

「火星の空は本当に赤いか」

[空に色がある理由]

晴れた昼の空はなぜいつも青く染まっているのだろうかという素朴な疑問を誰もが一度は持たれたことがあると思う。

この問題が解明されたのは意外と古く、19世紀の終わり頃である。

透明なはずの空気が色を発する理由は、空気の分子が光を反射するためであるということが、理論的にも実験的にも今日に至るまで精度よく検証されている。空気分子は原子数個で構成される極めて小さいものである。とても目に見えるサイズではないとはいっても寸法はゼロではないので光線をわずかに反射する。反射する方向が広範囲にわたるのでこの現象は「光散乱」と呼ばれる。

厳密には、散乱粒子の大きさによって可視光線の散乱の原理は3種類に分類される。

1. 散乱粒子のサイズが光の波長よりも小さい場合は「レイリー散乱」となる。
上記に述べた空気分子による散乱はこれに該当する。
2. 散乱粒子のサイズが光の波長と同程度である場合は「ミー散乱」となる。
煙粒子による散乱がこれに該当する。
3. 散乱粒子のサイズが光の波長よりも大きい場合は「物理光学近似散乱」となる。
火山灰や突風で舞い上がるチリによる散乱がこれに該当する。

2., 3. は局所的、一時的なものであるのに対して、1. は大気の主成分によって起こるため惑星全体で定常的に起こる代表的な光散乱である。

この他に大気分子が高エネルギー粒子と衝突や空間の電界によって電離し、夜昼を問わず局所的にオーロラのように輝く現象があるが、太陽光の散乱とは無関係なので論外である。

以下、3種類の散乱現象について個別に説明する。

[レイリー散乱]

カメラに詳しい方なら偏光フィルターというものをご存じかもしれない。

レンズに偏光フィルターを取り付けてファインダーを覗きながらフィルターを回転させると景色の中の空の色の濃さだけが変化するという不思議なアイテムである。青空から来る光が、太陽から来る直接光とは異なり振動方向に偏りがあることをうまく利用しているのである。

空の色が青い理由、その青い光が偏光であるという不思議な性質は、19世紀の終わり頃、物理学者レイリー(Rayleigh)によって解明され、今でも光散乱の最も重要な概念となっている。レイリー卿の理論が適用される光散乱現象は解明者の名前にちなんでレイリー散乱と呼ばれる。

肉眼で見えるレイリー散乱は、散乱粒子のサイズが可視光線の波長(0.35~0.7 μ m)よりも小さい場合に起こる。その散乱粒子とは大気分子であり、0.0001~0.001 μ m程度の大きさしかない。

レイリー散乱は、光が散乱粒子に入射したときに、光の振動電界が粒子に分極を生じさせ、この分極の振動によって光が再放射されるという過程によって起こる。

散乱光のどの色が強く散乱されるかという傾向は、大気成分に無関係であるのが大きな特徴である。光の散乱強度はその波長の4乗に反比例する。

例えば、白色光(太陽光)の各色成分の散乱強度は表1のようになる。

表 1 色別のレイリー散乱光の強度分布（赤色光の散乱強度を 1 とする）

赤色成分（波長=0.70 μm）の散乱強度	1.0
橙色成分（波長=0.65 μm）の散乱強度	1.3
黄色成分（波長=0.60 μm）の散乱強度	1.9
緑色成分（波長=0.52 μm）の散乱強度	3.3
青色成分（波長=0.46 μm）の散乱強度	5.4
藍色成分（波長=0.40 μm）の散乱強度	9.4
紫色成分（波長=0.35 μm）の散乱強度	16.0

赤と紫では散乱強度に 16 倍の開きがあり、結果的に波長の短い色が強く散乱され、全体的に空が青っぽく見えるということになる。

この比率は惑星の大気の種類に無関係であるため、レイリー散乱によって空が赤っぽく見えるということはありません。

また、空全体の明るさは大気の濃度により変動する。高山や飛行機の窓から見える空が地上よりも青色が濃くなり、天頂の空は暗くなるのは大気濃度が薄いためである。

太陽光が地上に達するまでに接触する分子の数と散乱される光の量は比例する。

報道されている情報では、火星の大気圧は 6.8hPa しかないとしている。この気圧は地球の平均大気圧 1030hPa の 150 分の 1 である。もし、火星の大気濃度が地球の 150 分の 1 しかないのであれば、空の明るさも 150 分の 1 になり、探査機が送ってきたような映像は決して撮れない。

もし希薄な大気しかないばあいは、地面だけが太陽に明るく照らされ、背景の空は真っ暗に映ってしまうことになる。

マーズパスファインダーが送ってきた火星の風景に明るい空が映っていることはそこに濃密な大気がある証拠である。地球のチョモランマ山頂から撮影された空の明るさよりも明るいのではないかと思うほどである。

だから、火星の地上大気圧はチョモランマ山頂程度（350hPa 程度）はあると考えられる。また、これくらいの濃度がなければ、探査機をパラシュートで着陸させるということは不可能だろう。

[ミー散乱]

日常生活の中では、タバコの煙の中にミー散乱を見ることができる。タバコから直接出ている煙をよく見ると青みがかっているが、口から吐き出された煙は白くなっている。この色の違いは、煙の粒子の大きさの違いによって生じるものである。

タバコから直接出ている煙粒子の大きさは可視光の波長よりも短く、レイリー散乱となるため青色成分が強く散乱される。しかし、吐き出された煙粒子の周りには肺の中の水分が凝集して付着し、光の波長程度の大きなサイズになっている。

この場合、そのサイズに対応する波長の光が強く散乱される。吐き出された煙粒子のサイズは光の黄色の波長近辺に分布するが、粒ぞろいではないため、さまざまな波長の光を全て散乱させてしまうことになり、結果的に白っぽく見える。

惑星の空で、ミー散乱が起こる条件はかなり制限される。浮遊しているチリや水蒸気の粒がその役割を演ずるだろうがそのサイズが可視光線の波長の範囲に収まらなければならないからである。

高山に登ると希に高層の大気圏で発生する雲が 5 色に彩られて見えることがあるが、たまたま水蒸気の粒が光の波長に共鳴するサイズであるために起こるわけである。

ミー散乱による光の色は散乱粒子のサイズに敏感に対応するため、空全体が特定の色に見えることはありえない。噴火や突風によって巻き上げられたチリのサイズが全て粒ぞろいであるはずがないからである。だから火星の昼の空が赤いということもミー散乱では説明できない。

[物理光学近似散乱]

物理光学近似散乱は、粒子サイズが光の波長よりも大きい場合に起こり、大気中に舞い上がったチリがその役割を演ずる。

散乱する原理は、レイリー散乱とは多少異なるが、散乱光の強度は波長の2乗に反比例し、短い波長の光が強く散乱されるという傾向は同じである。

物理光学近似散乱は、光が散乱粒子に入射したときに、光の振動電界が粒子の表面の電子を振動させ、その振動によって光が再放射されるという過程によって起こる。

レイリー散乱の例と同様に、白色光（太陽光）の各色成分の散乱強度を算出すると表2のようになる。

表2 色別の物理光学近似散乱光の強度分布（赤色光の散乱強度を1とする）

赤色成分(波長=0.70 μm)の散乱強度	1.0
橙色成分(波長=0.65 μm)の散乱強度	1.2
黄色成分(波長=0.60 μm)の散乱強度	1.4
緑色成分(波長=0.52 μm)の散乱強度	1.8
青色成分(波長=0.46 μm)の散乱強度	2.3
藍色成分(波長=0.40 μm)の散乱強度	3.1
紫色成分(波長=0.35 μm)の散乱強度	4.0

赤と紫では、散乱強度に4倍の開きがあり、結果的に青系統の色が強く散乱され、全体的に青く見えるということになる。

この性質はチリの種類やサイズのばらつきに無関係である。したがって物理光学近似散乱によって火星の昼の空が赤く見えるということはない。

[夕日や夕焼けの空が赤い理由]

以上の説明で、昼の空が青い理由が、空気分子や大気中のチリが太陽光の一部を散乱することによるものであることを明らかにしてきた。

大気に散乱光として青色成分を奪われた光は地上に届くが、高い仰角から射す光は通過する大気層の距離は薄い。この場合は散乱光として奪われる光は弱いので、最終的に地上に到達する光にはまだ勢いがあり、その色も白色に近い。

しかし、夕方になると、日光は大気層をかすめるように非常に長い距離を通過してやってくるので途中で青い成分はほとんど散乱によって奪われ、赤っぽい光だけが残る。

日本で夕日が見られる時を例として説明しよう。日本で夕日が見られる頃、中国ではまだ青空が見られる。日光が中国・日本海の上空を通過する過程で大気に青い光をほとんど奪われ、残った赤っぽい光が日本で夕日として見られるのである。

また、夕焼け空が赤い理由は、大気層中の長い道のりを経た日光は青色成分が既に欠落しているので、最後に残った赤系統の光だけが散乱されているのが見えるのである。ちなみに昼間の青い空中でも、赤色成分は散乱されているが、青系統の色の散乱の方が強いので弱い赤色散乱が肉眼では認識できないのである。

このとき、地球の外から大気層を眺めると中国から日本にかけて色の基調が暗い紫、藍、青緑、黄、オレンジ、紅というように連続的に変化しているのが見える。これはアポロが地球を周回するときに撮影した写真や宇宙飛行士の証言から明らかになっている。

火星の空でも全く同様であり、夕日と朝日は赤く、そのときに限り空も赤くなるのである。

[結論]

以上、光の散乱現象の基本となっている3種類の原理を紹介し、空の色について論じ、いずれの場合でも火星の空の色が地球と大差がないだろうということを説明した。この考えは、大気そのものの色が可視光に対して透明である限り、他の惑星でも適用できるものである。

また、空の明るさが大気の濃度を知る手がかりになることを述べ、火星の風景写真の中で空が明るく写っているのは、そこに濃密な大気が存在する強力な裏付けとなることを説明した。

[あとがき]

1997年、8月28日の朝日新聞の夕刊に「火星の夕日青かった」という見出しで青い夕焼けのカラー写真が掲載されている。これは、火星の昼間の空が赤いということを正当化させるための工作のようにも思われる。光散乱のプロセスを深く追求した方なら、赤い空、青い夕日というものがどれだけ不可解なものであるかわかるはずである。

筆者は、早い時期にインターネットでNASAのホームページを通じてパズファインダーが捉えた火星の朝日と夕日の鮮明なカラー写真を取得しており、新聞の写真と同じ山の稜線が写っている同じコマの写真も含まれている。これらの写真には全て鮮やかな赤い朝焼け、紅の夕焼けが写っている。また、別の写真には青空が写っている自然な感じの昼間の火星の風景があった。