

# 係留型成層圏プラットフォームの構築方法と実現可能性

## Feasibility Study of Construction Method for Moored Type Stratospheric Platform

指導教授 宮崎康行

M2018 野口拓人

### 1. はじめに

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。

成層圏プラットフォーム：Stratospheric Platform(以下 SPF)は、図 1 のように、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 飛行船は実用化には至っていない。



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方式が提案されている。これは SPF 飛行船を地上に係留することで、燃料や制御の面から位置制御が容易になるためである。また地上に係留することでケーブルを伝い、物資や人間を昇降させる事ができると期待されている。しかし係留型 SPF の構築は前例がないため、実現する上で何が問題となるかを調査、研究する必要がある。

本研究では係留型 SPF の構築方法を提案し、構築に必要な設計値の概算を行った。そして現状の技術で求めた設計値をどこまで満足できるかを判定し実現可能性について検討した。

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挙動解析を行う計算ツールの開発も行った。

### 2. 係留型 SPF システムの概要と構築方法

#### 2.1. システムの概要

本研究で想定する係留型 SPF システムの概要図を図 2 に示す。図 2 に示すように複数の飛行船をケーブルで係留し、キャビン昇降時にガイドとなる、エレベータケーブルを垂らす。そしてエレベータケーブルに沿ってキャビンが昇降する。ここでキャビンには昇降用飛行船を取り付け、キャビンの昇降は昇降用飛行船の浮力によって行うものとした。係留用飛行船およびキャビン用飛行船の配置を図 3 に示す。

係留用飛行船は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し、動力系にはプロペラと電気モータを用いるものと想定した。そして昼間は太陽電池で発電した電力の一部を動力系や搭載機器に直接供給すると同時に余剰分を水電解装置に供給、貯蔵された水から水素ガスと酸素ガスを製造して、ガスタンクに貯蔵する。また夜間は昼間に製造した水素ガスと酸素ガスを燃料電池に送って発電し、動力系や搭載機器に電力を供給する。

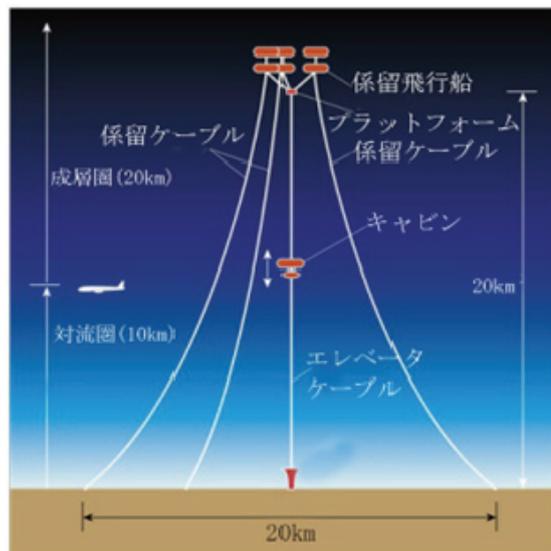


図 2 係留型 SPF システム概要図

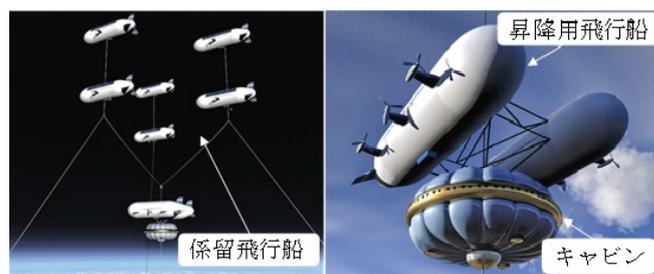


図 3 係留型 SPF システムを構成する飛行船

#### 2.2. 係留型 SPF の構築方法

図 4 に本研究で想定する、係留型 SPF の構築方法を示す。

まず 1 本の係留ケーブルを取り付けた係留用飛行船を 1 機ずつ高度 8km 程度まで上昇させる(手順 1)。次にこの高度にて飛行船同士を接続する(手順 2)。最後に飛行船群を高度 20km まで上昇させ、係留型 SPF を構築する(手順 3)。

飛行船は大気密度の高い地上付近において、風の影響を強く受ける。そのため大気密度が低く、風速も低い高度まで飛行船を上昇させ、上空で飛行船同士を接続することとした。

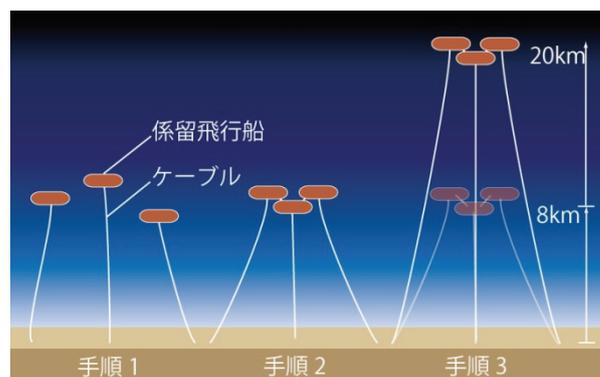


図 4 係留型 SPF の構築方法

### 3. 設計値の概算

2章で示したシステムおよび構築方法から、設計項目の洗い出しを行った。各システムにおける設計項目を表1にまとめる。

系	部品	設計項目
飛行船	本体	外形, 浮力, 抗力
	膜材	必要強度
推進系	プロペラ	外形, 出力
	電気モータ	トルク, 出力
電源系	燃料電池	出力, 水素消費量
	水電解装置	水素生成量
	太陽電池	発電量
ケーブル	係留用	最大応力, ひずみ
	エレベータ用	最大応力, ひずみ
システム全体		重量

#### 3.1. 飛行船本体

飛行船は構造重量の少ない軟式飛行船を選定した。飛行船の外形はまた大きな浮力を得る必要があるため、長さ 200m, 直径 50m の飛行船を想定した。飛行船の外形は JAXA の SPF 飛行船(長さ 68m, 直径 17.5m), および硬式飛行船ヒンデンブルク号(長さ 250m, 直径 41m)を参考にした。表2に飛行船の使用環境を、表3に飛行船の設計値を示す。

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

長さ[m]	200
直径[m]	50
体積[m <sup>3</sup> ]	250000
表面積[m <sup>2</sup> ]	25000
浮力[kg]	20500
膜重量[g/m <sup>3</sup> ]	300
積載量[kg]	13000
抗力係数[-]	0.05 <sup>[1]</sup>

#### 3.2. 推進系

ここでは飛行船が表2に示した使用環境で滞空できるプロペラ及び電気モータの設計値を示す。まず飛行船仕様から滞空に必要な出力を算出し、モータ出力を概算した。

プロペラの設計値は文献[1]を参考に概算した。文献[1]より150m級飛行船が高度18kmで耐風性能16m/sを得られる構成の中で、軽量かつプロペラ効率が高いものを設計値とした。

表4に推進系設計値を示す。ただし、プロペラやモータは1基あたりの設計値である。

飛行船抗力[kg]	20000
滞空必要出力[kW]	29.8
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
推進機発数[発]	4
モータ効率[-]	0.85
モータトルク[Nm]	234
モータ出力[kW]	13.0

#### 3.3. 電源系

電源系は燃料電池、水電解装置、太陽電池の設計値を概算した。ここで燃料電池の最大出力値は表4に示した4基分のモータ出力に加えて、各種センサや通信機に電力を使用することも考慮し、80kWとした。

また文献[2]を参考に発電による水素消費量を概算した。さらに昼の運用時間を10時間、夜の運用時間を14時間とし、水電解装置に求められる水素生成量および発電サイクルを継続するために必要な水素タンクの容量を求めた。

燃料電池最大出力[kW]	80
水素消費量[NL/min]	710
電解装置水素生成量[NL/min]	994
水素タンク容量[NL]	596000

次に太陽電池の設計値を示す。ここでは変換効率10%の太陽電池を飛行船表面積の約3割に貼るものとした。

また文献[3]より太陽光のエネルギー密度は600W/m<sup>2</sup>として日中の発電量を計算した。太陽電池の設計値を表6に示す。

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> ]	600
太陽電池発電量[kW]	455

#### 3.4. 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。この差圧は大気圧すなわち高度によって変化する。また成層圏では、昼夜で気温が50°C近く変動するため膜材にかかる圧力が大きく変化する。ここでは文献[4]を参考に膜材に必要な強度を算出した。ただし計算において飛行船の構造は円筒型で近似したとした。表7に膜材の設計値を示す。

差圧[Pa]	1471
安全率[-]	5
必要強度[kgf/cm]	187

### 3.5. ケーブル

ケーブルの設計値算出には有限要素法を用いた。ケーブルはトラス要素の節点がピンジョイントによって連結されているものとして近似した。ここでケーブルの素材は比強度が高く、ひずみの大きくなりにくい炭素繊維の撚糸を想定した。使用した解析モデルにおける各値を表 8 に示す。

表 8 ケーブル解析モデル

係留用ケーブル[本]	4
エレベータ用ケーブル[本]	1
係留位置半径[km]	10
係留位置間隔[deg]	90
飛行船最高到達高度[km]	20
ケーブル直径[mm]	5
ケーブル密度[kg/m <sup>3</sup> ]	1800
ヤング率[GPa]	294
ケーブル節点数	50

ケーブルの解析は、まず外乱として定常風が吹いている場合を想定した静解析を行い、次に静的解析の計算結果を初期条件として動的解析を行うことでケーブルにかかる応力やひずみを求めた。この解析において大気密度は標準大気モデル、定常風の風速は大気循環モデルを使用した。

動的解析では積分法に 4 段 4 次の Runge-Kutta 法を用い、定常風に加えて高度 10km~20km の間で x 軸正方向から負方向に風速 10m/s の突風が 10 秒間吹きつけた場合を考えた。

解析によって得られた、突風が吹き終わる直前のケーブル形状を図 5 に示す。また解析に用いたパラメータおよび各ケーブルにおける最大ひずみや最大応力を表 9 にまとめる。

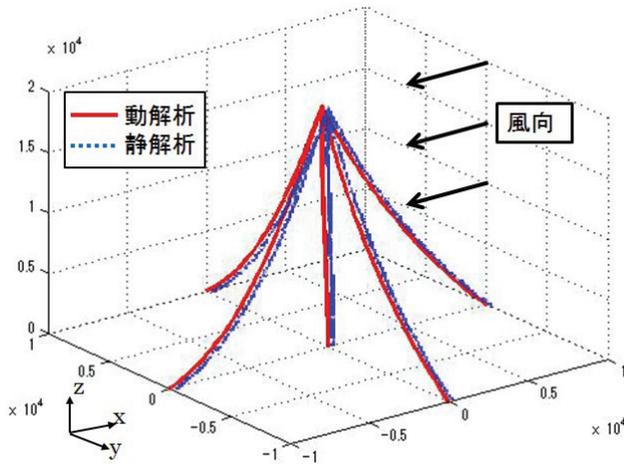


図 5 動的解析によるケーブル形状

表 9 動的解析におけるパラメータ

項目	係留用	エレベータ用
ケーブル長さ[km]	22.4	20.0
ケーブル重量[kg]	792	703
最大ひずみ[%]	0.279	0.224
最大応力[MPa]	820	659
時間刻み幅[sec]	0.001	
ステップ数	30000	

さらに 2 章 2 節で述べた構築方法を基に係留型 SPF の構築を想定した動的解析を行い、構築時にケーブルにかかる応力やひずみを求めた。飛行船群の上昇に伴うケーブルの形状変化を図 6、各ケーブルにおける最大ひずみや最大応力を表 10 にまとめる。

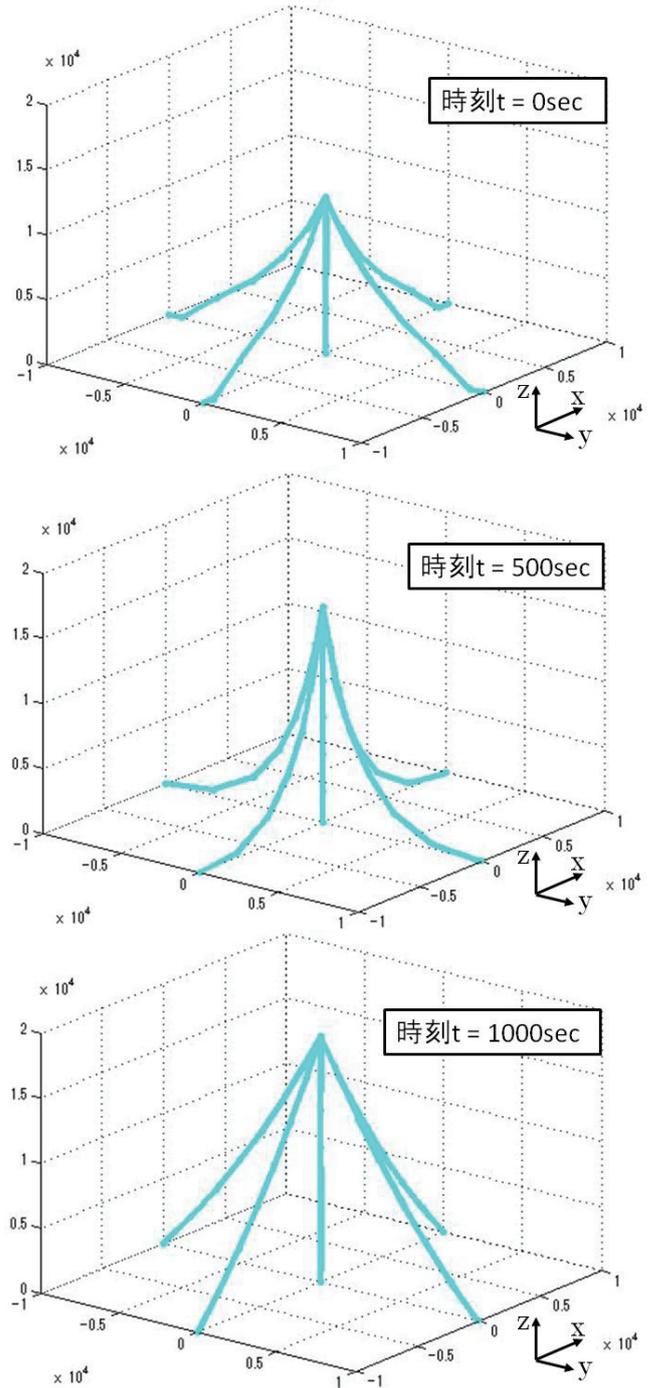


図 6 係留型 SPF 構築時のケーブル形状変化

表 10 動的解析におけるパラメータ

項目	係留用	エレベータ用
最大ひずみ[%]	0.380	0.600
最大応力[MPa]	1117	1764
時間刻み幅[sec]	0.001	
ステップ数	1000000	

### 3.6. システム重量

各システムの設備重量からシステムの構築に必要な飛行船の数を算出する。推進系、電源系、非常設備等の滞空設備の総重量は50トンと想定した。また太陽電池重量は0.6kg/m<sup>2</sup>として飛行船複数による総発電量を1000kWと仮定した。このとき太陽電池の総重量は10トンとなる。表11に重量の概算値をまとめる。

名称	重量[kg]
滞空設備	50000
太陽電池	10000
係留用ケーブル(4本)	3168
昇降用ケーブル(1本)	703
システム全体	64000

ここで表2より飛行船1機あたりの積載量は13000kgであるため、システムを滞空させるには飛行船5機が必要になるとわかった。しかし安全性を考慮し常時飛行船1機分の予備浮力を確保するため必要な飛行船を6機とした。

### 4. 技術成熟度の検討

設計値が現状の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。本研究での判定基準を表12に示す。

段階	TRL	内容
コンセプト段階	TRL1	基礎技術が研究され、原理的に可能なことが示されている段階。
	TRL2	コンセプト提案段階。
	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 での実験段階。
	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

現状で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る。表13に飛行船のTRL判定を示す。

要素	状況	TRL	
構造	膜材	現状で膜強度は102kgf/cm改良が必要。[3]	TRL3
	プロペラ	従来品で対応可能。	TRL5
推進	モータ	従来品で対応可能。	TRL5
	燃料電池	要求を満たす既製品がある。	TRL4
電源	太陽電池	従来品で対応可能。	TRL5
	水電解装置	要求を満たす既製品がある。	TRL4

#### 4.2. ケーブル

ケーブルについては、強度や耐環境性は橋梁などに使用される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と考える。表14にケーブルのTRL判定を示す。

要素	状況	TRL
強度・剛性	炭素繊維で満足できる。	TRL5
耐環境性	天候による劣化などの問題。従来品で対応可能。	TRL5
安全性	主にメンテナンス方法など。現状では未検討。炭素繊維ケーブルは橋梁などで	TRL1
製造技術	使用されているため数百mは製造実績がある。	TRL3

#### 4.3. キャビン

キャビンに関しては提案段階のものが多く技術成熟度が低いと考える。表15にキャビンのTRL判定を示す。

要素	状況	TRL
移動技術	提案段階。昇降によってケーブルに作用する力は小さいが、ケーブルガイド機構や昇降に伴うシステム全体の運動について研究が必要。	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を想定。	TRL4
居住性	航空機や等の技術を応用。	TRL5
安全性	現状では未検討。	TRL1

### 5. まとめ

本研究では係留型SPF構築方法を提案、構築に必要な設計値の概算し、現状の技術で設計値を満足できるかTRL判定を用いて検討を行った。飛行船やケーブルなどの要素技術はTRLが高いことに比べて、係留型SPFの安全性やメンテナンス等を含めたシステム全体の成立性については未検討項目が多いため今後も検討していく必要がある。これらの項目を検討することで係留型SPFの実現に必要なものが具体的にとなり、係留型SPFの実現に近付けると考える。

### 6. 参考文献

- [1] 奥山政広 柴田真 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，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，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，宇宙航空研究開発機構研究開発資料，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.