

係留型成層圏プラットフォームの概念設計

Feasibility Study of Moored Type Stratospheric Platform

宮崎研究室

立松 裕基

Stratospheric platform(SPF) is often assumed to be operated alone. However, it is not yet been realized due to the difficulty of flight control and development of lightweight fuel cell. As a solution, moored type SPF has been proposed.

In this paper, we developed the numerical software which calculate behaviors of three-dimensional cables. And we examine the design value of airship equipment and mooring cable

1. 緒言

近年、災害監視、環境観測、通信網の拡充などを行うために高度 10~20km の成層圏に飛行船や飛行機を飛行させる研究が盛んになされている。しかし、風が吹いている成層圏で飛行船を定点飛行させることや、太陽電池パネルで発電することが出来ない夜間の電力確保が問題となり実現されていない。[5]

そこで、これらの問題の解決方法として地上と Fig.1.1 に示す成層圏プラットフォーム (Stratospheric Platform, 以下 SPF) を長大なケーブルで係留する係留型成層圏プラットフォームが提案されている。成層圏と地上とを係留することによって位置制御が容易になり、ケーブルを伝うことで地上と SPF との間を物資や人間を昇降させることができるようになると期待されている。

しかし地上と成層圏とを繋ぐような長大なケーブルを持つ構造物には実例がなく、実際に係留型成層圏プラットフォームを実現する上でどのような技術的な課題や問題点があるのかを調べなければならない。また、SPF システム全体の検討は行われている[6]が、人が滞在可能なシステムとするためにもシステムの安全性についても検討しなければならない。

そこで本研究では、係留型 SPF のシステムが成立するための設計値の概算を行った。そして係留型成層圏プラットフォームの実現に向けたケーブルの挙動解析を行うために本研究では 3 次元ケーブルの挙動解析を行う計算ツールの開発も行った。



Fig.1.1 SPF 飛行船[7]

2. 係留型 SPF の概要

2.1 係留型 SPF のシステム

本研究で想定する係留型 SPF は以下の Fig.2.1 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。そして飛行船システム本体が昇降するのではなく、エレベータケーブルに沿って Fig.2.2 に示すキャビンが昇降する。このキャビンに昇降用飛行船を取り付けることによって、成層圏の飛行船まで物資や人を昇降させる。また昇降には昇降用飛行船の浮力によって行なうものとした。また飛行船を係留させるために地上 4 方向から係留ケーブルを係留用飛行船に取り付けている。

そして飛行船には長期間運用を行なうために係留飛行船の上部に太陽光パネルを貼付け、夜間の電源確保のために燃料電池を使用している。また昼間発電した電力で昼間は動力に用い、余剰分で水電解装置を稼働させ飛行船内に貯蔵してある水を分解し水素と酸素を発生させガスタンクに貯蔵しておく。そして夜間に電力が必要となった時に生成した水素と酸素を燃料電池に送ることによって夜間の動力系や搭載機器などを稼働させる。

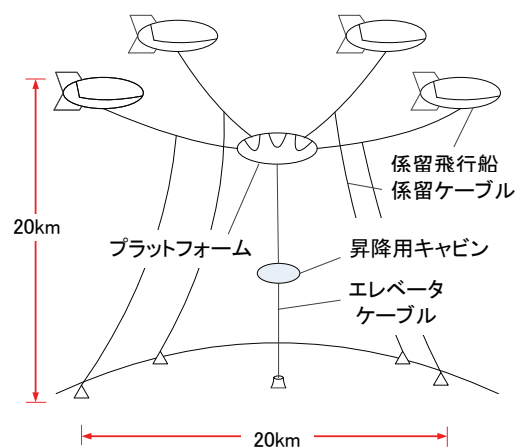


Fig.2.1 係留型 SPF 概要図

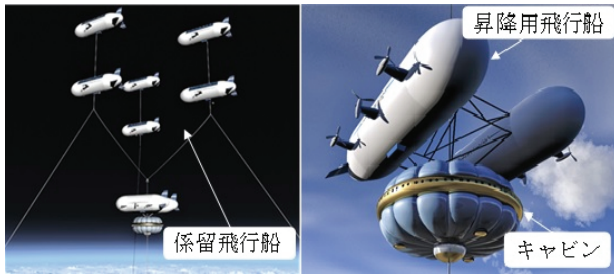


Fig.2.2 係留型 SPF システムを構成する飛行船

2.2 係留型 SPF の構築方法

本研究で想定する係留型 SPF の構築の手順を以下の Fig.2.3 に示す。

【手順 1】 1 本のケーブルを繋いだ飛行船を 8km まで上昇させる。

【手順 2】 8km まで上げた飛行船同士を結合させる。

【手順 3】 結合した飛行船を上空 20km まで上昇させる。

高度 8km 付近では大気密度と風速の積、すなわち風量が地表よりも小さくなるために 8km まで上昇させてから飛行船同士を結合させる。 [6]

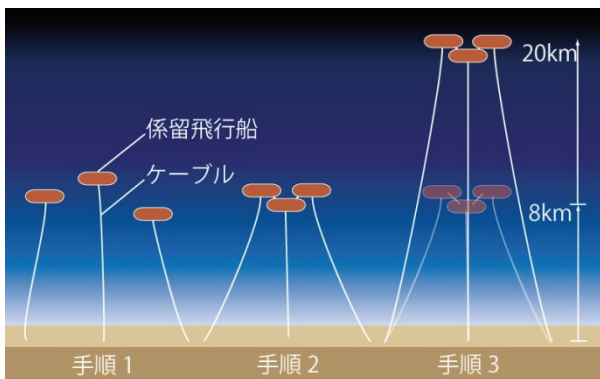


Fig.2.3 係留型 SPF 構築手順

3. 係留型 SPF の設計値

本研究で設計したケーブル、飛行船、電源系、動力系の設計値を 3.1~3.4 章で示す。

3.1 ケーブル設計

ケーブルの挙動解析を行う計算ソフトでは有限要素法を用いた。計算をする際にはケーブルをトラス要素（両端がピンジョイントで連結されているケーブル）として近似して計算を行った。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。使用したケーブルの解析モデルの値を Table.3.1 に示す。

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 法を用いて計算を行った。

Table3.1. 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 ³]	1800
ヤング率[GPa]	294
引張強度[MPa]	5880
ケーブル節点数	50

ケーブルの数値解析を行なった際に用いた標準大気モデルと大気循環モデルを以下の Fig.3.1, Fig.3.2 に示す。 [4]

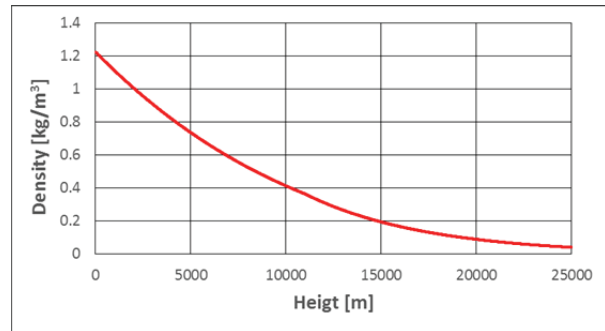


Fig.3.1 標準大気モデル

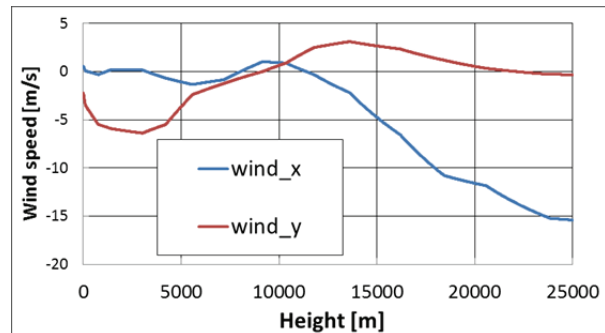


Fig.3.2. 大気循環モデル

次に静解析によって得られたケーブルの応力やひずみについて以下の Table.3.2, ケーブル形状について Fig.3.3 に示す。

Table.3.2 静解析におけるケーブルの状態

項目	係留用	エレベータ用
長さ[km]	22.4	20.0
重さ[kg]	792	703
変位[m]	82.7	43.6
最大ひずみ[%]	0.261	0.219
最大応力[MPa]	767	644

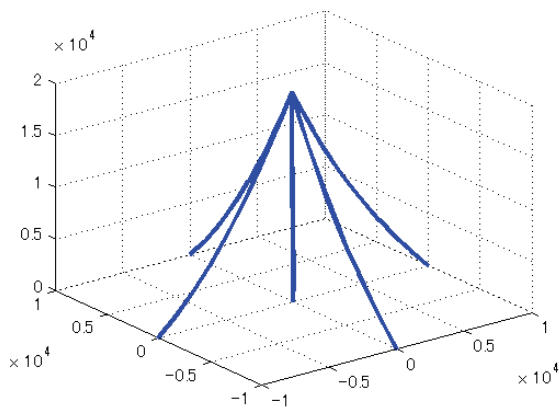


Fig.3.3 係留型 SPF のケーブル静解析

次に4本の係留ケーブルのうちの1本が飛行船との結合部から切断した時のケーブルにかかる応力やひずみについて以下の Table.3.3 に示し、ケーブル先端の時間変化については Fig.3.4、ケーブル切断時のケーブルの形状についてケーブル切断時から300秒毎に Fig.3.5~3.7 に示す。ケーブル切断した400秒後から高度が降下していく事が分かった。

Table.3.3 係留ケーブル切断時のケーブルの状態

項目	係留用	エレベータ用
ケーブル長さ	22.4	20.0
ケーブル重量[kg]	792	703
最大ひずみ[%]	0.674	0.224
最大応力[MPa]	1954	649
時間刻み幅[sec]	0.001	
ステップ数	60000	

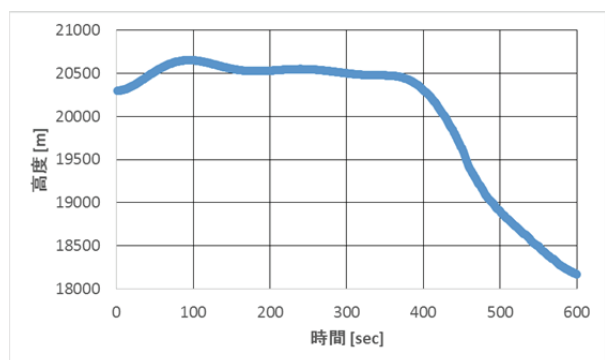


Fig.3.4. 先端座標（高度）の時間変化

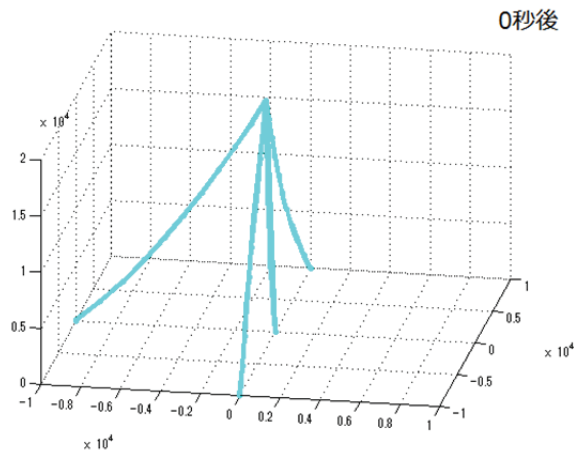


Fig.3.5 係留ケーブル切断時のケーブル形状 (0 秒)

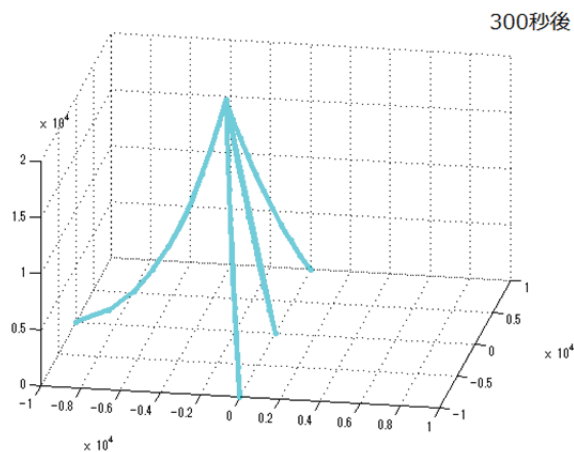


Fig.3.6 係留ケーブル切断時のケーブル形状 (300 秒後)

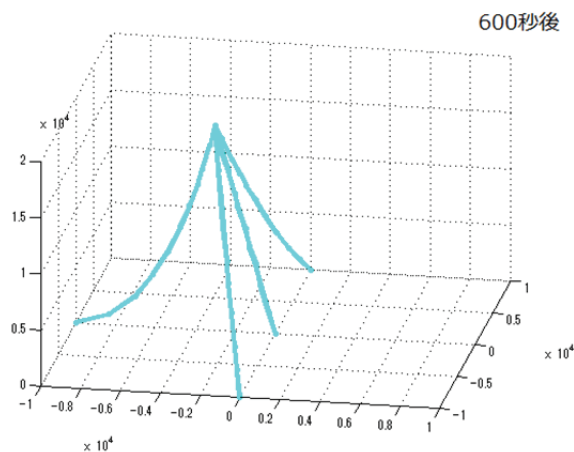


Fig.3.7 係留ケーブル切断時のケーブル形状 (600 秒後)

3.2 飛行船の設計

飛行船には硬式飛行船、軟式飛行船、半硬式飛行船などの種類があるが、今回は飛行船が大型となるので構造重量が低く且つ大きな浮力が得られる軟式飛行船を選定した。また外形は楕円型の飛行船とし、長さを

200m とした。そして飛行船の膜材には内圧と外圧の差圧がかかり、さらに温度変化も 50°C 近くとなるので膜にかかる圧力、膜の強度に関しては文献[3]を参考に設計値を算出した。以下の Table.3.4 に示す。

Table.3.4 飛行船と膜材の設計値

飛行船	長さ[m]	200
	直径[m]	50
	体積[m ³]	262000
	表面積[m ²]	25300
	浮力[kg]	21400
	抗力係数[-]	0.05
	抗力[N]	2047
	必要出力[kW]	30.7
膜材	差圧[Pa]	1471
	安全率[-]	5
	必要強度[kgf/cm]	187

3.3 電源系の設計

電力に関しては太陽光が飛行船に当たっている時には太陽光パネルで発電し、余剰電力分を水電解装置の稼働に割いている。水電解装置、燃料電池に関しては文献[2]を参考に設計した。また太陽光パネルには表面積の約 3 割に太陽光パネルを貼れるものとした。燃料電池、水電解装置、太陽光パネルの設計値を以下の Table.3.5 に示す。

Table.3.5 電源系の設計値

燃料電池 水電解装置	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
	張付面積[m ²]	7600
太陽光パネル	変換効率[%]	10
	太陽光エネルギー密度 [W/m ²]	600
	太陽電池発電量 [kW]	455

3.4 動力系の設計

飛行船にはプロペラと電気モータを用いて推力を得る。文献[1]を参考に飛行船が成層圏の環境で滞空でき

る設計値を算出した。Table.3.6 にプロペラと電気モータの設計値を示す。

Table.3.6 プロペラと電気モータの設計値

プロペラ	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
電気モータ	モータ効率[-]	0.85
	モータトルク[Nm]	234
	モータ出力[kW]	13.0

4. 結 言

本研究では係留型 SPF の設計値の概算、係留用ケーブルの挙動解析を行った。ケーブル切断時の挙動解析を行い、ケーブルにかかる応力を算出した。ケーブル切断時に残りのケーブルにかかる最大応力は炭素繊維の引張強度よりも小さい値となる。

今後は係留型 SPF のシステムの成立性、メンテナンスなど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なり、係留型 SPF の実現に近付けると考える。

5. 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] 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.
- [4] 気象庁「循環場のテキストデータ」：
http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/diag/db/hist_txt.html
- [5] 小松敬治
成層圏プラットフォーム飛行船の技術課題
第 38 回飛行機シンポジウム講演集 1B1, 21-24, 2000
- [6] 野口 拓人：
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，日本大学 修士論文 2013
- [7] JAXA デジタルアーカイブス：
http://jda.jaxa.jp/search.php?lang=j&page=&library%5B%5D=1&library%5B%5D=2&category1=&material_type_id=&keyword=%90%AC%91w%8C%97&keyword_radio=AND&material_no=&page_pics=50