

# 係留型成層圏プラットフォームの概念設計

宮崎研究室  
野口 拓人

## 1. 序論

近年、高度 10km~20km の成層圏に飛行船を設置し、通信中継/観測監視などのミッションを行わせる成層圏プラットフォーム構想が各国で研究されている。

図 1 のように成層圏プラットフォーム：Stratospheric Platform(以下 SPF)は航空機単体でミッションを行うことを想定しているものが多い。

しかし無人での飛行船の定点位置制御、再生型燃料電池の軽量化などが問題となり、SPF 飛行船は実現されていない。



図 1 SPF 飛行船

そこで、SPF 飛行船の船体下部に長大なケーブルを取り付け、地上に係留するという解決策が提案されている。地上に係留することで燃料や制御の面からみて、位置制御が容易になるためだ。さらにケーブルを伝い物資や人間を昇降させることができるためミッションの多様化が期待されている。

また別の問題として、資金不足も SPF 飛行船の大きな問題である。これを解決する手段の一つとして係留型 SPF の観光利用を提案する。

しかし係留型 SPF の建造は前例がため、実現する上で何が問題となるか調べられていない。

そこで係留型 SPF 建造に必要と考えられる技術項目調査および設計値の算出を最終目標とし、本研

究では係留型 SPF 建造に必要な設計値の概算を行った。

また実現に向けた問題の中でもケーブルの挙動解析は重要な課題の一つと考える。なぜならばケーブルは地上と成層圏を結ぶほど長大かつ、上空の強風に晒されるためである。よって本研究では 3 次元でのケーブルの静解析を行う計算ツールの開発も行った。

## 2. システム概要

図 2 に示すように複数の飛行船をケーブルに係留し、飛行船からエレベータ用のケーブルを垂らす。そして図 3 に示すようにエレベータケーブルを伝い、キャabinをまた別の飛行船で上昇させるものとした。これはシステム全体を昇降させるよりもキャabinのみを昇降させる方が、効率が良いと考えたためである。また長期間の連続運用をするため、電源には太陽電池と燃料電池を使用する。

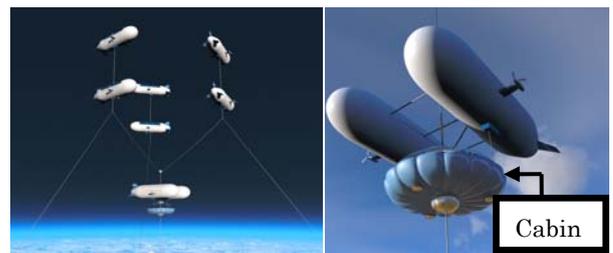


図 2 係留型 SPF

図 3 キャabin

## 3. 設計値の概算

### 3.1. 係留用飛行船

#### 3.1.1. 飛行船本体

表 1 に使用環境を示す。

浮力を得るため大きめの飛行船を想定した。なお飛行船外形は JAXA の成層圏プラットフォーム(長

さ 70m)及びヒンデンブルク号(長さ 250m)を参考に  
した。また外形から浮力と抗力、飛行船を滞空させ  
るために必要な仕事率,すなわち必要出力を求めた。  
表 2 に飛行船の仕様を示す。

表 1 使用環境

高度[km]	20
風速[m/s]	15
平均気温[°C]	-56~0
空気密度[kg/m <sup>3</sup> ]	0.0889
He密度[kg/m <sup>3</sup> ]	0.0073
運用時間(昼)[h]	10
運用時間(夜)[h]	14

表 2 飛行船仕様

外形	
長さ[m]	200
直径[m]	50
体積[m <sup>3</sup> ]	262000
表面積[m <sup>2</sup> ]	25300
力	
浮力[kg]	21400
抗力係数[-]	0.05 <sup>[1]</sup>
抗力[N]	2047
必要出力[kW]	30.7

### 3.1.2. 推進系

表 2 に示した必要出力  
から、文献[1]を参考にプ  
ロペラの設計値を求めた。  
そこから電気モーター 1  
基あたりに必要な出力を  
求めた。表 3 に推進系の設  
計値を示す。

表 3 推進系

プロペラ	
直径[m]	4.2
ブレード枚数[枚]	3
プロペラ効率[-]	0.674
回転数[rpm]	450
電気モーター(1基あたり)	
モーター効率[-]	0.85
トルク[Nm]	163
モーター出力[kW]	13.4
推進機発数[発]	4

### 3.1.3. 電源系

次に表 3 に示したモーター出力を満たせる燃料電池  
の設計値を求めた。4 基分のモーター出力に加え、  
センサや通信などに電力を使用することを考慮し燃料  
電池の最大出力は 100kW とした。また文献[2]を  
参考に水素消費量を定めた。

燃料電池の発電によって生成された水を再び水素  
と酸素に分解するため、水電解装置を搭載する必要  
がある。そこで燃料電池の水素消費量と昼夜の運用  
時間から、必要とされる水素生成量を求めた。

太陽電池は飛行船表面積の 3 割に貼れるものと仮  
定した。また太陽光のエネルギー密度は冬至時の値  
<sup>[3]</sup>を用い日中の発電量を計算した。

表 4 に電源系の設計値を示す。

表 4 電源系

燃料電池	
最大出力[kW]	100
水素消費量[NL/min]	14.9
水電解装置	
水素生成量[NL/min]	20.8
水素タンク容量[NL]	12508
太陽電池	
張付面積[m <sup>2</sup> ]	7600
変換効率[%]	10
太陽光エネルギー密度[W/m <sup>2</sup> ]	480
太陽電池発電量[kW]	364

### 3.1.4. 膜材

飛行船の膜材には外側の圧力と内圧の差圧がかか  
る。また成層圏では昼夜で気温が 50°C 近く変動する  
ため、差圧が大きく変化する。

文献[4]を参考に膜材に必要  
な強度を求めた。なお強度計  
算の際、飛行船の構造は円管  
とした。

表 5 膜材

差圧[Pa]	1471
安全率[-]	5
必要強度[kgf/cm]	187

### 3.1.5. 重量

ペイロード重量を計算し、浮力と差をとることで  
飛行船 1 機あたりの余剰浮力を求めた。ただし電気  
モーター、燃料電池、水電解装置の重量については  
同等スペックの既製品を参考にした。

重量と余剰浮力の計算結果を表 6 に示す。

表 6 重量

膜材	
膜材[kg/m <sup>3</sup> ]	0.3
膜材[kg]	7594
推進系	
プロペラ4基[kg]	190 <sup>[1]</sup>
モーター4基[kg]	720
電源系	
燃料電池[kg]	400
水電解装置[kg]	150
気体タンク[kg]	300 <sup>[2]</sup>
配管等[kg]	200 <sup>[2]</sup>
太陽電池[kg/m <sup>2</sup> ]	0.6
太陽電池[kg]	4556
合計重量[kg]	14110
余剰浮力[kg]	7255

### 3.2. ケーブル

ケーブルをトラス要素で近似し、有限要素法を用いて解析を行った。ここで係留用ケーブル本数は冗長性を考えて3本、ケーブルの素材は炭素繊維の撚糸を用いるものとした。また外乱として図5に示す定常風が吹いているとした。

解析モデルを表7に示す。

表7 解析モデル

係留用ケーブル[本]	3
エレベータ用ケーブル[本]	1
固定位置半径[km]	10
固定位置間隔[deg]	120
高度[km]	20
大気モデル	標準大気モデル
風モデル	大気循環モデル
ケーブル直径[mm]	5
ケーブル密度[kg/m <sup>3</sup> ]	2100
ヤング率[GPa]	30

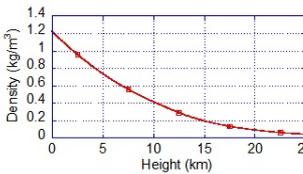


図4 標準大気モデル

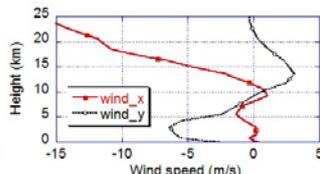


図5 大気循環モデル

解析によって得られた各部材のひずみや応力を表8に、各ケーブルの位置を図6に示す。

表8 解析結果

係留用ケーブル	
長さ[km]	22.2
重さ[kg]	915
最大ひずみ[%]	3.09
最大応力[GPa]	93
エレベータ用ケーブル	
長さ[km]	19.9
重さ[kg]	821
最大ひずみ[%]	1.61
最大応力[GPa]	48
ケーブル総重量[kg]	3567
必要浮力[kg]	537

表8からケーブルに要求される引張強度がわかった。また固定位置半径を10kmとすれば高度を維持するための必要浮力は少なくすむ。表6に示した余剰浮力から、飛行船1機の浮力でも係留システムは

成立すると考えられる。しかし風速が想定 of 2倍だった場合、必要浮力は36000[N]にもなる。よって突風の発生を考慮すると飛行船は2機以上での運用が望ましいと考えられる。

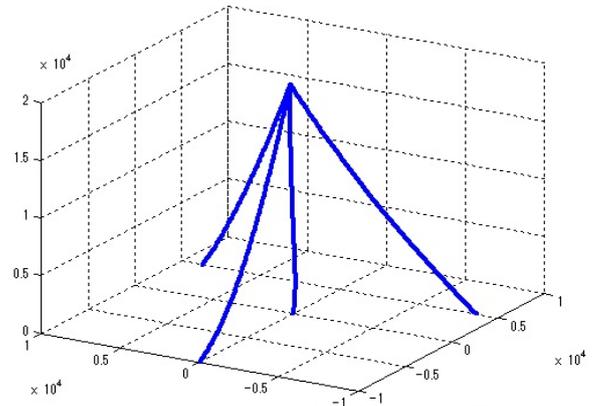


図6 定常風を考慮した解析結果

係留型SPF実現のためには以上の設計値を満たすものが必要と考えた。

### 4. 技術成熟度の判定

3章で求めた設計値が現状技術でどこまで満たしているのかを判断するため、技術成熟度: Technical Readiness Level(以下TRL)の判定を行った。本研究ではレベルを表9に示すとおりに定義した。

表9 TRL基準

段階	TRL	内容
コンセプト段階	TRL1	基礎技術が研究され、原理的に可能であることが示されている。
	TRL2	コンセプトが提案されている段階。
	TRL3	コンセプトが実証されている(定量的に検討されている)段階。
動作実証段階	TRL4	BBMが実験室で実験されている段階。
	TRL5	BBMが実環境を模擬した環境で実証されている段階。

#### 4.1. 飛行船

飛行船に関する技術成熟度は高く、必要となる部品の殆どは既製品で要求を満たすことができると考えられる。ただし膜材に関しては強度が不足しているため改良が必要と考える。

表 10 飛行船の技術成熟度

要素	状況		TRL
構造系	膜材	現状で膜強度は102kgf/cm <sup>[4]</sup> のため改良が必要.	TRL3
推進系	プロペラ	従来品で対応可能.	TRL5
	電気モーター	従来品で対応可能.	TRL5
電源系	燃料電池	要求値を満たす既製品がある.	TRL4
	太陽電池	従来品で対応可能.	TRL5
	水電解装置	要求値を満たす既製品がある.	TRL4

## 4.2. キャビン

キャビンに関しては技術成熟度が低いと考えられる。宇宙エレベータ研究に共通する項目があるが、提案段階、未検討のものが多い。

表 11 キャビンの技術成熟度

要素	状況	TRL
移動技術	提案段階. 宇宙エレベータ関連でクローラーの研究が応用可能と考える.	TRL2
着脱方式	提案段階. 機械式や電磁式が考えられる.	TRL2
電源	太陽電池と燃料電池	TRL4
居住性	航空機等の技術を応用	TRL5
安全性	現状では未検討	TRL1

## 4.3. ケーブル

強度や耐環境性は従来品で満足できると考える。しかし万が一ケーブルが切断されてしまった場合、広範囲に被害が出る可能性があるため十分な安全対策を取らなければならない。

表 12 ケーブルの技術成熟度

要素	状況	TRL
強度・剛性	炭素繊維で満足できる.	TRL5
耐環境性	天候や鳥など. 従来品で対応可能	TRL5
安全性	現状では未検討	TRL1
製造技術	橋梁などで使用されているため数百mまでは製造実績がある.	TRL3

## 5. 結論

- 係留型 SPF 建造に必要な設計値を概算した。
- 3次元でのケーブルの静解析を行う計算ツールを開発した。

## 6. 今後について

係留システムについては要素技術の TRL が高いとわかった。よって次はシステム全体の成立性を検討するためコンセプトモデル開発によって問題点を

調査していく必要がある。またケーブルについては突風によって励起される振動、応力変化を考慮した動解析を行う必要と考える。

キャビンシステムについては縮尺モデルでの解析、設計、BBM での耐荷性能・走行性能の調査を行う必要があると考える。

## 参考文献

- [1]奥山政広 柴田眞 横川彰寛 木村校優：  
成層圏プラットフォーム飛行船の推進性能とプロペラ特性の検討，2006
- [2]藤原勉 江口邦久：  
成層圏プラットフォーム飛行船用再生型燃料電池の研究開発，2008
- [3]G.A.Khoury J.D.Gillett：  
Airship Technology, 1999, pp.445.
- [4]小松敬治：  
飛行船構造設計と膜材，日本航空宇宙学会誌，54, 2006, pp.197-200.
- [5]宮崎康行：  
ゴッサマー マルチボディ ダイナミクスの基礎，2011