

ミッション解析書

1. 背景

現在、世界各国において地球温暖化、オゾンホール拡大や異常気象といった地球レベルでの環境変動の原因を解明すべく全地球規模的な長期間の人工衛星による観測が続けられている。またその観測成果が増えたことによって、気候システムにおける温暖化しつつある世界およびその他の変化についての全体像が明らかになっており、過去の調査研究結果に基づいて将来の気候を予測する取り組みが進められている。それらの気候予測のために必要となる気候モデルの構築において、より精度の高いモデルを構築するためには雲の取り扱いや土壌水分、雪氷といった地表面の取り扱い、そしてフラックス（物体の表面を介した放射エネルギーと顕熱のエネルギーとのやり取り）調整の問題が改善されなければならない^[1]。

1988年に世界気象機関（WMO）と国際環境計画（UNEP）が共同で設立した国連の組織である気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、1990年のIPCC第一次評価報告書以来変わらず、「将来の気候予測での不確実性は、雲とその放射との相互作用から生じており、気候予測における大気大循環モデル（GCM）の不正確さの原因となっている」^[2]ことを報告している。雲は太陽放射を吸収、反射し（その結果、地表面を冷却する）、長波長放射を吸収、放射することができる（その結果、地表面を暖める）。それらの効果のどちらが大きいかは、雲の高さ、厚さ及び放射性特性に関係している。かなりの不確実性が残っているものの、雲の放射特性と時間発展は、大気の水蒸気、水滴、氷粒子、大気エアロゾルおよび雲の厚さの分布に依存することが分かっている。雲のパラメタリゼーションの物理的基礎はモデルの雲水収支の式に雲の微物理的性質のバルク表現を含めることによって大幅に改良された。雲は気候シミュレーションの潜在的誤差のうちのかなり大きな部分を占め、雲による太陽[放射]の吸収をモデルが系統的に過小評価する可能性は議論のある問題として残っている。

2. 目的

この衛星はモーションステレオによって雲を三次元的に捉え、雲の厚さを可視化するとともに雲頂高度の温度を観測し、雲のタイプの違いにより太陽放射がどの程度の反射、吸収を受け、また赤外放射がどの程度吸収、射出されるかを調べるためのモデルを構築し、気候モデルにおける雲の取り扱いに大きく貢献する。

地球の気象・気候学において雲の存在は大気中の熱収支の変化を大きく左右する原因であり、大気大循環モデルの不正確さの原因でもある。

永年の統計によれば地球表面積の45～55%は常に雲に覆われている。雲によって遮られる太陽放射量や吸収される地球放射量を見積もることは、地球の放射収支を考える上で非常に重要なことであり、気候変動を考える際の指標となる。

雲はアルベドが大きく（Table. 1）広範囲に存在するため、雲がないと仮定した場合に比べ、地球のアルベドをほぼ倍増させる効果を持っている。しかし、雲の寿命は短く、またよく変化するため、気候モデルにおいて雲を表現することは難しい。このため、雲の役割を正確に定量化することは簡単ではない。また地球放射の射出過程における雲の役割も正確には分かっていない^[1]。巻雲を除く雲の影響については、雲をいくつかの層に分け計算するスティーヴァンズ（Stephens）のモデルが用いられている^[3]が、現在の気候モデルは雲を二次元平板に置き換えて近似している。そのため雲の種類別による考慮は正確ではない。

Table.1 さまざまな表面状態によって日光が反射される割合(アルベド) ^[1]

地表面の状態	アルベド
熱帯雨林	0.01～0.15
森林地帯（落葉樹）	0.15～0.20
森林地帯（針葉樹）	0.05～0.15
農地や草地	0.16～0.26
裸地	0.05～0.40
半砂漠地帯や岩石砂漠	0.20～0.30
砂漠	0.30～0.45
ツンドラ	0.18～0.25
水（0℃～60℃） ^a	0.08 以下
水（60℃～90℃） ^a	0.10～1.0
新雪	0.80～0.95
海水	0.25～0.60
雪で覆われた草木	0.20～0.80
雪で覆われた氷	0.75～0.85
下層雲	0.60～0.70
中層雲	0.40～0.60
上層雲(巻雲)	0.18～0.24
雲（積雲）	0.65～0.75

^a 太陽が天頂に近いほど、より多くの日射量が吸収される。
また水面に白波が存在すると、アルベドは増加する。

また雲の種類によっては雲の寿命が短い雲もあり、観測が困難である。太陽同期軌道の観測衛星では雲の成長を観測するために同じ地点に戻るまで約14日を要する。そこで複数機による観測が必要となる。積乱雲は雲の種類の中で極めて成長が早く、その成長はおよそ30分で終了する。この成長を発達期、成熟期、衰弱期の3タームに分け、10分間隔で観測するのが望ましい。これを達成するためには同一地点上空を10分おきに通過するような軌道とする必要がある。そのためには昇交点赤経を2.5°ずつ、ずらした軌道面に衛星を1機ずつ10分間隔で投入する。投入には目的軌道より10分軌道周期の長い楕円軌道を利用する。

大気大循環モデル（GCM）における雲の取り扱い、改善する必要がある。最も基本的な意味で、雲のタイプの違いにより太陽放射がどの程度の反射、吸収を受け、また赤外放射がどの程度吸収、射出されるかを高い精度で理解しなくてはならない。雲は赤外線をよく吸収し射出する。このため、雲の厚さと雲頂高度の温度は、雲が宇宙空間に射出するエネルギー量を規定するときに極めて重要となる。^[1]

雲を二次元平板ではなく三次元的に捉え、モデル化することは雲の厚さと高さが分かり、雲の種類の違いにより太陽放射がどの程度の反射、吸収を受け、また赤外放射がどの程度吸収、射出されているかを知るのに重要な役割を果たす。

3. ミッションの概要

地球の気象・気候学において雲の存在は大気中の熱収支の変化を大きく左右する原因であり、大気大循環モデルの不正確さの原因でもある。この衛星は3機を1チームとするフォーメーションフライトにより雲の短時間での変化を10分間隔で観測し、100mの精度で雲を三次元的に捉え、モデル化することで雲のタイプの違いにより太陽放射がどの程度の反射、吸収を受け、また赤外放射がどの程度吸収、射出されているかを知るのに必要なモデルを作成する。また雲が宇宙空間に射出するエネルギー量を規定するときに極めて重要となる雲頂点での温度も合わせて観測する。

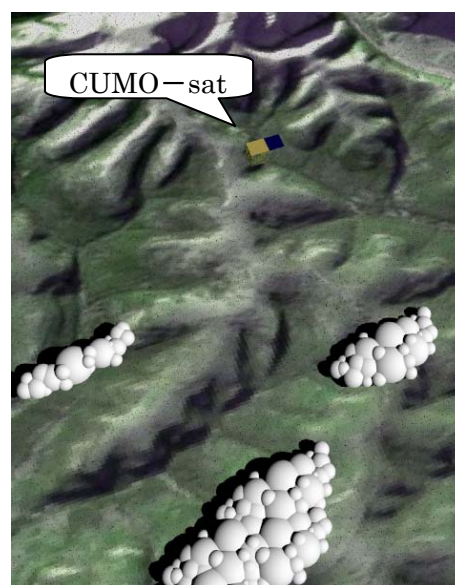


Fig 1. CUMO-sat の外観図

3.1 要求

この衛星は3機で1チームとするフォーメーションフライトで1日における雲の変化を観測し、異なった軌道上の3機を用いることにより観測間隔の時間短縮を実現する。

雲をモーションステレオ視で捉え、全球観測では得られない100mの精度で三次元的にモデル化することで雲のタイプ別に赤外放射の吸収、射出、散乱の特性を調べることができる。そのため空間分解能を10mとするメインカメラが要求され、撮影された画像の解析に必要な周辺環境を観測するために広範囲の撮影可能なサブカメラ及び雲が宇宙空間に射出すエネルギー量を規定するとき極めて重要となる雲頂点での温度を観測するために必要な赤外線装置が必要となる。また1回の打ち上げで雲の時間変化を観測するために必要な3機を同時に打上げる方法を想定している。

Table 2. CUMO-sat 仕様

目的	・モーションステレオによる雲の三次元モデル作成
形状	1翼式太陽電池パドルを有する箱型
質量	約 150 kg
運用軌道	高度280[km]の極軌道
運用期間	1年間
姿勢制御方式	3軸姿勢制御
搭載観測機器	メインカメラ サブカメラ 赤外線温度測定装置

3.2 観測機器

通常の現業用レーダーを利用しただけでは降水だけしか探知できないので、雲分布とは異なって見える。エコーのあるところには雲はあるが、エコーのないところは雲がないとは限らないので、レーダーでの観測は不十分であり、静止気象衛星の広域な画像からは低気圧、台風、前線などの全貌と特徴を捉えることはできるが、高緯度地域では雲を斜めに見ている欠点があり、100m程度の雲の形状ならびに雲頂高度、雲頂温度を観測することは難しい。また航空機による観測では局所的な観測に止まり、雲の雲量（全体的な形状）を観測することが困難である。よって可視光による画像で10mオーダーの高分解能のデータが必要となる。

3.2-1. メインカメラ

主ミッションである雲の3次元化モデルを作成するために必要な画像を撮影する。メインカメラのミッション要求は精度が100mであり、小さな雲を補足できるよう10m空間分解能を持つことである。よって1ピクセルで10mの分解能を要求する。

高度400kmから撮影に対する、焦点距離、空間分解能力、被写体幅、被写体高さ、を計算する。

CCD画素数を2400（幅）×1800（高さ）、
 CCD画素寸法は $x = 9.0\mu\text{m}$ のものを使用する。

$$\text{焦点距離}[f] = \frac{\text{距離}[h] \times \text{CCD画素寸法}[x]}{\text{空間分解能力}[d]}$$

被写体幅 = 空間分解能 × ピクセル数（幅）

被写体高さ = 空間分解能 × ピクセル数（高さ）

ここでCCD画素寸法は $x = 1.22 \frac{\lambda}{D} [\text{rad}]$ で表され、

可視光の波長は $\lambda = 0.5\mu\text{m}$ 程度であることから
 メインカメラのレンズ径 D を求めると

$$D = 1.22 \frac{\lambda}{x} = 6.8[\text{cm}]$$

得られた結果を Table.3 に示す。

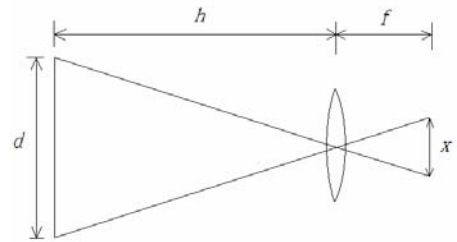


Fig.2 CCDカメラ撮像における
 幾何学的関係^[5]

Table 3. メインカメラの緒元

焦点距離[mm]	空間分解能[m]	被写体幅[km]	被写体高さ[km]	被写体面積[km ²]	撮影範囲例
360	10	24	18	432	神奈川県横浜市

3.2-2. サブカメラ

メインカメラが撮影した周辺環境を撮影し、特定の雲の範囲を正確に捉える。

サブカメラのミッション要求は、地球の表面積の40分の1程度が撮影できることである。

CCD画素数は640（幅）×480（高さ）である。

Table 4. サブカメラの諸元

焦点距離[mm]	空間分解能[m]	被写体幅[km]	被写体高さ[km]	被写体面積[km ²]	撮影範囲例
18	200	128	96	12288	日本全体面積 1/2

3.2-3. 赤外線装置

雲が宇宙空間に射出するエネルギー量を規定するとき極めて重要となる雲頂点での
 温度を観測するのに必要である。そこで赤外線装置で雲頂点の温度を計測する。これ
 はメインカメラの切り替えによって行われる。

4. 軌道決定

CUMO-Sat は地球観測衛星であり、雲の成長を観測するために精度を上げるため、低軌道(LEO)の極軌道(Polar Orbit)を利用する。衛星 1 機では雲の成長を観測することは極めて困難であるので 3 機で 10 分おきに観測する必要がある。そこで 10 分後に同地点上空を衛星が次々に通過するような回帰日数 1 日の準回帰軌道を決定する。

- (i) はじめに、周回数を変えて地表からの軌道高度、及び最大食時間を計算し、計算結果から適当な周回数決める。計算結果を Table.5 に示す。

Table.5

周回数	17	16	15	14	13
周期 [hour]	1.41	1.5	1.6	1.71	1.85
軌道高度 [km]	10.9	274.4	566.9	893.8	1262.1
最大食時間 [min]	40.78	36.74	35.57	35.02	34.83

また食時間のタイムテーブルを Fig.4 に示す。ミッション機器である CCD カメラの性能を十分に発揮できる高度を考慮すると周回数は 15 回かあるいは 16 回が望ましいことが分かる。ここでは最大食時間において両者間に約 1 分の差が生じたが、軌道高度のメリットから周回数 16 回を採用する。

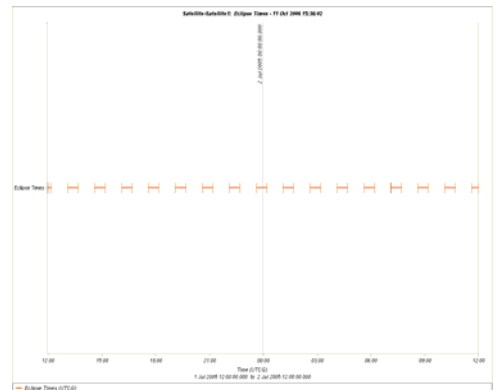


Fig.3 食のタイムテーブル

- (ii) 次に 3 機の衛星がそれぞれ 10 分後に同一地点上空を次々に通過するような軌道を決定する。地球の自転を考慮し、それぞれの昇交点赤経を 2.5° ずつ変えた軌道面に 10 分おきに 1 機ずつ CUMO-Sat を投入する方法を採用する。そのために 10 分の差をつけて極軌道に投入するための楕円軌道が必要となる。北極側からの外見図を Fig.4 に示す。また地表面軌跡を Fig.5 に示す。

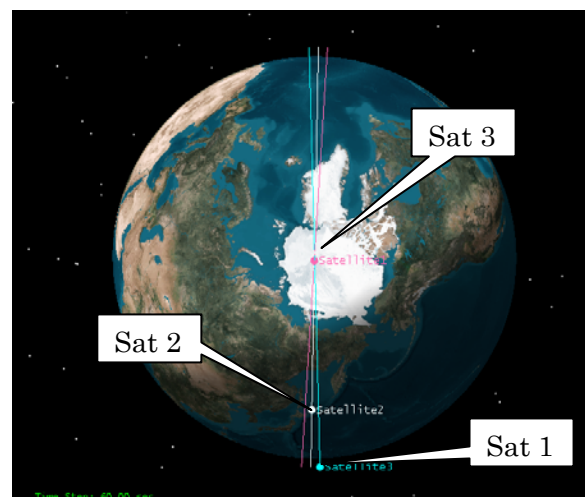


Fig.4 極軌道外見図

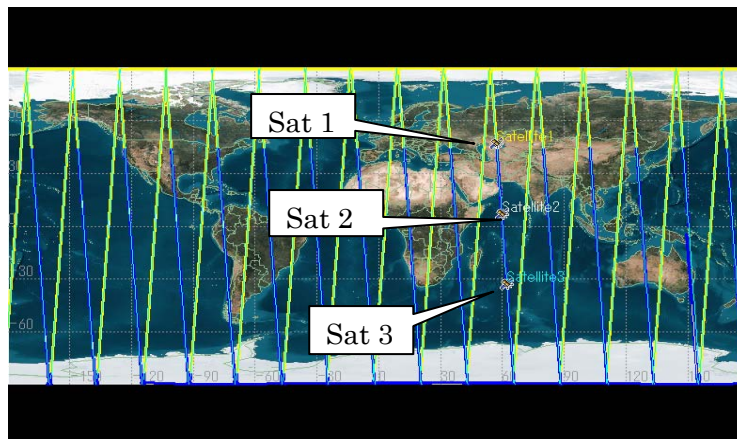


Fig.5 CUMO-sat の
地表面軌跡

(iii)(i)で求めた極軌道に CUMO - Sat を投入するための長楕円軌道を設定する。投入の方法には以下の2種類が考えられる。

- 1) 高高度の長楕円軌道から低高度の極軌道に投入する。
- 2) 低高度の長楕円軌道から高高度の極軌道に投入する。

どちらか一方を選択するために、軌道面変更に必要な推進薬重量および軌道投入の正確さから判断して決定することにした。

楕円軌道から目標の極軌道に投入するために使用する推進薬重量を少なくするために、楕円軌道を数回周回して目標軌道周期の10分前後の周期になるように設定する。

ツィオルコフスキーの公式を用いてイグニッション速度を求める。

計算結果を Table.6,7 に示す。ただし、軌道の昇交点赤経を基準とし、 5.0° ずらした極軌道に軌道面を変更するために必要なイグニッション速度を ΔV_1 、 2.5° ずらした極軌道に軌道面を変更するために必要なイグニッション速度を ΔV_2 、そのまま極軌道に軌道面を変更するために必要なイグニッション速度を ΔV_3 とする。

Table.6 高高度の長楕円軌道から低高度の極軌道に投入するとき

周回回数	近地点までの地表高度[km]	ΔV_1	ΔV_2	ΔV_3
1	274.41	0.733	0.423	0.256
2	274.41	0.695	0.367	0.136
3	274.41	0.686	0.352	0.092
4	274.41	0.681	0.346	0.069

Table.7 低高度の長楕円軌道から高高度の極軌道に投入すると

周期回数	近地点までの地表高度[km]	ΔV_1	ΔV_2	ΔV_3
1	-730.4	0.735	0.462	0.323
2	-223.1	0.686	0.367	0.152
3	-56.17	0.678	0.349	0.099
4	26.87	0.676	0.344	0.074

Table.7から低高度の長楕円軌道から高高度の極軌道に投入する方法では不安定であり、目標軌道投入まで時間がかかるので適切でないことが分かる。

次に高高度の長楕円軌道から低高度の極軌道に投入する際何回周回するかを決定する。軌道面変更に最も推進剤を必要とする昇交点赤経変更角度 $\phi = 5^\circ$ の時の周回回数とイグニッション速度の関係を Fig.6 に示す。Fig.6 から周回回数は2回が適切であると考えられる。

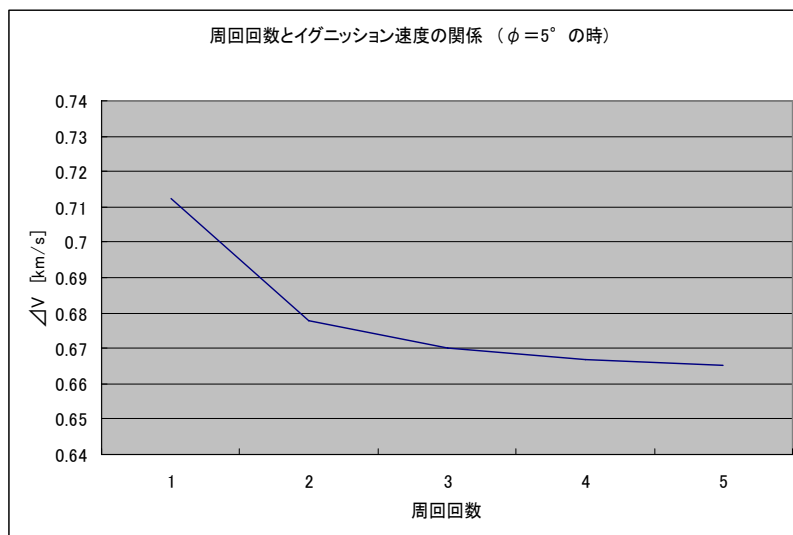


Fig.6 周回回数とイグニッション速度の関係

5. 雲のステレオ視

本衛星の目的でもある雲の3次元モデル作成において雲を観測する方法として、レーダーを用いる方法と赤外線を用いる方法があるが、レーダーを用いる方法では雲の内部において乱反射及び散乱するので受信電波にノイズが入り、正確な情報が得られない。また赤外線を用いる方法では昼間のみならず、夜間においても観測可能であり、光が当たっていない部分の雲を捉えることができるが、解像度に限界があるので、低軌道観測で可視光線による昼間に限定した観測を行なうものとする。またステレオ視に必要な画像を衛星1機で収集できるモーションステレオ技術を採用する。

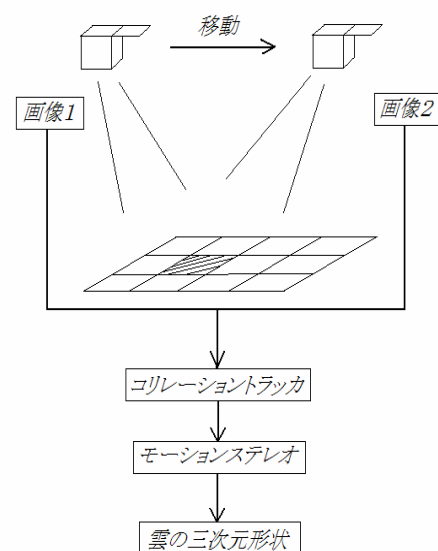


Fig.7 ステレオ視

6. モーションステレオ

Fig.8 に示すように、同じ内部パラメータを持つ 2 台のカメラを、光軸の方向をそろえ、視点（光学中心）の高さもそろえて置いたステレオを平行ステレオ、またはベースラインステレオ（base-line stereo）という。^[5] 左右の光学中心を結ぶ線分（基線：ベースライン（base-line））を決めるだけで、あとの全てのパラメータが決まるので、こう呼ばれる。

平行ステレオからの 3 次元空間の奥行き（depth）の決定は容易で、図のように、点 $P(X, Y, Z)$ がそれぞれ左、右の画像上の (x_l, y_l) , (x_r, y_r) に

像を結べば

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad Y = \frac{by}{d} \quad Z = \frac{bf}{d}$$

ただし、 f はカメラの焦点距離 $y_l = y_r$ であるので、 y はこの値、 b はカメラ間の距離（基線長）、そして $d = x_l - x_r$ で、この値を視差（disparity）とする。このステレオでは、左右画像での対称点の横方向のずれである視差がすべてを決めている一番重要な値であり、対象の奥行きはこの視差だけで決まる。モーションステレオはベースラインステレオを発展させ、軌道上の CUMOSAT が移動中に連続して雲を撮影し、1 枚目を「画像 1」、2 枚目を「画像 2」とし、2 枚の画像をコリレーショントラッキングした後に視差を利用して雲を三次元的に立体視することである。

7. コリレーショントラッカ

雲の形状は輪郭が明確でなく、コントラストに乏しく、短い時間で雲の形が変化するので、モーションステレオで必要となる画像間での対応点抽出が難しい。そこで、画像を 10 ピクセルで 1 ブロックになるようにブロック分けし、そのブロックを用いて相関演算するコリレーショントラッキングを用いて対応点を算出する。雲表面の模様を追尾対象とし、コリレーショントラッキングの手

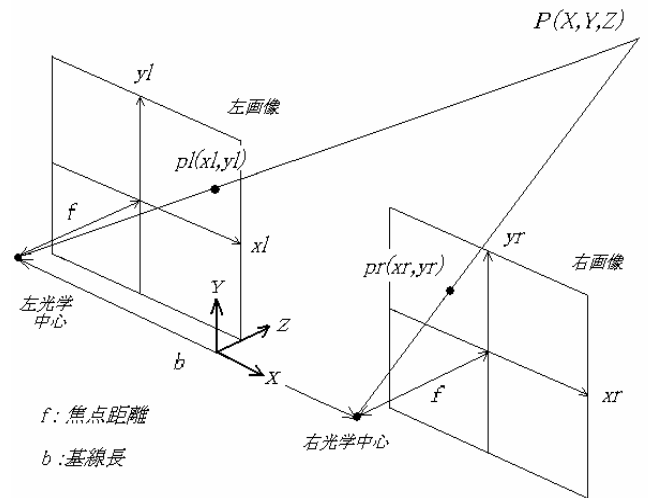


Fig.8 平行ステレオ（base-line stereo）

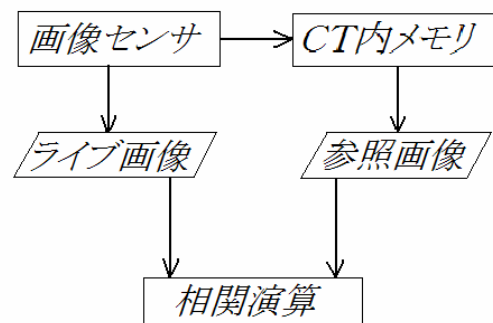


Fig.9 コリレーショントラッカ

法を用いて参照画像とライブ画像での対応関係を算出する。メインカメラで撮影した画像をメモリに保存し、これを参照画像とする。時間をあけて撮影した画像をライブ画像として参照画像と相関演算する。

$P(x, y)$ を各ピクセルの画像の輝度値とすると

$$V(nx, ny) = \sum_x \sum_y (P(x, y) - P(x + nx, y + ny))^2$$

$V(nx, ny)$ が最小となる nx, ny を求める。

この nx, ny が移動量すなわち視差となる。

雲の立体モデル形状を作成 (Fig.10) し、それを用いて濃淡変化の乏しい模擬的な雲の画像 (Fig.11) を作成した。この画像を用いてコリレーション演算により対応点を算出し、ステレオ視した結果を Fig.12 に示す。Fig.10 と Fig.12 を比較しても分かるように、結果は妥当であると言える。

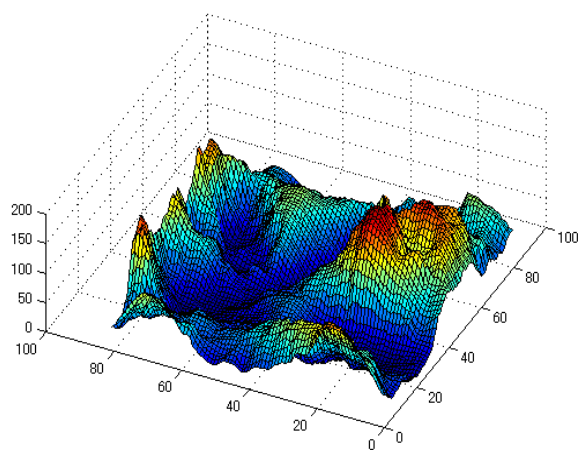


Fig.10 雲の立体モデル

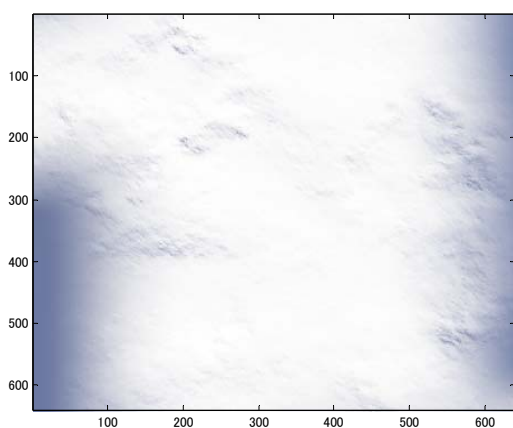


Fig.11 CGによる雲の画像

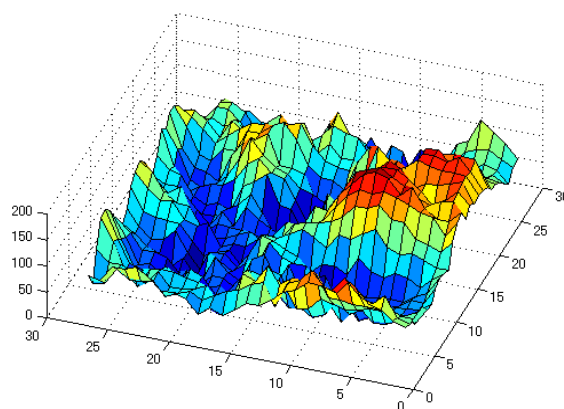


Fig.12 コリレーショントラッカを用いて算出した雲の立体モデル

8. 結論

モーションステレオによって雲を三次元的に捉え、雲の形状を可視化するとともに雲頂高度の温度を観測する小型衛星を提案した、この衛星は次のような特徴を持つこととした。

- ・ 全球観測衛星では観測できなかった高解像度を必要とする雲を観測し、三次元モデルを作成することにより、雲のタイプの違いにより太陽放射がどの程度の反射、吸収を受け、また赤外放射がどの程度吸収、射出されているかを知るのに重要な役割を果たす。また大気循環モデルにおける雲のタイプ別による役割の定量化の解明に寄与し、気候モデルの改善に役立てる。
- ・ 衛星の大型化を避け、同機種による複数打ち上げ、及びフォーメーションフライトを実施することで衛星1機あたりの開発生産コストを引き下げ、今まで観測が困難であった寿命の短い雲の成長の一部始終を観測することが可能となる。

9. 参考文献

- [1] 『気候変動—多角的視点から—』 シュプリンガーフェアラク東京
- [2] 『IPCC 地球温暖化第三次レポート』 IPCC 気候変動に関する政府間パネル編 中央法規
- [3] 『人間空間の気象学』 近藤裕昭著
- [4] 『衛星設計入門』 茂原正道・鳥山芳夫共編 培風館
- [5] 『ロボットビジョンの基礎』 出口光一郎著 コロナ社