火星着陸機搭載用ダストセンサーの シミュレーション

岡山大学理学部 地球科学科 大原正裕

2023/02/10

要旨

火星大気中のダストを直接観測するダストセンサーの仕様について,実際に火 星地表付近で観測する際の状況を想定してシミュレーションを行い,装置の性能 評価を行った.

ダストセンサーは,外部の空気を取り込んで装置内に流し,そこにパルスレー ザーを照射してダストが散乱した光を観測する.散乱光を観測した回数と散乱光 の強度から,それぞれダスト数密度とダストサイズを推定する.ここでは軽量化 のため空気の流量を制御せず,レーザー光の照射領域をダストが通過するのに要 する時間から,流量を推定する場合について考える.

シミュレーションは、以下の仮定をおいて行った. 散乱光を観測する領域(観測 領域)は円筒形とし、空気は円筒の軸に直交する方向に一定の速度で流れる. ダス トは球形でサイズ分布は対数正規分布とし、一定の数密度で空気に馴染んで移動 する. レーザー光の強度分布はガウス分布とし、散乱光強度はレーザー光強度と ダストの断面積に比例する. 以上の仮定の下、1MHz でパルスレーザーを照射し た際に各パルスに対して観測される散乱光強度を計算した. ダストが観測領域に 入ってから出て行くまでの間、散乱光は連続して観測される. 各時刻に観測され た散乱光強度から、連続して観測された散乱光を1回として、その継続時間と散 乱光強度の積分値を記録する場合について考察した.

流速は,散乱光が観測された継続時間から推定することができる.継続時間は ダストが横切った観測領域の長さに比例し,流速に反比例する.円筒形の観測領 域の場合,最も多く観測される継続時間は最長の通過距離を通過した場合に対応 する.このことを用いて流速を推定したところ,流速を正しく推定するには100回 以上散乱光を観測する必要があり,散乱光の観測回数が100回より少ないと流速 を過大評価する傾向にあることが示された.

ダスト数密度は、流速の推定値と散乱光の観測回数から推定する。測定を行った空気の体積は、観測領域の断面積に流速と観測した時間を掛けることで見積もることができる。散乱光を観測した回数をそのまま観測したダストの数とみなしてダスト数密度を推定したところ、観測回数100回以上かつ数密度10⁸個/m³以下で精度よくダスト数密度を推定でき、ダスト数密度が大きくなるにつれて推定値は過小評価される傾向が見られた。また、観測回数100回未満だとダスト数密度を正しく推定することができないことが示された。

目 次

第 1章	序論	3
1.1	火星ダストのその場観測........................	3
第2章	ダストセンサーの概要	4
第3章	シミュレーション	6
3.1	シミュレーションの設定	6
	3.1.1 ダストの空間分布	8
	3.1.2 ダストサイズ	9
3.2	観測される散乱光強度..........................	9
3.3	継続時間の確率密度分布........................	11
3.4	継続時間の頻度分布	13
第4章	推定	15
<i>yı</i> ,		
4.1	流速の推定	15
	4.1.1 推定方法	15
	4.1.2 推定結果	15

第5章	まとめ		21
	4.2.3	推定精度を高める方法...................	18
	4.2.2	推定結果	18
	4.2.1	推定方法	17
4.2	ダスト	数密度の推定	17

~	+-	_	+ 1	
太	*	v	南大	
"	-	へ	HU/	

 $\mathbf{2}$

第1章 序論

1.1 火星ダストのその場観測

火星大気中には半径1~2µmのダストが常に浮遊していることが知られている. ダストには太陽光を吸収して大気を温めるはたらきがあるなど,火星の気象や気候に影響を及ぼす一因となっている.ダストが火星大気に及ぼす影響を評価するためには,ダストに関する情報を観測によって得る必要がある.また,近年は火 星有人活動が計画されており,ダストは各種装置に不具合を引き起こす可能性があることから,工学的にも火星地表付近に浮遊するダストのサイズや数密度を知る必要がある.

本研究では,現在開発が進められている火星大気中のダストを直接測定するダ ストセンサーについて,実際に観測する際の状況を想定してシミュレーションを 行い,得られた結果を基に装置の性能評価を行った.

第2章 ダストセンサーの概要

本研究で想定しているダストセンサーは図 2-1 のように,レーザー光照射装置と 散乱光観測装置で構成されている.照射したレーザー光の光路上にダストが存在 する時,ダストがレーザー光を散乱し,散乱光を散乱光観測装置が捉える,とい う仕組みである.

散乱光を捉えることができるのは、図中の赤線で囲んだ部分、レーザー光の光路と散乱光観測装置の視野が重なった領域内で、ダストがレーザー光を散乱した時である.以降、この領域を観測領域と呼称する.散乱光を観測した回数から観測領域を通過したダストの数を知ることができる.また、散乱光の強度は散乱体の断面積に比例するため、散乱光の強度からダストの断面積を求めることができる.

同様の原理を用いたダストセンサーは,身近な例では空気清浄機に利用されて いる.使用実績のあるダストセンサーであれば火星のダストを観測できるような 気がするが,火星のダストは地球のダストとサイズや数密度が異なるため,火星で 使用するダストセンサーは火星のダストに合わせて調整する必要がある.よって, 火星用ダストセンサーの設定を最適化するため,火星でダストセンサーを運用し た際にどのようなデータが取れるかをシミュレーションする必要がある.



図 2-1: ダストセンサーの概略図. 黄色の帯はレーザー光, 点線部分は散乱光観測 装置の視野で, これらが交わる赤線で囲んだ部分はダストからの散乱光を観測可 能な領域 (観測領域).

第3章 シミュレーション

3.1 シミュレーションの設定

シミュレーションを行う上で設定した事項は以下の通り.

- 1. 観測領域は直径 D, 高さ H の円筒形 (図 3.1-1)
 - *H* は散乱光観測装置の視野で規定
 - 一般的な空気清浄機のダストセンサーは、D = 1mm、H = 1mm ほど
- 2. 空気は観測領域の軸に直交する方向に一定の速度 v [m/s] で流れる
- 3. ダストは空間中にランダムに配置しており,空気に馴染んでいるため空気と の相対速度はなし
- 4. ダストは球形で、そのサイズ分布は対数正規分布
 - ダストの典型的な大きさは数 µm であり、観測領域に比べて無視できる ほど小さい
- 5. レーザー光はガウシアンビームであり, 強度 *I* は光軸からの距離 *d* [m] のガ ウシアンで与えられる (式 (3.1-1))

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{d^2}{2s^2}\right)$$
(3.1-1)
 I_0 光軸上の明るさ
 s 広がり

- 6. 光軸から2s以内を通過したダストの散乱光が観測されると仮定
 - ・ 光軸から 2s 以上離れたところではレーザー光が弱く、ダストがあって も散乱光は観測されない

7. ダストが散乱する散乱光の強度 I_r は、ダストに照射されるレーザー光の強度とダストの断面積に比例 (式 (3.1-2))

 $I_r \sim I \pi r^2$

図 3.1-1: 観測領域の形状と大きさ.



図 3.1-2: 光軸の上から見た観測領域のレーザー光強度分布の模式図. レーザー光 の強度は光軸に近いほど強く,光軸上で最大.

(3.1-2)

3.1.1 ダストの空間分布

観測領域の中心を原点とする直線直交座標系を考え,空気の流れる方向を*x*軸, 観測領域の円筒の底面に平行で*x*軸に直交する方向を*y*軸,観測領域の円筒の軸 を*z*軸,とする.

空気は x 軸の方向にのみ移動するので、ダストの y 座標と z 座標が、それぞれ [-D/2, +D/2]かつ [-H/2, +H/2]の範囲内にあるものだけが、観測領域を通過す る. x 座標については、流速 v、観測時間 t_{obs} とすると、[$-D/2 - vt_{obs}$, +D/2]の 範囲内にあるものだけが、観測時間中に観測される可能性をもつ. したがって、ダ ストによる散乱光のシミュレーションにおいては、図 3.1.1-1 に示した範囲 (直方 体)の内部に存在するダストのみを考えればよい.

直方体内に存在するダストの空間分布は、乱数を用いて決定した.ここでは、観 測領域の大きさはD = Hとして、y座標とz座標は、それぞれ[-D/2, +D/2]と [-H/2, +H/2]の範囲でランダムに分布させた.x座標も乱数を用いて与えるが、 その位置は最初の1個目を除いては、先行するダスト(直方体内にあるダストをx座標の順番に並べたとき、x座標が大きい側にある隣のダスト)からのx方向の距 離を指数分布によって与えることで決定した.指数分布は、独立に一定の発生率 で起こる過程(ポアソン過程)に従う事象の時間間隔を与えるもので、y-z断面の面 積がDHでダスト数密度がNのとき、直方体内にあるダストのx座標の間隔 ξ の 確率密度分布 $f(\xi)$ は、 $\lambda = 1/NDH$ を用いて以下で与えられる.

$$f(\xi) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(\frac{-\xi}{\lambda}\right)$$

i+1個目のダストのx座標は、先行するダストのx座標 x_i と、乱数によって与えられる ξ の値から

$$x_{i+1} = x_i - \xi$$

によって与えられる.



図 3.1.1-1: 観測時間中に観測されるダストが存在する範囲 (青色の直方体). 観測 領域の中心 (赤色の点)を原点とした直線直角座標において, $x 軸方向は [-D/2 - vt_{obs}, +D/2], y 軸方向は [-D/2. + D/2], z 軸方向は [-H/2, +H/2] の範囲に存$ $在するダストが, 観測時間 <math>t_{obs}$ の間に観測される.

3.1.2 ダストサイズ

ダストの半径rは対数正規分布に従うとして,与えた.標準正規分布の上側確率 からパーセント点を求めるにあたっては,戸田・小野(1993)の近似式[1]を用いた.

3.2 観測される散乱光強度

前項で挙げた設定の下,1MHz でパルスレーザーを照射して散乱光を観測した 場合に観測される散乱光の強度を,各パルスについて計算した.図 3.2-1 は数密度 $N = 10^8$ 個/m³,流速 v = 10.0 m/s で 10 秒間観測した時の散乱光強度である.観 測領域にダストが存在しない場合,その時刻に得られる散乱光強度は0になる.観 測領域内にダストが存在すれば,ダストの位置やサイズに応じて様々な強さの散 乱光が観測される.



図 3.2-1: 数密度 10⁸ 個/m³, 流速 10.0 m/s で 10 秒間観測した時に得られる各時刻の散乱光強度.

図 3.2-2 は図 3.2-1 の一部分を拡大したものである. 散乱光が連続して観測され る事象が 3 回生じており,それぞれダストが観測領域に進入してから出ていくま でに対応する. レーザー光は光軸に近いほど強いため,散乱光の時間変化は山の 形になっている. ここでは,データ量を圧縮するため,散乱光を連続して観測す る一連のイベントを1回と数えることにして,散乱光を連続して観測した時間(図 3.2-2 における山の幅)と,その間に観測した散乱光強度の積分値(図 3.2-2 におけ る山の面積)だけを記録することにする.以下,記録した継続時間と散乱光強度の 積分値を基に,ダストの数密度とサイズを推定する方法を考える.



図 3.2-2: 図 3.2-1 の一部を拡大したもの. 散乱光の時間変化を表す 3 つの山は, いずれも 1 個のダストが観測領域に入ってから出て行くまでに散乱した光である.

3.3 継続時間の確率密度分布

流速が一定である時,継続時間はダストが観測領域のどこを通過するかで決ま る.図3.3-1は光軸の上からダストの経路を見た図で,継続時間が長いものと短い ものが等しい確率で現れないことがわかる.観測領域の断面が円である時,ダスト 1個が観測領域を通過する場合の継続時間 t の確率密度分布は解析的に求めること ができる (式 (3.1-1)).

$$f(x) = \frac{1}{t_{max}} \frac{x}{\sqrt{1 - x^2}}$$

$$x = \frac{t}{t_{max}}$$
(3.3-1)

 t_{max} 最長継続時間 [s]

ここで, x は最長継続時間 t_{max} で規格化した継続時間で, 最長継続時間は最長 経路 (円柱の中心を通過する経路) をとったときの継続時間である. 継続時間の確 率密度分布は、xが0から1の間で増加、x = 1で最大となり、xが1より大きい ところは0になる. (図 3.3-2).



図 3.3-1: 光軸の上から見たダストの経路. 観測領域を通過する長さ(緑色)は,光 軸からの距離に依存して変化する. 光軸上を通過する経路をとる時,通過する長 さは最長になる.



図 3.3-2: 継続時間の確率密度分布. 確率密度は x = 1 で最大, x > 1 で 0.

3.4 継続時間の頻度分布

シミュレーションによって生成した散乱光強度観測の時系列データから,継続時間の頻度分布図を作成した (図 3.4-1). 円筒を通過する場合の確率密度分布 (式 (3.3-1),図 3.3-2) がシミュレーションで再現されていることがわかる. 頻度分布を 作成するのに用いたシミュレーションは観測領域の中心を通過したダストからの 散乱光の継続時間が 100µs になるもので,たしかに継続時間が 100µs のところで 頻度は最大になっている. 継続時間の頻度分布は最長継続時間で鋭いピークを持 っため,頻度分布から最長継続時間を推定することは容易である.



図 3.4-1: ダスト数密度 10⁸ 個, 流速 10.0 m/s の継続時間の頻度分布. シミュレー ションで設定した最長継続時間は 100µs. 最長継続時間は頻度分布から容易に特定 することができる.

一方,図 3.4-1 の右側部分に着目すると,1個のダストでは現れるはずのない, 最長継続時間より長い継続時間も観測されていることがわかる.これは2個以上 のダストが同時に観測領域に入ったことによって観測されたものである.2個以上 ダストが同時に観測領域に入ると,図 3.4-2 のように散乱光強度の時間変化の山が 重なって現れる.数密度が大きくないときは,2個以上のダストが同時に観測領域 に入ることは稀なため,最長継続時間より長い継続時間を観測する頻度はあまり 高くならない.



図 3.4-2: 2 個のダストが同時に観測領域に入ったときの散乱光強度の時間変化. 2 つの山の間に不連続が現れているのは,光軸から 2σ 以遠の散乱光を計算していないため.

第4章 推定

4.1 流速の推定

4.1.1 推定方法

流速は,観測領域を通過した距離を通過するのに要した時間で割って求めるこ とができる.継続時間の頻度分布から最長継続時間を求めることができ,最長継 続時間はダストが観測領域の最も長い距離(円筒の軸の上を通る経路)を通過した ときに観測されるものであるから,流速は以下の式で推定することができる.

$$v_e = \frac{D}{t'_{max}} \tag{4.1.1-1}$$

D 観測領域の直径 [m]

t'max 観測によって決定した最長継続時間 [s]

4.1.2 推定結果

図 4.1.2-1 はシミュレーションの結果から流速を推定した結果である. 流速の推 定値は,同じ設定で 10 回シミュレーションを行って得た推定値の平均を用いた. 図の縦軸は流速の推定値の平均 \bar{v}_e [m/s] を正解の流速 (シミュレーションで設定し た流速) v_{true} [m/s] で割っている. $\bar{v}_e/v_{true} = 1$ だと正解, $\bar{v}_e/v_{true} > 1$ は流速を過 大評価した場合である.

図 4.1.2-1 では, 散乱光を観測した回数が 100 回より大きい場合, ほぼ正しい流 速が推定されている.一方, 散乱光を観測した回数が 100 回より少ない場合, 流速 は過大評価されている.これは, 散乱光の観測回数が少ないと最大継続時間の推定 に失敗するためである (図 4.1.2-2). 最大継続時間の推定に失敗するときは,ほぼ 必ず最大継続時間を短く推定する.なぜなら,最大継続時間より長い継続時間が 観測されることは稀だからである.最大継続時間を短く推定すると,式(4.1.1-1) より,流速は過大評価になる.

散乱光を観測した回数は、おおよそダスト数密度と観測した時間に比例する. 観 測する時間を長くすれば、散乱光を観測する回数を多くすることができる. 過大 評価されている図 4.1.2-1 の左端の結果 A はダスト数密度が 10⁶ 個/m³ の空気を 1 秒間に観測したものであるが、この場合でも、100 秒間観測すれば 100 個程度の散 乱光を観測することになり、問題なく流速を推定することができるようになる.



図 4.1.2-1: 流速の推定結果. 縦軸は流速の推定値の平均 \bar{v}_e を正解の流速 v_{true} で 割ったもの,横軸は散乱光を観測した回数. $v_{true} = 1.0 \,\mathrm{m/s}$ で計算した.



図 4.1.2-2: ダスト数密度 2.0×10^{-5} 個/m³, 流速 1.0 m/s の継続時間の頻度分布. ダストが観測領域の中心を通過した際に得られる散乱光の継続時間は 100μ s とな るように計算しているが, 観測回数が少ないと最長継続時間を特定することがで きない.

4.2 ダスト数密度の推定

4.2.1 推定方法

ダスト数密度を推定するには,観測したダストの数とダストセンサーが観測した 空気の体積を知る必要がある.観測した空気の体積*V*は,観測領域を通過した空 気の体積なので,観測領域の断面積*DH*,推定した流速*v*_e,観測した時間*t*_{obs}から

$$V = DHv_e t_{obs}$$

で与えられる. 観測したダスト数は散乱光を観測した回数 P で与えられるとする なら、ダスト数密度の推定値 N_e は以下のようになる.

$$N_e = \frac{P}{DHv_e t_{obs}} \tag{4.2.1-1}$$

- P 散乱光を観測した回数 [回]
- D 観測領域の直径 [m]
- *H* 観測領域の高さ [m]
- *v_e* 流速の推定値 [m/s]

tobs 観測時間 [s]

4.2.2 推定結果

式 (4.2.1-1) を用いてダスト数密度を推定した結果を図 4.2.2-1 に示す. 縦軸は 10 回のシミュレーションで推定したダスト数密度の平均 \bar{N}_e [個/m³] を正解のダスト 数密度 (シミュレーションで設定したダスト数密度) N_{true} [個/m³] で割ったもので ある. $\bar{N}_e/N_{true} = 1$ はダスト数密度を正しく推定した場合, $\bar{N}_e/N_{true} < 1$ は過小 評価した場合である. 散乱光を観測した回数が 100 回より少ない場合, ダスト数密 度は正しく推定されていない. これは, 流速が過大評価されていたり (図 4.1.2-1), 散乱光を観測した回数がゆらぎの影響を受けていたりするためである.

4.2.3 推定精度を高める方法

数密度が大きいとき,散乱光を観測した回数をそのまま観測したダストの数と して計算するとダスト数密度を過小評価してしまう.このことを考慮して,散乱 光を観測した回数をそのまま使うのでなく,継続時間の情報を用いて観測したダ ストの数を推定する方法について考察した.

1個のダストが観測領域を通過する時の継続時間は最長継続時間より長くなることはないので,最長継続時間より継続時間が長いものはすべて,2個以上のダスト



図 4.2.2-1: ダスト数密度の推定結果. 縦軸はダスト数密度の推定値の平均 v_e を正解のダスト数密度 v_{true} で割ったもの、横軸は散乱光を観測した回数. $v_{true} = 1.0 \text{ m/s}$ で計算した.

が重なって観測されたものである.同様に,最長継続時間の2倍より長い継続時間のものは3個以上のダストが重なって観測されたものである.継続時間に応じて観測したダストの数を図4.2.3-1に示すように与えれば,観測したダストの数の推定値を正解に近づけることができる.このとき観測したダストの数の推定値 P_eを求める式は式 (4.2.3-1) で与えられる.



図 4.2.3-1: 継続時間の長さによって観測されたダストの数を推定する.

$$P_e = \sum F_i \left(\left[\frac{C_i}{t'_{max}} \right] + 1 \right) \tag{4.2.3-1}$$

F_i 各階級の頻度 [回]

 C_i 各階級の階級値 [μ s]

t'max 観測によって決定した最長継続時間 [s]

 $[C_i/t'_{max}] C_i を t'_{max}$ で割った値の整数部分

第5章 まとめ

ダスト数密度を推定するためには,散乱光を100回以上観測する必要がある.また,ダスト数密度が高いときは,複数のダストが同時に観測領域に進入することを考慮して,ダスト数密度の推定を行う必要がある.

散乱光を観測する回数が少ないと、流速を推定することができない. 散乱光を 観測する回数は観測時間に比例するため、時間分解能を犠牲にして観測時間を長 くすれば散乱光を観測する回数を増やすことができる. また、ダスト数密度が大 きいと、複数のダストを同時に観測するようになるため、ダスト数密度の推定が 難しくなる. 複数のダストを同時に観測する確率は、観測領域の体積を小さくす ることで下げることができる. 観測領域の体積を小さくするには、レーザー光の 径を小さくするか、散乱光観測装置の視野を狭くしたらよい. ただし、観測領域を 小さくすると散乱光を観測する回数が減るので、観測時間は長くとる必要がある.

謝辞

本研究を行うにあたり,指導教員であるはしもとじょーじ教授には終始多大な ご指導を頂きました.心より感謝致します.

同研究室の桑山さんには,研究を進める上で様々なご助言を頂きました.高木 さんには,本論文の執筆にあたり温かい激励を頂きました.ありがとうございま した.

参考文献

[1] 戸田英雄, 小野令美.
 正規分布のパーセント点を求めるミニマックス近似.
 応用統計学 Vol.22 No.1, 1993.