

パラボリックフライトについて

ダイヤモンドエアサービス株式会社 飛行課 景山 大郎

1. はじめに

斜め上向きに初速のある物体に重力（地球の引力）のみが働いた場合、その物体の運動は放物線を描き、物体の内部は無重力状態になる。ところが、実際の大気中で例えば物体を放り投げても空気抵抗がある為、厳密な放物線は描かない。航空機による微小重力飛行は、この空気抵抗を打ち消す為、航空機の推力や揚力を利用して航跡が放物線を描くよう飛行（操縦）することにより、機内に微小重力環境を作り出すことができる。

我が国の航空機による微小重力実験は、平成2年度より宇宙開発事業団が定常的に実験を実施している。使用航空機は三菱式MU-300型機（小型ビジネスジェット機）で同時に2テーマの実験装置を搭載し、これを1サイクルとして実験を行っている。スケジュールは1年を3期に分け、1期約2ヶ月間で3サイクル、1サイクルにつき6フライトの実験を実施するのが標準で、図1に1期の標準作業工程を示す。年間にすると18テーマ、54フライトの実験を行うことになる。又、1フライトにつき平均で8回のパラボリックフライトを行うので年間で約430回のパラボリックフライトを行うことになる。

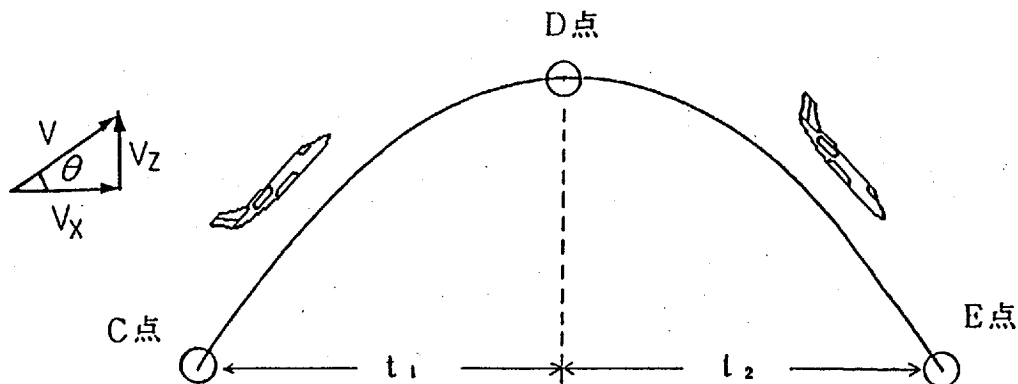
さて実験者にとってパラボリックフライトにおける微小重力レベル、微小重力持続時間、飛行方法（微小重力環境前後のGレベル）等を知ることは非常に興味深いものと思われる。又、航空機による微小重力実験の特長である色々な飛行方法が可能であるという観点から、本報では各種飛行方法による微小重力持続時間と飛行方法（微小重力環境前後のGレベル）の関係、及び微小重力レベルと微小重力持続時間の関係について簡単な物理計算と実際に操縦した経験上から記述することとする。



三菱式MU-300型

2. パラボリックフライトの原理

パラボリックフライトの原理を説明する為、質点の放物線運動のモデルに簡略化して説明する。放物線運動（パラボリックマニューバ）の時間及び速度の関係は以下のようになる。



上図のように放物線の始まりをC点、頂点をD点、終わりをE点とし、それぞれの点の速度を V_c 、 V_D 、 V_E とする。又、重力方向をZ軸、飛行方向でZ軸と鉛直な軸をX軸とし、それぞれの速度成分を V_z 、 V_x 、飛行方向とX軸のなす角を θ とすると、

$$V_z = V \sin \theta$$

$$V_x = V \cos \theta$$

初速 V_c に対し、放物線上の任意の点での速度は、

$$V_z = V_{cz} - g t \quad \text{..... ①}$$

$$V_x = V_{cx} \text{ (一定)}$$

g : 重力加速度 9.8 m/s^2

$$V = V_{cx} / \cos \theta$$

t : 時間 (sec)

一方、C点からD点までの時間を t_1 、D点からE点までの時間を t_2 とすると、

①式より

$$t_1 = (V_{cz} - V_{Dz}) / g$$

$$t_2 = (V_{Dz} - V_{Ez}) / g$$

D点においては $\theta_D = 0$ であることから、 $V_{Dz} = 0$

$$\therefore t_1 = V_{cz} / g$$

$$t_2 = V_{Ez} / g$$

以上の式より、 t_1 をできるだけ長くする為には V_{cz} をできるだけ大きくすること、即ち、初速 V_c を大きくするか、初期上向角（上昇角） θ_c を大きくすることである。又、 t_2 を長くする為には V_{Ez} を大きくする、即ち最終下向角（降下角） θ_E を大きくすることである。

3. 標準的なMU-300型機によるパラボリックフライトパターン

MU-300型機による標準的なパラボリックフライトパターンを図2に示す。
 図中のGの値はZ軸のG、速度は航空機の計器速度 (V_i) を表す。

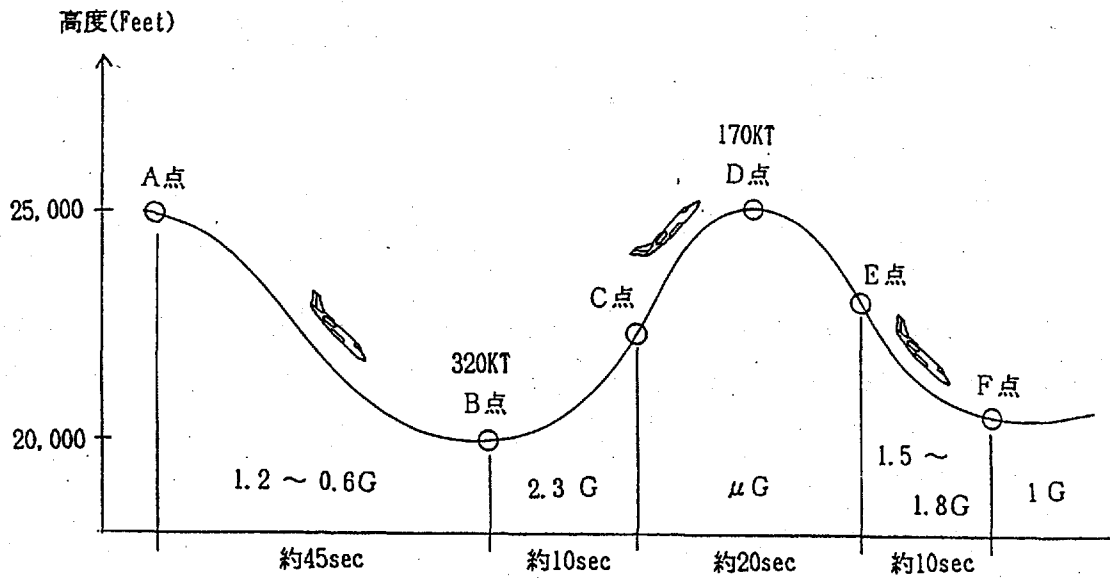


図2 標準的なパラボリックフライトパターン

- (1) A点以前は水平飛行で1Gの状態である。
- (2) A点（微小重力前約1分）で航空機の最高速度を得る為、降下飛行に移る。
- (3) B点で航空機の最高速度に達し、ここからC点に向け、約2.3Gの引き起こしを開始する。
- (4) C点からパラボリックフライトに入る。
- (5) E点でパラボリックフライトを終え、リカバリー操作（水平飛行への）を行う。
- (6) F点で水平飛行1G状態に戻る。

4. パラボリックフライト前後のGと微小重力持続時間の関係

航空機による微小重力実験においては、微小重力環境前後に2G程度のGがかかるのが標準であるが、実験の内容によってこの特に微小重力環境前の2Gが実験に悪影響を及ぼす場合がある。そこで、この微小重力環境前のGを2G以下でパラボリックフライトを実施する場合の飛行方法、特に微小重力持続時間に対する影響を以下に記述する。

4.1 MU-300によるパラボリックフライトの運用制限

パラボリックフライトパターン中、2項で述べたとおり、微小重力時間を長くする為 V_c 及び V_e をできるだけ大きくしたいが、本飛行で航空機の運用上考慮しなければならない事項は次の通りである。

- (1) 本飛行中、MU-300の最大運用速度 320 KT (ノット) (593 Km/H) (計器速度) を超えないこと。図2中ではB点を 320 KT にして引き起こしを開始する。又、F点で 320 KT を超えない様、充分マージンをとってE点での速度 V_e 及び降下角 θ_e を計画しなければならない。
- (2) 本飛行中、MU-300の失速速度約 100 KT (計器速度) 以下にならないこと。図2中ではD点が最小速度となるが、この時は操縦上速度制御が困難な為、失速速度に充分マージンがとれた速度でしかも操縦上安定した速度 160 KT 以上になるようC点での速度 V_c 及び上昇角 θ_c を計画しなければならない。
- (3) 本飛行中、MU-300の許容制限荷重 3.2Gを超えないこと。図中ではB~C点間及びE~F点間で顕著な+Gが予想されるが、同じ航空機で繰り返し行うので航空機の構造上 2.5G以下で実施するのが望ましい。
- (4) 本飛行中、操縦上過大な操舵力を要さないこと。経験上E点付近で操舵力が最大となり、 $\theta_e = -35^\circ$ でリカバリーしているのが現状である。

以上の事を整理すると、

- a. B点では 320KT (計器速度) で引き起こしを開始する。
- b. C点での速度 V_c 及び上昇角 θ_c は引き起こしのGの値 ($G \leq 2.5$) によって決定されるが、D点での速度 V_D が 160 KT 以下にならない様設定する。
- c. E点での降下角 θ_e は V_D 及びリカバリー時のGの値 ($G \leq 2.5$) によって決定されるが操縦上の問題で -35° 以下にならないこと。

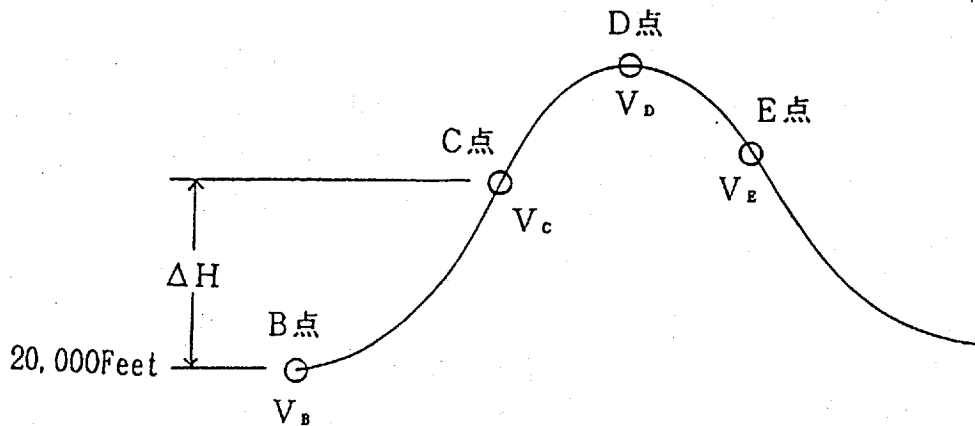
4.2 パラボリックフライトの飛行方法

2項で述べた様に微小重力持続時間は V_c , θ_c , θ_E によって決定される。一方前項でのMU-300の運用限界を勘案すると V_c , θ_c はパラボリックフライト前のGの値によって決定され、 θ_E は操縦上の問題で -35° 以上でなければならない。

本項では物理計算によってパラボリックフライト前のGと微小重力持続時間T ($t_1 + t_2$)の関係を示す。実際には空力学的に、迎え角、抗力、揚力、推力、温度、圧力高度等が全てパラメータとなるが、本計算ではこれら空力的要素を無視し、単に物理計算することによりあくまでも目安を得ることを目的とした。

☆ 計算条件

- (1) B点での高度を 20,000 FEET (6,096 m)とする。
- (2) 大気状態 (温度, 圧力) はISA (国際標準大気)とする。
- (3) 任意の点で航空機の抗力と推力はつり合っているものとする。



☆ 計算式

航空機の計器速度 (V_i) と真対気速度 (V_T) は近似式で、

$$V_T = V_i (1 + 0.02 (H/1000))$$

H : 高度 (FEET)

エネルギー保存の法則より

$$1/2 m V^2 + m g H = \text{一定}$$

m : 重量

g : 重力加速度 (9.807 m/s^2)

引き起こしGによる高度変化 ΔH は、

$$\Delta H = V_B^2 (1 - \cos \theta) / g (G^2 - 1)^{1/2}$$

θ : 上昇角

※実際はらせん運動となるが、円運動として計算する。

引き起こしGによる速度変化は、

$$V_c = (V_B^2 - 2 g \Delta H)^{1/2}$$

以上の計算式での計算結果を表1にまとめる。

表1 計算結果のまとめ

引き起こし G	V _B (m/s)	θ _c (deg)	V _c (m/s)	H _c (feet)	V _D (m/s)	H _D (feet)	t ₁ (sec)
1. 2	230.47	35	155.44	24,844	127.36	26,172	9.09
1. 4	230.47	40	166.60	24,242	127.66	26,159	10.92
1. 6	230.47	40	182.27	23,328	139.67	25,622	11.94
1. 8	230.47	45	179.81	23,477	127.20	26,179	12.96
2. 0	230.47	45	187.50	23,004	132.64	25,942	13.51
2. 2	230.47	45	192.98	22,655	136.51	25,768	13.91
2. 4	230.47	45	197.13	22,385	139.44	25,575	14.21

次にθ_R = -35° としてのt₂を求め、引き起こしGに対応したTを表2に示す。尚、実際に近い値にするため、C点で引き起こしGからμGに移行する時のリードタイムを3秒として、Tの値に加味した。

表2 引き起こしGとTとの関係

引き起こし G	t ₁ (sec)	θ _R (deg)	t ₂ (sec)	リードタイム (sec)	T (sec)	備 考
1. 2	9.09	-35	9.09	-3.00	15.18	
1. 4	10.92	-35	9.11	-3.00	18.03	
1. 6	11.94	-35	9.97	-3.00	18.91	
1. 8	12.96	-35	9.08	-3.00	19.04	
2. 0	13.51	-35	9.46	-3.00	19.97	
2. 2	13.91	-35	9.74	-3.00	20.65	
2. 4	14.21	-35	9.95	-3.00	21.16	

表2のとおり微小重力持続時間Tは、μG移行前の引き起こしGによって変化する。引き起こしGが小さい程Tは短くなるが、実験者の要望に応じ各種飛行方法によるパラボリックフライトを実施できるのが航空機の特長である。

5. 微小重力レベルと微小重力持続時間

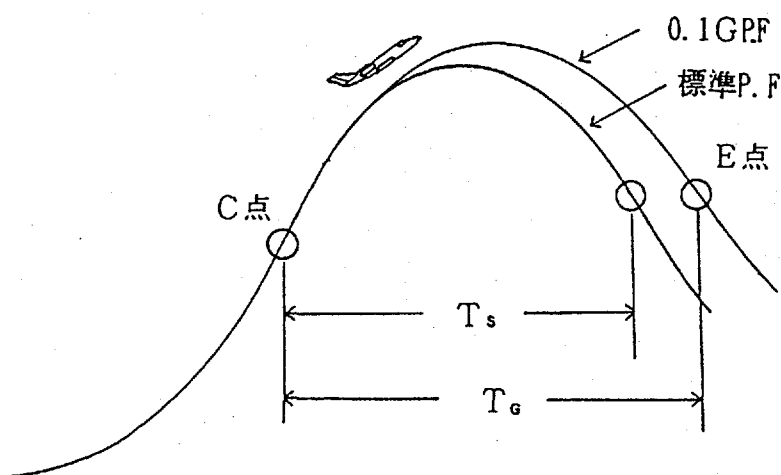
微小重力実験において、出来るだけ無重力に近い環境で実験したい場合と色々な重力環境下（例えば0.1Gの環境下）で実験したい場合がある。パラボリックフライトでは飛行方法によって、色々な重力環境下をつくることができるので、本項では微小重力レベルと微小重力持続時間の関係について述べる。

5.1 標準的なGレベル

標準的なGレベルは 10^{-2} レベルで+0.01~0.03Gであるのが一般的である。少し大きみになるのは、-Gになると機体システム（燃料系統、オイル系統、油圧系統）に悪影響を及ぼす為、操縦士は-Gにならない様にしてできるだけ0Gに近づけるよう操縦しなければならないからである。

5.2 色々なGレベルと微小重力持続時間

前述のとおりパラボリックフライトでは色々なG環境をつくることができる。例えば0.1Gの環境をつくる為には、下図のように標準的なパラボリックフライトパターンより少し弧が大きくなるように飛行すればよい。当然、微小重力持続時間は標準より長くなることになる。



前後の飛行方法は全く同じであるので、Gレベルと微小重力持続時間Tは下式のようになる。

$$T_g = T_s / (1 - G_0)$$

T_g : G_0 レベルでの重力持続時間

T_s : 標準的な微小重力持続時間

即ち、0.1Gの環境は4項で述べた標準的な微小重力持続時間より、約11%長く持続できる。又、0.2Gでは25%長く持続できる。

6. あとがき

航空機による微小重力実験は簡便で比較的安価であること、しかも実験者が搭乗し実験をその場で観察、操作することができる等多くの特長を有しているのは、一般的に知られているが、その他にも本報で述べたように色々な飛行方法によるパラボリックフライトが可能であることが1つの大きな特長である。来る宇宙時代に向けより多くの実験者（ユーザ）が本報を参考の上、航空機を有効に活用して微小重力実験を計画、実施することを期待する。