

## 微小重力実験用落下カプセルの風洞試験

井筒直樹\*・稲富裕光\*・並木道義\*  
栗林一彦\*・矢島信之\*

### Wind Tunnel Experiment of Microgravity Capsules

By

Naoki IZUTSU\*, Yorimitsu INATOMI\*, Michiyoshi NAMIKI\*  
Kazuhiko KURIBAYASHI\* and Nobuyuki YAJIMA\*

**Abstract:** Microgravity experiments are carried out mainly by shuttles in outer space, sounding rockets and airplanes in a ballistic orbit, and drop-shaft type facilities. Considering the frequency, condition of microgravity environment, and expenses, an inexpensive means with longer duration of microgravity than by an airplane or a drop type facility is expected. In 1980s three scientific balloons were launched with microgravity capsules which were dropped in the stratosphere to make a microgravity environment of 0.01g for 18 seconds. A long duration (more than 30 seconds) will be useful for such type of microgravity experiments. The conditions of duration, microgravity level, and experimental units loaded in a microgravity capsule were obtained by numerical simulations for free-fall capsules using the results of wind tunnel tests and the real condition of the upper air and wind over Sanriku Balloon Center. The results show that a microgravity experimental unit with 0.4m in diameter and 40kg in weight can make a 0.01g-microgravity environment for 30 seconds while a 0.125m and 10kg one can last for 35 to 40 seconds.

#### 概 要

現在、微小重力実験は主として、シャトル、観測ロケット、航空機、地上落下塔により行われているが、実験の頻度、微小重力環境の質と持続時間、実験費用等を検討すると、落下塔や航空機搭載の場合よりも持続時間が長くて、比較的簡便な方法が求められている。大気球を用いた大気中の落下カプセルによる微小重力実験は、1980年代に3回、三陸大気球観測所において行われており、0.01g以下の微小重力環境が約18秒間得られている。この持続時間を30秒以上に延ばすことができれば、簡便で有用な微小重力実験手段になると期待される。ここでは、三陸大気球観測所において大気球を用いた微小重力実験を行う場合に、どの程度の微小重力環境が得られるかを検討した。微小重力実験用落下カプセルのモデルを用いた風洞試験を行い、その結果と実際の大気環境条件を使用して、落下カプセルの降下運動を数値シミュレーションした。そして、大気球を用いた微小重力実験を行う場合に実現可能な微小重力の質と持続時間、また、そのために要

求される搭載機器の制限等を求めた。直径 0.4m, 40kg の搭載装置の場合には約 30 秒の 0.01g, 直径 0.125m, 10kg 程度の装置では 35~40 秒の 0.01g 以下の微小重力環境を実現することが可能である。

**重要語：** 気球実験, 微小重力, 風洞試験

## 1. はじめに

現在, 微小重力実験は主に, 宇宙空間を慣性飛行するシャトル, 弾道飛行する観測ロケットや航空機, 地上落下塔を用いた自由落下により行われているが, 実験の頻度, 微小重力環境の質, その持続時間, 実験に要する費用等を検討すると, 大部分の実験は航空機と落下塔を使用したものとなっている。しかしながら, これらの手段は微小重力の持続時間が物理的に限られているため, 実験の目的によっては不十分な場合も少なくない。そこで, 落下塔や航空機搭載より微小重力環境の持続時間が長くて, しかも比較的簡便な方法が求められている。過去に, 三陸大気球観測所において, 大気球を用いた大気中の落下カプセルによる微小重力実験は 1980 年から 1983 年にかけて 3 回行われている[1,2]。各実験の構成と得られた微小重力環境を表 1 に, その際に製作された落下カプセルの形状と寸法を図 1 に示す。1983 年の実験では約 18 秒間の 0.01g 以下の微小重力環境が得られている。この持続時間を 30 秒以上に延ばすことができれば, 非常に有用な微小重力実験手段になると期待される[3]。現在, 使用することのできる微小重力実験の手段を表 2 に示す。この中で MIKROBA は科学観測用大気球による落下実験手段であり, 直径 0.45m, 長さ 6m の落下カプセルを容積 400,000m<sup>3</sup> の気球で高度 42km まで上げ, スラスタを併用して約 1 分間の 0.001g の微小重力が得られるとしているが, スラスタを使用することでシステムは非常に複雑なものになっている。

ここでは, 三陸大気球観測所で大気球を用いた大気中の落下カプセルによる微小重力実験を行うことを想定した場合に, スラスタを使用することなくどの程度の微小重力環境が得られるかを検討した。まず, 微小重力実験用落下カプセルのモデルを用いた遷音速および超音速風洞試験を行った。その結果を用い実際の気や風の条件を当てはめて落下カプセルの降下運動を数値シミュレーションした。そして, 三陸大気球観測所で実行可能な範囲で, 実現可能な微小重力環境とその際の搭載機器等の制限を求めた。

表 1. 微小重力実験用落下体

実験日	落下カプセル			気球容積 (m <sup>3</sup> )	落下開始 時の高度 (km)	微小重力の質 (g)	
	直径 (mm)	全長 (mm)	重量 (kg)			10 sec	20 sec
1980.9.30	235	1000	37	5,000	25	0.004	0.030
1981.6.10	310	1800	90	15,000	29	0.002	0.015
1983.9.06	524	2200	275	50,000	32	0.003	0.014

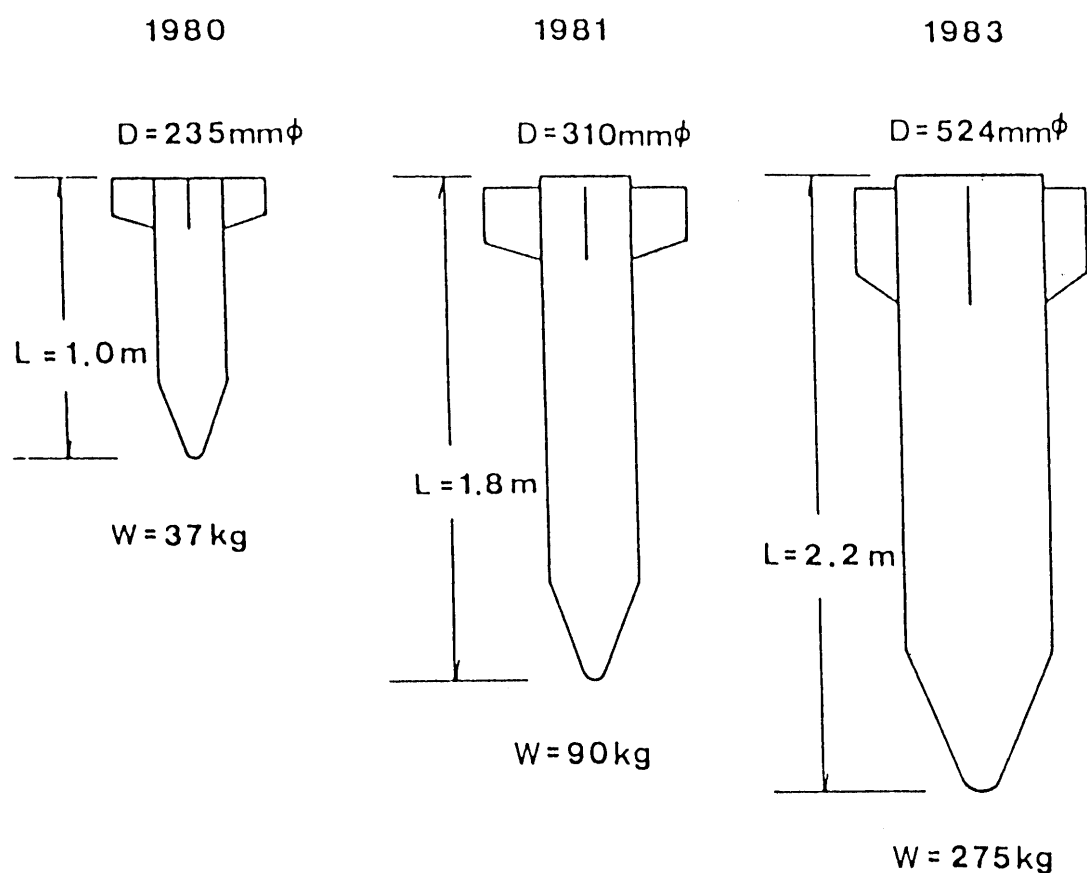


図1. 大気球を用いた微小重力実験用落下体

表2. 微小重力実験の手段

	微小重力の質 (g)	持続時間 (sec)	加速度(G)		ペイロードの 寸法, 重量
			実験前	実験後	
宇宙ステーション 衛星, シャトル等	0.0001	-	0	0	
観測ロケット (TR-IA 等)	0.0001	360	12	14	(0.85mD×5.9m, 750kg) を複数ユニットに分割
MIKROBA	0.001	60	0	7	(0.42mD×0.5m, 40kg) を最大4ユニット
航空機 (MU-300 等)	0.01	20	2	2	1.5m×0.5m×1.0m 以上
落下塔 (JAMIC) (MGLAB)	0.0001	10 4.5	0	8 10	0.87mD×0.91m, 500kg 0.72mD×0.88m, 400kg

## 2. 落下カプセルの運動

大気中を落下する微小重力実験用カプセルの重心周りの運動をヨーおよびロール方向の運動を考えずに二次元問題として取り扱うことにする。落下カプセルの重心の水平位置、高度をそれぞれ  $r$ 、 $z$  とし、図2に示すように、鉛直軸に対するカプセル中心軸の角度を姿勢角（ピッチ角）とし  $\theta$  で表すことにすると、カプセルの運動方程式は、

$$m_p d^2 z / dt^2 = -m_p g + F_z, \quad (1a)$$

$$m_p d^2 r / dt^2 = F_r, \quad (1b)$$

$$I_p d^2 \theta / dt^2 = M, \quad (1c)$$

で表される。ここで、 $m_p$ 、 $I_p$  はそれぞれカプセルの質量、慣性モーメントを示し、カプセルに作用する空気力の  $r$ 、 $z$  方向の成分  $F_r$ 、 $F_z$  は、カプセルに作用する抗力  $F_d$ 、揚力  $F_l$  によって、

$$F_z = F_d \cos(\theta - \alpha) + F_l \sin(\theta - \alpha), \quad (2a)$$

$$F_r = -F_d \sin(\theta - \alpha) + F_l \cos(\theta - \alpha), \quad (2b)$$

のように表される。ただし、 $\alpha$  は風の水平成分を考慮したカプセルの相対ピッチ角である。抗力、揚力、およびピッチングモーメント  $M$  は、相対ピッチ角  $\alpha$  における抗力、揚力、ピッチングモーメント係数  $C_D$ 、 $C_L$ 、 $C_M$  に

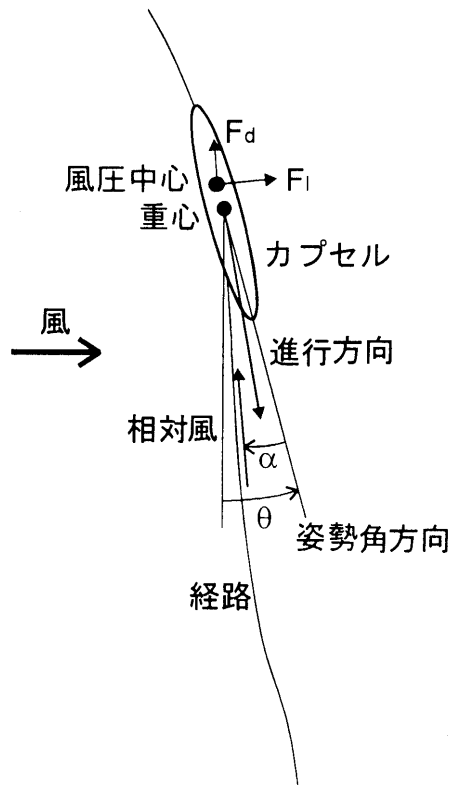


図2. 微小重力実験用カプセルに作用する力

よって,

$$F_d = C_D(\alpha)qA, \quad (3a)$$

$$F_l = C_L(\alpha)qA, \quad (3b)$$

$$M = C_M(\alpha)qAL, \quad (3c)$$

で求められる。ここで、動圧  $q$  およびカプセルの断面積  $A$  は、カプセルの直径、長さをそれぞれ  $D$ 、 $L$ 、カプセルの相対速度を  $V$  とすると、

$$q = \rho V^2 / 2, \quad (4)$$

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (5)$$

となる。また、 $U$  を風の水平成分とすると、

$$V^2 = (U - dr/dt)^2 + (dz/dt)^2, \quad (6)$$

$$\alpha = \theta - \tan^{-1}[(U - dr/dt)/(dz/dt)] \quad (7)$$

という関係がある。

気球の質量、容積をそれぞれ  $m_b$ 、 $V_b$ 、気球の飛行制御のために必要となるコントロールゴンドラおよびパラスタの質量を  $m_s$ 、ヘリウムガスの質量を  $m_h$ 、カプセルの形状抗力、造波抗力、摩擦抗力をそれぞれ  $C_{Db}$ 、 $C_{Dw}$ 、 $C_{Df}$  で表すことにすると、軸方向の微小重力の質に影響を与える加速度の項は、

$$\text{加速度} \sim \left( 1 + \frac{m_b + m_s + m_h}{m_p} \right) \frac{C_{Db} D^2 + C_{Dw} D^2 + C_{Df} DL}{V_b} \quad (8)$$

のような関係がある。これより、微小重力環境の質を高めるためには、以下の相反する条件を満足する必要がある。それは、より大きな容積の気球を使用し、しかも、気球の重量は軽くして、到達高度を高くする。カプセルの直径を小さくし、カプセルの重量は大きくすることにより、単位質量あたりの空気抵抗を小さくすることである。また、ピッチング運動が生じると、カプセルの重心周りの運動による加速度に加えて、カプセルの横滑りによる加速度が発生する。ピッチング運動の発生源としてはカプセル切り離し時の初期姿勢角度とその角速度、重心のずれ、降下中の擾乱が考えられるが、高度による風の水平成分の変化によるウインドシアによりカプセルの相対ピッチ角が変化することも問題となる。相対ピッチ角が生じると横の動揺モードと横滑り運動が発生し、加速度は軸方向と横方向の両方向に周期的に発生することになる。

### 3. 風洞試験

1983年の気球実験に使用した微小重力実験用カプセルのモデルを風洞試験および数値シミュレーションの検証のために用意し参照モデル (AL1) とした。その他のモデルは図3および表3に示すように全長  $L$  のカプセルの中間部分が断面形状の変化しない円柱状、前方は長さ  $L_f$  の回転放物面、後方は長さ  $L_a$  の回転楕円体の形状とした。各モデルの半頂角は参照モデルが25度、他のモデルは45度、26.5度、18.4度のいずれかとなっている。尾翼の後退角は参照モデルが30度、その他のモデルについては70度とし、その面積は過去の実験[1,2]等を参照して表3に示したような値とした。実験条件は、マッハ数が0.3~2、ピッチ角が±8度の範囲、レイノルズ数は

カプセル模型の直径を基準として 800,000~1,400,000 であった。

ピッチ角が 0 の場合に各モデルの空気抵抗係数のマッハ数による変化を図 4 に示す。参照モデルの後部にその直径に等しい長さ ( $L_a = D$ ) の回転楕円体形状部分を付加する (モデル AL 2) と空気抵抗係数はマッハ数 0.7 以下において 15~30%減少することがわかる。また、カプセル先端部の長さを変えずに放物面形状にする (モデル BL1) とマッハ数 0.6 以上において空気抵抗はかなり改善され 30~60%減少する。この半頂角を小さくするにつれてこの抗力係数はさらに小さくなる。また、尾部の  $L_a / D$  を大きくすることによりマッハ数 1 近傍までの抗

表 3. 風洞試験モデルの形状

モデル名	$D$ (mm)	$L/D$	$L_f/D$	$L_a/D$	半頂角 (度)	尾翼面積 (mm <sup>2</sup> )		
AL1*	46	4.2	0.95	0.0	25.0	380×4		
AL2		5.2		1.0				
BL1	46	4.2	1.0	0.0	45.0	380×4		
BS4		5.3		3.0		700×4		
CL1	46	5.2	2.0	0.0	26.5	380×4		
CN2		4.2		1.0				
CS2		5.2		1.0				
CS3		5.3		2.0				
CS4		6.3		3.0		700×4		
DL1		6.2		3.0		0.0	18.4	380×4
DS3		6.3				2.0		650×4
DN4		6.3				3.0		700×4
DS4	7.3	3.0						
DL4	8.4	3.0	3.0					

\*参照モデル

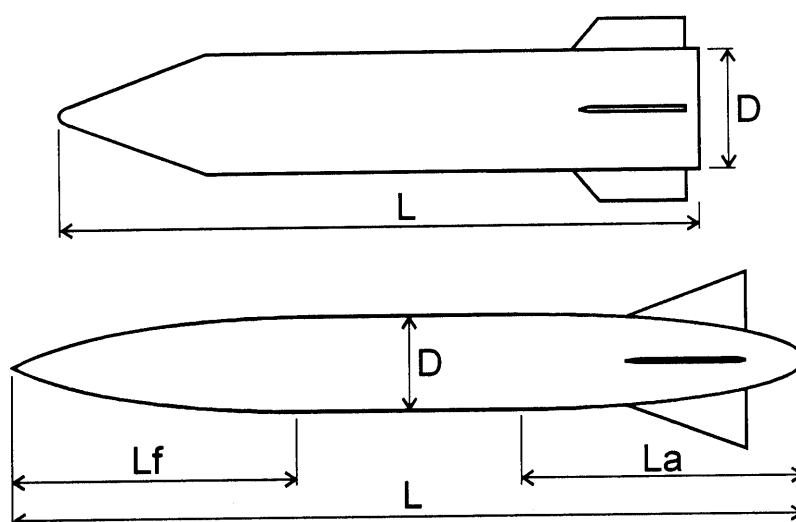


図 3. 風洞試験モデル.

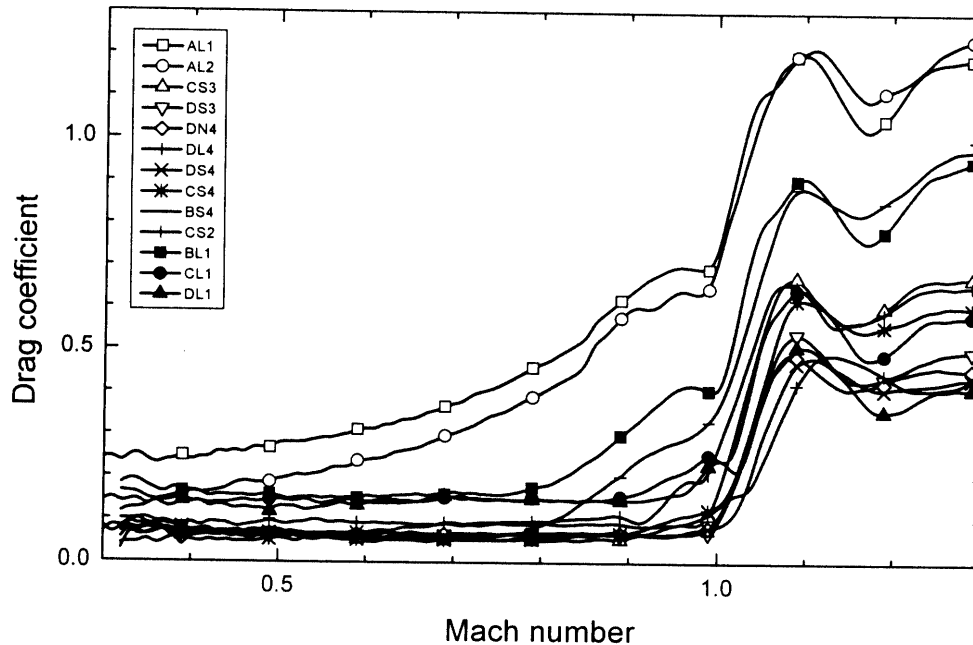
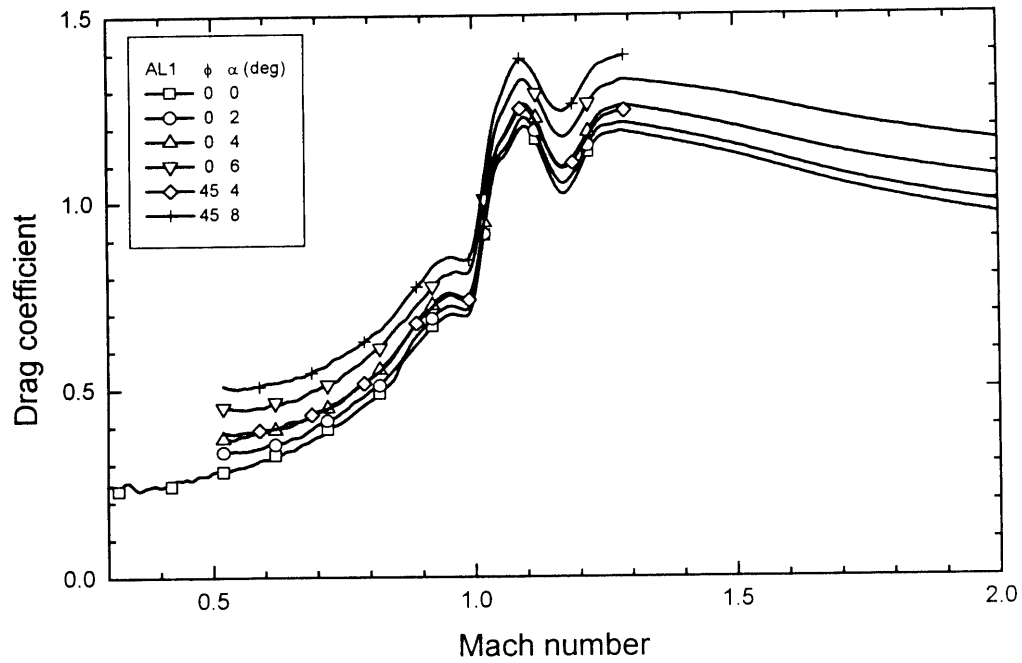


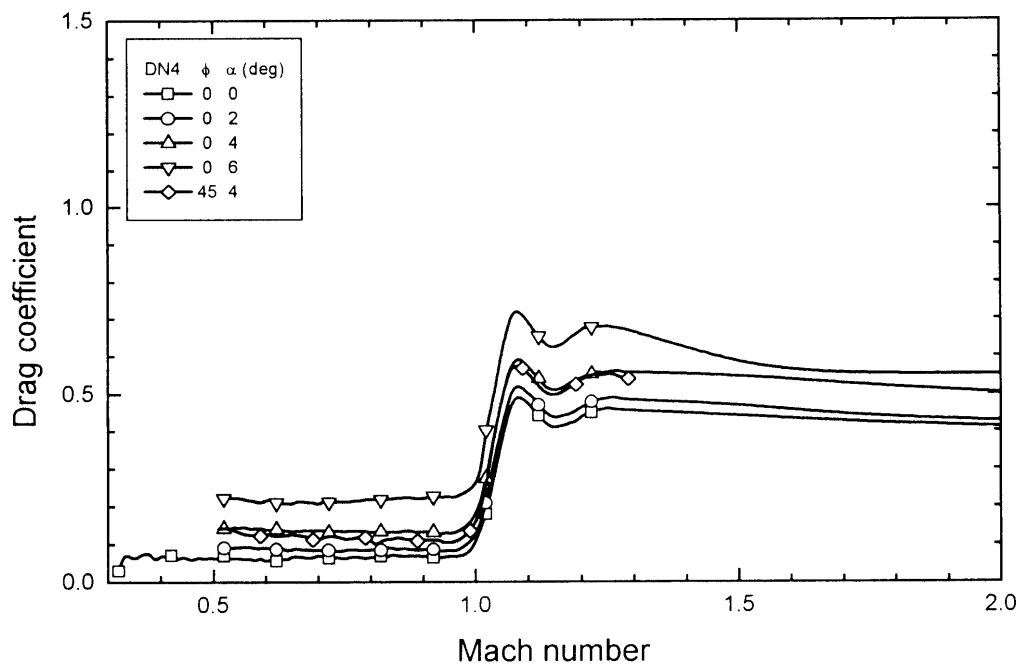
図4. マッハ数と抗力係数の関係, ピッチ角0

力を小さくすることが可能である。これらにより、マッハ数 0.9 以下における抗力係数は半頂角が 26.5 度以下ではマッハ数に対してほぼ一定値であり参照モデルに比べて非常に小さくなることがわかる。このような形状のカプセルを使用することで 25 秒以上の微小重力は十分達成できるものと予想される。さらに、30 秒以上の微小重力を達成するためにはマッハ数 0.95 以上における急激な抗力の上昇を減らさなければならないが、これはかなり困難である。ほとんど変化しない重力加速度に対して落下速度は時間に比例して増加するため、落下速度の 2 乗に比例する抗力の絶対値としての減少はあまり期待できない。

図5は抗力係数のピッチ角による変化を示したものである。参照モデルの場合、ピッチ角0における抗力係数が大きいため、ピッチ角の増加にともなう抗力係数の増加率は小さいが、モデル DN4 のようなピッチ角0における抗力係数が小さい場合には、ピッチ角が増えるにしたがって急激に抗力係数が大きくなることがわかる。ここで、 $\phi$  は模型のロール角を表しており等間隔に配置された4枚の尾翼のうち2枚がピッチ角方向と平行の場合を0度としている。ピッチ角が2度になると抗力係数は0度の場合に比べて20~30%の増加となり、4度になると2倍程度にまで増加する。したがって、カプセルの降下中のピッチング運動に伴うピッチ角の最大値を小さくすることが非常に重要となる。特にマッハ数 0.95 以上の遷音速、超音速領域においては、ピッチ角の最大値が減少しないと微小重力環境の質が非常に悪くなると考えられる。図6はピッチ角0における揚力係数とピッチングモーメント係数の傾斜とマッハ数の関係を示したもので、両者とも基本的にはマッハ数1から離れるにしたがって大きくなる傾向がある。また、その絶対値はカプセルの全長が長くなるにつれて大きくなる傾向があるが、これは尾翼の位置や面積を変更することにより調整することが可能である。



(a)



(b)

図5. マッハ数と抗力係数の関係；  $\alpha$  : ピッチ角,  $\phi$  : ロール角； (a)試験モデル AL1, (b)試験モデル DN4



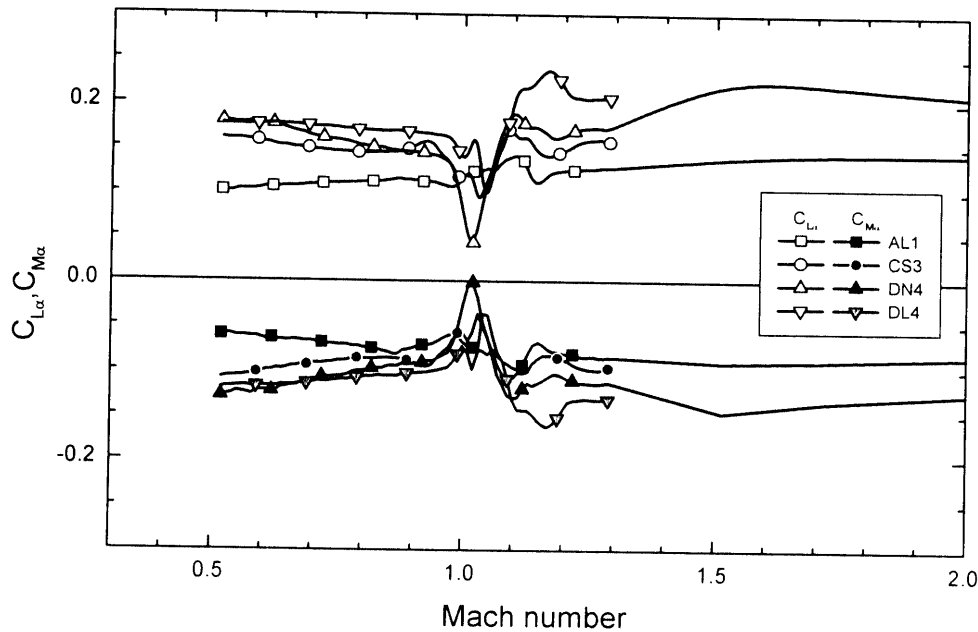


図6. ピッチ角0における揚力係数傾斜とモーメント係数傾斜のマッハ数による変化

#### 4. 数値シミュレーション

以上の風洞試験の結果を用いて、それぞれのカプセルを実機として落下させた場合の降下運動を数値シミュレーションした。まず、過去の大気球実験による落下カプセルの結果と比較することによりこのシミュレーションの妥当性の検証を行った。落下カプセルの直径と重量を1983年の落下カプセルと同一とし、気球はB50（容積 $50,000\text{ m}^3$ ）を用いる。与えられた条件より気球の到達高度を求め、その位置より落下カプセルを標準大気中で落下させるものとする。式(1)をルンゲクッタ法により積分することにより、カプセルの高度と加速度の時間変化を求めた。ただし、レイノルズ数は降下中に大きく変化するため、実際のレイノルズ数に合わせた摩擦係数による摩擦抵抗分を空気抵抗に上乘せすることにより空気抵抗係数を補正した。その結果を図7の白抜き記号を伴った線で示した。実線はピッチ角が0の場合を示しており、微小重力レベルの時間変化の上限を表している。実際には、ピッチ角が0でないためこれより悪い値すなわち大きい微小重力レベル値となる。このカプセルの微小重力レベルの時間変化をピッチ角が4度の場合について計算した結果を図7中の破線で示してある。参照モデルについての計算結果を1983年の実機による実験（図7に※印で表示）と比較するとピッチ角4度の場合と良い一致を示しており、風洞試験で得られた結果およびカプセル降下運動の数値シミュレーションは妥当であることがわかる。微小重力レベル $0.01\text{g}$ に到達するまでの時間18秒も実機の場合と一致している。この時の実際のピッチ角は10秒経過時に約5度、20秒経過時に約2.7度であった。このピッチ角4度で計算した微小重力レベルの持続時間を $0.01\text{g}$ のところで見ると、参照モデルの18秒からモデルCS3では27秒、モデルDN4では28秒となっている。モデルDL4になると25秒と逆に短くなっているが、これは、カプセルの直径、重量を同一にしたため、相対的に空気抵抗が大きくなっているためである。また、使用する気球をB150（容積 $150,000\text{ m}^3$ ）にすると、同一レベルの微小重力の持続時間はモデルにもよるが、1～3秒程度長くなることが図7よりわかる。

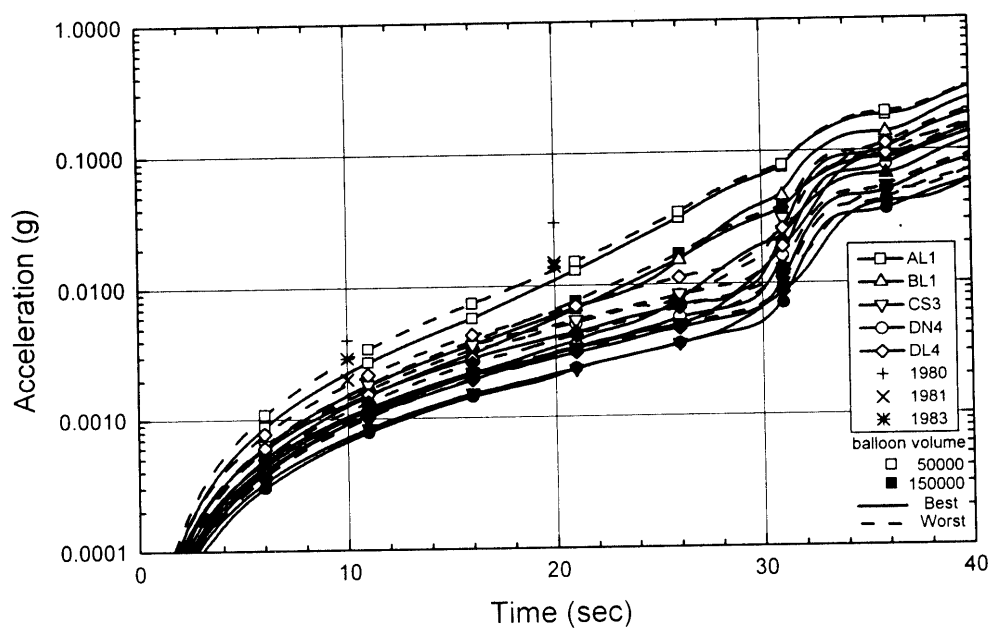


図7. 微小重力実験用落下カプセル内の微小重力レベルの時間変化；実線：相対ピッチ角0度，破線：相対ピッチ角4度

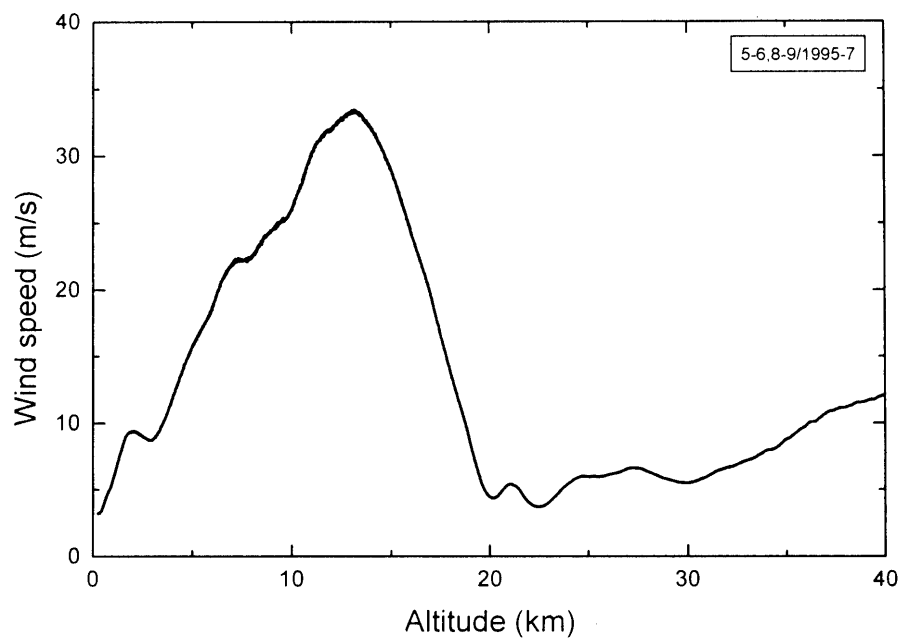
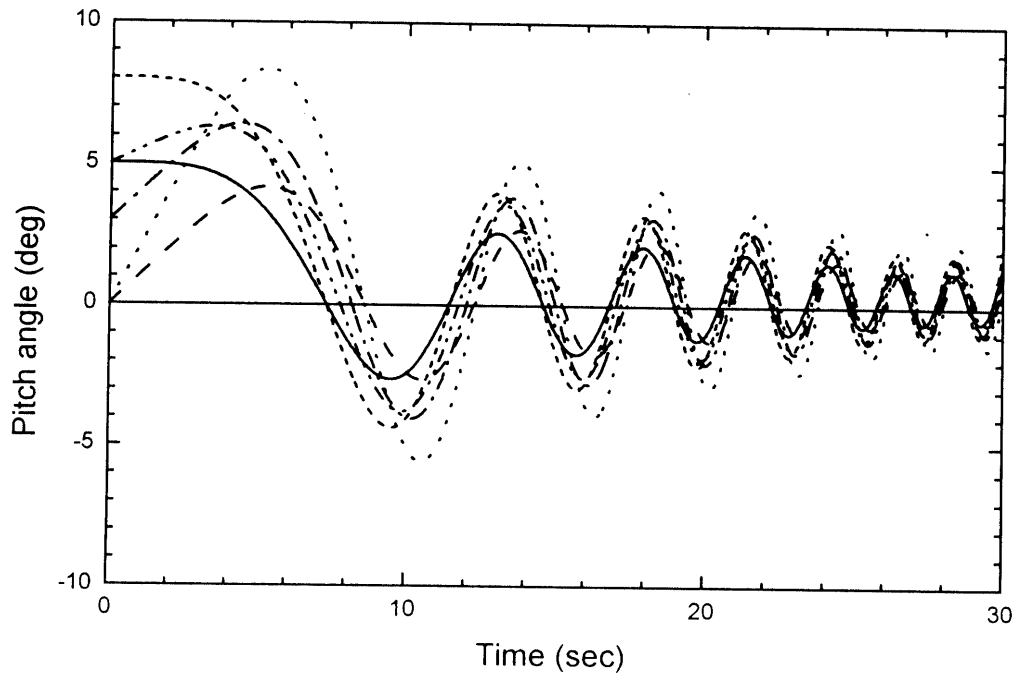
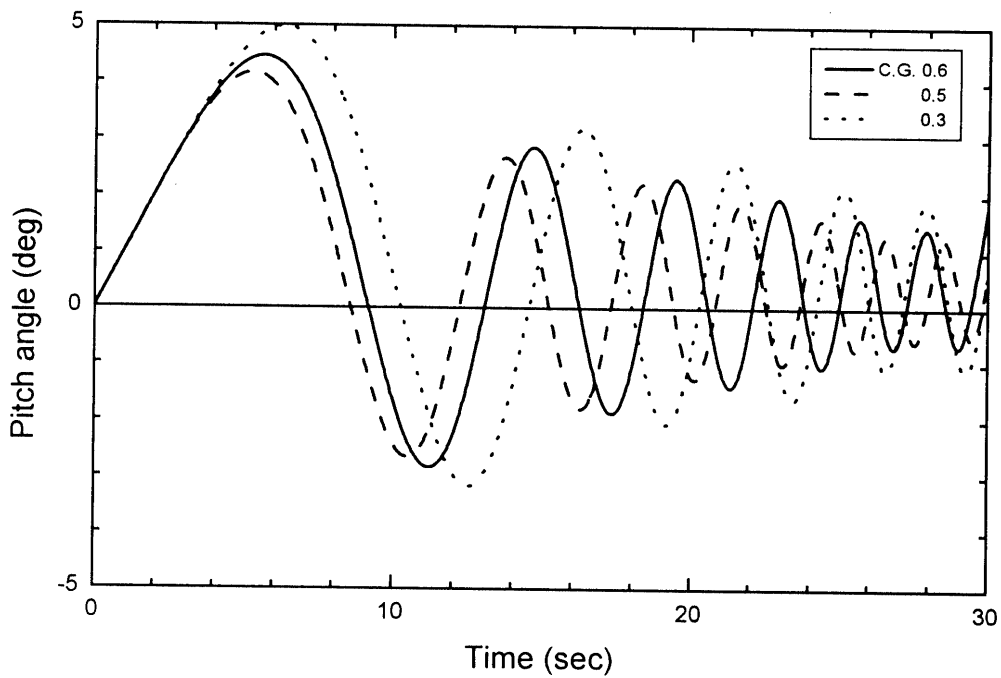


図8. 三陸上空の平均風速の高度変化



(a)



(b)

図9. 計算条件を変えた場合のピッチ角の変動；(a)落下開始時の姿勢角とその角速度を変えた場合，(b)カプセルの重心位置を変えた場合

次に、より具体的な条件を入れ、ピッチング運動を考慮し、実機を想定した数値シミュレーションを行った。実験期間中の三陸近辺における上層風の強さの高度変化を1995年から1997年まで平均した結果を図8に示す。高度20kmまではジェット気流により風速の変化が大きいがこれ以上の高度における風速の高度変化は比較的ゆるやかである。以降の数値シミュレーションでは、この風の強さを式(6)における風の水平成分 $U$ とみなして計算を行った。

検討の条件としては、微小重力レベル0.01gに到達するまでの時間を比較することとし、三陸大気球観測所における実験を前提にする。すなわち、打ち上げ時のカプセル重量 $m_p$ が400kg以下、使用する気球の容積は150,000m<sup>3</sup>以下、コントロールゴンドラ、パラシュート、バラストなどのカプセルを除いたペイロード重量は実機で想定される量を積算して求めた。また、カプセルの全長は2.55mに固定、カプセルの直径は0.135~0.52m、実験終了高度はウインドシアの小さい20km以上、カプセルの平均比重は0.7~3.0とした。ただし、比重が1以上の場合はフロートの放たまたはカウンターウエイト投棄などによる回収手段の検討が別途必要となる。

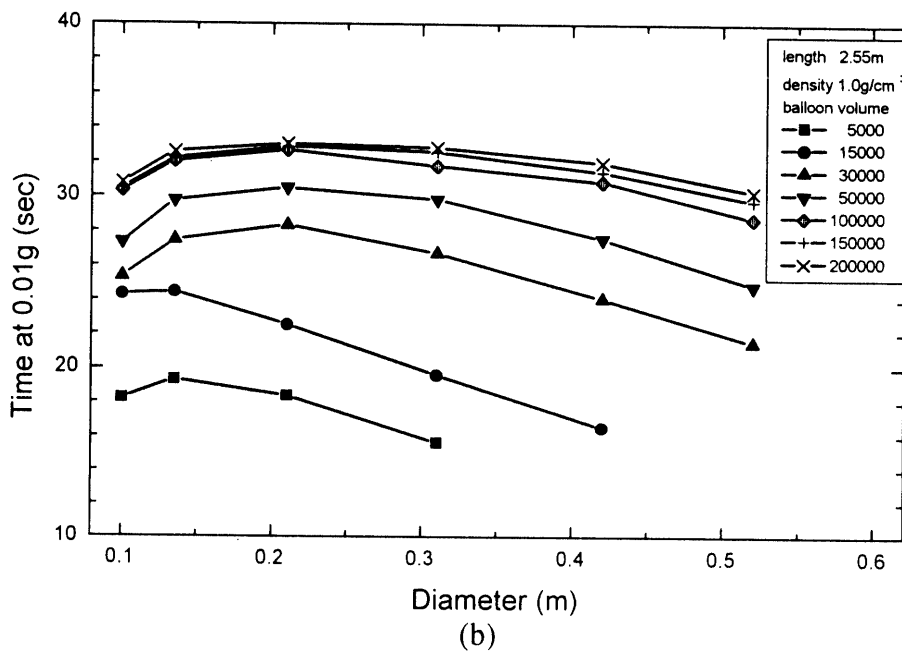
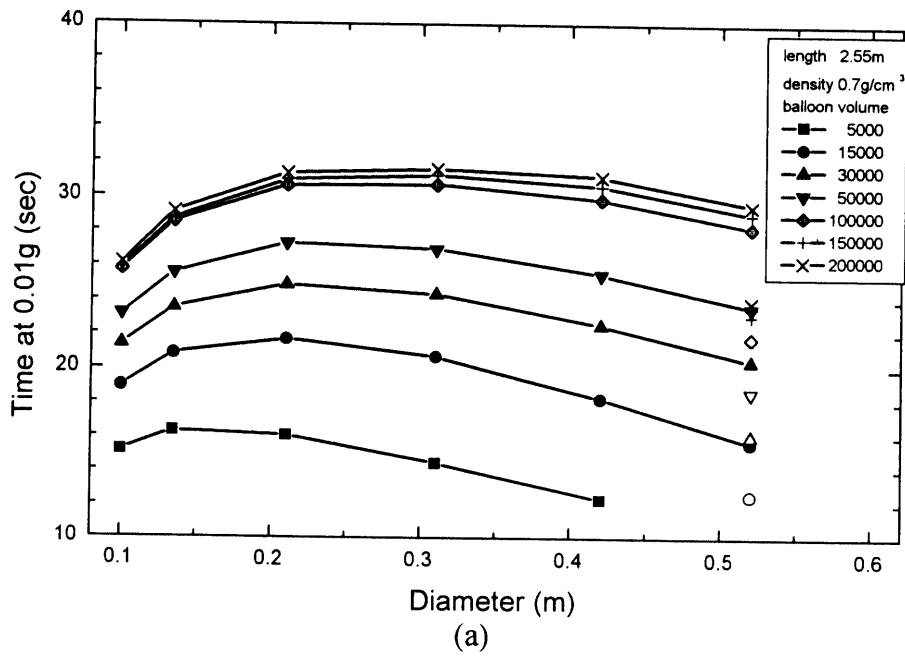
落下開始時の初期条件であるピッチ角を0~5度の範囲、その角速度を0~4度/秒の範囲で変えて、その後のピッチ角の変動を計算した結果が図9(a)である。初期条件によってピッチ角の振幅の大きさは異なるが、周期を重ねるにつれどの場合も振幅の大きさはだいに小さくなる。また、図9(b)はカプセルの重心の位置を変えた場合のピッチ角の時間変化を示しており、一般的に重心を風圧中心に近づけるにしたがって周期は短くなる傾向にある。前節においてピッチ角の振動は最初の周期を除いて最大4度であると仮定したが、参照モデルによる計算結果を実際の結果と比較することによりこの仮定が妥当であることは確認されている。したがって、数値シミュレーションの初期条件として、落下開始時における姿勢角 $\theta_0$ 、その角速度 $(d\theta/dt)_0$ をそれぞれ5度以下、4度/秒以下の組み合わせで複数回の計算を行い、最も悪い結果をそのモデルによる数値シミュレーションの結果として採用した。カプセルの形状はモデルDN4をベースに平行部分の長さを変えたものを想定し、モデルDS4、DL4の結果とから補間を行い空気抵抗を計算した。カプセルの長さの直径に対する比が小さい場合には、モデルCS3、CN2の試験結果を用いた。

## 5. 計算結果の考察

### 5.1 微小重力の持続時間

図10は長さ2.55m、比重0.7~2の落下カプセルが微小重力レベル0.01gに到達するまでの時間をカプセルの直径と使用する気球の容積を変化させて表示したものである。図10(a)における白抜きの記号は参照モデル(1983年の実験機)の場合を示している。同一の気球を使用した場合に微小重力のレベルが0.01gに到達するまでの時間が最大となるカプセルの最適直径が存在する。また、この最適直径は気球の容積を増すにしたがって大きくなることがわかる。カプセルの比重を変えた場合の結果を比較すると、カプセルの比重を大きくするにしたがって微小重力環境の持続時間は当然長くなるが、その最大値を与えるカプセルの直径は小さくなる傾向があることがわかる。カプセルの直径を小さくして比重を大きくすれば微小重力の持続時間は長くなるが、比重を1より大きくする場合には、回収のために海に浮くようにフロート放出機構を装備する、カウンターウエイトを投棄するなどの細工が必要となる。

図11には横軸にカプセルの比重をとってカプセルの直径を0.135~0.42mで変化させた場合について微小重力レベル0.01gに到達するまでの時間の変化を示した。カプセルの直径が大きい場合はカプセルの比重を大きくしても微小重力環境の持続時間はあまり増加しないが、直径を小さくする場合には、特に大容積の気球を使用することにより、持続時間が急に増加することがわかる。このことは、マッハ数1.1近傍における抗力係数の急激な増加に対抗するためにはカプセルの直径を小さくし、比重を大きくする必要があることを意味している。



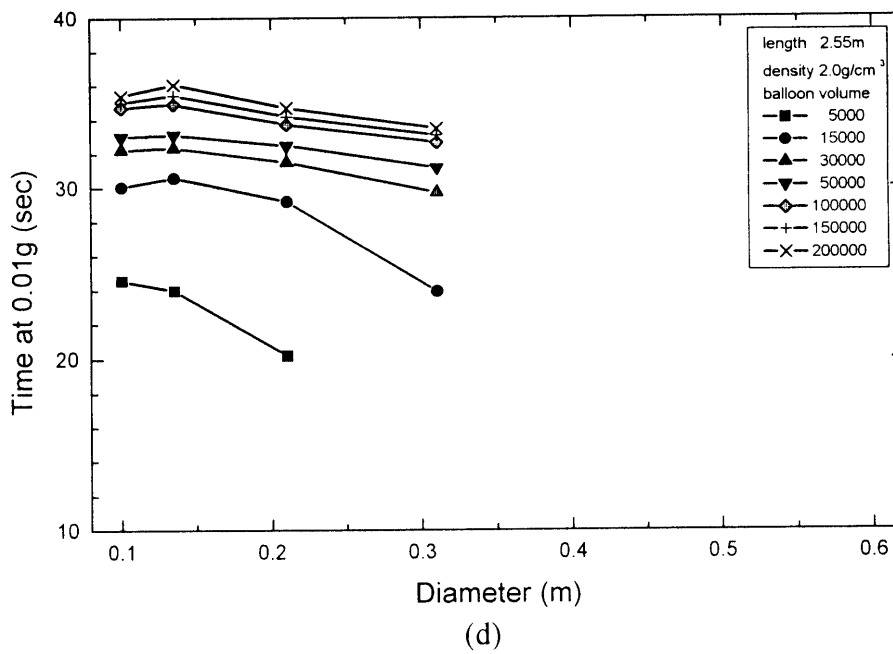
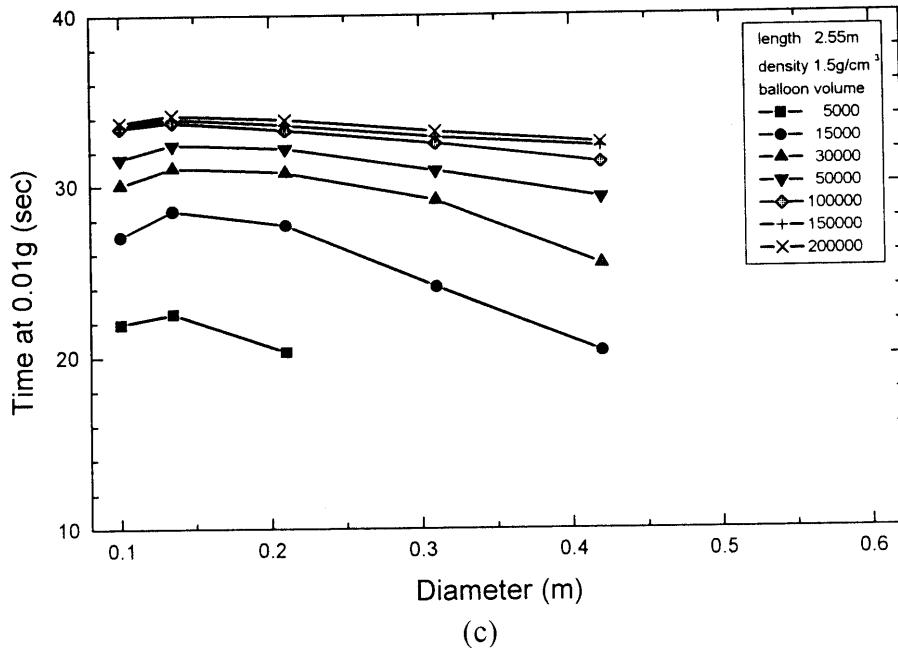
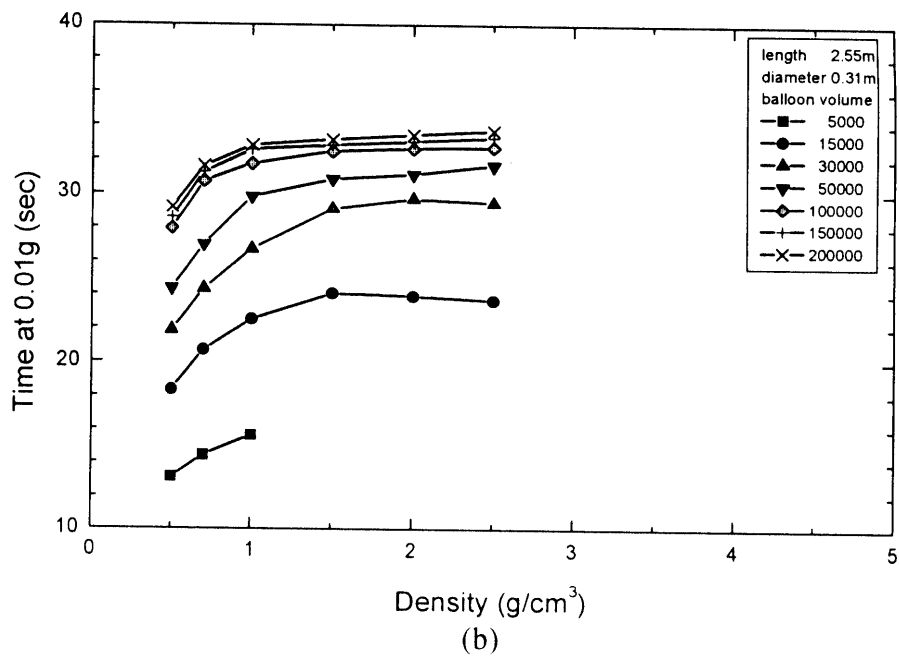
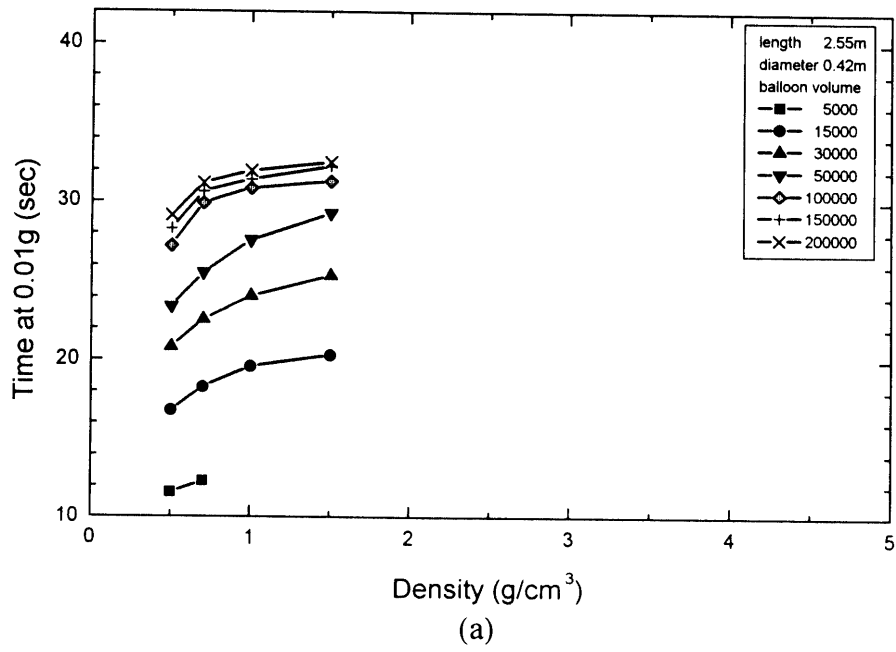


図 10. 全長 2.55m の微小重力実験用カプセルの直径と微小重力レベル 0.01g に到達するまでの時間の関係;カプセルの比重:  
(a) 0.7, (b) 1.0, (c) 1.5, (d) 2.0



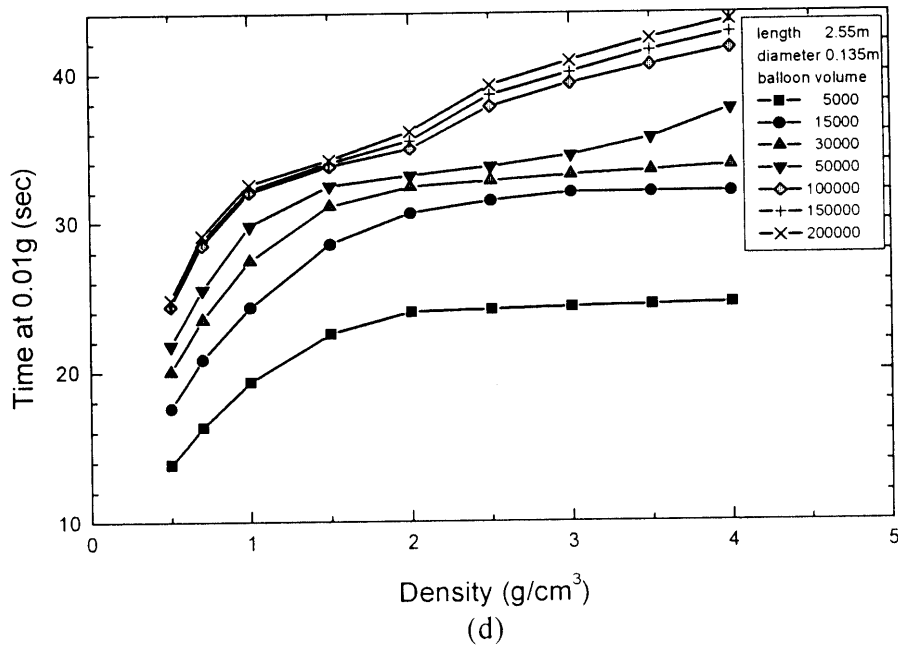
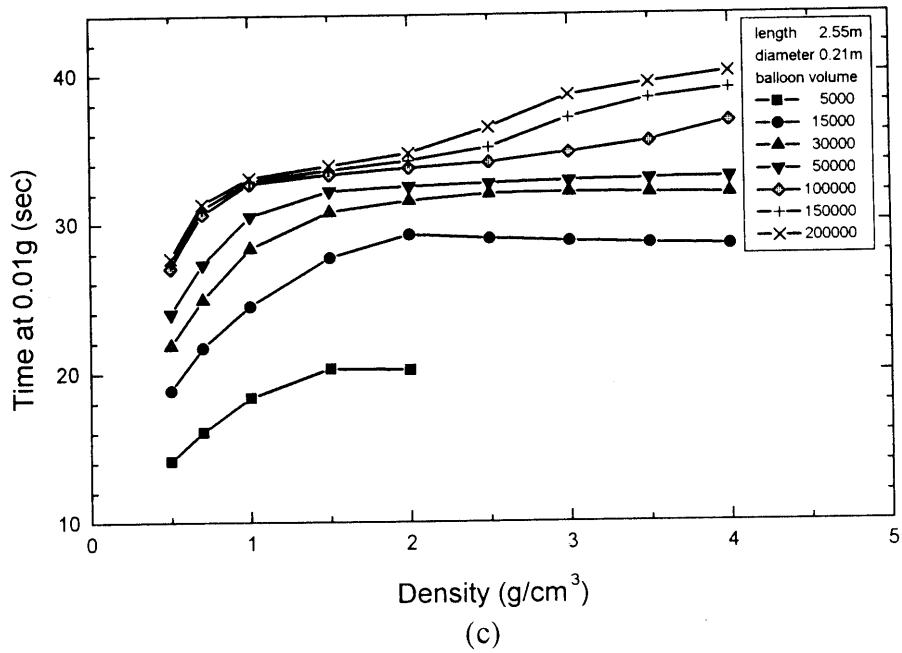


図 11. 全長 2.55m の微小重力実験用カプセルの比重と微小重力レベル 0.01g に到達するまでの時間の関係;カプセルの直径:

(a) 0.42m, (b) 0.31m, (c) 0.21m, (d) 0.135m



## 5.2 加速度の変動

落下カプセルに発生する加速度は実際には周期的に変動し、時間的にもカプセル内部の位置によっても微小重力環境の質が異なる。いくつかの場合について加速度の時間変動を図12に示す。図中の実線は軸方向の微小重力レベルの時間変化、破線はカプセルの重心の軸に垂直な方向の加速度のレベルを示している。また、点線はこの重心からカプセルの直径の半分だけ離れた点における重心周りの加速度の変動を表している。一点鎖線はこれらを総合して、重心からカプセルの前方に向かってカプセル全長の10%だけ離れた点における微小重力レベルの変動の絶対値を表しており、実際の搭載実験装置の位置において期待される微小重力のレベルを示している。横方向の加速度のピークはその時の鉛直方向の加速度に近い値となっているが、これはカプセルのピッチング運動の結果生じるものである。図12(b)に示すようなこの横方向の加速度のピークが軸方向の加速度の変動と同程度発生するケースはかなり存在する。しかし、同時にピッチング運動による重心周りの加速度も生じており、重心より前方ではこれらが互いに打ち消しあって横方向の加速度が小さくなる領域が存在することがわかる。したがって、実験・観測装置を設置する位置にも十分な注意が必要である。計算結果からは、重心の10%程度前方の条件がどの場合にも比較的良好であることがわかった。

## 5.3 薄型高高度気球を用いた場合

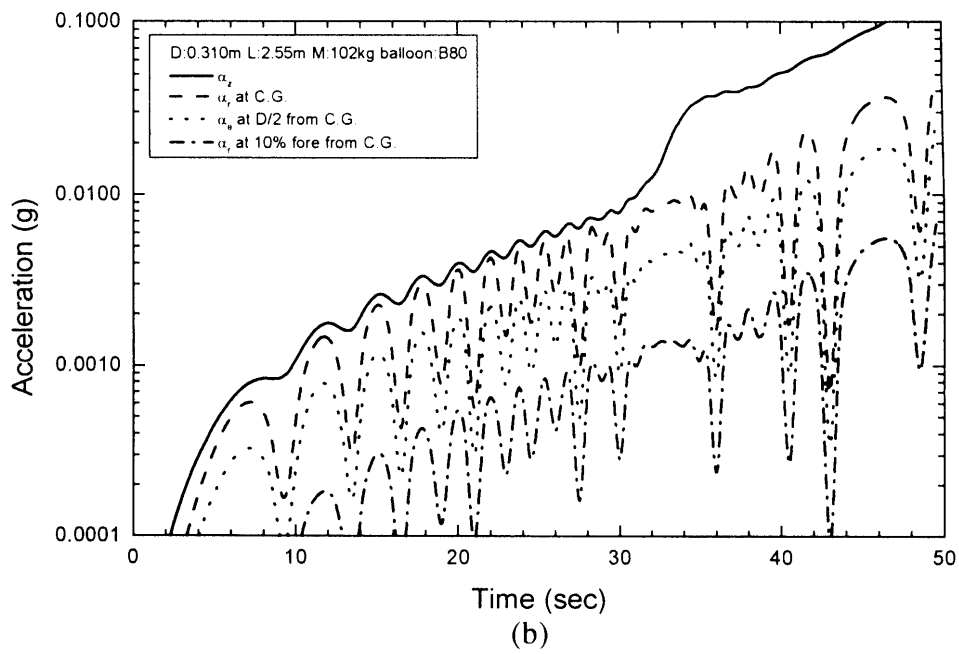
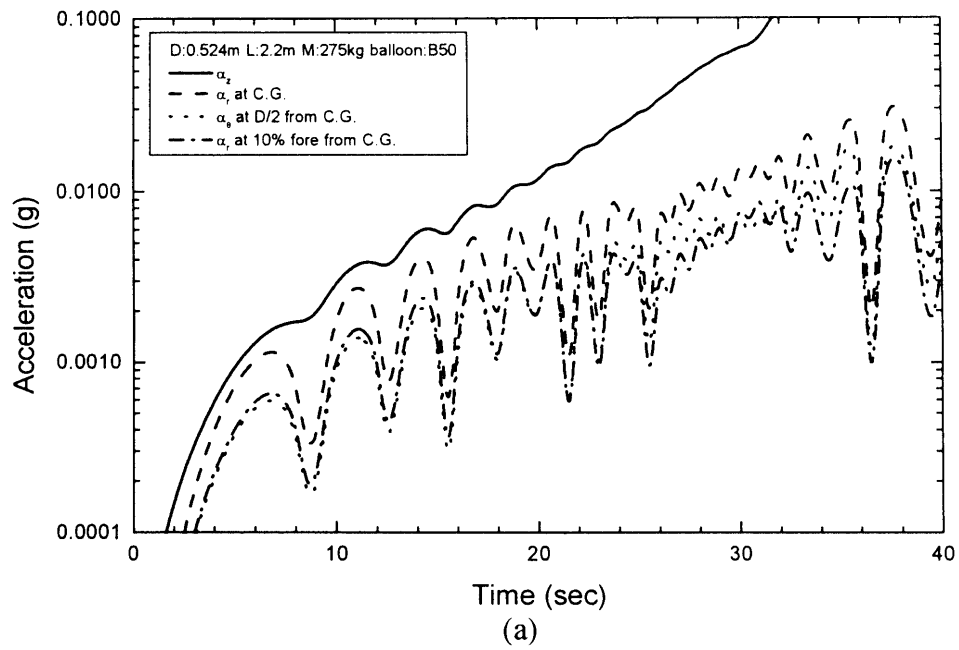
科学観測用気球には通常より薄いフィルムを使用した高高度気球[4]があるが、これらの気球を使用するとペイロードは非常に軽いものに限られるが高度42~46kmまで上がることが可能である。このような気球を使用した場合に微小重力環境がどの程度得られるかを示したのが図13である。これらの気球の最大ペイロードは10kgとなっているので、カプセルの直径を0.135mとし、その重量を9kgとした。その結果、BT15(容積15,000 m<sup>3</sup>)の薄型気球を用いてカプセルの比重を0.7とした場合にレベル0.01gの微小重力環境が22秒以上、気球をBT30(容積30,000 m<sup>3</sup>)とし、比重を1.3程度にすれば27秒以上のレベル0.01gの微小重力環境が実現可能であることがわかる。薄型高高度気球はコストの面でも打ち上げ頻度の点においても通常の気球に比べて非常に有利であるため、もしこのような軽量小型の実験装置を製作できれば予備実験等には十分なレベルの微小重力実験が可能と考えられる。

## 5.4 スラストの必要推力

これまで、スラストを使用しない場合を検討してきたが、40秒を越える微小重力環境を実現するためには、空気抵抗を打ち消す手段としてスラスト等により推力を与える必要がある。このスラスト等による必要推力 $T$ は、微小重力のレベルを $G$ とすると、

$$T = F_z - GM_p \quad (9)$$

で求められ、 $G=0.01g$ の場合と $G=0.001g$ の場合について計算した結果を図14に示す。これは、微小重力レベルを $G$ 以下に維持するために必要な推力値の時間変化を示したものである。この図よりレベル0.01gの微小重力環境を50秒維持するための推力は、直径0.21mのカプセルの場合に、落下開始後37秒における1Nから徐々に増加して50秒時点では50N必要となる。カプセルの直径が0.42mになると落下開始後31秒時点の3Nから50秒時点の250Nまで増加させる必要がある。また、微小重力環境の質は推力の各瞬間値によって決まるため、推力の精度も要求される。微小重力レベルが0.001gの場合にはカプセルによって異なるが落下開始後10~20秒の間にスラストをスタートさせ徐々に推力を上げていき最終的には微小重力レベル0.01gの場合より大きな推力が要求される。また、推力の精度も0.1N程度が要求される。いずれの場合も30~35秒にかけて推力を急増させる必要がある。あわせてピッチング運動による微小重力環境の劣化を防ぐためにピッチング運動のアクティブな制御も行う必要があると考えられる。



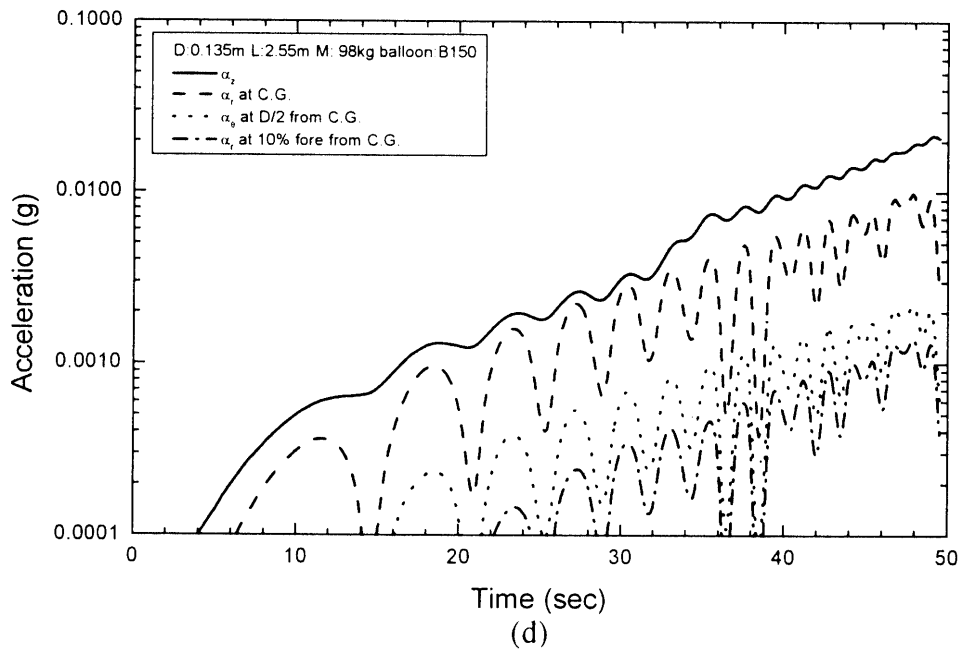
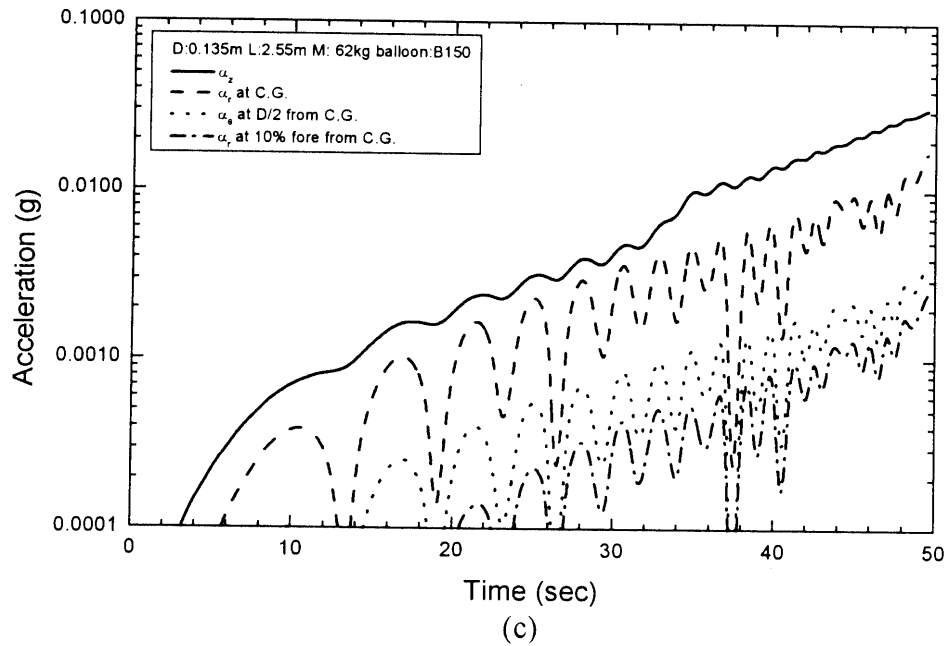
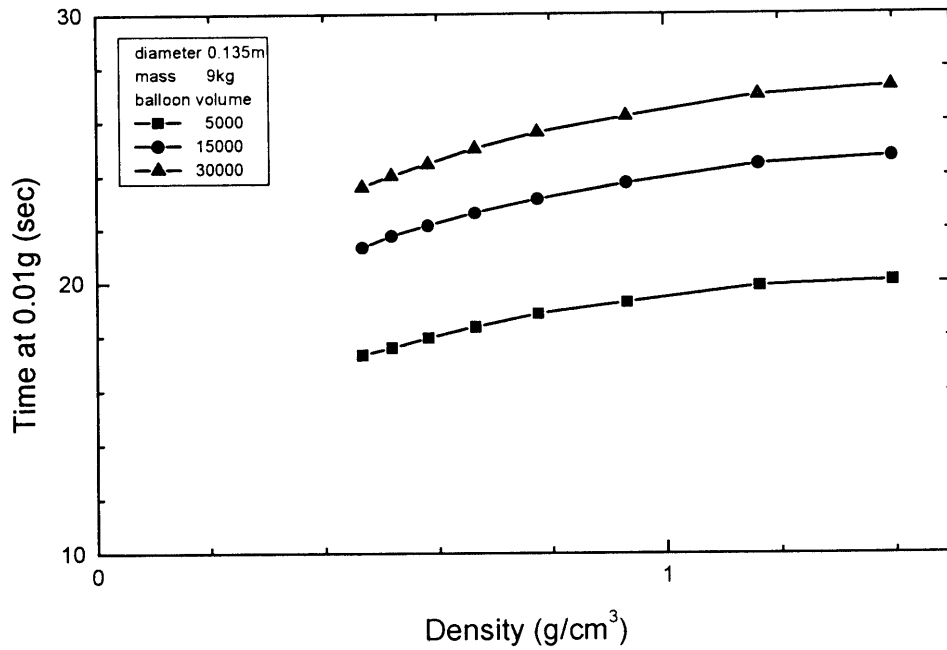
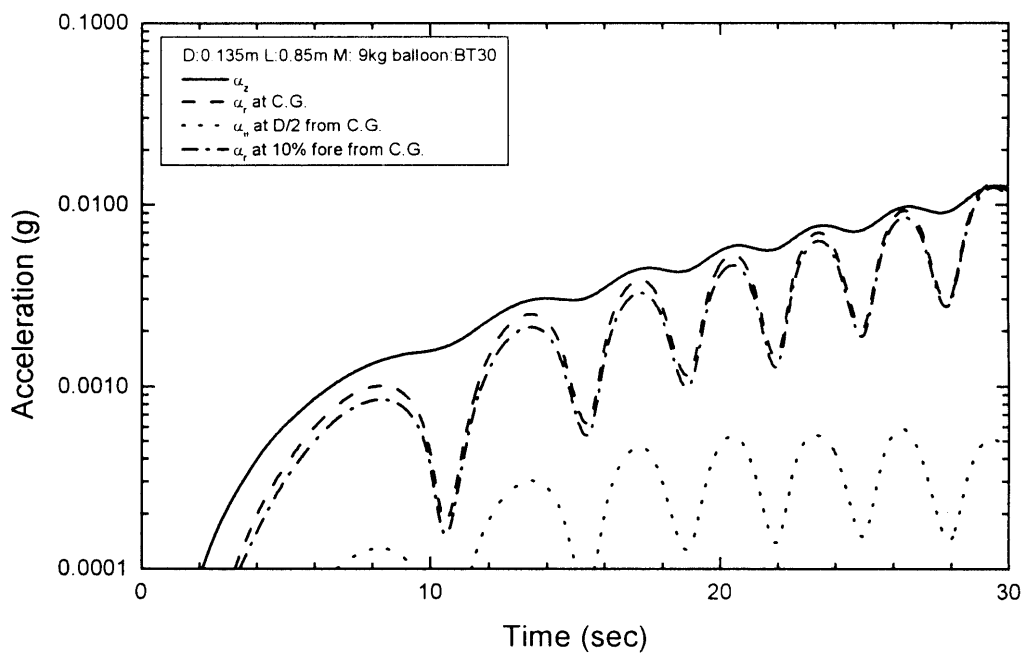


図 12. 微小重力実験用カプセル内の微小重力レベルの時間変動；実線：鉛直方向の微小重力レベル，破線：カプセル重心における水平方向加速度，点線：カプセル重心からカプセルの半径だけ離れた位置におけるピッチ角方向の加速度，一点鎖線：カプセル重心よりカプセル全長の 10% 前方位置における水平方向加速度；(a) 参照モデル，直径 0.524m，全長 2.2m，重量 275kg，気球容積  $50,000\text{m}^3$ ，(b) 直径 0.31m，全長 2.55m，重量 102kg，気球容積  $80,000\text{m}^3$ ，(c) 直径 0.135m，全長 2.55m，重量 62kg，気球容積  $150,000\text{m}^3$ ，(d) 直径 0.135m，全長 2.55m，重量 98kg，気球容積  $150,000\text{m}^3$



(a)



(b)

図 13. 薄型高々度気球を使用した場合、直径 0.135m、重量 9 kg；(a) カプセルの比重と微小重力レベル 0.01g に到達するまでの時間の関係、(b) カプセル内の微小重力レベルの時間変化、実線：鉛直方向の微小重力レベル、破線：カプセル重心における水平方向加速度、点線：カプセル重心からカプセルの半径だけ離れた位置におけるピッチ角方向の加速度、一点鎖線：カプセル重心よりカプセル全長の 10% 前方位置における水平方向加速度

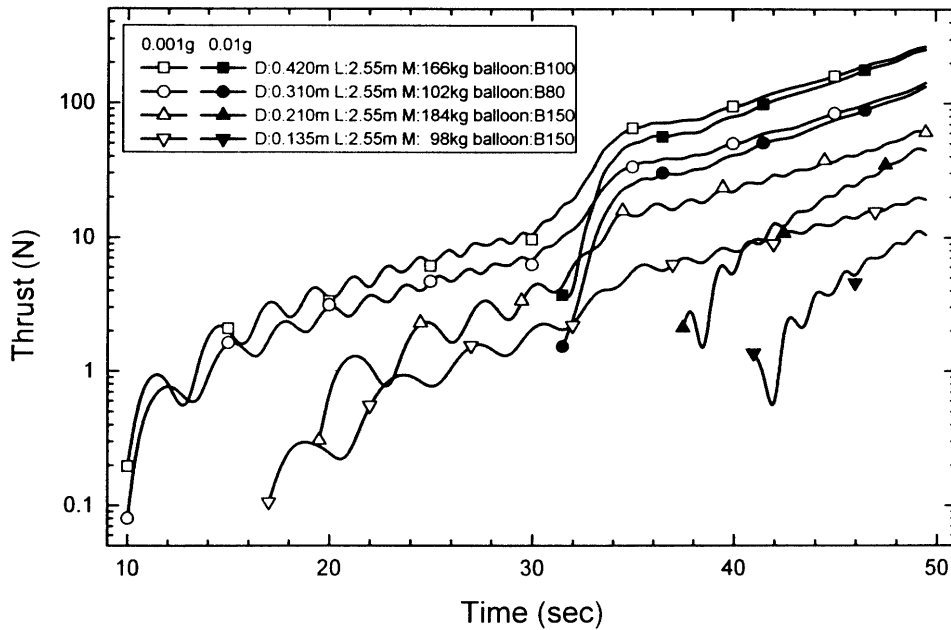


図 14. 微小重力環境を維持するために必要とする推力の時間変化

### 6. おわりに

大気中を落下する微小重力実験用落下カプセルの風洞試験を行い、大気球を用いた微小重力実験を行う際に実現可能な微小重力の質と持続時間、また、そのために要求される搭載機器の制限等を数値シミュレーションにより求めた。その計算結果をもとに実現可能な微小重力実験の構成をまとめたのが表4である。微小重力の持続時間を長くするためには、実験装置の小型化、特に直径を小さくすることが求められる。このような装置の小型、軽量化と回収手段の確立によりレベル 0.01g の微小重力環境を 35~40 秒間実現する可能性は十分にある。直径 0.4m、40kg の搭載装置の場合には約 30 秒の 0.01g、直径 0.125m、10kg 程度の装置では 35~40 秒の 0.01g の微小重力環境を実現することが可能である。今後、実機の製作にあたっては、カプセル尾部の形状変更に伴うパラ

表 4. 大気球による微小重力実験用カプセル

	微小重力レベル 0.01g を越えるまでの時間 (sec)	カプセル				使用する気球の容積 (m <sup>3</sup> )	ペイロード (電源を含まない) 寸法, 重量
		直径 (mm)	全長 (mm)	重量 (kg)	体積 (m <sup>3</sup> )		
通常気球	25 以上	520	2550	253	0.361	80,000	0.5mD×0.6m, 40kg
		420		166	0.237	50,000	0.4mD×0.6m, 40kg
	30 以上	420		166		80,000	
		310		102	0.146	80,000	
	35 以上	210		184	0.074	150,000	0.2mD×0.5m, 20kg
		135		62	0.033		0.125mD×0.5m, 10kg
40 以上	135	98					
薄型気球	22 以上	135	1130	9	0.012	15,000	0.125mD×0.25m, 2.5kg
	25 以上		850		0.008		
	28 以上						

シュートの放出機構，必要に応じてフロートの放出またはカウンタウエイトの投棄等，海上回収手段の検討を要する。また，重心の位置と観測・計測器の位置，尾翼の位置，形状，大きさと揚力，ピッチングモーメント係数の関係についてさらに詳しい解析，試験を行っていく必要がある。

#### 参 考 文 献

- [1] 並木道義，太田茂雄，秋山弘光，山上隆正，粕 豊，西村 純：大気球による無重力実験，宇宙科学研究所報告，特集 4，27-46，1982.
- [2] 並木道義，太田茂雄，秋山弘光，山上隆正，粕 豊，西村 純，広澤春任：大型実験体による無重力実験，宇宙科学研究所報告，特集 11，21-33，1984.
- [3] 栗林一彦，福中康博，井筒直樹，並木道義，矢島信之：大気球からの自由落下低重力環境を利用した材料実験，平成 8 年度大気球シンポジウム，92-95，1997.
- [4] 山上隆正，太田茂雄，並木道義，松坂幸彦，西村 純：高々度観測用気球，宇宙科学研究所報告，特集 33，3-17，1996.