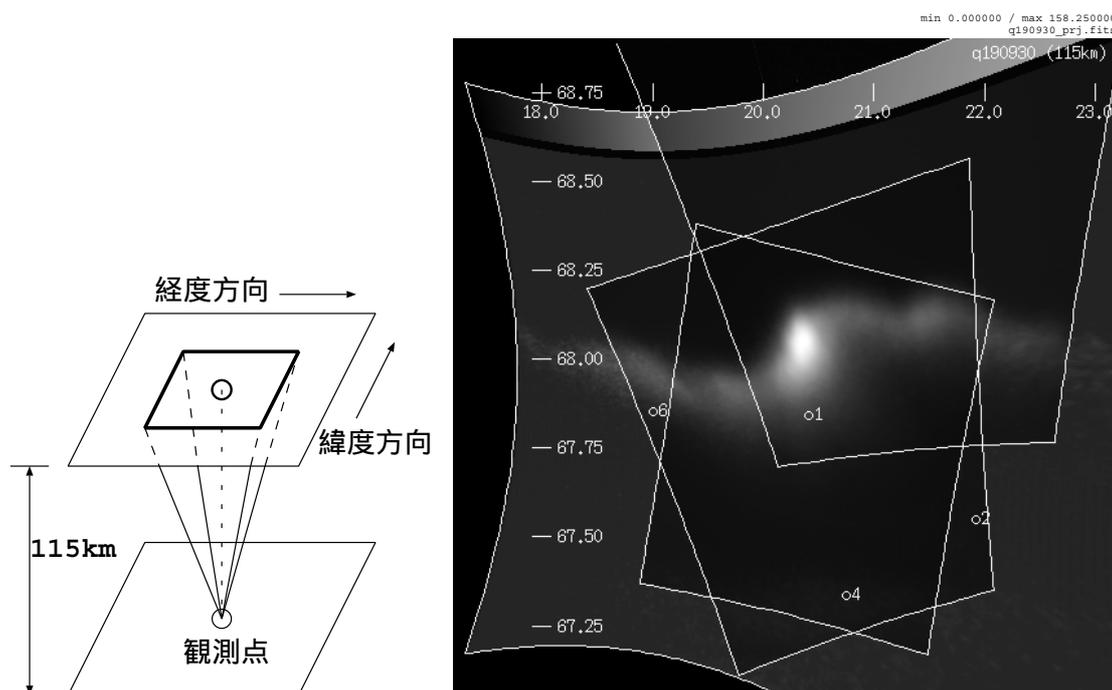


図 5.2: 1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒 (UT) の画像の投影

小丸で示された観測点位置との比較から、観測されたオーロラが4つの観測点よりもやや北に位置していることが分かる。つまり、このオーロラはトモグラフィ再構成が十分に行なえる複数画像が得られているが、アークの片側からしか観測されていないため再構成がやや難しくなるものと考えられる。

この4点観測画像から、4点すべてから観測されない部分が多くなるように再構成領域を設定し、SIRT法と $p$ -近似を用いて再構成を行なった。再構成結果を断面図で表したものが図 5.3(a), (b) である。この再構成における $p$ -近似の範囲は、南北方向に $\pm 4\text{km}$ 、東西方向に $\pm 8\text{km}$ である。再構成の際、セルには鉛直方向を軸として上から見て半時計回りに $-15^\circ$ の回転を施しているが、表示の都合上図 5.3では観測点の位置を変更して描いている。よって、図 5.3(b)の水平方向の断面図における左側は正確な地理的北方向ではなく、図中にNの文字と矢印で示すように、時計回りに $15^\circ$ 回転した方向が地理的北となっている。

この図 5.3(b)を見ると、中央に強く光る部分のある湾曲したオーロラアークが再構成されていることが分かる。ただ、Kiruna上空の磁力線方向は偏角 $4.1^\circ$  伏角 $77.2^\circ$ 程で、図 5.3(a)にはこの図の面に投影した磁力線の方向を図中の原点(Kirunaの観測点)から伸びる斜めの線で示しているが、再構成されたアークはあまりこれに沿っているとはいえない。

そこで、 $p$ -近似の沿磁力線プロファイル平均を行なう範囲を、近傍ではなく再構成領域全体とし、形状に関する制約をより強化してみた。図 5.4(a), (b)に、図 5.3(a)よりも $30\text{km}$ 程東側の単層のアークとなっている部分の断面図を、 $p$ -近似範囲を変化させた場合の比較

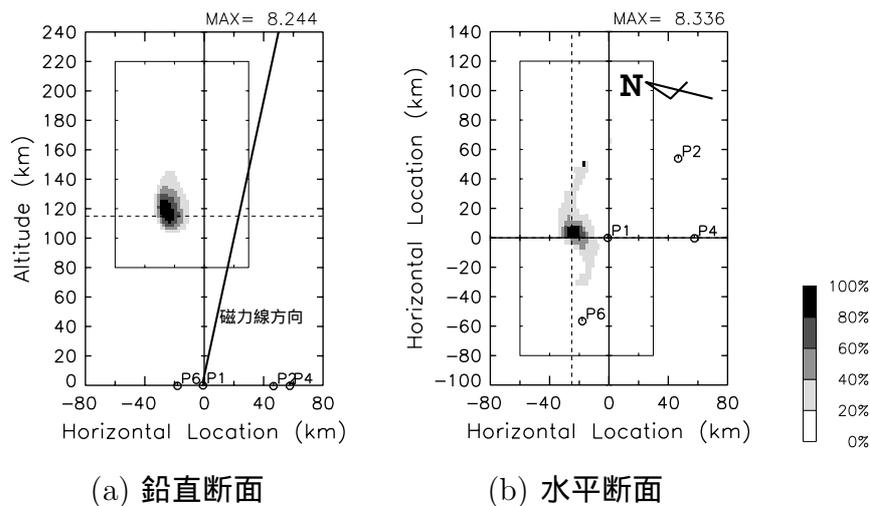


図 5.3: 1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒 (UT) の画像の再構成結果

のため示す。p-近似の範囲が $\pm 4\text{km} \times \pm 8\text{km}$ の図 5.4(a) に比べて、p-近似の範囲がセル全体の図 5.4(b) ではよりアークが磁力線に沿ったものとなっている。また p-近似を行なう範囲をセル全体とすることによってグレイレベル残差が 0.094 から 0.117 へと上昇しているが、これはそれほど大きなものとは言えない。これは制約を強化した場合の再構成結果の Tjautjas(4 番の観測点) での疑似観測画像が図 5.5 に示すように、実際の観測画像とほぼ一致していることから裏付けられる。この観測画像が図 5.1 の場合と反転して見えるのは、図 5.1 は上から見た図であり、図 5.5 は下から観測した画像だからである。

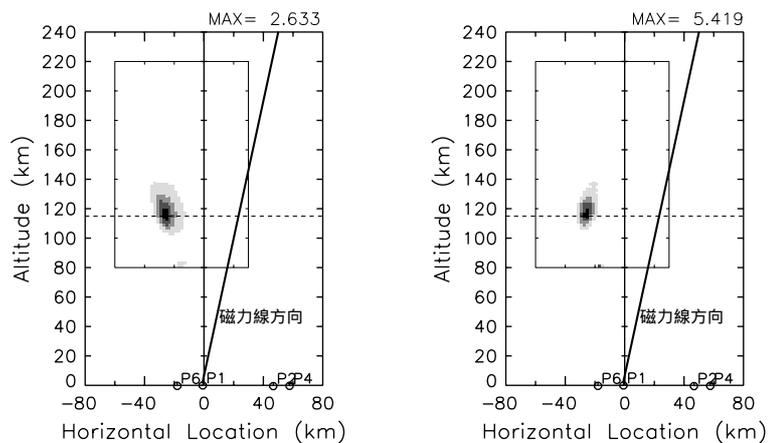
これらのことから、この時刻の同時観測画像についてはオーロラアークの厚み方向の情報が少ないため、再構成の際に適当な制約を必要とするものとする。ただ、次章で行なったシミュレーションの結果から、制約が妥当ならば、全体の形状としては信頼性がある再構成結果が得られているものとする。

### 5.2.2 1995 年 3 月 26 日 20 時 26 分 10 秒の 2 層のオーロラ

次に、1995 年 3 月 26 日 20 時 26 分 10 秒 (UT) に得られた 4 点同時観測画像 (557.7nm) を高度 115km に投影したものを図 5.6 に示す。この図も上が地理的北である。これらの画像の内、ALIS 側のカメラシステムで得られた 3 つの観測画像は 2 秒の露光を、日本側のカメラでとられた観測画像は 1 秒の露光を行なったものである。

この図 5.6 を見ると、画像には大きく 2 層に分けられるアークがあり、2 層のアークの北側のアークは多くの画像のエッジ付近にあることも分かる。

このため北側のアークを再構成する場合、3.5 節で述べた再構成領域の制限を行ない、一つの観測点からしか見えていない空間領域に発光がある可能性がなくなるように画像中の再構成に使用する領域をとると、再構成を行なうことのできる空間領域は非常に狭いもの



(a) p-近似範囲:  $\pm 4\text{km} \times \pm 8\text{km}$  (b) p-近似範囲: セル全体

図 5.4: p-近似範囲の違いによるオーロラアークの方向の違い

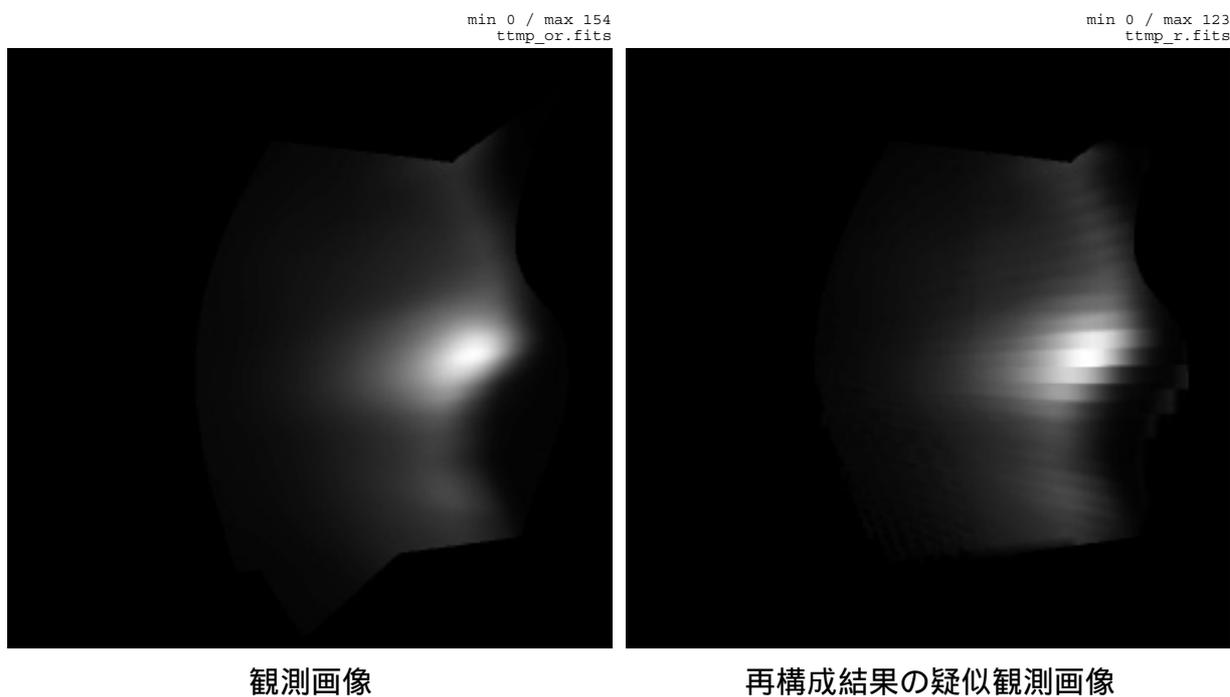


図 5.5: Tjautjas における観測画像と疑似観測画像の比較 (再構成に利用した領域のみ)

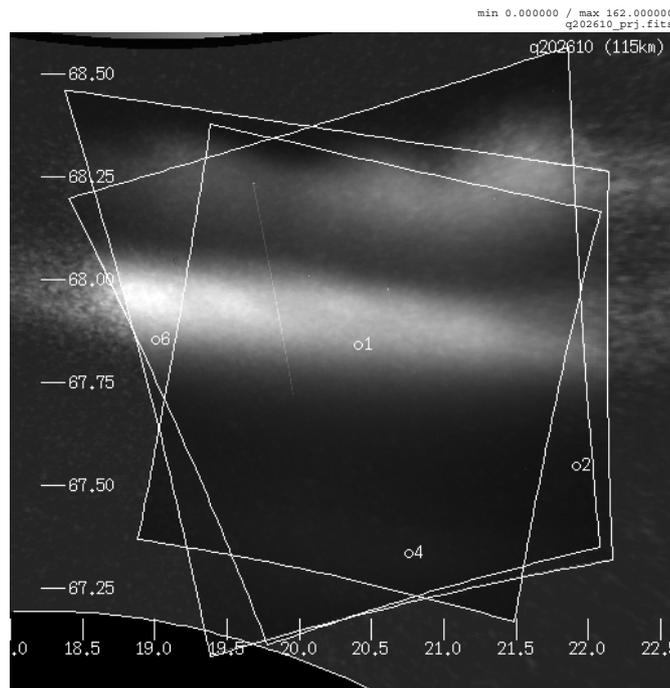


図 5.6: 1995 年 3 月 26 日 20 時 26 分 10 秒の画像の投影

となってしまう。また、この二つのアークは観測点からは南側の観測点から一部重なって観測されており、南側のアークだけを再構成しようとしても、北側のアークの一部をゴーストオーロラとして含んでしまう。

そこで、まずゴーストオーロラを作らない Kiruna(1 番の観測点) と Tjautjas(4 番の観測点) の 2 点の観測点による鉛直エピポーラ平面上の 2 次元の再構成を、SIRT 法と  $p$ -近似を用いて行なった。この時の  $p$ -近似の範囲はセル全体である。そして、このオーロラがオーロラアークの方向(東西方向)に関してそれほど分布に変化がないということを仮定して、2 点の再構成で得られた 2 次元の分布をオーロラアークの方向に拡張して 3 次元の初期値とし、4 つの画像から SIRT 法と  $p$ -近似を用いて 3 次元の再構成を行なった。この  $p$ -近似の範囲は  $\pm 4\text{km} \times \pm 8\text{km}$  である。これにより得られた、3 次元の分布を図 5.7(a), (b) に断面図で示す。この図 5.7(b) 中には、矢印と“N”の記号で地理的北方向を示している。

再構成される領域とされない領域の境界付近で多少の不自然さはあるものの、2 層のオーロラがうまく再構成されていることが分かる。この再構成結果のグレイレベル残差は 0.100 程である。

このような方法は一般的に用いることができるわけではなく将来において自動化することも難しい。また、次の章で述べるシミュレーションからも、それほど正確に再構成できるわけではないことも分かっている。しかし、条件の悪い同時観測画像からでもある程度の仮定を導入し再構成の方法に工夫をすることによって、妥当な結果を得ることができると分かった。

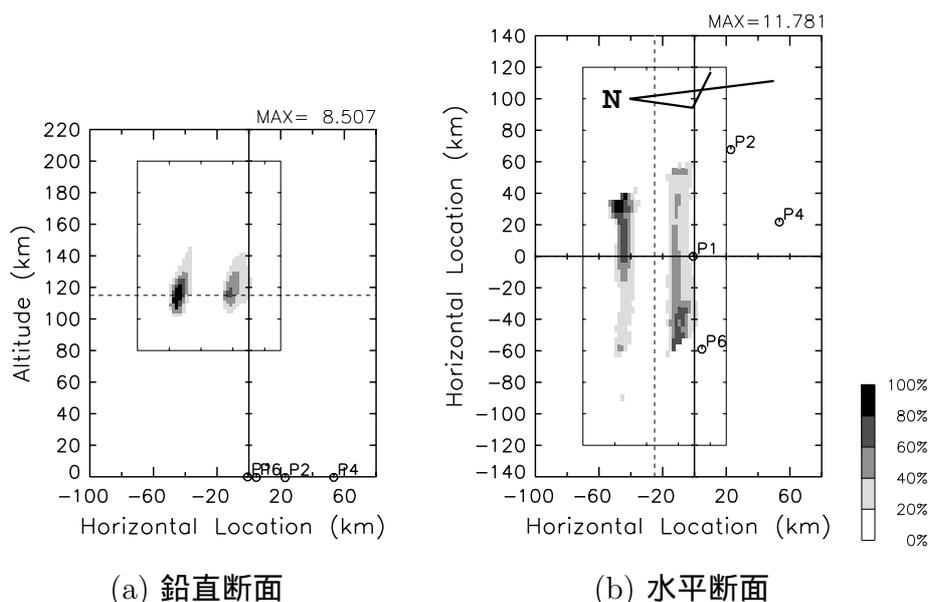


図 5.7: 1995 年 3 月 26 日 20 時 26 分 10 秒の再構成結果

### 5.2.3 1995 年 3 月 26 日 23 時 40 分 30 秒の複雑な形状のオーロラ

1995 年 3 月 26 日 23 時 40 分 30 秒の複雑に屈曲したオーロラの 4 点同時観測画像 (557.7nm) を高度 115km に投影したものを図 5.8 に示す。これらの画像の内、ALIS 側のカメラシステムで得られた 3 つの観測画像は 5 秒の露光を、日本側のカメラでとられた観測画像は 1 秒の露光を行なったものである。このオーロラはかなり複雑な構造を持っているが、その複雑な部分は観測点からそれほど外れた位置ではないため、良い再構成ができるものと考えられる。

この 4 点同時観測画像を SIRT 法と  $p$ -近似で再構成した結果を図 5.9 に断面図と投影図で示す。 $p$ -近似の範囲は  $\pm 4\text{km} \times \pm 8\text{km}$  としている。

この図 5.9 を見ると、例えば (a) の鉛直面の断面図中でセルの範囲を示す内側の長方形の右側境界付近の上部に見られるような、再構成を行なう範囲の境界付近の不自然な発光が多少見られるが、無視できる範囲である。(a)~(b) のいずれの図においても、複雑にフォールドしたオーロラの構造をはっきりと見て取ることが可能であり、良い再構成ができているものと思われる。

また、この再構成結果の磁力線に沿った発光強度分布プロファイルを図 5.10 に示す。これらのプロファイルは、A は複雑にフォールドした部分の南側の一点 (30, -25, 120) を、B は同じ複雑にフォールドした部分の北側の一点 (15, -25, 120) を、C は緩やかにカーブし東側に伸びる発光の弱いアークの一点 (10, 25, 120) を通るものである。これらの点は、図 5.9(b) に白丸で印を付けた点である。

このグラフから、このオーロラの発光強度最大となる高度は 115km~120km であること

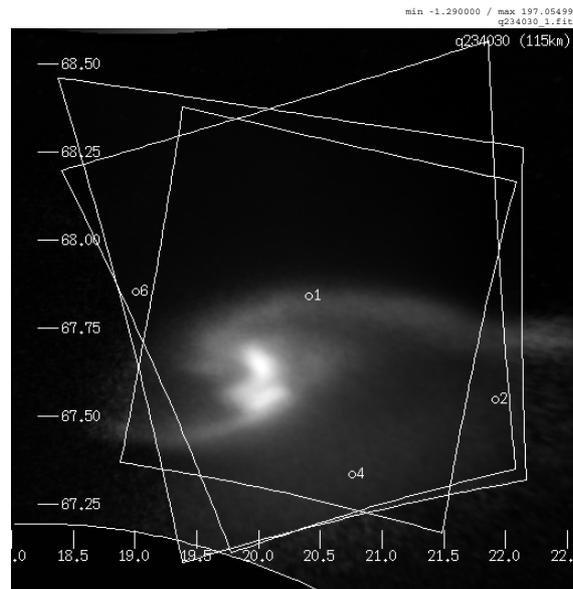


図 5.8: 1995 年 3 月 26 日 23 時 40 分 30 秒の観測画像の投影

が見て取れ、その高度はアークの位置により異なるものである可能性が示されている。

再構成結果の断面図や投影図、沿磁力線プロファイルを見る限り、複雑な構造が再現されており、良好な再構成ができていると思われる。これはオーロラが観測点群の間の上空にあり、オーロラアークを通過する磁力線のフットポイント付近に観測点があるためであると思われる。

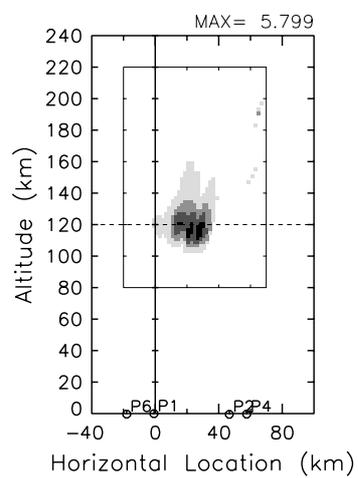
### 5.3 第 2 回の観測と再構成

第 2 回の ALIS-JAPAN 共同観測は、1995 年 12 月の上旬から下旬まで行なわれた。この時は第 1 回の観測に比べて観測点数が 1 点多く、ALIS 側の観測点 4 点に加え日本側のカメラ 2 点の計 6 点による観測が行なわれた。天候が不順な期間もあったが、この期間中に初めての 6 点同時観測画像を得ることができた。

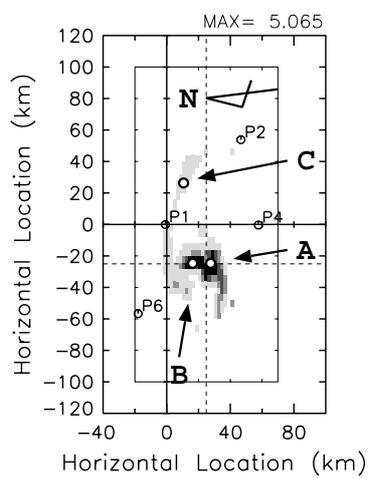
以下に、第 2 回 ALIS-JAPAN 共同観測における同時観測画像とその再構成結果を示す。

#### 5.3.1 1995 年 12 月 21 日 21 時 14 分 50 秒の近接した 2 層のオーロラ

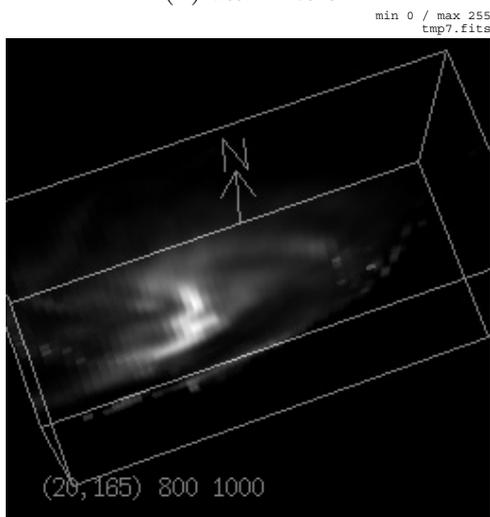
まず、1995 年 12 月 21 日 21 時 14 分 50 秒 (UT) に初めて取得された 6 点同時観測画像 (557.7nm) を、観測点配置と共に図 5.11 に示す。これを見ると Abisko と Nikkaluokta の画像が他と対応していないように見えるが、これはこの 2 つの観測点の画角が他に比べて大きいからであり、図 5.12 に示すように適当な高さに画像を投影すると、すべての画像が一



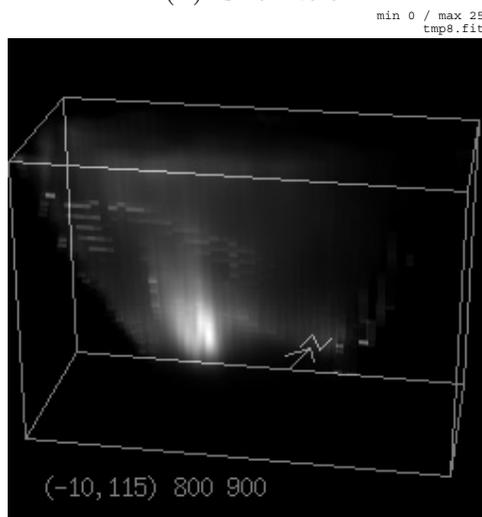
(a) 鉛直断面



(b) 水平断面



(c) 上方から見た投影図



(d) 南側から見た投影図

図 5.9: 1995 年 3 月 26 日 23 時 40 分 30 秒の画像の再構成結果

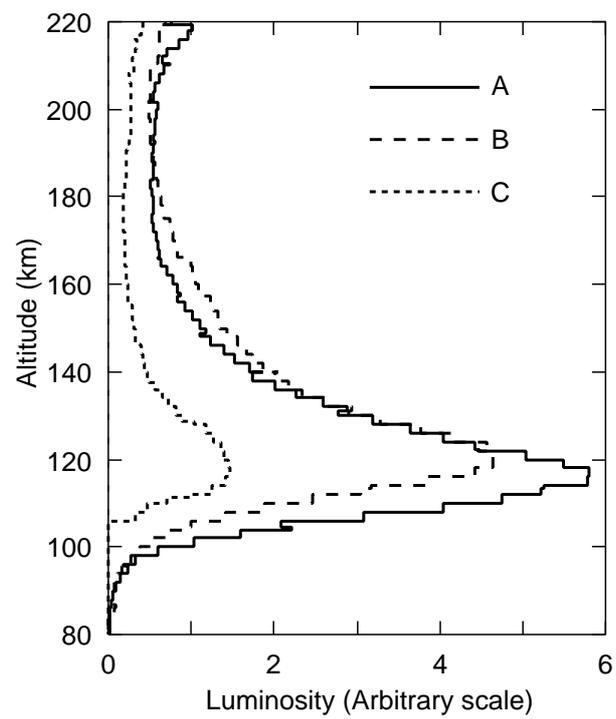


図 5.10: オーロラの各部分での沿磁力線プロファイル

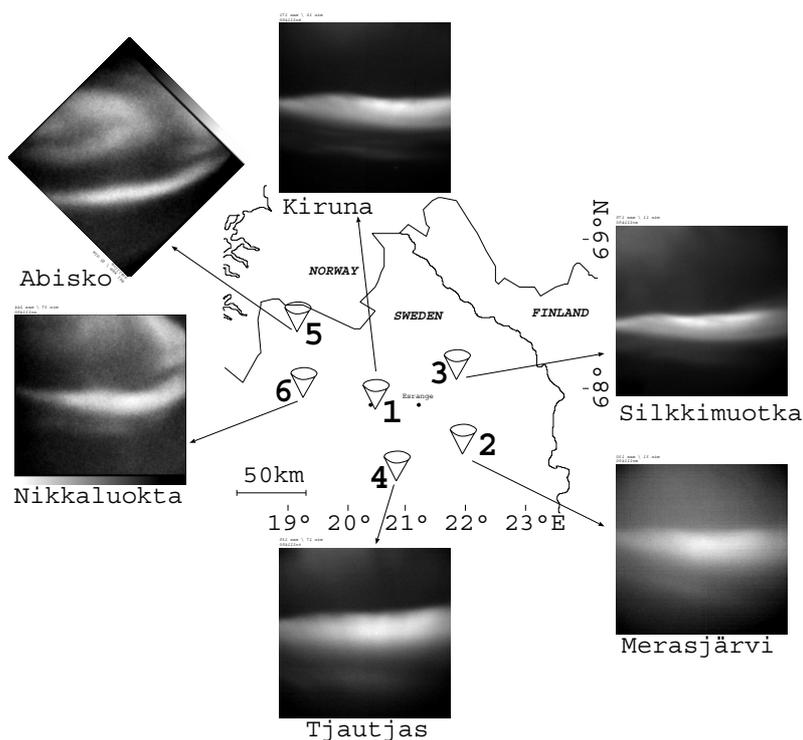


図 5.11: 1995 年 12 月 21 日 21 時 14 分 50 秒の 6 点同時観測画像

つのアークを撮影していることが分かる。これらの画像の内、ALIS 側の 4 点の画像は 1 秒間の露光、日本側の 2 点は 3 秒の露光となっている。

再構成はこのすべての画像に共通して写っているアークに対して行なうことにした。これより北にあるアークは再構成には含めていない。再構成手法は SIRT 法と  $p$ -近似を組み合わせたもので、 $p$ -近似の範囲は  $\pm 2$  ボクセル分、つまり南北方向に  $\pm 2\text{km}$ 、東西方向に  $\pm 8\text{km}$  である。再構成された結果を幾つかの方向に投影したものを図 5.13(a)~(c) に示す。(b) の左上側に多少のアーティファクト (再構成結果の不自然な発光) が見られるが、ほぼまっすぐに伸びたアーク状のオーロラが再構成されていることが分かる。

また、Kiruna(図 5.11 の中央の 1 と番号の振られた観測点) からの観測画像と再構成された結果から得られる画像とを、再構成に用いた領域のみを取り出して比較したものが図 5.14 である。これを見ると再構成された結果は画像に関しては十分に一致していることが分かる。グレイレベル残差値は 0.11 程度で、ここには示していないが他の 5 地点からの画像においても同様に、再構成結果から得られる画像と観測画像は十分に一致するものであった。

細かい構造を見るため再構成結果の Kiruna(1 番の観測点) を含む地理的南北方向の鉛直面上の発光強度と高度 115km の水平面上の発光強度を、濃淡で示した断面図が図 5.15 である。特に鉛直面の分布に注目すると、このアークは近接した二つの層からなっていることが分かる。そこで図 5.15 の水平面の断面図中に示すように、北側の発光強度の強い部分を A、その南側の発光強度の弱い部分の一点を B とし、その点を通る磁力線に沿った

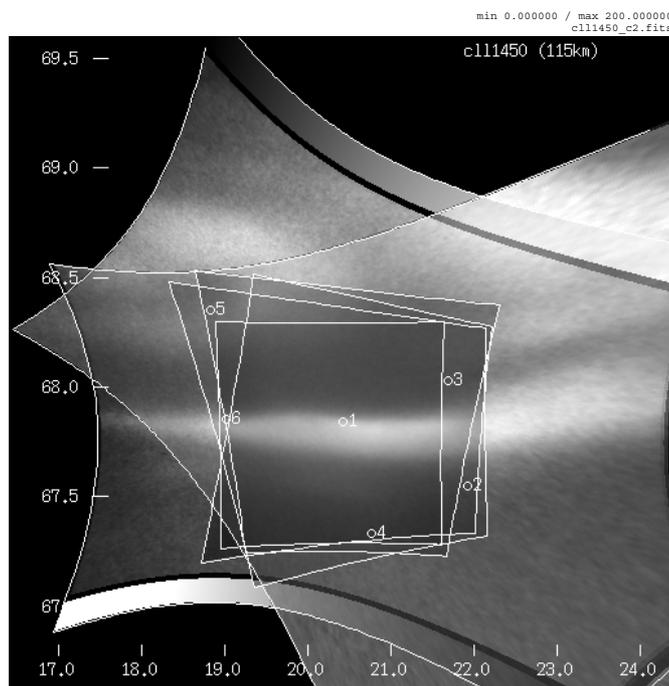
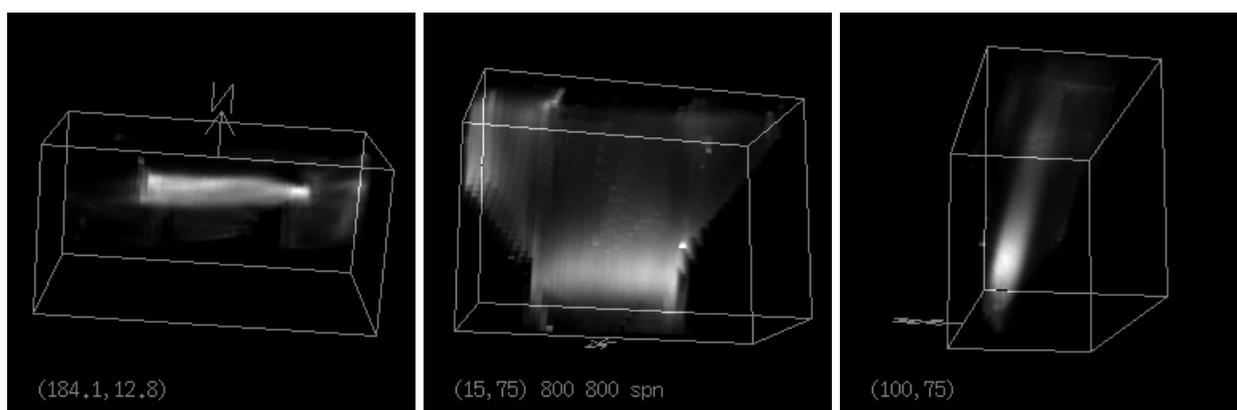


図 5.12: 1995 年 12 月 21 日 21 時 14 分 50 秒の画像を高度 115km に投影したもの



(a) 下方から見た投影図

(b) 南側から見た投影図

(c) 西側から見た投影図

図 5.13: 再構成結果の投影図

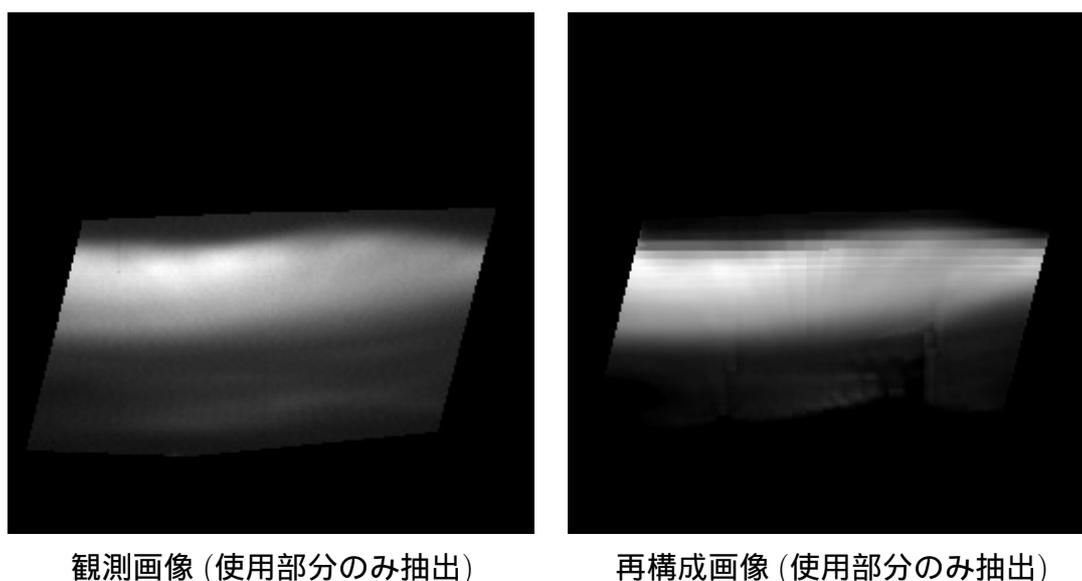


図 5.14: 観測画像と再構成結果の画像との比較

発光強度プロファイルを取り出したものが、図 5.16 である。発光強度最大となる高度に、A は 115km、B は 118km と多少の違いが出ている。B の南側の強度の弱いアークのプロファイルにおいて、220km 付近に不自然な強い発光が見られるのは、完全には除去されなかった背景光がアーティファクトとして現れたものと思われる。

このように画像からは判別し難い近接した 2 層の構造を、再構成を行なうことによりはっきりと識別することができた。ただ、次章のシミュレーションの結果から、このような近接する 2 層のオーロラでは、発光の弱いアークの高度の推定にはやや大きな誤差が出ることが分かったため、2 つの層の発光強度の高度分布の違いについては有意であるとは言えないと考える。しかし、発光の強いアークに関しては良好な再構成ができており、発光強度が最大となる高度についても信頼できると考えられる。

### 5.3.2 1995 年 12 月 21 日 21 時 31 分 20 秒の複雑な形状のオーロラ

次に、1995 年 12 月 21 日 21 時 31 分 20 秒 (UT) に取得された複雑にフォールドしたアークの 5 点同時観測画像 (557.7nm) を図 5.17 に示す。これらの画像の内 ALIS 側のカメラ 3 点の画像は 1 秒間の露光、日本側のカメラ 2 点は 3 秒間の露光を行なったものである。

この 5 点同時観測画像を SIRT 法と p-近似を用いて再構成した結果について、図 5.18 に投影図を、図 5.19 に断面図を示す。投影図はやや南の下方からオーロラを見上げた形となっており、これらの図を見ると、複雑にフォールドしたアークの構造が再構成されていることが分かる。

図 5.18 の投影図の左側で発光が断ち切られた形になっているのは、再構成を行なう領域がそこで断ち切られていてそれより左側 (実際の空間中では西側、図 5.19 の水平断面図で

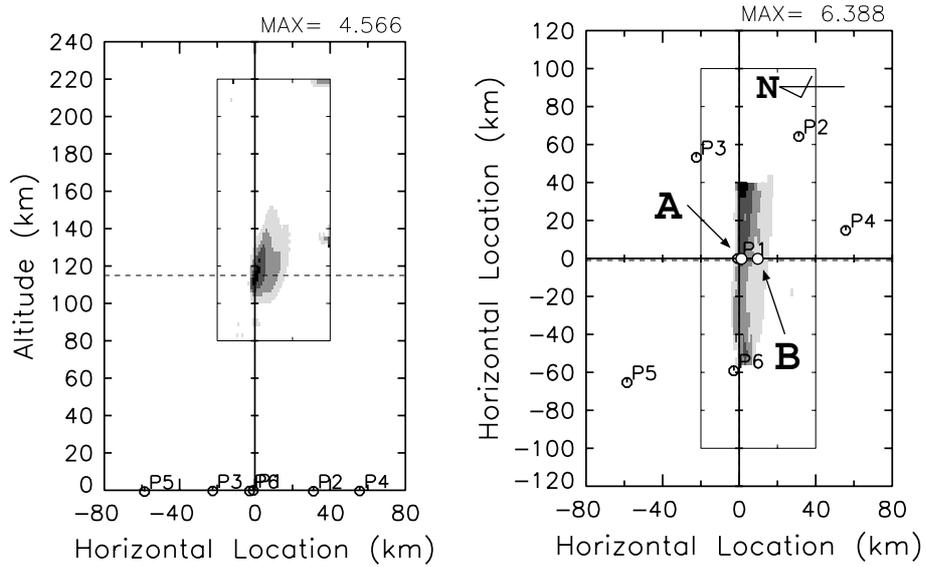


図 5.15: 再構成結果の発光強度分布断面図

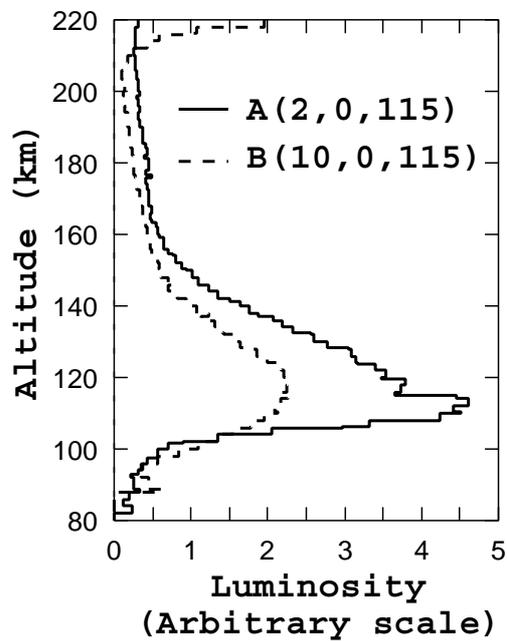


図 5.16: 沿磁力線発光強度プロファイル

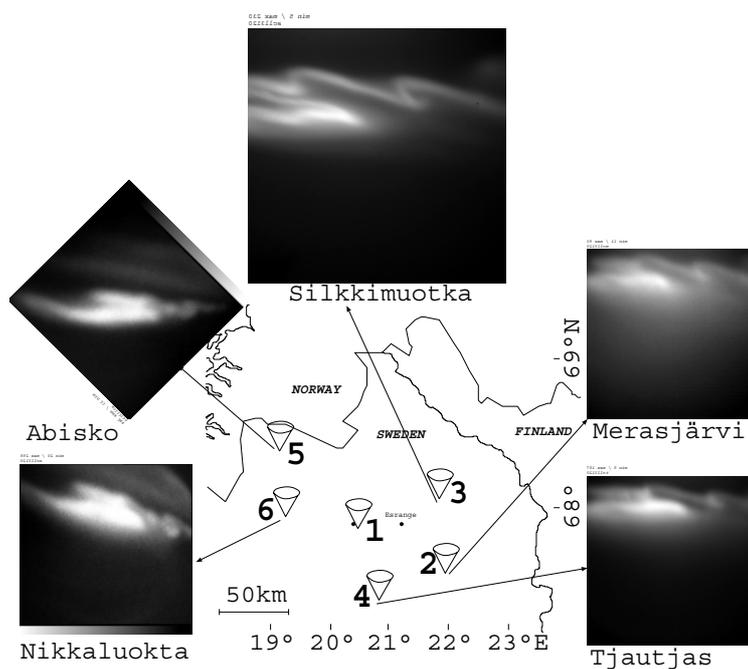


図 5.17: 複雑にフォールドした 5 点同時観測画像 (557.7nm)

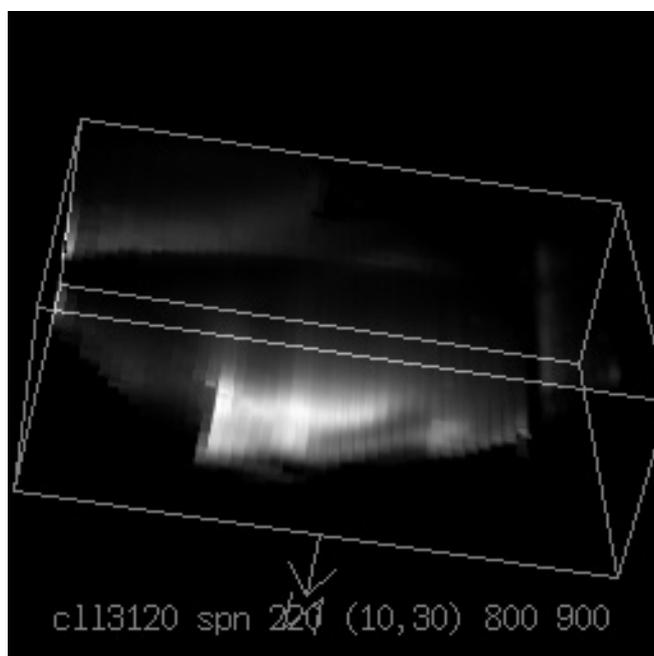


図 5.18: 再構成結果の投影

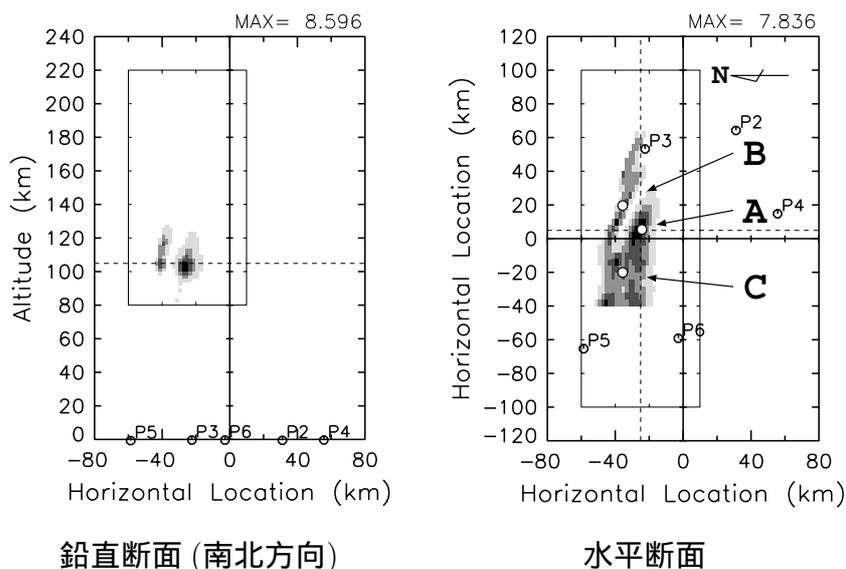


図 5.19: 再構成結果の断面

は下側)では再構成を行なわないからである。あまり目立たないが投影図の右側(実際の空間中では東側、水平断面図では上側)でも同様である。これは、3.5節の図3.7で示したような共通視野領域が複数重なることにより、再構成を行なう領域が複雑な形状となることによるものである。簡単化のため、図3.7の共通視野領域を2つの観測点を結ぶ直線に直交する平面で切断した場合を考える。オーロラの発光する高度の上限と下限を設定すると、この切断した平面上で共通視野領域は台形となる。この台形の共通視野領域が2組あるとし、それらの和を考えると、図5.20に太線で囲んだ領域で示すような、複雑な形状をした領域が共通視野領域となる。セル全体を設定する直方体の領域(この図では長方形の細線で示している)は、この共通視野領域を完全に覆うように設定する必要があるため、セルは設定されているが再構成を行なわない領域が存在することになる。このことから、再構成されたオーロラに関して、直方体で示された領域のかなり内側で発光が断ち切られた形となる。

また、図5.19の水平断面に小白丸で示した3点を通る、磁力線に沿った発光強度プロファイルを図5.21(a)~(c)に示す。図5.21(a)~(c)は、図5.19中のA~Cに対応し、Aは最も発光強度の大きい部分、Bは他のアークから少し分離した部分、Cは多層に重なった中央の部分から選んだ点である。図5.21(a)のグラフでオーロラが消光と思われる高度よりもさらに低い高度に発光のあるものとなっているが、これは画像中のオーロラ光以外のノイズとなる成分が再構成結果に現れたものと思われる。また、図5.21(c)のプロファイルの上下端に不自然な発光が見られるが、これも除去し切れなかった背景光や、再構成されたオーロラのさらに北にある発光の弱いオーロラが、アーティファクトとして現れたものと思われる。しかし、これらを除けば発光強度のプロファイルはいずれも Banksら [43] の計算に十分合致したものとなっている。これらのプロファイルにおいて、発光強度最大となる部分は100~105kmの高さとなっている。

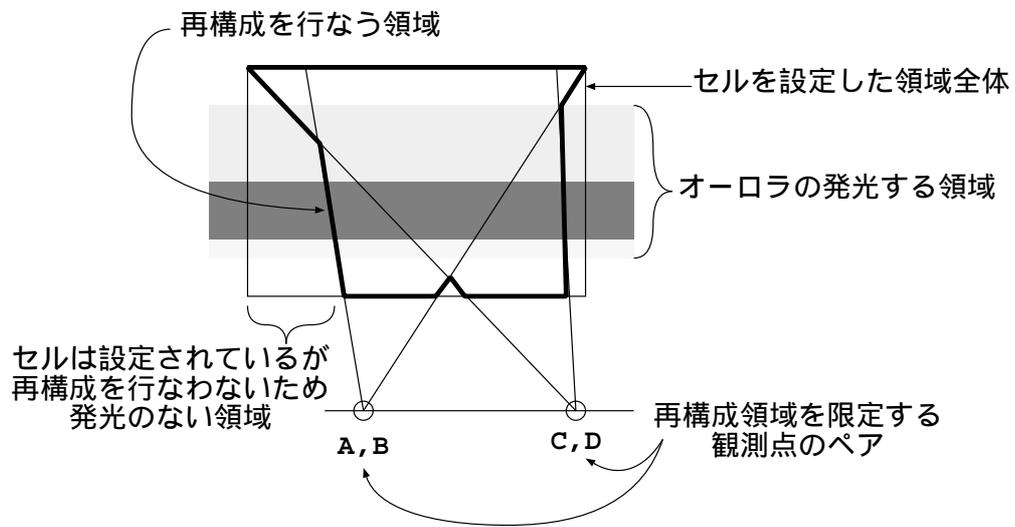


図 5.20: セルの設定される領域と再構成の行なわれる領域の違い

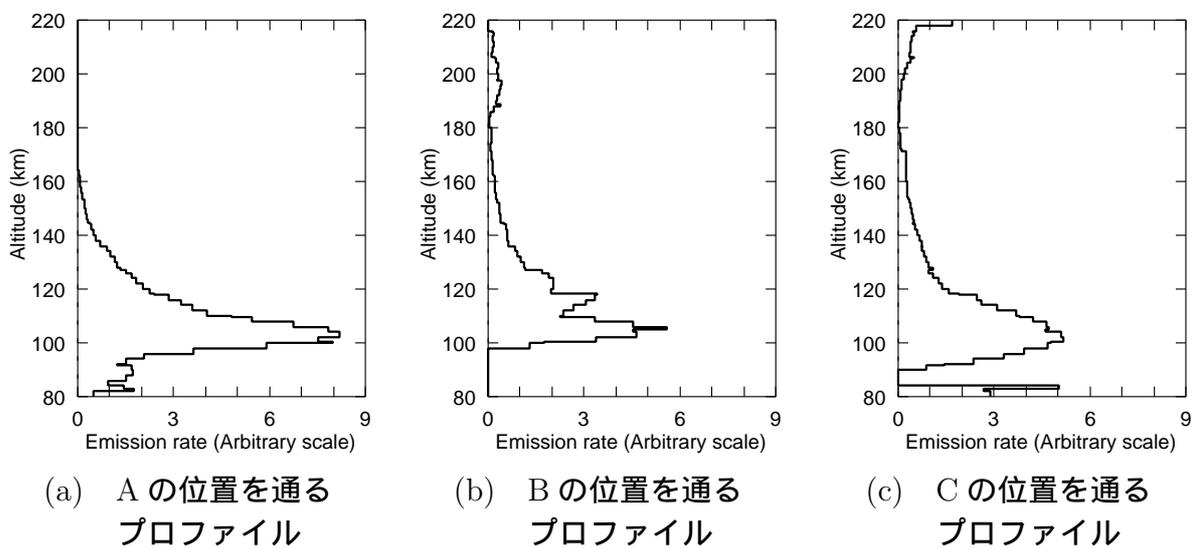


図 5.21: 沿磁力線プロファイル

この観測画像の場合、再構成するオーロラを通る磁力線のフットポイントに観測点があるわけではなく、アークを挟んだ両側から観測しているわけでもないが、オーロラアークの複雑にフォールドした形状がはっきりと再構成されている。次章のシミュレーションにおいても、複雑にフォールドした部分の中央では、発光強度最大となる高度の誤差が6km程度とやや大きくなる傾向があるが、それ以外は誤差が4km以下と小さなものとなっており、オーロラに対するある程度以上の基線長あることと観測点数の多さとによって、良い再構成が行なえているものと思われる。

## 5.4 第3回の観測と再構成

第3回の ALIS-JAPAN 共同観測は、1997年1月から3月に掛けて行なわれた。この観測では、FAST 衛星や EISCAT レーダとの同時観測が企図されたが、同時観測期間中に良いトモグラフィ画像データを得ることはできなかった。しかし、この観測期間中には初めて557.7nm 以外の波長を持つ427.8nm のオーロラトモグラフィ画像を得ることができた。この共同観測では日本からカメラを持ち込まなかったが、ALIS 側の観測点が1点強化されたため観測地点数は計5点であった。

以下に、第3回 ALIS-JAPAN 共同観測における同時観測画像とその再構成結果を示す。

### 5.4.1 1997年2月9日18時29分40秒の多層のオーロラ

まず、1997年2月9日18時29分40秒(UT)の4点同時観測画像(557.7nm)を、高度32kmに投影したものと高度115kmに投影したものを図5.22に示す。前者は各観測点の画像が個別に見ることができるよう、後者はそれぞれの画像が重なって見えるように示したものである。4つの観測画像すべて露光時間は1秒である。これらの画像からは、複数の層からなる比較的まっすぐなアークが4つの観測点から撮影されていることが分かる。このオーロラは、Kiruna(1番の観測点)の天頂付近を横切っており、観測点群の間にあるという点で再構成に有利であるが、画像上で複数のアークが重なりあっている点と、ほぼ東西に伸びるアークに対して、それに直交する方向である南北方向への観測点の基線長がそれほど長くないという点で、やや再構成が難しいものとなっている。

この4点観測画像をSIRT法とp-近似で再構成したものを、図5.23に断面図で、図5.23に投影図で示す。再構成を行なったオーロラはKiruna(1番の観測点)の上空付近の発光の強いアークで、そこからやや北にはなれたSillkmuotka(3番の観測点)より北側の上空にある発光の弱いアークは再構成する範囲には含めていない。再構成に用いたセルは時計回りに15°回転させてあり、水平断面の左側は北方向から15°東よりの方向である。p-近似の範囲は、 $\pm 4.5\text{km} \times \pm 9\text{km}$  である。

南側の近接した2層とそれから少し北側に離れた1層のアークは、図5.23の断面図にも図5.23(b), (c)の投影図にもはっきりと現れている。観測画像中でかろうじて見ることのできる、それらの中間にある発光の弱いアークは断面図には現れていないが、投影図では他のアークと比べて非常に高度の高い位置に現れている。これは発光が非常に弱いため、画

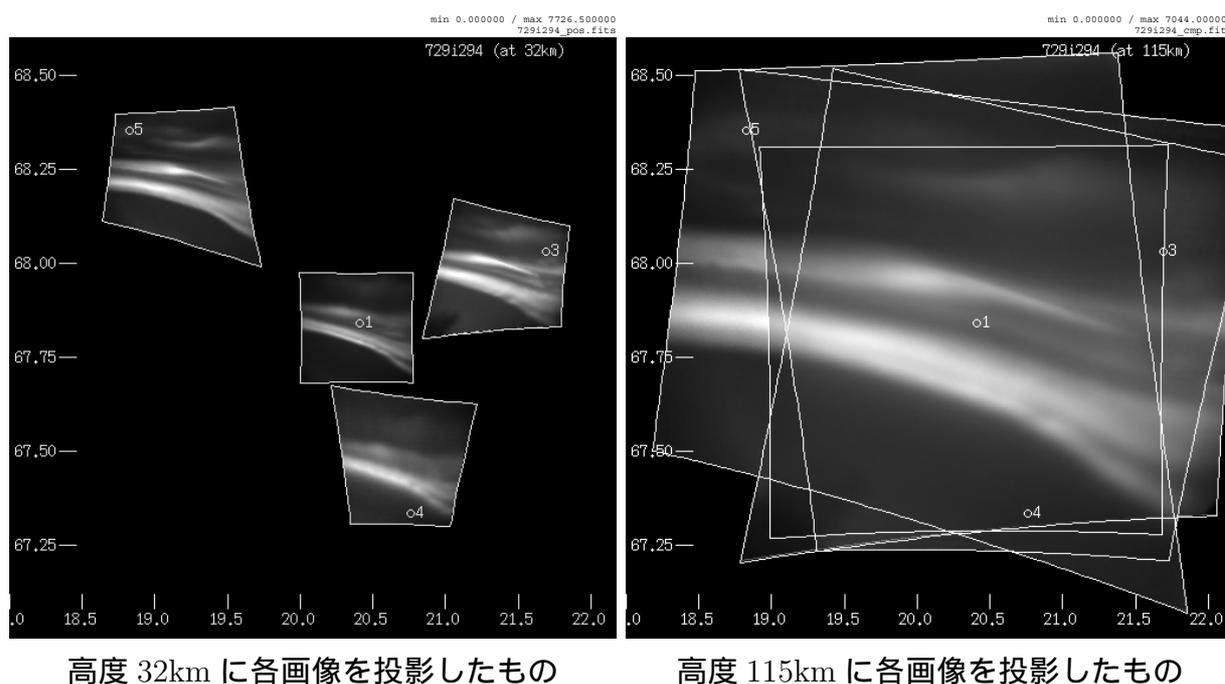


図 5.22: 1997 年 2 月 9 日 18 時 29 分 40 秒の観測画像の投影

像中では他の強いアークと重なることによって、隠された状態となってしまったためと思われる。

この再構成結果から、図 5.23に見られる 3 つの主なアークについて、横方向の点線で示される位置を通る沿磁力線プロファイルを南 (断面図では右) から順に A, B, C として取り出し、図 5.25にグラフで示した。このグラフを見ると発光強度最大となる高度は A, B, C それぞれ、109km、120km、122km 程度となっている。

このオーロラ観測画像では多数の層が重なりあっているが、構造の複雑さの割に観測点配置はそれほど良いものではなく、その再構成はやや難しいものと考えられる。次章におけるシミュレーションからも、A, C に対応するアークに関しては良好な再構成が行なわれるが、B に対応するアークに関してはやや誤差が大きくなるという結果が出ている。この 4 点観測画像からの再構成結果は、内側のアークに関して沿磁力線プロファイルのような細かい構造を見る場合には注意を要するが、外側のアークに関しては良好な再構成がなされており、全体の発光形状は妥当な結果が得られていると思われる。

#### 5.4.2 1997 年 2 月 9 日 18 時 31 分 30 秒の青色 (427.8nm) のオーロラ

次に、1997 年 2 月 9 日 18 時 31 分 30 秒 (UT) の 4 点同時観測画像 (427.8nm) を高度 32km に投影したものと高度 105km に投影したものを図 5.26に示す。露光時間はすべて 2 秒である。このオーロラ画像には Kiruna(1 番の観測点) 上空の付近を通る弱いアークがあ

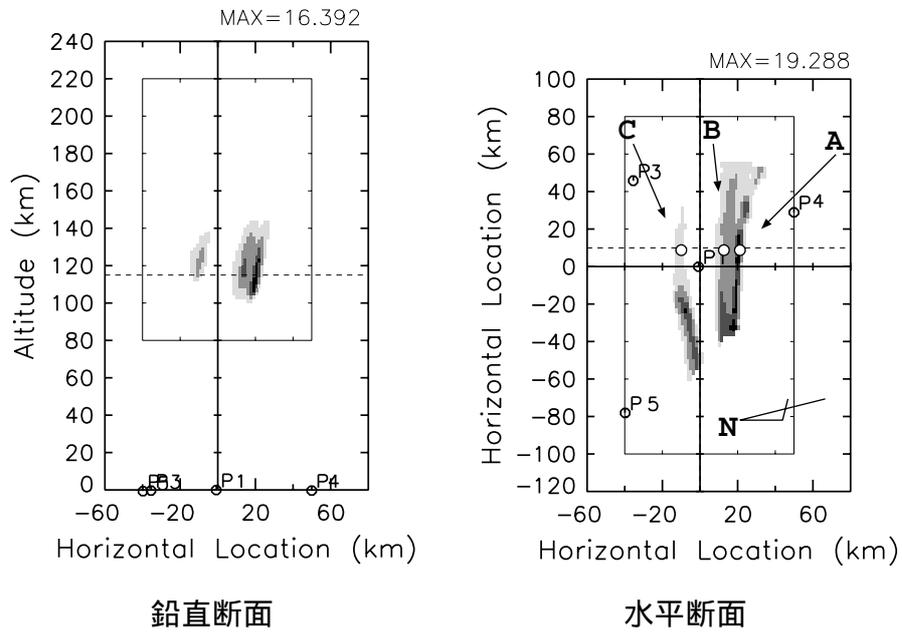


図 5.23: 再構成結果の断面図

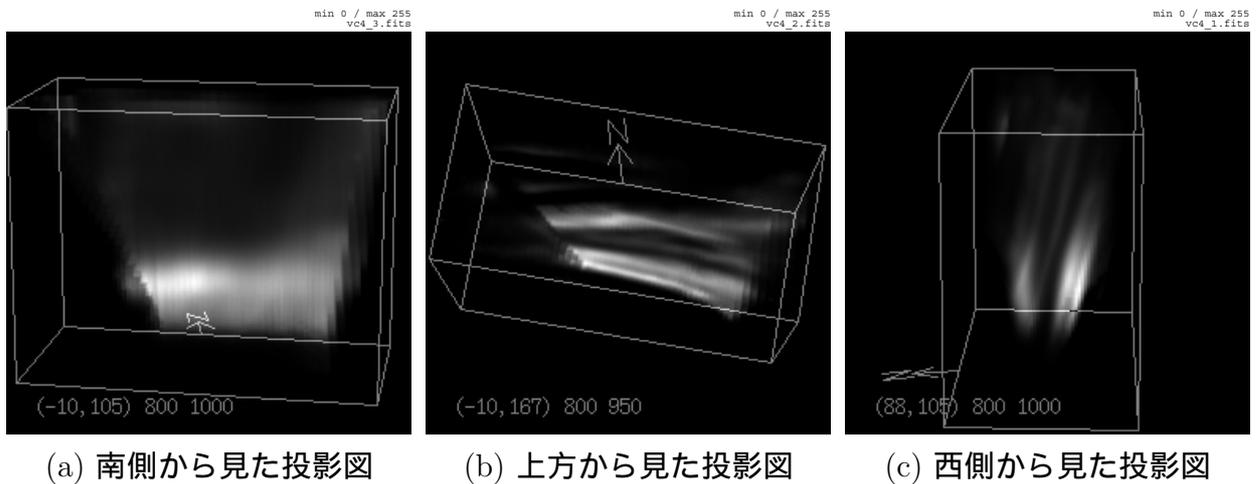


図 5.24: 再構成結果の投影

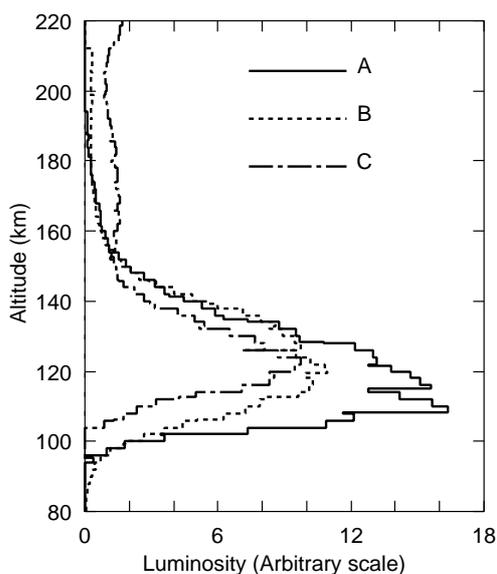


図 5.25: 各アークの沿磁力線プロファイル

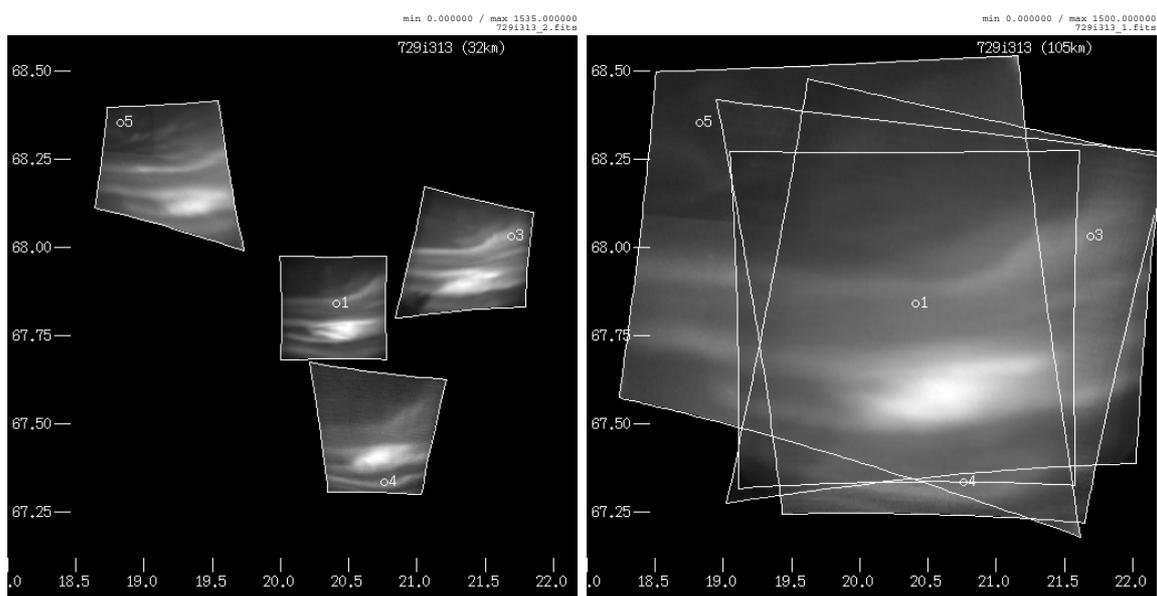
り、その北側にさらに発光の弱いアークが写っている。また、これらのアークからは少し離れて、Kiruna と Tjautjas(4 番の観測点) の間の上空で複雑な構造の強いアークがあり、さらにその南側に弱いアークがある。

基本的に 427.8nm のオーロラは 557.7nm のオーロラよりも暗く、また ALIS のカメラも 557.7nm に比べて 427.8nm ではやや感度が悪い。そのため、露光時間を倍にしているものの、前小節の 557.7nm のオーロラ画像の画素値のダイナミックレンジに比べて、本小節の 427.8nm のオーロラ画像の画素値のダイナミックレンジは  $1/5 \sim 1/4$  倍となり、相対的にノイズの影響が大きくなっている。

この 4 点観測画像中の、最も明るく複雑なフォールドのあるアークの部分とその北側の東西に長く伸びるそれほど強くないアークを、SIRT 法と  $p$ -近似を用いて再構成した。 $p$ -近似の範囲は、 $\pm 4\text{km} \times \pm 8\text{km}$  である。再構成結果を図 5.27(a), (b) に投影図で示す。(a) がやや南寄りの上方から見たもの、(b) がやや上方で西寄りの南側から見たものである。矢印と N の記号で表された方向は地理的北方向を示し、セルを設定した領域を示すワイヤフレーム直方体の下側の面に接している。

図 5.27(a) の再構成されたオーロラの右側の上下には、僅かに不要と思われる発光があるが、これは再構成に含めなかった南側の弱いアークや、画像中で最も北側に写っているそれほど東西に伸びていないアークの部分がゴーストオーロラとなってしまうためではないかと思われる。しかしそれを除けば、複雑に重なったアークの形状がある程度出ており、再構成されている範囲内では十分良好な再構成ができているものと思われる。

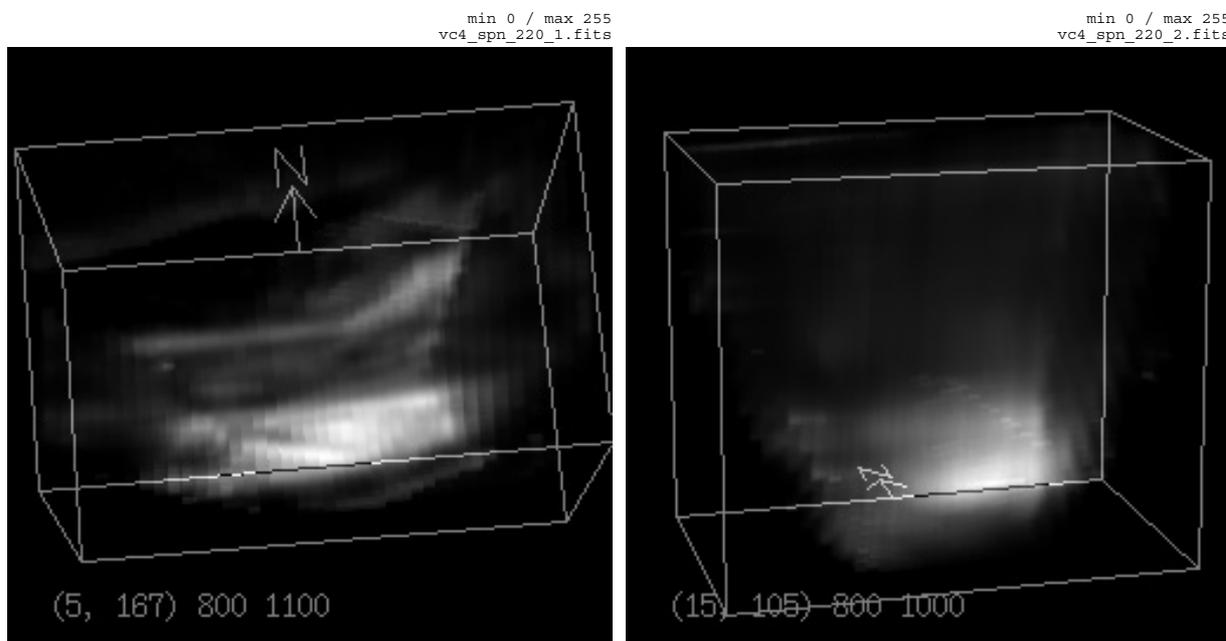
この再構成結果の沿磁力線プロファイルを図 5.28 に示す。A と示された実線のグラフが複雑にフォールドした強いアークの南側を通るプロファイルで、B と示された点線のグラ



(a) 高度 32km

(b) 高度 105km

図 5.26: 1997 年 2 月 9 日 18 時 31 分 30 秒の観測画像の投影



(a) 上方から見たもの

(b) 南側から見たもの

図 5.27: 再構成結果の投影図

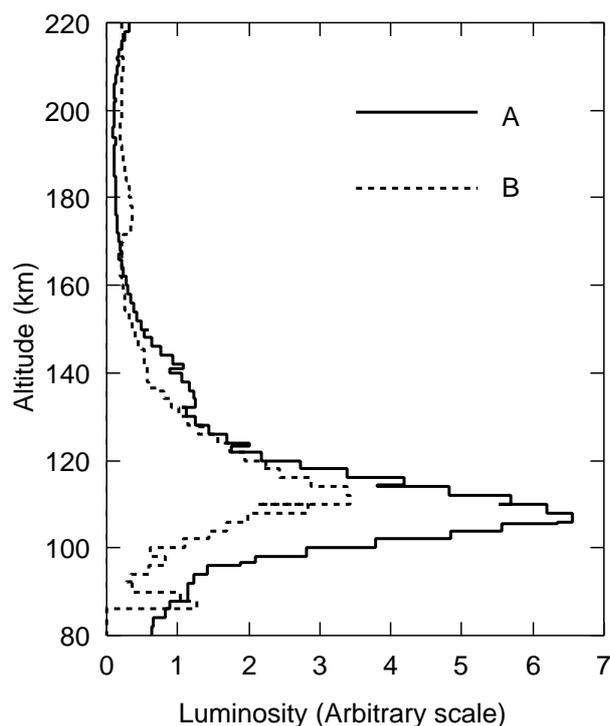


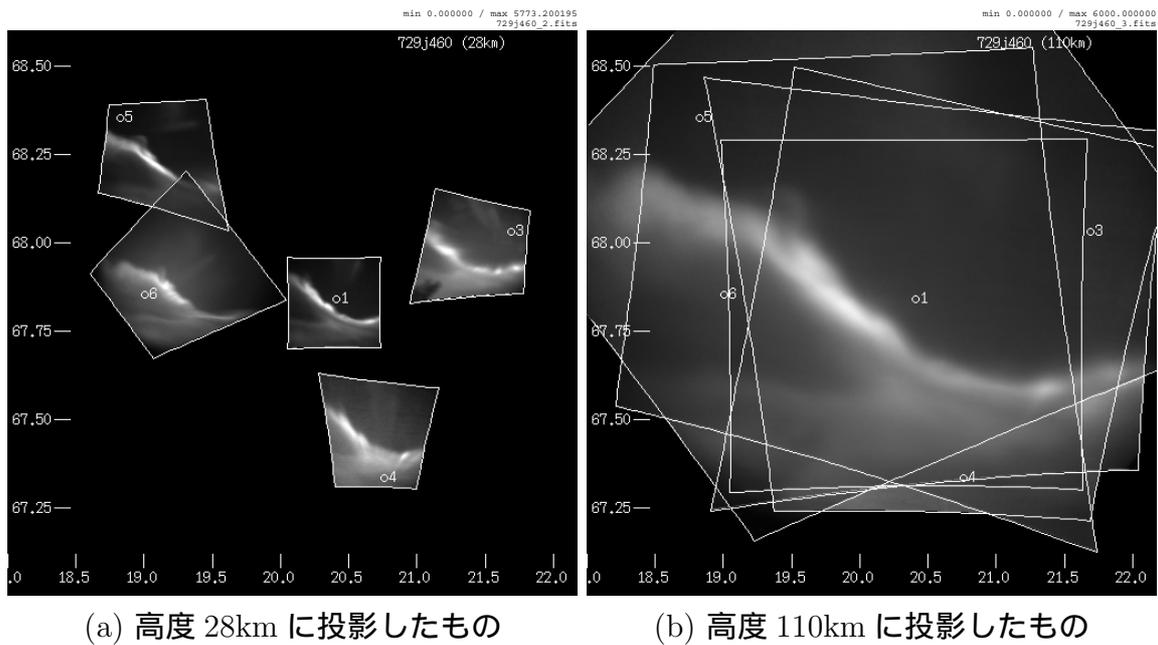
図 5.28: 427.8nm のオーロラ再構成結果の沿磁力線プロフィール

フが北側の東西に伸びる弱いアークを通るプロフィールである。発光強度最大となる高度はそれぞれ 106km、110km となっている。前小節で示した 50 秒前の 557.7nm のオーロラと比べてやや高度が低いものとなっているが、時刻の差が幾分大きくオーロラの形状にも大きな差があるため、直接比較を行なうことは難しいものとする。

このオーロラの場合、数少ない 557.7nm 以外の波長のオーロラのトモグラフィ解析となるのだが、形状が複雑でアーク同士が近接しており、その割に観測点配置はそれほど良いものではないため、解析結果の取り扱いには注意が必要であるとする。しかし、アークのフォールドした形状などは十分見て取ることができ、もし同様な観測点配置で同様な構造の複雑さを持つ時間的に連続した観測画像があれば、オーロラ構造の時間発展なども見ることができると思われる。

### 5.4.3 1997年2月9日19時46分0秒の単層のオーロラ

1997年2月9日19時46分0秒(UT)の5点同時観測画像(557.7nm)を、高度28kmと高度110kmの高さに投影したものを図5.29に示す。露光時間はすべて1秒である。これらのオーロラ画像には、一つの比較的発光の強いアークとその南側の弱いディフューズとが写っている。アークは比較的シンプルな構造で、観測点群の上空を横切っているため、精度の良い再構成ができるものとする。しかし、その南側のディフューズは一部が画像から



(a) 高度 28km に投影したもの

(b) 高度 110km に投影したもの

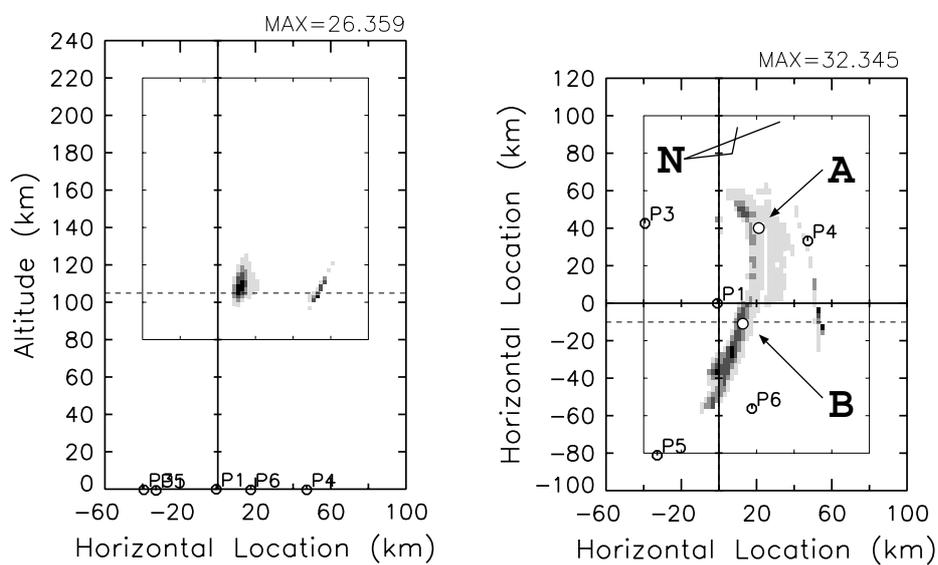
図 5.29: 1997 年 2 月 9 日 19 時 46 分 0 秒の観測画像の投影

外れた部分にあるため、再構成に際して複数の観測点から観測されていないゴーストオーロラとなってしまふものと考え。

再構成に関しては、東西に伸びる発光の強いアークのみを対象とし、ゴーストオーロラとなってしまふ南側の弱いディフューズはそれほど再構成に影響を与えないと考え、これを無視することにした。再構成手法は SIRT 法と  $p$ -近似を組み合わせたもので、 $p$ -近似の範囲は  $\pm 4\text{km} \times \pm 6\text{km}$  である。セルは上方から見て時計回りに  $15^\circ$  回転させてある。再構成結果を断面図と投影図で示したものが図 5.30(a)~(c) である。

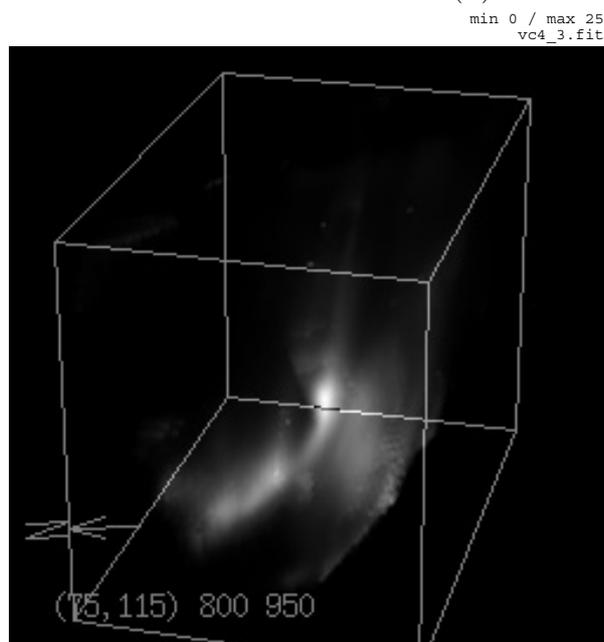
再構成結果を見ると、図 5.30(b) の P4(Tjautjas の観測点) 左側や図 5.30(c) のアークの右側に南側のディフューズが再構成結果に一部含まれていることが分かる。しかし、再構成に含めることのできなかつた南側のディフューズがゴーストオーロラとなることから、図 5.30(a) のアークの発光の右、P4 の真上にある発光のように再構成を行なう領域の境界付近で不自然な発光が現れてしまっている。しかし、これを除けば東西方向に伸びるアークがきれいに再構成されていることが分かる。

この再構成結果のアークの部分の沿磁力線プロファイルを図 5.31 に示す。A, B のグラフは図 5.30(b) に小丸で示した点を通るものである。図 5.31 から、ここに示した 2 つのプロファイルの発光強度が最大となる高度は、 $107 \sim 109\text{km}$  となっていることが分かる。東西方向の複数の位置に対して、アークの最も明るい位置を通る沿磁力線プロファイルから同様に発光強度最大となる高度を抜き出したものを、図 5.32 に示す。このグラフの縦軸は発光強度最大となる高度である。また、横軸の数字はアークの中の位置を示し、図 5.30(b) の縦軸の値と対応している。このグラフから、東西に伸びるアークの発光強度最大となる高度



(a) 鉛直断面図

(b) 水平断面図



(c) 西側から見た投影図

図 5.30: 再構成結果の断面図及び投影図

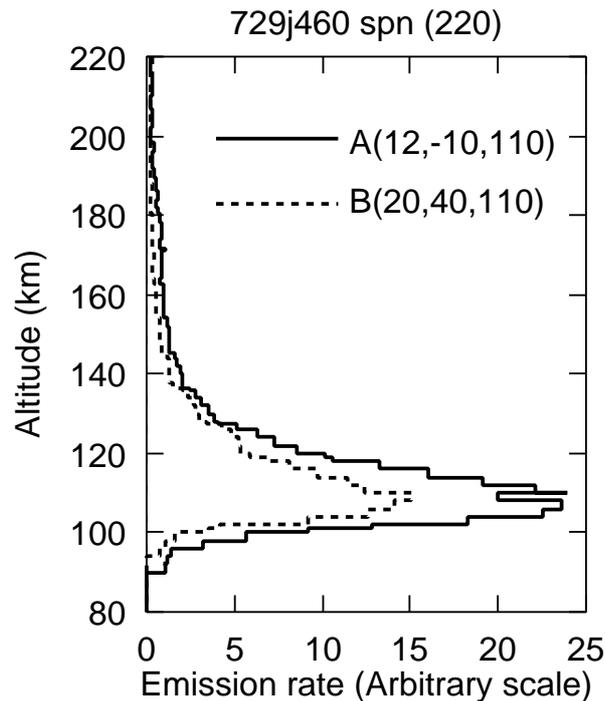


図 5.31: アークの沿磁力線プロファイル

が、西から東へ位置が変わるにつれて、105km 程度から 111km 程度へと緩やかに高くなっていくことが分かる。

このオーロラは、アークの南側にあるディフューズの影響が多少存在するかも知れないが基本的に単純なアークとみなすことができるものと考ええる。次章のシミュレーションによっても、このような単純な形状でしかも観測点群の上空にあるオーロラに対して、5点という十分な数の観測点がある場合には、良好な再構成結果が得られるということが分かっている。そのため、本小節の再構成結果の信頼性は高く、発光強度最大となる高度のアークに沿った推移についても、セルの解像度 (2km) 以上の変化については十分に意味があるものと考ええる。

## 5.5 第4回の観測と再構成

第4回 ALIS-Japan 共同観測は1998年2月の後半から3月の初めにかけて約2週間行なわれた。この観測ではALISの5点の観測点に日本で積分球による感度較正が行なわれたカメラを使う1点を加えた、計6点の観測地点による観測であった。

しかし、観測を行なったのが最近であること、観測システムのソフトウェアを更新したためか、時刻に問題があると思われる画像があることなどから、あまり多くの同時観測画像に対する解析は進められていない。

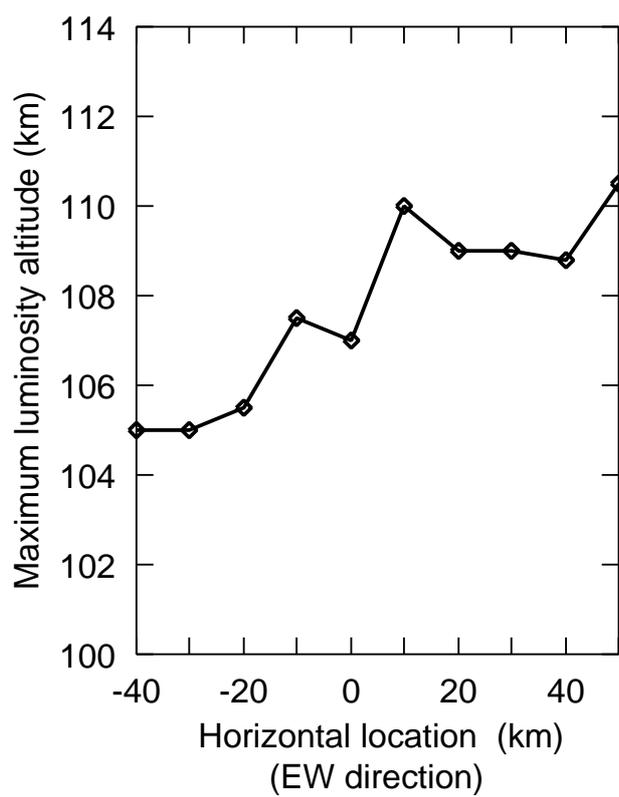
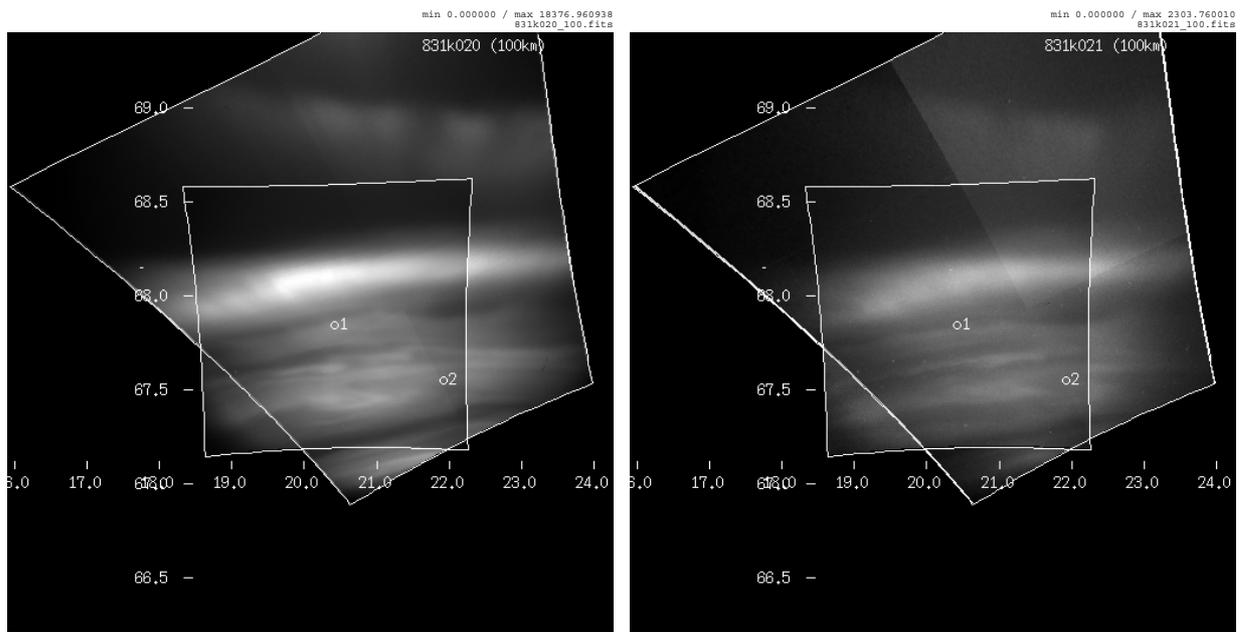


図 5.32: 東西に伸びるアークの発光強度最大となる高さの分布



(a) 557.7nm

(b) 427.8nm

図 5.33: 近接した時刻の異なる波長のオーロラ画像 (高度 100km に投影)

ただ、2点という少ない観測点数による観測であるが、近接した時刻における異なる波長のオーロラ画像が得られているので、これを再構成し、それぞれの沿磁力線発光強度プロファイルと比較してみることにする。また、この2点の観測点の片方は日本において感度較正されたカメラを用いているため、再構成を行なった結果は絶対的な発光強度として得られることになる。

### 5.5.1 1998年3月1日20時2分0秒と10秒の2種類の波長のオーロラ

ここで解析する画像は、1998年3月1日20時2分0秒(UT)の557.7nmのオーロラ画像と、1998年3月1日20時2分10秒(UT)の427.8nmのオーロラ画像である。両者を高度100kmに投影したものを図5.33(a), (b)に示す。これらの画像は、2秒の露光と4×4のビニングをしたもので、オーロラとしてはかなり発光の弱いものである。

図5.33(a), (b)のオーロラはほぼ同じ形状をしており、Kiruna(1番の観測点)の上空の北側に発光の強いアークがあり、その南側には多数の層が近接した発光の弱いアークが広がっている。また、発光の強いアークから北にやや離れた位置で Merasjärvi(2番の観測点)からの画像にのみ写っている発光の弱い単層のアークが存在する。

本小節では、この観測画像のもっとも明るい Kiruna の北側にあるアークのみを再構成することにした。Kiruna の南側の発光弱い多数層のアークは一部ゴーストオーロラとなってしまうが、十分無視できると判断した。この再構成を行なうアークは、どちらの波長の

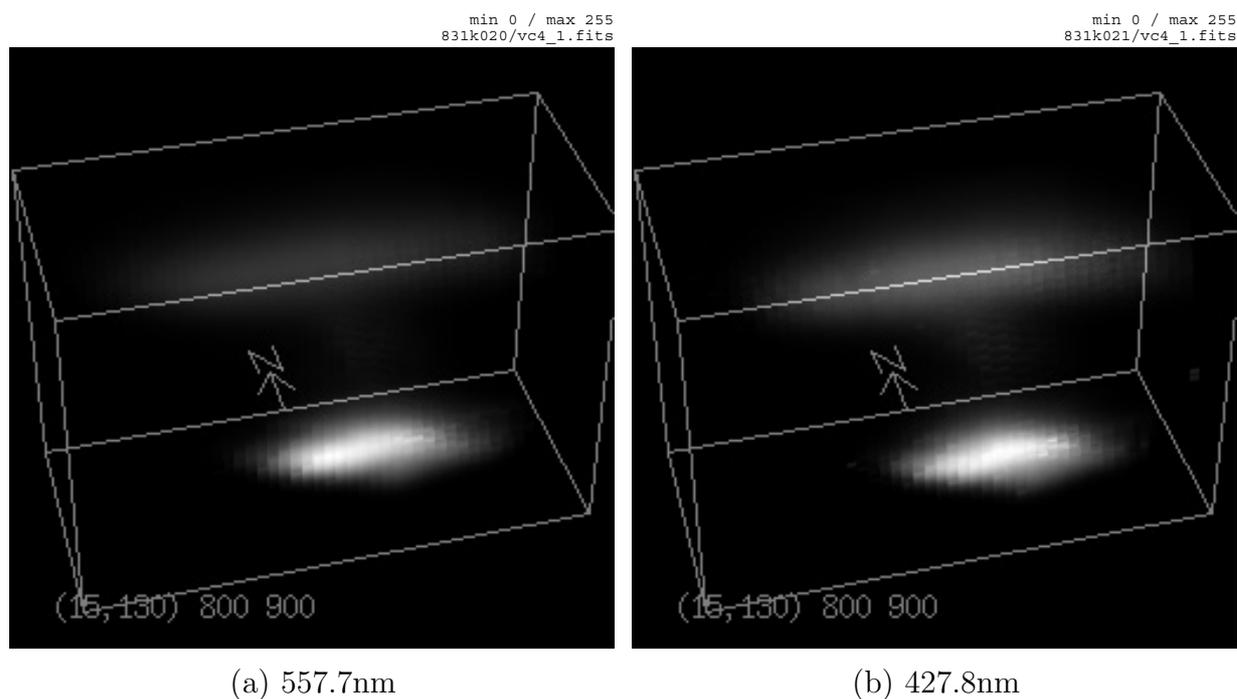


図 5.34: 再構成結果の投影

ものも2つの観測点の上空からやや外れたところにあるため、再構成が難しいものとなっている。そこでSIRT法とp-近似により再構成する際に、p-近似を行なう範囲をセル全体として制約を強化した。その結果得られた発光強度分布の投影を、図5.34(a), (b)に示す。再構成に用いた2組の画像は、時間差が10秒と近接した時間のもので、良く似た形状の画像であることから、どちらの波長についても再構成された形状はほぼ同様のものとなっている。図5.34(a), (b)ともに、再構成を行なったアークの上方に弱い発光が現れているが、これはKirunaの南側のオーロラの一部がゴーストオーロラとなるため、再構成結果にアーティファクトとして現れたものと思われる。

この再構成された発光強度分布の沿磁力線プロファイルを、図5.35(a), (b)にグラフで示す。沿磁力線プロファイルは同じ位置から取り出したもので、再構成された領域中でもっとも発光強度の大きい部分を通るものである。図5.35(a)のグラフが横軸を絶対的な発光強度で示したものの、図5.35(b)のグラフが比較のためグラフの大きさを揃えたものである。このグラフを見ると、557.7nmの発光強度最大となる高度が約101kmであるのに対し、427.8nmの発光強度最大となる高度が約97kmとやや高度が低くなっている。

またKirunaの南側の上空では細かい複数層のアークの発光構造が見られるため、図5.36及び図5.37に示すように、その中の一つに対してその下縁の三角測量を行なった。これらの図では、Kirunaの画像中で一つのオーロラの下縁と判断した位置に十字で示される点が描かれ、このKirunaの画像中に描いた点に対応する視線がMerasjärviの画像にエピポーララインとして描かれている。また、このMerasjärviの画像のエピポーラライン上で画像

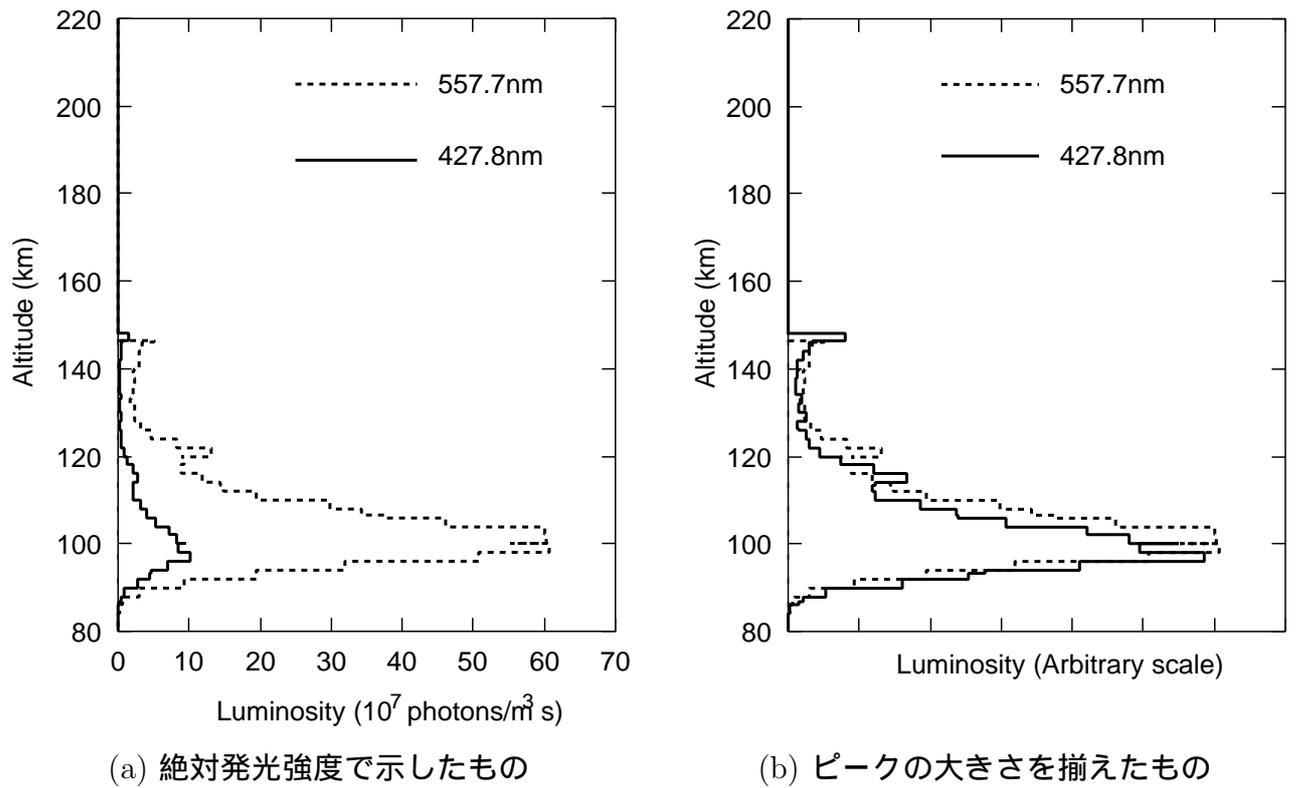


図 5.35: 沿磁力線発光強度プロファイル

中の形状から対応すると判断したオーロラの下縁の位置にも十字で示される点を描いている。この2つの画像中の点に対応する視線が空間中で最も近づく位置の中点を、2つの画像の斜め下の枠内に Kiruna を原点とする座標で示している。枠内の Error の項目はそれぞれの観測点から伸びる視線同士の距離である。このようにして画像を利用した三角測量により得られた下縁の位置は、557.7nm の方が約 111km、427.8nm の方が約 108km となった。

本小節の SIRT+p-近似による再構成結果は、その観測条件の悪さから必ずしも信頼できるものとはいえず、また 10 秒の時間差があるためそれほど確実ではないが、ほぼ同じ形状の 2 組の画像の再構成結果において沿磁力線プロファイルの発光強度最大高度に差があり、画像からの三角測量でも下縁の高度に差が出たことから、同じオーロラの 557.7nm と 427.8nm の発光強度最大となる高度に差が存在することを示していると考えられる。

## 5.6 まとめ

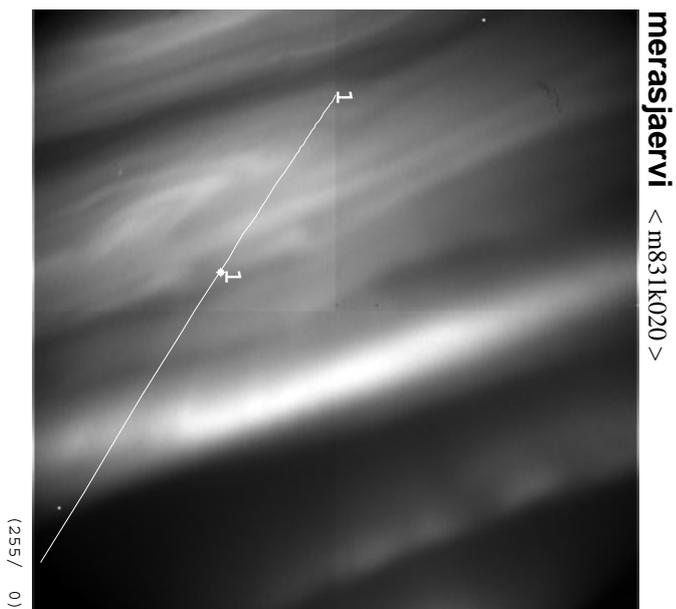
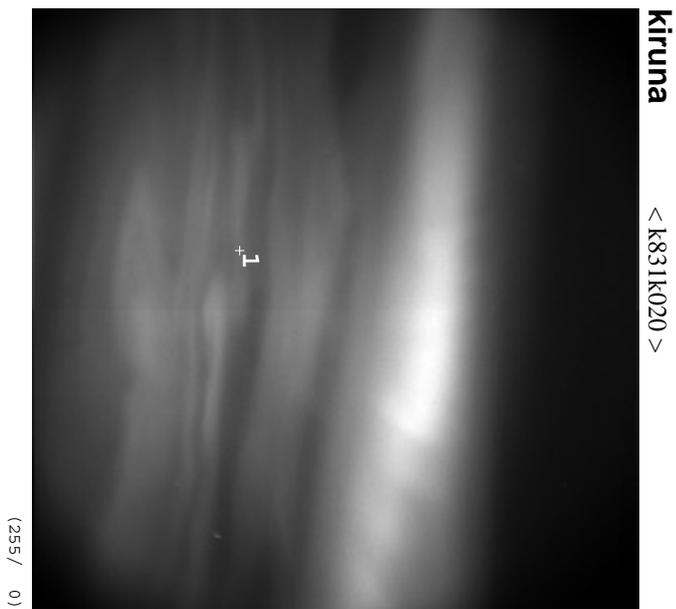
本章では、計 4 回にわたるオーロラの共同観測期間中に観測された、オーロラ画像とその再構成結果について示した。

これらの共同観測で用いているオーロラ観測システムは、557.7nm をはじめ 427.8nm や 630nm などの複数のオーロラ波長の画像を取得することができるものであるが、画像取得のタイミングは人間が決めるものであり、発光の強さなどの観測の容易さから 557.7nm のオーロラの観測画像が多くなった。将来の観測においては、より意識して 557.7nm 以外の波長の画像を取得すると良いと思われる。

また、オーロラには本論文の最初の表 1.1 で示したように種々の種類があるが、ここで再構成を行なったのはシングルアークやマルチプルアーク、フォールドしたアークなどこの中の一部である。これ以外の、パルセーティングオーロラやディフューズオーロラなど、その発光強度分布に対して関心が持たれるオーロラに関しても、以降の観測においてトモグラフィ観測が行なわれ、再構成が行なわれることを期待したい。

再構成に用いた同時観測画像数は、その時点で設置されている観測点数よりも少ない場合が多く、再構成結果の信頼性の点から見て、同時観測画像数をより多くするために、より多くの観測点の設置とより安定した無人観測システムが望まれるところである。

今回トモグラフィ解析したオーロラは、単層の単純な構造を持つオーロラから、複雑にフォールドしたオーロラまでいろいろな種類があるが、再構成された結果やその沿磁力線プロファイルを見ると、画像から人間が推察する構造や、Banks ら [43] や Onda ら [5] の結果と比べて納得できるものとなっている。また、オーロラの発光強度最大となる高度に関して、幾つかの興味深い結果も得られた。しかし、具体的にどの部分がどの程度信頼できるかについては、各個の観測状況に基づくシミュレーションによって検討することが必要である。それらの結果の一部は本章でも引いているが、詳しくは次章で述べることにする。



**Crossing Point**

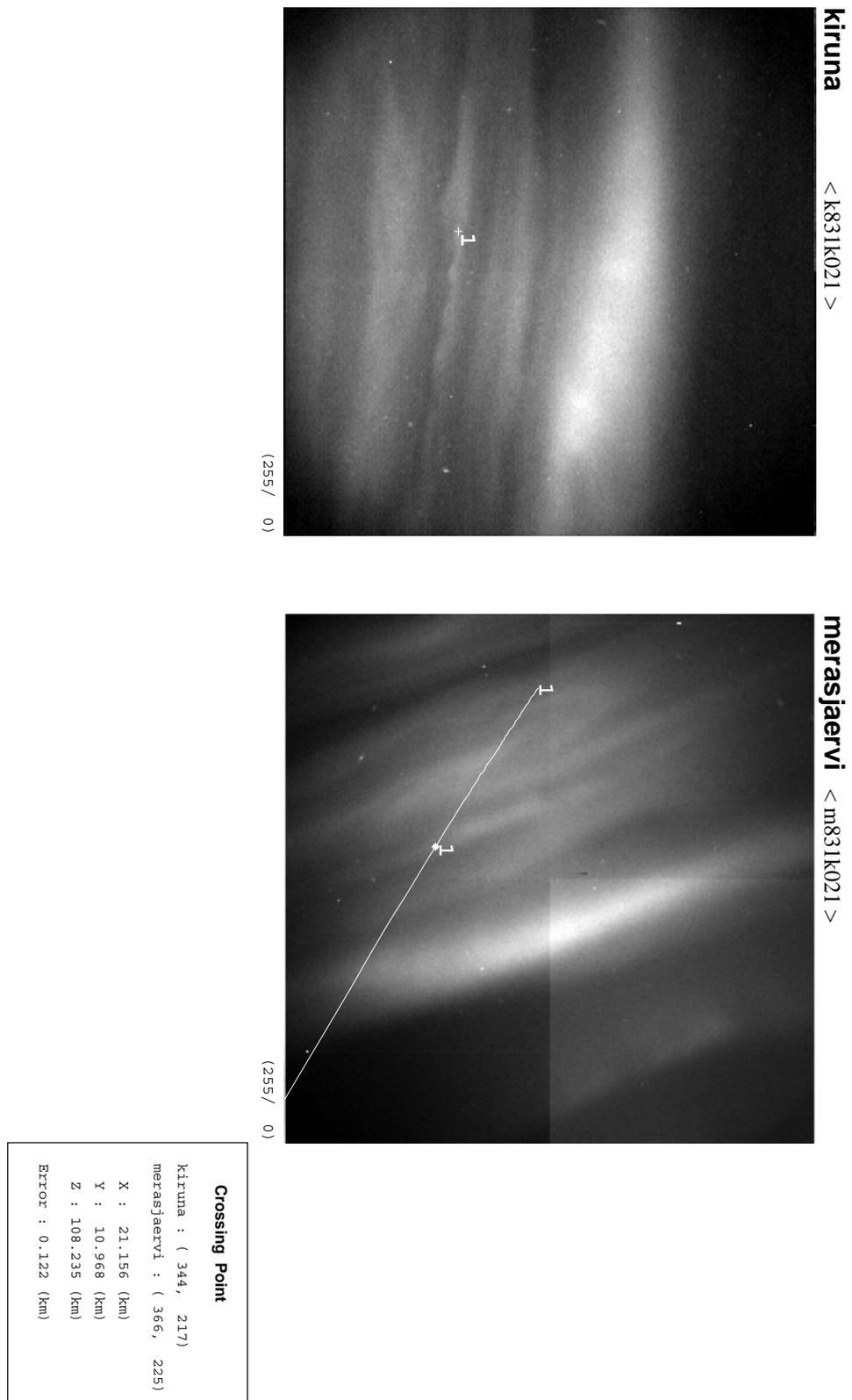
kiruna : ( 337, 206 )  
 merasjaervi : ( 353, 223 )

X : 19.315 (km)  
 Y : 14.537 (km)  
 Z : 110.858 (km)

Error : 0.500 (km)

1998-09-22 20:49:50

図 5.36: 557.7nm のオーロラの下縁の三角測量



1998-09-22 20:52:33

図 5.37: 427.8nm のオーロラの下縁の三角測量



# Chapter 6

## 個々の状況に対応したシミュレーションによる検討

### 6.1 前書き

前節で示した実際の観測画像からの再構成では、磁力線に沿った発光分布や、高度が下がるにつれて緩やかに発光強度が大きくなり、最大発光強度となったより下では急速に発光が減衰するなどの、オーロラに関する一般的な性質に合致した発光強度分布の結果が得られているが、定量的な再構成結果の精度を示すことはできない。また、3次元の分布に対する再構成のシミュレーションでは考慮すべきパラメータが多過ぎるため、一般的なオーロラと観測の状況に対する再構成結果の精度を網羅的に示すことは難しい。

そこで本章では、特定の観測画像や再構成結果から推察されるオーロラ構造に基づいたモデルオーロラを作成し、その特定の観測画像を取得した時と同様の観測点配置を用いて再構成のシミュレーションを行なうことにより、モデルオーロラと再構成結果の比較を行ない実際の画像からの再構成結果についての検討を行なうことにする。

同時にそれぞれの状況の相似性から、定性的な再構成の信頼性についても述べておきたい。

### 6.2 シンプルなアークの場合

まず、単純な単層のアークからなると思われる再構成結果を元にモデルオーロラを作り、再構成のシミュレーションを行なう。実際の観測では 5.4.3節で再構成を行なった 1997 年 2 月 9 日 19 時 46 分 0 秒 (UT) のオーロラや、5.2.1節の 1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒 (UT) のオーロラがこれに対応する。これらは観測点群に対するオーロラの位置に差があるため、再構成結果の信頼性にも違いがあると考えられる。

以下に作成したモデルオーロラと、それを用いた再構成シミュレーションについて述べる。

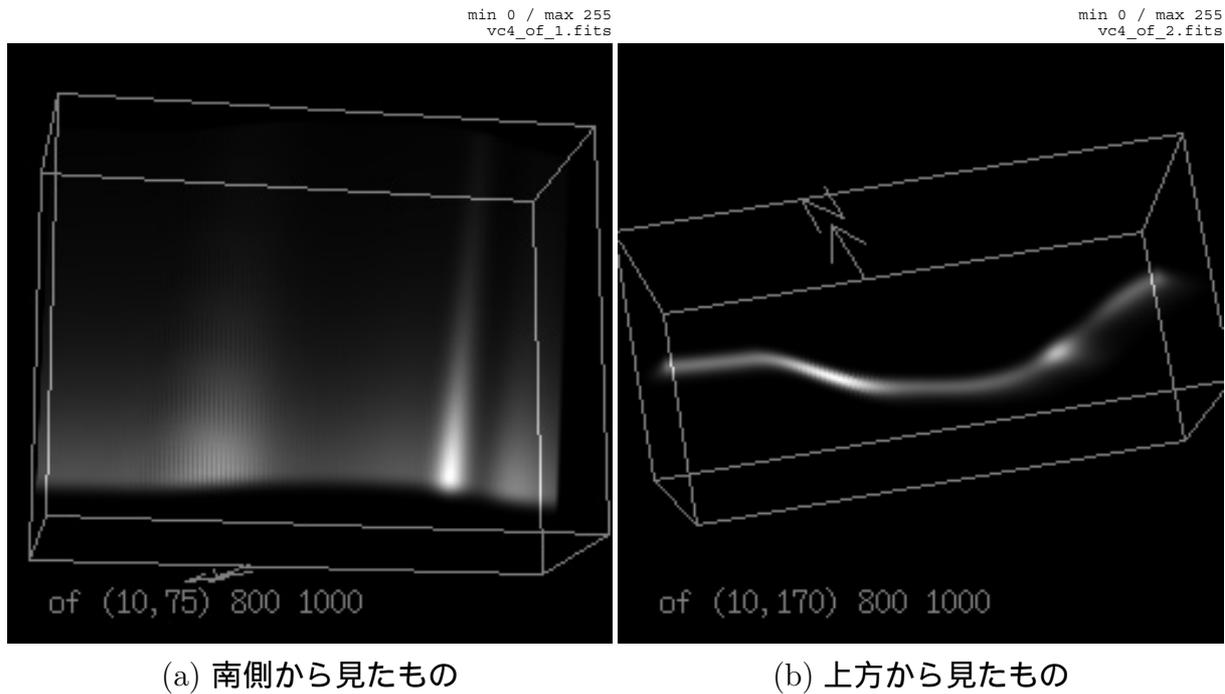


図 6.1: 単層のモデルオーロラ

### 6.2.1 1997年2月9日19時46分0秒のオーロラをモデルとするシミュレーション

まず、5.4.3節において再構成を行なった単層のアークを元に、図 6.1に示すような薄いアークのモデルを作成した。このモデルはアークに沿って発光強度は変化するが、発光強度最大となる高度は変化しないものである。

このモデルを実際の観測時と同じ5点の観測点で疑似観測し、得られた画像から SIRT 法のみ及び SIRT 法と  $p$ -近似を組み合わせたもので再構成を行なった。 $p$ -近似の範囲も 5.4.3 節と同じ  $\pm 4\text{km} \times \pm 6\text{km}$  である。まず、疑似観測画像の例として Tjautjas の画像とこのモデルの元となった観測画像とを並べて図 6.2に示す。実際の観測画像の右下部分にあるディフューズオーロラはモデルでは存在しないが、アークの部分については大体同様なモデルオーロラが作成できていることが分かる。また、再構成結果をモデルの場合と同じ方向で投影したものを図 6.3に示す。再構成領域の制限のため図中のワイヤフレームで囲まれたセル全体を示す領域の全てで再構成を行なったわけではないが、再構成され発光強度のある領域についてはモデルとほぼ同じ形状をしており、良い再構成がされていることが分かる。この場合のセル相関は 0.99 以上と非常に高くなっている。

さらに細かく見るために、オーロラアークの中央付近の沿磁力線発光強度プロファイルモデルと再構成結果についてグラフにしたものが図 6.4である。実線と点線で描かれた2つのグラフはほとんど重なっており、再構成された発光強度分布はモデルオーロラとほぼ

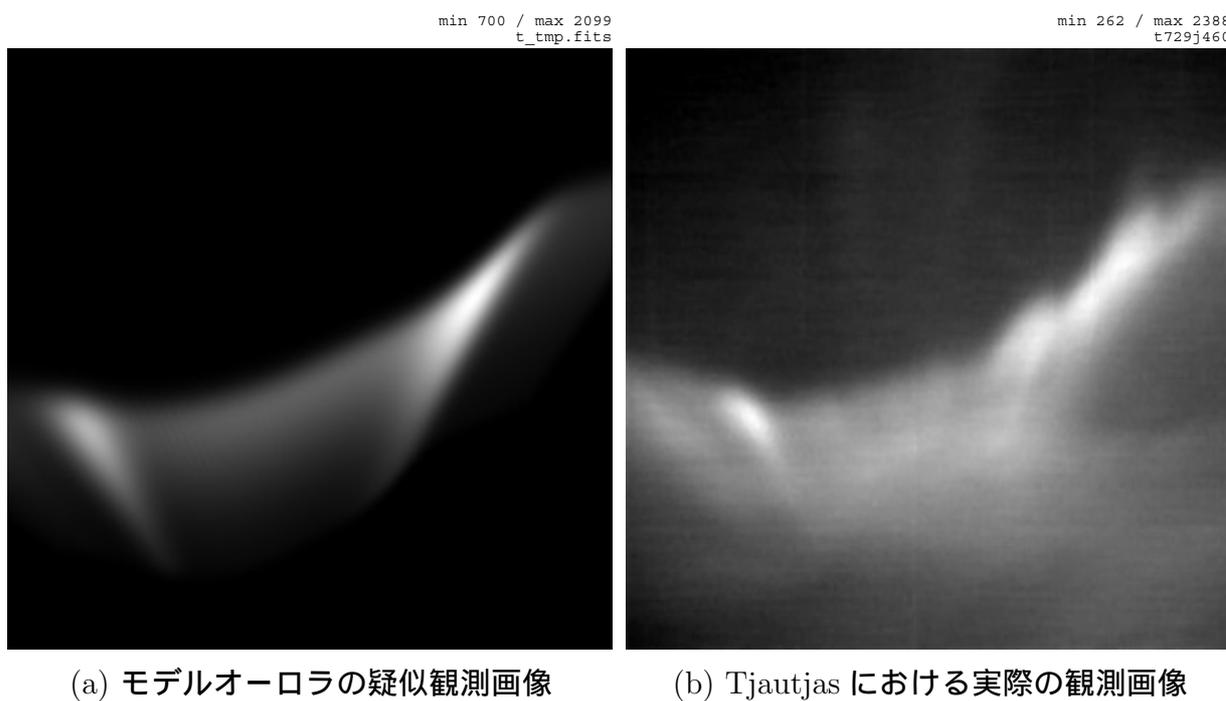


図 6.2: 疑似観測画像とモデルオーロラのもとになった観測画像

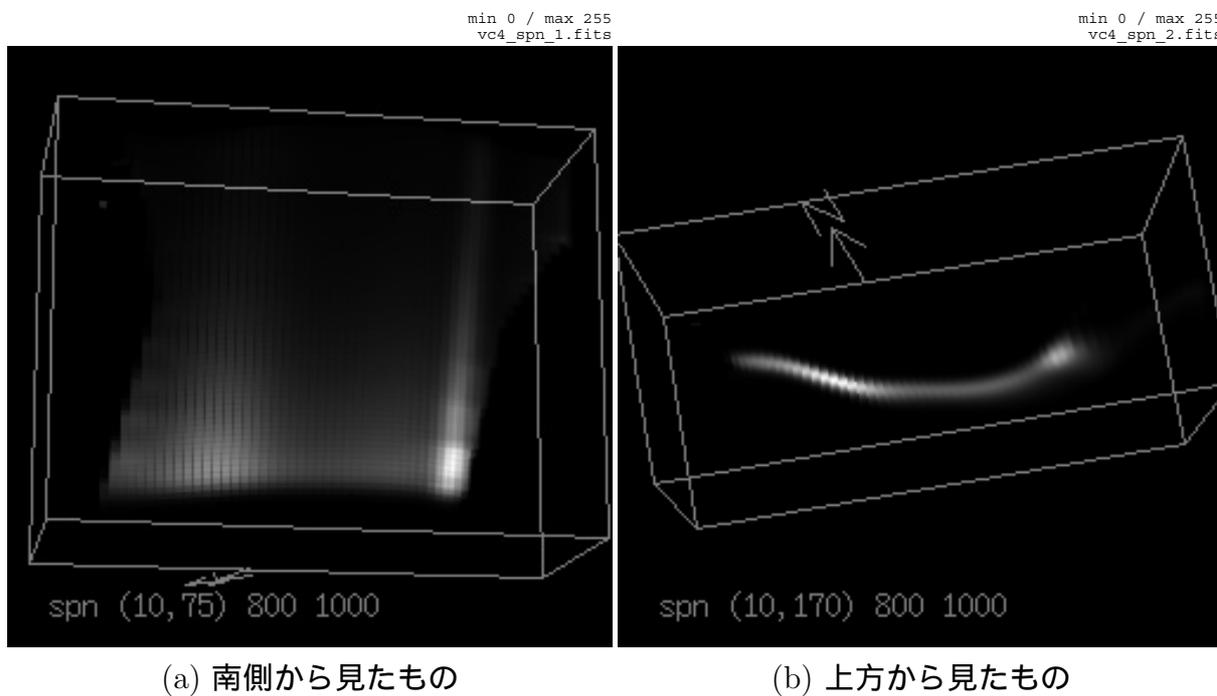


図 6.3: 疑似観測画像からの再構成結果

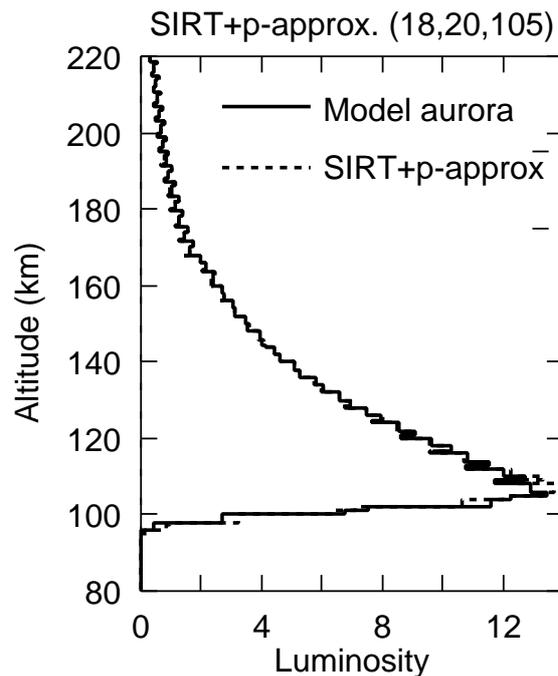


図 6.4: モデルと再構成結果の沿磁力線プロファイル (SIRT 法+p-近似)

一致していると考えられる。このグラフの発光強度最大となる高度を見ても、セルの解像度程度の 1~2km 程しか誤差はない。

また、再構成手法として SIRT 法のみを用いた場合の沿磁力線発光強度プロファイルを同様に図 6.5 に示す。この場合のセル相関は 0.97 程度と十分に高いものとなっており、図 6.4 と比較してもほとんど違いはないが、ややモデルのプロファイルとの差が大きくなっているため、グラフの線がやや太く見えるようになっている。また、発光強度最大となる高度の誤差が ~4km 程度とやや大きくなっている。

このシミュレーションでは 5 点の観測点群の上空を単層のモデルオーロラが横切っており、再構成としては易しい部類にはいる。つまり、このシミュレーションに対応する 5.4.3 節の実際の画像からの再構成においては、SIRT 法のみでも十分な精度が得られるが、SIRT 法と p-近似の組み合わせにより信頼性の非常に高いオーロラ再構成結果が得られているものとする。

### 6.2.2 1995 年 3 月 26 日 19 時 9 分 30 秒のオーロラをモデルとするシミュレーション

次に、5.2.1 節の再構成に似せて、図 6.6 の断面図で示すような、多少の湾曲があり Kiruna 付近で発光が強くなる単層のモデルを生成した。

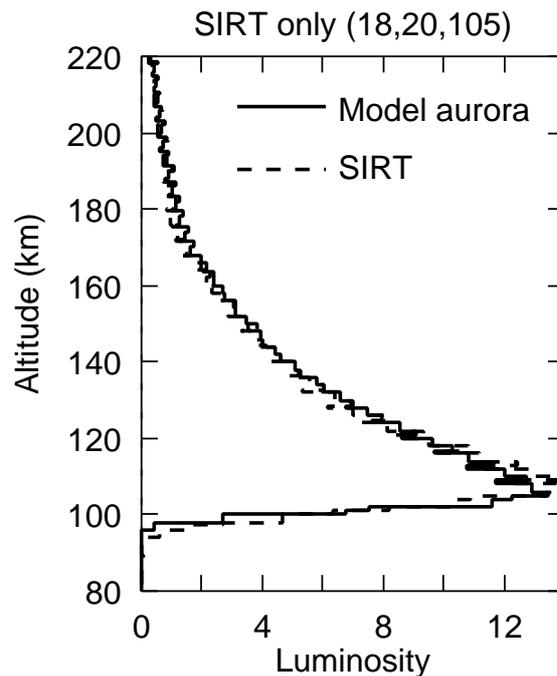


図 6.5: モデルと再構成結果の沿磁力線プロファイル (SIRT 法のみ)

このモデルオーロラを 5.2.1 節と同じ 4 点の観測点で疑似観測し、その疑似観測画像から SIRT 法+p-近似で再構成を行なった。P-近似の範囲は $\pm 4\text{km} \times \pm 8\text{km}$ とした。

このモデルによる再構成シミュレーションの場合、観測点群から北に外れた位置にモデルオーロラがあるため、オーロラカーテンの厚み方向の推定が難しく、前小節の場合よりも再構成結果が劣ることが考えられる。実際 SIRT 法のみで再構成を行なった場合、セル相関は 0.82 程度とそれほど高い値とならない。しかし、SIRT 法に p-近似を加えて再構成を行なった場合は、図 6.7 に断面図で示すように再構成される範囲内ではモデルとほぼ同じ分布となる良い再構成ができており、セル相関も 0.96 程度とかなり高いものとなる。これは、オーロラの南側にしか観測点がないことによるアーキの厚みに対する情報の少なさを、p-近似による制約が結果的にある程度補うためと思われる。ただし、モデルオーロラと比較すると、図 6.7(b) の水平断面において Kiruna(1 番の観測点) 付近の強い発光の部分から上側に伸びるアーキの発光高度がやや弱くなっている。これは、アーキのこの部分に関しては観測点配置の関係から、アーキの厚みに対する情報がほとんどなく発光領域が広がってしまったためではないかと思われる。

このモデルのもっとも発光強度の強い部分を通る沿磁力線プロファイルと、同じ位置を通る再構成結果のプロファイルを図 6.8 に示す。SIRT 法のみで再構成した場合の図 6.8(a) では、発光強度最大となる高度よりある程度上の部分ではモデルと再構成結果がほぼ一致しているが、発光強度最大値がモデルオーロラより小さく、オーロラ下縁の急峻な減衰もややなだらかになっている。しかし、SIRT 法に p-近似を加えて再構成を行なった場合の

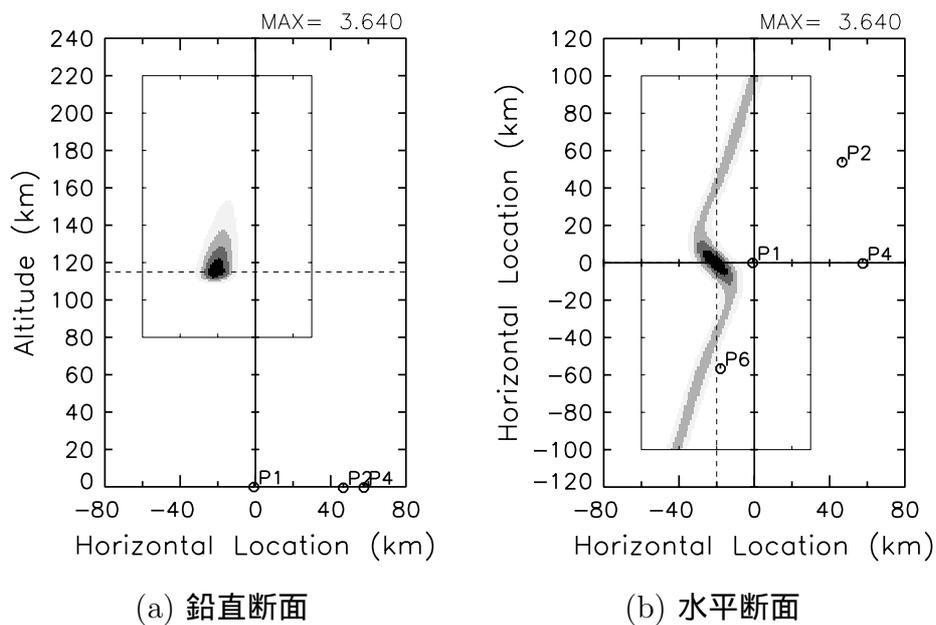


図 6.6: 単層の湾曲したモデル

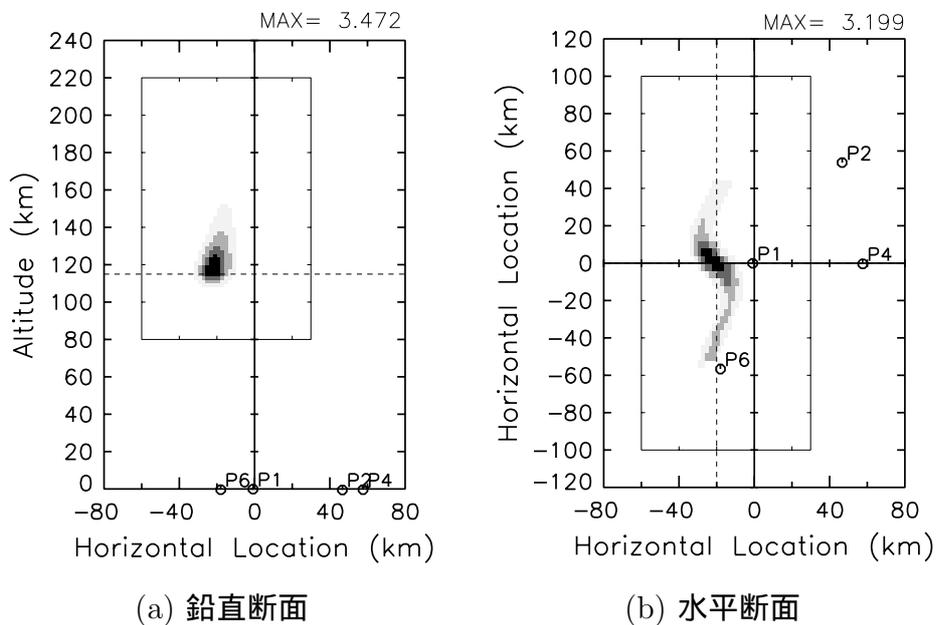


図 6.7: SIRT 法+p-近似による再構成結果

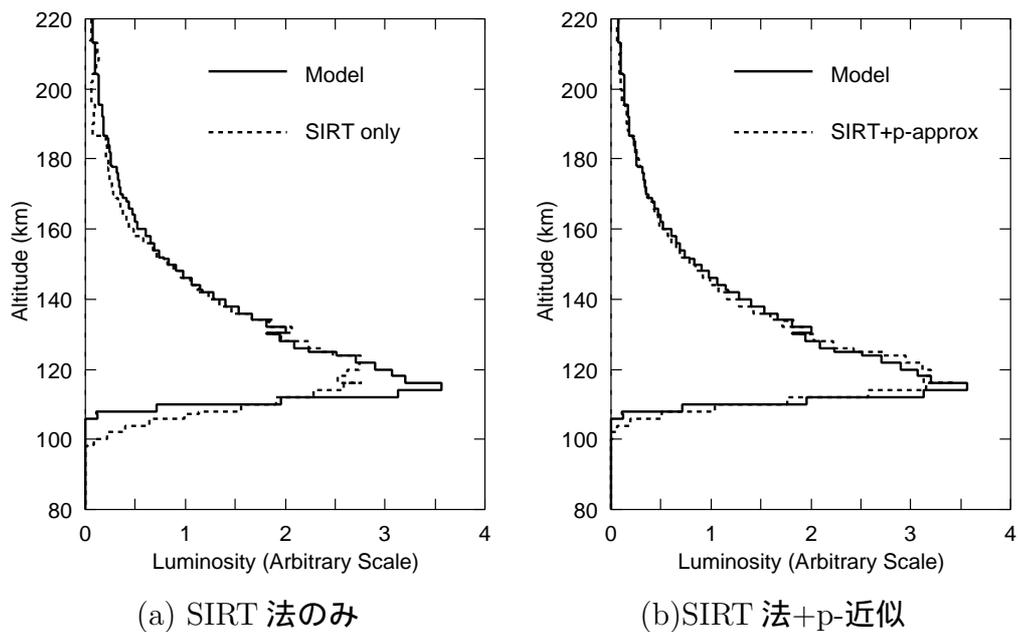


図 6.8: 発光強度のもっとも強い部分を通る沿磁力線プロファイル

図 6.8(b) では、発光強度最大となる位置に高度にすると約 2km の違いがあるが、モデルと再構成結果のグラフはほぼ一致している。

つまり、オーロラと観測点の位置関係があまり良くない場合は、 $p$ -近似という制約を加えることにより、良い再構成結果を得ることができることを再確認したことになる。以上の結果から見て、このシミュレーションに対応する 5.2.1 節の再構成結果は  $p$ -近似の仮定が成り立つならば十分信頼できるものとする。

## 6.3 複数の層のアーキの場合

この節では、複数のアーキの層からなるとされる再構成結果を元にモデルオーロラを作成し、再構成のシミュレーションを行なう。複数のアーキが一つの画像中に存在する場合、それらの位置関係など依存するが、再構成において発光分布が互いに影響を及ぼし合うため、特に実際の再構成に密着したシミュレーションが必要であるとする。

### 6.3.1 1995 年 3 月 26 日 20 時 26 分 10 秒のオーロラをモデルとするシミュレーション

まず、5.2.2 節の画像や再構成結果をもとに、図 6.9 に示すようなオーロラモデルを作成した。このモデルは 2 層のアーキからなり、どちらも発光強度最大となる高度が 115km であり、南側のアーキは直線状で北側のアーキはやや曲がったモデルである。

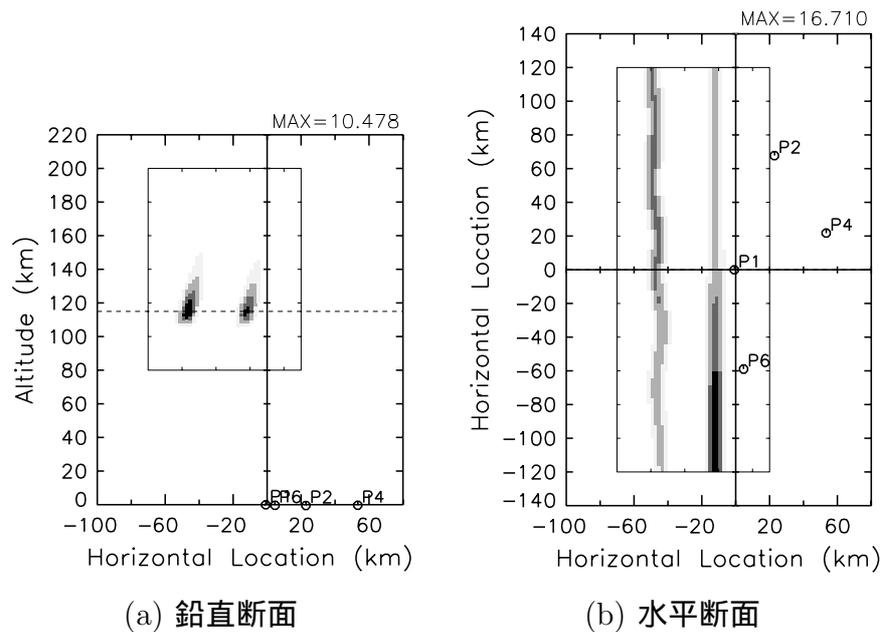


図 6.9: 離れた 2 層のモデルオーロラ

このモデルを実際の観測の場合と同じように疑似観測し、その画像を高度 115km へ投影すると図 6.10 のようになる。この図を見ると北側のオーロラの一部が多くの画像からはみ出しており、3.5 節で述べた本論文で通常用いている領域の限定が行なえないことが分かる。このような領域限定が行なえないオーロラの場合、はじめから領域限定を行わずに再構成をすることも考えられるが、不正確な再構成が行なわれる領域が増え、その影響が複数の観測点から観測される領域にも影響を及ぼす可能性を考えると、あまり得策とは考えられない。

そこで、5.2.2 節と同様の手順で再構成を行なった。これは、まず Kiruna(1 番の観測点) と Tjautjas(4 番の観測点) の 2 つの観測点からの画像を利用して、北側のオーロラが画像からはみ出さない鉛直エピポーラ平面上の 2 次元の再構成を行ない、その結果を 3 次元に拡張し、すべての観測点からの画像を利用して発光強度分布を修正することにより、再構成を行なうという手順である。その結果を図 6.11 に示す。この図でみるとアークの形状そのものは、モデルオーロラとほぼ同じでかなり良く再構成されており、再構成手順の 2 次元の分布を 3 次元に拡張する過程で一旦直線状のアークとしたにも関わらず、北側のアークの蛇行はうまく再現されている。ただし、鉛直面の図を細かく見るとモデルの図とはやや異なっている。南側のアークはモデルとそれほど違いはないが、特に北側のアークはやや厚みが大きく上方への広がりが小さい。そのためかセル残差は 0.85 程度とそれほど高い値とはならなかった。

この再構成に関しては再構成に特殊な手順を用いており、他の解析への適用は難しいものとする。ただ、本小節での再構成シミュレーション結果から、3.5 節の実際の観測画像

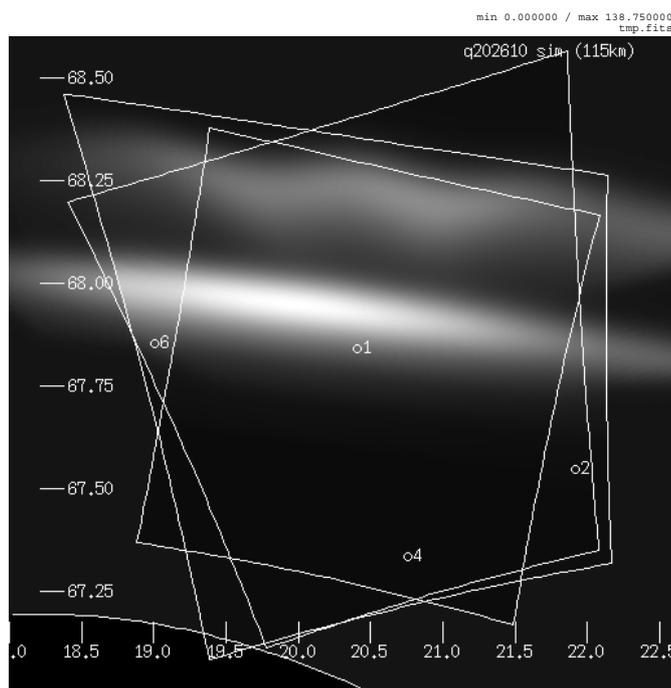
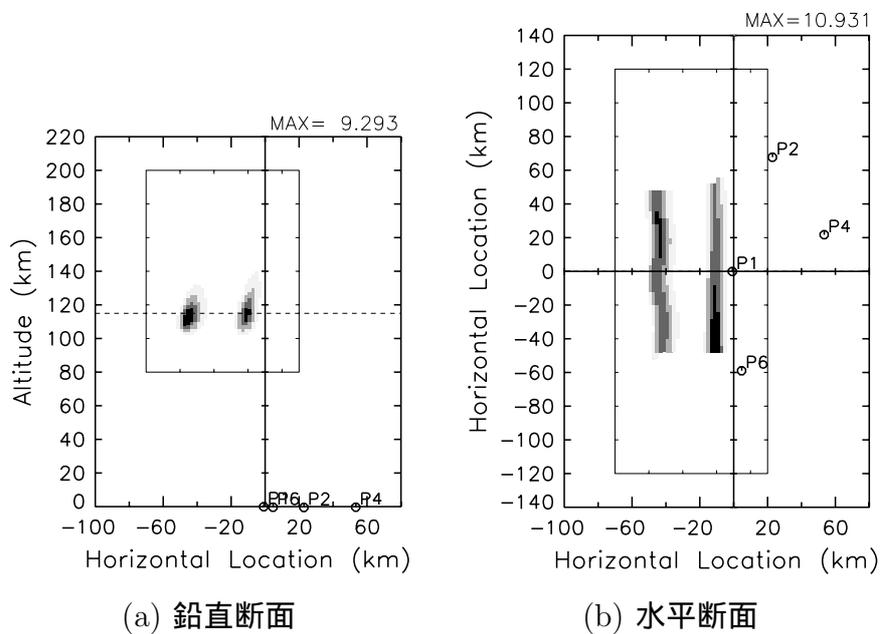


図 6.10: 疑似観測画像の高度 115km への投影



(a) 鉛直断面

(b) 水平断面

図 6.11: やや離れた 2 層のモデルの再構成結果

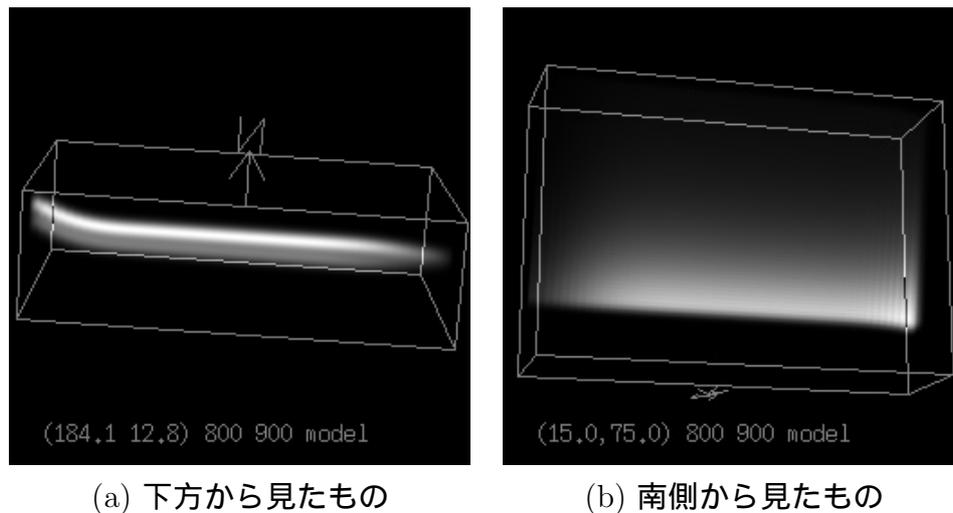


図 6.12: 近接した 2 層のモデルの投影

からの再構成結果に関しては、北側のアークの細かな形状に関しては多少の誤差があるものの大まかな形状はほぼ正しいものと思われる。

### 6.3.2 1995 年 12 月 21 日 21 時 14 分 50 秒のオーロラをモデルとするシミュレーション

次に、5.3.1 節の再構成結果を元に図 6.12 に投影図で示すようなモデルオーロラを作成した。このモデルオーロラを用いて、観測・再構成のシミュレーションを行い、その再構成結果と元のモデルオーロラとの比較を行った。このモデルは近接した北側の発光の強いアークと南側の弱いアークとを組み合わせたもので、発光強度は異なるが 2 つのアークの沿磁力線プロファイルの形状は同一のものとなっている。

観測点配置及び再構成手法には 5.3.1 節の実際の画像からの解析の時と同じものを用いて再構成を行なった。再構成結果のセル相関は 0.98 程度と非常に高いものとなった。そこでより詳しく再構成結果を調べるため、このモデルとその再構成結果の沿磁力線発光強度プロファイルを、図 6.13(a), (b) に示す。(a) は北側の発光の強いアークのプロファイルであり、(b) は南側の発光の弱いアークのプロファイルである。

図 6.13(a), (b) を見ると、どちらもモデルと再構成結果の沿磁力線プロファイルは、発光強度最大となる高度より上側ではほとんど重なりあっており、ほぼ同一の形状をしていることから、良い再構成ができていることが分かる。しかし、オーロラの下縁における急峻な変化が少しなだらかになっているため、強いアークの発光強度最大高度が 3~4km 程高くなっていることや、強度の弱い方のプロファイルは強い方にくらべて相対的な誤差が大きく、発光強度最大となる高度に 5~6km 程度の誤差があるという事も見て取れる。

更に、沿磁力線プロファイルの発光強度が最大となる高度の復元誤差の分布に注目する

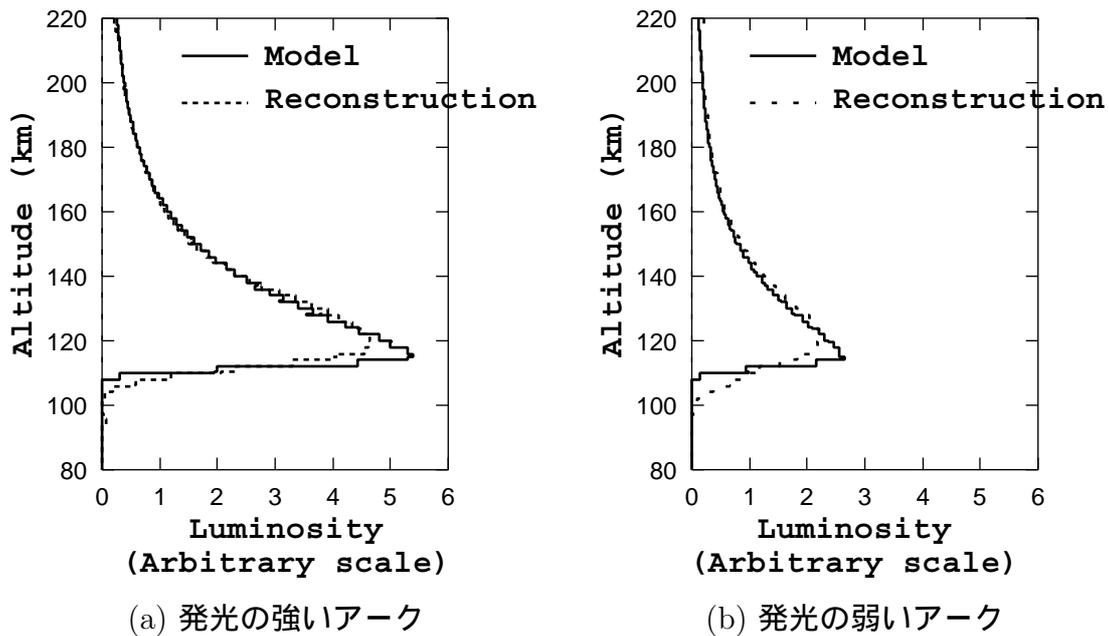


図 6.13: モデルオーロラと再構成結果の沿磁力線プロファイル

ことにする。地表面の位置を水平方向にとり、再構成したオーロラとモデルオーロラの沿磁力線プロファイルの発光強度最大となる高度の差、すなわち誤差を鉛直方向にとって鳥瞰図で表したものを図 6.14 に示す。鳥瞰図の下画像は、上の鳥瞰図で示されるのが再構成されたオーロラのどの部分の誤差であるかを対応させるために、再構成されたオーロラの沿磁力線プロファイルの発光強度の積分値を画像としたものである。結果として磁力線に沿った無限遠点への発光分布の投影画像と等価である。水平方向の数値は左右の図の対応を取るための便宜的なものである。

図 6.14(a) は再構成した領域すべてを含むように描いたものである。プロファイルをとるセルの範囲の一部が再構成されていない部分であったり、セルのうちオーロラのほとんど発光していない範囲のみをプロファイルが通過しているため、高度の誤差が大きいところもあるが、沿磁力線発光強度プロファイルの最大となる高度を推定する場合、発光の比較的弱い部分やプロファイルの一部しか再構成の範囲に入っていない部分では誤差が大きくなるのは当然である。また図中の中央付近の発光強度の大きい部分を通過するプロファイルの高度に関しては、それほど大きな誤差はない。この中央付近を拡大したものが図 6.14(b) である。オーロラカーテンの伸びる方向に対してはほぼ同じ誤差の構造をしており、オーロラの外側のほとんど発光のない部分では大きな誤差が出ているものの、暗い方のオーロラの部分では高度の誤差が 5~6km 程度、オーロラの最も明るい部分では誤差が 4km 以下となっていることが分かる。当然であるが、この誤差の値は先の沿磁力線発光強度プロファイルから得られるものと一致している。つまり、単層の場合と異なり、このオーロラのようにアーキが近接して重なりあっている場合、お互いの影響で高度推定誤差が出てしまい、

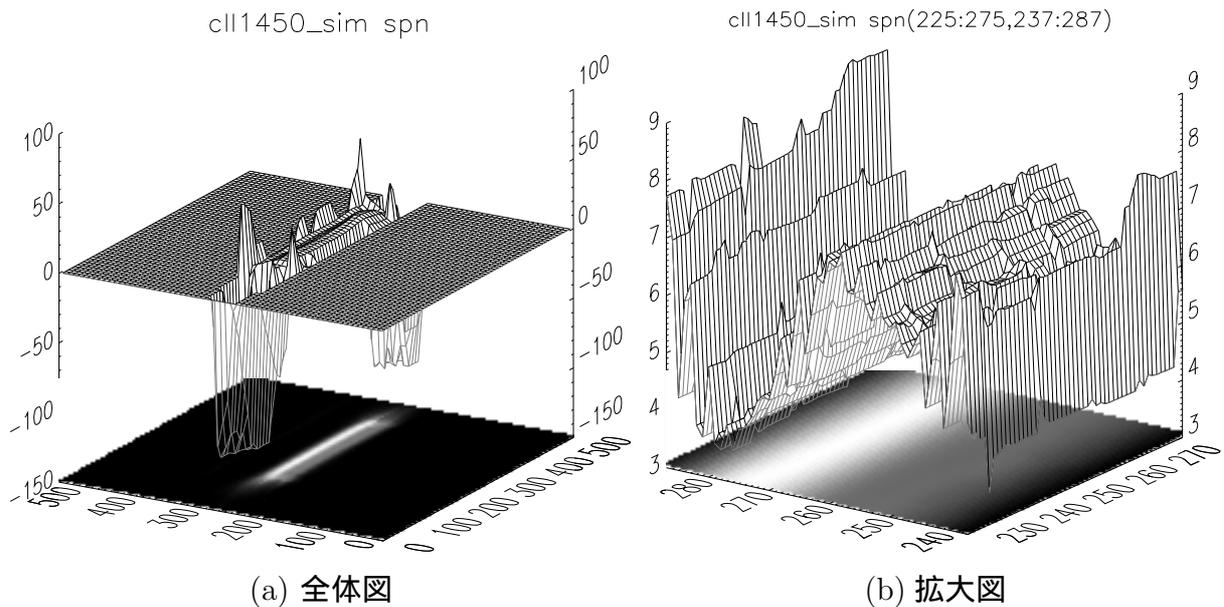


図 6.14: オーロラの高度誤差分布 (2層の近接したオーロラ)

特に発光強度に強弱がある場合は弱い方の影響が大きくなってしまふものと思われる。

2つのオーロラの高度が異なる場合のシミュレーションも行なったが、発光強度最大となる高度の誤差が発光の強いアークでは2km程度とやや少なくなるが、弱いアークでは6km程度となり、全体の傾向としてはほとんど変わらなかった。

これらのシミュレーション結果から、5.3.1節の再構成結果は、強いアークに近接した弱いアークに関しては発光強度最大となる高度の誤差がやや大きいものとして取り扱いに注意する必要があると考えられるが、全体としては再構成誤差も少なく、強い方のアークに関しては発光強度最大となる高度の誤差も4km以下程度と小さくなっており、良好な再構成結果が得られているものとする。

### 6.3.3 1997年2月9日18時29分40秒のオーロラをモデルとするシミュレーション

5.4.1節の再構成結果を元に、図6.15と図6.16とに投影図と断面図で示すような、複数層のアークからなる2種類のモデルオーロラを作成した。どちらも発光の強い3層のアークと発光の弱い1層のアークからなるモデルオーロラであるが、図6.15はすべてのアークの高さ構造が同じであるが、図6.16ではそれぞれの層のアークの高さに違いがあるという点で異なっている。画像中で重なった複数のアークを再構成する際にはそれぞれのアークが互いに影響を及ぼし合うが、これに相対的な高さの違いが影響を与えると考える。二つの種類のモデルを用いてシミュレーションを行なうことにより、相対的な高さの違いがどの程度再構成に影響を及ぼすかを見ることができる。

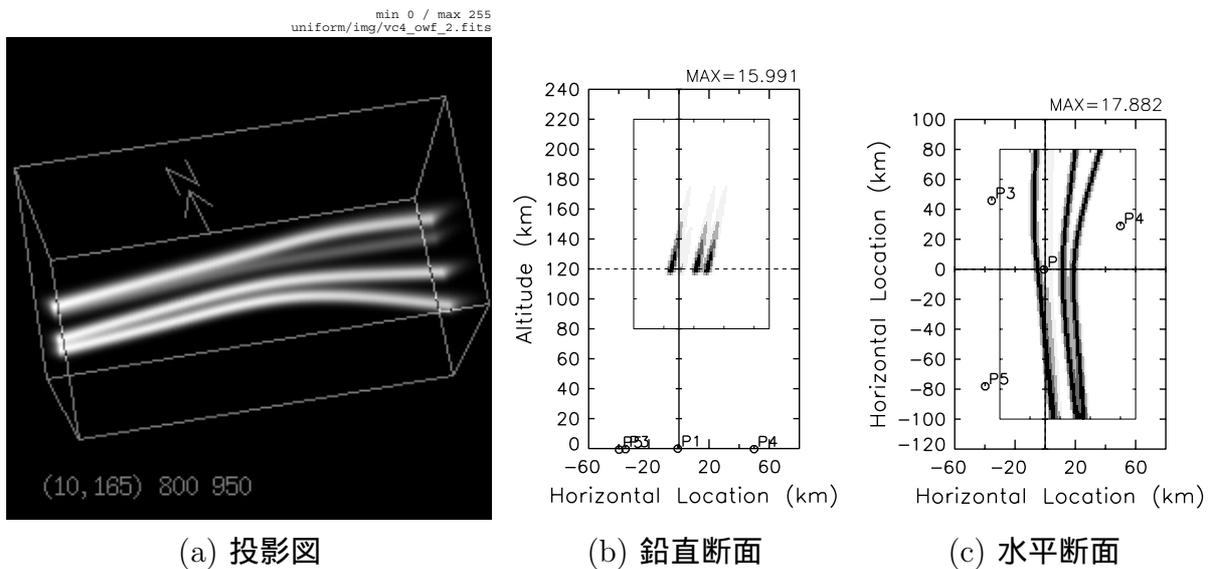


図 6.15: 同じ高度の多層モデルオーロラ

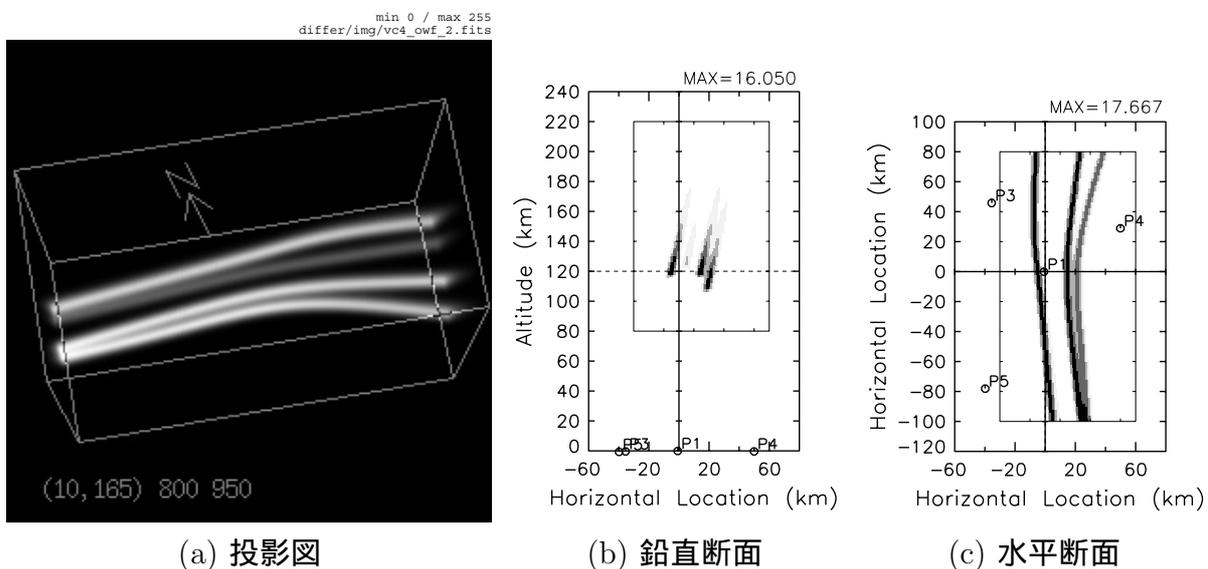


図 6.16: 異なる高度の多層モデルオーロラ

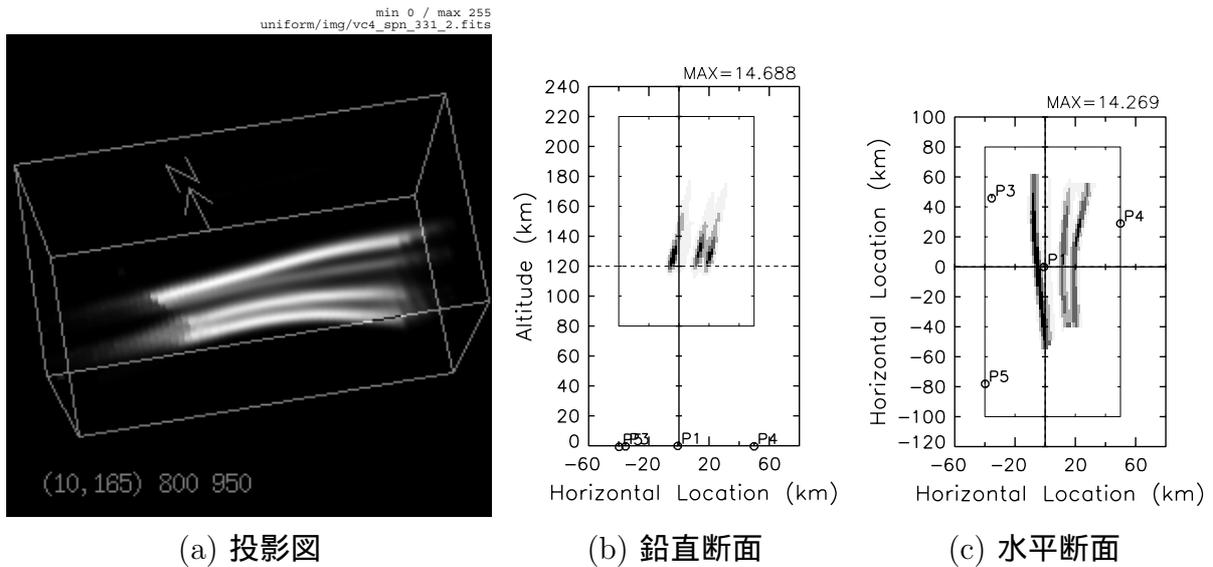


図 6.17: 同じ高度の多層モデルオーロラの再構成結果

これらのモデルを観測時と同じ4点の観測点で疑似観測し、その疑似観測画像から SIRT 法と  $p$ -近似で再構成を行なった。再構成結果を図 6.17及び図 6.18に投影図と断面図で示す。この再構成結果のセル相関値は、それぞれ 0.96 と 0.95 と高いものであった。投影図や水平断面図に見られる再構成されたオーロラの形状そのものについては、どちらも4層に分かれやや曲がった構造など十分に良く再構成できていると言える。しかし、鉛直断面図を詳しく見ると、モデルオーロラの鉛直断面図と比べて特に内側の2つの層の発光強度最大となる高度にやや違いがみられる。

より詳しく調べるため、発光の強い3つのアークを通る沿磁力線発光強度プロファイルのプロファイルを、図 6.19と図 6.20に示す。図 6.19(a)と図 6.20(a)に示す最も南側のアークは高度に関する誤差がやや大きく、発光強度最大となる高さが同じモデルの場合は6km程度の誤差、異なる高さのモデルの場合は4km程度の誤差となっている。最も北側のアークは、図 6.19(c)の約135km~150kmの高度や図 6.20(c)の約140km~165kmの高度に、他のアークとの干渉によると思われるモデルのグラフと多少一致しない部分がどちらにも見られるが、それ以外はほぼモデルと一致しており、発光強度最大となる高度も2km程度の誤差しかない。また、図 6.19(b)と図 6.20(b)に示す内側にある南から2層目のアークの場合、特にオーロラの下縁の急峻な発光の減衰が緩やかになっており、発光強度最大値が小さくなっている。発光強度最大となる高度の誤差は、アーク同士の高さの異なるモデルの方が小さくなっているが、これは発光強度最大となる位置同士が、高さ構造の同じモデルに比べて離れるため、干渉が少なくなるためではないかと思われる。

南側の2層の発光強度最大となる高度の差を見ると、高さが同じモデルの場合には、図 6.19(a), (b)を見ると、モデルの2つの層に高さの違いはないが、再構成結果では約6kmの差があるのに対し、異なる高さのモデルの場合には、図 6.20(a), (b)を見ると、モデル

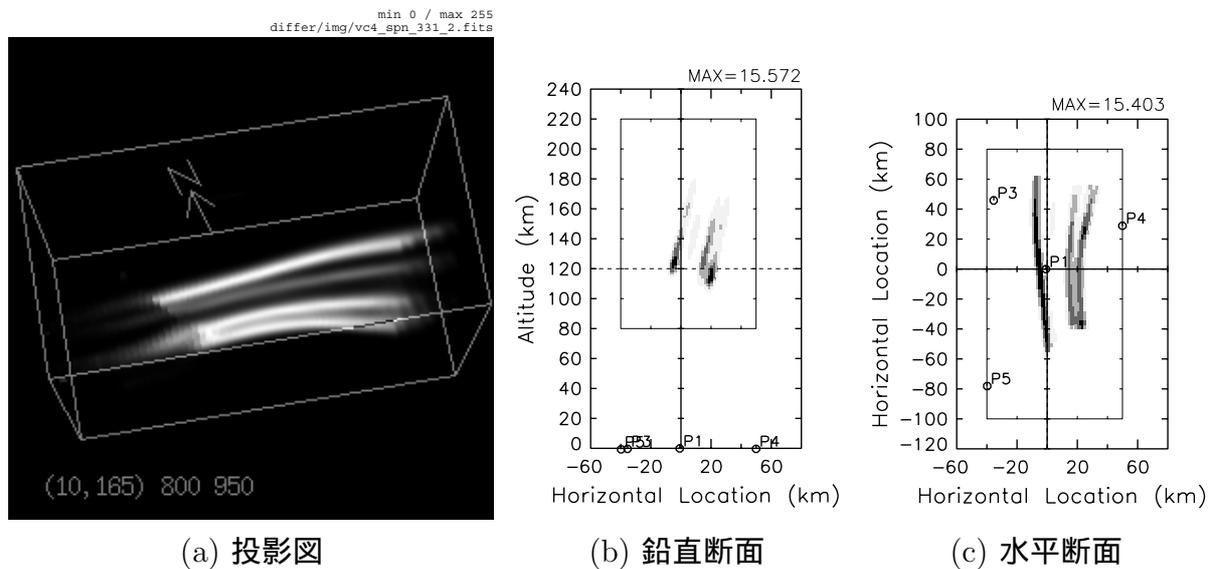


図 6.18: 異なる高度の多層モデルオーロラの解析結果

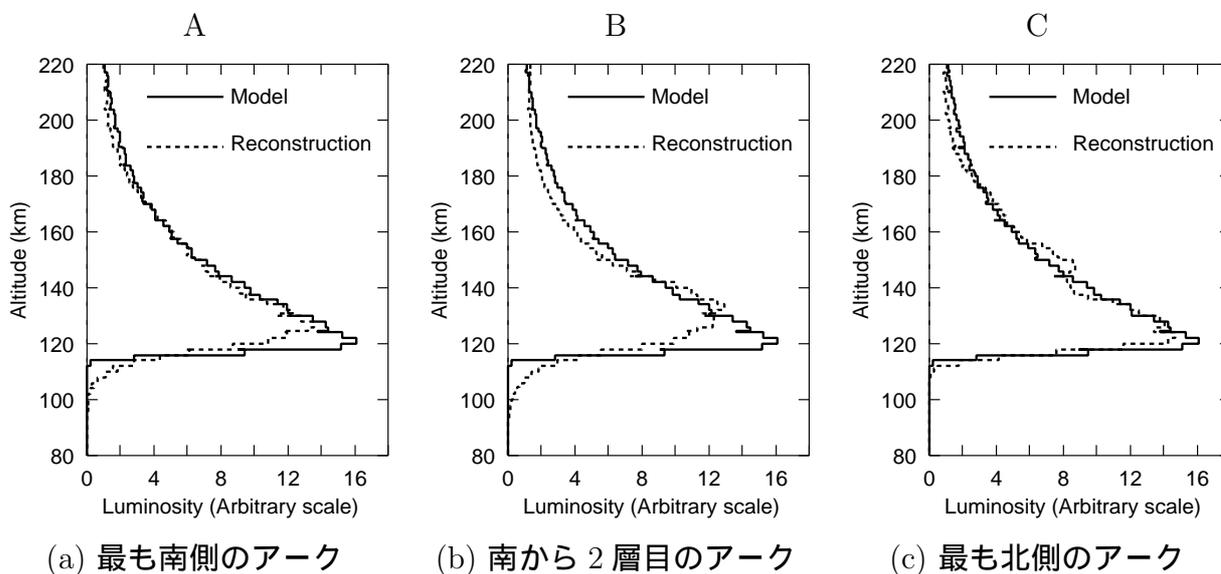


図 6.19: 同じ高度の多層モデルオーロラとその再構成結果の沿磁力線発光強度プロファイル



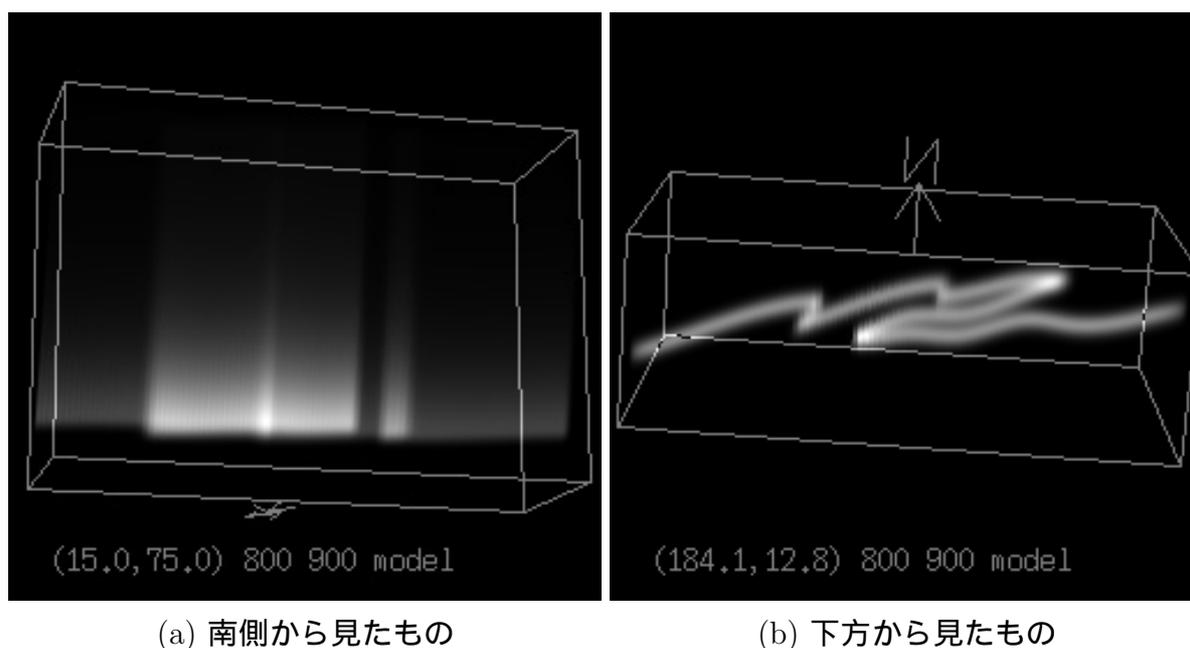


図 6.21: 1995 年 12 月 21 日 21 時 31 分 20 秒のオーロラに似せたモデルオーロラの投影

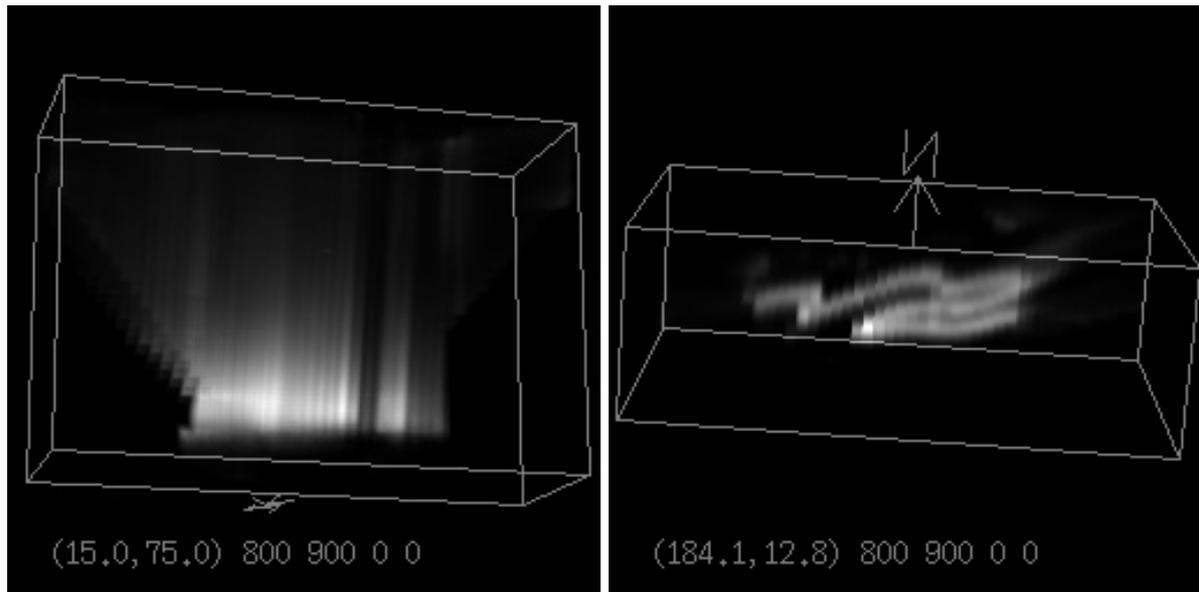
線発光強度プロファイルの形状は全体で同一のものである。

実際の観測時と同じように 5 点の観測点を設定し、このモデルから生成した疑似観測画像を用いて SIRT 法<sub>+p</sub>-近似で再構成を行なった。再構成結果を図 6.22 に投影図を示す。図 6.21 と図 6.22 を比較すると、再構成の行なわれている部分についてはモデルと同様の形状をしており、良い再構成ができていることが分かる。この再構成結果のセル相関値は 0.96 とかなり高いものとなった。

この再構成結果の沿磁力線プロファイルの発光強度最大高度の分布を取り、モデルオーロラのそれとの差を取ったものを、図 6.23 に示す。6.3.2 節の図 6.14 と同様に、下の画像が再構成結果の磁力線に沿った投影値、上の鳥瞰図が発光強度最大高度の誤差である。図 6.23 には全体像共に 5.3.2 節の図 5.21 のプロファイルを取得した A~C に対応する地点付近の拡大図も示している。再度述べると、図 6.23(b) に示す A とは南側のアークの折れ曲がる辺りで最も発光強度の大きい部分、図 6.23(c) に示す B とは東側にアークが伸び他のアークから少し分離した部分、図 6.23(d) に示す C とは南北に三つの層が近接して重なった中央の部分のことである。

これを見ると、A 地点のように発光強度は強くても二つの層が重なってフォールドする部分では高度推定に ~4km ほどの誤差があるが、B 地点のように他のアークとあまり近接せず画像上でも分離している部分ではほとんど誤差がないことが分かる。また、C 地点のように両側に接近してアークがある部分は、~6km 程度とやや誤差が大きくなっていることが分かる。

つまり、他と分離でき単層として捉えることの出来る部分のアークは、ほとんど誤差がな



(a) 南側から見たもの

(b) 下方から見たもの

図 6.22: 複雑なフォールドを持つモデルオーロラの再構成結果

くその高度を推定することができるが、他のアークと重なり合うとその影響により高度推定に誤差が出てしまうものと思われる。この傾向はこれまでの単層のアークのシミュレーション結果や複数の層からなるアークのシミュレーション結果の組み合わせとして捉えることができる。

以上の結果より、5.3.2節の再構成結果は全体の形状としてはほぼ信頼できる結果であり、発光高度最大となる高さの誤差もそれほど大きくはないと思われる。ただし、複数の層が近接していると思われる部分の中央の部分は他に比べてやや誤差が大きいことに注意する必要がある。

## 6.5 まとめ

この章では前章で解析したオーロラの再構成結果の信頼性を確認するため、実際の観測画像からの再構成結果に基づいたモデルオーロラを作成し、実際の解析と同じ方法で再構成をするシミュレーションを行ない、シミュレーションの再構成結果とモデルオーロラとの比較を行なった。4章の再構成シミュレーションが、再構成手法などに依存する全般的な誤差の傾向を見ているのに対し、本章のシミュレーションは個別の状況における細かな誤差の分布を検討するものである。

これらの結果は、前章の実際の観測画像の再構成結果に対する個別の検討材料として用いるものであるが、オーロラの構造そのものはどのシミュレーションでも十分な再構成がなされており、実際の画像からの再構成においても SIRT 法と  $p$ -近似の組み合わせによる

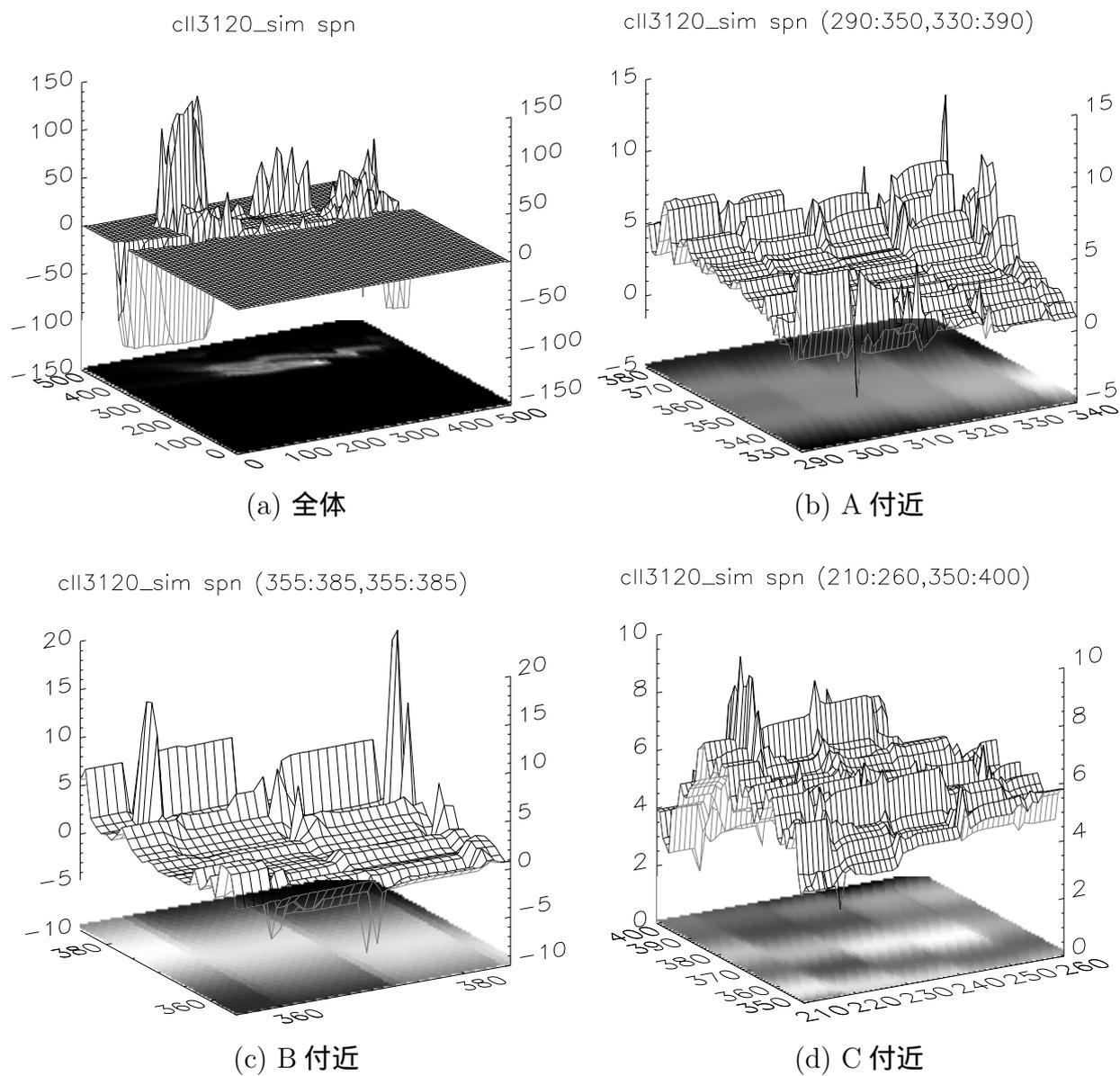


図 6.23: オーロラの高度誤差分布 (複雑にフォールドしたオーロラ)

再構成で十分な信頼性があると判断した。しかし、発光強度最大となる高度などの細かい構造に関する信頼性では結果が分かれた。発光強度最大となる高度について検討した結果、4点以上の観測点からの観測画像があり比較的単純な形状のオーロラに対してはそれほど大きな誤差はなく、例えば5.4.3節で解析したオーロラの場合は非常に良い再構成ができるが、例えば5.4.1節で解析したような多数の層が互いに近接して分離し難い複雑な形状のオーロラの場合、特に内側の部分で高度推定の誤差が大きくなる傾向があることが分かった。

画像上で複数のオーロラアーチの層が重なり合い、それらの分離が難しいことによって生じるオーロラ下縁等の推定誤差の状況は、オーロラの形状やオーロラに対する観測点配置によって異なるものとなっている。網羅的なシミュレーションが難しい以上、ここで行なったもの以外の再構成結果に対して、具体的な誤差の分布を検討するためには、やはり個々のオーロラ構造に対応した再構成シミュレーションを行なう以外にないと思われる。

セル残差で見ると、6.3.1節で行なった特別な状況での再構成を除いて、再構成シミュレーションではいずれも0.95以上と高い値となり、実際の画像からの再構成においても全体としては良好な再構成結果が得られているものと思われる。

# Chapter 7

## オーロラトモグラフィの将来的な展望

本章では、将来オーロラトモグラフィ観測システムを発展させるにあたり、どのような方向性が考えられ、またそれによってどのような影響があるのかについて検討することにする。

### 7.1 新たな観測点とその影響

本論文で画像データを利用している ALIS の観測点数は最大で 6 点である。4.10 節のシミュレーションにより、オーロラトモグラフィに関して観測点は多い方が望ましいことは確かめたが、将来的に ALIS の観測点をさらに拡充する場合、無制限に観測点数を増やすことはできない。そこで、幾つかの新たな観測点の候補に対し観測と再構成のシミュレーションを行なうことによって、新たな観測点による効果を探ることにした。

再構成のシミュレーションには、これまでに配置された 6 点の観測点に加えて、地理的な条件から選ばれた将来的に予定されている観測点のうち、3 つの観測点 (図 2.1 の点線の円錐で示されたもの) を用い、モデルオーロラは 4.10 節の図 4.29 と同じものを用いた。また、新たな観測点を加えた再構成では十分な数の観測点数があると判断したため、 $p$ -近似は用いず、再構成手法は SIRT 法のみとした。

将来的に予定された観測点を加え 6 点以上の観測点がある場合の再構成シミュレーション結果と、4.10 節の観測点数 6 点までの結果とを合わせ、観測点の組み合わせによるセル相関の違いをグラフにしたものを図 7.1 に示す。また再構成結果の一例として、図 7.2 に 9 点での再構成結果を示す。これは図 4.29 のモデルとほぼ同じ形状となっており、良い再構成ができていることが分かる。

図 7.1 を見ると、7~9 点の観測点による再構成のセル相関値は互いにそれほど変わらないが、6 点の観測点のセル相関よりはっきりと値が大きく、少なくとも北に大きくはなれた Frehetsli (9 番の観測点) は、Kilvo (7 番の観測点) と Nytrop (8 番の観測点) を合わせたものと同程度に再構成に貢献することが分かる。これは、これまでの観測点から離れた位置に新たな観測点加わることにより、新しい方向からのオーロラの投影を得ることができ、オーロラ構造に対する情報が増えるためであると思われる。

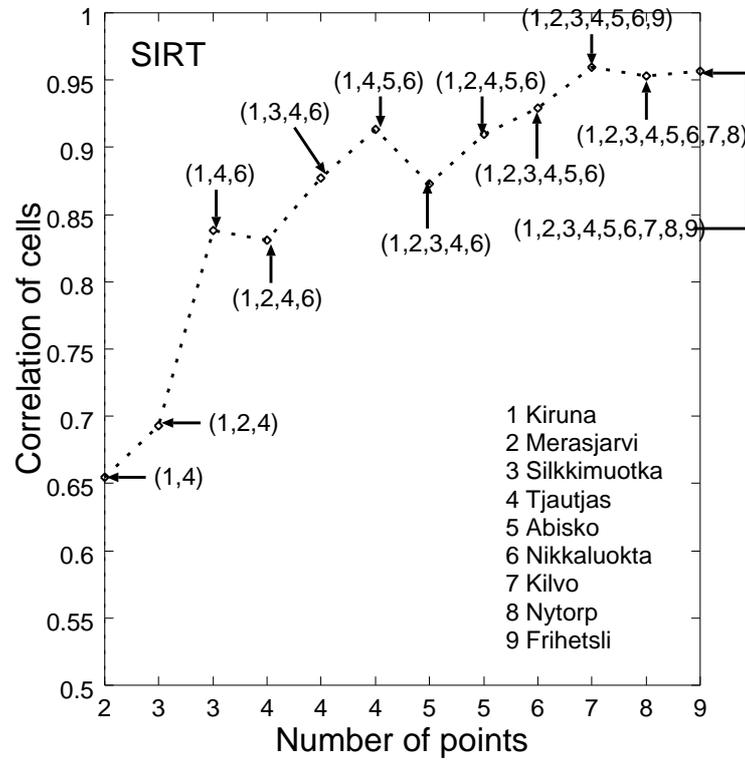


図 7.1: 観測点配置の再構成結果への影響 (SIRT 法のみ)

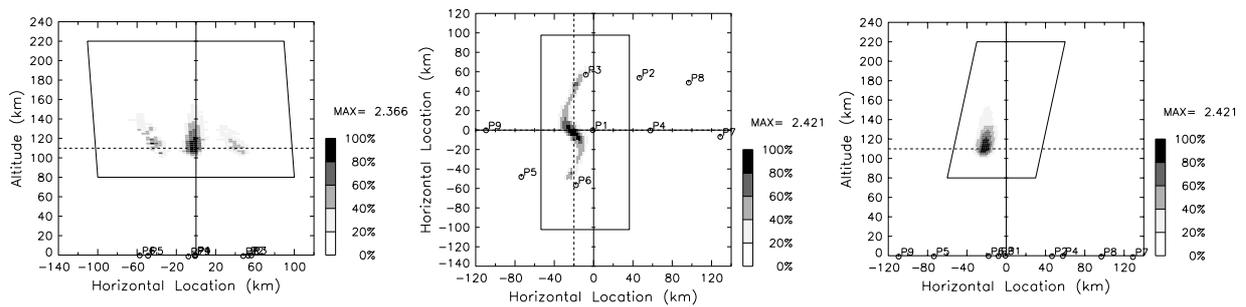


図 7.2: SIRT 法のみによる再構成結果 (観測点 9 点)

このシミュレーション結果からすると、Frehetsli(9番の観測点)が新たに加わる観測点としては望ましいと思われるが、この観測点はスウェーデン国外であり、交通の便もやや悪いということがある。しかし、Kilvo, Nytrop(7, 8番の観測点)を加えた場合も十分に6点での再構成よりセル相関が高いことから、これらの観測点を順次加えることにしても構わないと考える。

## 7.2 他の観測システムとの共同観測

これまで、オーロラは多様な観測装置を用いて観測されている。例えば、人工衛星による観測、レーダーを用いた計測、ロケットを用いたオーロラの直接計測などである。オーロラトモグラフィを行なうにあたり、できるだけ多様な情報がある方が再構成結果の信頼性が高くなると思われることから、本節ではALIS以外のオーロラ観測情報をトモグラフィ再構成に利用する方法を検討することにする。

多様な計測手段の中で、ロケットや衛星による光学観測結果は地上からの画像と同様に考えることができるため、同じ波長の結果ならオーロラトモグラフィ解析に組み入れることたやすい。しかし、それ以外のレーダーから計測される電子密度・衛星や観測ロケットで測定されるオーロラ粒子のエネルギー分布等からは、直接オーロラの発光分布に結び付けることは困難であるため、これらの情報を観測画像とともに利用するオーロラ再構成手法の開発も難しいと考える。ただ、レーダーにより観測された電子密度からオーロラ粒子のエネルギー分布を推定する研究 [44] もあるため、これから推定されたエネルギー分布、もしくは衛星や観測ロケットで計測されたエネルギー分布を、画像から再構成された発光強度分布との比較・対照のために用いることにより、光学計測以外の情報も再構成結果の検討材料として利用できると考えている。

実際、Kirunaの北方200kmほどのところに存在するEISCATレーダとの同時観測や、電場や粒子エネルギー等を測定できるFAST衛星との同時観測がこれまで何度か行なわれてきたが、オーロラや気象などの条件のため、オーロラトモグラフィに利用できるような結果はまだ得られていない。しかし、継続して観測を行なっていくことにより、検討に値する結果が得られるものと考えている。

また、現在のところ予定はないが、地上以外の観測点からの光学観測結果として衛星からのオーロラ観測画像がある場合を想定し、再構成結果にどのような影響があるかを見るためにシミュレーションを行なうことにした。モデルオーロラは6.3.3節の異なる高度の多数のアークの層からなるモデルを用い、地上からの4点の観測点に加えてこのモデルオーロラの北側の上空に1つの衛星を観測点としておき、計5点の観測点による観測と再構成のシミュレーションを行なった。その再構成結果の断面図を図7.3に示す。P<sub>a</sub>と示されているのが設定した衛星の位置である。6.3.3節のシミュレーションであまり結果の良くなかった内側の層の分布がモデルに近くなっている。これを詳しく見るため、モデルオーロラ、衛星がある場合の再構成結果、地上の観測点のみの場合の再構成結果から取り出した南から2層目のアークの沿磁力線プロファイルを図7.4に示す。衛星がない場合に比べて大幅な改善とはいえないが、衛星による観測点があつた場合発光強度最大値が大きくなってモデ

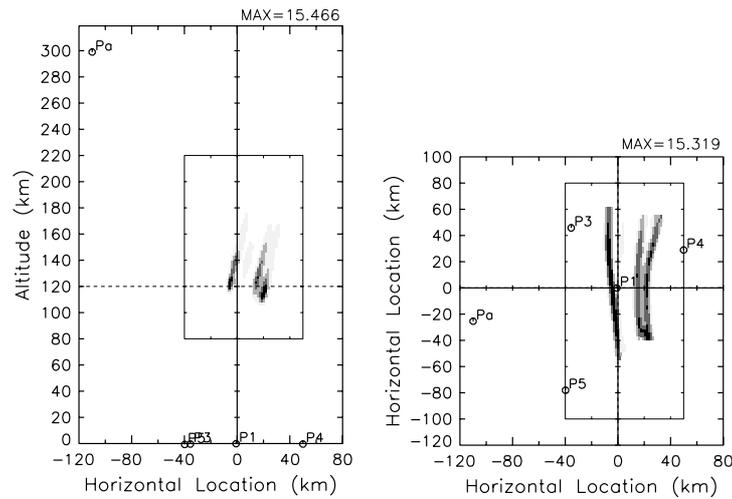


図 7.3: 衛星からの画像を加えた場合の再構成シミュレーション結果

ルに近付いており、また発光強度最大となる高度に関しては 7km 程度の誤差があったものが 2km 以下とかなり少なくなっている。

つまり、ALIS によるオーロラ観測と同期した光学的な観測は、オーロラトモグラフィに直接データを組み入れることが期待でき、レーダーによる計測や粒子エネルギーの計測はトモグラフィ結果との比較・対照に用いることができるため、どちらも有用で望ましいものとする。

### 7.3 自動化への考察

現在、オーロラの観測から再構成結果を得るまでには、人間による多くの作業が不可欠である。この人間による作業を自動化することにより、さらに多くのデータに対する解析が可能になると考える。本節ではこの自動化のポイントを挙げ、問題点と解決策について考察する。

まず一つめとして観測の自動化がある。現在オーロラを観測するにあたり、オーロラの検出とその観測タイミングの決定は人間の判断により行なっている。しかし、これを自動化することができれば、観測点の無人化は行なわれていることから完全に自動化された多点オーロラ観測が可能になると思われる。

このために解決すべき問題点として、まずオーロラの検出が挙げられる。記憶容量の観点から、常時観測を行ないその画像データをすべて蓄積することはできないからである。また、トモグラフィに適した画像を取得するためには、適当な位置にオーロラがあることを識別できることが望ましい。さらに、既に観測されたもしくはこれから観測される膨大なデータの検索のために、表 1.1 で分類したようなアークやディフューズ、単層複層といったオーロラ形状の識別も必要であるとする。

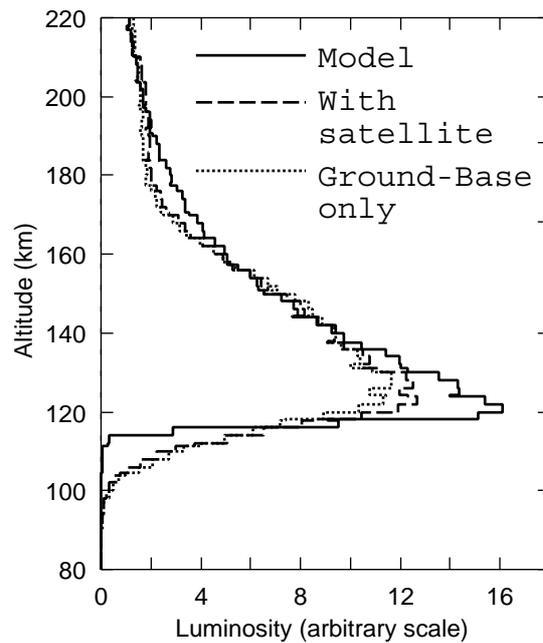


図 7.4: 衛星からの画像を加えたシミュレーション結果の沿磁力線プロファイル

これらの問題を解決するためには、新たに装置を作るよりも、オーロラ観測に用いているカメラシステムからの画像を利用して、計算機によるオーロラの認識を行なうのがよいと思われる。オーロラが存在するか否かについては、フィルタを交換しつつ複数枚の画像を取得し、これらの比較を行なうことにより可能と考えられる。オーロラの形状の識別に関しては、画像を直接利用するもしくは画像から特徴量を抽出してニューラルネットワークにより形状の識別を行なう研究 [45] がなされており、これを利用することができると考えている。また、トモグラフィに適切な位置にオーロラが存在するかどうかの識別は、オーロラ形状の識別ができれば容易であると考えられる。

二つめに方向較正の自動化がある。現在、一つの観測点の画像方向の較正には、一人の人間の数時間の作業が必要である。各観測点のカメラ方向は可変であることや、将来的な観測点数の増加を考えると、これも自動化することが望ましい。そのために必要な技術として、2.3.2節で述べた画像中からの恒星位置の抽出と抽出された恒星の同定作業の自動化がある。前者は2.3.2節で述べたサブピクセル単位での恒星位置の決定の延長線上にあり、ノイズの影響やCCD画素中の欠陥に注意すればそれほど難しくないと考える。後者は、画像以外の情報が何もなければかなり難しいものと思われるが、画像取得時刻、カメラ特性については既知とすることができ、カメラの大体の方向についても情報があることから、不完全な対応点探索問題として十分対応できると考える。

三つめに再構成の自動化がある。もちろんトモグラフィ解析を必要とするオーロラの決定は人間が行なうべきであるが、オーロラの時間発展を見る場合のように、ある一定期間の観測画像をすべて解析したいと考えた場合、解析すべき画像の数は非常に多くなること

が予想され、再構成の自動化が必要となる。そこで必要となるのは画像中のオーロラ範囲の決定である。画像中のオーロラ範囲を決定することにより、3.5節で述べた再構成領域の選択を自動化することができる。これは一つめに挙げたオーロラの認識と同じ問題であるため、同様な解決ができると考えている。オーロラ再構成領域の選択ができれば、SIRT法<sub>+p</sub>-近似のような再構成手法の適用に問題はない。領域選択後の再構成は、SIRT法等の定数回の繰り返しを行えば良いと考える。

以上のようにオーロラの観測から再構成までの自動化は十分可能であり、行なう価値のあるものとして将来の課題としたい。

## 7.4 まとめ

現在の ALIS によるオーロラトモグラフィ観測では 6 点の地上の観測点を用いており、これらの観測点からの画像のみであっても、かなり信頼性の高い再構成ができる。しかし、地上と衛星等とを問わず新たな観測点は、再構成の信頼性と再構成できる領域の大きさに関してそれだけの向上をもたらす。また、直接計測の難しいオーロラ発光強度分布の推定にあたり、多少の仮定を置いてでも光学的なもの以外からの発光強度分布への手がかりを与えるデータは望ましいものと言える。

現在の ALIS の観測点そのものは無人化されているが、そのコントロールは有人で行なわれており、また再構成結果を得るまでには多くの人間による作業を必要とする。この過程の自動化は十分に可能であると思われ、また将来にわたり継続的な観測を行なうためにも望ましいと考える。

# Chapter 8

## 結論

本論文では、オーロラの単色光画像からその空間的な発光強度分布を再構成する、オーロラトモグラフィについて検討を行ってきた。

光学的な観測結果を利用したオーロラの発光強度分布の推定は、オーロラ粒子のエネルギー分布や発光の素過程などの研究のため、幾つか行なわれてきている。しかし、それらは観測機器の制約や観測点数の少なさから、観測点の鉛直面上のみというように得られる発光強度分布の範囲が限定されていたり、妥当なオーロラの発光強度分布を推定するために強力な制約を必要としたりしている。

本論文では、実際の観測システムとして ALIS の観測網を用いることにより、最大 6 点というこれまでの研究に比べてより多くの観測点からの同時観測画像を利用することを前提として、より制約が少なく、より信頼性があり、より広範囲のオーロラ発光強度分布が得られる手法の確立を目指した。

以下に各章の内容をまとめる。

第 1 章では、本論文の背景や目的を述べると共にこれまでの類似の研究について触れ、最後に論文の構成について述べた。

第 2 章では、ALIS 観測網とそれを構成するカメラシステムの詳細について述べた後、得られた画像を再構成するにあたり必要となる前処理として、カメラ方向と感度の較正手法について述べた。カメラ方向の較正手法は恒星の画像を利用したもので、カメラ方向の較正の誤差はわずかで十分な精度を持っていることを、実例を挙げて確かめている。また、カメラ感度の較正については、燐光を用いたカメラ間の相対感度の較正と、カメラの方向特性から計算できる一つのカメラ内の画素間の相対感度の較正、そして積分球標準光源を用いた各画素の絶対較正の各手法を述べている。絶対感度較正は新たに定式化したものであるが、実現した時期が遅かったため、再構成に適用し絶対的な発光強度を得ることができたのは少数である。しかし、相対感度較正であってもオーロラ形状に関する再構成には十分である。

第 3 章では、まずセルモデルによるオーロラ発光構造表現のモデル化を行なった後、空間的な発光分布と画像の各画素のグレイレベルとの関係を、線積分投影とボリューム投影という二つの投影法で定式化した。これらの投影法は、セルモデルにおいて投影を行なう際の計算量を減らすための方法である。そして、オーロラ再構成手法として検討を行なう

MART 法・SIRT 法・疑似逆マトリクス法・フィルタ付き逆投影法の各手法についてそれらの特徴と共に述べた。また、再構成に制約を加える方法として、 $p$ -近似と呼ぶオーロラが磁力線に沿うという性質を利用した方法を新たに提案した。さらに、再構成を行なう際に信頼性のない領域を含めないようにするために再構成領域の選択を行なう方法を新たに提案した。

第4章では、計算機シミュレーションにより、オーロラトモグラフィにもっとも適した再構成手法の選択と、オーロラの位置や観測点配置の再構成への影響の検討を行なった。まず、再構成シミュレーションの手順と再構成結果の評価方法を説明した後、2次元の単純なオーロラ発光強度分布の再構成シミュレーションを行なった。このシミュレーションでは、MART 法・SIRT 法がもっとも結果が良く、疑似逆マトリクス法がこれに続き、フィルタ付き逆投影法はそれほど良い結果を与えなかった。また、観測点とオーロラの配置が再構成結果に影響を与え、観測点群の上空から外れた場所のオーロラの再構成はそうでない場合に比べて結果が劣ること、 $p$ -近似のもつ制約に合致する分布を持つオーロラに対して  $p$ -近似を再構成手法に加えることにより再構成結果を改善すること、空間に張るセルの形状が立方体であるか斜四角柱であるか、投影法に線積分投影を用いるかボリューム投影を用いるかという違いによって結果に大きな差がないことを確認した。さらに、ノイズを加えた場合の再構成シミュレーションの結果から、MART 法に比べて SIRT 法がノイズに強いことを確かめた。MART 法と SIRT 法及びそれらに  $p$ -近似を加えた再構成手法については、3次元の発光強度分布の再構成シミュレーションも行ない、2次元の結果と同様の傾向を持つ結果が得られることを確かめた。また、ALIS の6点の観測点の中から幾つかの観測点の組合せを選び、それらの画像からの再構成シミュレーションを行なった。その結果、例外もあるが基本的には観測点数が多い方が再構成結果は良いことが分かった。この章でのシミュレーション結果から、ノイズのない場合には MART 法に  $p$ -近似を加えた方法、もしくは SIRT 法に  $p$ -近似を加えた方法がオーロラトモグラフィのための再構成手法としては適していると考えられるが、ノイズの影響を考慮して SIRT 法に  $p$ -近似を加えたものを再構成手法として選択することにした。

第5章では、実際に ALIS 観測網を利用して得られた観測画像からオーロラ再構成を行なった。計4回の観測期間中に得られた多点同時観測画像は、オーロラの位置や形状・画像の数やその観測点の配置など様々な違いがあり、これらがそれぞれの再構成結果の信頼性に大きく影響を及ぼすと考える。そこで、信頼性を検討するためのシミュレーションも行なったが、これに関しては次の章で述べることとした。この章で得られた再構成結果は波長 557.7nm のものが多いが、427.8nm のものもある。構造に関してはいずれもアークのオーロラであるが、単層のほぼまっすぐに延びたものから複雑なフォールドを持つものまで種々のオーロラの再構成結果が得られている。幾つかの再構成結果では、背景光やゴーストオーロラの排除が不十分であったためか多少のアーティファクトが出ているが、発光強度最大となる高度や沿磁力線発光強度プロファイルの形状などは、これまでのオーロラの発光に関する知見にいずれも十分に一致するものであった。

第6章では、前章の実際の観測画像からの再構成に基づいたオーロラモデル及び観測時と同様の観測点配置による再構成の計算機シミュレーションを行なった。これは、オーロラの位置や構造・観測点配置などに依存する再構成結果の信頼性を確認するために、網羅

的なシミュレーションを行なうには、そのパラメータ数の多さゆえ非現実的な量の計算を必要とするが、各観測画像のそれぞれに基づいた再構成シミュレーションなら可能であり、それによって個々の再構成結果の信頼性は検討できるからである。このシミュレーションから、前章における再構成結果に対する信頼性について、単層のアーチからなるようなオーロラに対しては、非常に高い信頼性があり、例えば発光強度最大高度に関しては、セルの大きさ程度の誤差しかないという結果を得た。また、多層からなるような複雑な形状のオーロラに対しても、情報が不足することに起因すると思われる誤差のため、多少取り扱いに注意が必要な部分が生じることもあるが、十分な信頼性が得られていることを確かめた。

第7章では、オーロラトモグラフィ観測における将来的な発展について検討を行なった。観測点数の増加、光学的方法以外の観測手段との同時観測、観測からトモグラフィ結果を得るまでの過程の完全自動化は、いずれも今後の課題であるが、十分に可能であり望ましいものと判断した。

本論文による研究により、オーロラトモグラフィに関して、再構成手法の提案を中心に観測から再構成結果に至るまでの手法の検討が行なわれた。これらの結果が広く役立つことを期待している。



# 謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始暖かい御指導と御鞭撻を頂いた京都大学工学研究科 荒木光彦教授に心から深く感謝の意を表します。

また、本研究を行なうに際し、暖かい御助言、御指導を頂いた福山大学 安倍稔教授に深く感謝の意を表します。

国立極地研究所の麻生武彦教授には、研究全般にわたり終始暖かい御指導並びに御教示を頂き、心から感謝の意を表します。

また博士論文をまとめるにあたり、数多くの有益な御助言、御教示を頂いた京都大学超高層電波研究センター 松本紘教授ならびに京都大学超高層電波研究センター 深尾昌一郎教授には心より感謝の意を表します。

国立極地研究所 江尻全機教授並びにスウェーデンスペース物理研究所 Åke Steen 博士には、研究を進めるにあたり種々の御指導を頂き、心より感謝の意を表します。

福井大学 松木純也教授、静岡大学 橋本岳助教授、詫間電波工業高等専門学校 永井久助教授、京都大学工学研究科 斉藤啓子助手には、研究会などで適切な御助言を頂き、謹んで御礼申し上げます。

大阪府立大学 藪哲郎助手、京都大学卒業の六車和彦氏、中井 裕二氏、平田誠氏、藤田淳文氏、美馬傑氏、内山真男氏をはじめ、旧安倍研究室の皆様には大変御世話になりました。心から感謝致します。



## 参考文献

- [1] Steen, Å. and U. Brändström, B. Gustavsson and T. Aso, “ALIS – A multi-station imaging system at high latitude with multi-disciplinary scientific objectives,” Proc. 13th ESA symposium on European Rocket and Balloon Programs and related Research, Öland, Sweden, ESA **SP-397**, 261-266, 1997.
- [2] 斎藤恒雄, “画像処理アルゴリズム”, 第 6~8 章, 近代科学社, 1993.
- [3] Raymund, T. D., J. R. Austen, S. J. Franke, C. H. Liu, J. A. Klobuchar and J. Stalker, “Application of computerized tomography to the investigation of ionospheric structures,” Radio Sci., **25**(5), 771-789, 1990.
- [4] Borovsky, J. E., “Auroral arc thickness as predicted by various theories,” J. Geophys. Res., **98**(A4), 6101-6138, 1993.
- [5] Onda, K., M. Ejiri, Y. Itikawa, and H. Miyaoka, “Altitude profile of electron density and oxygen green line in active auroral arcs based on electron differential number flux observed by sounding rocket,” Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., **11**, 36-54, 1998.
- [6] Stenbaek-Nielsen, H. C. and Hallinan, T. J., “Pulsating auroras: Evidence for non-collisional thermalization of precipitating electrons”, J. Geophys. Res., **84**, 3257-3271, 1979.
- [7] Brown, N. B., T. N. Davis, T. J. Hallinan and H. C. Stenbaek-Nielsen, “Altitude of pulsating aurora determined by a new instrumental technique,” Geophys. Res. Letters, **3**, 7, 403-404, 1976.
- [8] Kaila, K. U., “An iterative method for calculating the altitudes and positions of auroras along the arc,” Planet Space Sci., **35**(2), 245, 1987.
- [9] Kaila, K. U., “Determination of the energy of auroral electrons by the measurements of the emission ratio and altitude of aurorae,” Planet Space Sci., **37**(3), 341-349, 1989.
- [10] Romick, G. J. and A. E. Belon, “The spatial variation of auroral luminosity—II,” Planet. Space Sci., **15**, 1695-1716, 1967.

- [11] Vallance Jones, A., R. L. Gattinger, F. Creutzberg, F. R. Harris, A. G. McNamara, A. W. Yau, E. J. Llewellyn, D. Lummerzheim, M. H. Ress, I. C. McDade and J. Margot, "The ARIES auroral modelling campaign: Characterization and modelling of an evening auroral arc observed from a rocket and a ground-based line of meridian scanners," *Planet Space Sci.*, **39**(12), 1677-1705, 1991.
- [12] Frey, S., H. U. Fray, D. J. Carr, O. H. Bauer and G. Haerendel, "Auroral emission profiles extracted from three-dimensionally reconstructed arcs," *J. Geophys. Res.*, **101**, 21731-21741, 1996.
- [13] Nygrén, T., M. Markkanen, M. Lehtinen and K. Kaila, "Application of stochastic inversion in auroral tomography," *Ann. Geophys.*, **14**, 1124-1133, 1996.
- [14] Aso, T., T. Hashimoto, M. Abe, T. Ono and M. Ejiri, "On the analysis of aurora stereo observations," *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**(5), 579-595, 1990.
- [15] Aso, T., M. Ejiri, H. Miyaoka, T. Ono, T. Hashimoto, T. Yabu and M. Abe, "Aurora stereo observation in Iceland," *Proc. NIPR Symposium on Upper Atmos. Phys.*, **6**, 1-14, 1993.
- [16] 麻生武彦, 江尻全機, 宮岡宏, 小野高幸, 藪哲朗, 六車和彦, 橋本岳, 安陪稔, "アイスランド・オーロラステレオ観測と画像のトムグラフィ解析," *信学論*, **J77-D-II**, No. 1, 67-68, 1994.
- [17] 工藤博幸, 斎藤恒雄, "CT 画像再構成問題の原理的考察 - 離散的に計測される投影データからの再構成 -," *信学論*, **J70-D**, 12, 2784-2792, 1987.
- [18] Lee, S. W., Z. H. Cho, "Limited angular view planar-integral projection reconstruction in NMR imaging," *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, **NS-31**, 4, 1984.
- [19] Groetsch, C. W., "Inverse problems in the mathematical sciences(1st Edition)," D-65183 Wiesbaden, Germany, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1993.
- [20] 譚玉峰, 佐藤俊輔, 土居伸二, "ART 画像再構成における Kaczmarz の解法について," *信学論*, **J76-DII**, 2, 191-198, 1993.
- [21] Semeter, J. and M. Mendillo, "A nonlinear optimization technique for ground-based atmospheric emission tomography," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **31**(5), 1105-1116, 1997.
- [22] B. Gustavsson, "A study of feasible tomographic inversion techniques for ALIS," IRF Technical Report, **039**, 1992

- [23] Ejiri, M., T. Ono, T. Oguti, N. Yajima, Y. Kameda, H. Hamada and K. Komatsu, "Visible Auroral Television Camera for the Sounding Rockets of S-310JA-8, -9 and -10," *J. Geomag. Geoelectr.*, **40**, 783-797, 1988.
- [24] Steen, Å. and U. Brändström, "ALIS—A multi-station ground-based imaging system at high latitudes," *STEP international Newsletter*, **3**(5), 11-14, 1993.
- [25] Steen, Å., U. Brändström and K. Kaila, "A scientific and technical description of ALIS," *Proc. NSSR Annual Meeting*, Bolkesjö, Norway, 153, 1990.
- [26] Brändström, U., Å. Steen, B. Gustavsson, P. Rydesäter, T. Aso and M. Ejiri, "ALIS, a versatile multi-station imaging facility at high latitudes – II. System overview and design principles," prepared for submission to *J. Geophys. Res.*, 1999.
- [27] Aso, T., M. Ejiri, A. Urashima, H. Miyaoka, Å. Steen, U. Brändström and B. Gustavsson, "First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995," *Earth, Planets and Space*, **50**(1), 63-80, 1998.
- [28] Aso, T., M. Ejiri, A. Urashima, H. Miyaoka, Å. Steen, U. Brändström and B. Gustavsson, "Auroral tomography analysis of a folded arc observed at the ALIS-Japan multi-station campaign on March 26, 1995," *Proc. NIPR symp. Upper Atmos. Phys.*, **11**, 1-10, 1998.
- [29] Aso, T., Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, A. Urashima and M. Ejiri, "ALIS, a state-of-the-art optical observation network for the exploration of polar atmospheric processes," to be appeared in "Advances in Space Research" in 1999.
- [30] Hoffleit, D. (with the collaboration of Jaschek, C.), "The BRIGHT STAR CATALOGUE, 4th revised edition," New Haven: Yale University Observatory, 1982.
- [31] Okano, S., S. Takeshita, and M. Taguchi, "Absolute calibration system at NIPR for aurora/airglow measurements using a 1.9-m integration sphere," *Proc. 24th Annual European meeting on Atmospheric Studies by Optical method*, 30, 1998.
- [32] 浦島智, 藤田淳文, 麻生武彦, "オーロラトモグラフィにおける再構成アルゴリズムの検討," *国立極地研究所 南極資料*, **41**(2), 469-496, 1997.
- [33] Peyrin, F. C., "The generalized back projection theorem for cone beam reconstruction," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **32**, 1512-1519, 1985.
- [34] 工藤博幸, 斎藤恒雄, "円錐ビーム投影からの3次元CT画像再構成", *信学技報*, **IE87-124**, 7-14, 1988.
- [35] 工藤博幸, 斎藤恒雄, "シングルスキャンによる円錐ビーム投影からの3次元CT画像再構成", *信学論*, **J72-D-II**, No.9, 1534-1542, 1989.

- [36] Kudo, H. and Saito, T., "Feasible cone beam scanning methods for exact reconstruction in three-dimensional tomography," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7**, 2169-2183, 1990.
- [37] 藪哲朗, 麻生武彦, 橋本岳, 安陪稔, 江尻全機, "ステレオ画像を用いたオーロラ形状の推定手法について," *南極資料*, Vol.37, **3**, 231-251, 1993.
- [38] Gordon, R., R. Bender and G. T. Herman, "Algebraic reconstruction technique(ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography," *J. Theor. Biol.*, **29**, 471-481, 1970.
- [39] Gordon, R. and G. T. Herman, "Reconstruction of Pictures from Their Projections" *Comm. ACM*, **14**, 12, 759-769, 1971.
- [40] Gilbert P., "Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections," *J. Theor. Biol.*, **36**, 105-117, 1972.
- [41] Cichocki, A. and Unbehauen, R., "Neural Networks for Optimization and Signal Processing," New York, J. Wiley, 1993.
- [42] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., "Numerical Recipes in C," Cambridge, Cambridge University Press, 1988.
- [43] Banks, P. M., Chappell, C. R. and Nagy, A. F., "A new model for the interaction of auroral electrons with the atmosphere: Spectral degradation, backscatter, optical emission, and ionization," *J. Geophys. Res.*, **79**, 1459-1470, 1974.
- [44] Kirkwood, S., and A. Osepian, "Quantitative studies of energetic particle precipitation using incoherent scatter radar," *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 783-799, 1995.
- [45] 高津 琢彦, "オーロラ CCD 画像の AI による自動認識に向けての基礎的研究", 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 1998.

# 本研究に関する発表

## 論文発表

- [1] 浦島智, 藤田淳文, 麻生武彦, “オーロラトモグラフィにおける再構成アルゴリズムの検討,” 国立局地研究所 南極資料, 41(2), 469-496, 1997.
- [2] Aso, T., M. Ejiri, A. Urashima, H. Miyaoka, Å. Steen, U. Brändström and B. Gustavsson, “First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995,” *Earth, Planets and Space*, 50(1), 63-80, 1998.
- [3] Aso, T., M. Ejiri, A. Urashima, H. Miyaoka, Å. Steen, U. Brändström and B. Gustavsson, “Auroral tomography analysis of a folded arc observed at the ALIS-Japan multi-station campaign on March 26, 1995,” *Proc. NIPR symp. Upper Atmos. Phys.*, 11, 1-10, 1998.
- [4] Aso, T., Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, A. Urashima and M. Ejiri, “ALIS, a state-of-the-art optical observation network for the exploration of polar atmospheric processes,” accepted for publication in *Advances in Space Research*, 1999
- [5] Urashima A., T. Aso, M. Ejiri, Å. Steen, U. Brändström and B. Gustavsson, “Camera calibration by the integration sphere for auroral tomography observation,” submitted to *Proceedings of the NIPR Symposium on Upper Atmosphere Physics*.

## 口頭発表

- [1] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 橋本岳, 安陪稔, “オーロラ画像トモグラフィへのMART/SIRT法の応用,” 第1回画像センシングシンポジウム論文集, 161-162, May 1995.
- [2] Aso, T., A. Urashima, M. Ejiri, H. Miyaoka, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “One analysis of auroral tomography based on the ALIS-Japan multi-point observation in March, 1995,” 第98回地球電磁気・地球惑星圏学会講演, Oct. 1995.

- [3] 麻生武彦, 浦島智, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “多点オーロラトモグラフィ国際共同観測,” Abstract for the 22nd Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, Helsinki, Finland, 1995.
- [4] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 中井裕二, 橋本岳, 安陪稔, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “多点オーロラ観測画像のトモグラフィ解析,” 平成7年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, Nov. 1995.
- [5] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 中井裕二, 橋本岳, 安陪稔, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, “オーロラトモグラフィの第1回多点国際共同観測,” 第19回極域における電離圏磁気圏総合観測シンポジウム講演予稿 1-01, Nov. 1995.
- [6] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 橋本岳, 安陪稔, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, “多点オーロラトモグラフィ観測と再構成解析,” 第100回地球電磁気・地球惑星圏学会予稿論文集, C12-04, Oct. 1996.
- [7] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 橋本岳, 安陪稔, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “オーロラトモグラフィの再構成解析,” 平成8年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, Nov. 1996.
- [8] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “ALIS-JAPAN オーロラトモグラフィ画像の再構成解析,” 第20回極域における電離圏磁気圏総合観測シンポジウム講演予稿集, 25, Nov. 1996.
- [9] 麻生武彦, 浦島智, 藤田淳文, 橋本岳, 安陪稔, 江尻全機, 宮岡宏, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “オーロラトモグラフィ観測と再構成解析 -その2-,” 地球惑星科学関連学会 1997年合同大会講演予稿集, F42-02, Mar. 1997.
- [10] 浦島智, 麻生武彦, “オーロラトモグラフィにおける逆変換解析手法の検討,” 第3回画像センシングシンポジウム講演論文集, 365-368, Jun. 1997.
- [11] 麻生武彦, 江尻全機, 浦島智, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “オーロラトモグラフィ観測と再構成解析 -その3-,” 第102回地球電磁気・地球惑星圏学会講演, B42-07, Oct. 1997.
- [12] 麻生武彦, 江尻全機, 浦島智, 内山真男, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “多点単色光オーロラトモグラフィ観測と再構成解析 -その4-,” 地球惑星科学関連学会 1997年合同大会講演予稿集, Ee-005, Mar. 1998.
- [13] 麻生武彦, 江尻全機, 浦島智, Å. Steen, U. Brändström, B. Gustavsson, “ALIS-JAPAN オーロラトモグラフィ観測とその再構成結果からの高度情報の抽出,” 第22回極域における電離圏磁気圏総合観測シンポジウム, Jul. 1998.