

- 修士論文 -

画像を用いた月惑星表面への  
着陸航法

平成19年2月2日

指導教員：中谷 一郎 教授

東京大学大学院 工学系研究科 電子工学専攻

56441 田村嘉章

## 内容梗概

For an unmanned exploration on the moon or a planet, an autonomous lander is necessary. This paper describes a method to recognize obstacles on the lunar or planetary surface for landers. The proposed method smoothes an image and uses a second moment of the gray-level image data for estimating high obstacles and rough terrains. The definition of safety for the lander depends on the height of obstacles. This paper proposes this method and the relation between the height of obstacles and the second moment. The simulation results of the proposed method are shown. The effectiveness of the proposed method is also discussed.

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.1.1 過去の着陸ミッション	2
1.2 研究の目的	4
1.3 本論文の構成	4
<b>第2章 従来 of 地形認識手法</b>	<b>5</b>
2.1 LRF (Laser Range Finder) スキャン法	5
2.2 影を用いた障害物回避	6
2.3 ステレオカメラを用いた手法	6
2.4 shape from shading を用いた月面地形の推定	7
2.5 地形カテゴリに基づく地形認識	8
2.6 Hapke モデルに基づく地形認識	8
2.7 輝度値の局所統計量を用いた手法	10
2.8 月惑星ランダによる障害物回避への既存手法の適応性	12
<b>第3章 輝度二次モーメントを用いた障害物回避手法</b>	<b>14</b>
3.1 着陸地点に必要とされる条件	14
3.2 提案手法の概要	15
3.2.1 輝度と二次モーメント	15
3.2.2 提案手法	16
3.3 岩石上への着陸危険度の判定	17
3.4 クレータへの着陸危険度の判定	17
3.5 障害物が多数分布する場合	18
3.5.1 平均化処理	18
3.5.2 空間周波数領域での平滑化	19
<b>第4章 シミュレーションによる検証</b>	<b>21</b>
4.1 凸半球	21
4.1.1 半球の半径と高さに変化する場合	21
4.1.2 半球の半径一定で高さに変化する場合	24
4.1.3 半球の高さ一定で底面の半径に変化する場合	25
4.1.4 太陽仰角が変化した場合	27
4.2 凹半球	30

---

4.2.1	半球の深さと半径が変化する場合 . . . . .	30
4.2.2	凹半球の半径が一定で深さが変化する場合 . . . . .	34
4.2.3	太陽仰角が変化した場合 . . . . .	35
4.3	クレータ . . . . .	37
4.3.1	太陽仰角が変化する場合 . . . . .	39
4.4	障害物が多数分布する場合 . . . . .	39
<b>第5章</b>	<b>複雑地形に対するシミュレーション解析</b>	<b>42</b>
5.1	異なる大きさの障害物に対する検討 . . . . .	42
5.2	複雑な地形に対する検討 . . . . .	49
5.2.1	シミュレーション検討 . . . . .	49
5.2.2	ウインドウ内に障害物の一部が含まれる場合 . . . . .	56
5.2.3	障害物の中央とウインドウの中心を一致させた場合 . . . . .	59
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>63</b>
	<b>参考文献</b>	<b>64</b>
	<b>謝辞</b>	<b>67</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

人類は常にその活動領域を拡大してきた。その源は、人類のDNAに組み込まれたフロンティア精神であり、それは人類が生物である所以である。私たち人類は、このDNAに従い、知的好奇心を充たすため数々の宇宙探査ミッションを行ってきた。ソビエト連邦のLuna 1号に始まり、世界の宇宙開発競争の中で人類は自らが作った宇宙探査機を太陽系外まで到達させることができるまでになった<sup>1</sup>。

近年月惑星の探査計画への関心が高まっている。現在、NASA<sup>2</sup>のMars Exploration Roverによる火星表面の岩石および土の調査が行われている。また、NASAの探査チームはリターンも視野に入れた将来の月への有人宇宙探査に関する新たな戦略を打ち出した。そのほか、欧州のESA<sup>3</sup>、中国、インドも月探査に向けた研究を行っている。日本ではJAXA<sup>4</sup>が小惑星探査機はやぶさを小惑星Itokawaに2005年11月にタッチダウンさせることに成功したことは記憶に新しい(Fig.1.1)。また、無人の探査機を送り、月面で各種の観測を行う次期ミッションを検討している。



Fig 1.1: 小惑星 Itokawa と探査機はやぶさ

月惑星の探査を行う際、月惑星表面上での探査が必要不可欠となる。これは、表面上での探査は軌道上からの観測と異なり、地質の探査や試料の採取などを行うことができるからである。地質の探査はその天体の起源を知ることができ、太陽系の成り立ちを知るきっかけとなる。また、試料の採取は地球外生命の存在の解明につながる可能性がある。

---

<sup>1</sup>米国によって打ち上げられた探査機 Voyager は太陽系惑星の観測後、太陽系外へ向かった

<sup>2</sup>National Aeronautics and Space Administration

<sup>3</sup>European Space Agency

<sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構

## 1.1 研究の背景

---

月惑星表面上に探査機を送る際、表面上に安全に着陸する技術が必要である。本研究では着陸に焦点を当て、安全に着陸する手法について検討を行った。

### 1.1.1 過去の着陸ミッション

今まで、様々なミッションにおいて月惑星表面への着陸が行われてきた。ここでは、それらのミッションについて取り上げ、それぞれの着陸の手法について述べる。

#### 有人ミッション

今日まで人類が地球以外の天体に足を踏み入れたミッションは、Apolloのみである。Apollo計画では、”That’s one small step for a man, one giant leap for mankind.”(これは一人の人間には小さな一歩だが、人類にとっては大きな飛躍だ)という、あまりにも有名な言葉を残したニール・アームストロング船長が乗ったApollo 11号からApollo 17号まで、計7回のミッションが行われた<sup>5</sup>。

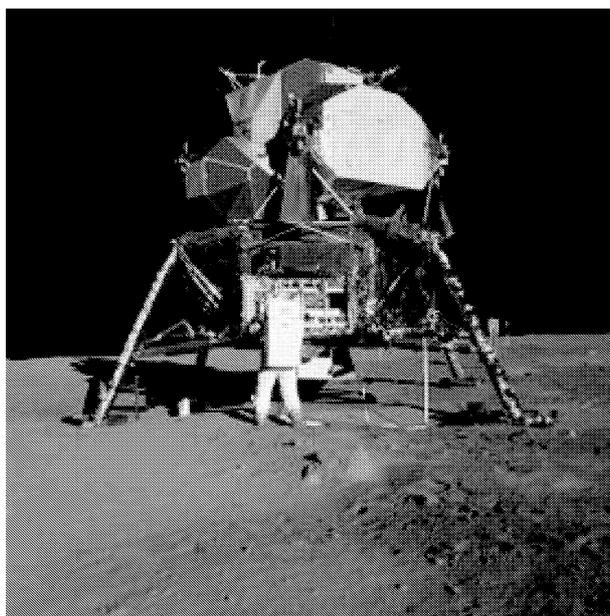


Fig 1.2: 月面の月着陸船 (Apollo 11号)

Apollo計画では、月面への着陸の際、宇宙飛行士が機上で月面の障害物を認識し、誘導を行った。月面地形の認識は、人間の目によって行われた。すなわち、人間の視覚情報からの障害物認識能力により着陸が行われた。

#### 無人ミッション

人類史上初めて地球以外の天体を目指した探査機は、ソビエト連邦のLuna 1号である。それから現在に至るまで、多くの探査機が各国により作られ、探査を行ってきた。

---

<sup>5</sup>ただし、そのうち1回、Apollo 13号は事故のため着陸していない

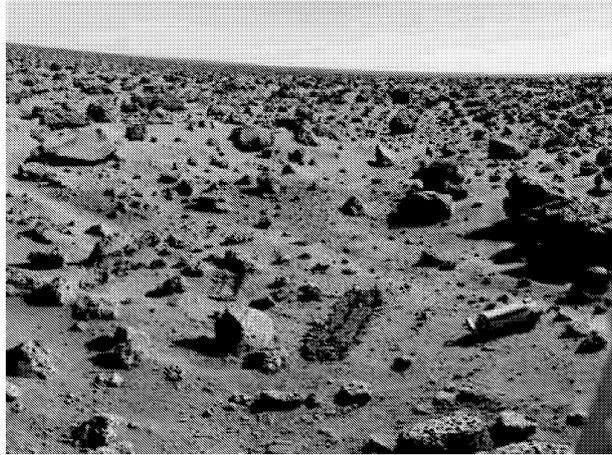


Fig 1.3: Viking によって撮られた火星表面

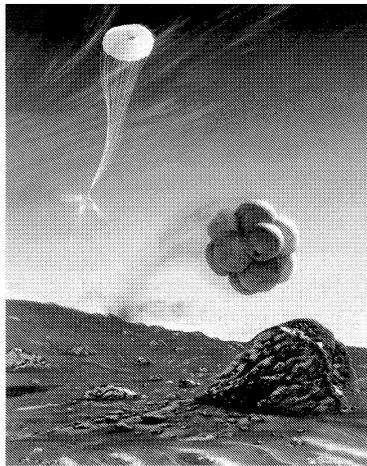


Fig 1.4: エアバッグとパラシュートを用いて着陸する想像図

月においてはソビエト連邦の Luna, 米国の Ranger, Surveyor によって月面の探査がなされた。これらのミッションでは、着陸の際、月面の地形認識や障害物回避は行わず、高度計のみによって着陸が試みられた。実際の成功率は、それぞれ 6/12, 6/7, 5/7 であった。これらの確率は、当時の冷戦構造での国家の威信をかけた競争の中においては許されるものであった。しかし、特に現在の日本では、これらの計画のような低確率での実行は、受け入れられるのは難しい。

火星においても、過去に米国の Viking によって探査が行われ、現在も Mars Pathfinder によって探査がなされている。Viking では月での Luna, Ranger, Surveyor と同様に地形認識は行わず着陸を行った。この時、Viking は 2 回とも軟着陸に成功し Fig.1.3 のような火星表面の画像を地球に送信してきた。

Mars Pathfinder では、Fig.1.4 に示すように、着陸の際パラシュートとエアバックを用いることにより着陸時の衝撃を吸収する手法がとられた。この時 Mars Pathfinder は着陸地点を選定しながらの着陸は行っておらず、Viking と同様に地形の認識を行っていない。この手法はスラスタによる逆噴射を行っての着陸に比べ、着陸システムのコストが低く抑えることができる利点がある。しかし、火星のように大気が存在する天体には有効である

が、月のように大気が存在しない天体には有効ではない。

## 1.2 研究の目的

Apollo 計画では月惑星表面に着陸をする際、人間が視認して着陸地点を選定した。現在も、NASA の探査チームは月面での有人探査を再び計画している。

しかし、有人ミッションでは人命の危険が伴う。Apollo 計画などでは比較的障害物が少ない安全な地点で着陸を行ったが、今後もっと障害物が多く、表面の凹凸が激しい領域へのミッションも考えられる。その際、有人による探査よりも無人探査機による表面の探査が有効であると考えられる。

月惑星表面上で無人探査機による探査を行う際、無人の着陸技術が要求される。無人着陸機が月惑星上に着陸する際、無人の宇宙機を地上の人間が遠隔操作することが考えられる。しかし、宇宙特有の問題として通信(電波)の大きな往復伝播遅延が存在する。地球から最も近い天体である月でさえ往復で最低 2.6 秒、火星では 8 分である。その為、遠隔操作した際、特に重力の大きな天体上ではホバリングをするのに莫大な燃料を要し、地上支援を待つことが困難となる。そこで、探査機が自ら地形を認識し、障害物を避け、安全に着陸する場所を選定するシステムが必要となる。

自律による月面の障害物判別にはさまざまな手法が提案されている。レーザを用いた手法、2つのカメラを用いたステレオ視 [14]、単眼による複数画像からの地形認識 [4]、1枚の画像からの地形認識 [17][15] などの手法が検討されている。これらの手法には、それぞれメリットとデメリットが存在するが、どれも決定的な手法とはいえない。詳細は第2章で述べる。

本論文では、濃淡画像を用いて着陸最適地点を選定する方式を検討する。

## 1.3 本論文の構成

本論文は以下のような構成とする。

- 続く第2章では、現在までに提案された地形認識手法について述べる。自律による地形認識手法には様々な手法が提案されている。それぞれ、メリットとデメリットが存在し、個々にそれらについて述べた後、最後にまとめる。

## 第2章 従来の地形認識手法

障害物の推定，ならびに地形認識には様々な手法が提案されている．最初に述べる LRF(Laser Range Finder) スキャン法以外は画像を用いる手法である．また，最後に述べる地形カテゴリを用いた手法は山や谷などの地形の性質を認識することを主な目的とする手法である．従来手法の概要について述べ，最後にそれらの自律ランダによる障害物推定への適応性について述べる．

### 2.1 LRF (Laser Range Finder) スキャン法

LRF(Laser Range Finder) は，Fig.2.1 のようにレーザ光を対象物に反射し，跳ね返ってくるまでの時間を計測することによって，その物体までの距離を測るものである．通常は高度計に使用される．これを探査機に搭載し，LRF を 2 次元的にスキャンすれば，探査機の下にある地形の 3 次元形状を知ることができる．この手法は 3 次元形状を直接知ることができるので，画像を用いた地形認識よりもデータの信頼性が高い．また，直接着陸に安全な領域，すなわち水平で平坦な領域を抽出することができる．しかし，この LRF スキャ

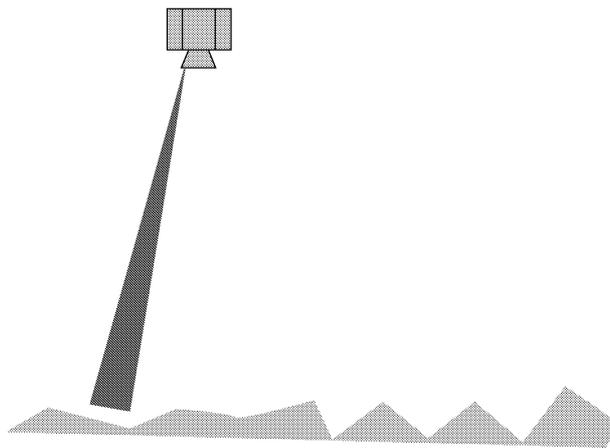


Fig 2.1: 着陸機から月惑星表面にレーザが照射される．

ンでは，いくつかの問題点がある．まず，レーザ・ダイオードの出力に限りがあり，3次元形状を計測できる高度が0.5~100[m]と高度が限られてしまう．次に，2次元スキャンをしている間にも宇宙機が振動してしまう．これを考慮して3次元形状を計算しようとするとき，アルゴリズムが複雑になり，処理時間も大きくなってしまう．

## 2.2 影を用いた障害物回避

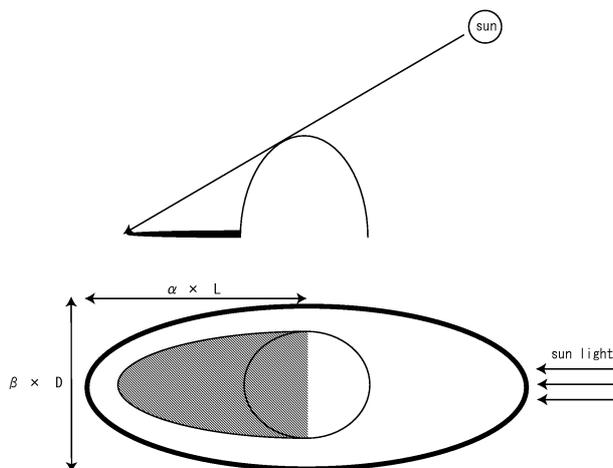


Fig 2.2: 影周辺領域を危険領域と定義する.

影を用いた障害物の推定である。月面上に岩などの障害物が存在する場合、影が発生する。大きな障害物が存在する場合、その周りにも、障害物が比較的多く存在することが予想される。そのため、影を積極的に利用し、影により、障害物の散在可能領域を定義する手法である。Fig.2.2のように影の長さや幅に対してあるマージン ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) を取った領域を障害物が存在する可能性が高い領域として定義する。この手法は単純なアルゴリズムであり、大きな岩石などの障害物は高確率で推定することができる。しかし、月惑星の極域や朝夕など、太陽の仰角が極端に低い場合には、影が非常に長くなり、測定することができなくなる。また、影ができないような緩やかな山などの障害物には適用することができない。

## 2.3 ステレオカメラを用いた手法

両眼ステレオ視は三角法の原理を用いて画像から対象の形状を復元する手法である。ステレオ視には多眼ステレオ視や移動ステレオ視などの手法があるが、ここでは両眼ステレオ視について説明する。両眼ステレオ視は2台のカメラに写る物体画像の位置のずれを画像処理により検出し、三角法によって奥行き画像を得る手法である。3次元位置は以下の式で求まる。

$$x = \frac{P_L}{P_L - P_R} d \quad (2.1)$$

$$y = \frac{fd}{P_L - P_R} d \quad (2.2)$$

$$z = \frac{P_h d}{P_L - P_R} d \quad (2.3)$$

このステレオ視の奥行きの情報の分解能は、対象物までの距離の2条に比例し、カメラ

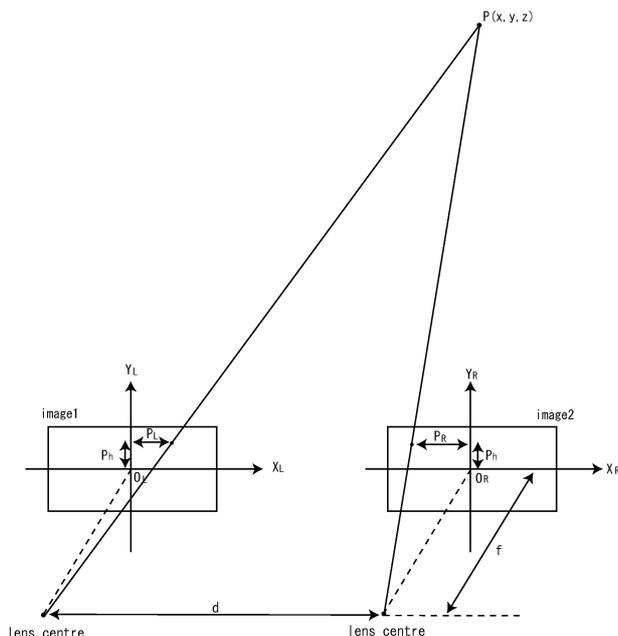


Fig 2.3: Schematic diagram of trigonometry in stereo matching.

間の距離（ベースライン距離）に反比例して劣化する。探査機に2台のカメラを搭載させる場合、ベースライン距離はせいぜい1[m]なので、高高度では地形の3次元形状推定の精度は悪くなってしまふ。この問題を克服する方法としては、探査機に1台だけカメラを載せ、探査機の移動前・移動後の画像をマッチングすることによる、移動ステレオ視がある。探査機の移動を大きくすれば、ベースライン距離を大きくすることができ、地形の3次元形状推定の距離を浴することができる。

ステレオ視では、ひとつのカメラ画像上の物体までの距離を知りたい場合、そのピクセルに対応するピクセルがもうひとつのカメラ画像においてどこにあるかを探し出す。しかし、平坦な地形のように一様で特徴の無いテクスチャ領域では、このマッチングを行うことが困難となり、3次元形状復元ができない。

## 2.4 shape from shading を用いた月面地形の推定

shape from shading[15]は一般的には、一枚の画像から表面形状の復元を行う手法である。陰影画像の反射率、光源分布から3次元形状を復元する問題であり、3次元形状、表面の反射特性、光源分布から陰影画像を合成するシェーディング処理の逆問題を解く。この手法は、連続な地形の場合地形の高さを推定することができ、惑星探査のミッションなどで、天体の形状を推定することに使用されている。しかし、この手法は不連続な地形の場合安定して地形を推定することができないという問題がある。また、逆問題を解くため、非常に多くの計算を要し、オフラインで地形の分析を行うには有用である[16]が、実際に着陸を行いながらオンラインで用いるのにはあまり向かない。

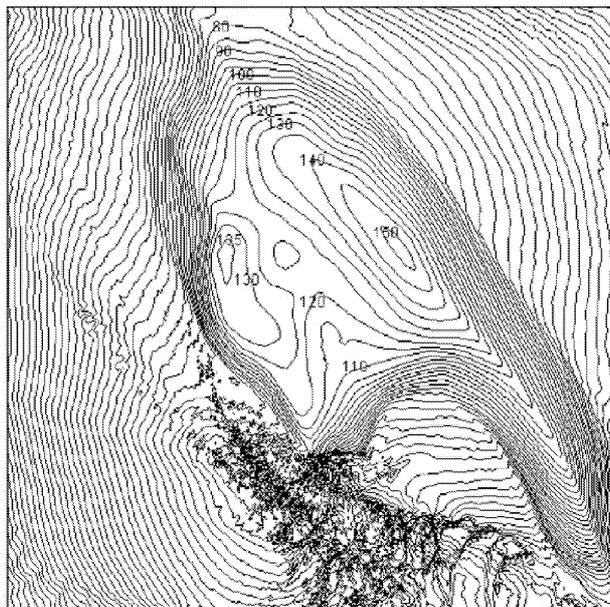


Fig 2.4: Contour maps derived from shape-from-shading.

## 2.5 地形カテゴリに基づく地形認識

この手法は、「地形」を「法線方向の面的な分布」として定義する。宇宙科学ミッションでは、探査対象となる地形が、「大きな山」といった定性的な概念で与えられることも少なくないことから、地形概念として「山」、「尾根」、「谷」、「窪地」といった定性的な地形カテゴリをあらかじめ規定する。このような、地形カテゴリをあらかじめ準備することにより、shape from shadingのような逆問題を回避し、順問題として直接的に地形を認識することが可能になる [19]。地形カテゴリと地形画像をマッチングさせることにより、山、谷、窪地など理学的興味にあわせて着陸地点を選定することができる。この手法は、着陸に安全な領域を選定する事よりも、主に地形の性質を分類することに主眼が置かれている。

## 2.6 Hapke モデルに基づく地形認識

月のように大気に覆われない天体は、宇宙空間にさらされており、様々な大きさの物体が絶え間なく衝突している。そのため、これらの天体は、塵、岩石、クレータから飛び出した飛散物などが細かくなってできた層、レゴリスで覆われている。レゴリスのような粒子状物質で覆われている地形の反射モデルを Hapke モデル??といい、Fig.2.6 に示すように角度を定義したとき以下のような数式で表現される。

$$r(I, E, \alpha) = \frac{w}{4\pi} \frac{1}{1 + E/I} \{ [1 + B(\alpha)] \dots \\ p(\alpha) + H(I)H(E) - 1 \} \quad (2.4)$$

$$I = \cos i \quad (2.5)$$

$$E = \cos e \quad (2.6)$$

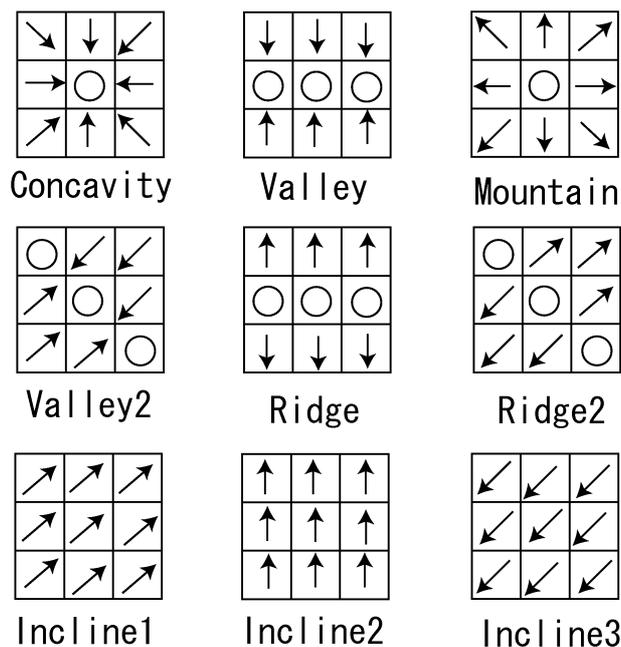


Fig 2.5: An example of a category of a terrain.

$$B(\alpha) = \frac{B_0}{1 + (1/h) \tan(\alpha/2)} \quad (2.7)$$

$$p(\alpha) = \frac{1 - g^2}{(1 + 2g \cos \alpha + g^2)^{3/2}} \quad (2.8)$$

$$H(x) = \frac{1 + 2x}{1 + 2\sqrt{1 - wx}} \quad (2.9)$$

ここでは、 $i$  は太陽光の入射角、 $e$  は反射光の出射角、 $\alpha$  は太陽光と出射角のなす角である。また、式 (2.4)、式 (2.9) のパラメータ  $w$ 、 $h$ 、 $B_0$ 、 $g$  は地質によって異なる値を持つ。

実際に Hapke モデルを用いて地形を認識する際、まず始めに、太陽入射光の方向は既知であり、探査機が着陸している間是不変であるとする。また、Hapke の 4 つのパラメータは何らかの方法で既に得られているものとする。ここで、太陽光の入射ベクトルを  $\mathbf{a}$ 、時刻を  $i$  における探査機の位置からある天体表面の地点までの方向ベクトルを  $\mathbf{x}_i$  とする。このとき、式 (2.4) は以下のように書き直すことができる。

$$r_i = \frac{w}{4\pi} \frac{1}{1 + E_i/I} \{ [1 + B(\alpha_i)] \dots p(\alpha_i) + H(I)H(E_i) - 1 \} \quad (2.10)$$

$$I = \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} \quad (2.11)$$

$$E_i = \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{n} \quad (2.12)$$

$$\cos \alpha_i = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_i \quad (2.13)$$

ここで、 $r_i$  はカメラから得られる時刻  $i$  の輝度値であり、 $\mathbf{x}_i$  はカメラと見ている地点との相対的な位置から得られる。この式において  $\mathbf{n}$  が未知となっており、これは 2 次元の方向

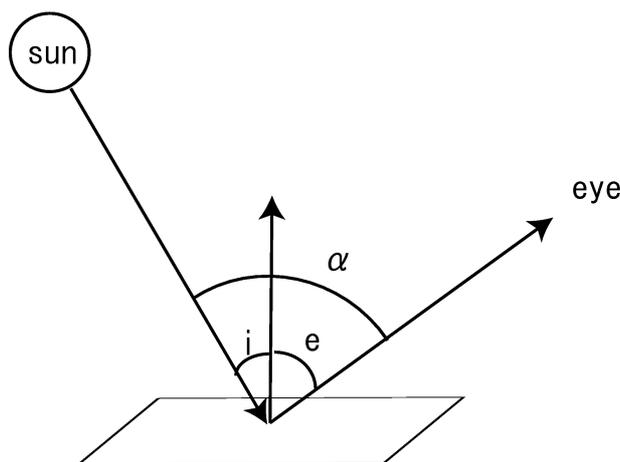


Fig 2.6: An definition of angles

ベクトルであり2つの連立方程式から求められる。そのため、異なる2つの角度から2つの同一地点の輝度値を得て、それによって面の法線ベクトルを求める。

このとき、2つの時間差の画像を用いるが、その間に、着陸機の姿勢や位置が変化する。そのため、2つの画像を合わせるための基準となる地点のマッチングなどが必要になる。

## 2.7 輝度値の局所統計量を用いた手法

この手法は、局在する障害物を検知して回避する画像処理方式で、輝度値の局所的な統計量を用いる??。

**irradiation 方程式** 単一の光源が十分遠方から Lambert 面（反射率一定の乱反射面）を照射しているとき、面の輝度は

$$I(x, y) = (\mathbf{b}, \mathbf{n})\rho \quad (2.14)$$

$\mathbf{n}$ :面の法線ベクトル

$\mathbf{b}$ :光源の方向を表す単位ベクトル

$\rho$ =入射光の強度 × 反射率

と表せる。ここで、 $(\cdot, \cdot)$  は内積を表す。面の形状を関数  $z = z(x, y)$  で表し、

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (2.15)$$

とおく。この時法線ベクトルは

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}}(-p, -q, 1) \quad (2.16)$$

となるから、式 (2.14) は

$$I(x, y) = \frac{\rho(b_x p + b_y q - b_z)}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \quad (2.17)$$

$$= R(p, q) \quad (2.18)$$

## 2.7 輝度値の局所統計量を用いた手法

と表すことができる。これが irradiation 方程式と呼ばれる。

**輝度値の局所統計量** 画像の位置  $(i, j)$  における輝度値を  $I_{i,j}$  とし、輝度値の局所平均値  $\mu_{i,j}$  と局所分散  $\sigma_{i,j}^2$  を

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{|D|} \sum_{i',j' \in D_{i,j}} I_{i',j'} \quad (2.19)$$

$$\sigma_{i,j}^2 = \frac{1}{|D|} \sum_{i',j' \in D_{i,j}} (I_{i',j'} - \mu_{i,j})^2 \quad (2.20)$$

で定義する。ここで、 $D_{i,j}$  は画素  $(i, j)$  を中心とする Fig.3.2 に示すような小領域を表す。 $|D|$  は小領域に含まれる画素の数を表す。例えば、 $15 \times 15$  画素の矩形領域とするとき、 $|D| = 225$  となる。また、画像全体の輝度値の中央値（メディアン）を  $\mu$  とする。画像の

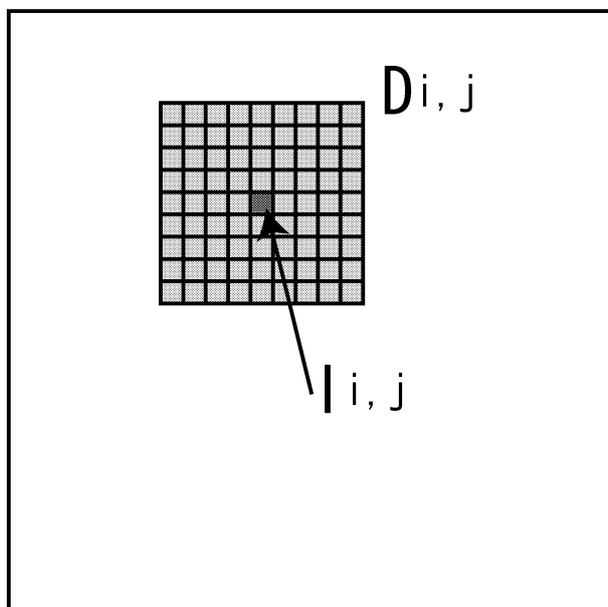


Fig 2.7: A local area taken statistics

各点での輝度値は irradiation 方程式で決まり、

$$I_{i,j} = (\mathbf{b}, \mathbf{n}_{i,j})\rho \quad (2.21)$$

と表すことができる。ここで、 $\mathbf{n}_{i,j}$  は画像での位置  $(i, j)$  における法線ベクトルである。式 (2.21) を式 (3.7) に代入すると輝度値の局所平均値は

$$\mu_{i,j} = (\mathbf{b}, \bar{\mathbf{n}}_{i,j})\rho \quad (2.22)$$

となる。ここで、

$$\bar{\mathbf{n}}_{i,j} \equiv \frac{1}{|D|} \sum_{i',j' \in D_{i,j}} \mathbf{n}_{i',j'} \quad (2.23)$$

## 2.8 月惑星ランダによる障害物回避への既存手法の適応性

---

は、小領域  $D_{i,j}$  における法線ベクトルの平均値であり、 $D_{i,j}$  での月面の平均的な傾きを表している。式 (2.22) を式 (2.21) を比べてみると、輝度値の局所平均値は法線ベクトルが  $\bar{\mathbf{n}}_{i,j}$  で与えられるような面、すなわち平均的な傾きの輝度値を表している。小領域  $D_{i,j}$  に対応する月面が平均的に傾いていれば、輝度値の局所平均値は  $\mu$  から隔たりを持つ。また、傾いていなくても、凹凸があれば、輝度値の局所分散の値が大きくなる。

**輝度値の局所 2 次モーメントによる着地可能領域の抽出** 点  $(i, j)$  における輝度値の局所 2 次モーメントを

$$V_{i,j} = \frac{1}{|D|} \sum_{i',j' \in D_{i,j}} (I_{i',j'} - \mu)^2 \quad (2.24)$$

$$\equiv \sigma_{i,j}^2 + (\mu_{i,j} - \mu)^2 \quad (2.25)$$

で定義する。着陸可能領域はこの  $V_{i,j}$  が適当に定めたあるしきい値  $V_{TH}$  をこえない領域として求められる。

## 2.8 月惑星ランダによる障害物回避への既存手法の適応性

本章で述べた既存手法の長所と短所を Table 2.1 にまとめる。月惑星ランダが自律で障害物を回避しながら着陸するためには、オンラインで計算でき、安定したシステムでなければならない。それぞれの手法に長所と短所が存在するが、どれも、無人ランダが自律で障害物を推定する決定的なものとはいえない。

Table 2.1: 既存手法の比較

	メリットとデメリット
LRF スキャン法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○直接3次元地形を求めることができる</li> <li>○太陽が当たらない領域にも適用できる</li> <li>×使用できる高度がレーザーの出力に依存する</li> <li>×測定中の着陸機の振動を考慮しなければならない</li> </ul>
ステレオカメラを用いた手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○2枚の画像から直接3次元地形を求めることができる</li> <li>×2枚の画像のマッチングをする必要がある（移動ステレオ）</li> <li>×高高度では分解能が低下する（複眼ステレオ）</li> </ul>
shape from shading 法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地形画像の陰影から地形の3次元形状を復元できる</li> <li>×不連続な地形やノイズに弱い</li> <li>×計算量が多く推定時間がかかる</li> </ul>
影を用いた手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○簡易的で計算時間が短い</li> <li>×極域など影が極端に長い場合有効でない</li> <li>×影ができないような緩やかな障害物を推定できない</li> </ul>
局所統計量を用いた手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○簡易的で計算時間が短い</li> <li>×障害物の大きさを推定することができない</li> </ul>
地形カテゴリにを用いた手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○簡易的で計算時間が短い</li> <li>○科学的に興味深い着陸地点を定性的に指定できる</li> <li>×着陸に安全な領域を推定するには不向きである</li> </ul>
Hapke モデルに基づく手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○平地を推定することができる</li> <li>×2枚の画像のマッチングをする必要がある</li> </ul>

# 第3章 輝度二次モーメントを用いた障害物回避手法

第2章で述べた既存手法は、それぞれメリットとデメリットを持っている。実ミッションでは簡易かつ汎用性のある手法が望まれるため、月惑星表面画像の局所的な輝度二次モーメントを用いた手法を提案する。輝度二次モーメントと障害物の着陸への危険性について述べ、本手法を展開する。

## 3.1 着陸地点に必要とされる条件

着陸機が安全に月惑星表面上に着陸する際、着陸領域はいくつかの条件を満たしている必要がある。月惑星上への着陸の障害物としては、クレータ、斜面、岩石、割れ目などが存在し、着陸機はこれらの障害物を回避しなければならない。本論文では、探査機が安全に軟着陸する為に着陸地点に要求される条件を次のように定義する。

- 条件1 高さが50cm以上の岩が存在しない
- 条件2 傾斜が $15^\circ$ 以下である
- 条件3 太陽光が当たる

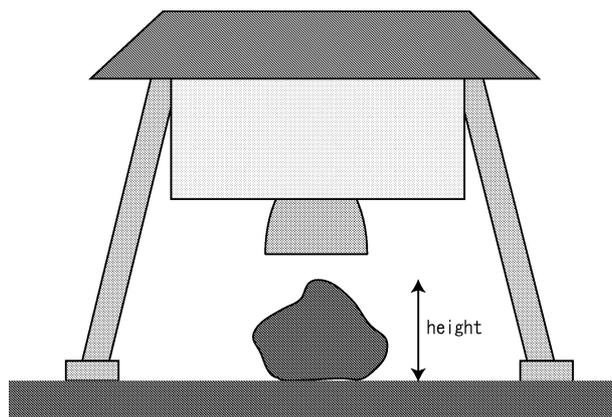


Fig 3.1: 岩石の高さとランダの関係

着陸機が着陸する際、着陸機の一部が岩石に当たり、転倒する危険がある。また、着陸機の動力であるメインスラスタが岩石と衝突し損傷しないようにする為に、ある一定以上の高さの岩石が存在する領域は着陸に適さない。その為、条件1が要求される。条件2は傾斜が大きい領域に着陸機が着陸した際、傾斜で転倒する恐れがある為である。条件3は着陸

## 3.2 提案手法の概要

機が月惑星表面で科学的観測を行う際に必要な電力を太陽光パネルで発電する必要がある為である。また、カメラを用いて障害物を回避する為、障害物が見えない影の領域は着陸には危険である。

条件1, 条件2は地形のある大きさの領域について考えたとき、その領域内の高低差に関係すると考えられる。領域  $D$  内の高低差を  $\Delta h$ , 座標  $\boldsymbol{x}$  での高さを  $h(\boldsymbol{x})$  とすると、式 (3.1) のように表される。これが着陸する際の危険度を評価する指数となる。

$$\Delta h = \max |h(\boldsymbol{\xi}) - h(\boldsymbol{x})| \quad (\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{x} \in D) \quad (3.1)$$

本研究では着陸機の大きさや着陸時の誘導誤差を考え、ある一定の領域内での高低差が比較的小さく、着陸に適した領域を推定する。

## 3.2 提案手法の概要

提案手法では、与えられた月面画像内に、ある一定の大きさのウインドウを設定する。その設定したウインドウ内の輝度二次モーメントを求めることにより、ウインドウ内の着陸危険性を推定する。

### 3.2.1 輝度と二次モーメント

まず、輝度と地形の関係と、ウインドウ内の輝度二次モーメントについて述べる。

**irradiation 方程式** 単一の光源が十分遠方から Lambert 面 (反射率一定の乱反射面) を照射しているとき、面の輝度は式 (3.2) で表せる。

$$I(x, y) = (\boldsymbol{b}, \boldsymbol{n})\rho \quad (3.2)$$

$\boldsymbol{n}$ :面の法線ベクトル

$\boldsymbol{b}$ :光源の方向を表す単位ベクトル

$\rho$ =入射光の強度  $\times$  反射率

ここで、 $(\cdot, \cdot)$  は内積を表す。面の形状を関数  $z = z(x, y)$  で表し、

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (3.3)$$

とおく。この時法線ベクトルは

$$\boldsymbol{n} = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}}(-p, -q, 1) \quad (3.4)$$

となるから、式 (3.2) は

$$I(x, y) = \frac{\rho(b_x p + b_y q - b_z)}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \quad (3.5)$$

$$= R(p, q) \quad (3.6)$$

となる。このように、光源が太陽のように遠点に位置する場合、面の輝度は面の傾きである  $p, q$  によって決定される。

**輝度の輝度二次モーメント** 画像の位置  $(i, j)$  における輝度値を  $I_{i,j}$  とし、輝度値のウィンドウ内での平均値  $\mu_{i,j}$  と輝度二次モーメント  $\sigma_{i,j}^2$  を

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{|D|} \sum_{i',j' \in D_{i,j}} I_{i',j'} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{i,j}^2 = \frac{1}{|D|} \sum_{i',j' \in D_{i,j}} (I_{i',j'} - \mu_{i,j})^2 \quad (3.8)$$

で定義する．ここで、 $D_{i,j}$  は Fig.3.2 に示すように、外枠の大きな正方形の画像が得られたとき、その中の画素  $(i, j)$  を中心とするウィンドウである． $|D|$  はウィンドウに含まれる画素の数を表す．例えば、15pixel×15pixel の正方形の領域とすると、 $|D| = 225$  となる．この場合、ウィンドウ内の輝度二次モーメントの値はウィンドウ内の傾斜の変化の大きさに依存する．

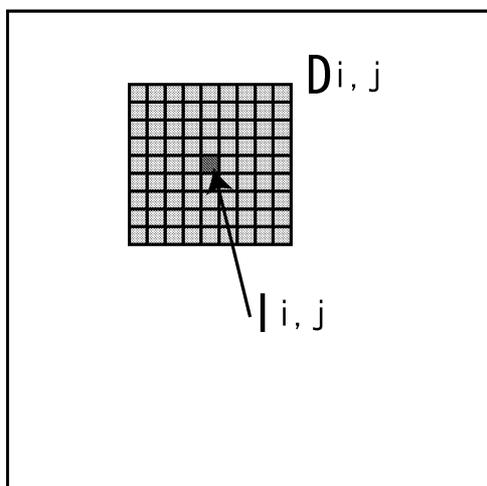


Fig 3.2: 輝度二次モーメントを計算するウィンドウ

### 3.2.2 提案手法

本手法では、輝度二次モーメントと障害物の大きさとの関係を利用し、指定した領域内への着陸の危険度を推定する．

例えば、Fig.3.3 のように、一辺  $w$  のウィンドウ内に半径  $r$  の半球の形をした障害物が存在するとする．このとき、ウィンドウ内の地形の傾きの変化が大きいほど、ウィンドウ内での輝度の二次モーメントの値は高くなる．半球の形を保ったまま、半径を変化させた場合、 $r/w$  が 1 に近いほど輝度二次モーメントの値が高くなると考えられる．つまり、ウィンドウの幅  $w$  が一定の場合、輝度二次モーメントの値から半球の半径  $r$  を推定することができる．このような関係を利用し、輝度二次モーメントから岩石とクレータの大きさを推定することで任意の領域の高低差を推定する．

### 3.3 岩石上への着陸危険度の判定

月惑星表面には様々な形の岩石が存在する．本研究では簡易化の為，Fig.3.3のように球型の岩石や楕円球型の岩石の下半分が地中に埋まっている状態とする．

このとき，ウインドウの幅  $w$  を一定としたとき，ウインドウ内の輝度二次モーメントは半球の半径，すなわち高さに依存する．これは，ウインドウ内の半球が大きく，高さの変化が大きい方が輝度二次モーメントが高くなる為である．また，同じ底面の楕円球の場合，高さが高い楕円球の方が面の傾斜の変化が大きく，輝度二次モーメントは高くなる．よって，輝度二次モーメントから岩石のおおよその大きさを推定することができる．

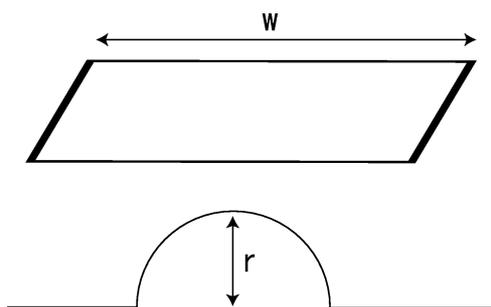


Fig 3.3: 半球型の凸地形

### 3.4 クレータへの着陸危険度の判定

月惑星表面には数多くのクレータが存在する．本研究では簡易化の為，Fig.3.4のように球型の下半分の形をした凹地形であるとする．このとき，ウインドウの幅  $w$  を一定とした

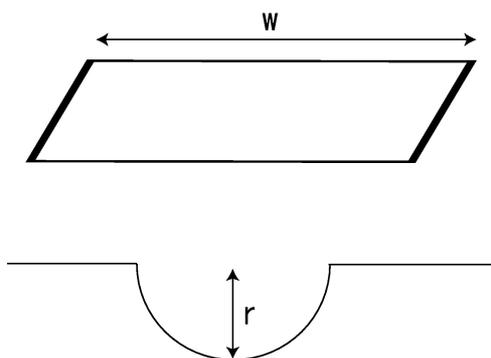


Fig 3.4: 半球型の凹地形

とき，ウインドウ内の輝度二次モーメントは凹地形の半径，すなわち深さに依存する．これは，ウインドウ内の凹地形が大きく，高さの変化が大きい方が輝度二次モーメントが高くなる為である．

### 3.5 障害物が多数分布する場合

ウインドウ内に小さな障害物が多数分布する場合、輝度二次モーメントは高くなる。例えば、ウインドウ内に Fig.3.3 よりも半径が小さい相似形の地形が多数分布する場合を考える。ウインドウ内の輝度二次モーメントの値を  $\sigma_B^2$  とし、 $A$  をウインドウ内の半球の数、 $B$  を半球の半径とする。すると、このとき式 (3.9) の関係が成り立つ。このとき、 $n$  は正の整数である。

$$\sigma_{r/n}^{2n^2} = \text{constant} \quad (3.9)$$

これは、地形が相似形の場合、輝度の変化も相似形となる為である。本研究では輝度二次モーメントを求める前に、地形画像を平滑化することにより、比較的小さな障害物の輝度二次モーメントを下げる。それに対し、大きな障害物に関しては、平滑化することで輝度二次モーメントが比較的低下することはない。その為、輝度二次モーメントから着陸への危険度を推定することができる。本論文では、2種類の平滑化処理を用いる。ひとつは平均化処理であり、もうひとつは二次元空間周波数領域でのローパスフィルタである。

#### 3.5.1 平均化処理

本論文で行う平均化処理は式 (3.10) のように表される。

$$I'(i, j) = \frac{1}{\|A\|} \sum_{i', j' \in A_{i, j}} I_{i', j'} \quad (3.10)$$

Fig.3.5 に示すように外枠の大きな正方形の地形の陰影画像が得られたとする。この時の陰影画像の中において、ある大きさのウインドウを設定した領域  $A_{i, j}$  について輝度の平均を計算する。この時の輝度平均は平均化後の画像において領域  $A_{i, j}$  の中心と同じ位置の画素  $I(i, j)$  に代入する。このとき、平均化された後の画像は平均化する際のウインドウの大き

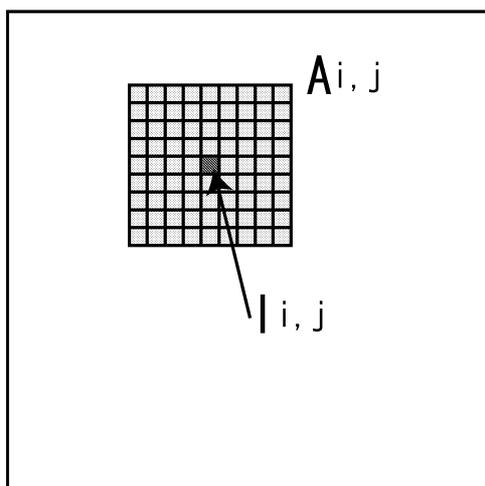


Fig 3.5: 平均化処理

さに依存する。平均化する際のウインドウが大きければ大きいほど、平均化された後の画像は平滑化されたことになる。

## 3.5.2 空間周波数領域での平滑化

画像データ  $g(x, y)$  のフーリエスペクトルは式 (3.11) で与えられる [11].

$$G(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-2\pi i(ux + vy)] dx dy \quad (3.11)$$

周波数領域, つまり式 (3.11) で言うと,  $(u, v)$  領域では, 画像データ  $g(x, y)$  の情報は波動に分解されて,  $G(u, v)$  として周波数ごとに分布する. 画像データの場合は, 空間周波数領域では Fig.3.6 に示すように, 中央付近は低周波数成分が占め, 中心から遠ざかるにつれて高周波成分になる.

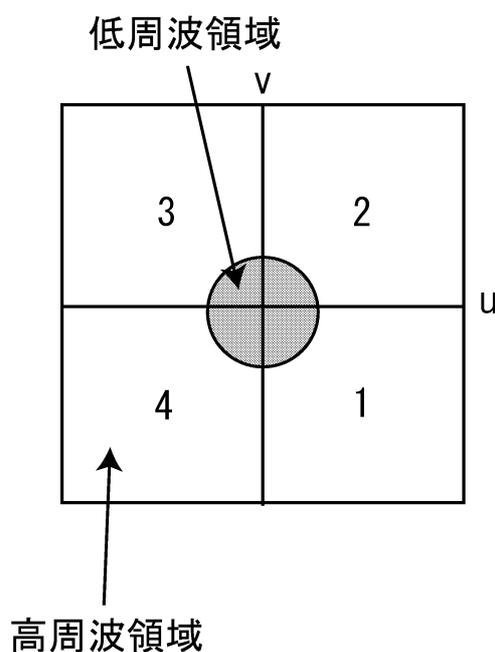


Fig 3.6: 空間周波数領域

式 (3.11) のフーリエ・スペクトル  $G(u, v)$  をそのまま逆フーリエ変換すると, 当然のことながら元の画像データ  $g(x, y)$  に戻る. しかし  $G(u, v)$  のスペクトル分布に重みをつける関数  $F(u, v)$  を乗じた  $[F(u, v)G(u, v)]$  の逆フーリエ変換は周波数成分に重みが与えられた分だけ異なる画像になる.

$$g_f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) G(u, v) \exp[2\pi i(ux + vy)] du dv \quad (3.12)$$

ここで,  $F(u, v)$  を「フィルタ関数」という. ローパスフィルタの場合, 中心の直流を含む低周波成分のみを通過させるフィルタで, 細かな変動をする高周波成分は除かれる. ローパスフィルタのフィルタ関数は式 (3.13) で表される.

$$F(u, v) = \begin{cases} 1 & (|u| \leq a, |v| \leq b) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (3.13)$$

このフィルタ関数の  $a, b$  を小さくすればするほど, 通過する周波数帯は狭くなる.

### 3.5 障害物が多数分布する場合

---

**二次元高速フーリエ変換** 本論文では計算時間の短縮化を図るため、フーリエ変換には二次元高速フーリエ変換を用いる。ここで、二次元高速フーリエ変換について述べる。

二次元高速フーリエ変換は式 (3.15) のように表される。

$$W = \exp\left(\frac{-j2\pi}{N}\right) \quad (3.14)$$

$$G(u, v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) \exp(-j\frac{2\pi}{N}(ux + vy)) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) W^{(ux+vy)} \quad (3.15)$$

この時、 $x, y$  方向のデータの定義域が共に  $[0, N-1]$  の場合、 $u, v$  の範囲は  $[0, (N-1)/2]$  となる。

本論文ではローパスフィルタを用いることによって、比較的小さな障害物の輝度二次モーメントを低下させる。

# 第4章 シミュレーションによる検証

第3章で提案した手法について，ここでは半球などの単純地形を用いながら，検証を行う．前項で提案した手法をそれぞれの地形に当てはめ，シミュレーションにより検証する．

## 4.1 凸半球

### 4.1.1 半球の半径と高さが増える場合

Fig.4.1 のような半球型地形を作成し，CG(Computer Graphics)を作成した．このときのCGが Fig.4.3，高さ情報を表すDEM(Data Elevation Map)は Fig.4.4 である．

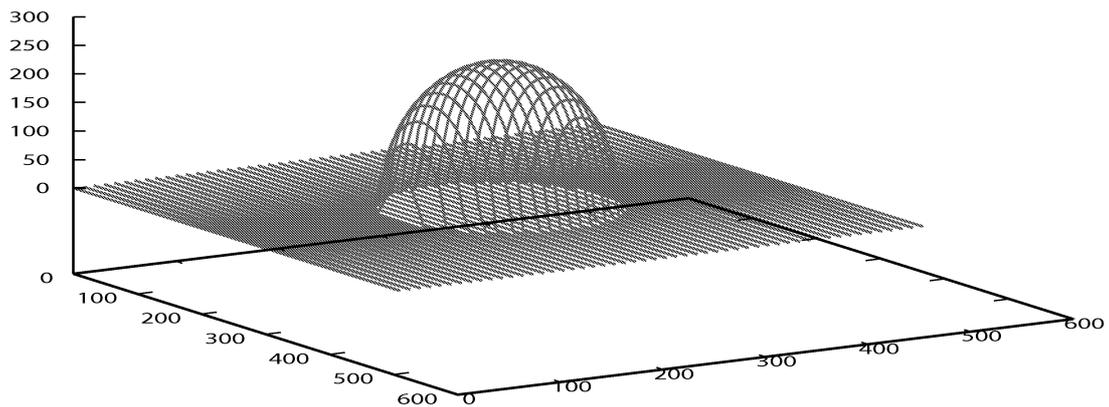


Fig 4.1: 半球のモデル

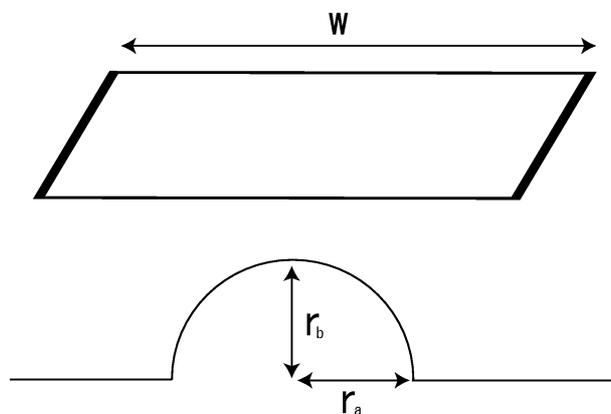


Fig 4.2: 半球

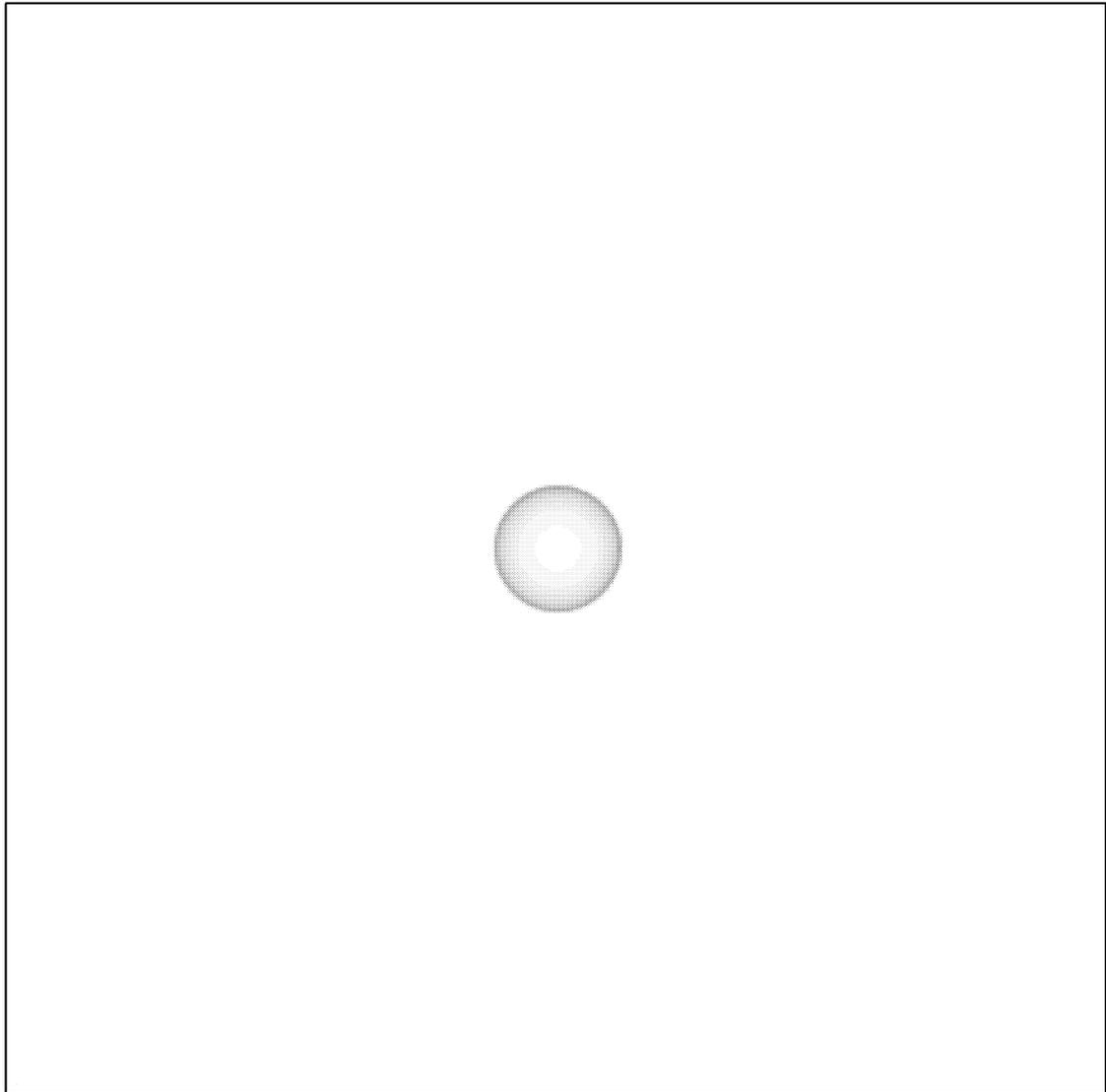


Fig 4.3: 太陽仰角が  $90^\circ$  の時の半球の CG

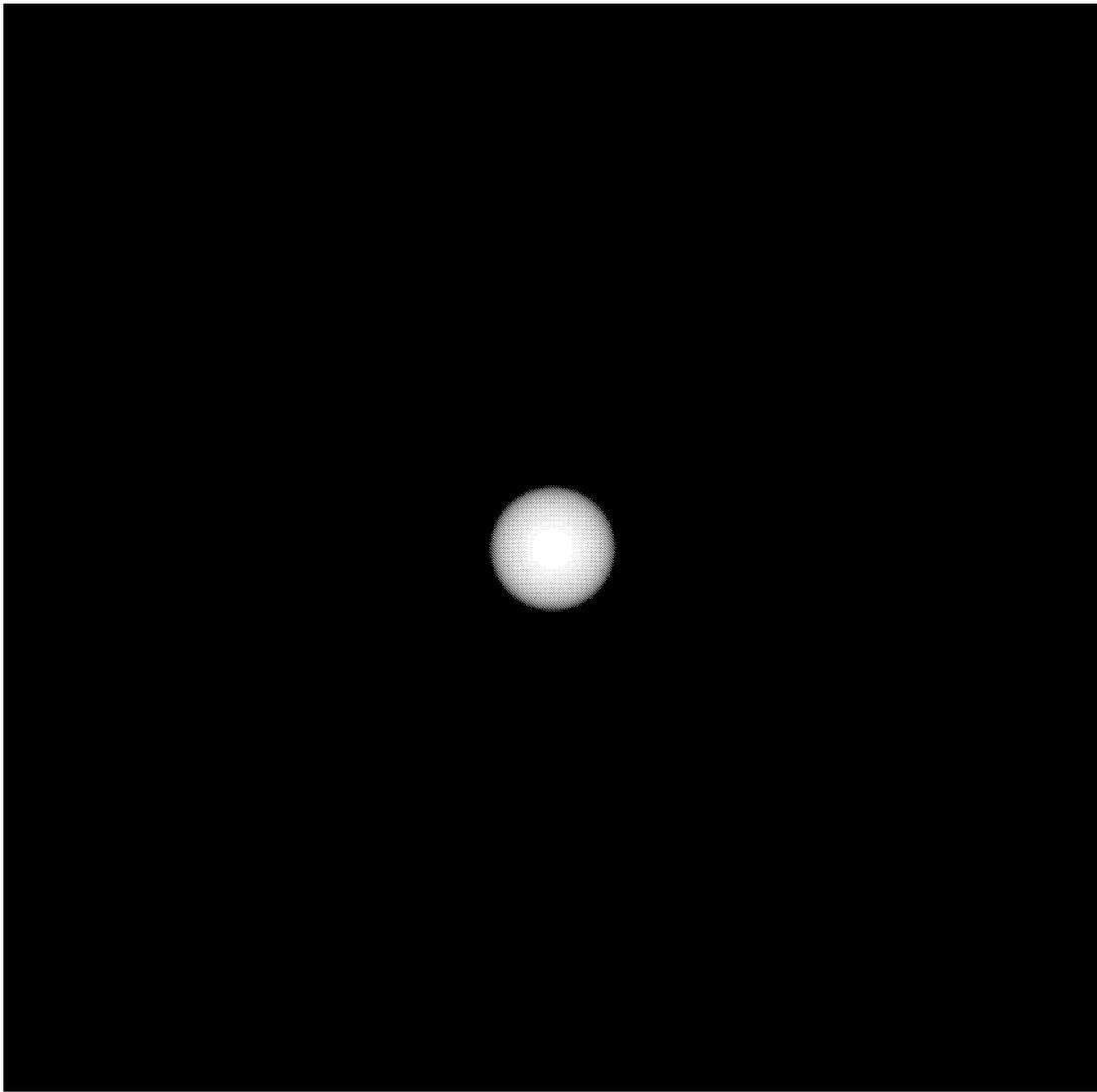


Fig 4.4: 凸半球の DEM(Data Elevation Map)

## 4.1 凸半球

半球形地形 Fig.4.2 のような形をしており，式 (4.1) で表すことができる．このとき， $r$  は半球の中心からの距離， $r_b$  は半球の高さ， $r_a$  は半球の底面の半径である．

$$h(r) = \begin{cases} \frac{r_b}{r_a} \sqrt{r_a^2 - r^2} & (0 < r < r_a) \\ 0 & (r_a < r) \end{cases} \quad (4.1)$$

ウインドウの大きさは一定とし，ウインドウの中心を半球の中心上に置いた．凸半球の底面の半径  $r_a$  を変化させ，半径と輝度二次モーメントの関係を求めた． $r_a = r_b$  とし，半球の底面の半径  $r_a$  かつ高さ  $r_b$  を変化させたところ，Fig.4.5 のようになった．この場合太陽の仰角は  $90^\circ$  である．横軸はウインドウの幅  $w$  に対する半球の半径  $r_a$  の比である．また，縦軸はそのウインドウ内での輝度二次モーメントである．

ウインドウの幅  $w$  に対し半球の半径  $r_a$  が大きくなるにつれて，ウインドウ内の輝度二次モーメントが大きくなるのが分かった．輝度二次モーメントは  $r_a/w = 1$  のとき最大値を示し， $r_a/w > 1$  のとき，単調減少した．これは，半球の中央部分は陰影の変化が少ない．その為，ウインドウが半球に対して小さいとき，輝度二次モーメントが低くなる為であると考えられる．

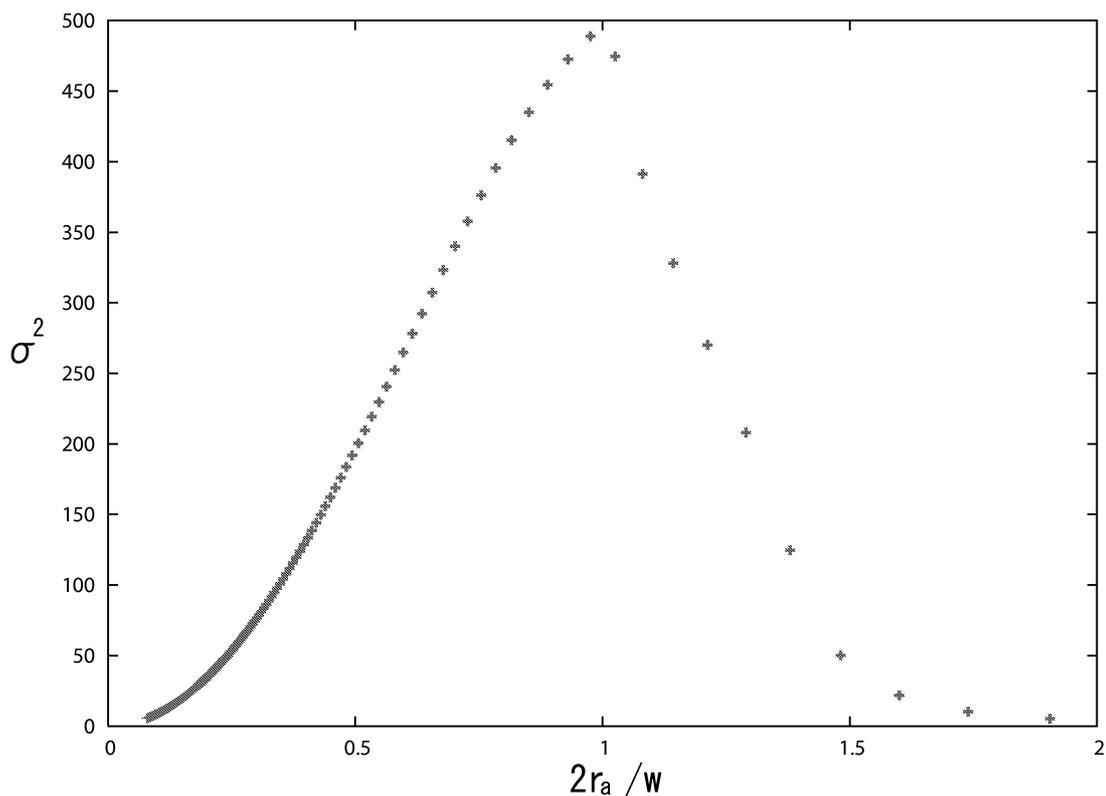


Fig 4.5: 凸半球の半径と輝度二次モーメントの関係

### 4.1.2 半球の半径一定で高さが増える場合

半球の底面の半径  $r_a$  を一定とし，半球の高さ  $r_b$  を変化させ，半径と輝度二次モーメントの関係を求めた．ウインドウ内の輝度二次モーメントと半球の高さは Fig.4.6 のような

## 4.1 凸半球

関係となった。この時、太陽仰角は  $90^\circ$  とした。横軸は半球の底面の半径  $r_a$  のウインドウの幅  $w$  に対する比である。縦軸はウインドウ内での輝度二次モーメントである。

Fig.4.6 から半球の高さによらず、半球の高さが全ての場合で、 $r_z/w$  が 1 付近である時、最大の輝度二次モーメントを示すことがわかった。また、 $r_a/w = 1$  の時のウインドウ内の輝度二次モーメントは半球の高さ  $r_b$  が大きければ大きいほど、高い輝度二次モーメントを示すことがわかった。このことから、半球の底面積が一定の場合であっても、輝度二次モーメントから半球のおおよその高さを知ることができることがわかった。

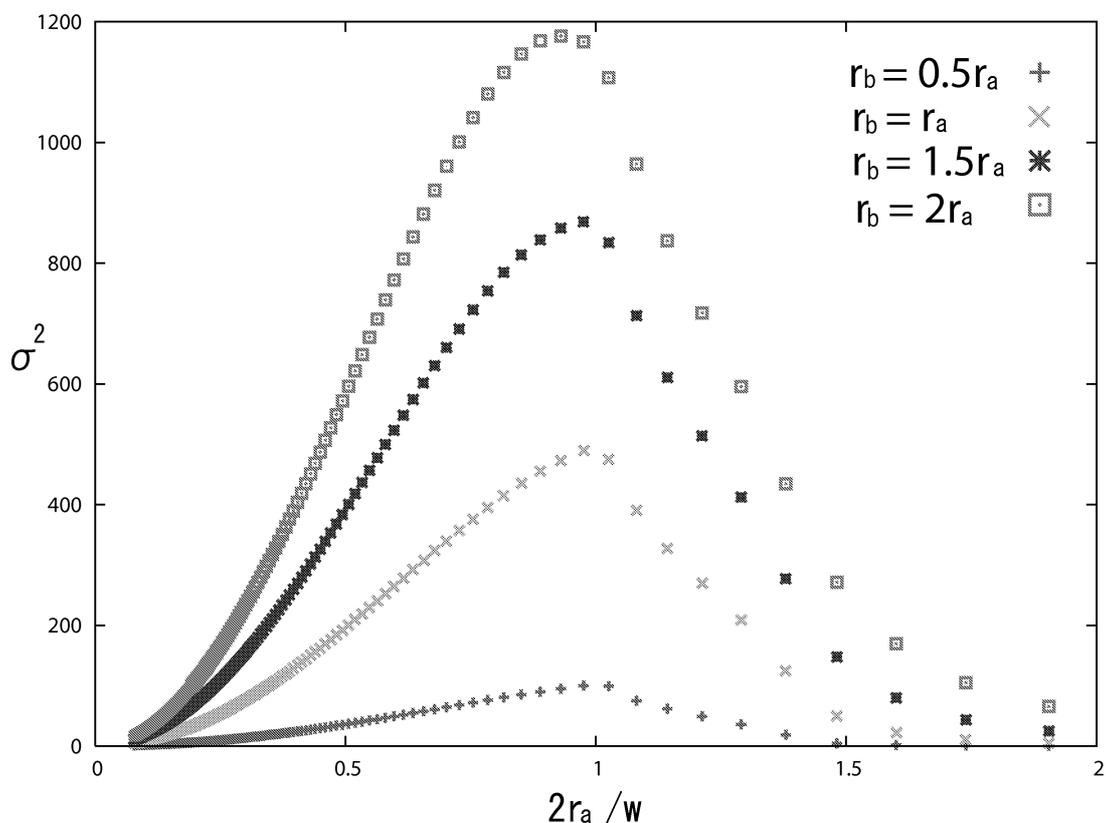


Fig 4.6: 凸半球の高さと輝度二次モーメントの関係

### 4.1.3 半球の高さ一定で底面の半径が変化する場合

次は先ほどと同様に式 (4.1) で表されるような半球の高さ  $r_b$  を一定とし、半球の底面の半径  $r_a$  を変化させ、半径と輝度二次モーメントの関係を求めた。このとき、ウインドウの幅  $w$  は一定とした。このとき、障害物の高さは変化しないが、ウインドウ内において障害物が占める割合が変化する。

結果を Fig.4.7 に示す。横軸が底面の半径  $r_a$  に対する半球の高さ  $r_b$  の比を表している。縦軸はウインドウ内の輝度二次モーメントである。Fig.4.7 から、 $r_a$  が小さくなるにつれ

#### 4.1 凸半球

て輝度二次モーメントが緩やかに低下することがわかった。本論文では、自然地形では障害物の底面に対して障害物の高さが極端に高い場合は無いと仮定する。そのため、底面の半径に対して高さが2倍程度までの障害物であれば、輝度二次モーメントはあまり変化しないということがいえる。

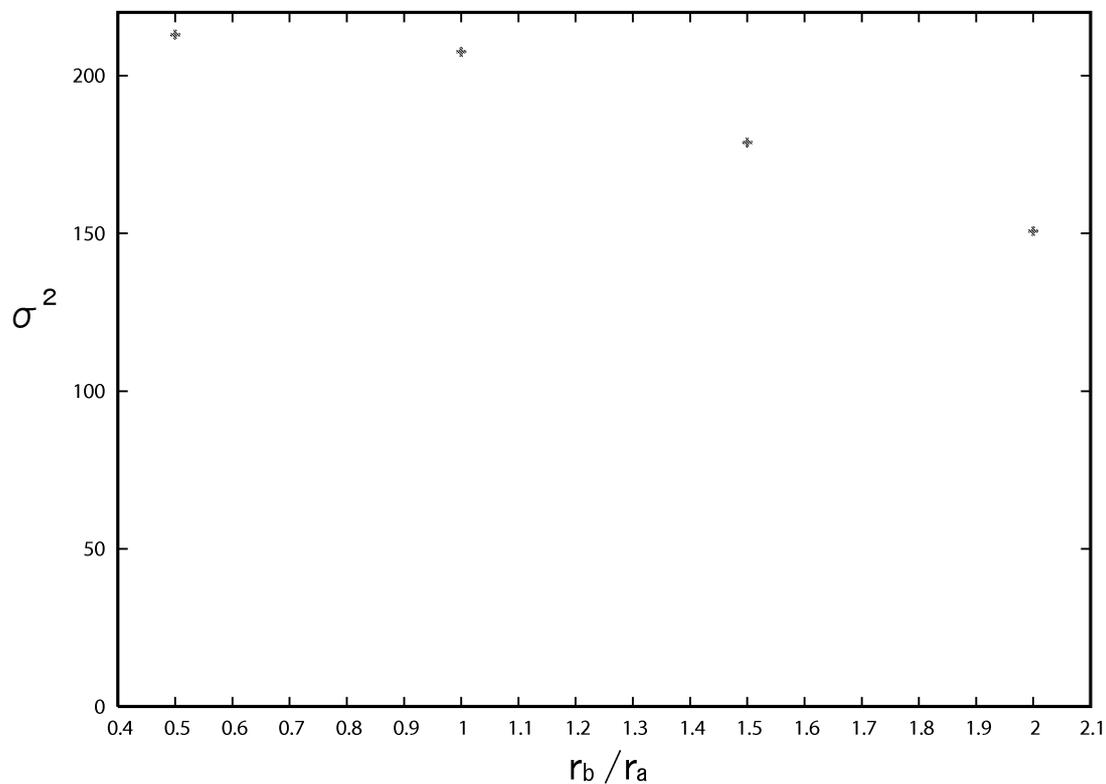


Fig 4.7: 凸半球の底面の半径と輝度二次モーメントの関係

### 4.1.4 太陽仰角が変化した場合

太陽仰角を変化させ、半球の半径とウインドウ内の輝度二次モーメントの関係を求めた。ここで、ウインドウの幅  $w$  は一定とし、半球の半径と高さは等しい。太陽仰角を変化させた CG 画像の例を Fig.4.8 に示す。Fig.4.8 は太陽仰角  $15^\circ$  とした場合の凸半球の地形画像である。

その結果、Fig.4.9 のようになった。太陽仰角が  $90^\circ$  の Fig.4.5 の場合に比べ、輝度二次モーメントが全体的に高くなっているのがわかる。これは、太陽仰角が小さくなるにつれて、凸半球による影が大きくなり、ウインドウ内の輝度の変化が大きくなるためであると考えられる。また、輝度二次モーメントが最大値となる際の、太陽仰角が  $15^\circ$  の場合、凸半球の半径  $r$  のウインドウ幅  $w$  に対する比が大きくなった。太陽仰角が小さくなるにつれて凸半球から伸びる影が長くなる。ウインドウ内を占める影の比率があまりにも大きくなった場合ウインドウ内の輝度二次モーメントは低くなる。そのため、影をあまり含まない  $r > w$  の場合に輝度二次モーメントが最大になったものと考えられる。

また、Fig.4.9 から太陽仰角が変化した場合でも、半球の半径とウインドウ内の輝度二次モーメントには相関性があることがわかった。

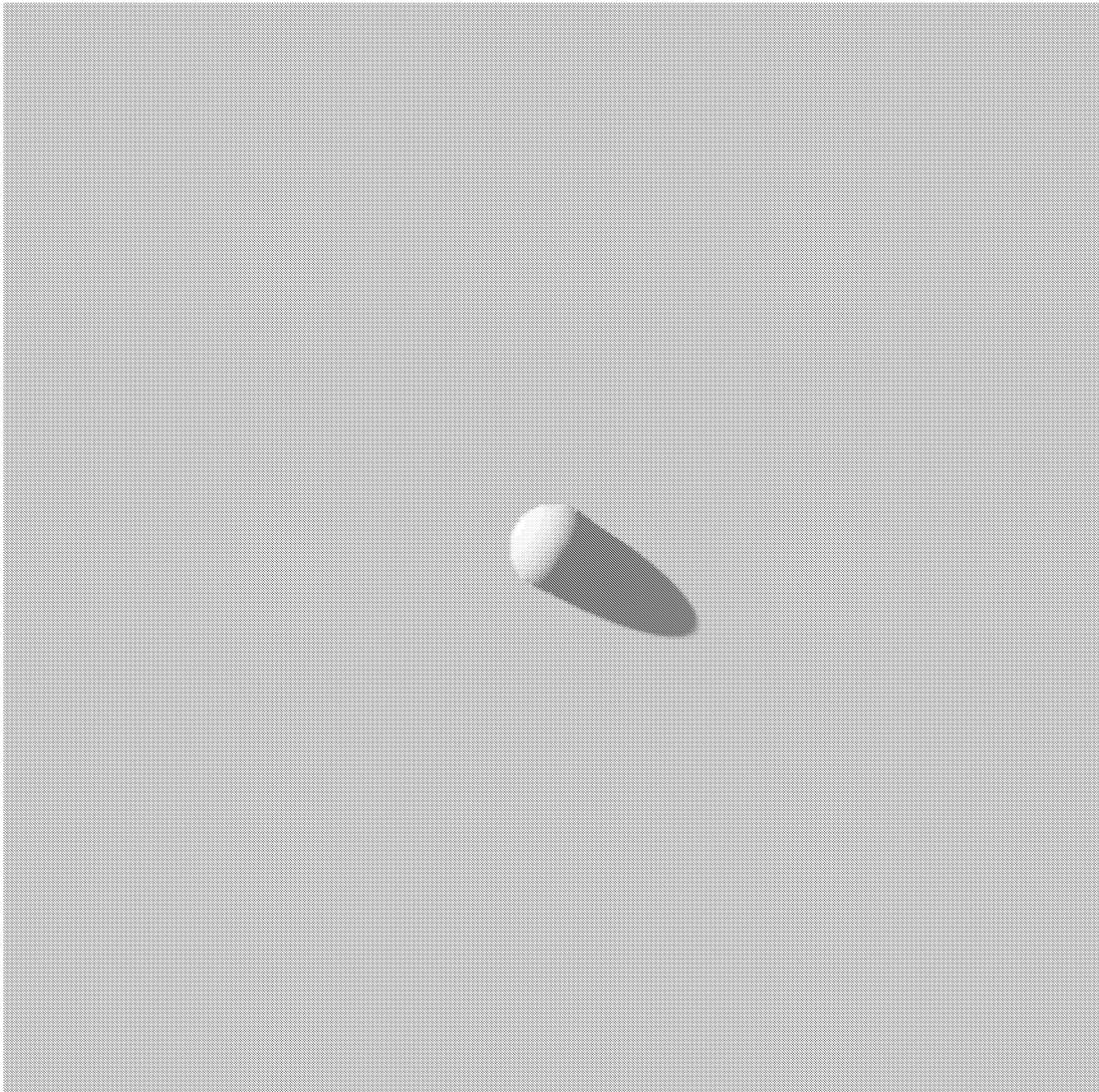


Fig 4.8: 太陽仰角を  $15^\circ$  とした場合の凸半球の地形画像

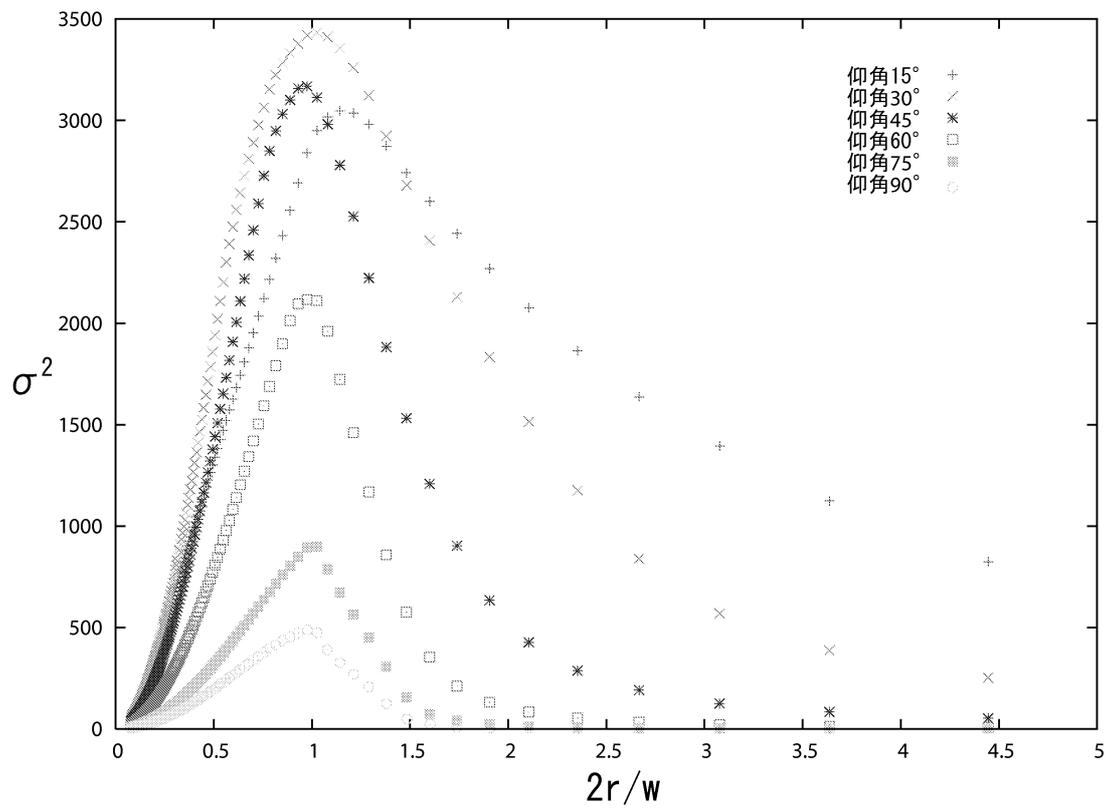


Fig 4.9: 太陽仰角が変化した時の凸半球の半径と輝度二次モーメントの関係

## 4.2 凹半球

### 4.2.1 半球の深さと半径が変化する場合

Fig.4.10 のような半球型地形を作成し, Fig.4.12 のような CG を作成した. このときの DEM は Fig.4.13 である.

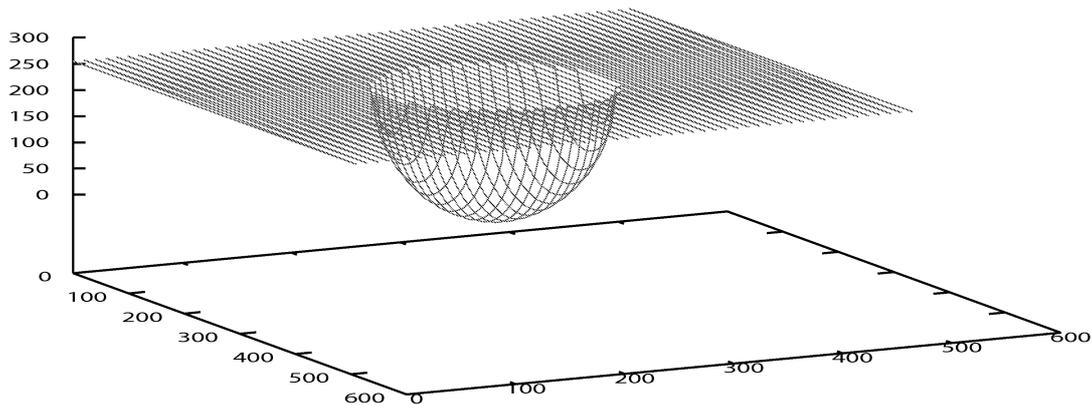


Fig 4.10: 凹半球のモデル

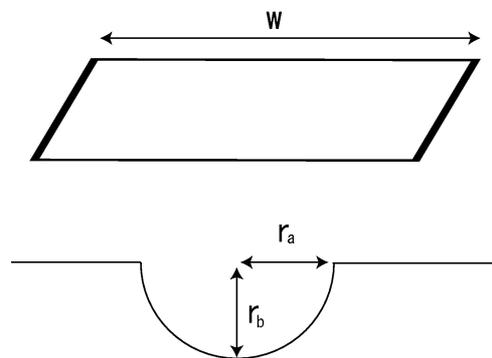


Fig 4.11: 半球型の凹地形

凹半球形地形は式 (4.2) で表すことができる. また, 高さ情報は Fig.4.13 の DEM で与えられる.

このとき,  $r$  は半球の中心からの距離,  $r_b$  は半球の高さ,  $r_a$  は半球の底面の半径である.

$$h(r) = \begin{cases} -\frac{r_b}{r_a} \sqrt{r_a^2 - r^2} & (0 < r < r_a) \\ 0 & (r_a < r) \end{cases} \quad (4.2)$$

ウインドウの大きさは一定とし, ウインドウの中心を凹半球の中心上に置いた.

凹半球の底面の半径と高さ  $r_a$  かつ高さ  $r_b$  を変化させた場合の半球の半径と輝度二次モーメントの関係を求めた.  $r_a = r_b$  とし, 凹半球の底面の半径  $r_a$  を変化させたところ, Fig.4.14 のようになった. この場合太陽の仰角は  $90^\circ$  である. 横軸はウインドウの幅  $w$  に対する半球の半径  $r_a$  の比である. また, 縦軸はそのウインドウ内での輝度二次モーメントである.

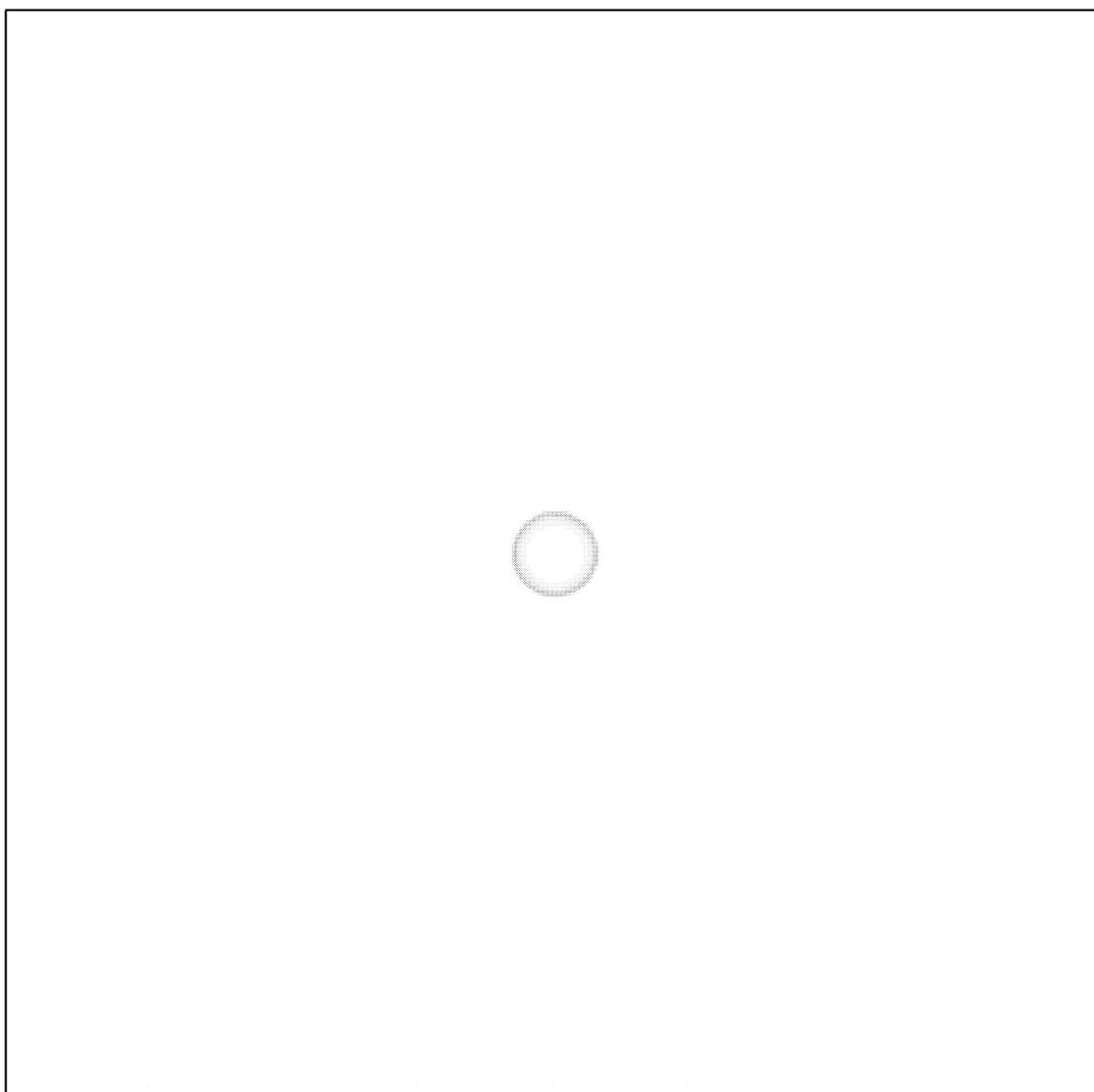


Fig 4.12: 半球型の凹地形の CG

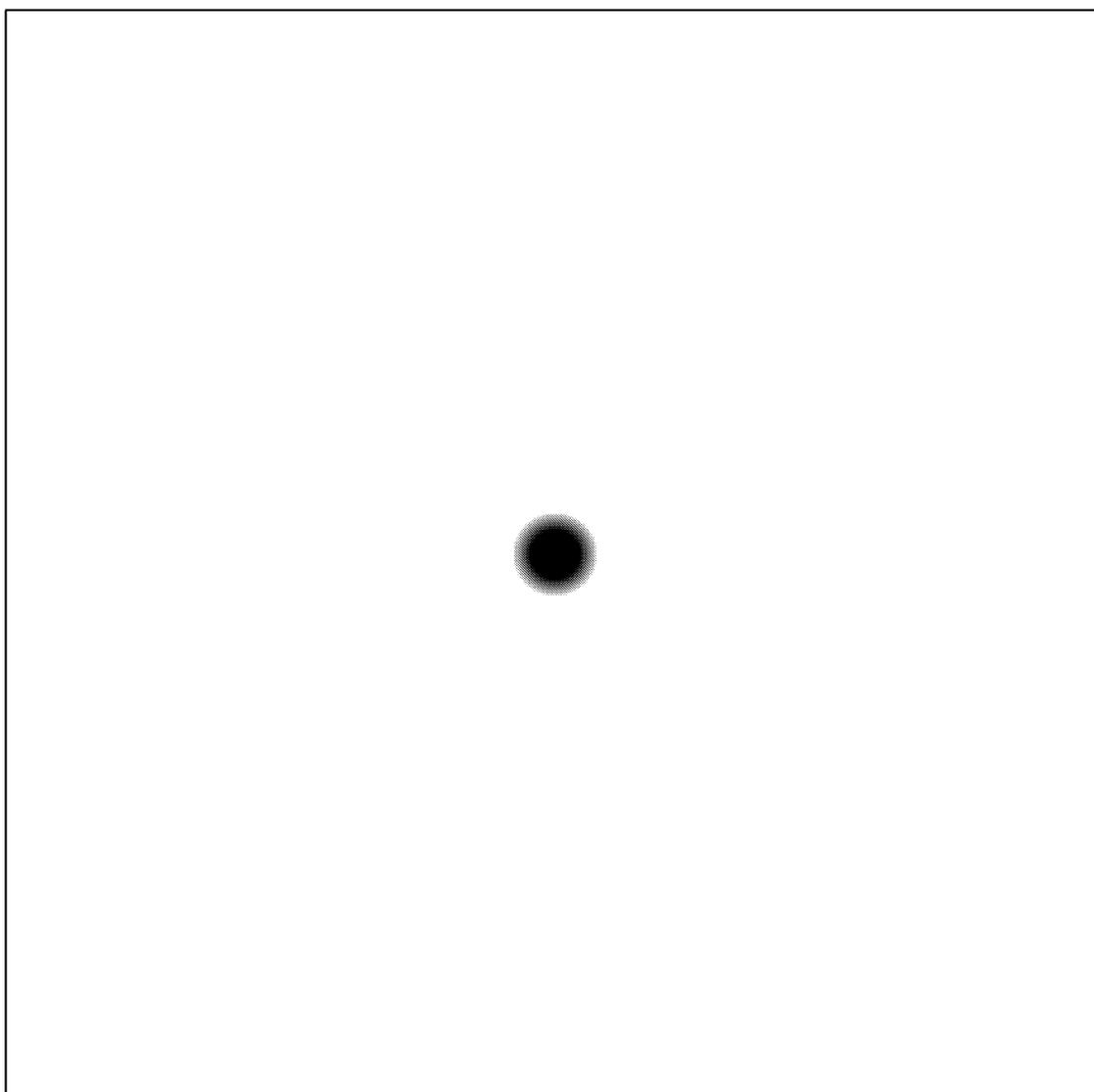


Fig 4.13: 半球型の凹地形の DEM

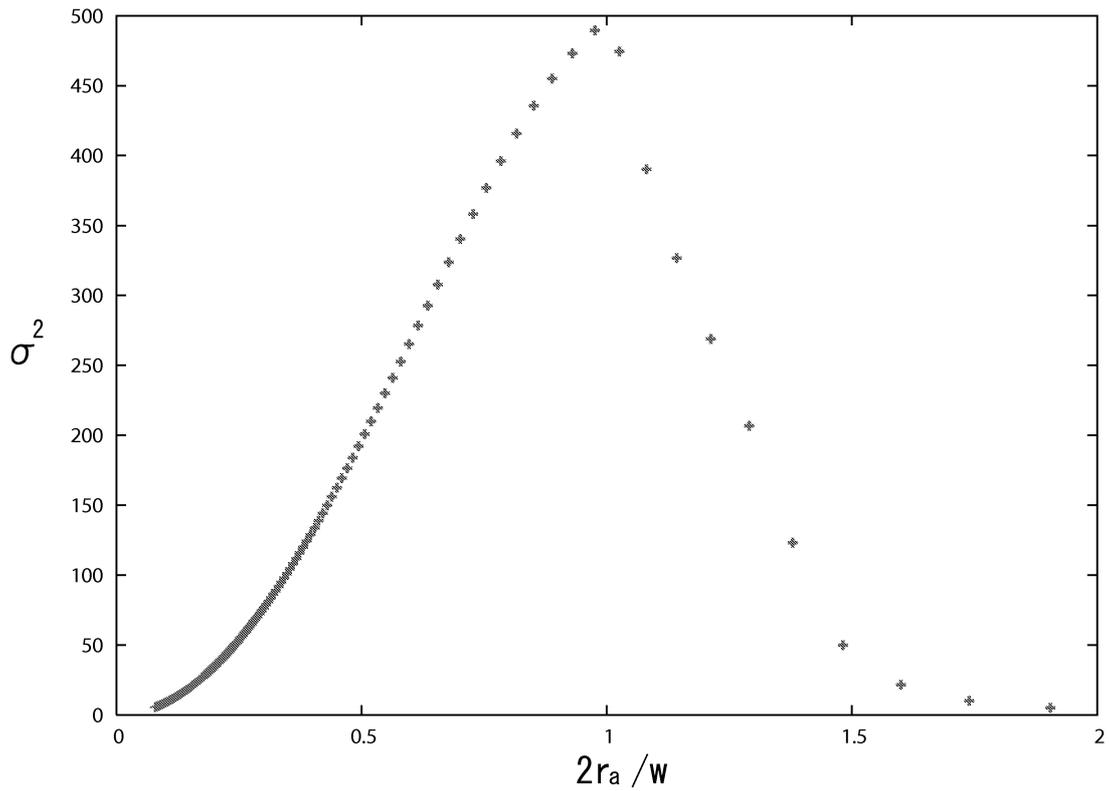


Fig 4.14: 凹半球の半径と輝度二次モーメントの関係

ウインドウの幅  $w$  に対し凹半球の半径  $r_a$  が大きくなるにつれて、ウインドウ内の輝度二次モーメントが大きくなるのが分かった。輝度二次モーメントは  $r_a/w = 1$  のとき最大値を示し、 $r_a/w > 1$  のとき、単調減少した。これは、凹半球の中央部分は陰影の変化が少ない。その為、ウインドウが凹半球に対して小さいとき、輝度二次モーメントが低くなる為であると考えられる。

## 4.2.2 凹半球の半径が一定で深さが変化する場合

凹半球の半径  $r_a$  を一定とし、深さ  $r_b$  を変化させ、半径と輝度二次モーメントの関係を求めた。ウインドウ内の輝度二次モーメントと凹半球の深さは Fig.4.15 のような関係となった。このとき、太陽仰角を  $90^\circ$  とする。横軸は凹半球の底面の半径  $r_a$  のウインドウの幅  $w$  に対する比である。縦軸はウインドウ内での輝度二次モーメントである。

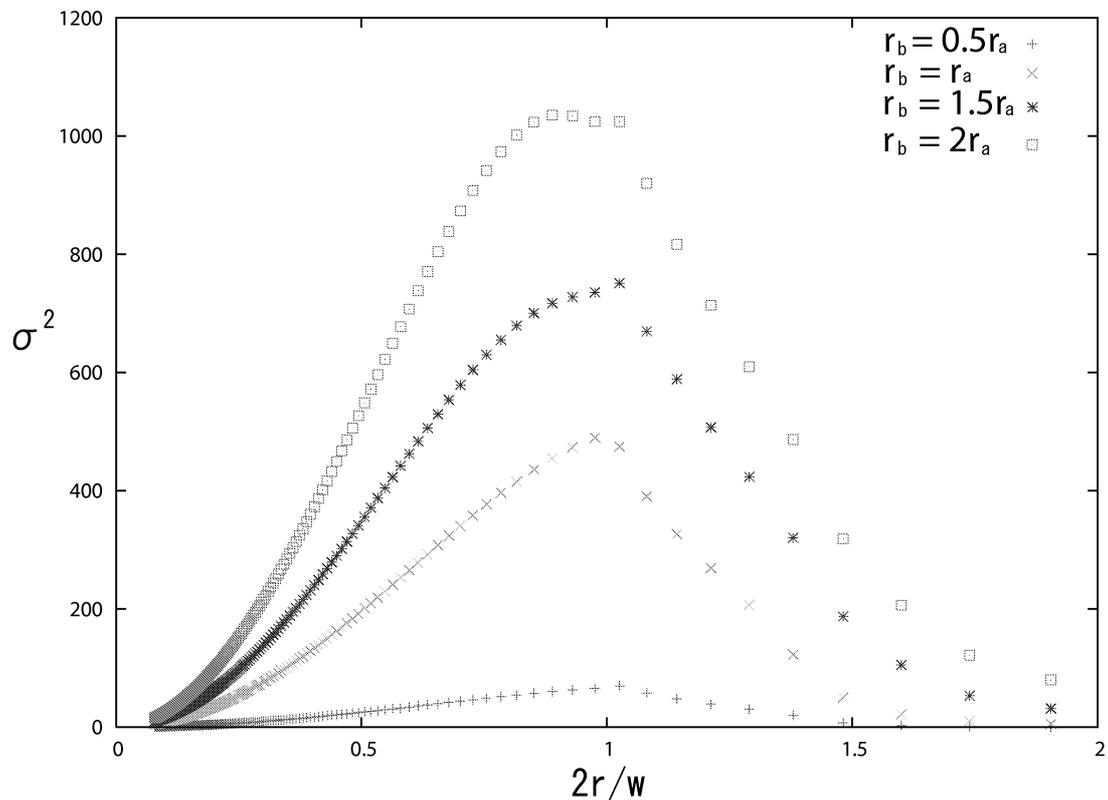


Fig 4.15: 凹半球の深さと輝度二次モーメントの関係

Fig.4.15 から全ての凹半球の深さ  $r_b$  の場合において  $2r/w = 1$  付近において最大の輝度二次モーメントを示すことがわかった。また、そのとき、凹半球の深さ  $r_b$  が大きくなるにつれてウインドウ内の輝度二次モーメントの値が大きくなることがわかった。このことから、輝度二次モーメントから凹半球のおおよその深さを知ることができることがわかった。

## 4.2.3 太陽仰角が変化した場合

太陽仰角が変化した場合に凹半球地形の輝度二次モーメントがどのようになるかについて検討する。Fig.4.11のような地形において $r_a = r_b$ とする。ウインドウ幅 $w$ は一定とし、半球の半径と高さは等しい。その結果、Fig.4.16のようになった。

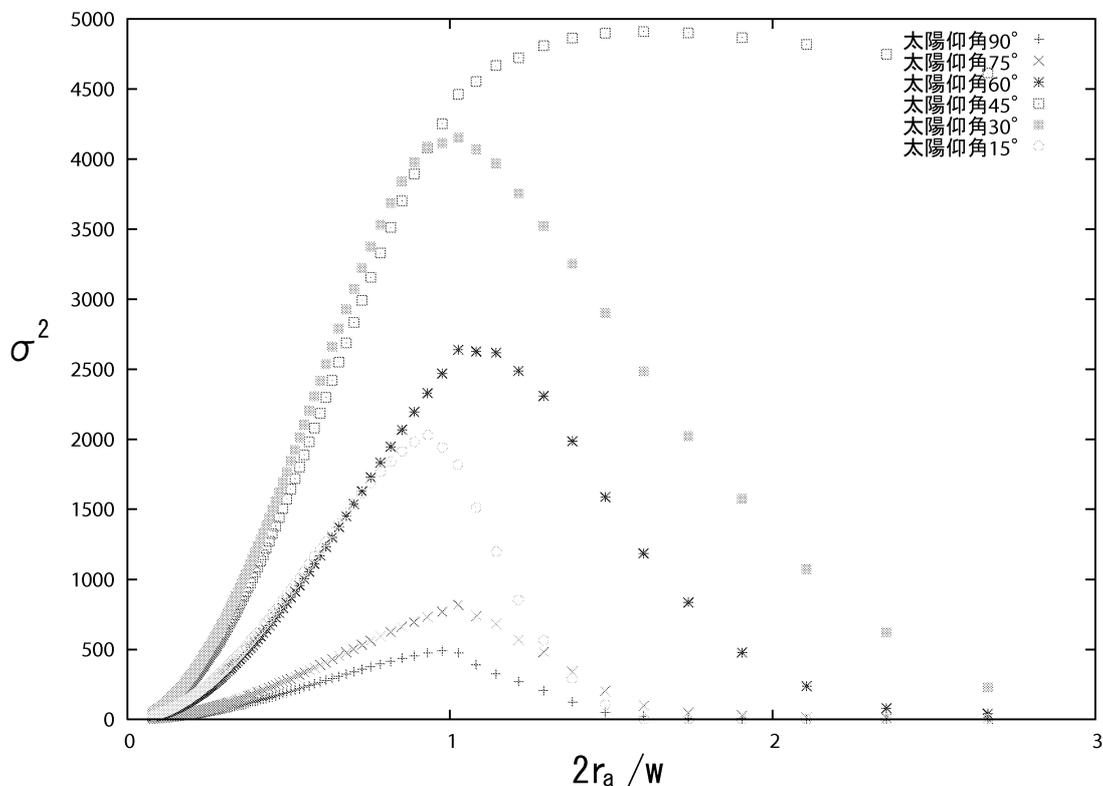


Fig 4.16: 太陽仰角が変化した時の凹半球の半径と輝度二次モーメントの関係

半球の半径 $r$ を変化させた場合、輝度二次モーメントは変化し、最大値を持つ。そのときの最大値の値が、太陽仰角によって変化することがわかった。輝度二次モーメントの最大値は、太陽仰角が $90^\circ$ から小さくなるにつれて増加した。輝度二次モーメントの最大値は、太陽仰角が $45^\circ$ の場合に最大値を示し、それから太陽仰角が小さくなるにつれて減少することがわかった。

半球の半径 $r$ を変化させた場合、太陽仰角が $45^\circ$ 以外の場合はウインドウ内の輝度二次モーメントの値が最大値を持つ時の $r$ は $2r = w$ の値の付近であった。太陽仰角が $45^\circ$ のとき、輝度二次モーメントが最大値を示すときの $2r/w$ は約1.5付近であった。これはFig.4.17のように、太陽仰角が $45^\circ$ の場合、影の境界線が凹地形中心付近に存在する。そのため、ウインドウに比べ凹地形が大きい場合でも、この境界線により輝度二次モーメントは高くなる。

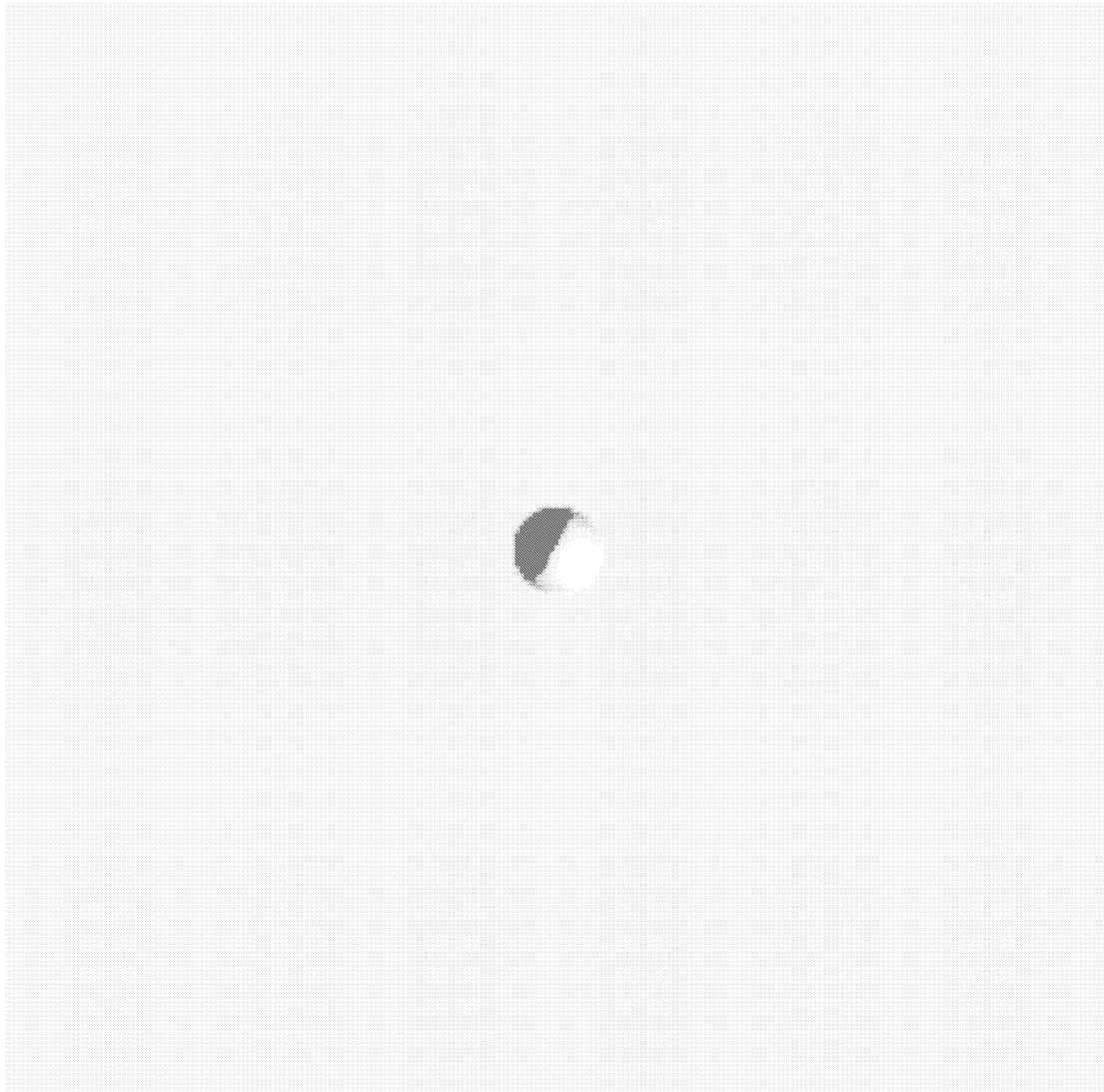


Fig 4.17: 太陽仰角が  $45^\circ$  の場合の凹地形の画像

### 4.3 クレータ

クレータの地形は下式で表すことができる [6].

$$\frac{h(r)}{r_c} = \begin{cases} \frac{h_0}{r_c} \left(\frac{r}{r_0}\right)^\alpha - \frac{h_0}{r_c} & (0 \leq r < r_0) \\ a_1 \left(\frac{r}{r_c} - 1\right) + a_2 \left(\frac{r}{r_c} - 1\right)^2 + \frac{h_1}{r_c} & (r_0 \leq r < r_2) \\ \frac{h_1}{r_c} \left(\frac{r}{r_c} - a_3\right)^{-\beta} & (r_2 \leq r) \end{cases}$$

このとき,  $r$ =クレータの中心からの距離,  $r_0 = 0.884r_c$ ,  $h_0 = 0.36r_c$ ,  $h_1 = 0.038r_c$  である. また,  $\alpha = 1.31$ ,  $\beta = 2.6$ ,  $a_1 = 3.13$ ,  $a_2 = -1.09$ ,  $a_3 = 2.55 \times 10^{-2}$ ,  $r_2 = 1.054r_1$  である. 外観は Fig.4.18 のような形をしており, これを元に先と同様に CG を作成した. ウィンドウの大きさを一定にしたままクレータの半径  $r_c$  を変化させ, 半径と輝度二次モーメントの関係を求めた.

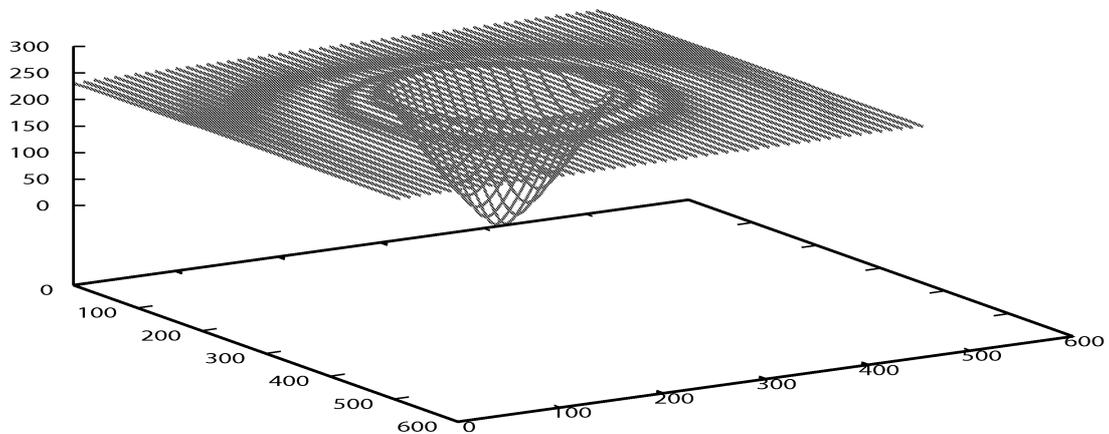


Fig 4.18: クレータのモデル

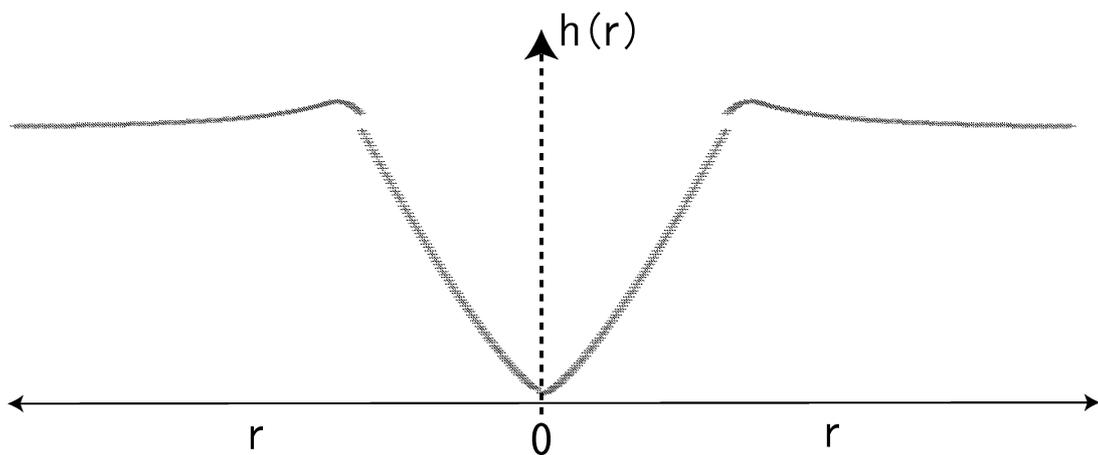


Fig 4.19: クレータの断面

結果, Fig.4.20 のようになった. 岩石と同様にクレータの半径  $r_c$  がウィンドウの幅  $w$  とほぼ等しいとき最大の輝度二次モーメントを示した. 輝度二次モーメントが最大となる時の  $r_c/w$  が 1 よりも少し大きいのは, クレータの半径  $r_c$  上が緩やかな丘陵になっているか

### 4.3 クレータ

らである。また、輝度二次モーメントが減少するときの方が輝度二次モーメントが増加するときよりも緩やかであった。これは、クレータ中心での地形の傾斜の変化が大きい為であると考えられる。

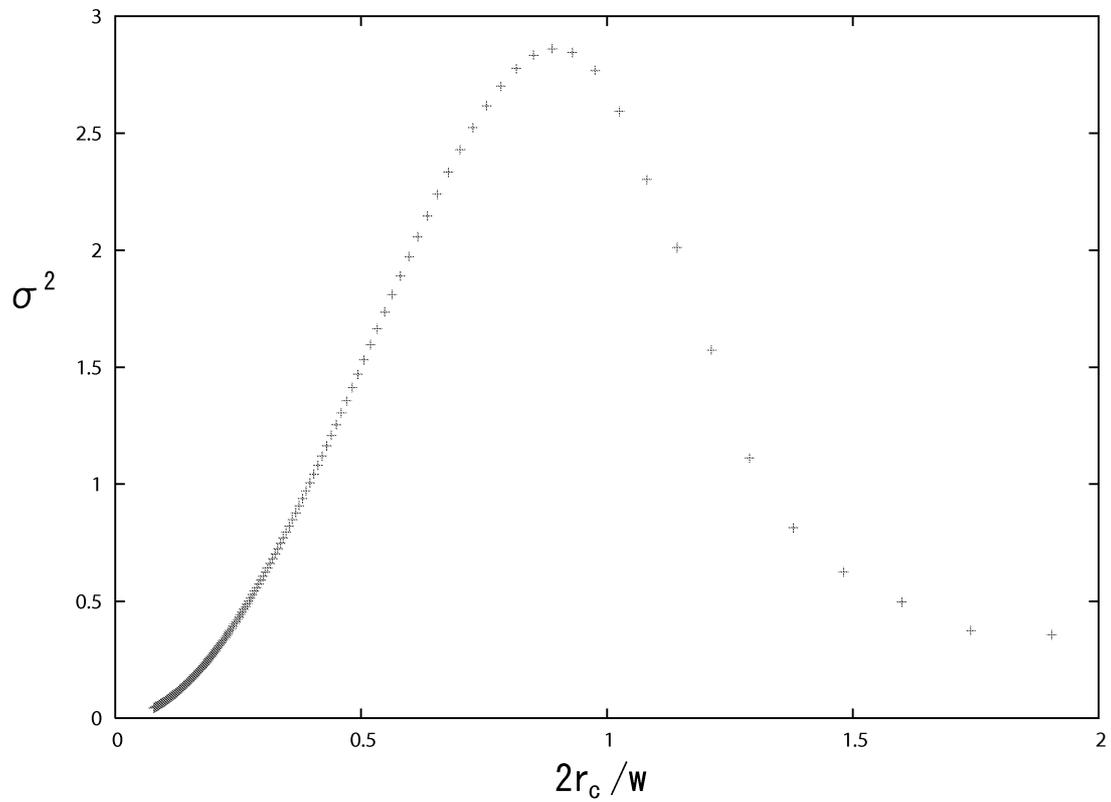


Fig 4.20: クレータの半径と輝度二次モーメントの関係

## 4.3.1 太陽仰角が変化する場合

太陽仰角を変化させ、クレータの半径  $r_c$  とウインドウ内の輝度の二次モーメントの関係を求めた。ここで、ウインドウの幅  $w$  は一定とし、クレータの形は常に変化しないものとする。その結果 Fig.4.21 のようになった。

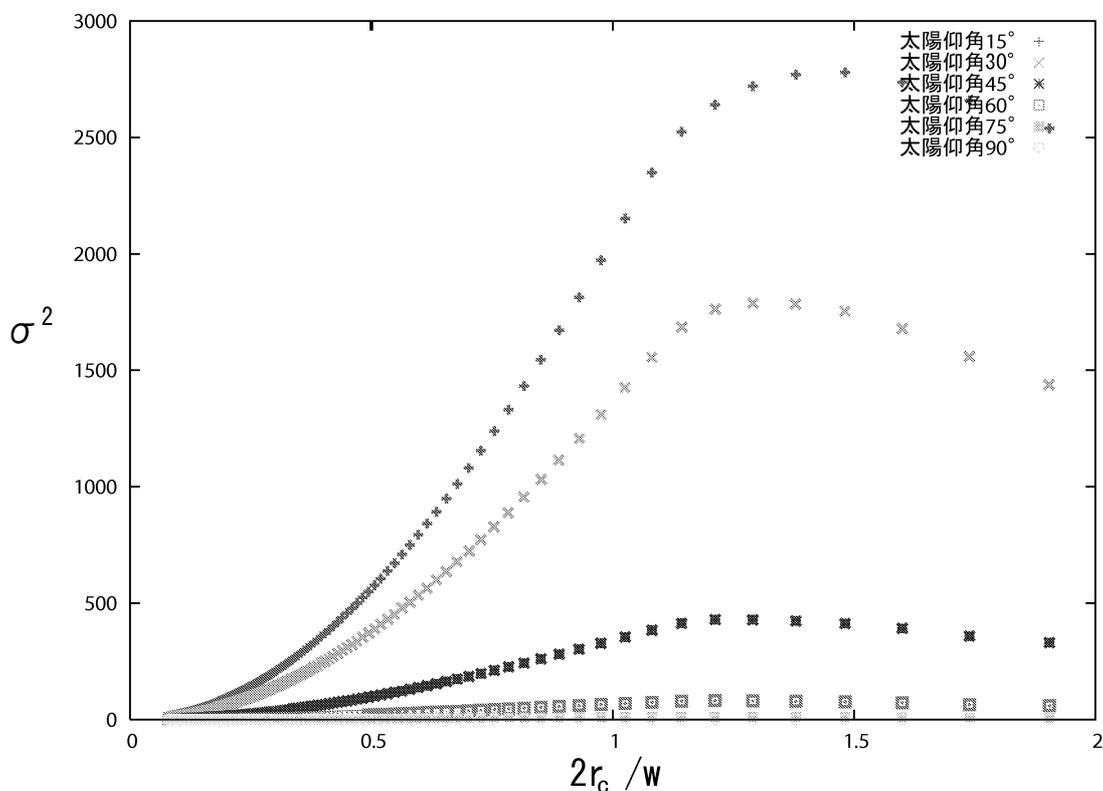


Fig 4.21: 太陽仰角が変化した際のクレータの半径と輝度二次モーメントの関係

太陽仰角が小さいほど、ウインドウ内の輝度二次モーメントの値は小さくなることがわかった。また、太陽仰角が  $90^\circ$  の場合と同様に  $2r_c/w$  が  $1 \sim 1.5$  のときに輝度二次モーメントは最大であった。

クレータの場合も凹半球の場合と同様に輝度二次モーメントからクレータの深さをしることができると考えられる。

## 4.4 障害物が多数分布する場合

Fig.4.22 に示すような半球の障害物が複数存在する地形について考える。

このとき、ウインドウ内の半球の高さは半球の半径に等しく、半球の数  $n$  と半球の半径  $r$  は式 (4.3) のような関係を持つ。

$$n \propto (1/r)^2 \quad (4.3)$$

この関係を保ちながら半球の半径  $r$  を変化させたところ Fig.4.23(a) のようになった。半球の半径、すなわち半球の高さに関係なく、ある一定の輝度二次モーメントを保つことが分かった。

#### 4.4 障害物が多数分布する場合

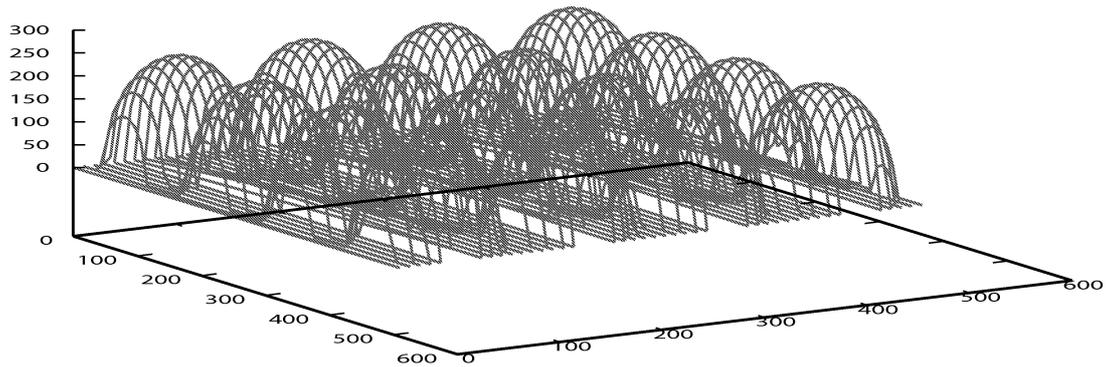


Fig 4.22: 縦 4 個, 横 4 個の半球が分布する地形

次に, 3.5 節で述べたように, 平滑化処理を行った後, 輝度二次モーメントを求めた. 結果 Fig.4.23(b)~(e) のようになった. この時, 3.5.2 節で述べたローパスフィルタを用いた空間周波数領域においてある一定の周波数以上の高周波をカットしている. ここでは高速フーリエ変換を用いた. 高速フーリエ変換を用いる場合, 周波数分解できる周波数域は高速フーリエ変換を行う前の画像の画素数に依存する. これは, サンプル定理から明らかであるが,  $N_{\text{pixel}} \times N_{\text{pixel}}$  の画像を高速フーリエ変換する際, 周波数分解できる周波数域は 0 の直流成分から  $N/2$  までとなる. 例えば,  $512\text{pixel} \times 512\text{pixel}$  の画像の場合 0 の直流成分から 256 の高調波成分までの周波数領域に分解することができる. Fig.4.23(b)~(d) は空間周波数領域で, それぞれ周波数分解できる全周波数帯の  $1/10 \times N/2$ ,  $1/30 \times N/2$ ,  $1/100 \times N/2$  の周波数の値を持つ低い周波数のみをローパスフィルタで通過させた. Fig.4.23(e) は, このときの輝度二次モーメントをとる際のウインドウ幅  $512\text{pixel}$  に対し,  $35\text{pixel} \times 35\text{pixel}$  の領域で平均化 [12] を行ったものである. 平均化は式 (3.7) を用いて計算する. このとき, 平滑化された後の画像における  $(i, j)$  における輝度を  $I'_{i,j}$  とする (3.5.1 節参照).  $\mu_{i,j}$  を平均化された画像の位置  $(i, j)$  における輝度  $I'_{i,j}$  に代入した.

ローパスフィルタを用いた結果, 半径がある一定値よりも小さな障害物の輝度二次モーメントが低下することが分かった. また, ローパスフィルタで通す周波数帯を狭くするほど, 輝度二次モーメントが低下する障害物の半径が大きくなることが分かった. また, 平均化を行った際も同様の結果が得られた.

#### 4.4 障害物が多数分布する場合

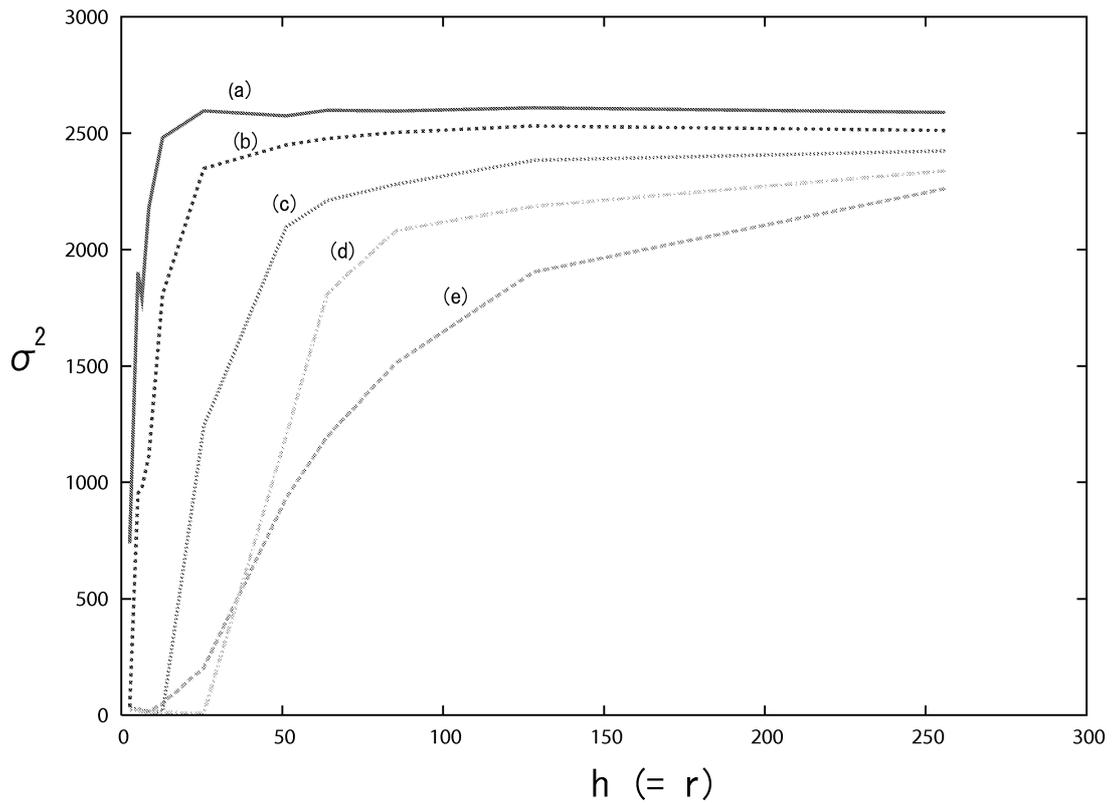


Fig 4.23: 高低差と二次モーメントの関係. (a) 平滑化無し, (b) 低波長 1/10, (c) 低波長 1/30, (d) 低波長 1/100, (e) 平均化

# 第5章 複雑地形に対するシミュレーション解析

本章では、異なる大きさの障害物や複雑地形を含んだ画像を用いてシミュレーション解析を行う。そして、提案手法がそれらの画像に対して有効性があるかどうか検討する。

## 5.1 異なる大きさの障害物に対する検討

半径が異なる障害物が分布した地形について検討する。4.4節で、小さな障害物が多数分布する場合、大きな障害物が分布する場合と同様な輝度二次モーメントをもつことが示された。そこで、半径5mと半径30mの半球が512m×512mの平面状に分布する地形画像を作り、シミュレーションを行った。Fig.5.1は、その地形を真上から見た画像である。また、Fig.5.2はその地形の高さ情報を表すDEM (Data of Elevation Map) である。

このとき、地形上の高さは分かっているものとした。ウインドウの幅を51pixel×51pixelとし、輝度二次モーメントを求めた。このとき、用いた画像は1pixel = 1mである。また、同時に、ウインドウ内の地形の高低差を求めた。

このときのウインドウ内の高低差と輝度二次モーメントの関係をFig.5.3に表した。横軸はウインドウ内の高低差、縦軸はウインドウ内の輝度二次モーメントの値である。

Fig.5.3から半径5mの障害物も半径30mの障害物も同じような輝度二次モーメントを示すことがわかった。よって、この場合、輝度二次モーメントとウインドウ内の高低差にあまり関係性が無く、輝度二次モーメントからウインドウ内の着陸危険度を推定することができない。

そこで、輝度二次モーメントを求める前に、5pixel×5pixelの平均化による平滑化処理を行った。平滑化後の輝度二次モーメントとウインドウ内の高低差は、Fig.5.4のようになった。先ほどのFig.5.3に比べ半径5mの比較的小さな障害物が分布する領域の輝度二次モーメントが低下し、輝度二次モーメントとウインドウ内の高低差に相関性を見ることが出来る。

Fig.5.5が平滑化処理を行わずに輝度二次モーメントを求めた結果である。輝度二次モーメントが高い領域ほど白く表している。このとき輝度二次モーメントを求めるウインドウは51pixel×51pixelである。

また、Fig.5.6は5pixel×5pixelのウインドウで平均化処理を行った後に51pixel×51pixelのウインドウで輝度二次モーメントを求めた結果である。

Fig.5.5では地形画像全体が高い輝度二次モーメント値を示し、障害物の大きさを識別することができない。Fig.5.6では小さな障害物の輝度二次モーメントが低下し、画面中央にある比較的大きな障害物の輝度二次モーメントのみが高い値を示していることがわかる。

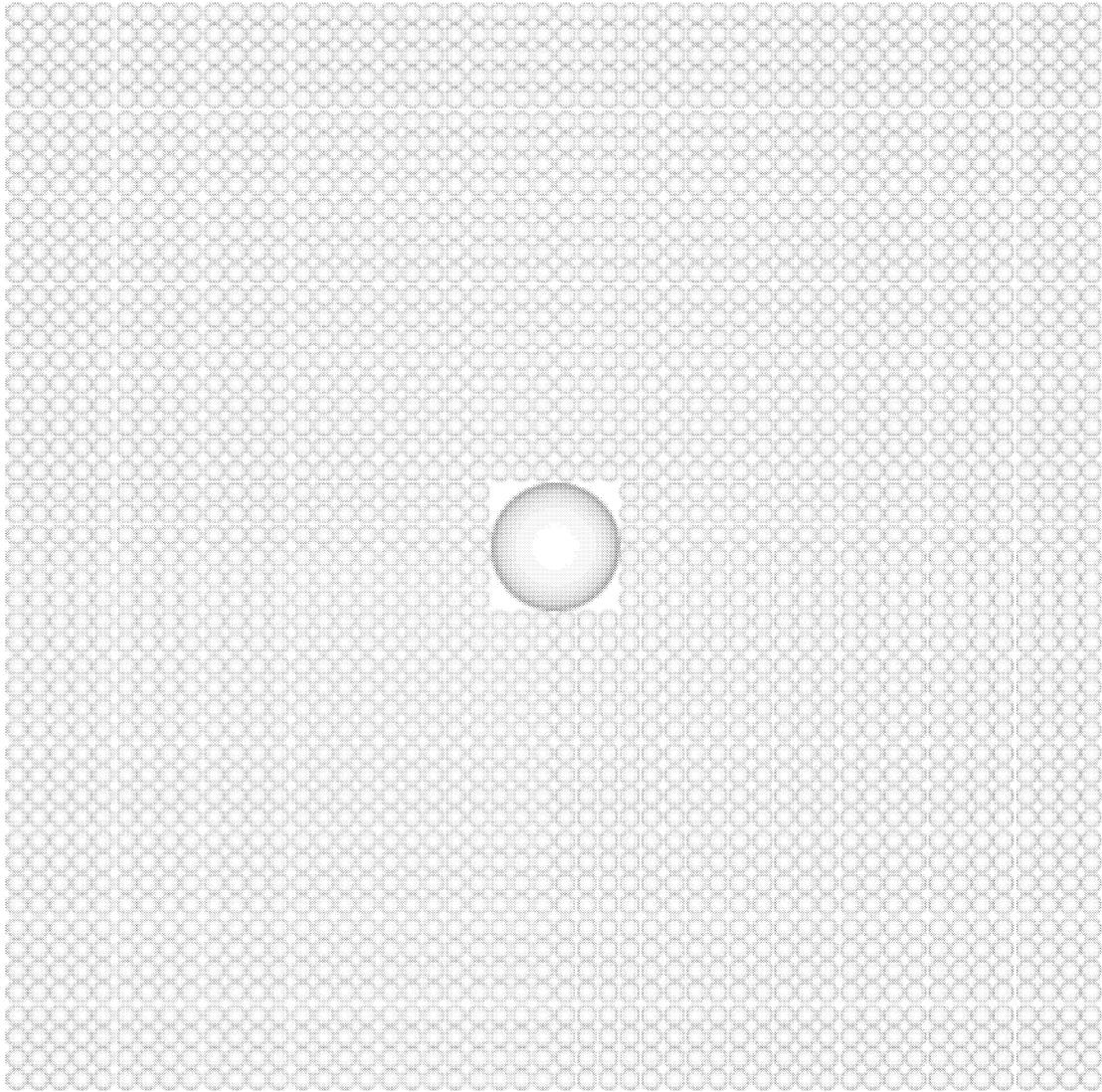


Fig 5.1: 半径 30m と 5m の半球が分布した地形の CG

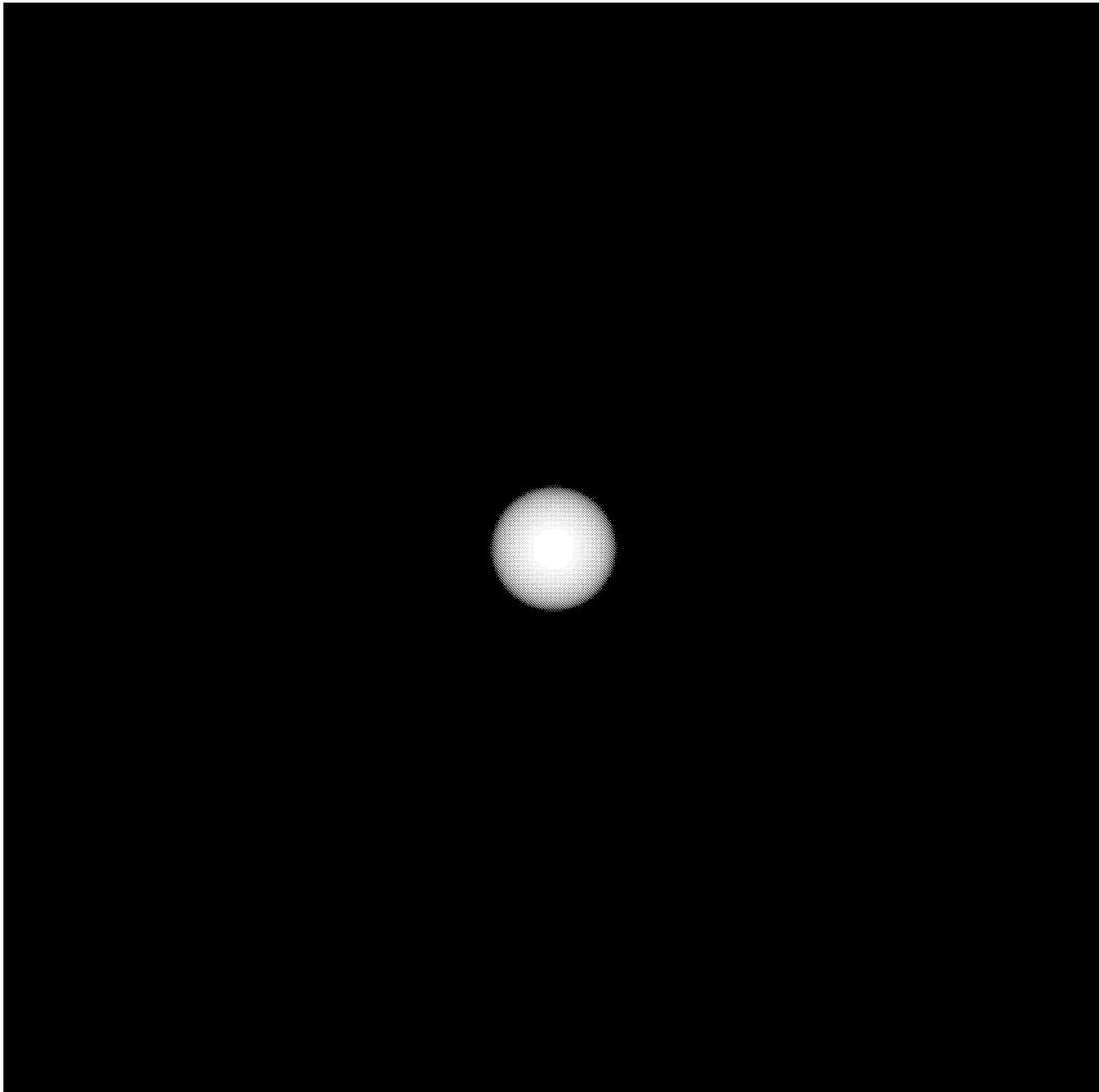


Fig 5.2: 半径 30m と 5m の半球が分布した地形の DEM

## 5.1 異なる大きさの障害物に対する検討

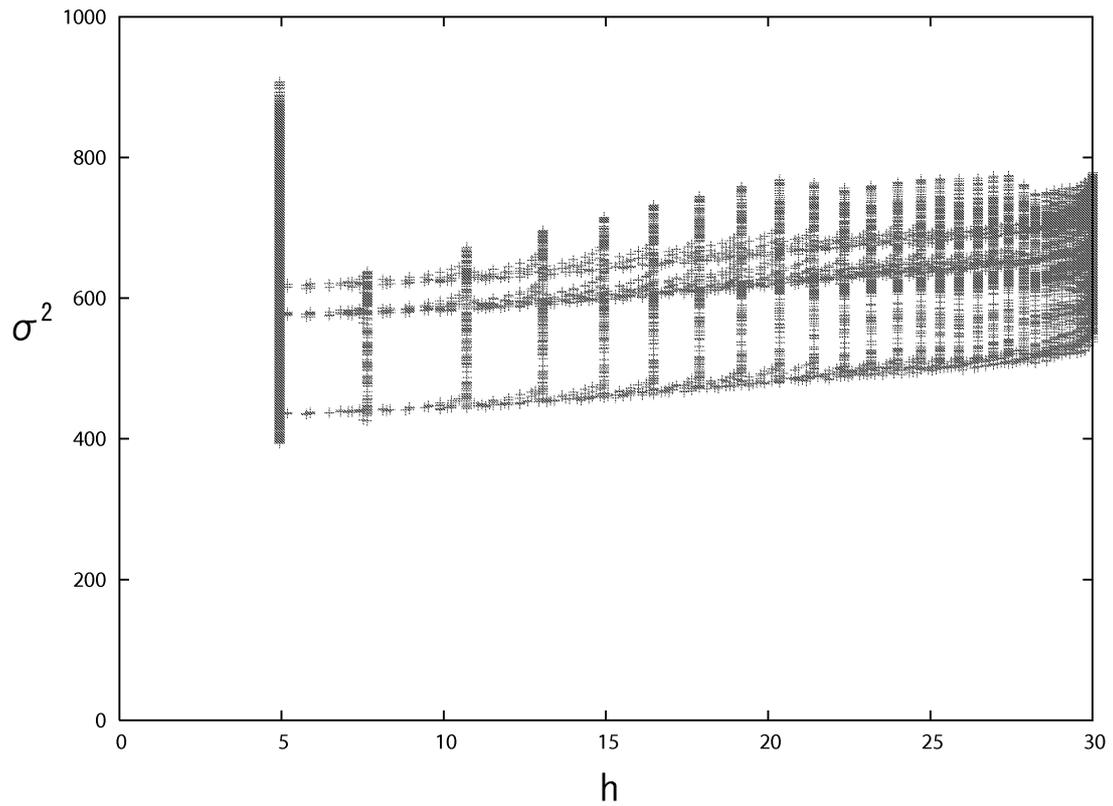


Fig 5.3: 輝度二次モーメントとウィンドウ内の高低差の関係

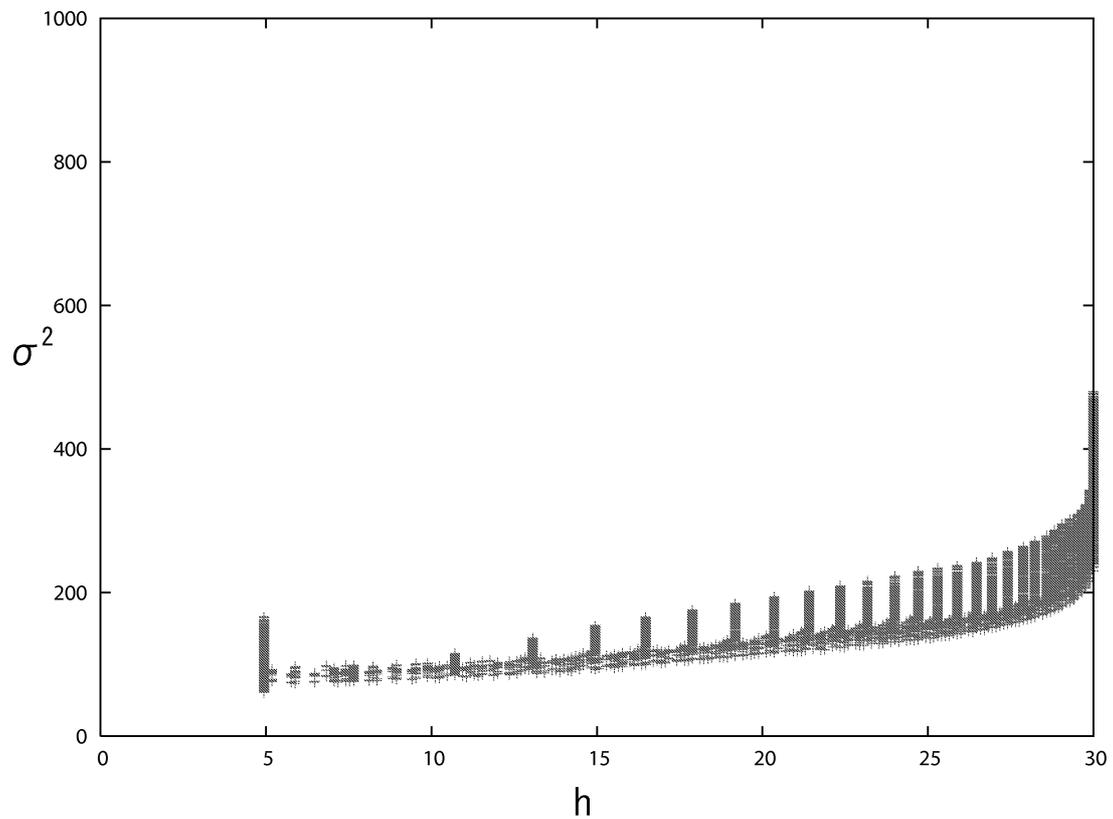


Fig 5.4: 平滑化後の輝度二次モーメントとウィンドウ内の高低差の関係

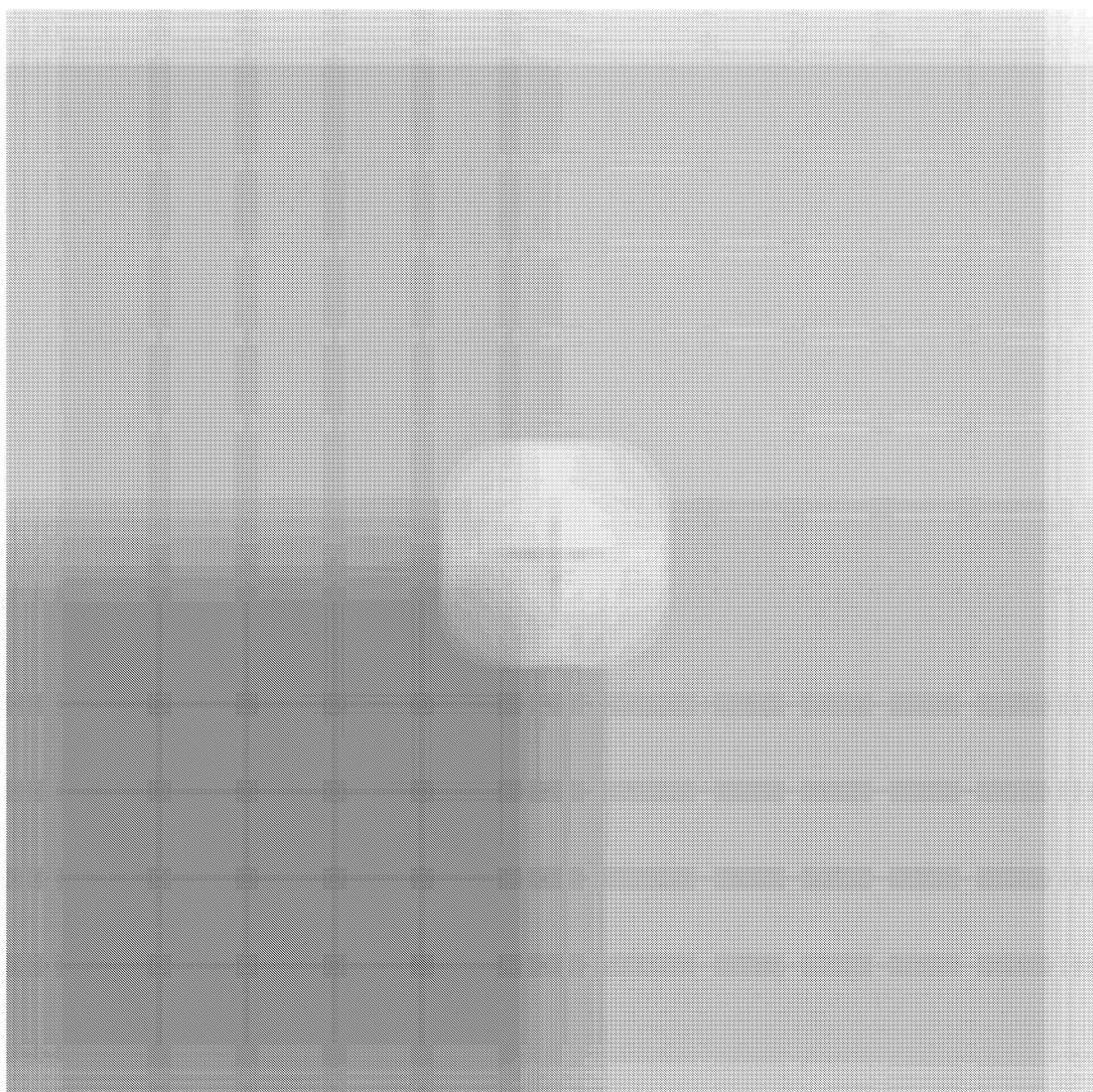


Fig 5.5: 輝度二次モーメント結果 (ウインドウ:51pixel × 51pixel)

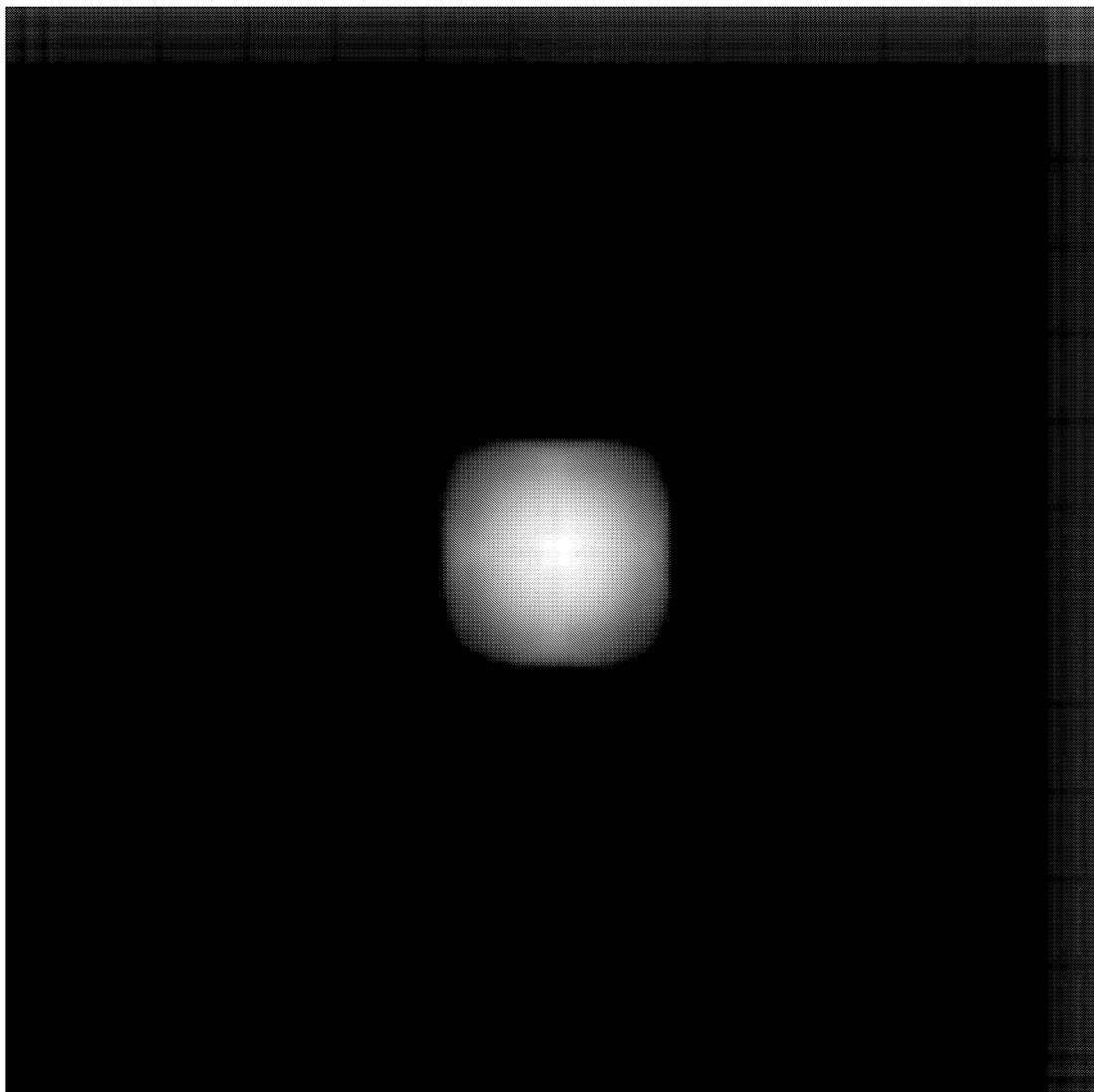


Fig 5.6: 5pixel×5pixel で平均化処理を行った後の輝度二次モーメント結果  
(ウインドウ : 51pixel×51pixel)

## 5.1 異なる大きさの障害物に対する検討

---

以上のことから、地形画像の平均化を行ってから輝度二次モーメントを求めることによって着陸危険な地形の高さを推定することができることが示せた。

## 5.2 複雑な地形に対する検討

### 5.2.1 シミュレーション検討

Fig.5.7のような複雑な地形画像を用いてシミュレーションを行った。太陽仰角は $90^\circ$ である。また、この地形のDEMはFig.5.8である。

Fig.5.7の地形画像から $35\text{pixel} \times 35\text{pixel}$ のウインドウを用いて輝度二次モーメントを求めた結果がFig.5.9である。輝度二次モーメントが高い領域ほど白く表している。Fig.5.10は $3\text{pixel} \times 3\text{pixel}$ で平均化を行った後に輝度二次モーメントを求めた結果である。

また、Fig.5.8に対し $35\text{pixel} \times 35\text{pixel}$ のウインドウを $1\text{pixel}$ ずつ走査し、ウインドウ内の高低差を求めた結果、Fig.5.11のようになった。

このときのウインドウ内での高低差と輝度二次モーメントの関係を表した結果がFig.5.12である。また、平滑化を行ってから輝度二次モーメントを求めた際の高低差と輝度二次モーメントの関係を表した結果がFig.5.13である。

Fig.5.12とFig.5.13から、複雑な地形の場合でウインドウ内の高低差と輝度二次モーメントにある一定の相関性があることがわかった。しかし、ある一定の幅をもった相関性である為、輝度二次モーメントからウインドウ内の高低差を高精度で推定することはできない。

Fig.5.12, Fig.5.13から、この相関性は一意ではなく幅を持っている。さらに輝度二次モーメントが低く、ウインドウ内の高低差が大きい領域がある。これは、様々な大きさや高さの地形の輝度二次モーメント結果が重なっている為である。よって、この結果をそのまま用いて輝度二次モーメントからウインドウ内の高低差を推定することは困難である。以下でこの問題を考察する。

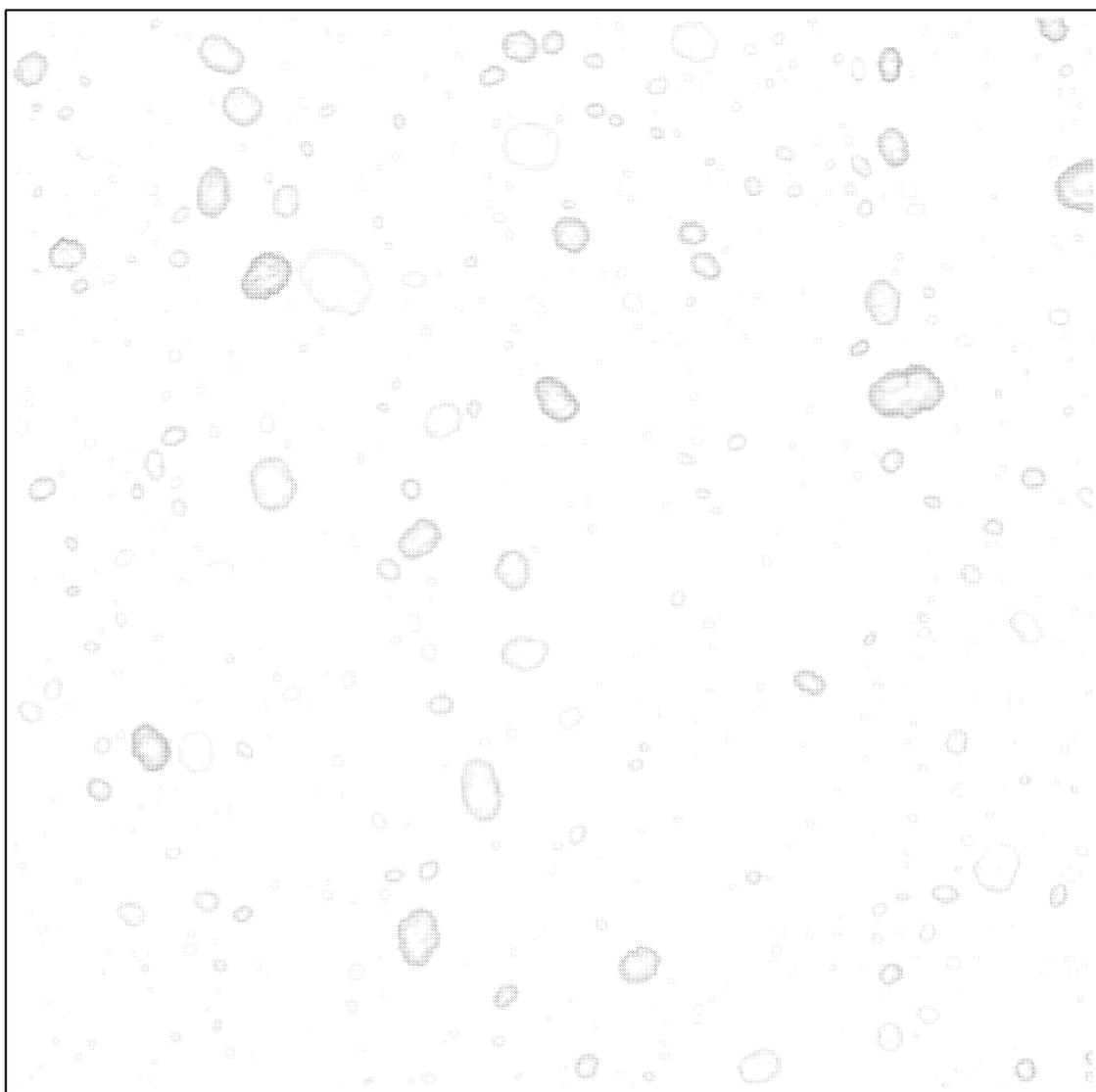


Fig 5.7: 太陽の仰角が  $90^\circ$  の場合の複雑地形の画像

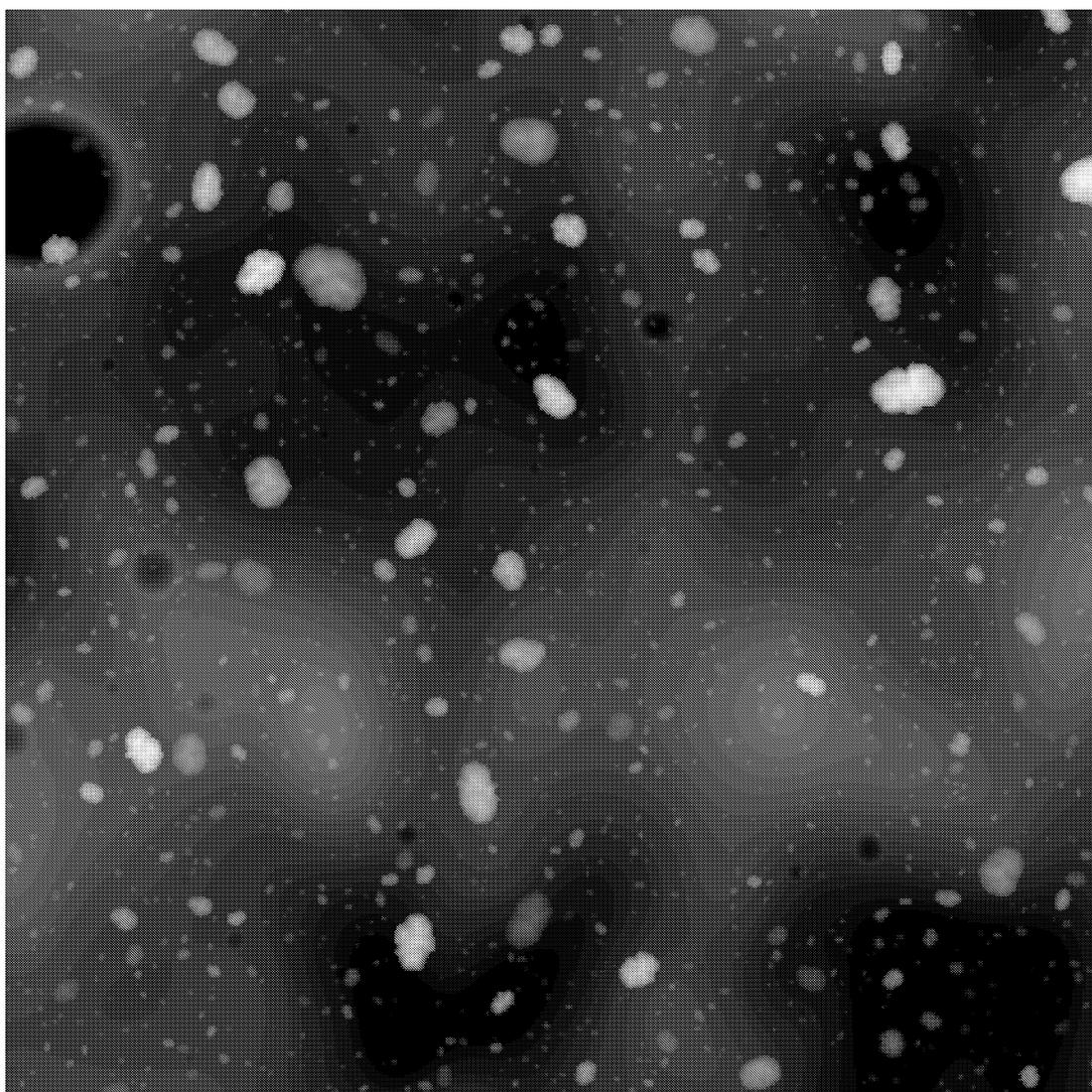


Fig 5.8: 複雑地形の DEM

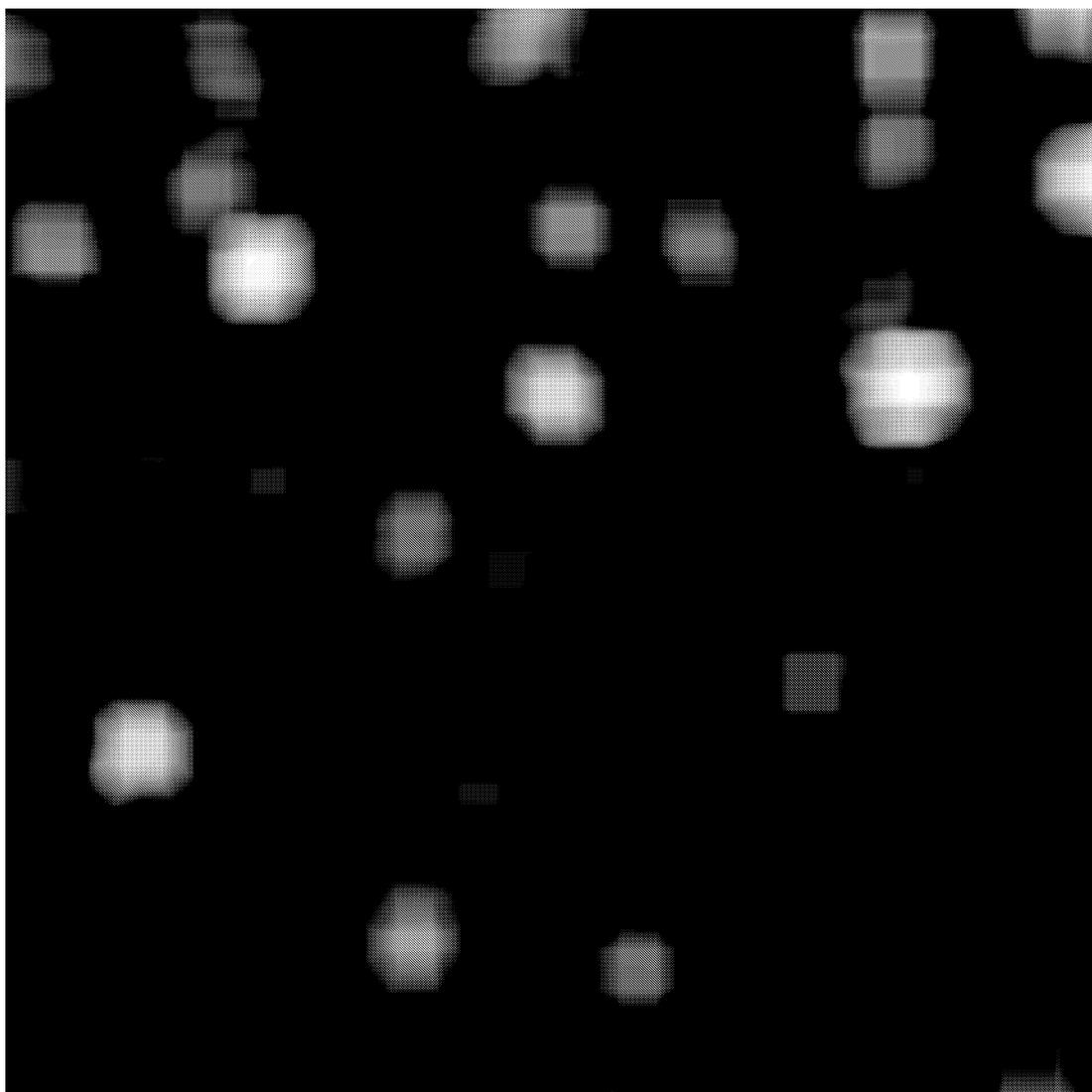


Fig 5.9: 輝度二次モーメント結果(ウインドウ : 35pixel×35pixel)

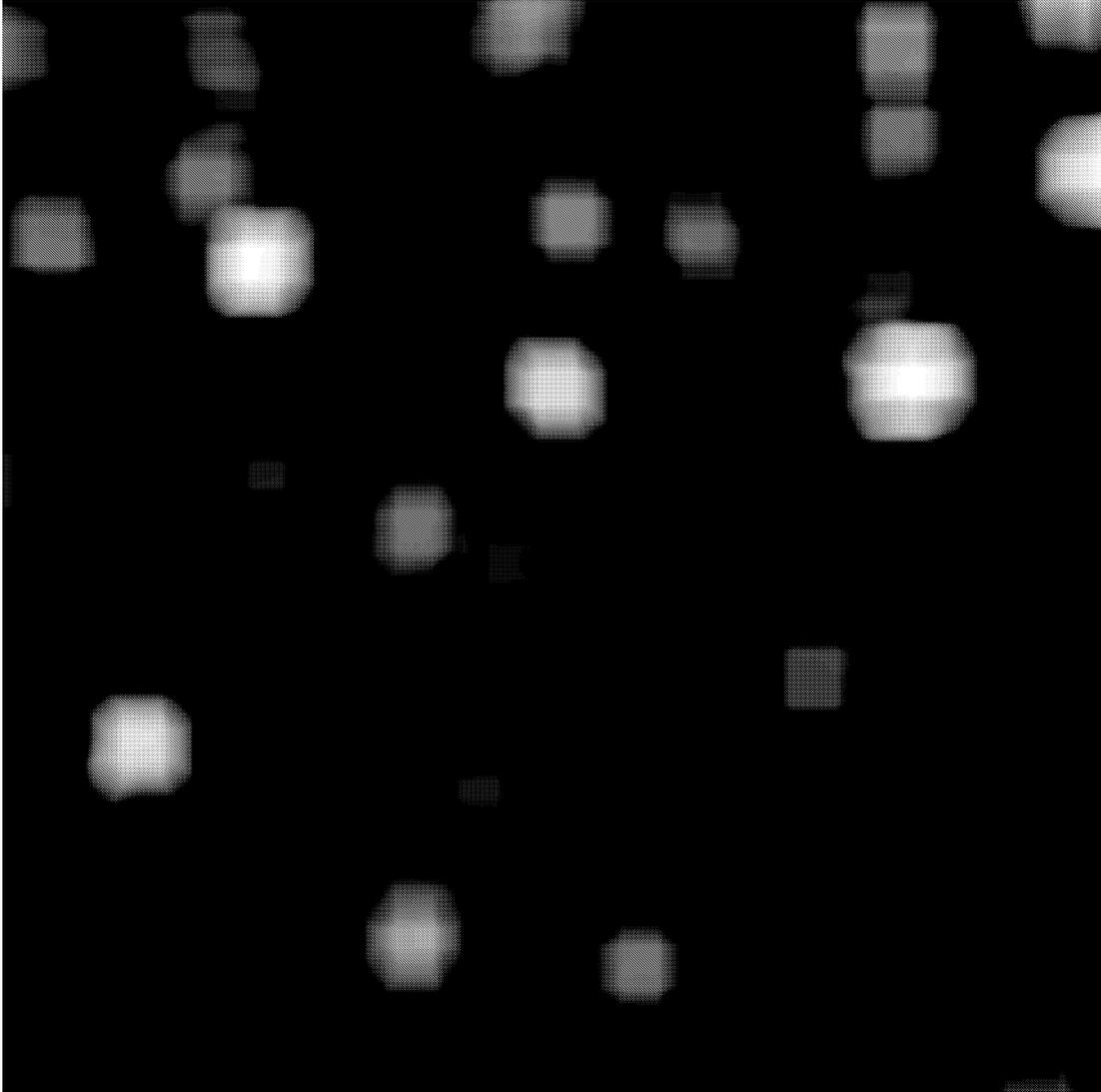


Fig 5.10: 3pixel×3pixel で平均化処理を行った後の輝度二次モーメント結果  
(ウインドウ : 35pixel×35pixel)

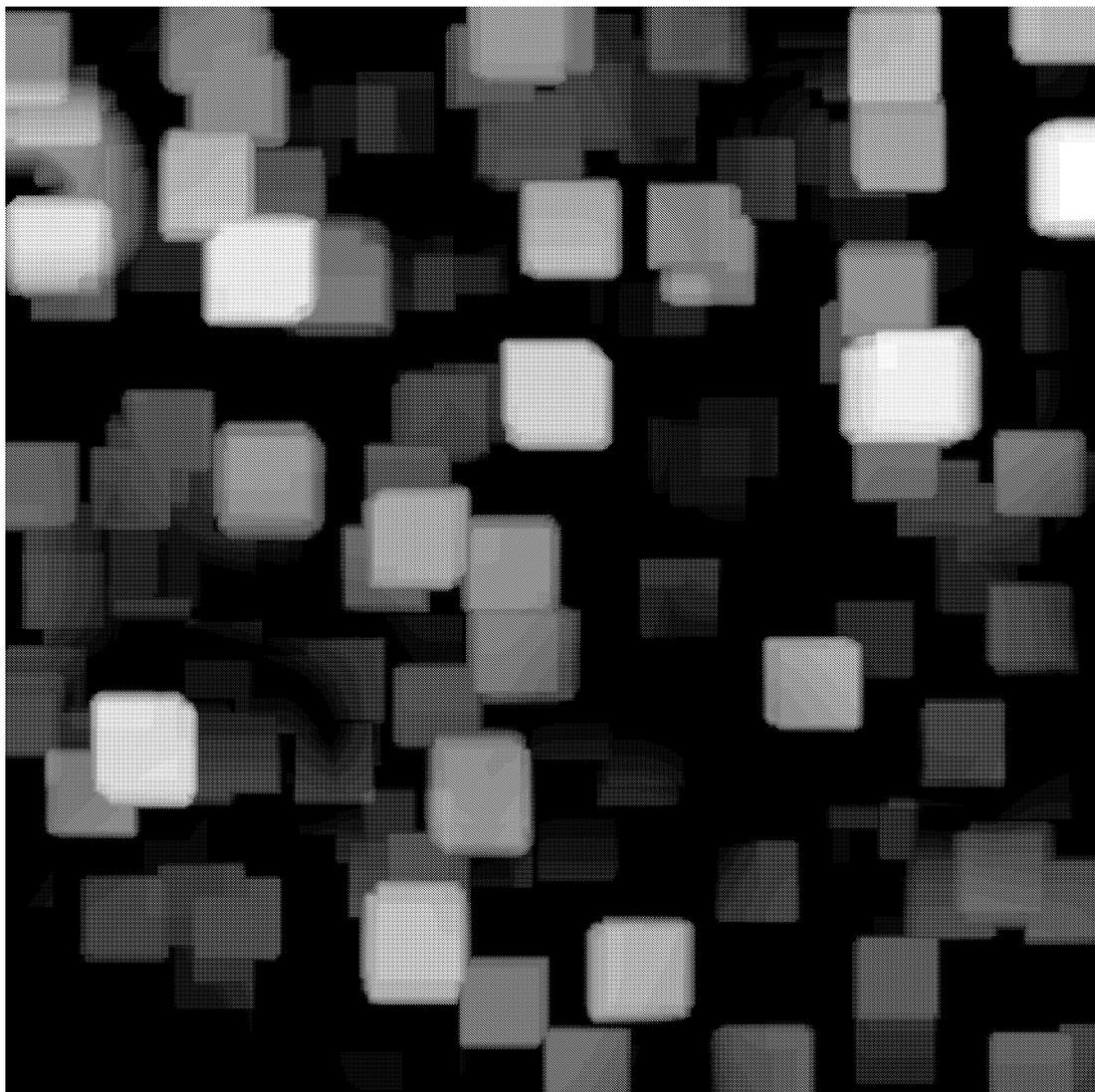


Fig 5.11: 35pixel×35pixel 内での高低差

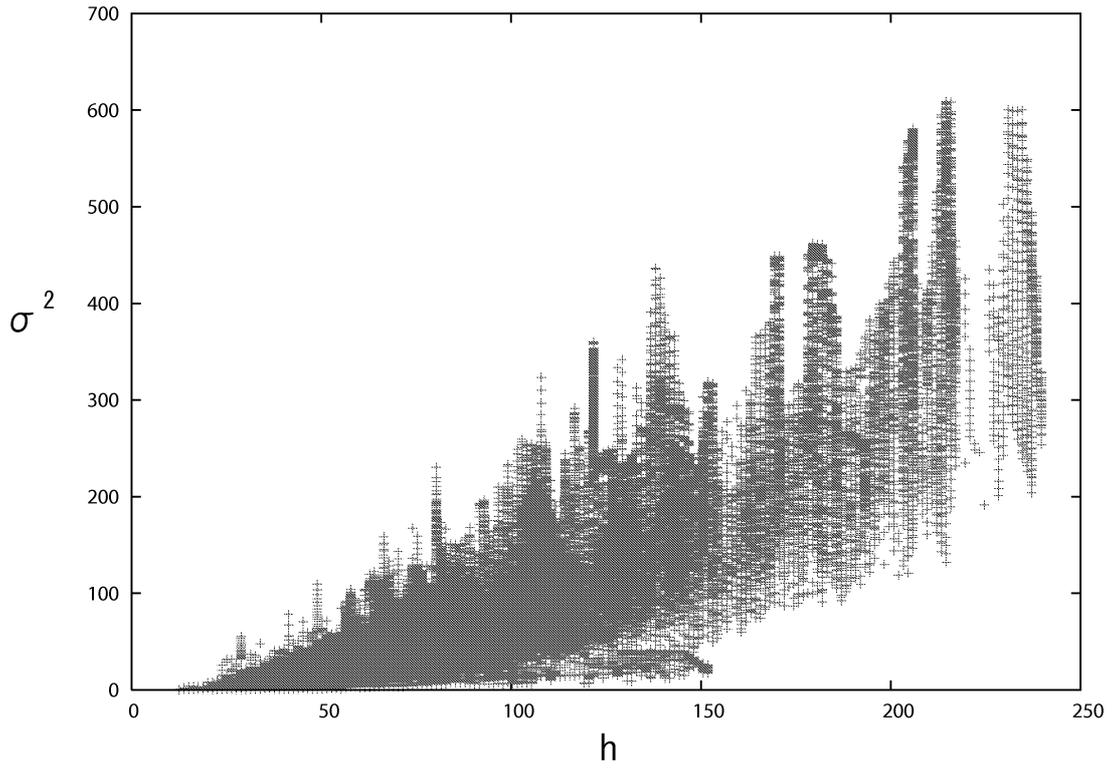


Fig 5.12: 局所的な輝度二次モーメントと高低差の関係

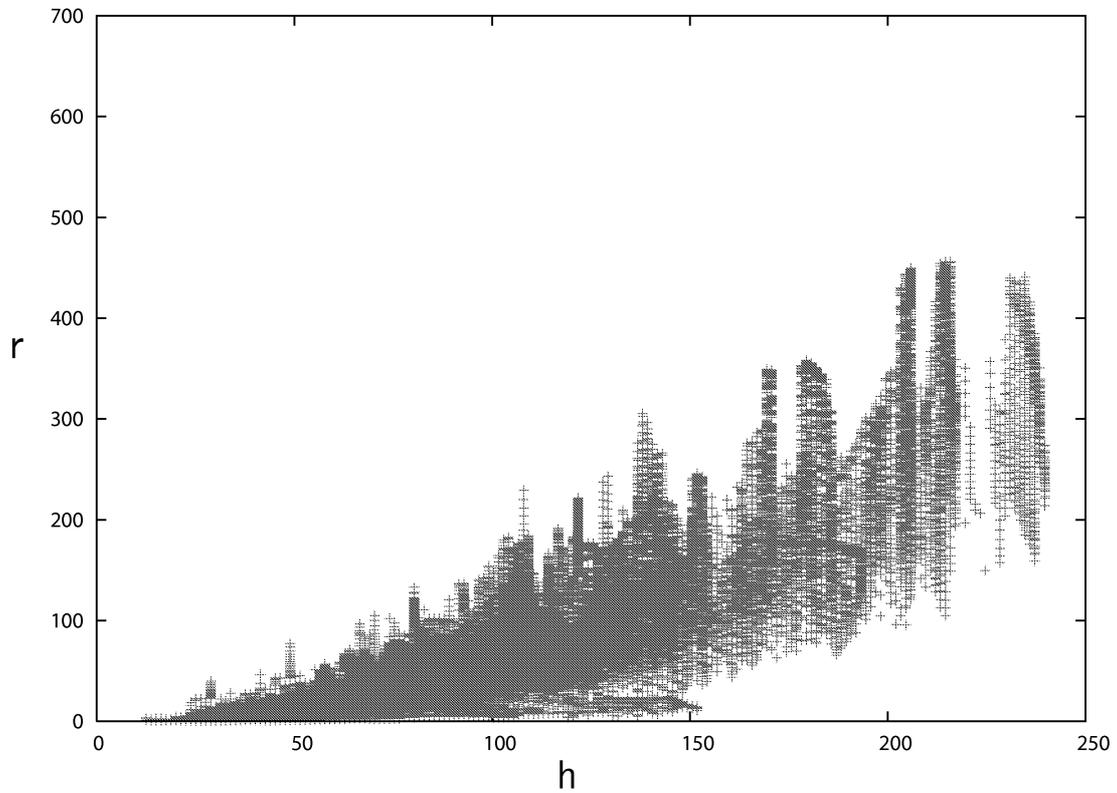


Fig 5.13: 平均化処理を行った後の局所的な輝度二次モーメントと高低差の関係

## 5.2.2 ウインドウ内に障害物の一部が含まれる場合

障害物の一部がウインドウ内に含まれる場合、輝度二次モーメントが低く、ウインドウ内の高低差が大きくなることが考えられる。そこで、Fig.5.14のように、ウインドウを1pixelずつ移動させ、ウインドウ内の輝度二次モーメントと高低差がどのように変化するかを見た。このとき、障害物はFig.4.2のような凸半球とし、半球の半径と高さを等しくする。また、ウインドウは移動する際半球の中央を通過するものとした。結果はFig.5.18のようになった。

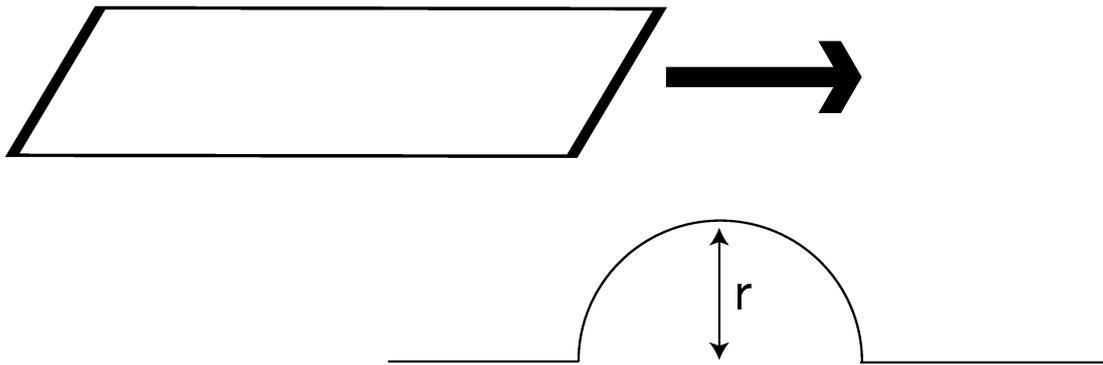


Fig 5.14: 障害物を固定し、ウインドウを移動する

また、Fig.5.15はウインドウの進行方向の距離を横軸にとり、高さを縦軸で表したものである。半球の中心は横軸の0である。Fig.5.16も同様にウインドウの進行方向の距離を横軸にとり、ウインドウ内の輝度二次モーメントを縦軸で表したものである。半球の中心は横軸の0であり、横軸の値はウインドウ中心の位置を示している。Fig.5.17も同様にウインドウの進行方向の距離を横軸にとり、ウインドウ内の高低差を縦軸で表したものである。半球の中心は横軸の0であり、横軸の値はウインドウ中心の位置を示している。

Fig.5.18から、ウインドウが半球の中央に位置しないとき、ウインドウ内の輝度二次モーメントが低く、高低差が大きくなることが分かった。このことから、輝度二次モーメントから障害物のおおよその高さを推定するには、ウインドウ中心が障害物の中央と一致することが望ましいと考えられる。

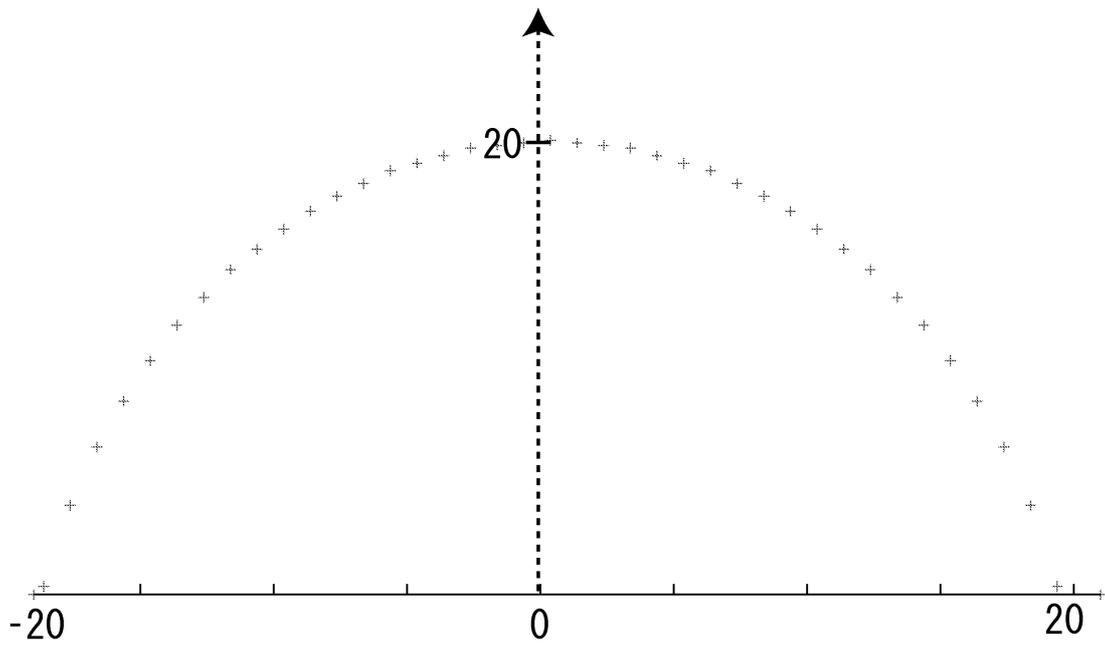


Fig 5.15: 凸半球の高さ

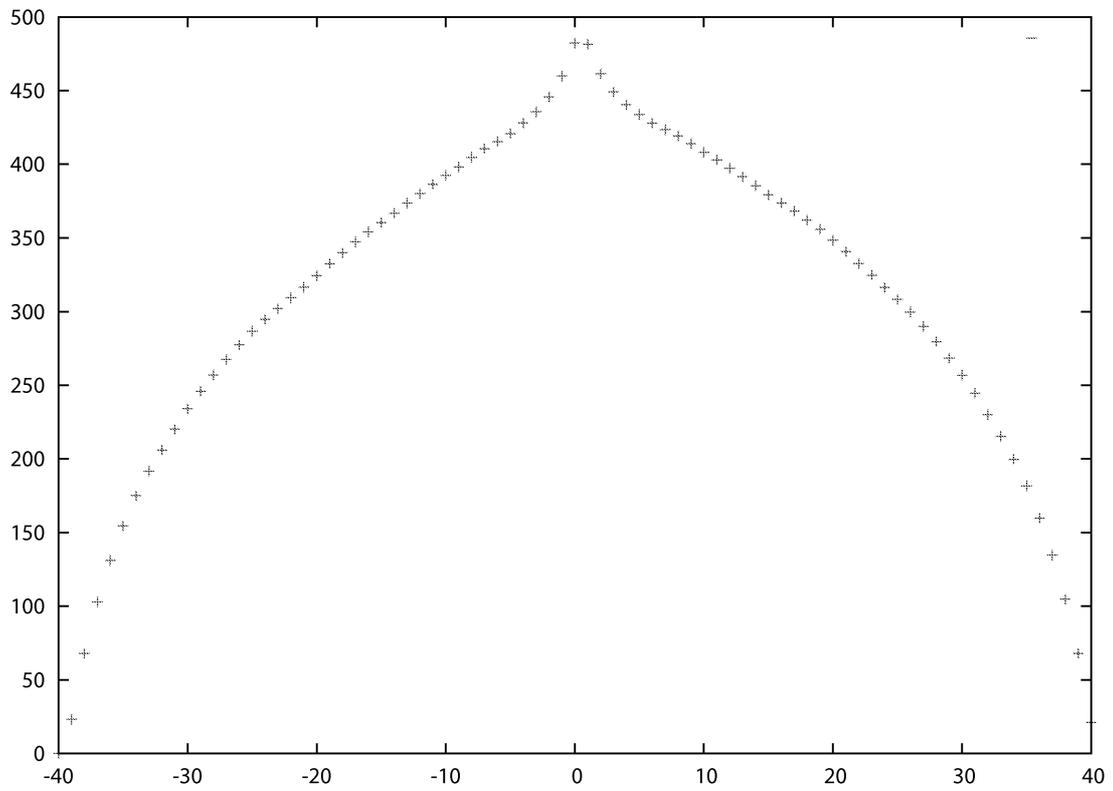


Fig 5.16: ウィンドウを移動した際のウィンドウ内の輝度二次モーメントの変化

## 5.2 複雑な地形に対する検討

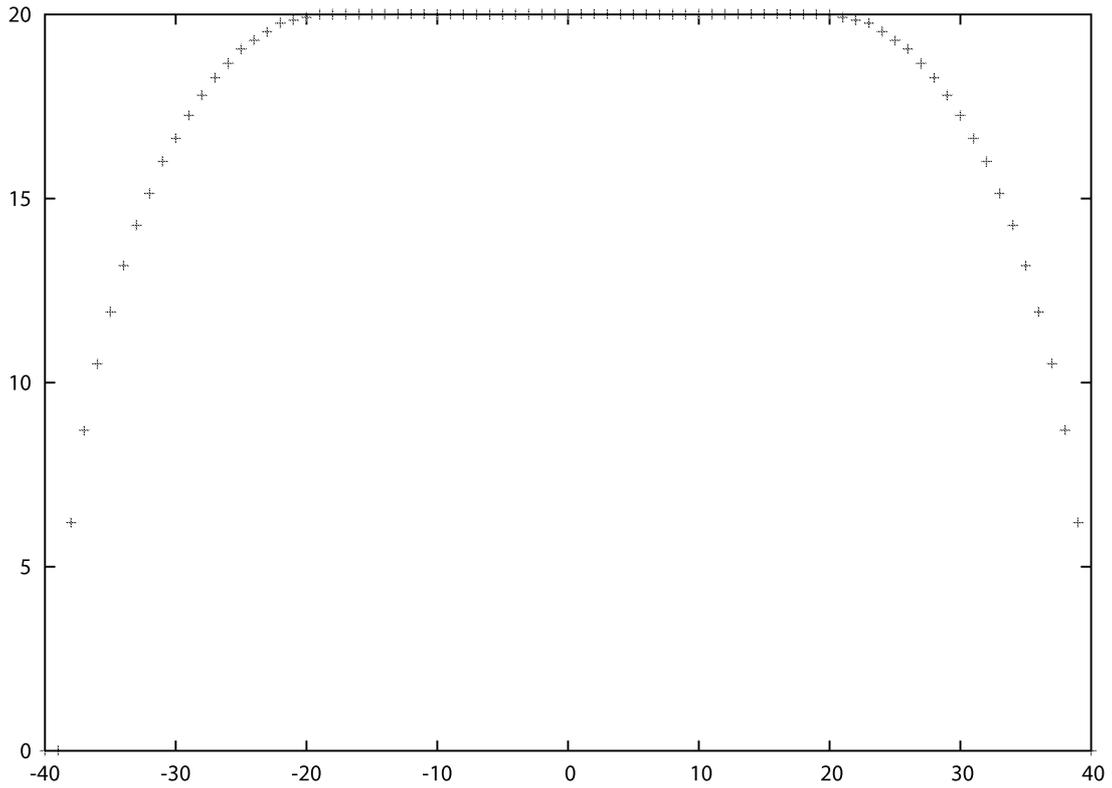


Fig 5.17: ウィンドウを移動した際のウィンドウ内の高低差の変化

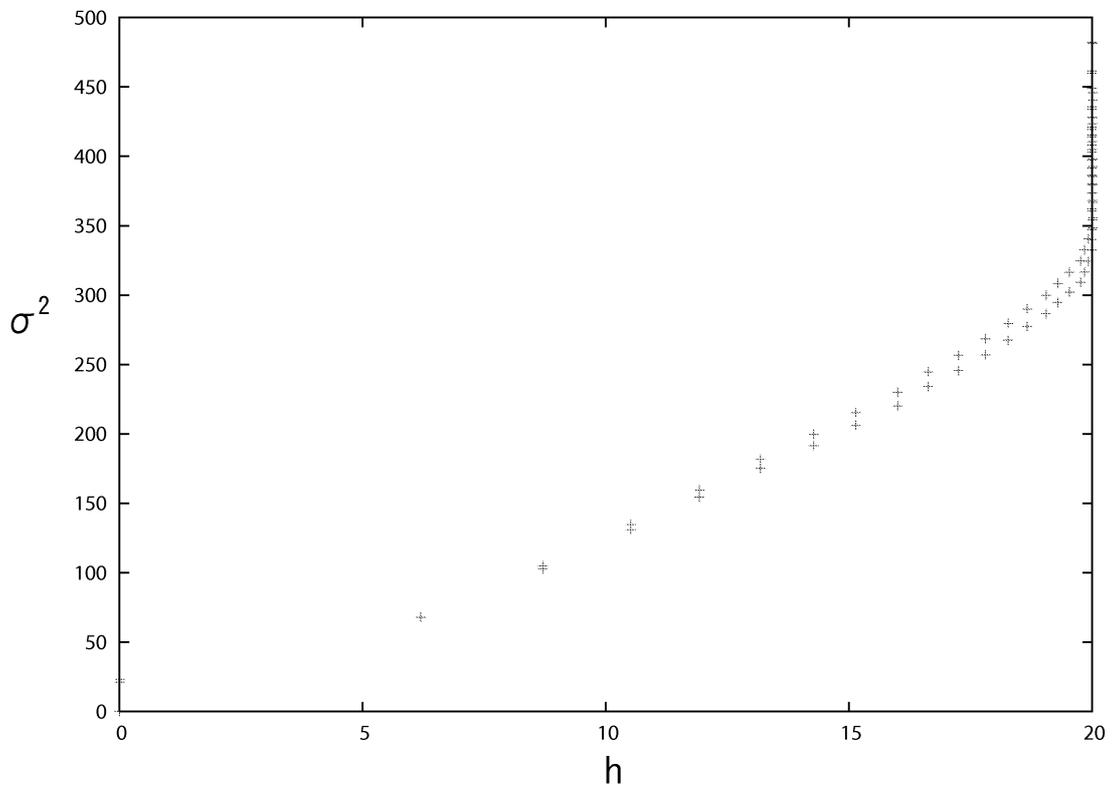


Fig 5.18: ウィンドウを走査した際の輝度二次モーメントと高低差の関係

### 5.2.3 障害物の中央とウインドウの中心を一致させた場合

5.2.2 節より、障害物の一部のみがウインドウ内に含まれる場合、ウインドウ内の高低差に比べ、輝度二次モーメントが低くなり、相関性を示さなくなることがわかった。そこで、本論文では、ウインドウの中心を岩の中央と一致するように設定し、その際の輝度二次モーメントと高低差を求めた。そのとき用いた地形画像が Fig.5.19, DEM が Fig.5.20 である。それぞれ、障害物の中央がウインドウの中心となるよう設定したときのウインドウの位置に番号を付けた。

このときのウインドウ内の輝度二次モーメントと高低差の関係性を Fig.5.21 のように示した。結果、障害物の中央とウインドウの中心が一致したとき、複雑な地形であってもウインドウ内の輝度二次モーメントと高低差の関係性が示されることがわかった。このことから、ウインドウ中心と障害物中央とを一致させることで、複雑な地形であっても輝度二次モーメントから障害物のおおよその高さを知ることができるとわかった。

ここではウインドウ中心と障害物の中心を手動で一致させた。一連の処理を自動化させるためには、障害物の中心を検出する手法と組み合わせることが必要となる。障害物の中心を検出する手法は以下のような処理が考えられる。

1. 輝度二次モーメントの高い場所を抽出し、障害物の存在する領域を特定する
2. エッジ抽出から障害物の輪郭を抽出する。

本論文で提案した手法では、輝度二次モーメントを求めているため、その結果を用いて上記1を行う。さらに、その特定した領域内でエッジ処理を行うことによって上記2を行う。ここで用いるエッジ抽出手法は、1次微分による処理手法である [12]。エッジ抽出の範囲を画像の一部に絞ることが可能となる為、画像全体のエッジ抽出が不要であり、画像処理量を少なくすることができる。障害物の輪郭を抽出した後、画像における障害物の縦横の長さがわかる。その縦横の長さから、障害物の中心を求めることができる。そして、障害物の中心がウインドウの中心に重なるようにウインドウの位置を調節する。そのウインドウを用いて提案手法を適用すればその障害物の高さを推定することができる。

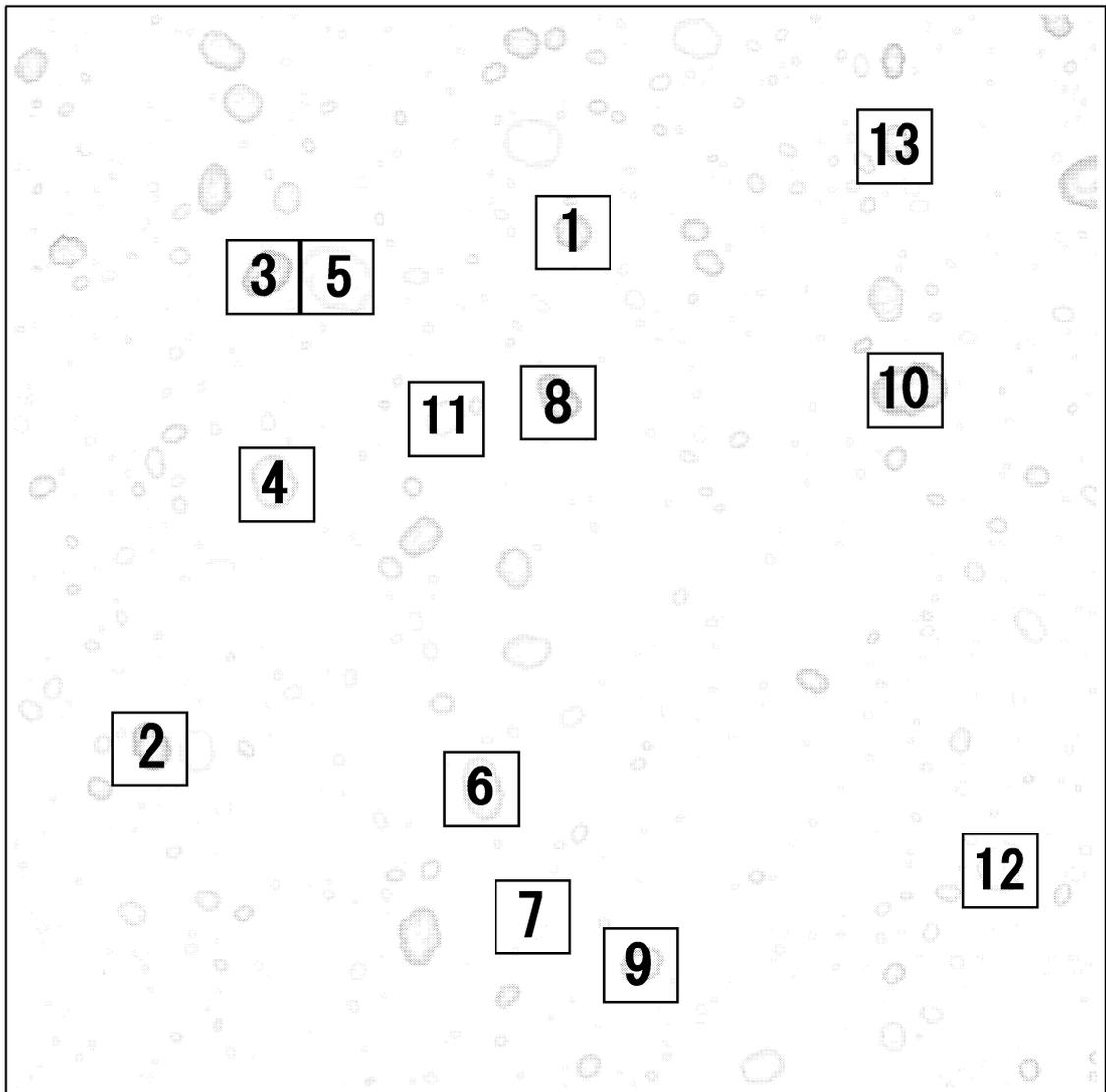


Fig 5.19: ウィンドウの中心を岩の中央に一致させた場合の画像

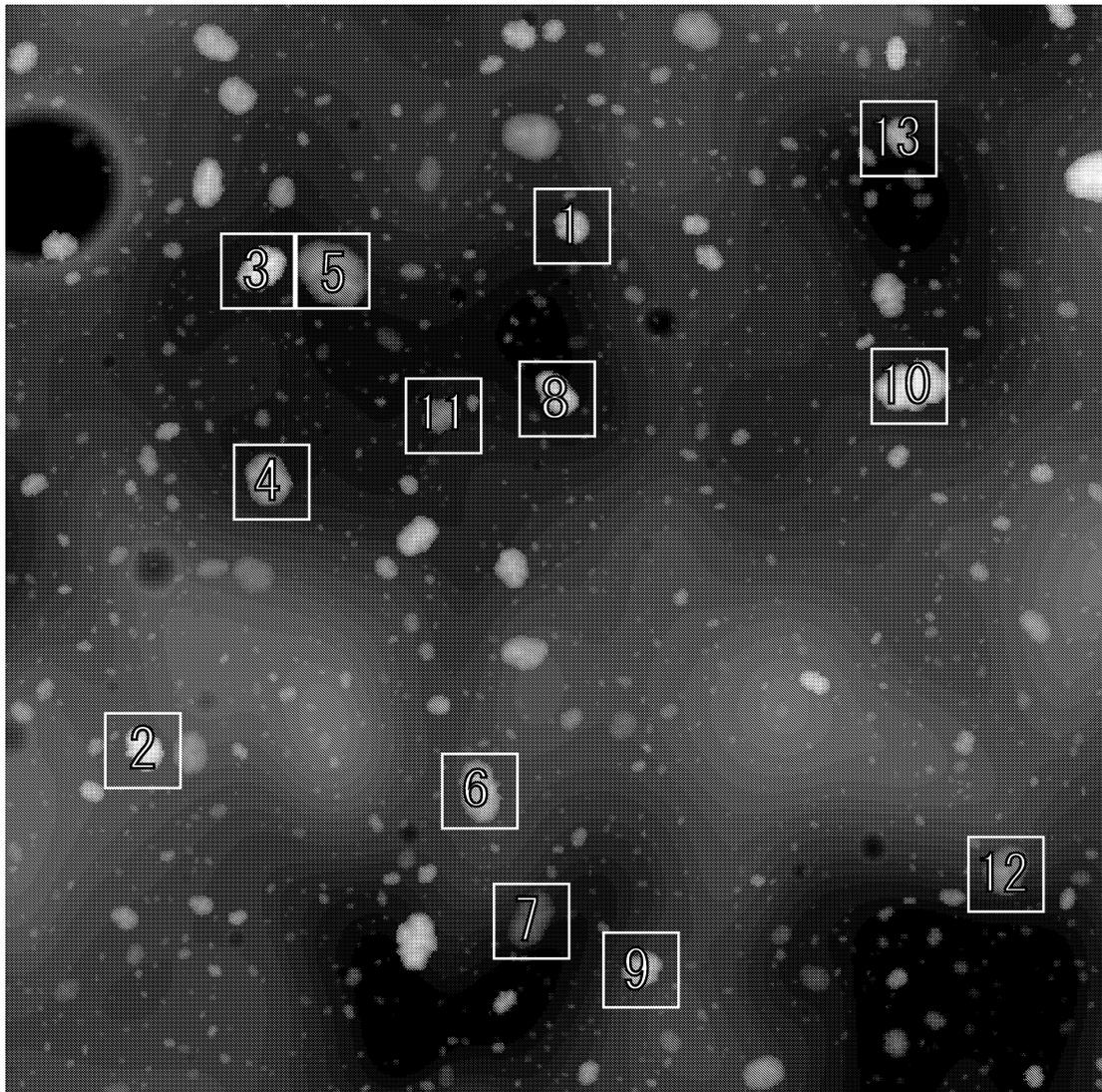


Fig 5.20: ウィンドウの中心を岩の中央に一致させた場合の DEM

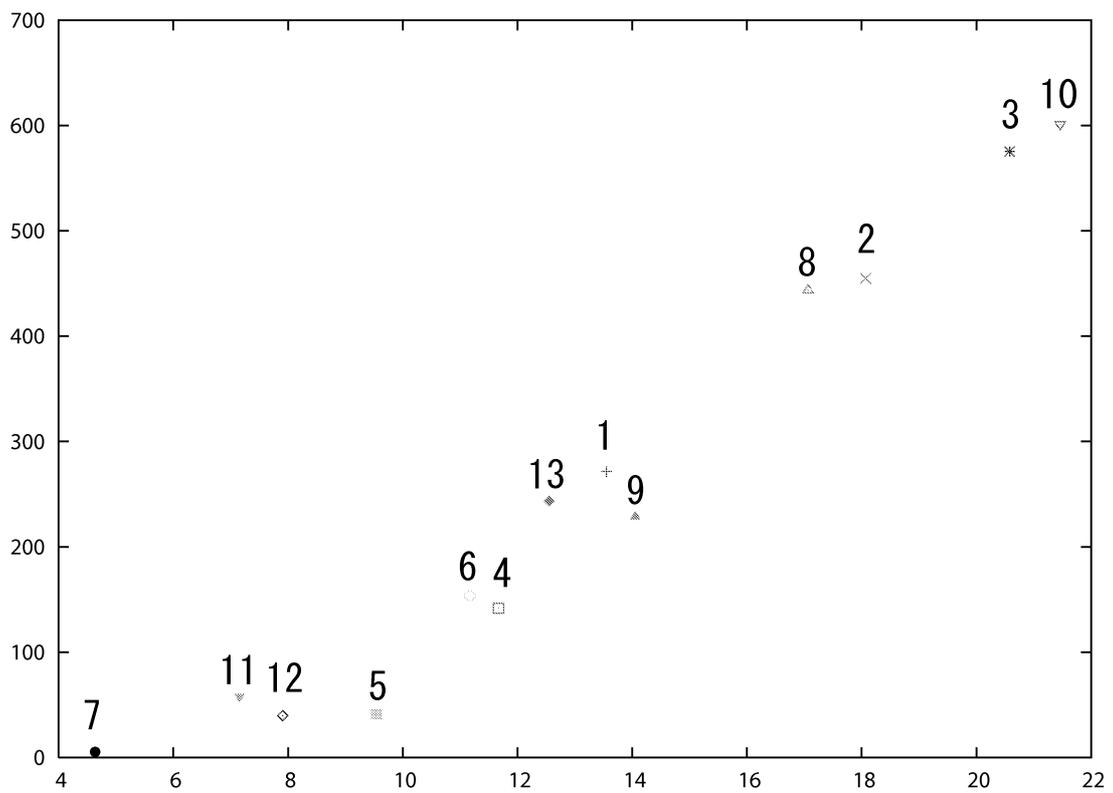


Fig 5.21: ウィンドウ内の高低差と輝度二次モーメントの関係

## 第6章 結論

本論文では、月惑星着陸機の着陸地点の選定手法を目的とし、新しい地形認識手法を提案した。既に局所二次モーメントを用いて月惑星表面の起伏が激しい領域を推定する手法は存在する。しかし、この手法では障害物の高さまでは考慮に入れておらず、着陸に障害とならない小さな障害物が存在する領域も危険領域と判断してしまう恐れがある。

本研究では、以下のこと示し、シミュレーションによる検討を行った..

- 本研究では障害物の大きさと輝度二次モーメント値の関係性を示した
- 輝度二次モーメントから障害物のある程度の高さを推測する手法を示した

さらに、シミュレーションでは半径や高さを変化させたり、太陽仰角を変化させるなどを行い、様々な条件に適用可能かどうかの検討を行った。また、単数だけではなく複数の障害物が画像内に含まれる場についても手法の有用性を示した。

提案手法は以下のような特徴がある。

- 輝度二次モーメントを有効に用いた簡易的な手法である。
- 障害物の大きさを考慮に入れることにより、既存手法では凹凸が激しく危険と判別していた領域にも着陸することができる。

今後の課題として、他の既存手法との組み合わせることが必要であると考えられる。なぜなら提案手法では障害物のある程度の高さを推定することは可能であるが、障害物の位置情報や大きさ情報を正確に求めることはできないためである。実際に着陸機が着陸場所を決定する場合には、失敗できないため、最終的に高精度な地形情報が必要になる。画像中にはあいまいな情報が多いため、画像のみで高精度の地形情報を求めることは困難となる。しかし、画像は広範囲の地形情報を含み、着陸場所の選定を有効に行うことができる。そこで、本手法とステレオ視などの手法を組み合わせ、より有用性の高い手法の構築が必要となる。さらにその際5.2.3節で述べたように、障害物の中心を自動的に判定する手法の構築も必要となる。

## 参考文献

- [1] Patrick Michel, Makoto Yoshikawa, Earth impact probability of the Asteroid (25143) Itokawa to be sampled by the spacecraft Hayabusa, Icarus, 291-296, 2005.
- [2] B.K.P.Horn, "Robot Vision," MIT Press
- [3] B.K.P.Horn and Brooks, "SHAPE from SHADING," MIT Press
- [4] 内藤智之, 久保田孝, 橋本樹明, 中谷一郎, 二宮敬虔: 宇宙探査の軟着陸のための複数画像を用いた地形認識手法, 第45回宇宙科学技術連合講演会, 2001
- [5] Naito Tomoyuki, A Terrain Recognition Method using Multipule Images for Soft Landing of Spacecraft, 38, 2002.
- [6] 古河章二, 西口憲一, 実データとフラクタルモデリングによる模擬月面の生成, 計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.1, 1-6 1997.
- [7] Hongxing Liu, Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images, Remote Sensing of Environment, 190-209, 2004.
- [8] 西口憲一, 吉河章二, 木下貴博, 月面着陸のための障害物検出方式, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 28, No. 554, 55-60, 2000.
- [9] Hongxing Liu, Derivation of surface topograpy and terrain parameters from single satellite image using shape from shading technique, Computers and Geosciences, 1229-1239, 2003
- [10] Toshihiko Misu, Tatsuaki Hashimoto, and Keiken Ninomiya, Terrain Shape Recognition for Celestial Landing/Rover Missions from Shade Information, 357-364, 1998.
- [11] 高井信勝, 「信号処理」「画像処理」のための MATLAB 入門, 工学社
- [12] 画像処理ハンドブック編集委員会, 画像処理ハンドブック, 昭晃堂, 1987
- [13] Patrick Michel, Makoto Yoshikawa, Earth impact probability of the Asteroid (25143) Itokawa to be sampled by the spacecraft Hayabusa,Icarus, 291-296, 2005.
- [14] B.K.P.Horn, Robot Vision, MIT Press
- [15] B.K.P.Horn and Brooks, SHAPE from SHADING, MIT Press

- [16] Hongxing Liu, Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images, *Remote Sensing of Environment*, 190-209, 2004.
- [17] 西口憲一, 吉河章二, 木下貴博, 月面着陸のための障害物検出方式, *日本航空宇宙学会論文集 Vol. 28, No. 554*, 55-60, 2000.
- [18] Hongxing Liu, Derivation of surface topography and terrain parameters from single satellite image using shape from shading technique, *Computers and Geosciences*, 1229-1239, 2003.
- [19] Toshihiko Misu, Tatsuaki Hashimoto, and Keiken Ninomiya, Terrain Shape Recognition for Celestial Landing/Rover Missions from Shade Information, 357-364, 1998.

## 発表文献

- [1] 田村嘉章, 中谷一郎, ”月惑星ランダによる画像を用いた障害物判定”, 第7回 計測自動制御学会制御部門大会 (予定)

# 謝 辞

私にとって中谷研究室で過ごした2年はとても有意義なものでした。中谷研究室は、風通しのよいアカデミックな雰囲気があるだけでなく、素晴らしい先生方や学生がいらっしゃる素晴らしい研究室でした。

日頃の激務の中、研究全般に渡り御指導、御助言を賜りました指導教官の中谷一郎教授に厚く御礼申し上げます。先生の学生の目線に立ったご指導に感動いたしました。研究の進捗が思わしくなかった私に対しても、最後まで熱心にご指導していただき、本当にありがとうございました。

様々な目線からご助言をいただきました久保田孝助教授に心より御礼申し上げます。ホームパーティーや内之浦の打ち上げでは大変お世話になりました。ありがとうございました。

ISSなどで鋭く的確な御助言ご指導をいただいた橋本樹明教授に深く御礼申し上げます。

研究者の本当のあるべき姿をご教示いただきました吉光徹雄助教授に御礼申し上げます。

広い見識から様々なアドバイスをしていただきました大槻助手に御礼申し上げます。宮崎ではおいしいものをたくさんご馳走していただき、ありがとうございました。

時々ISSやハーベストでお話をしていただいた坂東助手に御礼申し上げます。研究についても色々アドバイスを頂き、ありがとうございました。

G-ROSE作成やCAD設計、研究について多くのアドバイスをくださいました飯塚さんに感謝いたします。私の中谷研究室に初めて来た時から、やさしく接していただきました。色々つらい時に励ましてくださり、ありがとうございました。

研究について御指導くださり、また、研究のみならず私生活においても多くの相談に乗っていただいた江尻さんに感謝いたします。研究の進路などを指導していただいたのは感謝

## 謝 辞

---

しても仕切れません。映画の博識ぶりにも脱帽でした。いつも研究室を明るくしてくれてありがとうございました。

水上さんに感謝します。M1の一般公開の時に一緒にG-ROSEを徹夜で作った思い出は忘れられません。G-ROSEを月に送ってやってください。

杉浦さんに感謝します。戦車の構造や拳銃の撃ち方など、ちょっと物騒な話もありましたが、色々教えていただき、ありがとうございました。また、パソコンのこととか色々教えてください。

エドモンドに感謝します。節目節目に色々企画する場を作ってくれてどうもありがとうございました。クリスマスにプレゼントに差し上げたしめ縄効果を大切にしてください。

長岡君に感謝します。いつもクールでイケメンの空気で研究室を爽やかにしてくれてどうもありがとうございました。もっと変態なところも見たかったです。自分も爽やかなイケメンになれるようがんばります。

2年間を通し、毎日公私共に楽しい生活を送らせてくれた中村君に感謝します。私が就職活動や研究で、どうしようもなく苦勞したときなど、節目節目の重要な際に励ましてくれて本当にありがとう。私も中村君のようにおもしろいことが言えるようになりたいと思います。

斉藤研の久木君に感謝します。最後まであきらめない姿勢は勉強になりました。励ましてくれて本当にありがとうございました。筋トレという未知のスポーツを毎週御殿下で教えてくれたのは忘れられません。今度、スキーを是非教えてください。

そのほか数多くの東京大学、宇宙研の皆様にお世話になりました。ありがとうございました。

最後に両親に感謝します。今まで長い間、物心両面から支えて頂き、本当にありがとうございました。