

新しい気球放球法のシミュレーション

井筒直樹^{*1}・矢島信之^{*1}

Simulation of a new static balloon-launching system

By

Naoki IZUTSU and Nobuyuki YAJIMA

Abstract: Several static balloon-launching procedures were numerically analyzed. A balloon and suspension are divided into small segments with mass and elasticity. They are influenced with drag force by motion and wind condition. Simultaneous differential equations of motion were integrated numerically. In the balloon ascent process from spool release to vertical position, a head wind follows a smooth ascent without shocks. A new static balloon-launching procedure is proposed. A payload is initially suspended from a cart on a inclined rail held on a launcher vehicle. Then, it begins to go up by free lift along the rail and is released at the end of the rail. The vehicle does not move during the launch, however the rail direction can be changed with wind condition. This method has the same effect as standard dynamic launching way. The results show the smooth launching with small acceleration of the payload in the wide range of wind conditions.

概要

気球の大型化に対応して新しい放球法が検討されているが、その解析手段として、気球の放球の数値シミュレーションを行なった。計算は、気球および吊り紐等を短い要素に分割して、各要素ごとの運動方程式を時間積分することにより行なった。その結果、跳ね上げローラーによる気球の完全立て上げでは向かい風の方が有利であることがわかった。また、ランチャーを動かさずにダイナミック放球法と同様の効果が期待される新しいスタティック放球法を提案している。 Gondola直上の吊り紐を斜めのレール上の台車に固定し、気球が完全に立て上げられた後に、風向きをあわせて台車を自走させる。台車は気球に引かれてレールを登り、レール端部で吊り紐が開放されて放球は終了する。この新スタティック放球法について計算した結果、従来の放球法とくらべて風に対する許容度が大きく、放球が非常になめらかに行われることが確かめられた。さらに、放球時の Gondolaの加速度を小さくすることが可能である。

1 はじめに

気球は、地上を離れば安定な飛翔を開始すると考えてよいが、そこに至るまでの、ヘリウムガスの注入から放球までのプロセスは必ずしも容易ではない。気球に全浮力を与える間、薄いフィルムでできた気球本体に部分

*1 宇宙科学研究所

的に大きな力が加わらないように地上に固定してガスを注入しなければならない。全浮力分のガスを注入しても、体積は気球全体積の数%程度であり、残りの部分は折り畳まれて数十cm幅の長い带状となっている。さらに、気球の終端からはパラシュート・吊り紐がのび、最後に観測装置を搭載した Gondola が取付けられる。これら、ガスが詰まった気球頭部から下の長さは、気球の大きさ等により異なるが、通常50mから時には100mを越える。どのような方法で、このような長い状態のものを立て上げ、最後に Gondola の衝撃が少なく安全に飛翔を開始させるかが、気球放球法の基本となる。その場合、地上の風が大きな障害となる。風が強い場合には、気球が大きく傾き Gondola を引き倒し、逆に、風が弱い場合にはランチャーに接触する。そこで、多少風が強くてもその影響を減らし、放球可能な条件の範囲を広げることが放球法の検討課題となる。

現在、米国を中心に広く世界的に行なわれている放球法は、ダイナミックランチング法である。これは、図1に示すように、ランチャーは移動可能な車両に取り付けられている。Gondola はランチャー先端のリリース機構よりつり下げられている。同図(a)のようにしてガスを注入した後、気球頭部を開放して気球全体を立て上げる。この時、ランチャーはあらかじめ風下となるように配置されている。気球が立上がり、ランチャーの頭上を通過する段階でランチャーは風下に向かって走行し、風の影響を相殺する。風に合わせて速度を調整し、気球頭部が若干 Gondola より前に位置するタイミング(b)で Gondola をリリースする。風の強さおよび方向の変化に対する許容範囲が広いことが利点である。また、たとえ一度放球のタイミングを失しても、ランチャーの走行で再び良い放球条件を作りだせる。難点は、広いフィールドを必要とすること、風が強い場合にランチャーの走行が危険なことである。後述するように、もしランチャーを走らせない方式を採用する場合には、それにかわるなんらかの方法で風の影響を減じなければ、放球可能な風の条件は著しく狭まることになる。

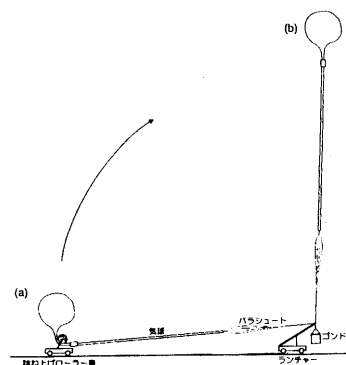


図1 ダイナミック放球法

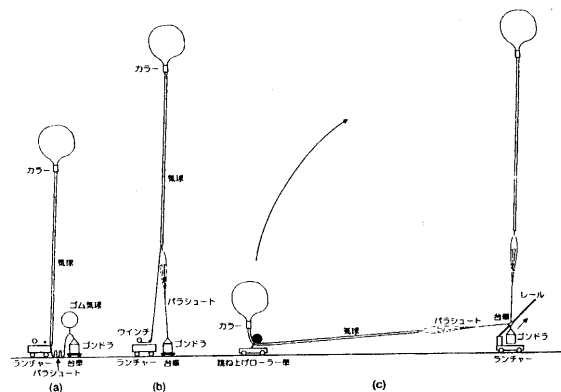


図2 気球の放球方法

(a) 立て上げ放球法 (b) 完全立て上げ放球法 (c) 新スタティック放球法

上記のダイナミック放球法に対し、我が国でここ約20数年行なわれているのが、図2(a)に示すスタティック放球法(立て上げ放球法 [1])である。ガスを注入する段階は同じであるが、その後、ローラを徐々に前進させ、ゆっくりと気球を立て上げ、最後に気球の尾部をランチャーに固定した状態で気球全体を立て上げ、ここで風の様子を見て放球条件を合わせる。ゴンドラはつり下げず、地上に置かれている。ランチャーは地上に固定しておいて動かさない。風の影響を減じる方策としては、気球尾部以降の地上に置かれている部分(吊り紐、パラシュート等)が一定の長さ(10から30m程度)をもっていることを利用し、ゴンドラを風下の方向に置いて合わせる。すなわち、ランチャーからリリースされた気球が吊り紐類を引き上げながら上昇し、最後にゴンドラを持ち上げる時、ちょうど真上にゴンドラが引き上げられるように、ゴンドラの位置を合わせておく。狭いフィールドから比較的大きな気球を上げることが可能であり、かつ気球は地上に固定されているため、放球の条件とタイミングを合わせることが容易であり、安全な放球が可能となる。ただし、難点としてはゴンドラを吊り上げる瞬間に大きなショックが発生すること、および気球が大きくなり、ランチャー上に立ち上がっている長さが大きくなると、風の傾きによる気球頭部の位置変化が大きくなるため、地上の吊り紐等を一杯にのばしても頭部の下までゴンドラを移動できなくなる。また、ゴンドラをつり下げた状態から放球しようとする、無風時に真上に上がって保持機構に当たる。こうした点から、この方式は中規模の実験には適しているが、規模が大きくなるとともに、放球可能条件が狭まる傾向を有している。

上記放球法の変形として、放球時の衝撃を緩和するため、補助ロープとウインチを用いて、吊り紐およびパラシュート部を放球前に引き上げておき、リリースした後すぐにゴンドラが引き上げられるようにした、完全立て上げ法 [2] (図2(b))も試みられている。この場合、ショックは大幅に減少するが、放球前の待機状態でゴンドラが風の影響を受けやすくなる。また、風がある場合に放球時の気球の振り子運動に伴うゴンドラと地面の接触が問題となる。これを防ぐには放球時にゴンドラの位置を高く保持すればよいが、風向きの問題もあり実際にはかなり難しい。また、気球の大型化にともない気球と吊り紐の完全立て上げ時の全長は120m以上になる。さらに、地上では2~3m/sの風も上の方では4~6m/sの風速になるのが普通である。

次に、スタティック放球法の利点を生かしながら、より大規模な気球実験にも適用可能な新しい放球方式として、次に示す助走路付放球方式を検討することとした。この原理は、図2(c)に示すように、ゴンドラにとって不安定な放球直後の上昇位置をガイドレールを設けて拘束し、一定の高度と上昇速度を与えてから完全にリリースして上昇させようとするものである。このようにゴンドラの初期の運動を拘束することにより、風に対する許容度を広げようというものである。実現可能な長さの助走路によって、ダイナミックランチングにおけるランチャーの走行と同様の効果が期待できれば、走り回らない分有効な方式となる。

本研究の目的は、各種放球方式の比較が数量的にできるよう、放球時の気球本体およびゴンドラの挙動を解析するシミュレーションプログラムを開発すること、およびそれを用いて、地上風の強さに対する放球可能条件を具体的に求めることにある。そうした評価結果をもとに、新しい放球法に対しても現段階の解析にもとづく評価を行う。

計算は、跳ね上げローラーによる気球の完全立て上げ過程、立て上げ放球法、および完全立て上げ放球法について行なった。さらに、新スタティック放球法についての計算を行ない従来の方法との比較を行なった。

2 計算方法

2.1 計算上の仮定

計算は二次元で行ない、水平方向に一様な風があるとする。ガスが未充填の気球後半部分および吊り紐の部分は柔軟な連続体であるが、このままでは扱い難いため、小さい要素に分割して各要素に対する運動方程式を立てた。カラーを常に装着した状態を想定し、頭部の形状は変わらないとする。要素に分割された気球後半部と吊り紐等は、張力を

受け持つ質量がなく大きさをもつ索と、運動を受けもつ質点で構成されるとする。加速度運動に対する空気抵抗は、定常流中の空気抵抗係数を適宜変化させて計算し、仮想質量を導入する。弾性については、縦弾性係数のみを考え、索は自由に曲がるものとし、たるんだら張力は0とする。ゴンドラの回転・傾きは無いとする。新スタティック放球法では、ランチャーのレール上の台車や摩擦は考えないが、レールにそった一定値の押し上げ力を付加できるものとする。

2. 2 運動方程式

各要素の重心の座標を (x_i, z_i) 、角度を θ_i 、質量を m_i 、仮想質量を \tilde{m}_i 、空気力を (F_{xi}, F_{zi}) 、張力を T_i 、反力を (R_{xi}, R_{zi}) とする。また、頭部慣性モーメントを I_0 、頭部半径を r_0 、浮力を B とする。気球頭部の運動方程式は、

$$(m_0 + \tilde{m}_0) \frac{d^2 x_0}{dt^2} = F_{x0} - T_1 \cos \theta_1$$

$$(m_0 + \tilde{m}_0) \frac{d^2 z_0}{dt^2} = F_{z0} - T_1 \sin \theta_1 + B - m_0 g$$

$$I_0 \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} = -r_0 T_1 \tan(\theta_1 - \theta_2)$$

カラ一点においては、

$$x_1 = x_0 - r_0 \cos \theta_1$$

$$z_1 = z_0 - r_0 \sin \theta_1$$

$$T_1 = T_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

なる関係がある。N個の要素からなる気球後半部・吊り紐等の各要素 (i) およびゴンドラ (e) の運動方程式は、

$$(m_i + \tilde{m}_i) \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{xi} - T_i \cos \theta_i - T_{i+1} \cos \theta_{i+1} + R_{xi}$$

$$(m_i + \tilde{m}_i) \frac{d^2 z_i}{dt^2} = F_{zi} - T_i \sin \theta_i - T_{i+1} \sin \theta_{i+1} - m_i g + R_{zi}$$

$$m_e \frac{d^2 x_e}{dt^2} = F_{xe} + T_e \cos \theta_e + P \cos \alpha + R_{xe}$$

$$m_e \frac{d^2 z_e}{dt^2} = F_{ze} + T_e \sin \theta_e - m_e g + P \sin \alpha + R_{ze}$$

ここで、 α はランチャーレールの仰角、 P はレールにそって付加された補助力による項である。また、索の長さを l_i とすると張力は、

$$T_i = \begin{cases} E_i S_i \frac{l_i - l_{oi}}{l_{oi}} + C_i \frac{d l_i}{dt} & (l_i \geq l_{oi}) \\ 0 & (l_i < l_{oi}) \end{cases}$$

で表される。ここで、 E_i は縦弾性係数、 S_i は断面積、 C_i は減衰係数、 l_{oi} は索の自然長さである。

2. 3 計算条件

ゴンドラは一辺が2 mの立方体で、吊り高さは2 mとし、質量は標準的な500kgおよび極端な場合として200kg、1000kgの3種類とした。使用気球はB100を想定し質量は230kg、自由浮力は10%とした。吊り紐等の全長は25 mとし、質量はゴンドラの軽いほうから順に13kg、20.5kg、33kgとした。このときの総浮力はそれぞれ487kg、826kg、1389kgとなる。気球の $E_i S_i$ は $5 \times 10^5 \text{N}$ とし、吊り紐等の $E_i S_i k_i$ はそれぞれ $6 \times 10^4 \text{N}$ 、 $1 \times 10^5 \text{N}$ 、 $1.7 \times 10^5 \text{N}$ とした。気球頭部垂直方向、水平方向、気球尾部、吊り紐、ゴンドラの空気抵抗係数はそれぞれ0.4、0.6、0.8、1.2、1.0とした。新スタティック放球法のランチャーレールの長さは5 m、仰角は45度とした。以上の条件のもとで、跳ね上げローラーによる完全立て上げ過程、従来の立て上げ放球法、完全立て上げ放球法、および新スタティック放球法について風速を12m/sまでの範囲で計算を行なった。

3 結果

3. 1 跳ね上げローラーによる気球の完全立て上げ

図3は、跳ね上げローラーによる気球の完全立て上げ過程の計算結果を総浮力826kg、無風の場合について示している。なお、跳ね上げローラー・吊り紐端固定部とも地面上 ($Z=0$) にあるとして計算している。図では、気球と吊り紐等をそれぞれ太線・細線で描き、表示の時間間隔は0.5秒で5秒ごとに頭部を太線で表してある。両軸は1目盛り10mである。また、カラー点および吊り紐端固定部の張力の時間変化をそれぞれ太線および細線で示している。

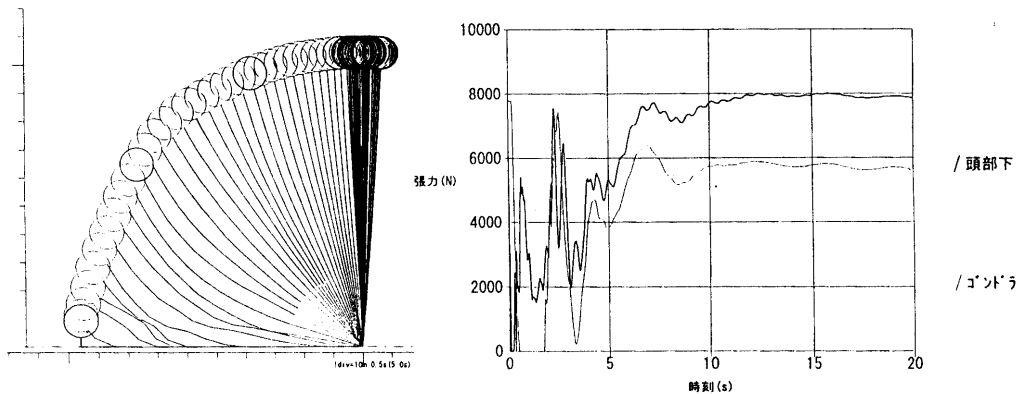


図3 完全立て上げ過程 総浮力826kg 無風

頭部直下の索では、はじめは総浮力から気球頭部の重量を引いた張力が生じているが、いったんゆるんだ後に、振動をくり返しながら最終的にはほぼ最初の値に収束する。気球尾部ははじめ地面上にあるから、吊り紐端固定部の張力は、はじめは頭部下とほぼ同じ値であり、ローラーが開放されるとゆるむため張力はいったん0となる。その後、振動

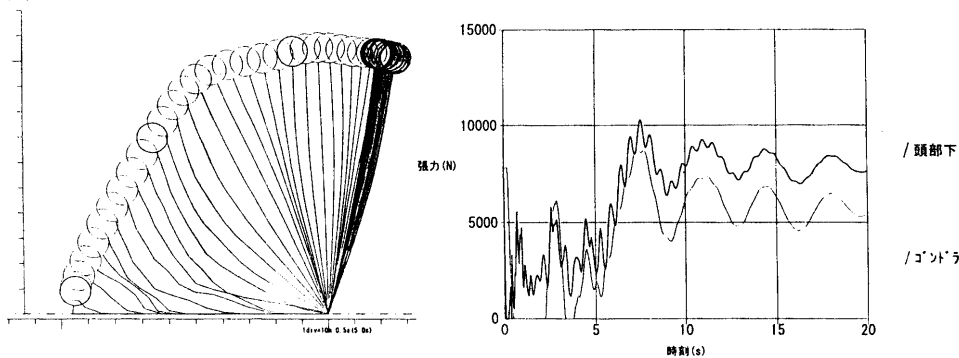


図4 完全立て上げ過程 総浮力826kg 追い風5 m/s

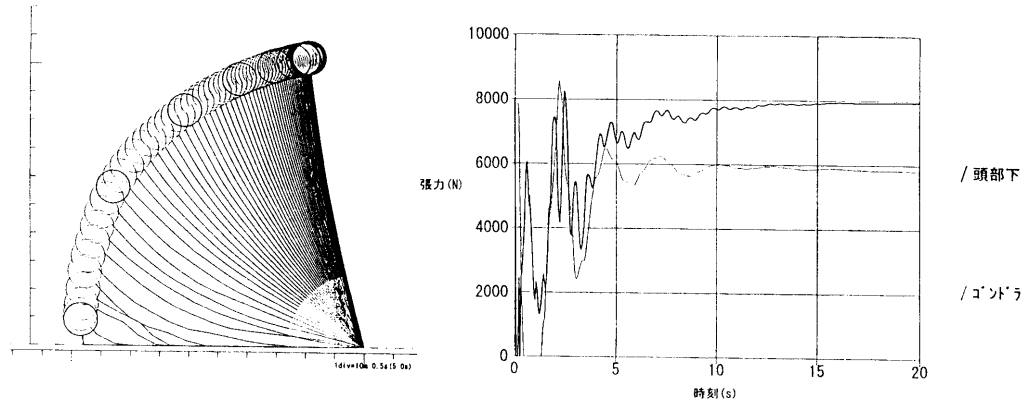


図5 完全立て上げ過程 総浮力826kg 向かい風5m/s

をくり返し、最終的には総浮力から気球・吊り紐等の重量を引いた値に近い張力に収束する。図4は同条件で追い風5m/sの場合である。この場合の張力の最大値は気球が最も伸びきった約7.5秒後に生じ、その値は総浮力の1.27倍程度である。同じ条件で向かい風になると、図5のように張力の最大値はもっと早く2.5秒後に生じる。したがって、気球頭部の速度も小さく張力の最大値は総浮力の2%増にとどまる。

表1 気球頭部直下の最大張力/総浮力

風速 (m/s)	総浮力 487kg				総浮力 826kg				総浮力1389kg			
	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック
-6	0.989				1.080				1.056			
-5	0.977				1.018				1.052			
-4	0.975				0.979				1.079			
-3	0.969			1.003	0.979			0.974	1.090			0.978
-2	0.997			0.968	0.982			0.973	1.092			0.978
-1	1.022			0.967	0.986			0.974	1.083			0.978
0	1.036	0.968	1.852	0.968	0.990	0.973	2.053	0.976	1.055	0.977	2.235	0.979
1	1.033	0.967	1.761	0.967	0.996	0.973	1.900	0.974	1.068	0.977	2.038	0.978
2	1.038	0.968	1.761	0.968	1.014	0.973	1.941	0.973	1.091	0.978	2.014	0.978
3	1.127	0.970	1.782	0.971	1.090	0.974	1.926	0.974	1.136	0.978	2.143	0.978
4	1.202	0.979	1.683	0.979	1.175	0.978	1.994	0.978	1.185	0.981	2.084	0.981
5	1.285	×	×	0.996	1.275	0.987	1.941	0.987	1.282	0.985	2.293	0.985
6	1.291			1.025	1.353	1.004	1.970	1.003	1.380	0.994	2.324	0.994
7	1.418			1.070	1.469	×	×	1.028	1.467	1.009	2.240	1.009
8	1.686			×	1.661			1.066	1.613	×	2.130	1.031
9	1.971				1.725			1.116	1.693		×	1.062
10	2.121				2.067			×	1.857			1.103
11												1.157
12												1.223
13												×

表2 ゴンドラ直上の最大張力/総浮力

風速 (m/s)	総浮力 487kg				総浮力 826kg				総浮力1389kg			
	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック
-6	1.095				1.073				0.981			
-5	1.099				1.061				0.975			
-4	1.086				1.023				0.978			
-3	1.059			0.586	0.995			0.699	0.978			0.812
-2	1.030			0.503	0.971			0.697	0.970			0.811
-1	0.993			0.501	0.961			0.697	0.970			0.811
0	0.956	0.501	1.409	0.501	0.961	0.697	1.940	0.697	0.970	0.811	2.164	0.811
1	0.949	0.501	1.376	0.501	0.961	0.697	1.892	0.697	0.970	0.811	2.053	0.811
2	0.950	0.503	1.401	0.503	0.962	0.697	1.907	0.697	0.992	0.811	1.985	0.811
3	0.951	0.508	1.402	0.508	0.962	0.699	1.931	0.699	1.059	0.812	2.071	0.812
4	0.954	0.521	1.374	0.533	0.995	0.704	1.925	0.704	1.130	0.815	2.024	0.815
5	0.991	×	×	0.548	1.089	0.716	1.914	0.716	1.203	0.820	2.065	0.820
6	1.075			0.595	1.233	0.736	1.842	0.736	1.307	0.831	2.039	0.831
7	1.265			0.664	1.404	×	×	0.768	1.430	0.847	2.013	0.847
8	1.537			×	1.563			0.814	1.588	×	1.912	0.872
9	1.820				1.736			0.877	1.710		×	0.907
10	2.117				1.971			×	1.883			0.954
11												1.014
12												1.087
13												×

すべての計算結果は、気球頭部直下の索（カラー点）の最大張力と総浮力の比および吊り紐端固定点（ゴンドラ直上の索に相当）の最大張力と総浮力の比の形で表1および表2にまとめてある。図6、7はカラー点および固定点の最大張力および60秒後の平均張力と風速の関係を示す。風速が極端に大きくなければ最大張力は総浮力の2割増程度である。さらに風が強いときは追い風に対しては張力は急上昇するが、向かい風のときはほとんど変化しないことがわかる。向かい風の場合の方が立て上げ過程に無理がなくなめらかであるといえる。

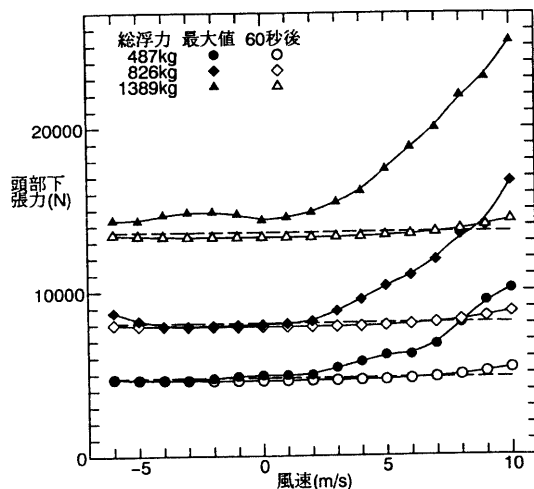


図6 完全立て上げ時の頭部直下索の張力と風速の関係

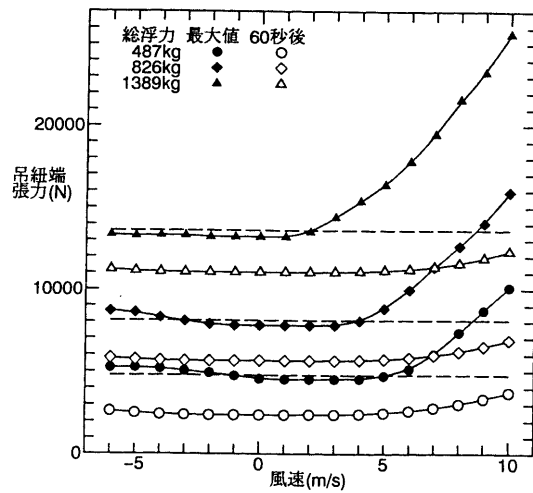


図7 完全立上げ時の吊り紐端固定点の張力と風速の関係

3. 2 放球時の運動

図8は、従来の立上げ放球法の場合の計算結果を総浮力が826kg、風速が3 m/sの場合について示している。最初、気球尾部を地面上に固定し、吊り紐等は固定点とゴンドラに平均的にたるませて地面上に置いてある。時刻0で気球尾部の固定点を開放し計算を進めている。なお、ゴンドラの初期位置は、風速によって可能な限り最適な位置をくり返し計算により求めた。図では、気球と吊り紐等をそれぞれ太線・細線で描き、表示の時間間隔は0.5秒で5秒ごとに頭部を太線で表してある。軸は1目盛り10mである。また、カラー点および吊り紐端固定部の張力の時間変化をそれぞれ太線および細線でしめしている、張力はゴンドラの離陸直前から急上昇し総浮力の1.9倍強、定常値の2.2倍程度に達する。これは従来から言われている値[3]と一致する。その後、減衰振動して定常値に収束する。図9は風速を6 m/sとした場合である。放球時の索およびゴンドラの振動はかなり激しいが張力の変化は風速3 m/sの場合と大きくは変わらない。

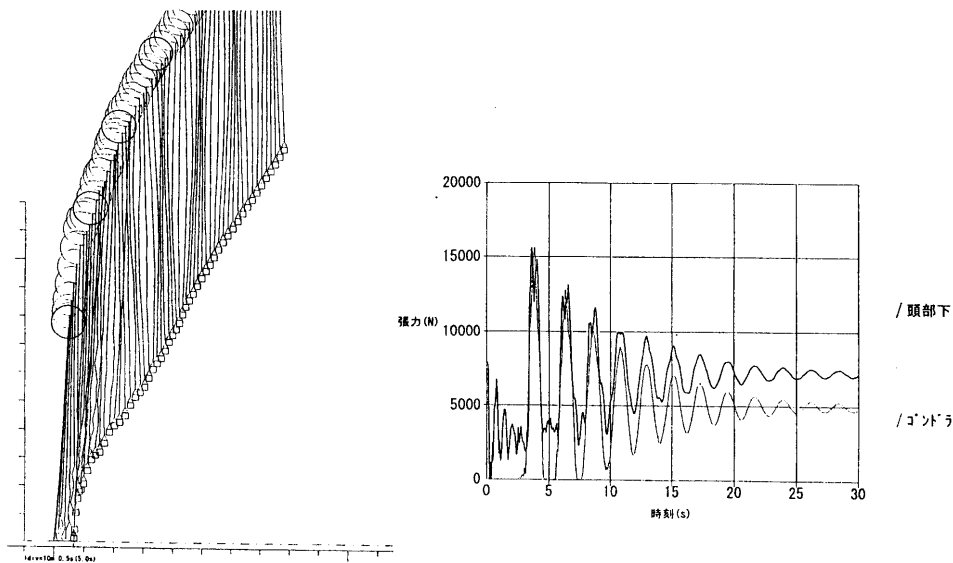


図8 立上げからの放球 総浮力826kg 風速3 m/s

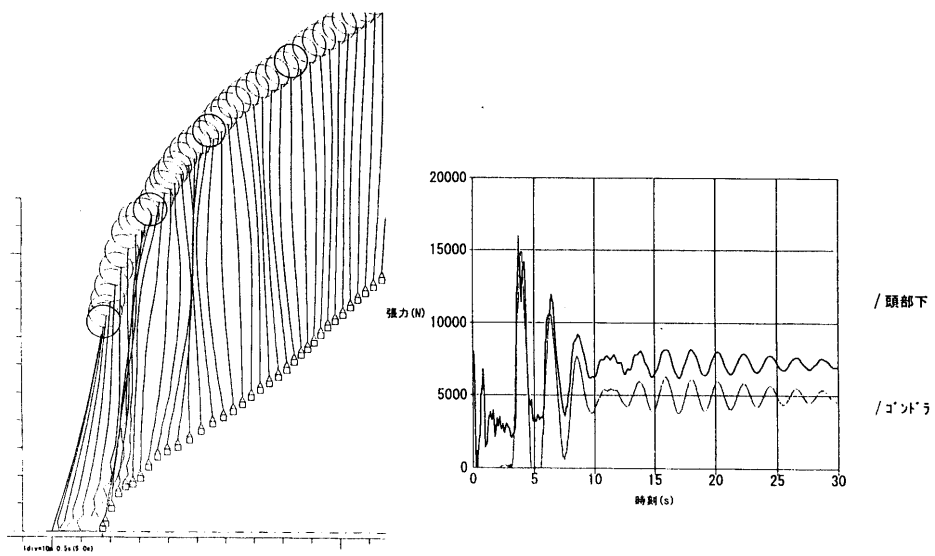


図9 立て上げからの放球 総浮力826kg 風速6 m/s

図10は風速3 m/sでの完全立て上げからの放球の場合の結果を表している。完全立て上げ放球では気球・吊り紐ともすべて立て上げられた状態から出発するため、張力の変化はゴンドラ離陸時の弱い減衰振動のみで、最大張力は初期の値をこえることはなく、総浮力の97%程度である。離陸は非常になめらかに行なわれるが、風に対しては弱く、図11に示すように6 m/sになるとはじめは完全に横滑りに近い状態で危険な状況となる。

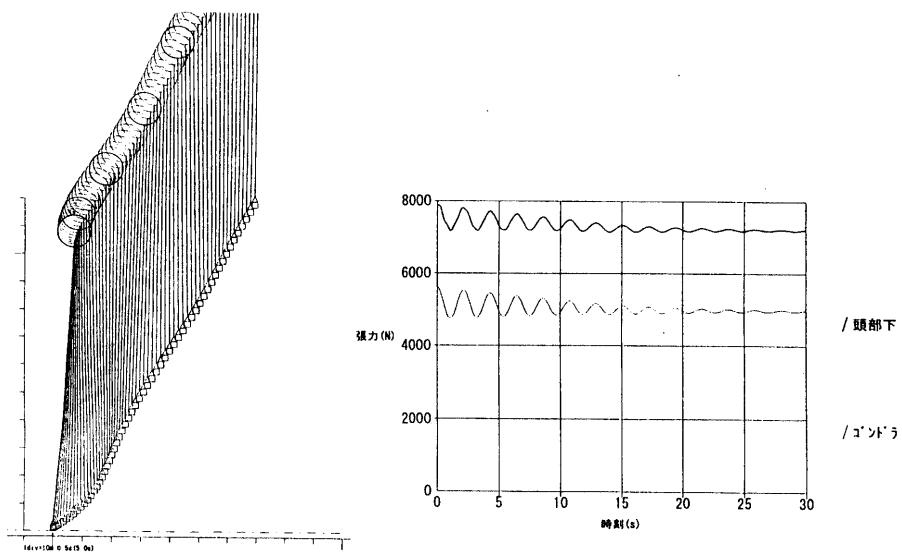


図10 完全立て上げからの放球 総浮力826kg 風速3 m/s

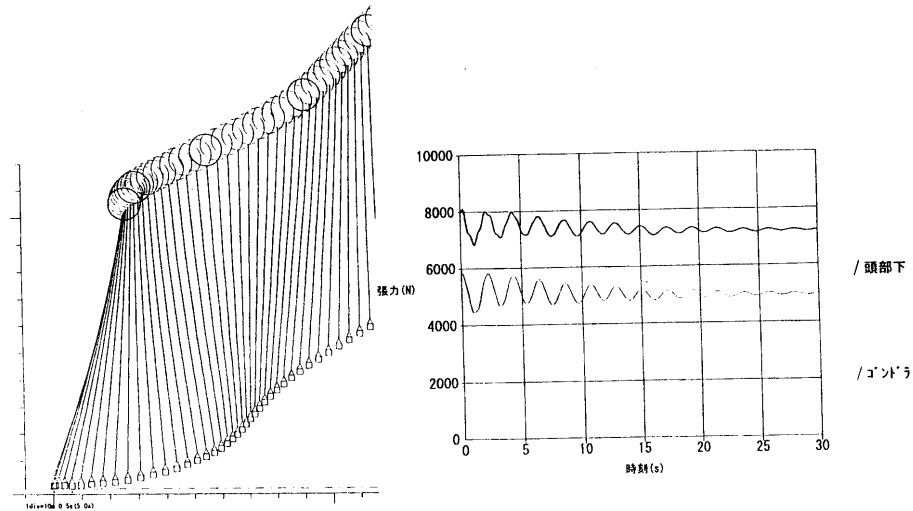


図11 完全立て上げからの放球 総浮力826kg 風速 6 m/s

これに対して、新スタティック放球では、図12の風速 3 m/s、図13の風速 6 m/sの場合でも、完全立て上げからの放球と同様に最大張力が初期の値をこえることなく、離陸は非常になめらかでしかも安全に行なわれる。これは新スタティック放球法の風に対する許容度が高いことを示している。風がない場合もレールから離れる際にゴンドラが速度

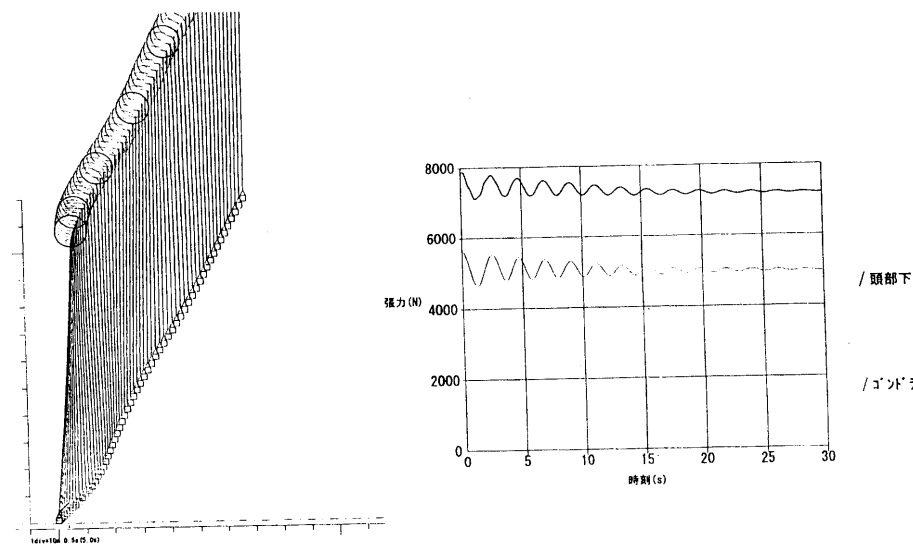


図12 新スタティック放球 総浮力826kg 追い風 3 m/s

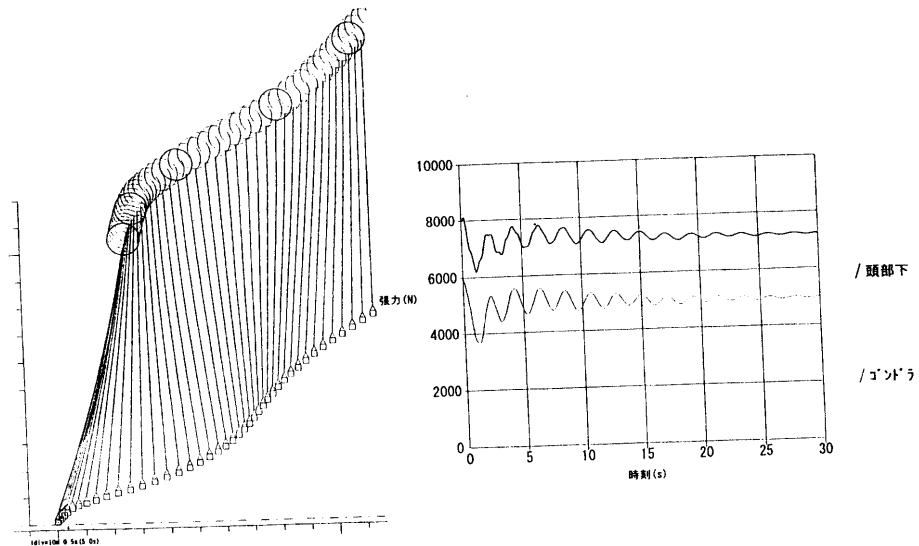


図13 新スタティック放球 総浮力826kg 追い風6 m/s

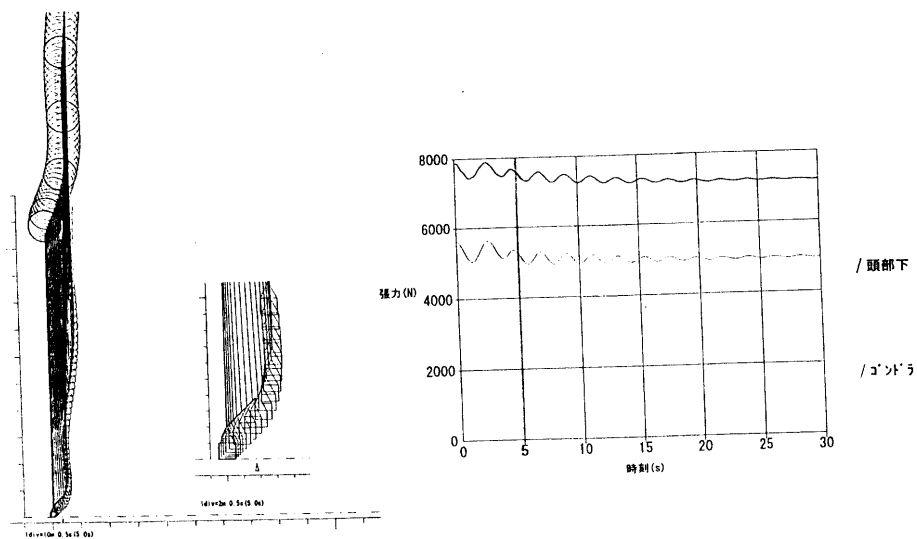


図14 新スタティック放球 総浮力826kg 無風

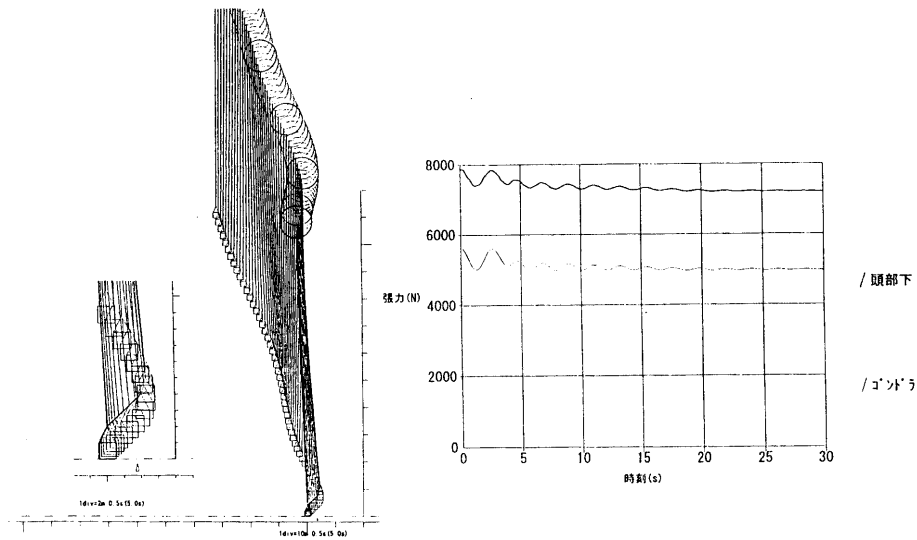


図15 新スタティック放球 総浮力826kg 向かい風 2 m/s

を持っているため図14に示すようにレールに接触することもない。さらに図15に示すように向かい風 2 m/sの場合でもレールにそって釣り合い錘による押し上げ力を付加すれば問題なく放球が可能である。この場合、補助力は200 N加えてあるが、この値は最低限の値であり、ゴンドラはレール端部近傍を通過している。実際には、この補助力をもう少し大きくするのが適当である。

表3～5には各放球法におけるゴンドラのふるまいをゴンドラの初期位置からの距離でまとめてある。各方法について左端の列にはゴンドラが横滑りを始めた位置を表示してある。ここが空欄の場合はゴンドラが初期位置から横滑りすることなく離陸したことを表す。その次の列にはゴンドラが離陸した位置を表示している。新スタティック放球法の場合はレールの分だけ進んだ位置が離陸点になる。次の欄は離陸したゴンドラが再び地面と接触した場合にその位置が示されている。右端の列には再び地面に降りたゴンドラが再度離陸した位置が表されている。

表3 ゴンドラの横滑り・離陸・地面衝突・再離陸地点(m) 総浮力487kg

風速 (m/s)	完全立て上げからの放球				立て上げからの放球				新スタティック放球			
	横滑り	離陸	衝突	再離陸	横滑り	離陸	衝突	再離陸	離陸	衝突	再離陸	
-3									3.54			
-2									3.54			
-1									3.54			
0		0.00				0.00			3.54			
1		0.00				1.20			3.54			
2		0.00			4.81	4.79			3.54			
3		0.00			10.80	10.71			3.54			
4	0.00	0.01			17.32	17.15			3.54			
5	0.00	0.01	2.71	9.33	17.32	17.44			3.54			
6	0.00	0.02	2.26	12.47	17.32	18.03			3.54			
7	0.00	0.03	2.02	35.02	17.32	24.00			3.54			
8	0.00	0.04	1.94	42.58	17.32	39.28			3.54	24.89	50.91	
9	0.00	0.05	1.98	65.14	17.32	56.74			3.54	20.07	65.15	
10	0.00	0.06	2.12	87.57	17.32	72.81			3.54	17.62	89.78	

表4 ゴンドラの横滑り・離陸・地面衝突・再離陸地点(m) 総浮力826kg

風速 (m/s)	完全立て上げからの放球				立て上げからの放球				新スタティック放球			
	横滑り	離陸	衝突	再離陸	横滑り	離陸	衝突	再離陸	離陸	衝突	再離陸	
-3									3.54			
-2									3.54			
-1									3.54			
0		0.00				0.00			3.54			
1		0.00				0.74			3.54			
2		0.00			2.95	2.95			3.54			
3		0.00			6.64	6.61			3.54			
4	0.00	0.01			11.78	11.68			3.54			
5	0.00	0.01			17.32	17.16			3.54			
6	0.00	0.01			17.32	17.25			3.54			
7	0.00	0.02	3.65	11.62	17.32	17.48			3.54			
8	0.00	0.03	2.94	15.97	17.32	17.72			3.54			
9	0.00	0.03	2.56	20.38	17.32	18.69			3.54			
10	0.00	0.04	2.30	46.41	17.32	23.43			3.54	53.08	58.36	
11									3.54	25.94	61.50	
12									3.54	22.09	65.43	

表5 ゴンドラの横滑り・離陸・地面衝突・再離陸地点(m) 総浮力1389kg

風速 (m/s)	完全立て上げからの放球				立て上げからの放球				新スタティック放球			
	横滑り	離陸	衝突	再離陸	横滑り	離陸	衝突	再離陸	離陸	衝突	再離陸	
-3									3.54			
-2									3.54			
-1									3.54			
0		0.00				0.00			3.54			
1		0.00			0.52	0.54			3.54			
2		0.00			2.14	2.14			3.54			
3		0.00			4.83	4.78			3.54			
4		0.00			8.58	8.47			3.54			
5	0.00	0.01			13.36	13.18			3.54			
6	0.00	0.01			17.32	17.11			3.54			
7	0.00	0.01			17.32	17.22			3.54			
8	0.00	0.02	6.73	8.35	17.32	17.35			3.54			
9	0.00	0.02	4.72	16.53	17.32	17.53			3.54			
10	0.00	0.03	3.88	21.47	17.32	17.84			3.54			
11									3.54			
12									3.54			
13									3.54	34.70	68.81	
14									3.54	28.67	68.60	

3. 3 放球時の最大張力およびゴンドラの加速度

図16は、気球のカラー点にかかる初期張力、最大張力、および30秒後の平均張力と風速の関係を総浮力がそれぞれ487kg、826kg、1389kgの場合について示している。総浮力826kgの場合、立て上げからの放球では総浮力の2倍程度の張力が生じるが、完全立て上げからの放球、新スタティック放球では最大張力は総浮力と同程度である。完全立て上げ放球、立て上げ放球とも風速6m/sが限界である。これに対して、新スタティック放球では9m/sまで放球可能である。この限界風速は、総浮力が小さくなるにつれて小さくなり、総浮力が大きくなると大きくなる。総浮力487kgでは、立て上げからの放球では総浮力の1.8倍程度の張力が生じる。風速の限界値は、立て上げ放球と完全立て上げ放球では4m/s、新スタティック放球では7m/sとなる。総浮力1389kgでは、立て上げからの放球では総浮力の2.2倍以上の張力が生じる。風速の限界値は、立て上げ放球と完全立て上げ放球ではそれぞれ7m/s、8m/s、新スタティック放球では12m/sとなる。

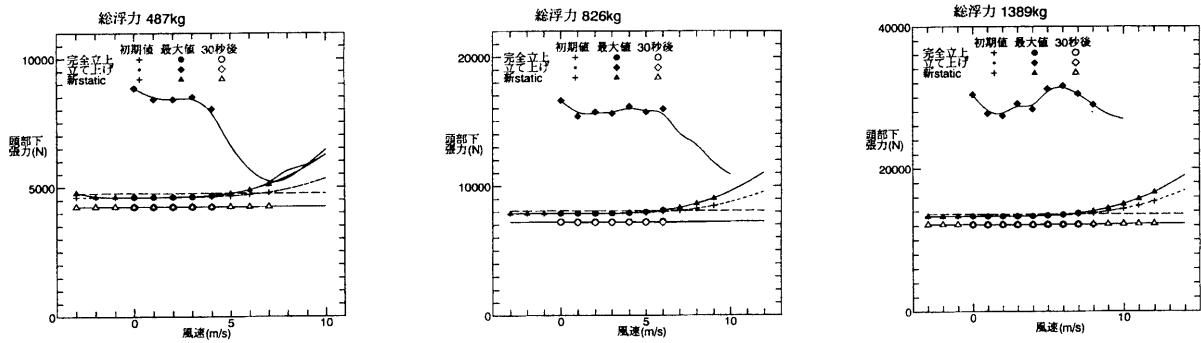


図16 放球時の頭部直下索の張力と風速の関係

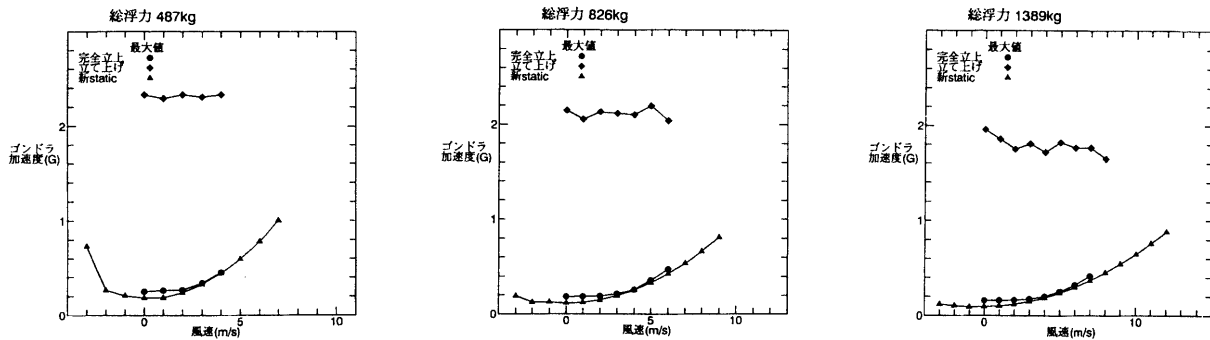


図17 放球時のゴンドラの最大加速度

図17は、放球時のゴンドラの最大加速度を総浮力がそれぞれ487kg、826kg、1389kgの場合について示している。総浮力が826kgの場合、風が弱い場合には、立て上げ放球でのゴンドラの最大加速度が約2.1Gであるのに対して完全立て上げ放球では約0.2G、新スタティック放球ではさらに小さくなる。総浮力が小さい場合は加速度は大きくなり、総浮力が大きい場合には加速度は小さくなる。すべての結果は表6にまとめている。

表6 放球時のゴンドラの最大加速度(G)

風速 (m/s)	総浮力 487kg				総浮力 826kg				総浮力1389kg			
	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック	完全立 上過程	完全立 上放球	立て上 げ放球	新スタ ティック
-6												
-5												
-4												
-3				0.730				0.190				0.120
-2				0.270				0.130				0.100
-1				0.210				0.130				0.090
0		0.250	2.330	0.180		0.190	2.150	0.120		0.160	1.960	0.100
1		0.260	2.290	0.190		0.190	2.060	0.120		0.160	1.860	0.100
2		0.270	2.330	0.240		0.190	2.130	0.150		0.160	1.750	0.120
3		0.340	2.310	0.330		0.220	2.120	0.190		0.180	1.810	0.150
4		0.450	2.330	0.450		0.260	2.100	0.260		0.200	1.720	0.190
5		×	×	0.600		0.360	2.200	0.330		0.250	1.820	0.240
6				0.780		0.480	2.040	0.430		0.320	1.770	0.300
7				1.000		×	×	0.540		0.420	1.770	0.370
8				×				0.670		×	1.650	0.450
9								0.810			×	0.540
10								×				0.650
11												0.760
12												0.890
13												×

4. おわりに

以上の計算条件のもとで、跳ね上げローラーによる気球の完全立て上げ時に頭部にかかる最大張力は、風速 5 m/s で総浮力の1.3倍以内である。さらに、向かい風では総浮力の1.1倍以内となり、完全立て上げ過程もよりなめらかになる。新スタティック放球法は風に対する許容度が大きく、放球は非常になめらかに行なわれる。また、放球時のゴンドラの加速度も非常に小さく、無風状態や向かい風でも放球に問題はない。今回の計算はモデルが簡略な二次元計算であることに加え計算例も少ないので、さらに具体的なモデルと様々な条件での計算を順次進めていく予定である。

参考文献

- [1] 秋山弘光、西村純、岡部選司、並木道義、松坂幸彦、高成定好：立て上げ放球法、宇宙科学研究所報告、特集第4号、1982、3—16.
- [2] 秋山弘光、岡部選司、松坂幸彦、並木道義、高成定好、西村純：完全立て上げ放球法、昭和62年度大気球シンポジウム、1987、12—14.
- [3] 西村純：気球放球時に観測器に加わる衝撃について、宇宙科学研究所報告、特集第22号、1988、15—26.