

1.2.5 大気ドラッグ

陣 英克（情報通信研究機構）

（2020年7月1日受付、2021年5月31日公開）

1.2.5.1 はじめに

地球大気の最も外側は熱圏と呼ばれ（高度90kmから太陽活動によって400～800kmの範囲で変動）、下の大気層から伝わる波動や上の太陽・磁気圏から到来する電磁波・高エネルギー粒子などにより、多様な変動が駆動される領域である（熱圏の現象については本テキストの第4.5節で説明される）。1957年にスプートニク1号がこの領域に打ち上げられて以降、人工衛星や宇宙ステーションなどが宇宙空間に送り込まれ、気象や環境変動のモニタリング、災害把握、通信や測位、科学観測など我々の社会活動の維持・発展を支えてきた。宇宙空間に送り込まれる宇宙機の数は増加の一途を辿っている。特に近年では衛星の機材や打ち上げ費用の低コスト化により衛星コンステレーションの計画が続出し、更なる衛星数の増加が見込まれる。これと同時に不要となった衛星やロケット機体の一部・破片などスペースデブリの数も増加している（図1）。2020年2月時点でサイズが10cm以上の宇宙機とデブリの総数は、公表されているもので地球軌道上に約20,000個存在する。このうち約15,000個が高度2000km以下の低軌道（LEO）にある（NASA, 2020b）。LEOにある衛星とデブリの多くは熱圏を通り、その際に大気ドラッグ（大気抵抗）の作用を受け、軌道や姿勢が歪められる。軌道に影響する外力は幾つかあるが、熱圏では大気ドラッグが主たる外力である。また、軌道を予測する際の大気ドラッグの見積もりに熱圏のモデルが用いられるが（経験モデル又は物理モデル。これらの説明は本節にて後述する）、多様な熱圏の変動を正確に予測するには至っておらず、大気ドラッグが軌道予測の主たる不確定要因となっている。従って、地球近傍の宇宙利用において大気ドラッグの影響を避けて通ることは出来ない。

本節では、まず基礎事項として衛星やデブリの軌道（1.2.5.2節）および外力が軌道に及ぼす影響（1.2.5.3節）を説明したうえで、大気ドラッグが何に依存し、軌道にどう影響するか説明する（1.2.5.4節）。そして、熱圏の変動と大気ドラッグの関係（1.2.5.5節）を述べたのちに、大気ドラッグが宇宙利用に具体的にどう影響するか示す（1.2.5.6節）。最後に熱圏の変動を予測するためのモデルを紹介する（1.2.5.7節）。

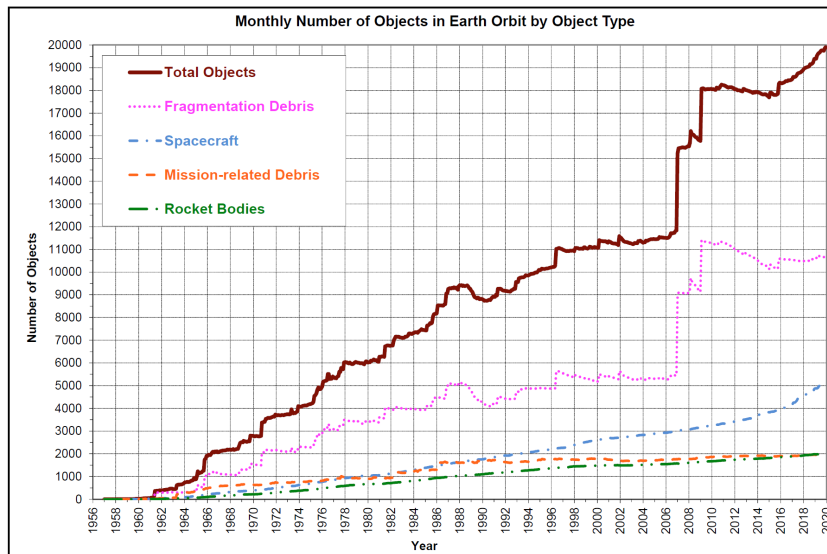


図 1. 米国の地上レーダー網によって観測されているサイズが 10cm 以上の地球軌道の物体総数の推移 (NASA, 2020a)。「Fragmentation Debris」は爆発や衝突によって生ずる破片、「Mission-related Debris」は正常な運用中に分離・放出された機体の一部や不要物を指す。2007年1月のデブリの急増は意図的な衛星の爆破によるものであり、2009年2月は偶発的な衛星同士の衝突によるものである。

1.2.5.2 基礎①：地球を周回する物体の軌道

人工衛星やスペースデブリなどが背景の熱圏大気からどのように影響を受けるか述べる前に、まず基礎事項として地球を周回する物体の軌道がどのように決まっているか、また物体の位置を規定する軌道要素について簡単に説明する。詳細については軌道力学の教科書などを参照されたい (King-Hele, 1987; 姿勢制御研究委員会, 2007など)。

地球を周回する物体は、第一次的には地球との万有引力によって引き合い、ケプラー運動している。その運動方程式は次のようになる。

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -\frac{\mu}{r^2} \quad (1.2.5.1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt}(r^2\dot{\theta}) = 0 \quad (1.2.5.2)$$

ここで、図2のように座標系は物体の軌道平面上に地球を中心とする2次元極座標 (r, θ) をとり、 t は時刻、 μ は定数である ($\mu = GM = 3.986004 \times 10^5 \text{km}^3\text{s}^{-2}$; G は万有引力定数、 M は地球質量)。式 (1.2.5.1)、(1.2.5.2) はそれぞれ r 方向と θ 方向についての表式であり、これらの解が物体の軌道を表す次式である (導出過程は省略)。

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (1.2.5.3)$$

$$r^2\dot{\theta} = (\mu p)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2.5.4)$$

ただし、 $p = a(1 - e^2)$ 。 a と e は導出の過程で現れる任意定数であり、楕円軌道の長半径と離心率に相当する（図2参照）。また、物体の速度の大きさ v は次式より得られる。

$$v^2 = \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 = \frac{\mu}{p}(1 + e^2 + 2e \cos \theta) \quad (1.2.5.5)$$

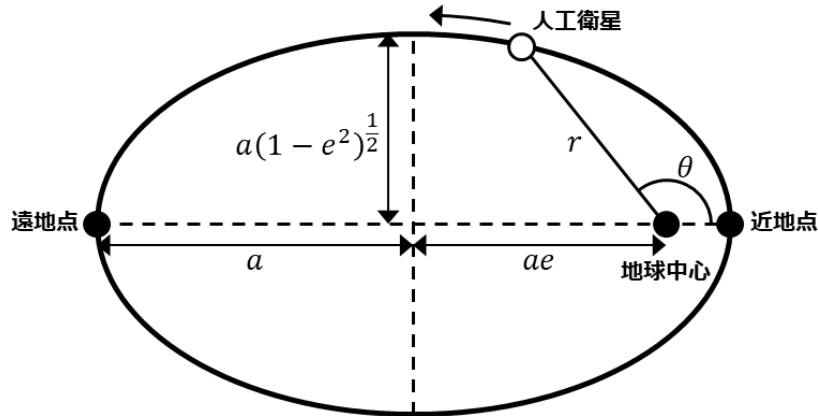


図2. 地球を周回する物体（人工衛星）の軌道

地球を周回する物体について軌道の形状や位置を定めるパラメータは基本的に6つあり、軌道要素（orbital elements）と呼ばれる（図2）。まず既述の軌道形状を定める軌道長半径（semi-major axis） a と離心率（eccentricity） e 、近地点を基準に軌道上の位置を示す真近点角（true anomaly） θ がある。そして軌道面と地球との位置関係を示すパラメータとして、昇交点赤経（right ascension of ascending node） Ω および軌道傾斜角（inclination） I がある。前者は地球赤道面上にて春分点方向と昇交点（軌道面と地球赤道面の交点の一つ）のなす角度であり、後者は軌道面と地球赤道面のなす角度である。6つ目の軌道要素は軌道面上にて軌道の傾きを示す近地点引数（argument of perigee） ω であり、昇交点方向と近地点のなす角度と定義される。

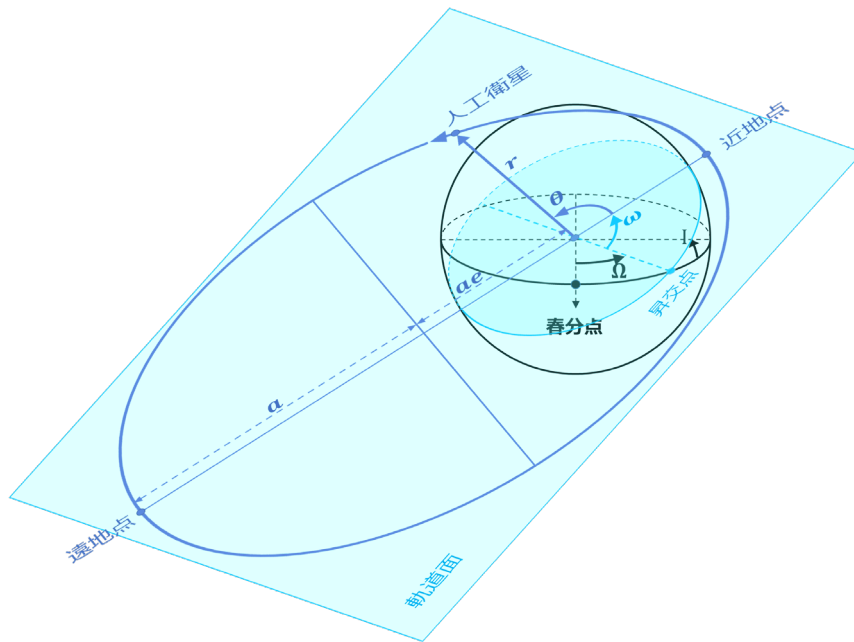


図 3. 地球を周回する物体（人工衛星）の軌道を定める軌道 6 要素

1.2.5.3 基礎②：外力による軌道の変化

前節で挙げた軌道要素は、地球を質点と見做した万有引力以外に力が働いていなければ、 θ のみ時間変化する。しかし、実際には地球質量分布の不均一性に由来する高次の引力の成分があり、また太陽や月など他の天体による引力、太陽輻射圧、それから熱圏を通過する際の大気ドラッグなどがある。これらの外力を受けると θ 以外の軌道要素も変化する。外力が作用する場合の物体の運動方程式および角運動量の変化は次のようになる。

$$\ddot{\mathbf{r}} + \frac{\mu}{r^3}\mathbf{r} = \mathbf{f} \quad (1.2.5.6)$$

$$\frac{d}{dt}\{(\mu p)^{\frac{1}{2}}\mathbf{n}\} = \mathbf{r} \times \mathbf{f} \quad (1.2.5.7)$$

ただし、 \mathbf{n} は軌道面の法線方向の単位ベクトル、 \mathbf{f} は単位質量あたりに働く外力ベクトルである。これらの式 (1.2.5.6)、(1.2.5.7) を各方向成分に展開し、変形すると、以下のように軌道要素の時間変化を示す方程式系が導かれる。

$$\dot{a} = \frac{2a^2v}{\mu} f_T \quad (1.2.5.8)$$

$$\dot{e} = \frac{1}{v} \left\{ 2f_T(e + \cos \theta) - f_N \frac{r}{a} \sin \theta \right\} \quad (1.2.5.9)$$

$$\dot{\Omega} \sin i = (\mu p)^{-\frac{1}{2}} r f_n \sin(\omega + \theta) \quad (1.2.5.10)$$

$$\frac{di}{dt} = (\mu p)^{-\frac{1}{2}} f_n \cos(\omega + \theta) \quad (1.2.5.11)$$

$$\dot{\omega} + \dot{\Omega} \cos i = \frac{1}{e} \left(\frac{p}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ -f_r \cos \theta + f_\theta \left(1 + \frac{r}{p} \sin \theta\right) \right\} \quad (1.2.5.12)$$

ここで、 f_r 、 f_θ は外力の軌道面上における r 、 θ 成分、 f_n は法線方向成分である（図4）。式（1.2.5.8）と（1.2.5.9）は f_r 、 f_θ の代わりに物体の軌道に沿った方向成分（速度方向） f_t とその直角内向き方向成分 f_N を用いて表している。後述するように大気ドラッグは主に軌道に沿った方向に作用するため、この方が都合良い。

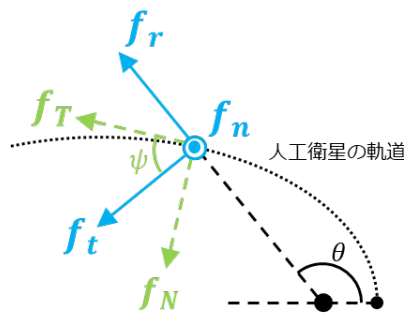


図4. 地球を周回する物体に作用する外力の各方向成分

1.2.5.4 大気ドラッグの大きさを決める要因

低軌道（高度2000km以下）の物体は、地球上層大気原子や分子と衝突するため、大気ドラッグ（大気抵抗）を受ける。地球に近づくほど大気密度が濃くなって物体との衝突頻度が増加するため、大気ドラッグが重要な外力となる。また、宇宙利用において大気ドラッグの不確実性はその扱いを厄介にさせている。本節では、大気ドラッグの大きさを決める要因と、大気ドラッグによって物体の軌道がどのように変わるかを記述する。

大気ドラッグによる単位質量当たりの力は次のように表せる。

$$\mathbf{f}_{drag} = -\frac{1}{2} B \rho |\mathbf{V}_r| \mathbf{V}_r \quad (1.2.5.13)$$

ここで ρ はその地点における背景大気質量密度、 \mathbf{V}_r は物体と大気の相対速度ベクトル、 $B (= C_d S/m)$ は弾道係数の逆数（inverse ballistic coefficient）である（ C_d は無次元の大気抵抗係数、 S は物体の軌道に垂直な面の断面積、 m は物体の質量）。 B は単に弾道係数と呼ばれることが多い。これらのパラメータの詳細はKing-Hele（1987）などで議論されており、ここでは概略のみ記述する。 B に含まれるドラッグ係数 C_d は、その物体と周囲の大気がどのように運動量をやりとりするかによって依存する。高度150km以上では物体と個々の大気粒子とのやりとりになる（大気

の平均自由行程がmからkmのオーダーであり、物体のサイズに比べて大きく、大気は流体でなく粒子の集まりと見做せる)。この状況において C_d は物体に付着する原子・分子と周囲の大気の組成、それらの平均速度、物体の形状や回転などに依存する。物体が球状または円柱状であり、大気主成分が酸素原子（高度200km付近から高度550~750kmまでの範囲）の場合は $C_d \sim 2.2$ となり、より高い高度で大気主成分が水素原子になると $C_d > 4$ となる（Afonso et al., 1985）。物体の断面積 S については、多くは軌道に垂直な面の向きが変化しながら移動するので平均した近似値が考慮される。物体の形状が把握され、球状や円柱状の場合は、比較的単純に近似値が推定できる。複雑な形状の場合は例えばCHAMP衛星の例などがある（Liu et al., 2005）。

実際には C_d や S の正確な値を得るのは困難であり、軌道計算など実利用の場面では地上レーダーのトラッキングデータから軌道要素を得る際にフィッティング係数として B に関する推定値が得られる。そして、軌道伝播モデルSGP4（Simplified General Perturbations model 4）（Hoots and Roehrich, 1988）などを用いて軌道予測の計算に使われる。ただし、そこで得られる推定値にはフィッティングの際の各誤差が含まれており、正確に B や大気密度の推定を行う場合には補正が必要となる（Bowman, 2002; Picone et al., 2005）。

式（1.2.5.13）に出てくる物体と背景大気の相対速度 V_r については、以下のように近似できる。

$$|V_r|V_r \cong \left(1 - \frac{r\omega}{v} \cos i\right)^2 |v|v \quad (1.2.5.14)$$

v は物体の速度ベクトル、 ω は地球の自転の角速度である。ここで物体が大気に比べて十分速く移動し、かつ大気が地球とともに共回転していると見做している。式（1.2.5.14）による近似の誤差は多くの場合3%以内と見積もられている（Picone et al., 2005）。ただし、磁気嵐が起きた時の高緯度域では熱圏大気の速度が地球の自転の速度（~400m/s）を上回り（本テキストの第4.5節を参照）、式（1.2.5.14）は適用できず、軌道面に垂直な力を考慮する必要が生ずる（King-Hele, 1987, Section 8）。式（1.2.5.14）を用いると式（1.2.5.13）は次のようになる。

$$f_{drag} \cong -\frac{1}{2}BF\rho|v|v \quad (1.2.5.15)$$

ただし、 $F(= (1 - r\omega/v \cos i)^2)$ は大気との相対速度に関するパラメータである。式（1.2.5.15）より大気ドラッグは主に物体の速度の方向に作用し（ f_T 成分）、式（1.2.5.8）、（1.2.5.9）を通じて軌道長半径や離心率を変化させることが分かる。

ここで大気ドラッグによる軌道変化の例を示す。万有引力以外に作用する力として大気ドラッグだけを考慮し、物体の軌道の変化を計算した結果を図5に示す。この例では仮想的な人工衛星（ $B=0.05\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 、軌道傾斜角60度とした）について、近地点高度350km、遠地点高度2000kmの初期位置から、衛星が大気に再突入（高度150km以下に到達）するまで計算した。熱圏の密度分布には経験モデル（「経験モデル」については1.2.5.7節にて後述）であるNRLMSISE-00（Picone et al., 2002）を用いた（大気の変動は季節や太陽紫外線強度に伴う変動のみ考慮し、磁気嵐の影響に相当するパラメータはオフにした）。図5（左）には3つの軌道が示されている

(初期の軌道、大気再突入に至るまでの期間 (ライフタイム) の1/2にあたる軌道、大気再突入直前の軌道)。大気ドラッグによって衛星の軌道半径が縮小し、軌道の形も楕円から円に近づく (離心率が小さくなる) ことが分かる。また、図5 (右) には近地点高度の時系列が示されている。大気ドラッグによって軌道半径が縮小する (高度が低くなる) と、背景の大気密度が増加するに従って大気ドラッグが増加し、軌道半径が縮小する (高度が下がる) 度合いが増している。同図の2つの実線は計算開始の時期だけずらした各計算結果である (衛星の弾道係数や初期軌道は共通)。赤線は太陽活動が比較的高い時期 (2000年1月1日)、青線は太陽活動が低い時期 (2005年1月1日) から計算を開始している。太陽紫外光強度が大きいほど熱圏の大気密度が濃くなり、大気ドラッグの影響が大きい。このため前者では計算開始から3.9年後、後者では11.8年後に大気に再突入しており、衛星のライフタイムに大きな違いを生じている。

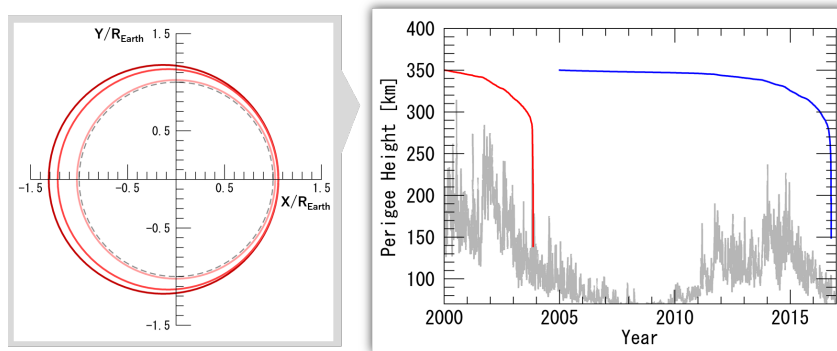


図5. 大気ドラッグの影響による人工衛星の軌道の推移を計算した例。(左) 軌道面上の軌道の変化。赤い3つの実線は、外側の線から順に、初期の軌道、中間 (ライフタイムの 1/2) の軌道、大気への再突入直前の軌道を示す。さらに内側の点線は地球表面の位置を示す。(右) 近地点高度の推移。2つの実線 (赤線と青線) は、衛星の弾道係数や初期の軌道は共通だが、軌道への投入時期をずらした計算結果である (太陽活動が高い時期と低い時期)。灰色の実線は太陽活動の指標である F10.7 指数の変動を示す。

1.2.5.5 熱圏大気密度の変動と大気ドラッグへの寄与

式 (1.2.5.15) が示すように熱圏の大気密度と大気ドラッグは直接結びついている。熱圏には様々な時間・空間変動が存在し、それによって大気ドラッグが変わり、人工衛星・デブリの軌道が変化する。熱圏で起きる現象の物理過程の詳細は本テキストの第4.5節にて説明される。本節では大気密度の変動にどのような種類があり、それらの大気ドラッグへの寄与を述べる。

表1はHe et al. [2020]から引用したもので (※のみLe et al. [2012]から)、1列目は熱圏に見られる典型的な変動の種類を示す。(準) 規則的な時間変動 (年変動、日変動)、太陽面の活動に由来する変動 (太陽面の活動領域の変化と自転による移動、太陽フレアによる放射強度増加、CME等による磁気嵐の発生)、空間変動、その他の特徴的な時空間変動が含まれる。表中のMDM (Midnight Density Maximum) は真夜中の赤道域にて密度増大が起こる現象を指し (例え

ば、Ruan et al. [2014]）、EMA (Equatorial Mass density Anomaly) は日中に赤道よりも中低緯度域にて密度が大きくなる分布のことを指す (Liu et al., 2005)。表には1年より長い変動は含んでいない (温暖化による数十年スケールの変動、太陽活動による約11年周期の変動など)。2列目は1列目の各変動による大気密度の変動幅の目安を示す (高度400km)。これらの値は熱圏の経験モデルDTMと物理モデルTIME-GCMを用いて得られている (※のみ衛星観測値)。3-4列目は、円軌道 (高度400km) の衛星について1列目の各変動による1日後の軌道の変位量を示す。これらはまず熱圏モデルで各時間・空間変動を入れる・入れない設定で大気密度分布を導出し、次にそれぞれの場合における大気密度分布を基に衛星の1日後の軌道変化を計算したのち、2つの計算結果の差分をとったものである。3,4列目の違いは太陽活動度によるもので、太陽活動度が高い時期ほど大気密度が濃く (第4.5節参照)、大気ドラッグの影響が大きいことを示す。熱圏の各変動による違いに関して、太陽面活動や太陽フレアによる変動を除いては、熱圏の年変動 (1年、半年周期) やMDM、12時間周期の変動による軌道変位の値が大きい。一方、24時間周期の変動や緯度方向の空間変動などについては、大気変動の振幅がある程度でも軌道変位量への寄与は小さい。これは、衛星が1周の間に通過するローカルタイム範囲、緯度範囲の中で熱圏の大気潮汐、緯度分布の山と谷を通り、軌道変位が相殺するためである。例えば、極軌道では1周の間に12時間離れた2つのローカルタイム帯を通る。これは12時間周期の大気潮汐では同位相だが、24時間周期の大気潮汐では位相が半分ずれているので変化が相殺する。また、年変動のような長期の熱圏変動の場合、1日当たりの大気変動の幅は小さいが、全球的に増加または減少となるため、1日後の軌道変位量は大きくなる。

表1では空欄となっているが、太陽面現象に由来する熱圏変動は、短期間で大きな変動になりうるため、衛星軌道に与える影響は最も大きいと考えられる。Berger et al. [2020] では、熱圏の経験モデルNRLMSISE-00を使い、磁気嵐が発生した際の高度200-650kmの実存する衛星について軌道の変位量を推定している。その見積もりでは、Kp=6相当の磁気嵐が発生し、それが3時間継続した場合に数km、18時間継続した場合に十数kmオーダーの軌道変位が生じる。

また、表1には含まれていないが、下層大気 (対流圏、成層圏) の現象が上層に伝搬して引き起こされる熱圏の変動も大気ドラッグに寄与しうる。主に北半球の冬季 (11月~3月) にかけて一冬に0~数回発生する成層圏突然昇温という現象がある。1回の発生につき、熱圏の大気密度は数日の間、日変動の振幅と位相変化し (特に12時間周期の振幅が顕著 (<数十%) に増加)、また全球平均の大気密度が高度によって3-7%程度小さくなるという報告がある (Liu et al., 2013; Yamazaki et al., 2015)。

表 1. 熱圏に見られる典型的な時間・空間変動とそれらが引き起こす1日後の衛星軌道の変位 (He et al. (2020) からの抜粋。※の部分のみ Le et al. (2012) から)。1列目の MDM は Midnight Density Maximum、EMA は Equatorial Mass density Anomaly と呼ばれる熱圏の現象を指す。2列目の振幅は高度 400km における大気密度の変動幅を示す。3-4 列目の衛星軌道は高度 400km の円軌道を想定し、 $B = 0.0023 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$ ($C_d = 2.3$ 、 $S = 0.5 \text{ m}^2$ 、 $m = 500 \text{ kg}$) の値を用いて計算されたもの。軌道変位の数値は、昇交点赤経と軌道傾斜角を各 0-360 度、0-90 度の範囲で変えて 90 通り計算し、その平均値と標準偏差を示している。

| 熱圏変動の種類 (周期・時間スケール) | 熱圏変動の 振幅 (%) | 1日後の衛星軌道変位への寄与 (m) | |
|------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| | | 太陽活動高 (F10.7=200) | 太陽活動低 (F10.7=70) |
| 年変動 (1年周期) | 5-15 | 300±20 | 25±5 |
| (半年周期) | 20 | 800±40 | 70±15 |
| 日変動 (24時間周期) | 10-40 | 50±30 | 10±10 |
| (12時間周期) | 10 | 100±100 | 10±10 |
| (8時間周期) | <3 | 1±1 | 0.5±0.5 |
| 太陽自転に伴う変動 (27日周期) | <100 | — | — |
| 太陽フレア放射の影響 (数時間-半日) | <30※ | — | — |
| 磁気嵐の影響 (1-3日) | 100-200 | — | — |
| 空間変動：緯度方向 | 10-20 | 50±40 | 15±10 |
| 経度方向 | <5 | 1±1 | 0.5±0.5 |
| MDM (数時間) | 20-30 | 150±30 | 15±6 |
| EMA (10時間) | 1-6 | 50±30 | 5±3 |

1.2.5.6 大気ドラッグが宇宙利用に及ぼす影響

前節までに熱圏の大気密度の変動が大気ドラッグを通じて人工衛星やスペースデブリの軌道を変化させることを説明した。本節では、大気ドラッグが宇宙利用に及ぼす影響について簡単に述べる。

人工衛星のライフタイム

1.2.5.4節で述べたように大気ドラッグは衛星の軌道半径を縮小させる。また、図5では高度や太陽活動によって衛星周囲の大気密度が変わり、それに伴い大気ドラッグの効果すなわち軌道半径の縮小の度合が変わり、衛星の大気再突入の時期に影響することが示されている。表2に高度500km以下の円軌道 ($e = 0$) の衛星が大気に再突入 (高度150km以下に到達) するまでの期間について試算結果を示す。背景の熱圏の大気密度にはNRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) を用いた。表に見られるように、高度が低く、太陽活動度が高いほど大気密度が濃く、そして弾道係数 B が大きいほど強い大気ドラッグが作用し、衛星のライフタイムが短くなる。この表には

1.2.5.5節で述べたような太陽面現象に由来する熱圏の変動などは含んでいないが、もし $K_p=8$ 相当の磁気嵐が1日間発生したと仮定すると、 $F_{10.7}=200$ 、 $B=0.05$ のケースにおいて、初期高度200km, 300km, 400kmの各衛星のライフタイムは、0.41日→0.29日、6.4日→5.4日、43日→42日と短くなる。

表 2. 高度 500km 以下の円軌道の人工衛星が大気に再突入するまでの期間。軌道傾斜角は 60 度に設定し、太陽活動は $F_{10.7}=70$ 又は 200 に固定して計算した。括弧付きの数値は太陽活動変動の時間スケールより長く、 $F_{10.7}$ の変動を考慮しないとあまり意味が無い。

| 初期高度 (km) | 太陽活動高 ($F_{10.7}=200$) | | 太陽活動低 ($F_{10.7}=70$) | |
|--------------|-----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | B=0.05 | B=0.01 | B=0.05 | B=0.01 |
| 500 | 220日 | 2.9年 | (8.8年) | (44年) |
| 400 | 43日 | 210日 | 330日 | 4.5年 |
| 300 | 6.4日 | 31日 | 23日 | 110日 |
| 200 | 0.41日 | 2.0日 | 0.67日 | 3.2日 |

人工衛星の追尾

人工衛星の運用機関では管理する衛星を地上アンテナと軌道予測計算により追尾している。衛星がアンテナの追尾できない非可視の範囲から可視の範囲に入ったときに、実際の衛星の位置が軌道計算による予測と大きくずれるとアンテナ捕捉ができなくなる。大気ドラッグがそのような軌道予測誤差を引き起こす可能性について、「宇宙天気災害に向けた科学提言のためのハザードマップ (2020)」の5.4.2節（「衛星大気ドラッグ」）の中で調べられている。簡単に、地上アンテナの開口直径が10mで周波数がXバンド（8GHz）とするとビーム幅は0.2625度であり、これは高度400kmでは31kmの範囲に相当する。この値は表1の大気ドラッグによる軌道変位と比べて十分大きく、静穏時の熱圏の変動の範囲では衛星の追尾に支障を与えるほどではない。ハザードマップでは磁気嵐を想定した熱圏擾乱のケースを調べているが、その試算でも高度300km以上は衛星の追尾に支障を与えるほどの影響は出ないと結論付けている。一方、米国空軍では地上レーダー網（SSN : Space Surveillance Network）によりサイズが10cm以上の人工衛星やスペースデブリを定常的に観測し、各物体の軌道要素などを含むカタログを更新し続けている。その運用者の証言によると、2003年10-11月に発生した大規模な磁気嵐の際には、SSNにて大半のLEO衛星を一時的に見失い、運用によりカタログを復活するのに数日要したとのことである（Berger et al., 2020）。

人工衛星やスペースデブリとの衝突予測

1.2.5.1節「はじめに」で述べたように地球近傍の宇宙環境はLEOの衛星およびデブリが増加し続けており、それらの衝突リスクを考慮した宇宙利用が重要となっている。このために各国の宇宙関連機関では宇宙環境の状況把握（SSA：Space Situational Awareness）の取り組みとして、衛星やデブリの監視や軌道の解析などを行っている。米国では18th Space Control Squadron（18SPCS）がSSAデータシェアの実務を担い、衛星と他の衛星やデブリとの接近情報（CDM：Conjunction Data Message）を衛星運用機関に送っている。2019年9月にはESAのAeolus衛星とSpaceX社のコンステレーション衛星の1つとの衝突リスクが高くなり、18SPCSからCDMを受けたESAがリスク回避のためAeolus衛星の高度を上げている。

(https://www.esa.int/Safety_Security/ESA_spacecraft_dodges_large_constellation)。

衝突リスクの評価に大気ドラッグの見積もりが影響する。NASAの衝突リスクの評価手法（Hejduk and Snow, 2018）やミシガン大学の衝突リスク評価モデル（Bussy-Virat et al., 2018）などでは次の様な手順がとられる。①まず、宇宙空間には数多くの物体があるので、評価対象の衛星がその中のどれかと接近するかを調べる。このため予測期間において（NASAの場合は7-10日間先まで）、評価対象の衛星とSSNで監視している衛星やデブリの軌道を計算し、軌道どうしが一定の距離より短くなるか調べる（ミシガン大モデルの閾値は10km）。②次に前過程で“接近する”と判断されたケースについて衝突リスクの解析を行う。具体的には2物体の軌道とその誤差（不確実性）の大きさから、2物体間の距離が衝突距離（数m）以内となる確率 P_c （衝突確率）を計算する。衛星運用機関は P_c の値を参考に衝突回避の操作を行うか判断している（NASAやESAでは $P_c > 10^{-4}$ を目安としている）。この衝突リスクの評価過程（とくに②の過程）において、大気ドラッグの不確実性に由来する軌道予測の不確実性が P_c に大きく影響する。1.2.5.4節にて大気ドラッグを決める要因として弾道係数 B と熱圏大気密度を挙げたが、これらの推定値は衝突リスクを評価する時点までの衛星・デブリの追尾データとモデルから得られており、その先の予測期間（～10日）にこれらの変動が小さければ、不確実性は限定されたものになる。しかし、実際には1.2.5.5節で挙げたように、熱圏の変動は～10日の期間に対して有意に変動幅を持つものがあり（27日周期の太陽自転に伴う変動や、突発的な太陽フレア・磁気嵐に伴う変動、やや変動幅は小さいが下層大気現象に由来する変動など）、これらの変動を軌道計算に用いる熱圏モデルが十分に予測できないため、不確実性が増加する。例として前述の文献（Hejduk and Snow, 2018; Bussy-Virat et al., 2018）では、熱圏モデル自体に含まれる誤差や、熱圏モデルに入力する太陽放射強度指標（F10.7）と地磁気擾乱指数（ A_p ）の予測値の不確実性が、衝突リスクの評価に影響することを示している。

大気圏突入の解析

大気ドラッグによる人工衛星のライフタイム・大気再突入の時期への影響について既に述べ

たが、衛星やデブリが大気圏に再突入した後はさらに大気による減速や加熱の影響が大きくなる (e.g., 米国FAAのチュートリアル文書 "Returning from Space: Re-entry")。高度150km以下に下がると大気平均自由行程が物体のサイズより小さくなり、大気は粒子から流体としての扱いになる。また、物体の速度は音速を超えているため、前方に衝撃波が形成される。このような物体周囲の大気状態の変化に伴い、大気ドラッグの係数 C_d も変化し (King-Hele, 1987)、物体の軌道や速度に影響する (e.g., Smith et al., 2005)。衝撃波の内側は断熱圧縮により非常に高温になっており、物体表面も1000Kを越え、鉄などの金属を含め多くの物質を溶かしてしまう。衛星運用機関では、大気圏に再突入する衛星やデブリについて、その物体の構成物のどれくらいが燃え尽きずに地表に達するか、到達する場合の速度、範囲などの解析を行い、地上で暮らす人類へのリスクを評価している (e.g., Smith et al., 2005)。

人工衛星の姿勢

上記では大気ドラッグが物体の軌道に及ぼす作用について宇宙利用への影響を記述したが、大気ドラッグが物体の姿勢に及ぼす作用も衛星運用に影響しうる。衛星のデザインによって大気ドラッグが作用する中心点と重心の位置が離れている場合、衛星を回転させようとするトルク $\mathbf{T}_{drag} = \mathbf{r}_{rel} \times \mathbf{f}_{drag}$ がかかる (\mathbf{r}_{rel} : 大気ドラッグが作用する中心点と重心の位置の相対距離ベクトル、 \mathbf{f}_{drag} : 単位質量当たり働く大気ドラッグ)。通常は姿勢制御機能により衛星の姿勢が適切になるように維持される。大気ドラッグによるトルクが影響した可能性のある事例として、X線天文衛星「あすか」の例が挙げられる。当初のミッション予定期間を終えて継続運用されていた「あすか」は、2000年7月14日に発生したX6.1クラスの太陽フレアの影響に見舞われた。この時、地球近傍では太陽から放出されたコロナガスの到達により、規模の大きい磁気嵐 (Dst指数<300nT) が起こり、熱圏では極域に降り込んだ高エネルギー粒子や電流によって大気が加熱され、膨張している。「あすか」の軌道は近地点高度440km付近で緯度±30度以内の範囲にあったが、磁気嵐による大気膨張のため周囲の大気密度が数倍に急増したと推定されている。このため衛星の姿勢制御能力を超えた大気ドラッグによるトルクが作用した可能性があり、衛星の姿勢が大幅に乱れたことにより、以降の観測停止につながってしまった (JAXA ウェブ: http://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter06/02/06.shtml)。

1.2.5.7 おわりに：熱圏変動の予測モデル

本節では、熱圏における大気ドラッグがLEOの衛星やデブリの軌道をどう変化させるか、そして大気ドラッグが宇宙利用に具体的にどう影響するか説明した。1.2.5.6節で紹介したように、衛星やデブリの軌道の予測、大気再突入時期の推定、衝突リスクの評価、大気再突入のり

スク評価などの各場面において、大気ドラッグの影響を考慮するため、熱圏大気の分布や変動を記述するモデルが必要となる。そのような熱圏大気のモデルは大きく分けて2種類ある。一つは実際の観測データに基づき位置や季節、太陽活動・地磁気擾乱指数などを変数として統計的に整理したもので、平均的な振る舞いを記述する経験モデルである。もう一つの種類は大気の物理法則を表す方程式を数値的に解く物理モデルである。

熱圏の経験モデルについて一般的な特徴・モデル例を以下に挙げる。

- **規則的な変動・平均的な変動を良い精度で再現**

観測データに基づいているので、データが豊富にある領域の規則的な変動・平均的な変動を比較的良い精度で再現できる。例えば表1の中では太陽活動サイクルに伴う変動、年変動、(月平均的な)日変動など。観測データの少ない領域についての再現精度は低い(高度200km以下の熱圏下部など)。

- **地磁気擾乱に伴う変動は平均的なパターンを再現**

ただし、磁気嵐の規模が大きくなるにつれ、観測データが少ないことに加え、イベントごとに熱圏の振る舞いが異なるため、モデルの誤差は大きくなる。

- **時間・空間分解能は低い**

標準的にモデルで扱っている時間変動の最短周期は8時間である。緯度方向には球面調和関数の6次成分まで含まれ、分解能は20度くらいに相当する。経度方向の変動は最小波長が120度である。

- **計算コストは小さい**

- **モデルの例**

NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002)、JB2008 (Bowman et al., 2008)、DTM2013 (Bruinsma, 2015) など。

一方、熱圏の物理モデルの一般的特徴・モデル例を以下に挙げる。

- **規則的な変動だけでなく、不規則な変動も再現可能**

経験モデルと同様に熱圏の規則的な変動は再現できるが、再現精度は劣る。対流圏まで含む物理モデルは、熱圏の日々の変動や成層圏突然昇温などによる突発的な変化を再現できる。

- **地磁気擾乱に伴う変動はイベントごとの振る舞いを再現できる**

- **時間・空間分解能は高い**

標準的に時間変化は分のオーダーから再現可能であり、空間分解能は緯度・経度方向に5度以下である。例えば、表1にある太陽フレア放射に伴う変動や磁気嵐の影響などについて詳細な時間・空間発展を再現できる。また、MDMやEMAは分解能的に物理モデルでのみ再現できる。

- **計算コストは大きい**

- モデルの例

熱圏・電離圏を対象としたものにTIE-GCM (Richmond et al., 1992) やCTIPe (Fuller-Rowell et al., 2002) などがある。対流圏から熱圏 (および電離圏) を含めたWAM (Akmaev et al., 2008)、WACCM-X (Liu et al., 2010)、GAIA (Miyoshi and Fujiwara, 2008; Jin et al., 2011) などがある。

上に挙げた各モデルの特徴や結果などの詳細についてはレビュー論文Emmert [2005]を参照頂きたい。1.2.5.6節で述べた実際の宇宙利用の現場では経験モデルが使われている。経験モデルの方が規則的・平均的な変動について再現精度が良く、計算コストが小さいためと考えられる。物理モデルの再現精度については、データ同化の導入などにより近年向上しつつある。また熱圏変動の予測において、両タイプのモデルとも未来の太陽放射や地磁気擾乱の状況に依る点は共通している。例えば1.2.5.6節で挙げた衝突リスクの評価では10日程度先までの予測が必要とされるが、現状では熱圏モデルの予測誤差が大きく、衛星・デブリの軌道の不確定性に寄与している。従って、太陽放射や地磁気擾乱の予測を含め、熱圏モデルの予測精度を上げることが今後望まれる。

参考文献

- Akmaev, R.A., Fuller-Rowell, T.J., Wu, F., Forbes, J.M., Zhang, X., Anghel, A.F., Iredell, M.D., Moorthi, S., Juang, H.-M., Tidal variability in the lower thermosphere: comparison of whole atmosphere model (WAM) simulations with observations from TIMED. *Geophys. Res. Lett.* 35, L03810. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL032584> (2008)
- Afonso, G., Barlier, F., Berger, C., Mignard, F., and Walch, J. J., Reassessment of the charge and neutral drag of LAGEOS and its geophysical implications, *J. Geophys. Res.*, 90 (B11), 9381–9398, doi:10.1029/JB090iB11p09381 (1985)
- Berger, T. E., Holzinger, M. J., Sutton, E. K., & Thayer, J. P., Flying through uncertainty. *Space Weather*, 18, e2019SW002373. <https://doi.org/10.1029/2019SW002373> (2020)
- Bussy-Virat, C. D., Ridley, A. J., and Getchius, J. W., Effects of uncertainties in the atmospheric density on the probability of collision between space objects. *Space Weather*, 16, 519–537. <https://doi.org/10.1029/2017SW001705> (2018)
- Bowman, B. R., Tobiska, W. K., Marcos, F. A., Huang, C. Y., Lin, C. S., & Burke, W. J., A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices. In *Aiaa/aas astrodynamics specialist conference and exhibit*, pp. 6438. <https://doi.org/10.2514/6.2008-6438> (2008)
- Bowman, B. R., True Satellite Ballistic Coefficient Determination for HASDM, *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, doi:10.2514/6.2002-4887 (2002)

- Bruinsma, S., The DTM-2013 thermosphere model. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5, A1. [https://doi.org/10.1051/swsc/2017008\(2015\)](https://doi.org/10.1051/swsc/2017008(2015))
- Emmert J. T., Thermospheric mass density: A review, *Adv. Space Res.*, 56, 773-824 (2015)
- Fuller-Rowell, T.J., Millward, G.H., Richmond, A.D., Codrescu, M.V., Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 64, 1383–1391 (2002)
- He, C., Yang, Y., Carter, B., Zhang, K., Hu, A., Li, W., et al.. Impact of thermospheric mass density on the orbit prediction of LEO satellites. *Space Weather*, 18, e2019SW002336. <https://doi.org/10.1029/2019SW002336> (2020)
- Hejduk, M. D., and Snow, D. E., The effect of neutral density estimation errors on satellite conjunction serious event rates. *Space Weather*, 16, 849–869. <https://doi.org/10.1029/2017SW001720> (2018)
- Hoots, F. R., and R. L. Roehrich, Models for propagation of NORAD element sets, Aerospace Defense Command Spacetrack Rep. 3, Peterson AFB, CO (1988)
- Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Shinagawa, H., Terada, K., Terada, N., Ishii, M., Otsuka, Y., Saito, A., Vertical connection from the tropospheric activities to the ionospheric longitudinal structure simulated by a new Earth's whole atmosphere–ionosphere coupled model. *J. Geophys. Res.* 116, A01316. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015925> (2011)
- King-Hele, D.G., *Satellite orbits in an atmosphere*, Blackie and Son Ltd. (1987)
- Le, H., Liu L., Wan W., An analysis of thermospheric density response to solar flares during 2001–2006. *J Geophys Res* 117, A03307, doi:10.1029/2011JA017214 (2012).
- Liu, H., H. Luhr, V. Henize, and W. Köhler, Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP, *J. Geophys. Res.*, 110, A04301, doi:10.1029/2004JA010741 (2005)
- Liu, H. Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., and Shinagawa, H., Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time and height dependence simulated by GAIA model, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 635– 640, doi:10.1002/grl.50146(2013).
- Liu, H.-L., Foster, B.T., Hagan, M.E., et al., Thermosphere extension of the whole atmosphere community climate model. *J. Geophys. Res.* 115, A12302. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015586> (2010)
- Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Gravity waves in the thermosphere simulated by a general circulation model. *J. Geophys. Res.* 113, D01101. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD008874> (2008)
- NASA Orbital Debris Quarterly News, Vol.24, 1, February (2020a)
- NASA Orbital Debris Quarterly News, Vol.24, 2, April (2020b)
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., and Aikin, A. C., NRLMSISE - 00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1468, doi:10.1029/2002JA009430(2002)
- Picone, J. M., Emmert, J. T., and Lean, J. L., Thermospheric densities derived from spacecraft orbits: Accurate processing of two - line element sets, *J. Geophys. Res.*, 110, A03301, doi:10.1029/2004JA010585 (2005)
- Returning from Space: Re-entry, *Advanced Aerospace Medicine On-line: Section III-Space Operation*, Federal Aviation Administration, available at https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/aam/cami/library/online_libraries/aerospace_medicine/tutorial/section3/spacecraft_design/

- Richmond, A.D., Ridley, E.C., Roble, R.G., A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics., *Geophys. Res. Lett.* 19, 601–604 (1992)
- Ruan, H., Lei, J., Dou, X., Wan, W., and Liu, Y. C. - M., Midnight density maximum in the thermosphere from the CHAMP observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 3741- 3746, doi:10.1002/2013JA019566 (2014).
- Smith, R., Bledsoe, K., Dobarco-otero, J., Rochelle, W., Johnson, N., Pergosky, A., Weiss, M, Reentry Survivability Analysis of the Hubble Space Telescope (HST), 4th European Conference on Space Debris, Vol. 4, Issue 1 (2005)
- Yamazaki, Y., Kosch, M. J., and Emmert, J. T., Evidence for stratospheric sudden warming effects on the upper thermosphere derived from satellite orbital decay data during 1967–2013, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6180– 6188, doi:10.1002/2015GL065395 (2015).
- 姿勢制御研究委員会, 人工衛星の力学と制御ハンドブック, 培風館, (2007)