

宇宙科学研究所報告

第125号

統計的推測手法を用いた
惑星雲移動ベクトルの誤差評価法

村地 哲徳*・今村 剛**・樋口 知之***

2003年9月

宇宙科学研究所

この報告書は宇宙科学研究所が、研究成果を公表するために発行する不定期継続刊行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記にご連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

統計的推測手法を用いた惑星雲移動ベクトルの誤差評価法

村地 哲徳*・今村 剛**・樋口 知之***

Error Evaluation of Planetary Atmospheric Motion Vectors

by Statistical Presumption Technique

By

T. Murachi*, T. Imamura**, T. Higuchi***

Abstract: The purpose of this study is to establish the error evaluation of Atmospheric Motion Vectors (AMVs) which reflects influence of the image spatial resolution and the change of cloud shape that are the essential primary factor of AMVs' error. In past meteorological researches AMVs' error is defined as the standard deviation of neighboring AMVs. In this definition, however, the AMVs' error is larger than the target physical phenomenon. In this study, by statistical presumption technique, which presumes the detail information from the limited information, we evaluate the AMVs' error which reflects influence of the image spatial resolution and the change of cloud shape. In order to verify this method, we make simple and fractal cloud patterns, and calculate the AMVs and the error estimated by statistical presumption technique. In addition, using Venus' cloud images we calculate the AMVs and the error evaluated by statistical presumption technique and the error by past error evaluation. The result is that the error by statistical presumption technique is as small as a quarter of the error by past error evaluation. In this study, by statistical presumption technique the error evaluation of AMVs that reflects influence of the image spatial resolution and the change of cloud shape is established.

概 要

本研究の目的は、雲移動ベクトルを見積もる作業で誤差の本質的要因となる雲の形の変化や空間分解能の影響を見積もることである。過去の研究では雲移動ベクトルの誤差は周囲のベクトルとの比較から求めていたため、解析対象とする物理現象の空間的・時間的スケールが誤差に含まれて物理現象より誤差が大きくなっていた。本研究では、統計モデルを作ることで限られた情報からより詳細な情報を統計的に推測する手法を用いて、雲の形の変化や空間分解能の

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

** 宇宙科学研究所

*** 統計数理研究所

影響を評価する方法を考えた。この方法をテストパターンを使った計算に適用して誤差評価の適切さを調査した。また、金星の雲画像にも適用して過去の誤差評価方法によって見積もられた値よりも4分の1程度小さい値が得られ、解析対象とする物理現象の大きさを誤差が下回ることができた。この誤差評価方法は雲惑星の気象を詳細に理解する上で重要な方法である。

第1章 序 論

惑星の大気運動を可視化する方法の一つに、探査機や望遠鏡によって撮られた雲画像データを用いる方法がある。この方法では時間差がある雲画像データを比較し、個々の雲を相関係数を用いて同定し雲の移動ベクトルを求める（相互相関法と呼ばれている）[1]，[2]，[3]，[4]。この時、雲の変化や解像度の制限・雲の同定ミスなどによって雲移動ベクトルの精度は悪化する。

地球の場合では、同じ場所・高度・時間におけるラジオゾンデの観測（風速の実測値）と比較して雲移動ベクトルの誤差評価を行っている[1]。この場合、相互相関法で求めた雲移動ベクトル（広い範囲の時間平均）とラジオゾンデの風速のデータ（狭い範囲の一瞬の値）とを比較すると $\sim 10\text{m/s}$ 程度の違い（実用上、ラジオゾンデの観測誤差： $\sim 3\text{m/s}$ 程度は許容できる）が存在する。しかし、数100km程度の範囲に含まれる数ヶ月間のデータ（100 \sim 1000程度）を平均した結果は、 $\sim 1\text{m/s}$ 程度の違いで良く一致している。

惑星の場合では、ラジオゾンデなどのin-situ観測によって、風速のデータを広い範囲に渡って長期間、同時観測することが非常に困難なので、地球で用いられている方法を使うことはできない。従って、より精度の良いものとの比較はできず、求めた雲移動ベクトル自体の精度を評価する方法が必要となる。

過去に惑星雲画像を用いて雲移動ベクトルを算出して地球以外の惑星の気象研究を行った例[2]，[3]，[4]では、雲移動ベクトルの誤差は周囲（例えば過去の金星気象研究では $\sim 1000 \times 1000\text{km}$ ）に存在する雲移動ベクトルの標準偏差としていた。

しかし、この方法では標準偏差を求めた領域内に存在する風速の変化が誤差に含まれるため、誤差が解析対象とする物理現象の空間的・時間的スケールよりも大きくなることが予想される。実際、過去の地球以外の惑星の気象研究では物理現象の大きさと誤差が同程度になると言うことがあった。金星の場合に限ると、解析対象の風速分布の振幅が $\sim 10\text{m/s}$ と予測されているので、要求精度が $\sim 1\text{m/s}$ であるが、実際に標準偏差から求めた誤差が $\sim 10\text{m/s}$ であった。

この問題点を解決して雲移動ベクトルの精度を正しく評価することができれば、雲移動ベクトル・データの正しい理解につながり、雲惑星の気象メカニズムについて正しく解釈することが可能になる。

我々は、相互相関法で想定すべき雲移動ベクトルの誤差は、雲の形の変化や空間分解能に限られるべきと考えた。本研究の目的は、雲の形の変化や空間分解能の影響による雲移動ベクトルの誤差を見積もることである。本論文では、統計モデルを作ることで、限られたデータからより詳細な情報を統計的に推測する手法（データの分布が正規分布するというような仮定を使う、統計的推測手法と呼ばれる）を導入した誤差評価方法を提案する。

次章以降では、統計的推測手法を用いた誤差評価方法について説明する。また、雲の移動や変化を模擬したテストパターンを用いて誤差の適切さを評価し、さらに金星の雲画像を用いて従来の方法と統計的推測手法を用いて計算を行い、求めた誤差の比較結果と観測限界（雲の形の変化や空間分解能）に起因する必然的な誤差以外をこの手法で取り除けているかについての調査を報告する。

第2章 統計的推測手法を用いた誤差評価方法

この章では雲移動ベクトルの誤差の原因を検討してその影響が反映されている相関曲面から統計的推測手法を

用いて誤差を評価する方法を提案する。

2.1. 雲移動ベクトルの誤差の原因

求めた雲移動ベクトル自体の精度を評価する方法を考える。

まず、雲移動ベクトル算出時に誤差の原因となるものを挙げると以下の3つが挙げられる。(同定ミスによる精度の悪化は除去可能と考えられるので除く)

- ・機械的誤差 (光学系の収差, データの欠損, ノイズ (電気系統, 迷光, 観測器自体の赤外放射))
- ・解析的誤差 (空間分解能, 画像の位置を合わせる際の誤差)
- ・対象に起因する誤差 (雲の変化・輪郭が不明瞭なことによる誤差)

この中で、「光学系の収差」・「データの欠損」・「ノイズ (電気系統, 迷光, 観測器自体の赤外放射)」は理想的な光学系や通信系などが得られるものとして今回は無視する。(実際は、データ欠損のある部分は処理時に除かれるし、ノイズや収差の影響は位置決定精度による誤差より小さくなるように光学系は設計される)

「位置決定精度による誤差」・「画像の位置を合わせる際の誤差」は画像の解像度に依存するもので誤差を見積もることができる。過去の探査機の場合 (1pixelの大きさ: ~30km, 撮像時間間隔: 4時間), 「位置決定精度による誤差」は2~4m/s程度, 「画像の位置を合わせる際の誤差」は1~2m/s程度と見積もられている [5].

「雲の変化・輪郭が不明瞭なことによる誤差」は最も大きく~10m/s程度と見積もられている。しかし、この誤差を適切に評価する方法は確立されていないので~10m/sという値は適切な値ではない。つまり、この誤差を評価する方法がないため、前章で述べた問題点があるにもかかわらず近傍領域の雲移動ベクトルの標準偏差を取って誤差としていたのである。従って、「雲の変化・輪郭が不明瞭なことによる誤差」を評価する方法を考える。

2.2. 雲の変化と相関曲面の関係

雲の変化・輪郭が不明瞭なことによる影響は雲移動ベクトル算出時に、2枚の画像の重ね合わせる位置をずらし、相関係数を求めることで得られる「相関曲面 (図1参照)」に現れる。この曲面のピーク (複数ある場合は最大値) が雲移動点となり、X・Y方向の移動距離から雲移動ベクトルを求める。

ここで相関曲面には以下の2つの性質がある。(雲移動ベクトル算出には積率相関係数が用いられている。)

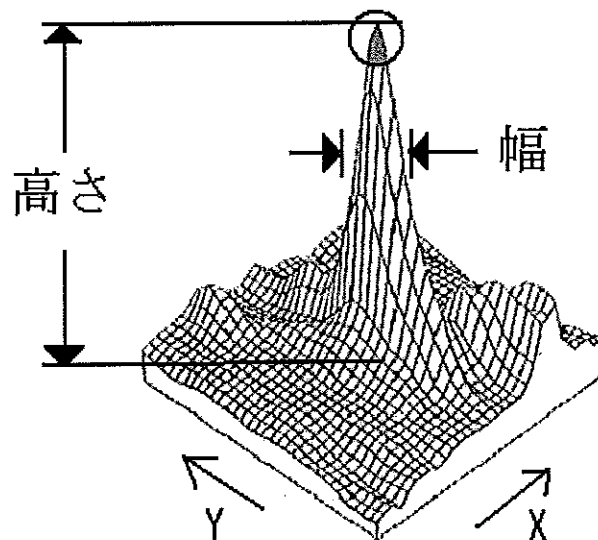


図1 相関曲面. ピークの高さと幅は雲の変化の度合いを反映している

1. ピーク値の低下は同定精度の低下を反映している（同定精度そのものを表しているわけではない）
2. 幅は位置の誤差を反映している（位置の誤差そのものを表しているわけではない）

ピーク値の低下も幅も、空間分解能の制限や雲の形の変化によって発生する。従って、相関曲面を用いて「雲の変化・輪郭が不明瞭なことによる誤差」を評価する方法を考えることにする。

ここで、相関係数の値というのは確実なものではなく、データ量の制限（空間分解能など）から発生する誤差を持つものである。ピークの値は誤差の範囲で変動しうるので、相関曲面のピーク（雲移動点）の周りには変動次第で雲移動点になる領域が存在する。従って、データ量の制限による相関曲面の変動を見積もることができれば相関曲面のピークの周囲で雲移動点となる確率の高い領域（この領域の大きさは、空間分解能の制限や雲の変化・輪郭が不明瞭なことによる影響を反映）を評価して誤差範囲とすることができる。

2.3. 統計的推測手法による相関係数の誤差評価法

統計学によると、母集団から標本を取り出してくる時に標本として母集団の一部しか得ることができないため、標本には必ず標本誤差と呼ばれるものが付随する。標本誤差は位置決定精度などの不確定要素に依存している。標本誤差が母集団同士で求めた母相関係数と標本同士で求めた相関係数との間に違いをもたらす相関係数の誤差が発生する（図2参照）。

時刻が異なる衛星雲画像を用いて相関係数を計算した場合は、母集団の一部分である標本同士で相関係数を求めているので、相関係数には標本誤差の影響による誤差があると言える。

従って、母相関係数と相関係数の誤差を評価すれば標本誤差（不確定要素に依存）による相関曲面の変化が評価でき、相関曲面のピークの周りで雲移動点となる確率の高い領域を評価して誤差とすることができる。

しかし、相関係数の誤差は母集団が解からないと正確に見積もることはできない。惑星の雲画像では母集団を得ることは非常に困難なので相関係数の誤差を正確に見積もることはできない。しかし、このような場合のために統計学では統計モデルを作り相関係数の誤差に近い値を得る手法が考え出されている。今回はこの手法を導入して相関係数の誤差を評価する。

統計モデルを作り相関係数の誤差を見積もる統計的推測手法にはさまざまな方法がある。今回はその中でも最も古い方法（フィッシャーの方法 [6]）と比較的新しくコンピュータでの計算に適している方法（ブートストラップ法 [7]）を導入し、相関係数の誤差を見積もり雲移動ベクトルの誤差を評価する。

それぞれの方法の概要は以下のようにになっている。

・フィッシャーの方法

母集団と標本のデータの存在度数分布（雲画像の場合は、雲の輝度やアルベドの強弱の度数分布）が正規分布すると仮定して標本から母集団を推定して相関係数の誤差を求める方法。

・ブートストラップ法

母集団から標本を選び出す過程を擬似的に作り出し多数の標本を生成し、相関係数をそれぞれについて求め分布を調べて相関係数の誤差を求める方法。つまり、標本誤差の影響によってできる画像を擬似的に作り出す方法である（図3参照）。

フィッシャーの方法は標本と母集団のデータ（雲画像の場合は、雲の輝度やアルベドの強弱）の存在度数分布が正規分布に従う場合しか計算できないが積率相関係数も同じ場合にしか計算できない。雲移動ベクトルの計算に積率相関係数を用いる限りフィッシャーの方法は常に使うことができる。また、ブートストラップ法は標本の分布を元にして母集団を推定するので正規分布という仮定を用いない。ブートストラップ法は積率相関以外の相関係数にも用いることができる。

今回、相関係数の誤差を評価するのにこの二つの方法を用いた。二つの方法を用いた目的は統計的推測手法によって誤差が影響を受けるか調べるためである。

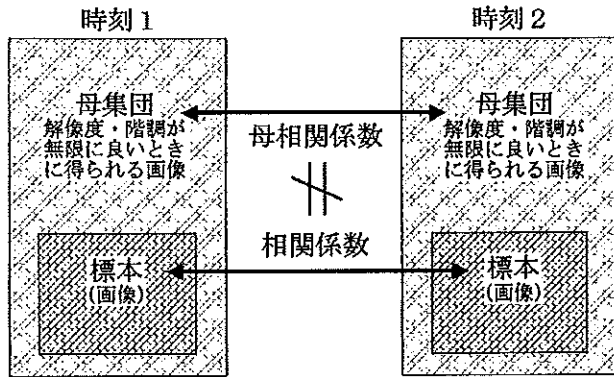


図2 標本から計算される相関係数は標本抽出に伴う誤差の影響で母集団同士から計算される母相関係数とは異なる

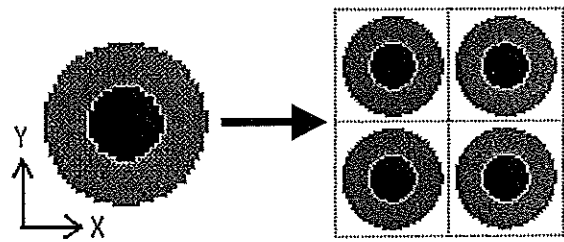


図3 ブートストラップ法を実際に行った例。左の画像から右の画像を生成する。これらはそれぞれ微妙に異なっている。これらの微妙に異なる画像は短い時間に大量の撮像を行った時（雲の変化が無視できる時間スケール）に撮れる画像を模擬している（解像度・階調の影響を反映）

2.4. 相関係数の誤差から雲移動ベクトルの誤差へ変換

2.3. 章で説明したフィッシャーの方法とブートストラップ法で相関係数の誤差が見積もられるが、この誤差を雲移動ベクトルの誤差に変換する必要がある。これについては以下のように考えた。

相関曲面のピークの点について相関係数の誤差を評価する。このときピークは誤差範囲の最小値まで低くなる可能性があり、その場合、相関曲面がピークの誤差範囲の最小値より上の領域は雲移動点の候補となる。従って、この領域は雲移動ベクトルの誤差範囲と言えるので、ピークの誤差範囲の最小値での相関曲面の幅を取って雲移動ベクトルの誤差とする（図4参照）。相関曲面のピークの値とピークの幅は雲の形（変化・輪郭の不明瞭さ）の影響を反映しているので、この方法で雲の形の影響と標本誤差の影響を含んだ誤差が求まる。

この方法では、雲の形の影響と標本誤差の影響が混ざった誤差が求められるが、サンプリングによる誤差（標本誤差）と雲の変化による誤差は解像度が落ちた画像になると区別出来ない（図5参照）（標本誤差は高々 1pixel 分程度だが、雲の形による誤差に上限は存在しないので、雲の形が大々的に変化する場合、この方法で求められる誤差は雲の形の影響と言える。しかし、雲の形が大々的に変化する場合雲の追跡が行えないので想定外である。今回想定しているのは、雲の形の影響と標本誤差がほぼ同じ場合である）。標本誤差と雲の変化による誤差は密接に絡み合っていて分離することは出来ない。従って、この方法で標本誤差と雲の変化による誤差を同時に

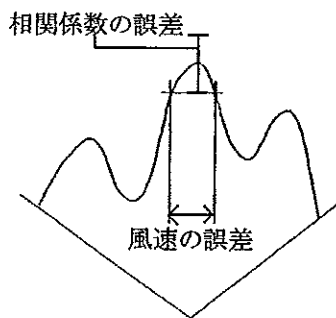


図4 相関係数の誤差から風速の誤差への変換方法の概要図

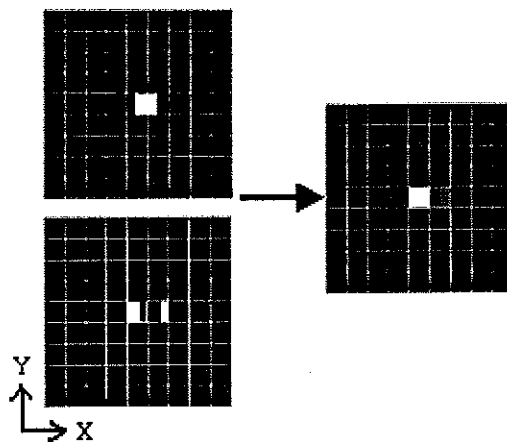


図5 撮像後に区別が付きなくなるテストパターン。右上の図はサンプリングによるずれ（標本誤差）の結果ともパターンが 1pixel 以下の移動をした結果とも言える

見積もることに妥当性はある。

2.5. 簡単な計算例

前章で考えた統計的推測手法を用いた誤差評価方法が誤差の過大評価などを取り除けているか、テストパターンを作って試してみた。図6のように7×7pixelの四角を32pixelごとに並べた画像と、これを1.1倍した画像とで移動ベクトルを計算した。計算時には7×7pixelの四角の中心をTemplate・Search Areaの中心として、それぞれ16×16pixel・32×32pixelの領域を切り出してパターンマッチングを行った。

移動ベクトルの計算結果は図6の右の図のようになった。この結果を使って従来の近傍領域に存在する雲移動ベクトルの標準偏差を取って誤差とする方法と統計的推測手法を用いた誤差評価方法とを比較してみる。標準偏差を取る方法では誤差を評価するベクトルと上下左右と斜め方向に隣接する9つのベクトルのX・Y成分それぞれの標準偏差を求めてこの平均を誤差とした。統計的推測手法を用いた誤差評価方法は一つ一つのベクトルについて誤差を評価することができ、また、解像度が許す限りあらゆる方向について独立な誤差が計算できる。今回は上下左右の4方向について誤差を評価し平均して誤差とした。ブートストラップ法は1万回繰り返して誤差を求めた。

白で囲った四角同士の距離の比を誤差を含めて計算すると以下のようになった。

従来の方法（標準偏差）： 1.094 ± 0.120

統計的推測手法を用いた誤差評価方法

： 1.094 ± 0.017（ブートストラップ法）

： 1.094 ± 0.013（フィッシャーの方法）

従来の方法では誤差範囲の下限が1.0以下となるのでこの結果からでは膨張か収縮か解からない。つまりこの場合、解析対象の物理現象（膨張）と誤差が同じ程度になってしまったのである。その点、統計的推測手法を用いた誤差評価方法では誤差範囲の下限値は1.0以上なので画像が膨張したことがはっきり解かる。

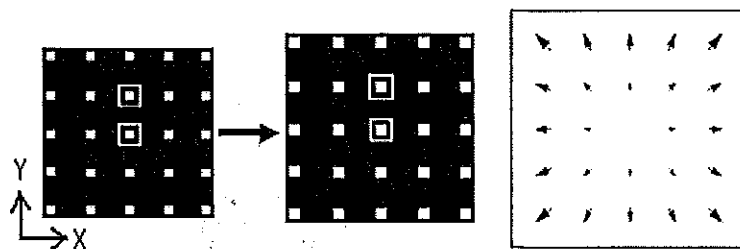


図6 計算に用いたパターン（左・中央）と雲移動ベクトルの計算結果（右）

2.6. 統計的推測手法を用いた誤差評価方法のまとめ

従来の研究で用いられてきた誤差評価方法（近傍領域に存在する雲移動ベクトルの標準偏差を取る方法）では、「風速の空間・時間変動が誤差に含まれ誤差を過大評価している」という問題点が存在したが、統計的推測手法を用いた誤差評価方法（「雲の形」と「標本誤差」の影響による誤差を評価する方法）により、

- ・ 誤差の過大評価がなくなり誤差推定の精度が向上する
- ・ 孤立した雲移動ベクトルについても誤差を評価できる

従来の標準偏差を取る方法では周囲に雲移動ベクトルが存在しないと誤差を評価できなかった

- ・ 解像度が許す限りあらゆる方向について独立な誤差が計算できる

雲がある方向に膨張している場合、相関曲面はその方向に裾が広がる。今回の方法ではこの膨張を

検出することができる

ということが実現した。

しかし、前章の計算例だけでは誤差の過大評価が全ての場合についてなくなるとは言いきれない。また、誤差を過小評価している可能性もある。他にも雲の変化による誤差を適切に見積もれているか、あるいは雲の大きさの影響についても調べる必要がある。

従って、次章では様々なテストパターンを作成して統計的推測手法を用いた誤差の適切さを評価する。

第3章 計算による検証

統計的推測手法を用いた誤差評価方法が適切な誤差を見積もっているか、単純な場合とフラクタル理論を用いた場合とでテストパターンを作成し誤差を計算した。また、金星雲画像を使って統計的推測手法を用いた方法と従来の標準偏差をとる方法について誤差を計算し比較を行った。今回は、金星の雲画像から雲移動ベクトルを算出することを想定して計算時の諸条件を金星雲画像に最適化した。

3.1. 計算時の諸条件

3.1.1. Template の大きさ

地球の雲画像で雲移動ベクトルを求める場合、風速を正確に求めるためには Template の大きさについて経験的に以下のようなことが解かっている [8]。

- ・対流セルより大きく
- ・主要な波の波長より小さく

これらは原理的に、「風速の指標となるものを含み、かつ、巨視的波動が見えなくなる広さ」と言える。これらについて金星の観測で解かっていることは、

- ・対流セル（らしき構造）の大きさ < 100km [9]
- ・主要な波の波長 > 1000km [10]

地球で成り立っている原理が金星でも適応出来るなら、金星では数100km規模の構造を Template として切り出せば良い。過去の探査機による雲画像では 1pixel の大きさは約 30km 程度である。従って、画像から 10~30pixel 程度の Template を切り出せば良い。今回は FFT を計算に用いるため Template の大きさを 16 と 32pixel とした。

3.1.2. 相関曲面の補間方法

雲移動ベクトルの誤差を計算するとき相関曲面のピークの誤差範囲を計算するが、この誤差の値は 1pixel ごとに求まっている相関係数の値と等しくなるとは限らない。(1pixel より細かく相関係数を求めることもできるが、この場合、何らかの仮定(例えば、1pixel 内の輝度は等しいなど)を入れることになるので相関係数の推定値となる。また計算に時間がかかる)

例えば図7のように 1pixel ごとの相関係数の値として a, b, c, d が得られているとする。最大値を取る b の位置が雲移動点となる。この相関係数 b の誤差範囲の下限値が Y であった場合、この Y が相関曲面を切る位置 x が誤差範囲の上限値か下限値になる。このとき Y は a, b, c, d の間の値を取ることが多いので補間して求める必要がある。

今回は補間方法としてキュービック補間法という方法を用いた。具体的な補間式は以下である。

$$\begin{aligned}
 Y &= Px^3 + Qx^2 + Rx + S \\
 P &= (d - c) - (a - b) \\
 Q &= (a - b) - P \\
 R &= c - a
 \end{aligned}$$

$$S = b$$

この方法で相関曲面を補間して相関係数 b の誤差範囲の下限値が相関曲面を切る位置を計算し誤差範囲とした。ただし、雲移動点は補間した後の相関曲面のピークではなく b の位置のままである。

次章からテストパターンを用いた計算結果のグラフで用いられる記号に以下のようなものがあるが、定義は、

- ・ Vector_X (Y) : 雲移動点の座標 (X, Y) (図7での b の位置。補間した相関曲面のピークではない)
 - ・ Error_± X (± Y) : 相関係数 b の誤差範囲の下限値が相関曲面を切る位置の X (Y) 方向の上限值・下限値
- これらについての模式図は図8である。

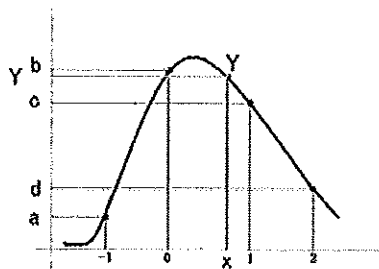


図7 なめらかに補間された相関曲面

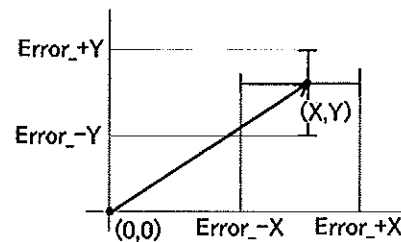


図8 雲移動点と誤差範囲

3.2. 単純なテストパターンの場合

3.2.1. 単純なテストパターンを移動させた場合

まずは、雲の大きさによって統計的推測手法を用いた誤差評価に影響がでるか調べる。

雲が移動した場合、1pixel 内の移動まで追跡することはできない。この 1pixel 内の移動が実際の雲の移動量と相互相関法で計算した雲移動量 (1pixel ごとの値) の誤差となり、最大で 0.5pixel 分の大きさを持つ。統計的推測手法を用いた誤差が雲の大きさの影響を受けるか、雲に 1pixel 内の移動がある場合をテストパターンとして作成し検証した。

3.2.1.1. 計算時の条件

図9 (1マスの幅を 1pixel とする) のような四角い雲を仮定し、この画像と雲が右方向に ΔX だけ移動したときの様子を撮像した画像を作成し、この 2 枚の画像を用いて雲移動ベクトルと誤差を計算し、雲の大きさによって統計的推測手法を用いた誤差に影響がでるか調べた。Template の大きさが 16 と 32pixel、雲の大きさが 2 ~ 14or30pixel の場合について計算を行った。また、ブートストラップ法は 1 万回繰り返して誤差を求めた。ただし、この雲は単純化されているので実際の雲の場合とは大きく異なる可能性は否定できない。従って、この計算結果は参考として示すものである。

3.2.1.2. 計算結果

Template が 16pixel で雲の大きさが 2pixel のとき、フィッシャーの方法で誤差を計算した結果が図10である。この図で雲移動点の位置は Vector_X, Y で、X 方向の誤差範囲が Error_+ X, - X, Y 方向の誤差範囲が Error_+ Y, - Y, 雲を動かした距離が ΔX (X 方向のみへの移動を考える) となっている。

このグラフから、雲の移動距離が 0.5pixel より大きいところでは 0 ~ 0.5pixel 間のパターンの繰り返しとなっている。この現象は雲の形が上下左右に対象であるために起こる。他の Template や雲の大きさについての計算結果は雲の移動距離が 0 ~ 0.5pixel までのグラフを示すことにする。

Template や誤差評価方法別に分けて誤差範囲を雲の大きさ順に 0.05pixels ごとにずらしてプロットしたものが図11 ~ 14 である。また、X 方向の誤差範囲の中心位置を雲の大きさ順に 0.05pixels ごとにずらしてプロットしたものが図15,16 である。

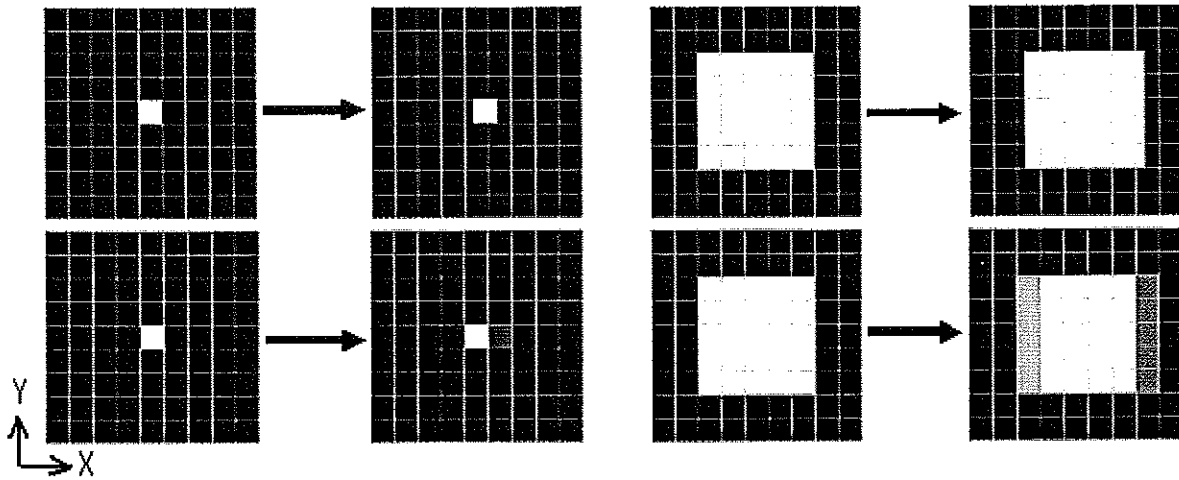


図9 作成したテストパターン。上段：実際の雲の動き，下段：上段の雲を撮像した時の画像。左4つは雲の大きさが1×1pixelの時，右4つは5×5pixelの時

この結果からは、

- ・ + X方向の誤差の大きさに雲の移動量依存性（誤差＝雲の移動量の2倍）が見られる（図11～14参照）
- ・ X方向の誤差の中心位置は ΔX とほぼ同じである（図15,16参照）
- ・ 誤差の大きさがTemplateや雲の大きさと無関係である（図11～16参照）。ただし、雲の大きさがTemplateとほぼ同じ（～80%以上）か小さい（～20%以下）と誤差が適切に評価出来ない
- ・ 統計的推測手法の違いによって誤差が大きく変わらない（図11～16参照）。雲の大きさがTemplateに対して20～80%程度であれば0.1pixel以内

ということが解かった。

また、誤差を2倍程度に過大評価しているように見えるが、前述の図5のように雲が一部分だけ切れて1pixel移動した場合と今回作成したテストパターンは撮像後には見分けがつかない。このような場合も含めて誤差を評価していると考えると誤差を過大評価も過小評価もしていないと言える。

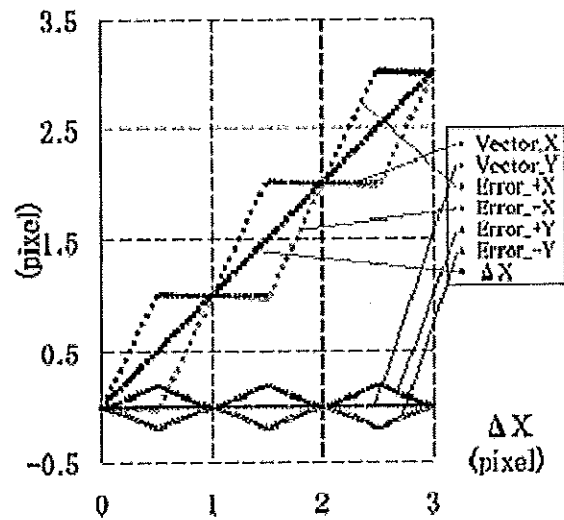


図10 Templateの大きさ：16×16pixelで、雲の大きさ：2×2pixelの場合に、雲を移動させた時の雲移動ベクトル・誤差の計算結果

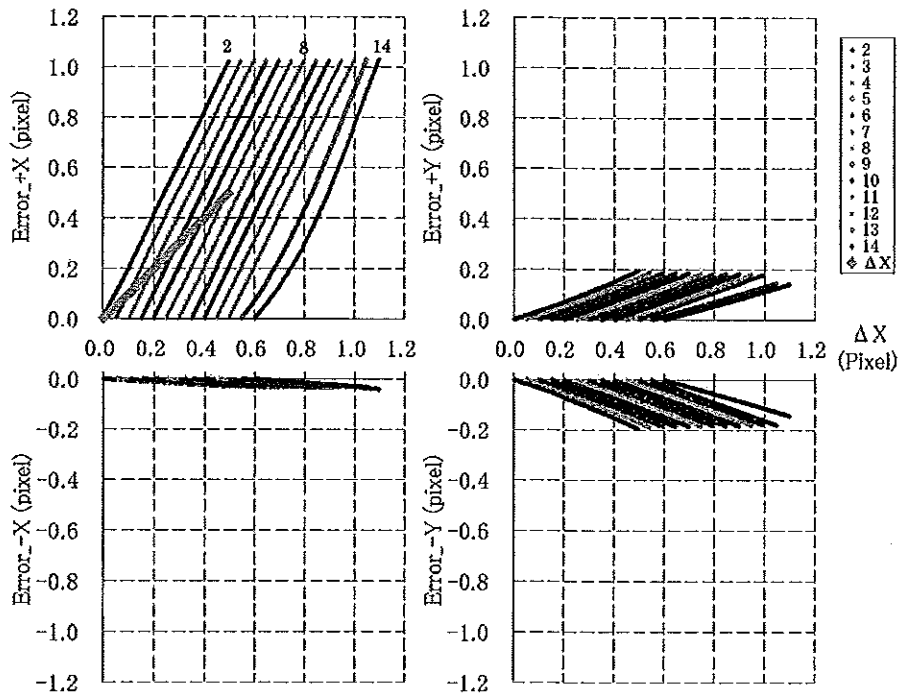


図11 Templateの大きさが 16×16 pixelの場合、フィッシャーの方法を使って誤差を計算した結果、雲の移動距離と4方向（上段左： $+X$ ，上段右： $+Y$ ，下段左： $-X$ ，下段右： $-Y$ ）の誤差との関係が雲の大きさ順に 0.05 pixelsごとにずらしてプロットしてある。 ΔX は、 $Error_{+X}$ のみにプロットしてある。上段左のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

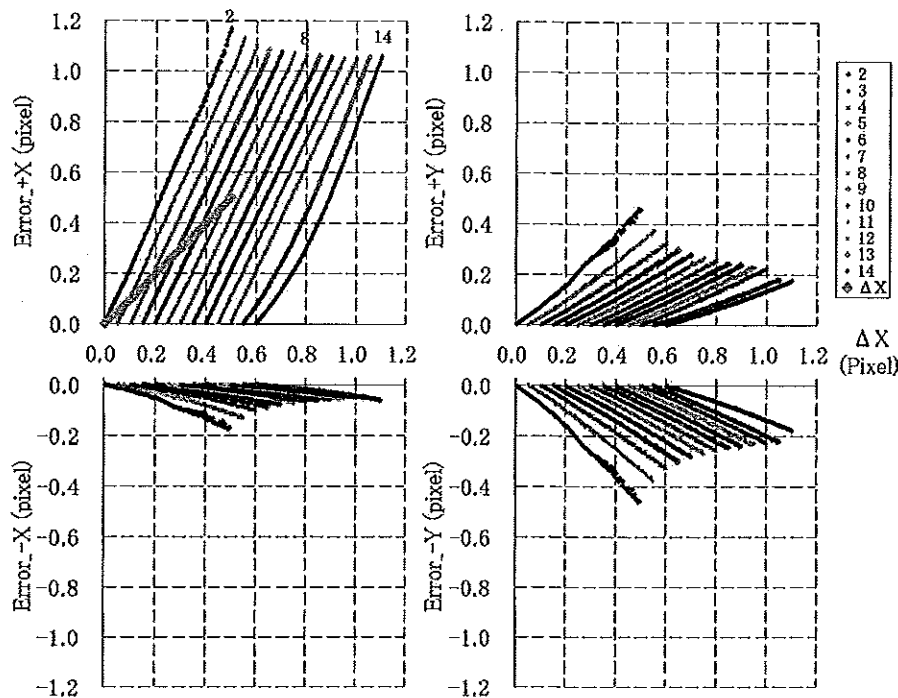


図12 Templateの大きさが 16×16 pixelの場合、ブートストラップ法を使って誤差を計算した結果、雲の移動距離と4方向（上段左： $+X$ ，上段右： $+Y$ ，下段左： $-X$ ，下段右： $-Y$ ）の誤差との関係が雲の大きさ順に 0.05 pixelsごとにずらしてプロットしてある。 ΔX は、 $Error_{+X}$ のみにプロットしてある。上段左のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

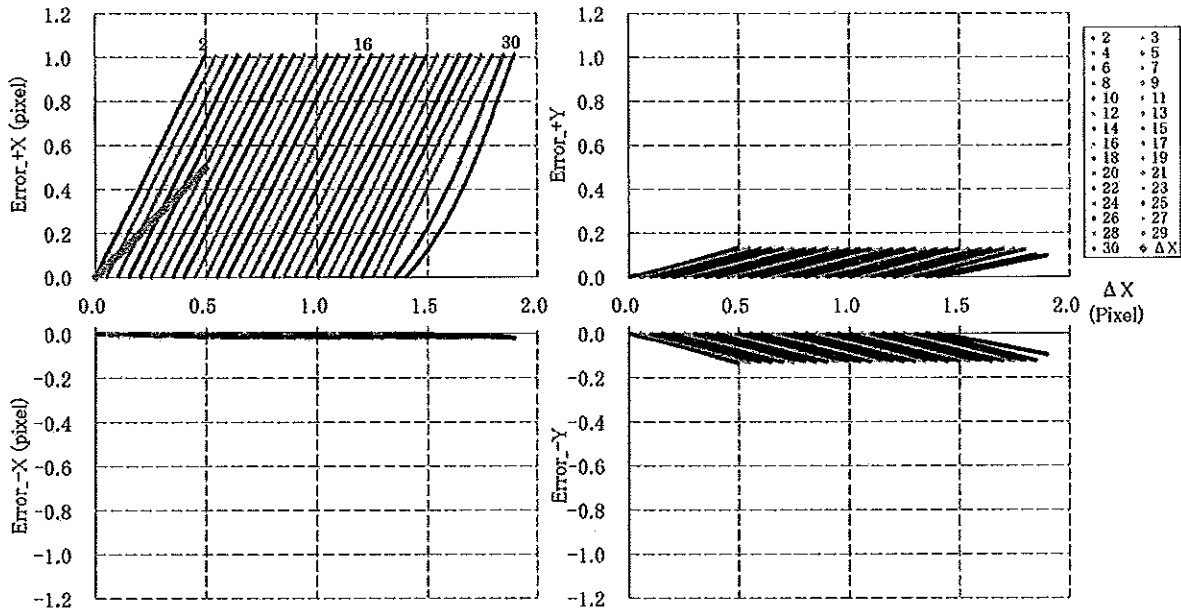


図 13 Template の大きさが 32×32 pixel の場合、フィッシャーの方法を使って誤差を計算した結果。雲の移動距離と 4 方向（上段左：+X, 上段右：+Y, 下段左：-X, 下段右：-Y）の誤差との関係が雲の大きさ順に 0.05 pixels ごとにずらしてプロットしてある。 ΔX は、 $Error_+X$ のみにプロットしてある。上段左のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

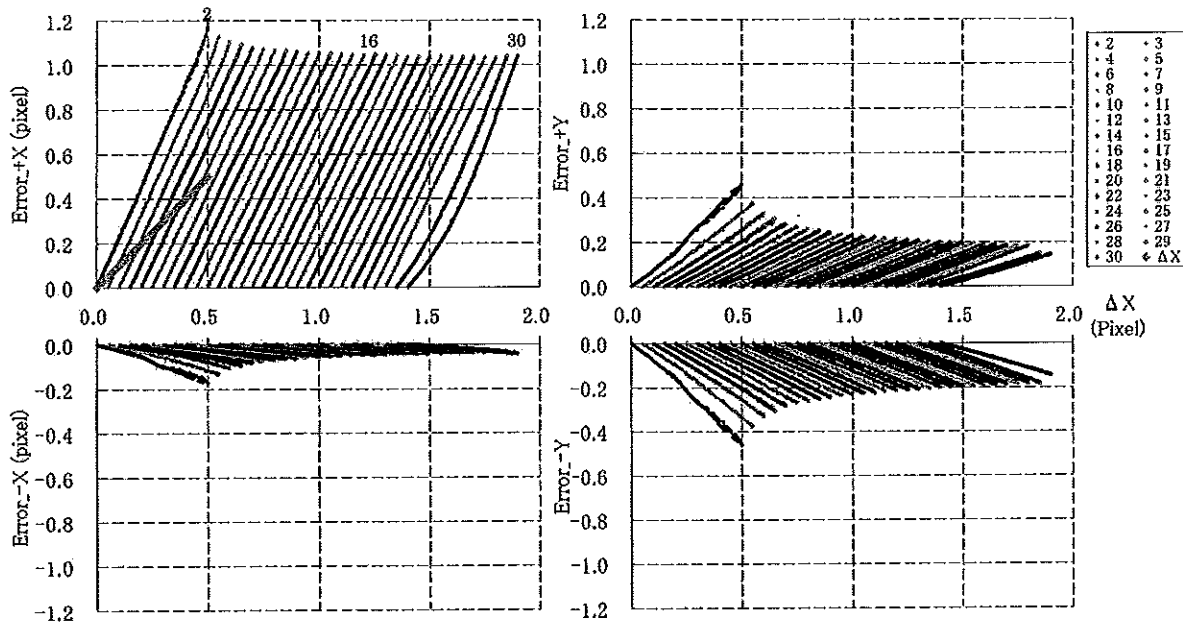


図 14 Template の大きさが 32×32 pixel の場合、ブートストラップ法を使って誤差を計算した結果。雲の移動距離と 4 方向（上段左：+X, 上段右：+Y, 下段左：-X, 下段右：-Y）の誤差との関係が雲の大きさ順に 0.05 pixels ごとにずらしてプロットしてある。 ΔX は、 $Error_+X$ のみにプロットしてある。上段左のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

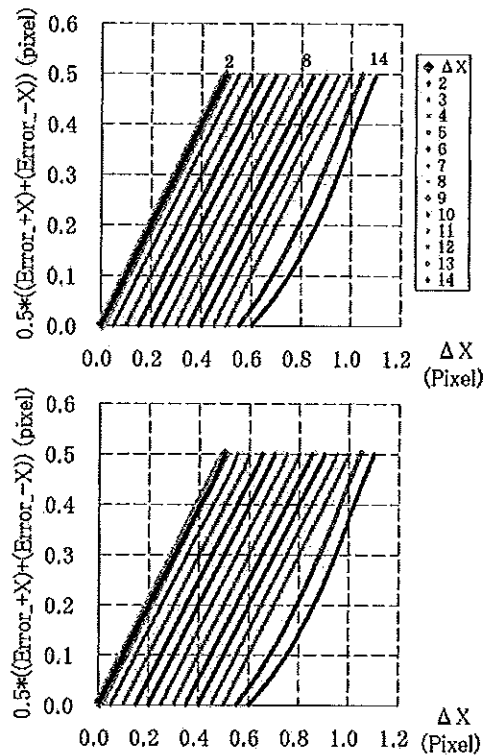


図15 Templateの大きさが 16×16 pixelの場合、フィッシャーの方法(上)とブートストラップ法(下)を使って誤差を計算した結果。雲の移動距離とX方向の誤差範囲の中心位置の関係が雲の大きさ順に 0.05 pixelsごとにずらしてプロットしてある。上段のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

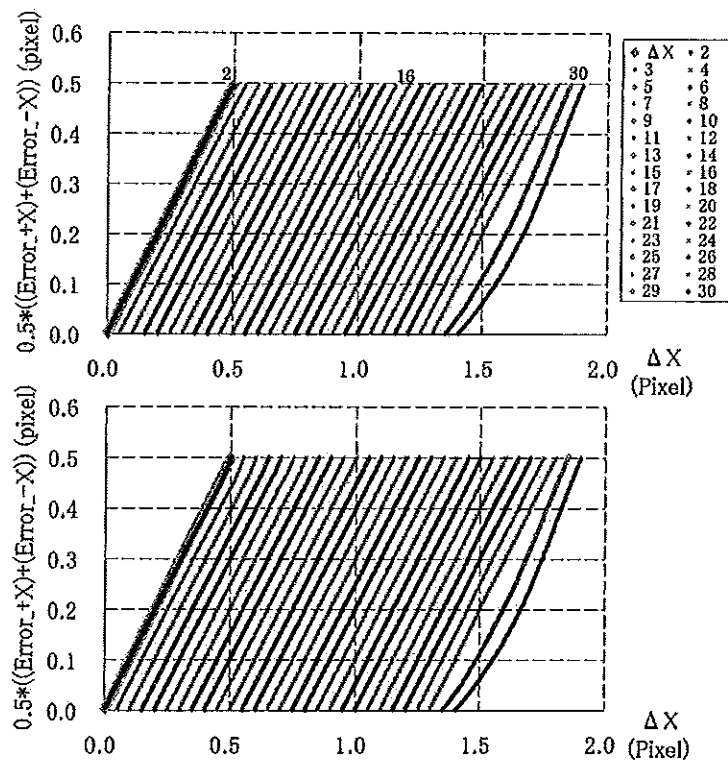


図16 Templateの大きさが 32×32 pixelの場合、フィッシャーの方法(上)とブートストラップ法(下)を使って誤差を計算した結果。雲の移動距離とX方向の誤差範囲の中心位置の関係が雲の大きさ順に 0.05 pixelsごとにずらしてプロットしてある。上段のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

3.2.2. 単純なテストパターンを膨張させた場合

統計的推測手法を用いて雲の変化による誤差を適切に見積もられるかを調べる。

雲の変化による誤差と統計的推測手法を用いた評価方法による誤差を比較するため、雲の変化による誤差の大きさを見積もる必要がある。雲の変化には生成・消滅と膨張・収縮など様々なものが考えられる。今回は誤差の大きさが予想できる膨張の場合をテストパターンとして作成し検証した。

3.2.2.1. 計算時の条件

図17のような四角い雲を仮定し、この画像と雲を ΔX だけ膨張させたときの雲を撮像した画像を作成し、この2枚の画像を用いて雲移動ベクトルと誤差を計算し、統計的推測手法を用いて評価方法が雲の変化による誤差を適切に見積もれるか調べる。 ΔX は図17のように取った。Templateの大きさが16と32pixel、雲の大きさが2～14or30pixelの場合について計算を行った。また、ブートストラップ法は1万回繰り返して誤差を求めた。ただし、この雲は単純化されているので実際の雲の場合とは大きく異なる可能性は否定できない。

3.2.2.2. 計算結果

単純な雲の膨張の場合、 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 方向の誤差は全て同じ値になるので $+X$ 方向の誤差のみをグラフで示す。図18,19はTemplateの大きさと誤差の評価方法別に分けて、雲の大きさ順に0.05pixelsごとにずらしてプロットしたものである。

図18,19の結果からは、

- ・ 誤差に雲の膨張量依存性（誤差 \propto 雲の膨張量）が見られる。
- ・ 雲の膨張量から予想される誤差（ ΔX ）と統計的推測手法を用いた誤差評価方法による誤差がほぼ一致（10%以内）している。従って、誤差の過大・過小評価はほとんどない
- ・ 誤差がTemplateや雲の大きさと無関係である
ただし、雲の大きさがTemplateとほぼ同じ（ $\sim 80\%$ ）であると誤差が適切に評価出来ない
- ・ 統計的推測手法の違いによって誤差が大きく変わらない（5%以内）

ということが解かった。

このテストパターンは現実の雲を表しているとは言い難いので、現実の雲に近いテストパターンで検証する必要がある。次章では、現実に近いテストパターンを用いて統計的推測手法を用いた誤差の適切さを評価する。

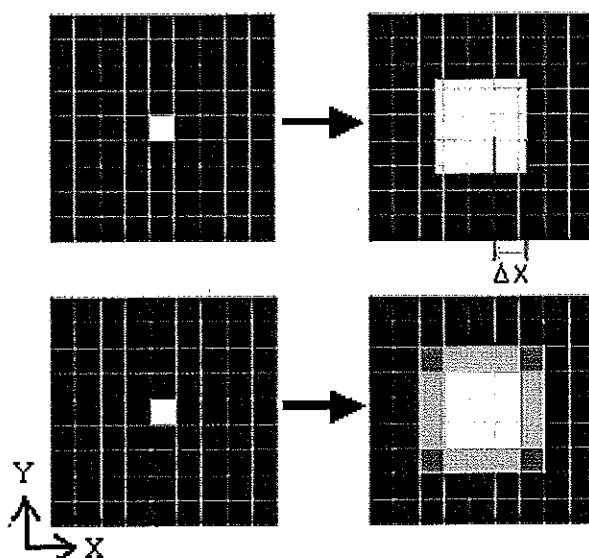


図17 作成したテストパターン。上段：実際の雲の膨張。下段：上段の雲を撮像した時の画像。左2つは雲の大きさが1×1pixelの時、右2つは ΔX pixel膨張した時

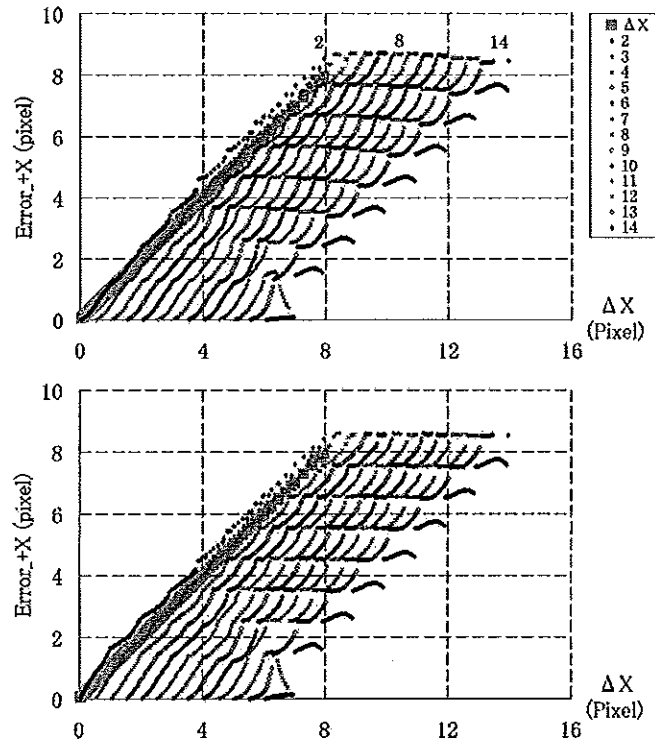


図18 Templateの大きさが16×16pixelの場合、フィッシャーの方法(上)とブートストラップ法(下)を使って誤差を計算した結果、雲の膨張距離と+X方向の誤差との関係が雲の大きさ順に0.05pixelsごとにずらしてプロットしてある。上段のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

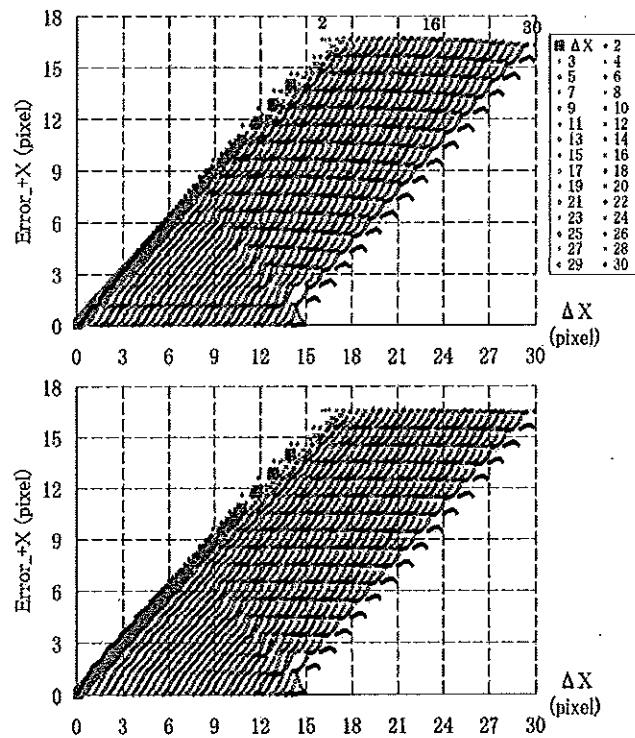


図19 Templateの大きさが32×32pixelの場合、フィッシャーの方法(上)とブートストラップ法(下)を使って誤差を計算した結果、雲の膨張距離と+X方向の誤差との関係が雲の大きさ順に0.05pixelsごとにずらしてプロットしてある。上段のグラフ中の数字は雲の大きさを表している

3.3. フラクタル理論を用いて作成したテストパターンの場合

本章では金星の雲画像から雲移動ベクトルを算出する場合を想定して金星雲画像をフラクタル理論を用いて再現した。この画像を用いて統計的推測手法を用いた誤差評価方法が適切な誤差を見積もれるか調べる。

3.3.1. フラクタル理論を用いてテストパターンを作成

図20は金星の雲の輝度の空間変動をフーリエ変換して周波数成分に直したものである。このような対数-対数プロットで直線になるようなスペクトル特性を持つものにはフラクタル性があることが知られている [11]。従って、金星の雲にもフラクタル性があることが予想されフラクタル理論を使って金星の雲に近いパターンを再現することが出来る [12]。この方法で作成した雲画像は図21のようなものである（作成した全ての雲画像は補遺A.参照）。パターンの作成時に乱数を使うので金星雲画像は作るたびにパターンが違うものが出る。従って、パターンを大量に作成して統計を取る。

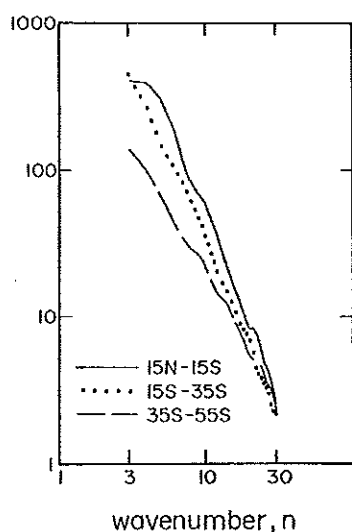


図20 Mariner10で撮られた金星雲画像の輝度の空間変動から求めた輝度スペクトル [13]

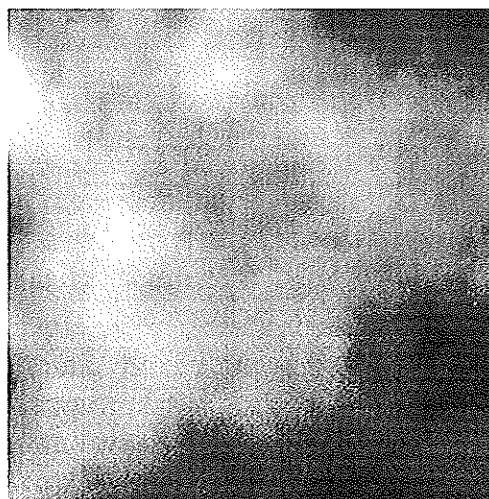


図21 フラクタル理論を用いて作成した雲画像

3.3.2. 作成したパターンの検証

フラクタル理論を用いて作成したパターンが金星の雲画像に似ているか検証する。

まず輝度の空間変動をフーリエ変換して周波数成分をプロットしたものが図22である。画像は先程の図21 (2048 × 2048pixel) を用いて縦方向に244・483・705・940・1173・1871番目の列について輝度の空間変動の周波数成分をプロットした。図22によると金星低緯度の輝度の空間変動の周波数成分と同じような傾きをどの列も持っており、輝度スペクトルとしては似たものが出来た。

しかし、図23に示されているように過去の観測で得られた金星の雲画像 (~10,000 × 10,000km) とは似ていない。金星の雲画像の方にはより細かいパターンが存在している。この違いの原因は、フラクタル理論で作成したパターンは複数の画像から得られた輝度スペクトルを平均したものを再現したからであると考えられる。1枚の金星雲画像から輝度スペクトルを取ると図24のようになり波の構造がある。この構造が金星雲画像とフラクタル理論で作成された雲画像が似ていない原因になっていると考えられる。

金星雲画像に見られるような細かいパターンを再現することはフラクタル理論では困難である。今回はフラクタル理論で作成したパターンは金星雲画像の一部分を再現しているとして、雲移動ベクトル算出・誤差評価に用いることにした。

図23に示されているように金星雲画像の一部(64×64pixel)とフラクタル理論で作成したパターンはよく似ている。今回は、フラクタル理論で作成したパターンは金星の雲の64×64pixel(～2000×2000km)の構造を再現しているとして計算に用いた。

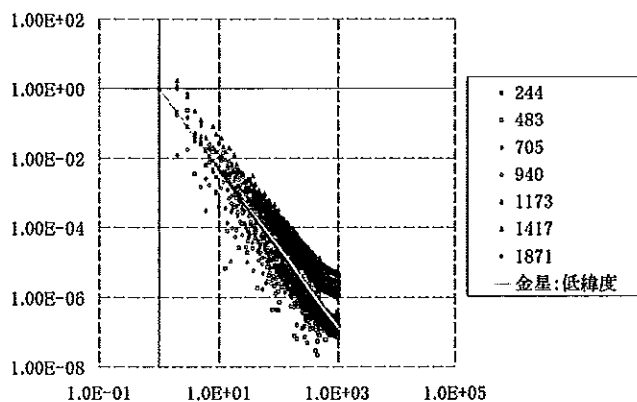


図22 作成したパターンと金星雲画像の輝度スペクトルの比較

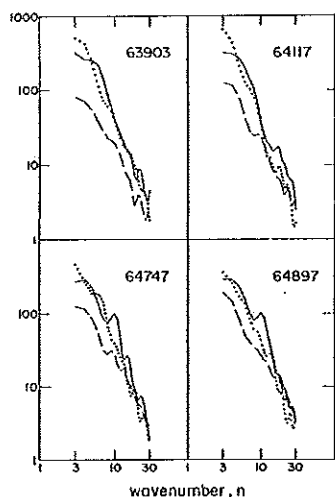


図24 一枚の金星雲画像から求めた輝度スペクトル [13]

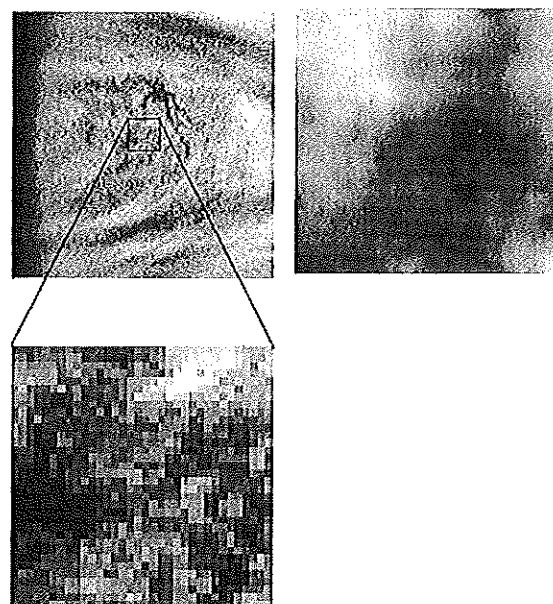


図23 金星雲画像(左上:512×512pixel)とその拡大図(左下:64×64pixel)とフラクタル理論で作成した雲画像(右)

3.3.3. パターンを移動させた場合

単純なテストパターンを用いたときと同様にフラクタル理論で作成したテストパターンを移動させて誤差の適切さを評価する。この場合、単純な場合との比較で輪郭が不明瞭なことの影響による雲移動ベクトルの誤差の大きさを見積もることもできる。

3.3.3.1. 計算時の条件

まず、フラクタル理論で2048×2048pixelの画像を作成し(補遺A.の001～100番の画像)、これをΔXpixel移動させて(補間方法は4点線形補間法)新たな画像を作り、元の画像と新たな画像をそれぞれ64×64pixelに解像度を落とし(撮像と同じような処理を行う)64×64pixelの画像同士で移動・誤差を評価した。ブートストラップ法は1万回繰り返して誤差を求めた。このとき、雲移動ベクトルが予想される方向から誤差範囲も含めてはズレた場合は同定ミスとして不合格にして結果には入れなかった。雲画像は100パターン(補遺A.の001～100番の画像)用意してこれらを解析し統計を取る。Templateは16と32pixelについて計算を行った。

3.3.3.2. 計算結果

移動距離とベクトルが計算できた画像数の関係は図 25 である。ほとんど全ての場合についてベクトルを求めることができた。図 26 は画像全て (001 ~ 100) の計算結果について統計を取ったものである。エラーバーは標準偏差である。

この結果からは、

- ・ 誤差に雲の移動量依存性 ($\text{Error}_{+X} \approx 2 \times \Delta X$) が見られる
- ・ 単純な場合に比べて誤差が大きく計算されているのは雲の輪郭が不明瞭なことによる影響 ($\sim 0.3\text{pixel}$)

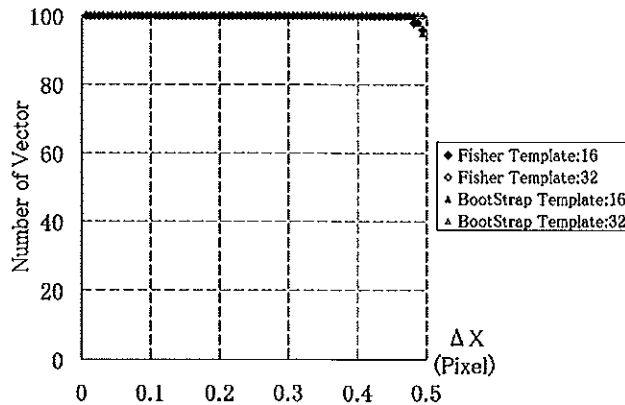


図 25 雲の移動距離と雲移動ベクトルが計算できた画像数の関係

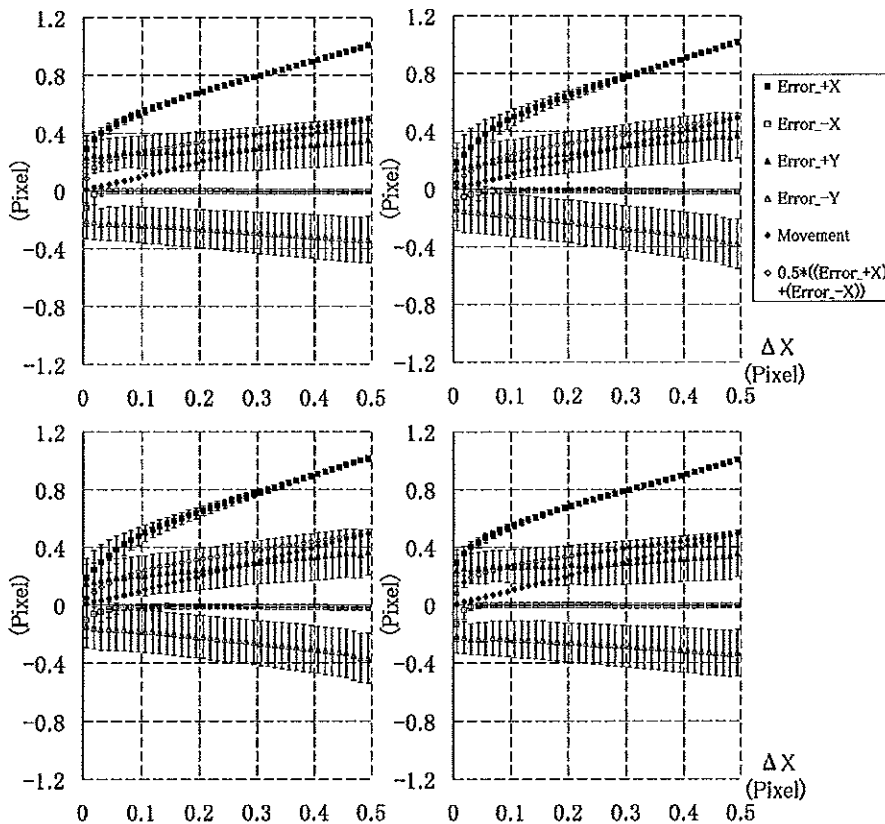


図 26 Template の大きさが 16 × 16 (左)・32 × 32 (右) pixel の場合、フィッシャーの方法 (上) とブートストラップ法 (下) を使って誤差を計算した結果の統計結果。雲の移動距離と誤差との関係がプロットしてある

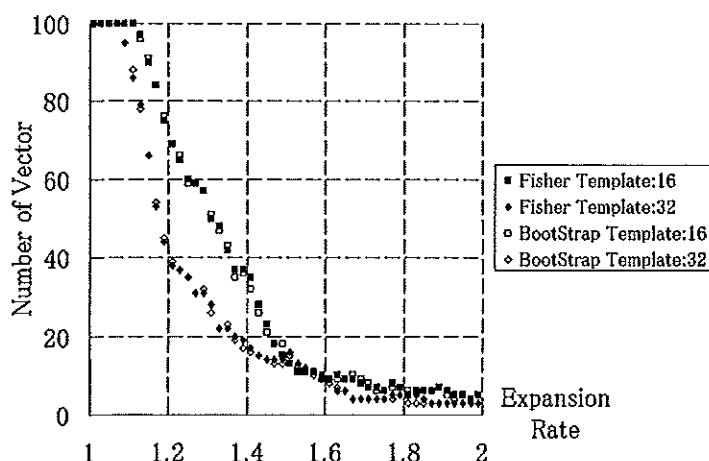


図27 雲の膨張率と雲移動ベクトルが計算できた画像数の関係

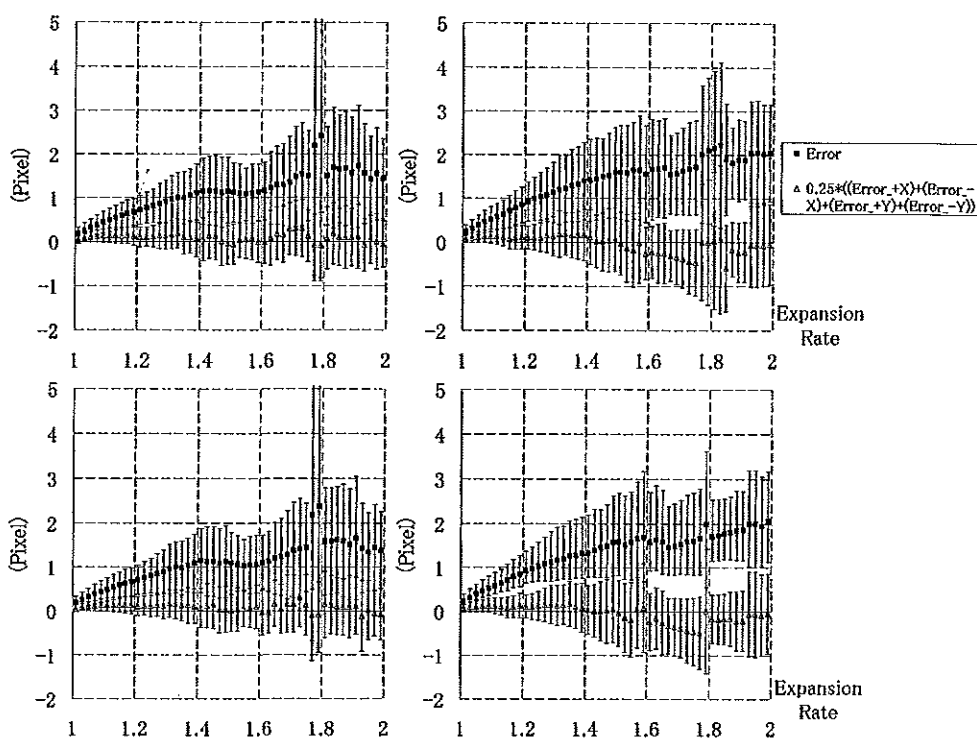


図28 Templateの大きさが16×16(左)・32×32(右) pixelの場合、フィッシャーの方法(上)とブートストラップ法(下)を使って誤差を計算した結果の統計結果. 雲の膨張率と誤差との関係がプロットしてある

であると考えられる

- ・ Templateの大きさで誤差はほとんど変わらない (0.1pixel 以内)
- ・ 統計的推測手法の違いによって誤差が大きく変わらない (0.1pixel 以内)

ということが解かった.

3.3.4. パターンを膨張させた場合

単純なテストパターンを用いたときと同様にフラクタル理論で作成したテストパターンを膨張させて誤差の適切さを評価する. この場合, 単純な場合との比較で雲の大きさが任意の場合にどの程度の大きさの雲を追跡して誤差を評価しているか解かる.

3.3.4.1. 計算時の条件

まず、フラクタル理論で 2048 × 2048pixel の画像を作成し（補遺 A. の 001 ~ 100 番の画像）、これを Δ X 倍膨張させて（補間方法は 4 点線形補間法）新たな画像を作り、元の画像と新たな画像をそれぞれ 64 × 64pixel に解像度を落とし（撮像と同じような処理を行う）、この画像同士で移動・誤差を評価した。ブートストラップ法は 1 万回繰り返して誤差を求めた。このとき、雲移動ベクトルが予想される方向（この場合は (0,0)）から誤差範囲も含めてはずれた場合、同定ミスとして不合格にし結果には入れなかった。雲画像は 100 パターン用意（補遺 A. の 001 ~ 100 番の画像）してこれらを解析し統計を取った。Template は 16 と 32pixel について計算を行った。

3.3.4.2. 計算結果

拡大率とベクトルが計算できた画像数の関係は図 27 である。拡大率が 1.2 倍以上で急激に計算できた画像数が減少していることが解かる。図 28 は画像全て (001 ~ 100) の計算結果について統計を取ったものである。エラーバーは標準偏差である。

この結果からは、

- ・雲が膨張・収縮した場合、雲移動ベクトルが 50% 以上計算できるのは拡大率が 0.8 ~ 1.2 倍の範囲である。（収縮は膨張を時間的に逆にすれば良いので膨張時の値から予想できる）（図 27 参照）
- ・誤差に雲の膨張率依存性（誤差 = 膨張率）が見られる（図 28 参照）
- ・誤差を単純な場合と比較すると誤差評価されている雲の大きさは ~ 1/5 × Template 程度である。つまり、~ 1/5 × Template 程度の雲の動きを誤差評価しているので ~ 1/5 × Template の雲を追跡していることが解かった。このことから実際の雲画像を用いた場合に追跡する雲のサイズに対する最適な Template の大きさが決定できる（図 28 参照）
- ・膨張率 = 1 から雲の輪郭が不明瞭なことによる誤差の大きさを見積もると ~ 0.3pixel である（図 28 参照）
- ・統計的推測手法の違いによって誤差が大きく変わらない（10% 以内）（図 28 参照）

ということが解かった。

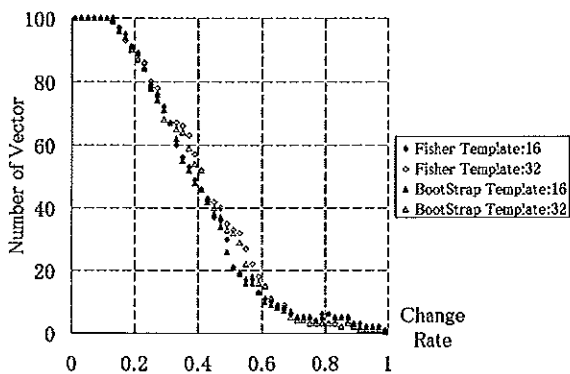


図 29 雲の変化率と雲移動ベクトルが計算できた画像数の関係

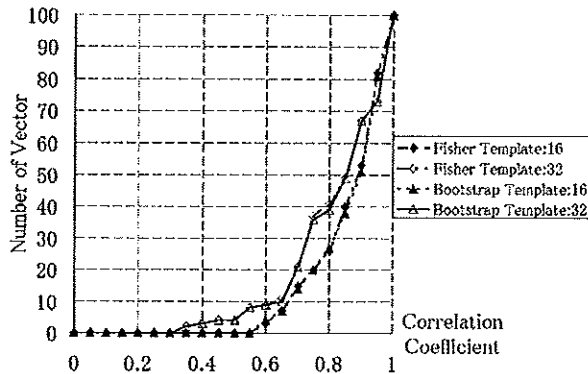


図 30 雲移動ベクトルを計算した時の相関係数の値と雲移動ベクトルが計算できた画像数の関係

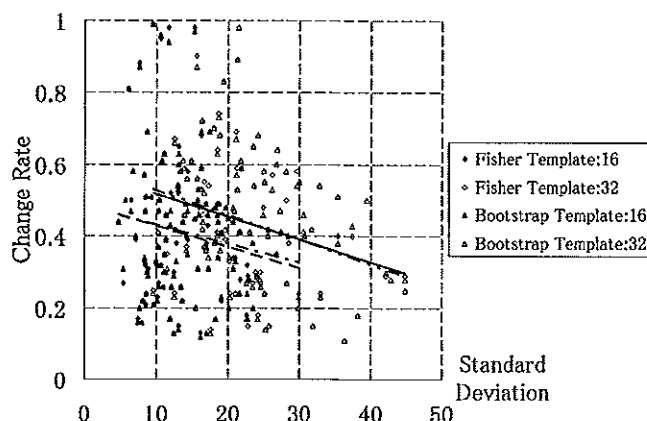


図31 膨張前の画像のコントラスト(Template内に含まれる輝度の標準偏差)と雲移動ベクトルが計算できなくなった時の変化率との関係

3.3.5. パターンを変化させた場合

フラクタル理論で作成したテストパターンを2枚使うことで雲が時間変化した場合(生成・消滅)を擬似的に作り出すことが出来る。2枚の画像の情報を混ぜて雲が変化した画像を作成し雲の生成・消滅によって誤差がどのように振る舞うか調べる。

3.3.5.1. 計算時の条件

まずフラクタル理論で2048×2048pixelの画像を2枚作成し、これらの情報を混ぜて新たな画像を作り(新たな画像 = $(1 - \Delta T) \times 1$ 枚目の画像 + $\Delta T \times 2$ 枚目の画像 ΔT : 変化率)元の画像と新たな画像をそれぞれ64×64pixelに解像度を落とし(撮像と同じような処理を行う)、64×64pixelの画像同士で移動・誤差を評価した。ブートストラップ法は1万回繰り返して誤差を求めた。このとき、雲移動ベクトルが予想される方向(この場合は(0,0))から誤差範囲も含めてはずれた場合、ミス・マッチングとして不合格にし結果には入れなかった。雲画像は100組用意(補遺Aの001~101番の画像から(1,2), (2,3)・・・というような組を100組作った)し、これらを解析し統計を取る。Templateは16と32pixelについて計算を行った。

3.3.5.2. 計算結果

変化率とベクトルが計算できた画像数の関係は図29である。変化率が0.2以上で計算できた画像数が徐々に減少していくことが解かる。図29~31は雲移動ベクトルが計算できなくなる時、どのようなパラメータと関連があるかを調査したものである。図29は変化率とベクトルが計算できなくなった画像数の関係、図30は相関係数とベクトルが計算できなくなった画像数の関係、図31は画像のコントラストと変化率の関係である。どれも関係ないという結果になった。今回は計算したのが100例と少なかつたためランダムな要素の影響が大きかつたのではないかと考えられる。これらについてはさらに詳しい調査が必要である。図32は全ての組((001,002)~(100,101))の計算結果について統計を取ったものである。エラーバーは標準偏差である。

この結果からは以下のことが解かつた。

- ・誤差に雲の変化率依存性(誤差 $\approx 1.5 \sim 2.5 \times$ 変化率)が見られる(図32参照)
- ・雲が変化した場合、雲移動ベクトルが50%以上計算できるのは変化率が0.4程度まで(図29参照)
- ・変化率 ≈ 1 から雲の輪郭が不明瞭なことによる誤差を見積もると ~ 0.3 pixelである(図32参照)
- ・統計的推測手法の違いによって誤差が大きく変わらない(10%以内)(図32参照)

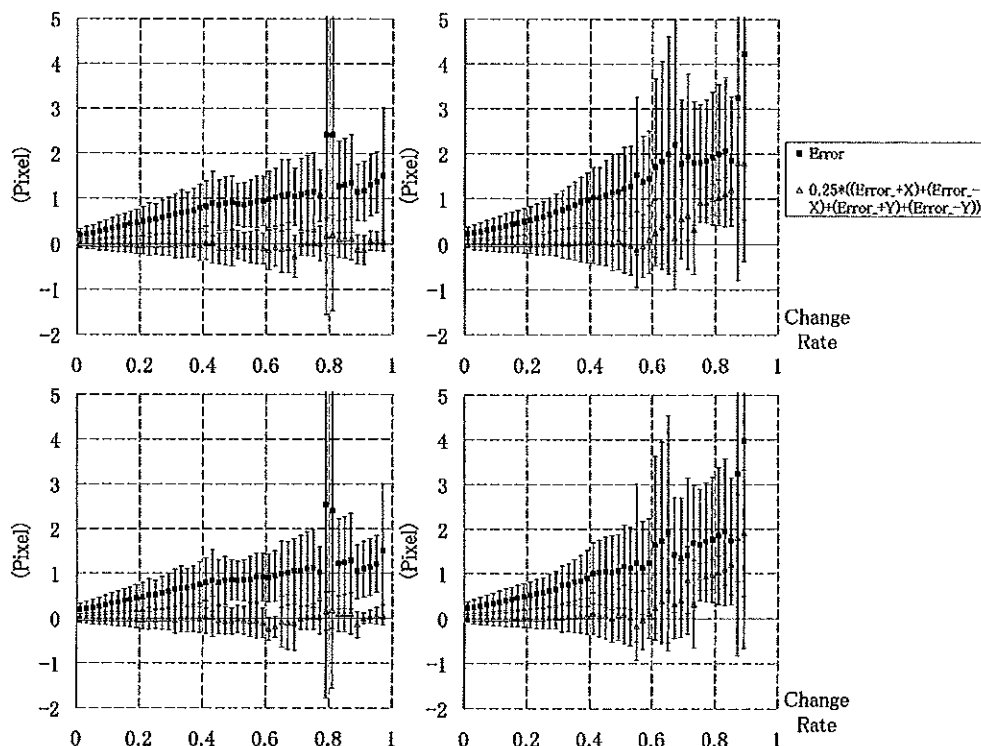


図32 Templateの大きさが16×16(左)・32×32(右) pixelの場合、フィッシャーの方法(上)とブートストラップ法(下)を使って誤差を計算した結果の統計結果。雲の変化率と誤差との関係がプロットしてある

3.4. 金星の場合

金星の雲画像を用いて従来の標準偏差を取る誤差評価方法と今回の統計的推測手法を用いる誤差評価方法とでそれぞれの誤差を計算し比較を行った。

3.4.1. 計算時の条件

用いた画像(図33参照)はGalileoが金星フライバイを行ったとき(1990年2月16日)にSolid State Imaging(SSI) Systemが未知の吸収物質(S₂Oと近年言われているが未解決である)による太陽の散乱光(UV:418nm)を撮像したものである(提供:NASA 画像番号:PIA00110)。この画像はもともと金星を球体のまま撮像しているので球面の射影像となっているが、衛星直下点を0度とした緯経度にマッピングし直して(補間方法は4点線形補間法)解析に用いた。

雲移動ベクトルは以下の方法で算出した。最初にTemplateとして12.8°×12.8°(64×64pixel)の領域を切り出し、Search AreaとしてTemplateを中心に25.6°×25.6°(128×128pixel)の領域を切り出し相互相関法を用いて雲移動ベクトルを算出し、それから最初のTemplateの中心からTemplateとして上下左右に3.2°×3.2°(16×16pixel)、Search Areaとして1回目の雲移動ベクトル算出で求めた雲移動点を中心に9.6°×9.6°(48×48pixel)の領域を切り出し相互相関法をもう一度行って雲移動ベクトルを算出した[14]。この方法のメリットとしては広い範囲のトレンドを押さえた上で細かい範囲で雲のパターンマッチングを行うので同定ミスを低く抑えられることが挙げられる。Templateの大きさは16と32pixelで計算を行った。また、ブートストラップ法は1万回繰り返して誤差を求めた。

ここで計算時に以下の2つの制約条件を付けた。これは雲移動ベクトルの精度を向上させるためである。過去の研究で用いられているプログラムはもっと多くの制約条件を付けているが、今回は結果の客観性を保つために

2つだけにとどめた。

1. データの存在度数分布がふた山や端にかかって偏っている場合 (図 34 参照) を除く。(ピアソンの積率相関係数とフィッシャーの方法は標本と母集団のデータ (雲画像の場合は雲の輝度やアルベドの強弱) の存在度数分布が正規分布に従う場合しか計算できないため)
2. 相関曲面の 1 番高いピークの誤差範囲内に 2 番目のピークが入る場合は除く。(雲移動ベクトルが 2 方向に分かれてしまうため (図 35 参照))

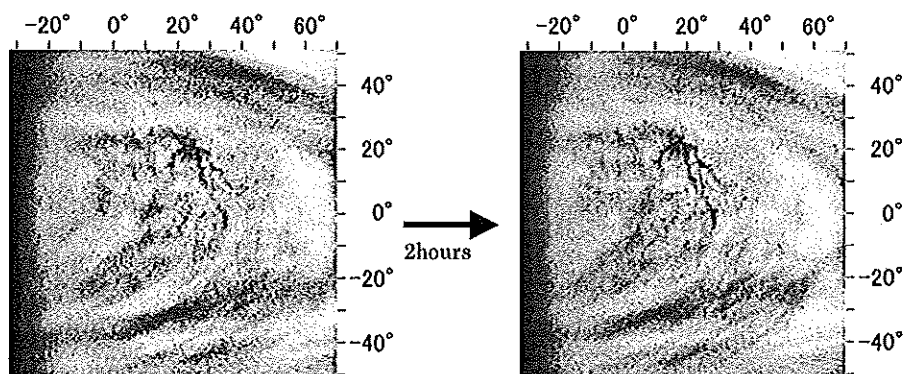


図 33 雲移動ベクトル算出に用いた金星雲画像 (NASA 提供, Galileo 衛星による画像)

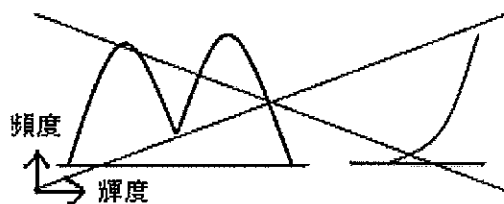


図 34 相関係数を計算しない分布図の例

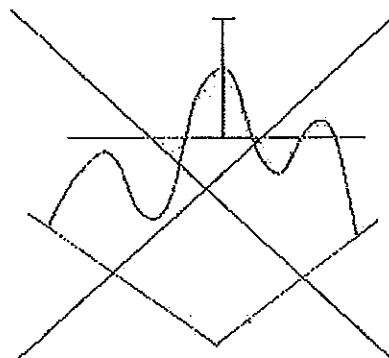


図 35 相関係数を計算しない相関曲面の例

3.4.2. 計算結果と従来の方法との比較

フィッシャーの方法とブートストラップ法での雲移動ベクトルと誤差の計算結果は図 36,37 のようになった。図 36 に示されているように $12.8^\circ \times 12.8^\circ$ (64×64 pixel) の領域を 16 個切り出し、それぞれについて、

- ・雲の形と標本誤差の影響による誤差 (統計的推測手法を用いた誤差評価方法)
- ・雲移動ベクトルの標準偏差 (従来 of 誤差評価方法)

を計算した (Template:16 の場合のみ、32 の場合は黒枠の領域について雲の形と標本誤差の影響による誤差を見積もった)。この結果は、

- ・統計的推測手法を用いた誤差
 - フィッシャーの方法 : 3.7m/s (Template:32 の場合は、3.9m/s)
 - ブートストラップ法 : 3.5m/s (Template:32 の場合は、3.7m/s)
- ・雲移動ベクトルの標準偏差 : 16.3m/s

となった。(図 38,39 参照)

統計的推測手法を用いた誤差評価方法の方が誤差が小さいのは、風速の空間変動（理論からの予測は～10m/s）が誤差に含まれなくなり誤差の過大評価がなくなったためと考えられる。また、統計的推測手法の違いによって誤差が大きく変わらないことが確かめられた。

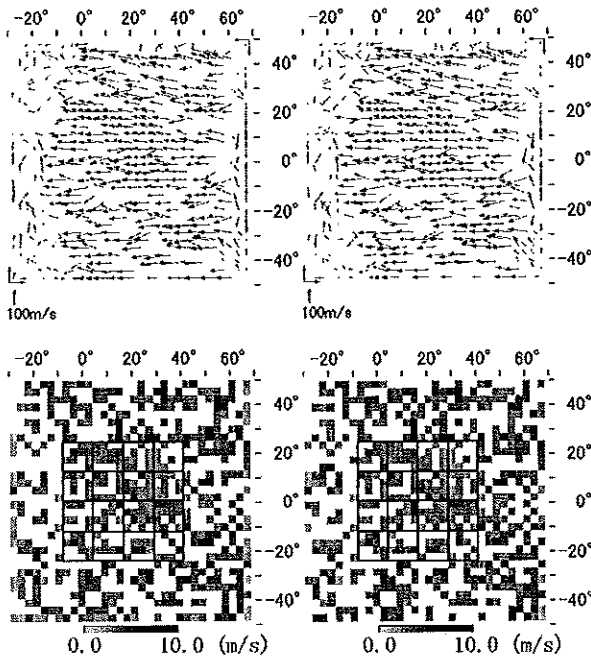


図36 Templateの大きさが16×16pixelの場合の雲移動ベクトル（上段）と誤差（下段）の計算結果。左：フィッシャーの方法、右：ブートストラップ法で誤差を算出。ベクトルのない部分と誤差の図で白い部分は制約条件によって計算されなかった所

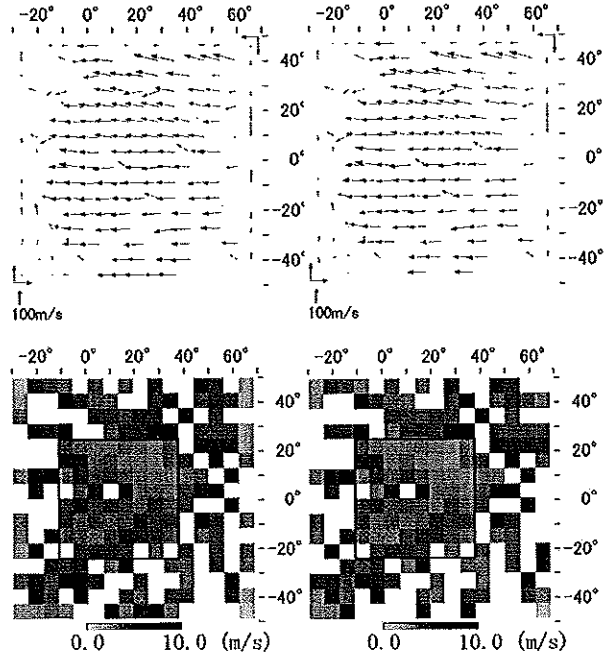


図37 Templateの大きさが32×32pixelの場合の雲移動ベクトル（上段）と誤差（下段）の計算結果。左：フィッシャーの方法、右：ブートストラップ法で誤差を算出。ベクトルのない部分と誤差の図で白い部分は制約条件によって計算されなかった所

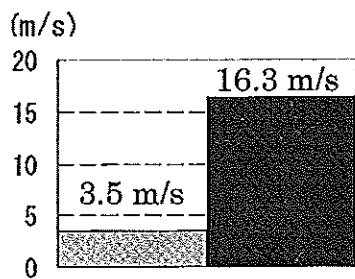


図38 統計的推測手法（ブートストラップ法）を用いた場合の誤差（右）と従来の雲移動ベクトルの標準偏差を誤差とする場合（左）の比較。図36の黒枠内を平均した値を示している

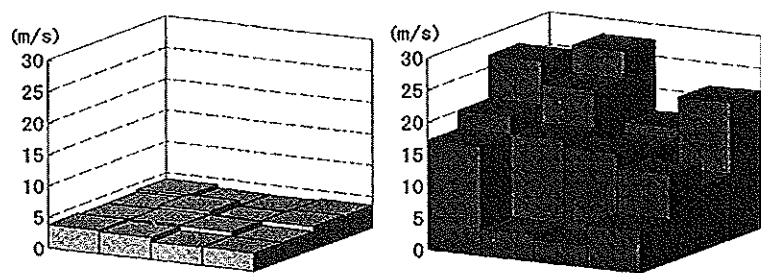


図39 統計的推測手法（ブートストラップ法）を用いた場合の誤差（上）と従来の雲移動ベクトルの標準偏差を誤差とする場合（下）の比較。一番左の柱が図36の黒枠の中で一番左下のセル、一番右の柱が図36の黒枠の中で一番右上のセルに対応している

第4章 まとめ

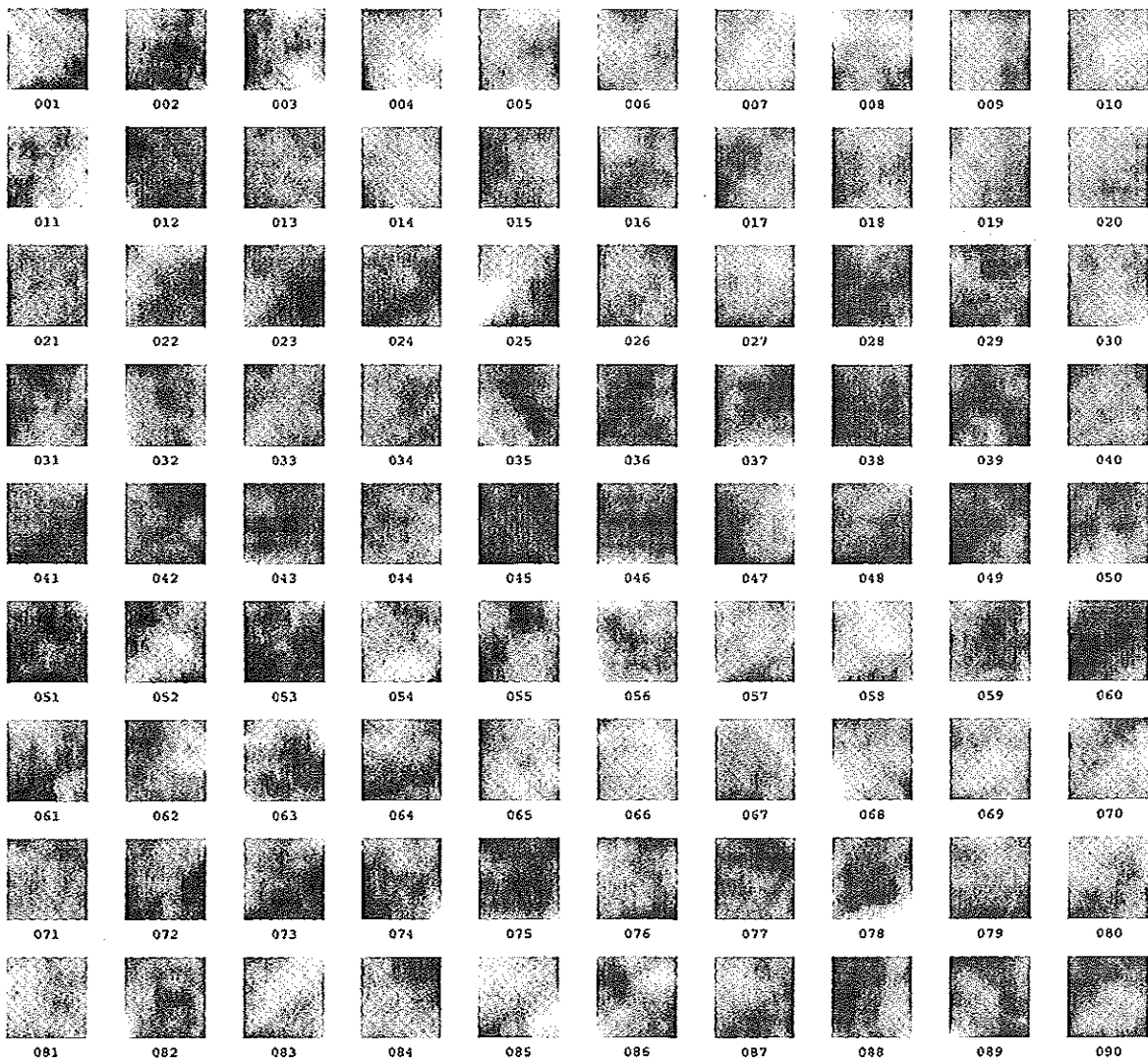
統計的推測手法を用いた誤差評価方法が適切な誤差を見積もっているか、単純な場合とフラクタル理論を用いた場合とでテストパターンを作成し誤差を計算した結果では、適切な誤差を見積もれていることが確認できた。

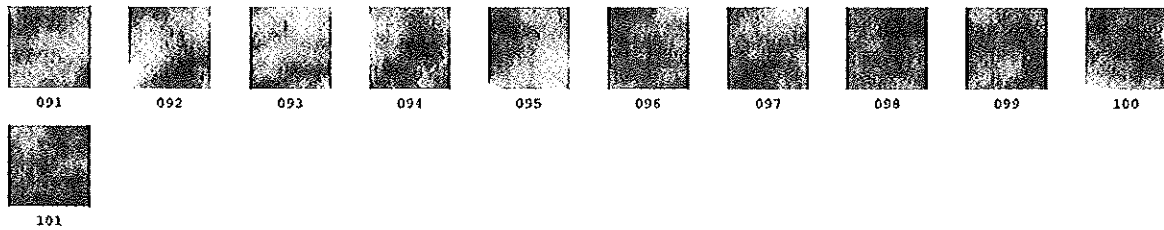
Galileo が金星フライバイを行ったときの画像を用いた結果では、従来の方法（標準偏差）に対して統計的推測手法を用いた誤差評価方法で4～5分の1程度に誤差を改善でき風速の空間変動を誤差が下回ることができた。

統計的推測手法を用いた方法は従来の手法を完全に代替できる。なぜなら、フィッシャーの方法は標本と母集団のデータ（雲画像の場合は、雲の輝度やアルベドの強弱）の存在度数分布が正規分布に従う場合しか計算できないが積率相関係数も同じ場合にしか計算できないからである。雲移動ベクトルの計算に積率相関係数を用いる限りフィッシャーの方法は常に使うことができる。また、ブートストラップ法は標本の分布を元にして母集団を推定するので正規分布という仮定を用いない。ブートストラップ法は積率相関以外の相関係数にも用いることができる。

補 遺

A. フラクタル理論で作成した金星雲画像





第6章 参考文献

- [1] CGMS, 2001: Consolidated Report of CGMS Activities. 9th Edition, Version 1.
- [2] Limaye, S.S., 1988: Venus: Cloud level circulation during 1982 as determined from Pioneer cloud photopolarimeter images. II. Solar longitude dependent circulation. *Icarus*, 73, 212-226.
- [3] Limaye, S.S. and V.E. Suomi, 1981: Cloud motions on Venus - Global structure and organization. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1220-1235.
- [4] Belton, M.J.S., P.J. Gierasch, M.D. Smith, P. Helfenstein, P.J. Schinder, J.B. Pollack, K.A. Rages, D. Morrison, K.P. Klaasen and C.B. Pilcher, 1991: Images from Galileo of the Venus cloud deck. *Science*, 253, 1531-1536.
- [5] Rossow, W.B., A.D. Del Genio, and T. Eichler, 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2053-2084.
- [6] Fisher, R.A., 1915: Frequency Distribution of the Values of the Correlation Coefficient in Samples from an Indefinitely Large Population. *Biometrika*, 10, 507-521.
- [7] Efron, B., 1979: Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7(1), 1-26.
- [8] Fujita, T. T., E.W. Pearl and W.E. Shenk, 1975: Satellite-tracked cumulus velocities. *J. Appl. Meteor.*, 14, 407-413.
- [9] Belton, M.J.S., G.R. Smith, D.A. Elliot, K. Klaasen and G.E. Danielson, 1976a: Space-time relationships in the UV markings on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 33, 1383-1393.
- [10] Rossow, W.B., A.D. Del Genio, S.S. Limaye, L.D. Travis and P.H. Stone, 1980: Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images. *J. Geophys. Res.*, 85, 8107-8128.
- [11] Mandelbrot, B.B., 1982: *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman, San Francisco.
- [12] Perlin, K., 1985 : An Image Synthesizer. *Computer Graphics*, 19 (3), pp 287-296.
- [13] Travis, L. D., 1978: Nature of the atmospheric dynamics on Venus from power spectrum analysis of Mariner 10 images. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1584-1595.
- [14] 大島隆, 1989 : 風計算処理, GMS システム更新総合報告 II データ処理編, 気象衛星センター技術報告特別号 (1989) II, 85-102.

既 刊 行 物

- 第 105 号 (1999 年 10 月) S-310-27 号機による中層大気水蒸気密度の測定
第 106 号 (1999 年 12 月) S-310-27 号機による DC プローブ測定
— E S 層中の電子温度について—
第 107 号 (2000 年 2 月) SEPAC プロジェクトのエンジニアリングとマネジメント
第 108 号 (2000 年 2 月) 飛行時間法を用いた中性ガス質量分析器の開発
第 109 号 (2000 年 3 月) 金星ホールの生成機構に関する一考察
第 110 号 (2000 年 8 月) 臼田宇宙空間観測所水素メーザ標準周波数時刻システム
第 111 号 (2000 年 10 月) 臼田宇宙空間観測所用 X バンド冷却低雑音増幅器
第 112 号 (2000 年 10 月) 探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)
第 113 号 (2000 年 12 月) 宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と全
半球放射率の温度依存性に関する測定データ
第 114 号 (2001 年 3 月) 科学衛星「はるか」の位相基準信号伝送システム
— 臼田地上局システムを中心にして—
第 115 号 (2001 年 3 月) 成層圏大気中の多種の微量成分観測を目的とした気球
搭載用大気採取装置の研究
第 116 号 (2001 年 9 月) 科学衛星「はるか」における位相基準信号伝送のため
の衛星搭載システム
第 117 号 (2001 年 10 月) 電磁飛翔体加速装置開発の歩み—(I)
第 118 号 (2001 年 12 月) リングコア磁力計センサの衝撃実験
— ペネトレータ型磁力計開発の基礎実験—
第 119 号 (2002 年 8 月) 窒素振動温度測定器の室内実験による較正と解析方法
の改良
第 120 号 (2002 年 11 月) Bepi Colombo / MMO 搭載カメラ用光学ガラスの放射
線耐性試験
第 121 号 (2003 年 3 月) X線天文観測科学衛星「あすか」および「ASTRO-E」
の姿勢制御系
第 122 号 (2003 年 3 月) 新精測レーダ
第 123 号 (2003 年 3 月) 鹿兒島宇宙空間観測所 34m アンテナ科学衛星追跡局
第 124 号 (2003 年 9 月) 多層膜回析格子の開発

宇 宙 科 学 研 究 所 報 告

第 125 号

2003 年 9 月

発行者 宇 宙 科 学 研 究 所
〒 229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1
電話 (042) 759-8009
印刷者 藤原印刷 株式会社
〒 186-0003 東京都国立市富士見台 3-6-4
電話 (042) 573-3090

