

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

藪 哲郎^{1*}・麻生武彦¹・橋本 岳¹・安陪 稔¹・江尻全機²

An Upgraded Method for Reconstructing 3-Dimensional Structure of Aurora from Stereo Images

Tetsuro YABU^{1*}, Takehiko ASO¹, Takeshi HASHIMOTO¹, Minoru ABE¹
and Masaki EJIRI²

Abstract: We have been studying reconstruction of auroral 3-D luminous structure from stereo images. We have used the model function method for this problem. In this method, auroral structure is expressed by an appropriate function with some parameters, which are determined by iterative calculations. The auroral model assumes sheet-like luminosity structure with some prescribed thickness and altitude distributions.

In this paper, we present an upgraded model function which can express an aurora of more complicated structure. The upgraded model is expressed by the product of a 2-D function which represents projections of an aurora along the geomagnetic lines of force onto the horizontal plane and an altitude function along the geomagnetic line of force. Using this model, curved aurora arcs and pulsating auroras of irregular form can be more properly delineated. In this paper, we analyze the aurora arc observed in Iceland and a pulsating aurora observed in Antarctica. At the same time, we examine the appropriateness of the functional form which expresses the altitude profile of the luminosity of aurora based on theoretical prediction.

要旨: 我々は1987年以降, 他に先駆けてオーロラ観測画像よりオーロラの三次元的発光形状を求める研究を行っており, その解析手法としてモデル関数法を用いてきた. モデル関数法とはオーロラを適当な関数によって表し, その関数を構成するパラメータを求めることにより, オーロラの発光形状を推定する手法である. これまでに使用してきたモデル関数は磁気東西方向に一樣なオーロラアークを表すものを基本とし, これにアークの曲がりを考慮したものであった. すなわち, アークの断面における二次元的発光分布をオーロラの厚み方向の明るさ分布を与える関数と高度方向の明るさ分布を与える関数の積で表し, オーロラの伸びる方向には比較的簡単な発光形態を呈することを仮定していた.

これに対して本論文では, 三次元的により複雑な形状をしたオーロラを表現するために改良したモデル関数の構成法について詳述する. 本論文で提示するモデル関数は, オーロラを各磁力線に沿って地平面に投影した時の投影像を表す二次元的関数と, 高度方向の明るさ分布を表す関数の積により表される. この改良されたモデルを使用することにより, 複雑な曲がりを持ったオーロラアークや不規則な形をしたバルセーティングオーロラについても形状推定が可能になった. 本論文ではこれを用いて, アイスランドで観測されたオーロラアークの画像および南極で観測されたバルセーティングオーロラの画像について形状推定を行い, その発光形状を明らかにする. また同時に, 高度方向の発光分布を表す関数形についても検討を行う.

¹ 京都大学工学部, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 606-01.

² 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

* Present address: 大阪府立大学工学部, College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai 593.

1. ま え が き

オーロラの発光形状を推定することは高エネルギー粒子と大気原子の衝突過程により、オーロラが生成されるメカニズムを理解する上できわめて重要な役割を持っている。

オーロラの形状推定の方法として、オーロラのステレオ観測画像より三角測量により高度を求める試みがある。今世紀初めに、STÖRMER はオーロラステレオ写真よりオーロラの下縁の高度を求めた。また、近年 STENBAEK-NIELSEN and HALLINAN (1979) はテレビカメラを用いたステレオ観測により、パルセーティングオーロラの高度を求めている。

一方、掃天フォトメータによるステレオ観測より磁気子午面におけるオーロラの発光形状を求める研究も行われてきた。ROMICK and BELON (1967) は 226 km 離れた二つの観測点に設置された掃天フォトメータより磁気子午面内のオーロラの発光形状を求めた。

これに対して筆者らのグループでは、イメージ増倍管と CCD を用いた新世代のテレビカメラによって撮影されたオーロラ画像よりオーロラの三次元的発光形状を求める研究を他に先駆けて行ってきた。Aso *et al.* (1990) は南極で観測されたステレオ画像よりモデル関数法を用いてオーロラアークの発光形状を求めた。このとき用いられたモデル関数はオーロラは磁気東西方向には一様、または単純な曲がりを持つということを仮定したものであった。本論文では Aso *et al.* (1990) により提案されたモデル関数法を用い、その上で三次元的により複雑な形状を持つオーロラをも表すことが出来るように改良したモデル関数の構成法について述べる。そして、その改良されたモデル関数を用いてアイスランドで観測されたオーロラアークと南極で観測されたパルセーティングオーロラの形状推定を行う。また、併せて高度方向の発光分布を表す関数形についても検討を行う。

2. 観 測

オーロラをその生成メカニズムによって分類すると (1) ディスクリットオーロラと (2) ディフューズオーロラの二つに分類され、それぞれ異なる形状を持つ。本論文ではそれぞれに対するモデル関数を提案し、形状推定を行う。形状推定の対象としては、ディスクリットオーロラの代表としてオーロラアークを、ディフューズオーロラの代表としてパルセーティングオーロラの観測画像を選んだ。

オーロラアークの観測画像としては 1991 年 11 月から 12 月にかけて、アイスランドの Husafell ($64^{\circ}40.4'N$, $21^{\circ}01.5'W$) と Efri-Brunna ($65^{\circ}23.4'N$, $21^{\circ}52.5'W$) の 2 地点で主に 557.7 nm の干渉フィルターを用いて観測された単色光ステレオ画像を用いる (Aso *et al.*, 1993; 麻生ら, 1993)。二つの観測点は、ほぼ磁気子午線上に並んでおり、観測点間の距離は約 90 km である。

一方、パルセーティングオーロラの観測画像としては 1985 年 8 月に南極の昭和基地

(69°00'22''S, 39°35'24''E) とレブスネス島の北の仮設観測点 (69°16'18''S, 39°38'00''E) で ND フィルターのみを用いて観測されたステレオ画像を用いる (麻生ら, 1991). 二つの観測点は地理的にはほぼ南北に並んでおり, 観測点間の距離は約 30 km, 磁気子午線に投影した観測点間の距離は約 20 km である.

3. 形状推定の手法

3.1. 概 略

オーロラ観測画像よりその形状を推定する問題は, 二次元の投影像より三次元形状を求めるという逆問題である. 本研究では地上の 2 箇所ですら観測画像が得られていないため, 観測画像に含まれている情報だけではオーロラの形状を一意に推定することが困難である. 従って, 「オーロラは磁力線に沿って輝く」「磁力線に沿った発光プロファイルは特徴的な形状を持つ」「オーロラアークはシート状の形状を持つ」などの二次的な知識を導入する必要がある. その方法として Aso *et al.* (1990) に倣ってモデル関数法を用いる. モデル関数法とは, いくつかのパラメータで構成されるモデル関数によってオーロラの形状を表し, そのパラメータを反復計算によって求める手法である. モデル関数にはオーロラの形状に関する知識を織り込む.

本論文では, 空間の各点 (x, y, z) におけるオーロラの発光強度を表す関数 $L(x, y, z)$ を仮定し, これをオーロラルミノシティ関数と呼ぶことにする. オーロラルミノシティ関数によって表されるオーロラの形状は, 関数を構成するパラメータによって決定される. パラメータにはオーロラの位置を表すパラメータ, 幅や厚みを表すパラメータなどがある. オーロラは透光性を持つ物体なので, 各画素の視線方向に沿ってオーロラルミノシティ関数を線積分することにより, 疑似的なオーロラ観測画像を作成することが出来る. この画像を再構成画像と呼ぶ.

再構成画像と観測画像の差の 2 乗に重みをつけて和をとった評価関数 F を考え, これが最小になるように反復計算によりパラメータを決定する. 反復計算には非線形最小 2 乗法の 1 手法である改訂マルカート法を用いる. F は次のように表せる.

$$F = \sum_i \sum_j \left[\left\{ G_{ij} - \int_0^{\infty} L(x, y, z) dr \cdot C_{ij} \right\} W_{ij} \right]^2.$$

- ただし,
- F : 最小化すべき関数,
 - G_{ij} : 観測画像上のグレーレベル,
 - W_{ij} : その画素に対する重み付け,
 - C_{ij} : カメラ特性,
 - $L(x, y, z)$: オーロラルミノシティ関数,
 - dr : 視線に沿った積分路.

3.2. オーロラルミノシティ関数の構成

ここでは、オーロラの形状に関する知識をうまく織り込んだモデル関数の構成法について述べる。Aso *et al.* (1990) は、シート状のオーロラアークを表すためのモデルを提案した。そのモデルでは、オーロラアークは磁気東西方向には一様、ないし比較的単純な曲がりを持つと仮定し、アークの断面における明るさ分布をオーロラの厚み方向の明るさ分布を与える関数と高度方向の明るさ分布を与える関数の積によって表した。これに対して、本論文で提案する改良されたモデルはオーロラを磁力線に沿って水平面に投影した時の明るさ分布を与える二次元の関数と磁力線に沿っての高度方向の明るさ分布を与える関数の積によってオーロラの三次元的発光形状を表す。このようにオーロラルミノシティ関数を構成することにより、より複雑な空間形状を持つオーロラを表すことが可能になる。

オーロラルミノシティ関数を構成するにあたっては、次に述べる二つの座標系を使用する。一つは直交座標系で x 軸を南向き、 y 軸を東向き、 z 軸を鉛直上向きにとり、北側の観測点を原点とする座標系で、図 1a のように表される。もう一つは磁力線に沿った座標系で x' 軸は南向き、 y' 軸は東向き、 z' 軸は磁力線の向きにとり、原点は先述の直交座標系と同じ位置にとる。図 1b のように表される。

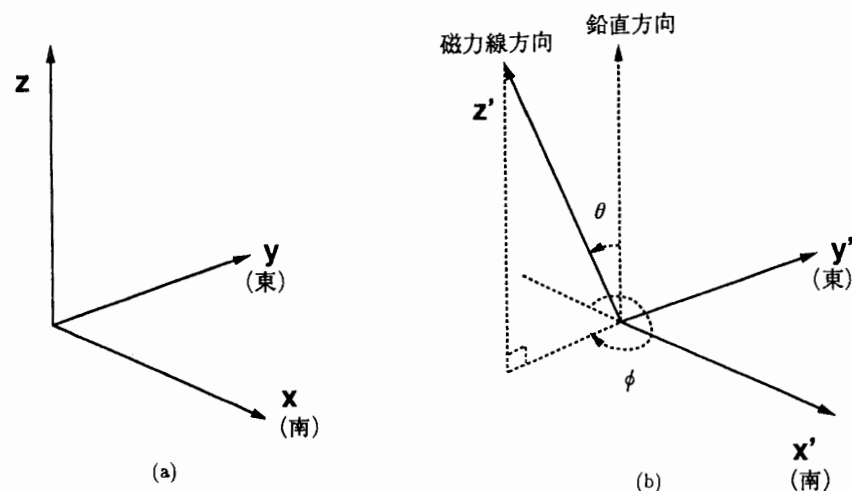


図 1 本論文で使用する座標系
Fig. 1. Coordinate system used in the text.

磁力線の方位角を ϕ (北を 0° とする)、天頂角を θ とするとき、次のような関係がある。

$$x' = x + z \cdot \tan \theta \cdot \cos \phi,$$

$$y' = y - z \cdot \tan \theta \cdot \sin \phi.$$

図 1b より分かるように、1本の磁力線上の点は同じ (x', y') 座標値を持つので、ある磁力線は (x', y') で表される。オーロラを磁力線 (x', y') に沿って $x'y'$ 平面に投影した時の明るさ分布を与える関数を

$$L_{\text{horizon}}(x', y'),$$

と定義する. 次に磁力線 (x', y') に沿っての高度方向の発光分布が

$$L_{\text{altitude}}(x', y', z),$$

で表されるものとする. ただし, 以下のように正規化してあるものとする.

$$\int_0^{\infty} L_{\text{altitude}}(x', y', z) dr = 1.$$

dr : 磁力線に沿った積分路.

オーロラ粒子は磁力線に沿って降下するので, オーロラの発光形状は以上二つの関数の積によって近似できると考えられる. 従って, 次のようにオーロラルミノシティ関数を構成する.

$$L(x, y, z) = L_{\text{horizon}}(x', y') \cdot L_{\text{altitude}}(x', y', z).$$

2層のオーロラを表現するにはこの関数を二つ重ね合わせればよい. 以下に実際の $L_{\text{horizon}}(x', y')$ と $L_{\text{altitude}}(x', y', z)$ の構成例について述べる.

3.3. L_{horizon} の構成

オーロラには帯状のディスクリットオーロラと薄く広がったディフューズオーロラがあり, それぞれ異なる生成機構を持つものと考えられている. またそれぞれに特有の形状を持っているので L_{horizon} としてディスクリットオーロラを表すものと, ディフューズオーロラを表すものとの2種類を考える.

ディスクリットオーロラは, オーロラアークに見られるようにカーテン状の形状をしていることが多い. 従って, ディスクリットオーロラを磁力線に沿って (x', y') 平面に投影した時の明るさ分布を表す関数 $L_{\text{horizon}}(x', y')$ として, 図2に示すような関数を考える. 縦軸が y' 軸, 横軸が x' 軸, 上向き軸が明るさを表している. 図から分かるようにディスクリットオーロラを表す $L_{\text{horizon}}(x', y')$ は尾根を表す曲線 (図中に示した太線, 以後中心線と呼ぶ) を中心とし, 中心線から離れるにしたがって減衰するような形状を持つ. また, 尾根の高さは場所により変化する.

中心線の位置を記述する関数としては基本的に準エルミート補間式を用いる. 準エルミート補間式は不自然な屈曲点が現れることなく節点を滑らかに補間する3次の区分多項式であり, オーロラアークを表すのに最適であると考えられる. ただし, 解析対象とするオーロラの形状が単純な時は計算量の低減, 収束性の向上のため, パラメータの個数が少なく済む直線や2次多項式を用いる.

中心線に沿っての明るさ変化 (図2の尾根の高さの場所による変化) を表す関数としては, 節点数が2ないし3の折れ線を用いる.

中心線から離れるにしたがっての減衰を表す関数としては基本的には準エルミート補間式を用いる. この場合も形状が単純な時はガウス関数やボックスカー関数を用いる.

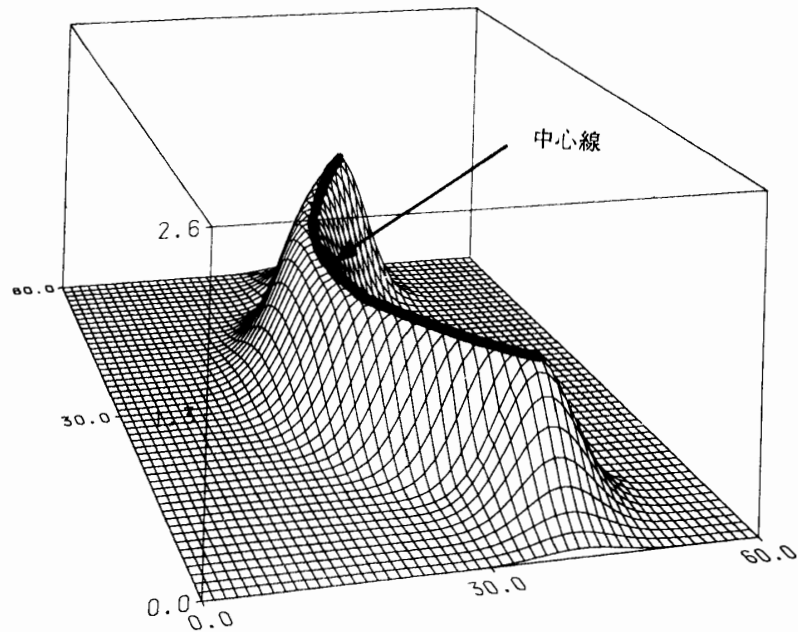


図 2 オーロラアークを表す L_{horizon}
 Fig. 2. L_{horizon} for auroral arc.

また、アークの終端は二次元のガウス関数などで滑らかに終端させる。

以上のように、ディスクリートオーロラを表す L_{horizon} を構成するパラメータは次の三つに分類される。

- 1) 中心線の位置を表すパラメータ,
- 2) 中心線に沿っての明るさ変化を表すパラメータ,
- 3) 中心線から離れるにしたがっての減衰の度合を表すパラメータ.

そして、 $L_{\text{horizon}}(x', y')$ を中心線に沿っての明るさを表す関数と中心線から離れるにしたがっての減衰を表す二つの関数の積によって表す。

$$L_{\text{horizon}}(x', y') = A(\alpha) \cdot B(\beta).$$

$A(\alpha)$: 中心線に沿っての明るさ変化を表す関数

(中心線に沿っての明るさ変化を表すパラメータにより構成される)

$\alpha(x', y')$: (x', y') を中心線に投影した時の中心線上の位置を求める関数

(中心線の位置を表すパラメータにより構成される)

$B(\beta)$: 中心線から離れるにしたがっての減衰を表す関数

(中心線から離れるにしたがっての減衰の度合いを表すパラメータにより構成される)

$\beta(x', y')$: 中心線と (x', y') の距離を求める関数

(中心線の位置を表すパラメータにより構成される)

最も簡単な例として、直線 $\cos p_1 \cdot x' + \sin p_1 \cdot y' = p_2$ で中心線を表し、中心線に沿っての明る

さは一定であり、中心線から離れるにしたがってガウス関数的に減衰するような関数で $L_{\text{horizon}}(x', y')$ を表す場合、次のようになる。

$$L_{\text{horizon}}(x', y') = p_3 \cdot \exp\left\{-\frac{\beta^2}{2p_4^2}\right\},$$

$$\beta = \cos p_1 \cdot x' + \sin p_1 \cdot y' - p_2.$$

ここでのパラメータは中心線の位置を表す p_1, p_2 、中心線に沿っての明るさを表す p_3 、および中心線から離れるにしたがっての減衰を表す p_4 の計4個であり、この4個のパラメータで $L_{\text{horizon}}(x', y')$ を構成する。

次に、ディフューズオーロラを表す L_{horizon} の構成法について述べる。ディフューズオーロラはパッチ状をしていることが多く、決まった形を持たない。そこで、 L_{horizon} としては図3に示すように (x', y') 空間に格子点を設定し、それぞれの格子点を二次元の準エルミート補間式で滑らかに補間するような関数を考える。そして各々の格子点での値を L_{horizon} を構成するパラメータとして扱う。

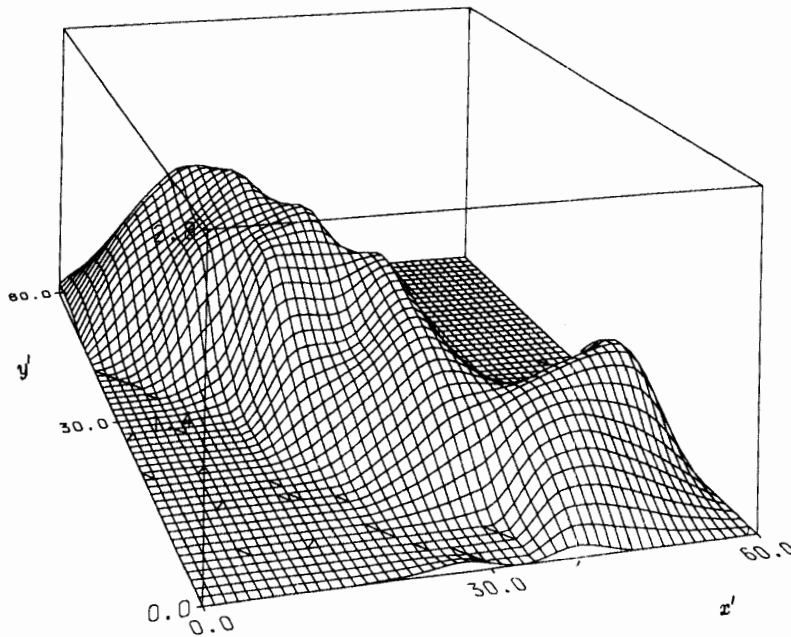


図3 パルセーティングオーロラを表す L_{horizon}
Fig. 3. L_{horizon} for pulsating aurora.

3.4. L_{altitude} の構成

ここでは磁力線 (x', y') に沿っての高度方向の発光分布を表す関数 $L_{\text{altitude}}(x', y', z)$ の構成法について述べる。

オーロラの高度方向の発光分布はオーロラ特有の特徴的な分布をしているので、その特徴

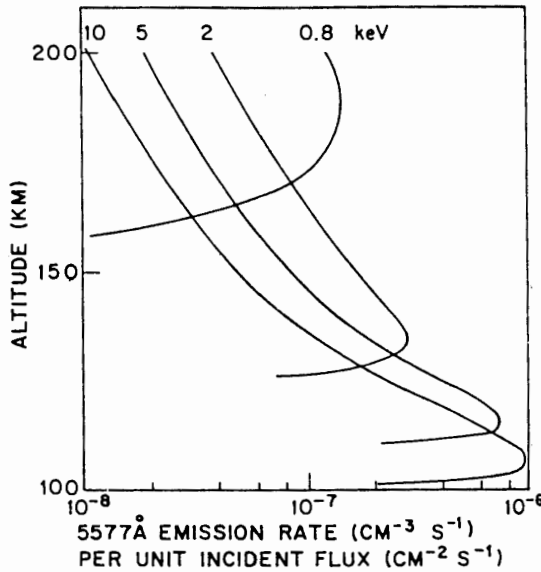


図 4 BANKS *et al.* (1974) の求めた 557.7 nm の発光分布
 Fig. 4. Profiles of optical emission for 557.7 nm given by BANKS *et al.* (1974).

をうまく表した関数形を用いることが望ましい。高度方向の関数形として準エルミート補間式のような制約のない関数形を使用した場合、パラメータの値が一意に定まらなかったり、非現実的な解に収束する恐れがある。

BANKS *et al.* (1974) は特定の入射エネルギーの粒子に対して、オーロラの発光分布が図 4 のようになることを計算によって求めた。我々はこれまで、高度方向の発光分布を表す関数としてチャップマン型関数を仮定してきたが、よりよい近似をするために、BANKS らが計算によって求めた発光分布を近似する解析的な式を使用する。BANKS らの結果を近似する関数形として、チャップマン型関数を変形して得られる次の関数を仮定する。この関数は、BANKS らが求めた発光分布に準拠しつつ、中心高度と垂直幅は独立に変えることが出来るようになっており、パラメータは p_1, p_2, p_3, p_4 の計 4 個である。

$$L_{\text{altitude}}(x', y', z) = \begin{cases} z \geq \zeta \text{ のとき} & \exp \left[-\eta^{1/2} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\eta}{3} \right) \right\} \right] / S \\ & \text{ただし, } \eta = \frac{(z - \zeta) \cdot 2.76}{p_3} \\ z < \zeta \text{ のとき} & \exp \left[\{ 1 - \eta - \exp(-\eta) \} \left\{ 1 - \exp \left(\frac{\eta}{3} \right) \right\} \right] / S \\ & \text{ただし, } \eta = \frac{(z - \zeta) \cdot 1.61}{p_4} \\ & \zeta = f(x', y'; p_1, p_2) \\ & S = \int_0^{\infty} L_{\text{altitude}}(x', y', z) dz. \end{cases}$$

上の関数を、*expsq-chap* 型の関数と呼ぶことにする。図 5a-c に BANKS らが求めた発光分布

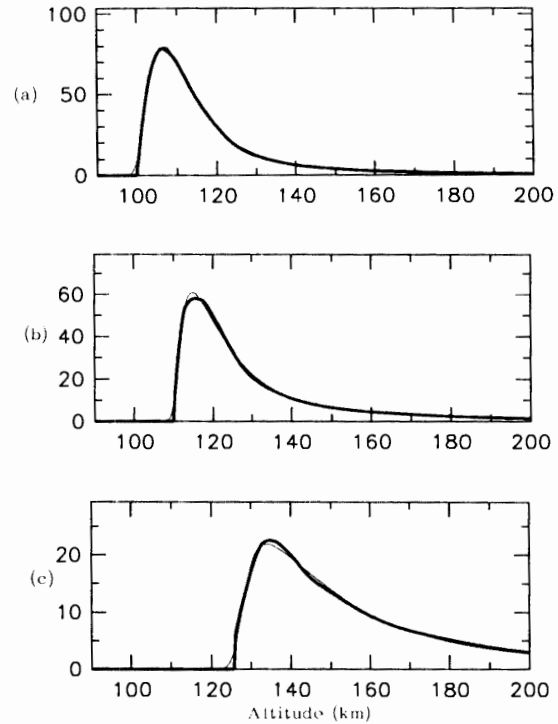


図 5 BANKS *et al.* (1974) の求めた発光分布 (太線) の expsq-chap 型関数 (細線) による近似. (a) 10 keV, (b) 5 keV, および (c) 2 keV.

Fig. 5. Approximation of profiles by BANKS *et al.* (1974) (thick line) by the expsq-chap-type function (thin line) for (a) 10 keV, (b) 5 keV, and (c) 2 keV monoenergetic electrons.

のうち、入射エネルギーが 10, 5, 2 keV の場合について、上述の expsq-chap 型関数で近似した例を示す。太線が BANKS らが求めた値で、細線が expsq-chap 型関数で近似した値である。おおむね良好な近似がなされていると言える。

また、expsq-chap 型の関数が実際に観測されたオーロラを精度良く近似できることを確かめるため、次節で、高度方向の発光分布を表す関数形としても最も自由度が高い準エルミート補間式を使用して発光形状の推定を行い、こうして求めた発光分布が expsq-chap 型関数で近似できることを示す。

4. 鉛直エピソード面におけるオーロラ形状の推定

ここでは、鉛直エピソード面において、オーロラの高度方向の発光分布を準エルミート補間式を使用して形状推定を行い、こうして求めた高度方向の発光分布が先ほど提示した expsq-chap 型関数によって近似できることを示す。エピソード面とは二つの観測点のカメラ中心と画像中の任意の一点で決まる平面であり、画像面との交線はエピソード線と呼ばれる。

図 6 はアイスランドで 1991 年 12 月 1 日 2234:33 に観測されたオーロラアークの画像対である。なおこの画像にはカメラキャリブレーションの結果および鉛直エピソード線が書き込まれている。カメラキャリブレーションの結果は天頂角、方位角ともに 10° ごとの線を記入しており、いずれの画像においても右側が磁北、左側が磁南を指している。鉛直エピソード

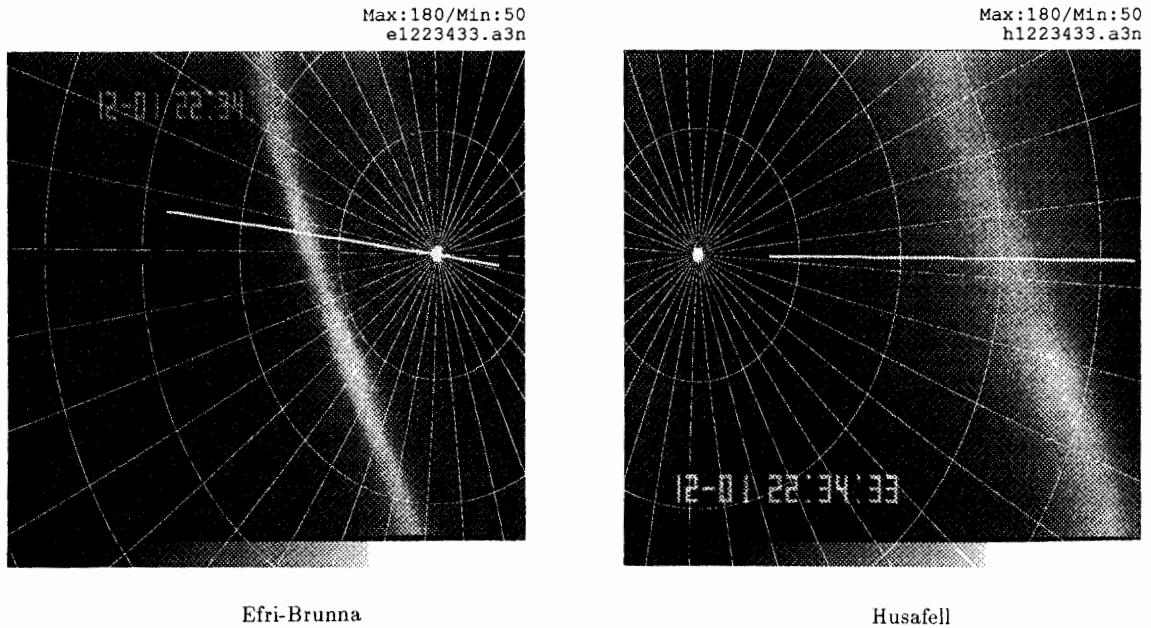


図 6 アイслランドで 1991 年 12 月 1 日 2234:33 に観測されたオーロラアーク
 Fig. 6. Auroral arc observed at 2234:33 on December 1, 1991 in Iceland.

線は画像中央付近の太い線である。

画像中に示された鉛直エピソード面内のオーロラの発光形状を求める。鉛直エピソード面内の水平方向の明るさを表す関数形として準エルミート補間式を使用し、節点は 5 km おきに設定する。高度方向の発光分布を与える関数形としても準エルミート補間式を使用し、節点は 90, 95, 100, 105, 110, 120, 140, 170, 200, 240, 300 km に設定する。以上二つの関数の積によって鉛直エピソード面内の発光分布を表す。こうして発光形状を推定した結果が図 7a, b である。

図 7a は鉛直エピソード面での発光強度分布を表した図で、縦軸が高度、横軸が地上での位置を表している。二つの観測点 Efri-Brunna と Husafell の位置は○印で書き込まれており、それぞれ E, H で表されている。オーロラの発光強度が等高線図で表されており、色が濃い所ほど明るいことを示している。等高線は最も明るい所を基準にして明るさが 80%, 60%, 40%, 20%, 5% となる所を示しており、一番外側の等高線は 5% の線である。原点を通る斜めの直線は観測点 Efri-Brunna に入射する磁力線を表している。図 7b は図 7a の格子の部分を立て的に表した図である。縦軸が高度、横軸が地上での位置、上向き軸が発光強度を表している。この観測画像の場合、オーロラの水平方向の厚みは約 8 km、高度方向の幅は約 25 km である。ただし、最も明るい点より明るさが $1/e \approx 0.368$ になる幅をオーロラの幅と定義する。

このときの高度方向の発光分布は図 8 の太線のようにになった。縦軸が発光強度、横軸が高度を表す。この関数形を `expsq-chap` 型関数で近似した結果が図 8 の細線である。

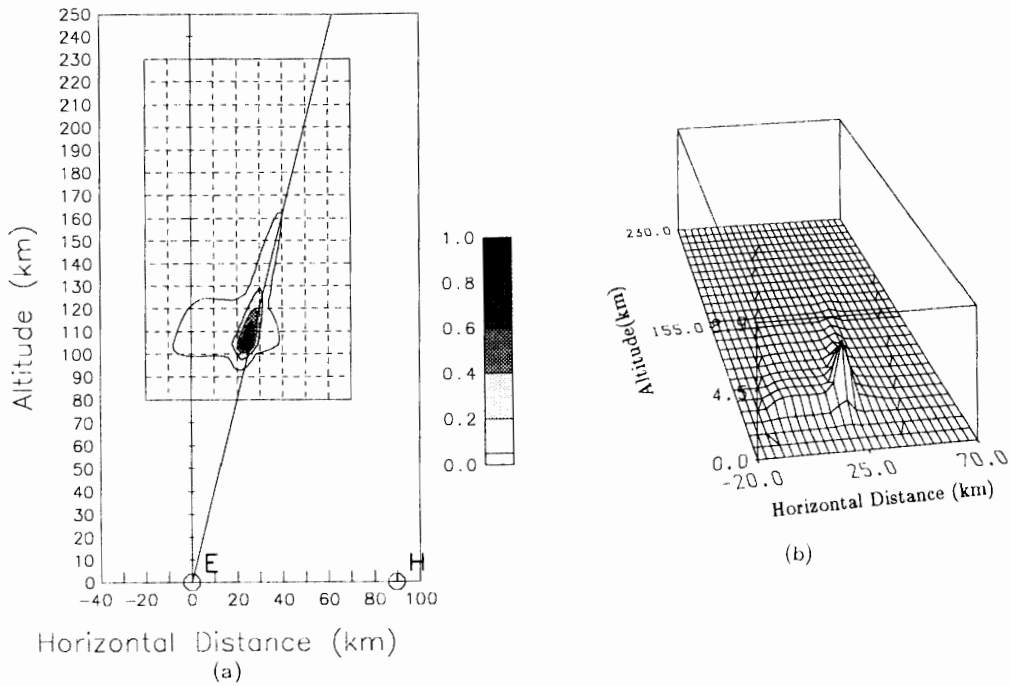


図 7 鉛直エピポーラ面における発光分布の推定. (a) 発光分布の等高線表示, (b) (a) の格子部分の立体表示
 Fig. 7. Retrieved emission profiles in the vertical epipolar plane. (a) Contour expression, (b) 3-D expression of lattice region of (a).

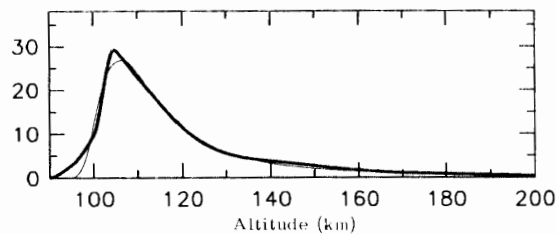


図 8 鉛直エピポーラ面において求めた発光分布 (太線) の expsq-chap 型関数 (細線) による近似
 Fig. 8. Approximation of emission profiles (thick line) in the vertical epipolar plane by expsq-chap-type functions (thin line).

その他数例についても同様の解析を行ったが、いずれの場合も高度方向の発光分布は、expsq-chap 型関数で精度良く近似できることがわかった。従って、次節以降における形状推定においては高度方向の発光分布を与える関数形として expsq-chap 型の関数を仮定して形状推定を行う。

5. 三次元空間におけるオーロラ形状の推定

5.1. オーロラアークの形状推定

ここでは、アイスランドで観測されたオーロラアークの解析例を二つ掲げる。

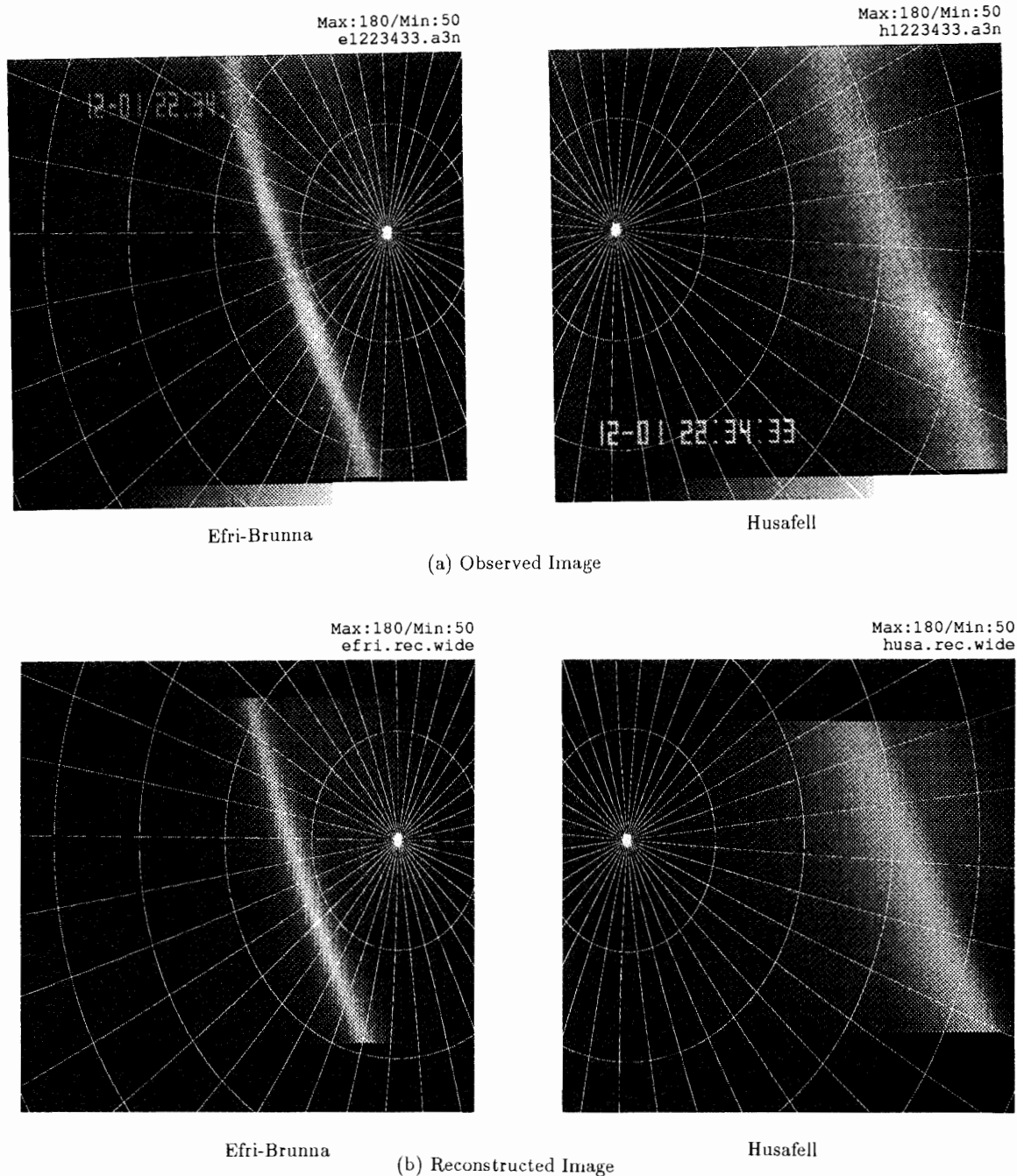


図 9 アイランドで 1991 年 12 月 1 日 2234:33 に観測されたオーロラアーク (図 6 と同じ) とその再構成画像

Fig. 9. Auroral arc observed at 2234:33 on December 1, 1991 in Iceland as in Fig. 6 and its reconstructed image.

図 9a は図 6a と同じステレオ画像対である。画像には Efri-Brunna の磁気天頂付近に出現している明るいアークとそれに付随する暗いアークの二つのオーロラが写っている。このオーロラを 3 節で述べた三次元のオーロラルミノシティモデルによって再構成する。明るいアークを表す L_{horizon} としては、中心線の位置を表す関数として 2 次の多項式、中心線に沿っ

ての明るさ変化を表す関数として節点数3の折れ線, 中心線から離れるに従っての減衰を表す関数として準エルミート多項式を使用する. 暗いアークを表す L_{horizon} としては中心線の位置を表す関数として2次の多項式, 中心線に沿っての明るさ変化を表す関数として節点数3の折れ線, 中心線から離れるに従っての減衰を表す関数としてボックスカー関数を使用する. いずれのオーロラも L_{altitude} としては `expsq-chap` 型関数を用いる. 以上のモデルによって再構成した画像が図9bであり, 再構成画像と観測画像の違いは小さい. この時のオーロラの三次元形状を表した図が図10a-dである.

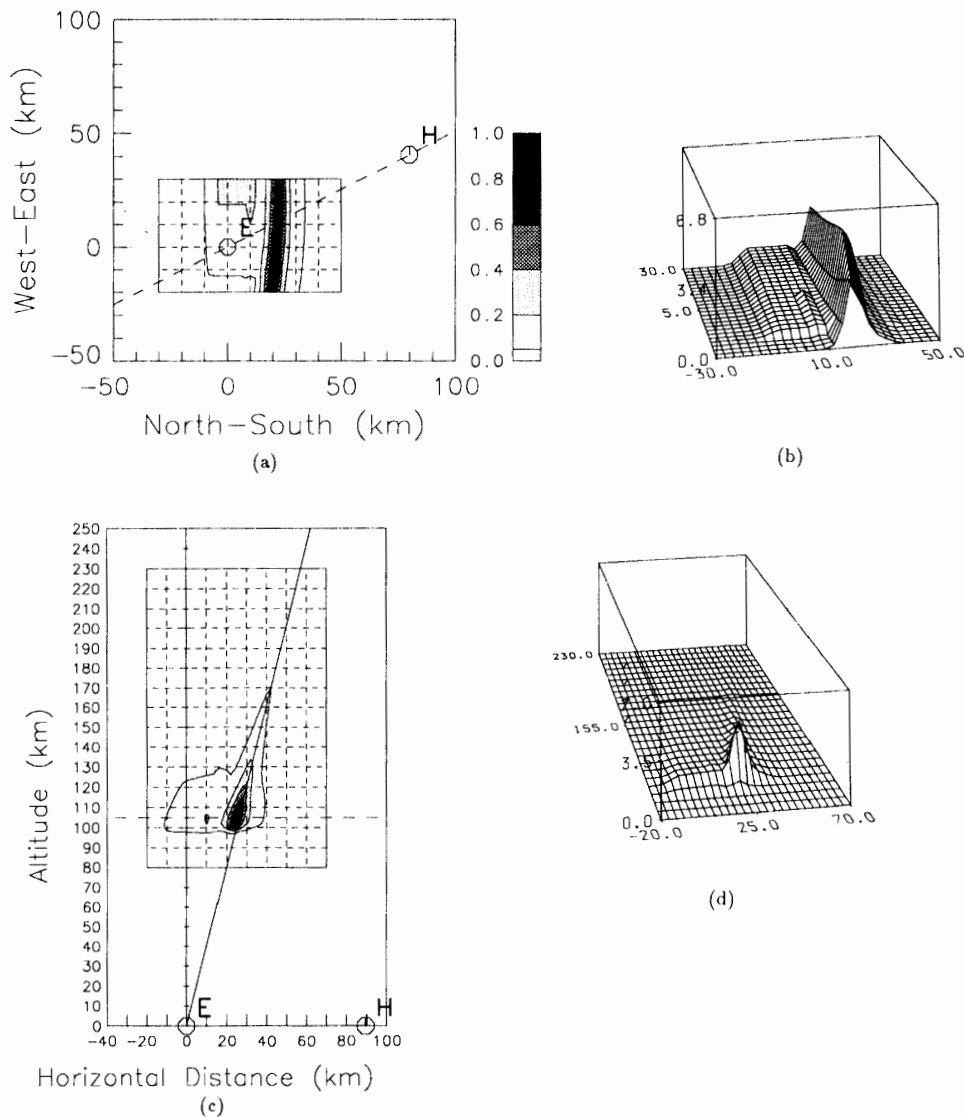


図 10 1991年12月1日2234:33に観測されたオーロラアークの三次元形状の復元. (a) 高度105 kmにおける発光分布, (b) (a)の格子部分の立体表示, (c) 鉛直面における発光分布, (d) (c)の格子部分の立体表示

Fig. 10. Retrieved three-dimensional structure of auroral arc at 2234:33 on December 1, 1991 in Iceland. (a) Luminosity distribution at 105 km, (b) three-dimensional expression of lattice region of (a), (c) vertical profile, (d) 3-D expression of lattice region of (c).

図 10a は高度 105 km (図 10c 中に点線で表された平面) におけるオーロラの発光強度を等高線で表した図である。縦軸が東西方向、横軸が南北方向を表している。二つの観測点 Efri-Brunna, Husafell はそれぞれ E, H で表されている。図 10b は図 10a の格子部分を立体的に表

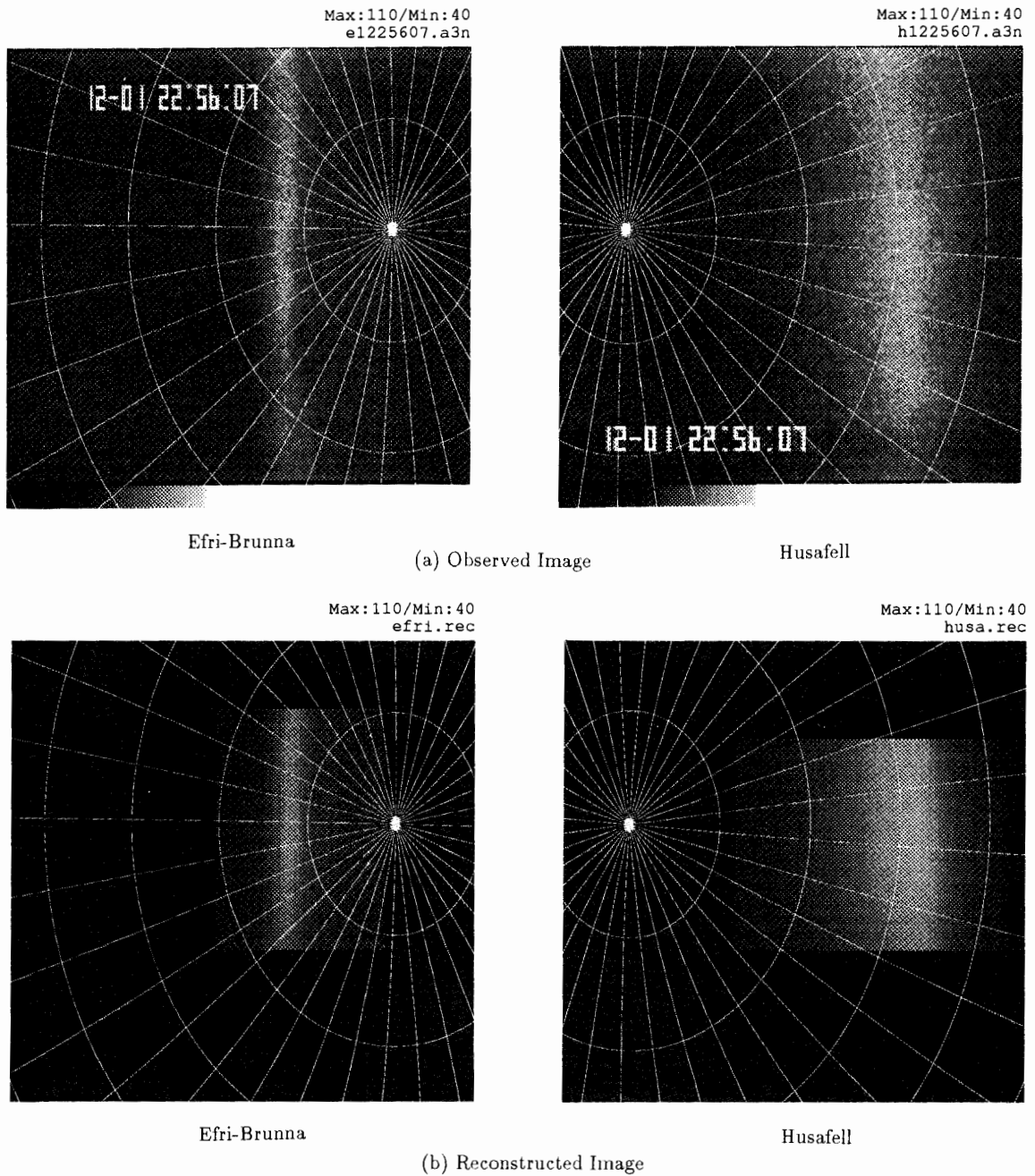


図 11 アイスランドで 1991 年 12 月 1 日 2256:07 に観測されたオーロラアークとその再構成画像

Fig. 11. Auroral arc observed at 2256:07 on December 1, 1991 in Iceland and its reconstructed image.

した図である。縦軸が東西方向、横軸が南北方向を表しており、上向き軸が明るさを表している。図 10c は図 10a 中に点線で示された鉛直面 (Efri-Brunna と Husafell を通る鉛直面) でのオーロラの発光強度を等高線で表した図である。縦軸が高度、横軸が地上での位置を表している。図 10d は図 10c の格子部分を立体的に表した図である。図から分かるように、明るいアークが地理東西方向に伸びており、それに付随する薄く水平方向に広がったアークが Efri-Brunna の東方より東に向けて伸びている。明るいアークの高度方向の幅は約 25 km、水平方向の厚みは約 8 km である。

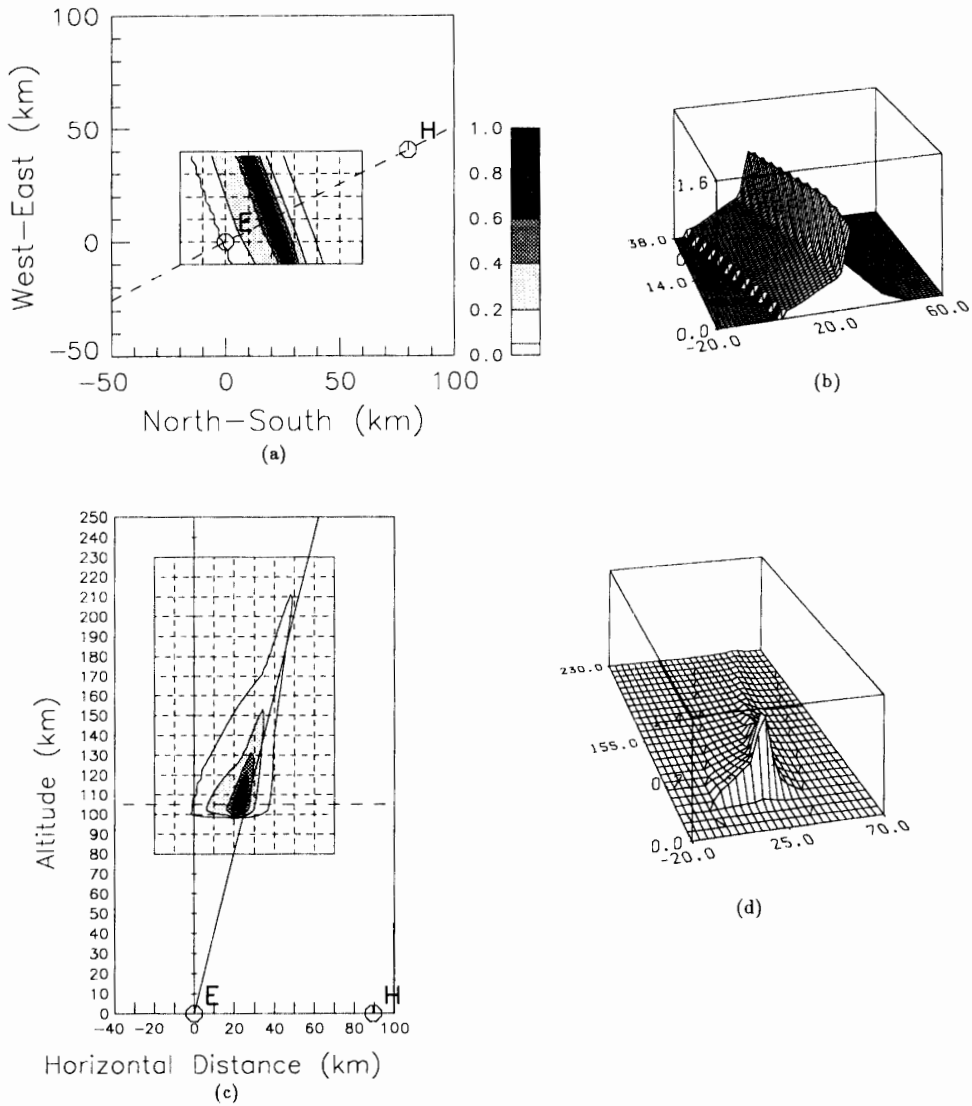


図 12 1991 年 12 月 1 日 2256:07 に観測されたオーロラアークの三次元形状の復元。詳細は図 10 に同じ。

Fig. 12. Retrieved three-dimensional structure of auroral arc at 2256:07 on December 1, 1991 in Iceland. Details are as in Fig. 10.

別の解析例を示す。図 11a は 1991 年 12 月 1 日 2256:07 に観測された画像対である。強いオーロラアークが画像中央に 1 本見える。ここで使用したモデルは、 L_{horizon} については、中心線の位置は 2 次の多項式、中心線に沿っての明るさ変化は節点数 3 の折れ線、中心線から離れるに従っての減衰を表す関数は準エルミート補間式を用い、 L_{altitude} については `expsqchap` 型関数を用いた。

再構成画像を図 11b, このときのオーロラの三次元形状を表した図を図 12a-d に示す。図から分かるように明るいアークが東北東より西南西にかけて伸びており、アークの高度方向の幅は約 35 km, 水平方向の厚みは約 15 km である。

5.2. パルセーティングオーロラの形状推定

ここでは、第 26 次観測隊により南極の昭和基地とレブスネス島北方の仮設観測点でステ

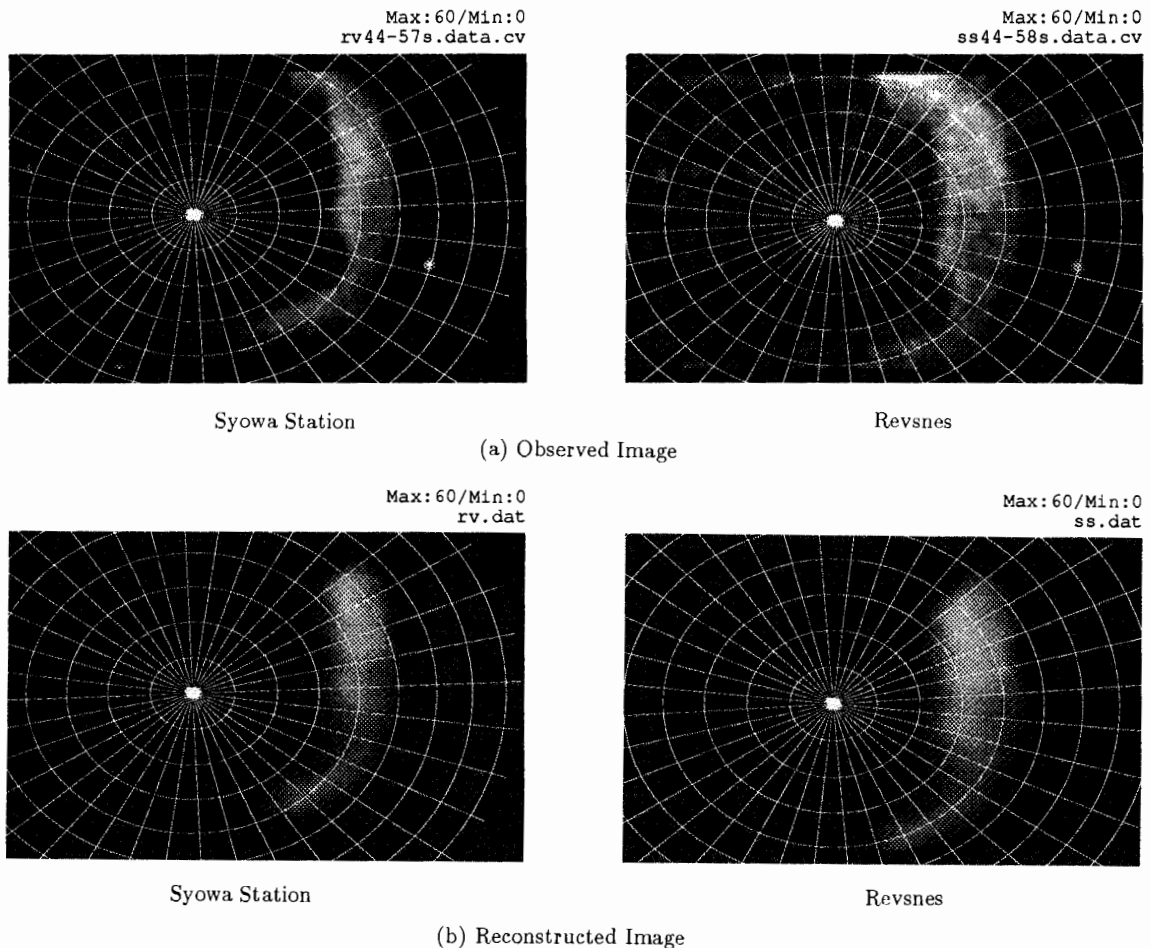


図 13 南極で 1985 年 8 月 17 日 2344:58 に観測されたパルセーティングオーロラとその再構成画像

Fig. 13. Pulsating aurora observed at 2344:58 on August 17, 1985 in Antarctica and its reconstructed image.

レオ観測されたパルセーティングオーロラ画像の解析例を2例掲げる。パルセーティングオーロラの形状推定においては L_{horizon} として二次元の準エルミート補間式, L_{altitude} として *expsq-chap* 型の関数を用いる。

また、以下で示す観測画像は、パルセーティングオーロラが明るいフェーズの画像より暗いフェーズの画像を引き算してパルセーティングオーロラの寄与する部分のみを取り出し、さらにノイズ除去のためのフィルターをかけるという前処理を施した後のものである。

南極での観測はアイスランドとは異なり観測点間の距離が約 30 km と短いのに対してパルセーティングオーロラの水平方向の広がり方が約 30 km–60 km と広いため、いずれの解析例においてもパルセーティングオーロラの高さ方向の幅を一意に決定することが出来なかった。従って、ここでは高さ方向の幅を仮定した時の解を示す。

図 13a は 1985 年 8 月 17 日 2344:58 に観測されたパルセーティングオーロラの観測画像に前処理を施したものである。上述のようにオーロラの高さ方向の幅を一意に決定することが

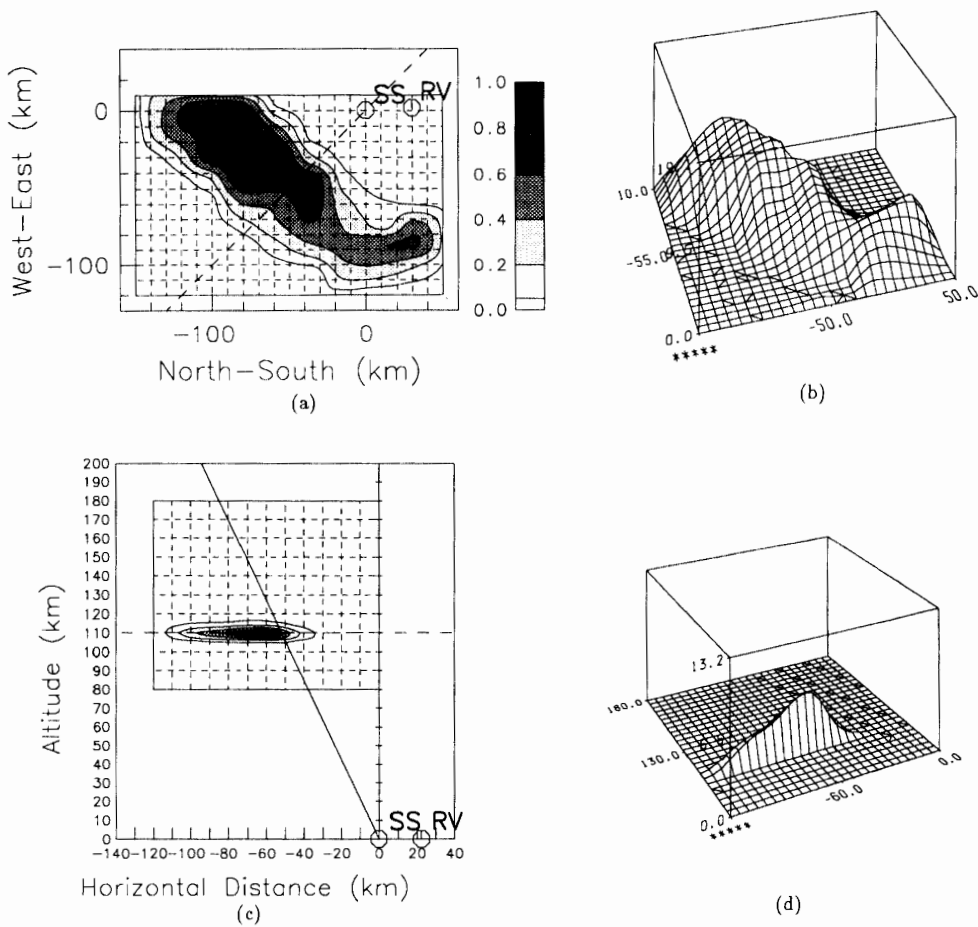


図 14 1985 年 8 月 17 日 2344:58 に観測されたパルセーティングオーロラの三次元形状の復元。詳細は図 10 に同じ。

Fig. 14. Retrieved three-dimensional structure of pulsating aurora at 2344:58 on August 17, 1985 in Antarctica. Details are as in Fig. 10.

できないため STENBAEK-NIELSEN and HALLINAN (1979) の報告を参考にして、高度方向の幅を 5 km (薄い値) と仮定した場合の解析結果を示す。

再構成画像が図 13b であり、この時のオーロラの三次元形状を表したのが図 14a-d である。図中に示されている SS は昭和基地、RV はレブスネス島北方の仮設観測点を表している。図 14 から分かるように昭和基地の北方約 90 km の地点から昭和基地の西方約 90 km の地点にかけてパルセーティングオーロラが広がっている。

また、高度方向の幅を 1 km-30 km の間のいずれの値に仮定しても同様の再構成画像が得られ、水平方向の発光分布を表す L_{horizon} もほぼ同様の形を示した。

別のパルセーティングオーロラの解析例を示す。図 15a は 1985 年 8 月 17 日 2348:42 に観測された画像に前処理を施したものである。この場合も、高度方向の幅は一意に求まらない

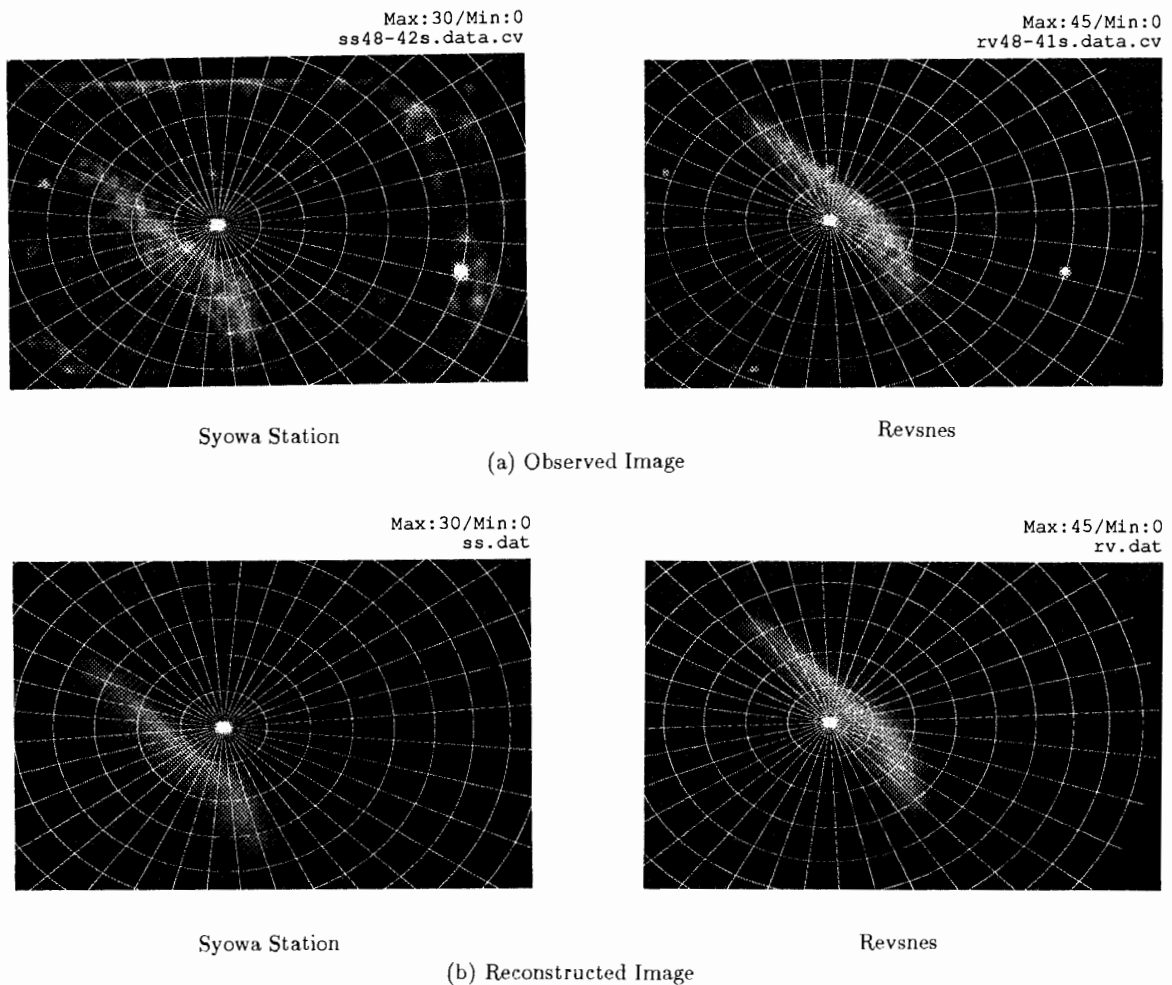


図 15 南極で 1985 年 8 月 17 日 2348:42 に観測されたパルセーティングオーロラとその再構成画像

Fig. 15. Pulsating aurora observed at 2348:42 on August 17, 1985 in Antarctica and its reconstructed image.

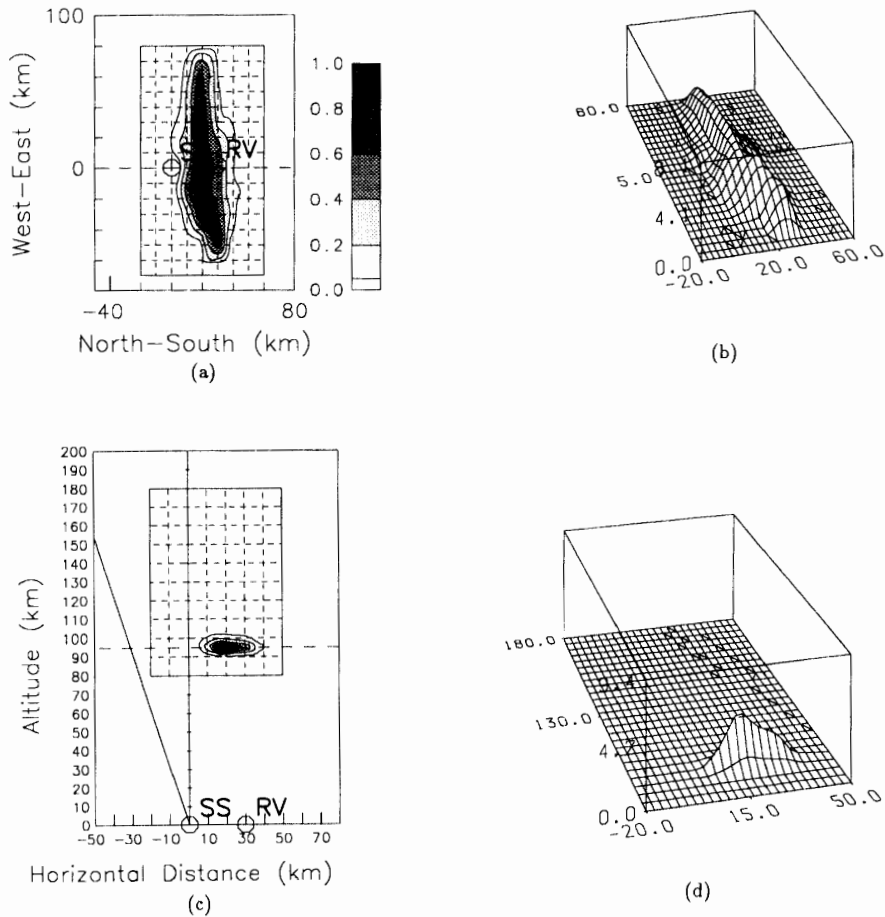


図 16 1985年8月17日2348:42に観測されたパルセーティングオーロラの三次元形状の復元。詳細は図10に同じ。

Fig. 16. Retrieved three-dimensional structure of pulsating aurora at 2348:42 on August 17, 1985 in Antarctica. Details are as in Fig. 10.

ため、高度方向の幅を 5 km と仮定した場合の解析結果を示す。

再構成画像が図 15b であり、このときのオーロラの三次元形状を表したのが図 16a-d である。昭和基地とレブスネスの間にパルセーティングオーロラが地理東西方向に広がっていることが分かる。

この場合も高度方向の幅を 1 km-30 km の間のいずれの値に仮定しても同様の再構成画像が得られ、 L_{horizon} は高度方向の幅によらないでほぼ同じ形状をとった。

今回解析の対象としたパルセーティングオーロラ画像については、いずれの場合も高度方向の幅を一意に決定することが出来なかった。パルセーティングオーロラの高度方向の幅が一意に決定できるか否かは、観測点の数、配置、パルセーティングオーロラの水平方向の広がり、パルセーティングオーロラと観測点の位置関係など様々な要因によって決定されるので、一概には言えないが、一般的には観測点間隔を十分にとった多点観測、衛星との同時観測などにより解析結果の一意性を高めることが出来る。

6. 結 論

本論文ではオーロラの形状推定の方法として *Aso et al. (1990)* が提案したモデル関数法を踏襲し、その上でより複雑な形状を表すことが出来るように改良したモデル関数の構成法について述べた。本論文で提案したモデル関数は、空間におけるオーロラの明るさをオーロラを磁力線に沿って水平面に投影した時の明るさ分布を与える二次元の関数と磁力線に沿っての高度方向の明るさ分布を与える関数の積によって表すものであり、オーロラ形状に関する知識をうまく織り込んだ有力なモデルである。そして、そのモデルを用いてオーロラアークについては曲がりを含めた三次元的な形状を求め、パルセーティングオーロラについては、高度方向の幅を仮定すれば水平方向の発光分布が求まることを示した。また、*expsq-chap* 型関数はオーロラの高度方向の発光分布を精度良く表す関数であることを示した。

次に、あらためて本研究の目指すところについて付言する。本研究によって求められたオーロラの発光形状はオーロラに関する様々な物理過程を推定する手がかりとなりうる。すなわち、本研究により推定されたオーロラの高度方向の発光プロファイルより入射粒子のエネルギー分布を求めることが出来る。また、オーロラアークのカーテンの厚さは入射粒子の加速機構にかかわり、空間的に複雑なオーロラの構造とその時間変化はアーク状オーロラとディフューズオーロラの成因とダイナミクスの研究に貴重な知見を与えることが期待される。

最後に、今後の課題について述べる。二つの観測点でのオーロラ画像よりその形状を推定するという逆問題においては、画像に含まれている情報だけからオーロラの形状を一意に推定することは、一般に困難である。そこで、あらかじめ分かっている知識を導入して解に制約を加えることが必要になる。本論文では制約を加える方法としてオーロラの形状があらかじめ仮定した関数形で記述されるというモデル関数法を用いた。本論文で示したモデルを使用すれば、ある程度の複雑な形状を持ったオーロラを表現することが可能であるが、より一層複雑なオーロラを表すにはさらに複雑なモデルを考案し、その時の収束計算の収束性の向上をはかる手法を開発することが必要である。

また、モデル関数法は強力な制約を入れる手法であるが、その制約があまりにも強いため、表現可能なオーロラの種類が狭いという欠点がある。そこで、モデル関数では表しきれない複雑な形状を持つオーロラに対しては、空間をセル分割し、正則化の手法を採り入れて、形状推定を行っていくことが考えられる。今後はこのような別の解析手法によるアプローチも模索してゆく必要がある。

謝 辞

本解析には南極及びアイスランドにおけるステレオ観測画像が用いられた。これらの貴重

なデータの取得にご尽力いただいた国立極地研究所の山岸久雄、小野高幸、宮岡宏各先生に深甚なる謝意を表す。

文 献

- ASO, T., HASHIMOTO, T., ABE, M., ONO, T. and EJIRI, M. (1990): On the analysis of aurora stereo observations. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 579–595.
- 麻生武彦・橋本 岳・薮 哲郎・安陪 稔・山岸久雄・江尻全機 (1991): オーロラ立体観測画像の解析手法について III. 第14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要旨. 東京, 国立極地研究所, 7.
- ASO, T., EJIRI, M., MIYAOKA, H., ONO, T., HASHIMOTO, T., YABU, T. and ABE, M. (1993): Aurora stereo observation in Iceland. *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, **6**, 1–14.
- 麻生武彦・薮 哲郎・橋本 岳・安陪 稔・小野高幸・宮岡 宏・江尻全機 (1993): アイスランド・オーロラステレオ観測と画像のトモグラフィー解析. *信学論 DII* (印刷中).
- BANKS, P. M., CHAPPELL, C. R. and NAGY, A. F. (1974): 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.
- ROMICK, G. J. and BELON, A. E. (1967): The spatial variation of auroral luminosity-II. *Planet. Space Sci.*, **15**, 1695–1716.
- STENBAEK-NIELSEN, H. C. and HALLINAN, T. J. (1979): Pulsating auroras: Evidence for noncollisional thermalization of precipitating electrons. *J. Geophys. Res.*, **84**, 3257–3271.

(1993年8月23日受付; 1993年9月20日改訂稿受理)