

# 太陽光発電ケーブル支持構造の耐風安定性の検証

## AERODYNAMIC STABILITY OF A SYSTEM SUSPENDING SOLAR PANELS

岡田 幸児\* 橋 肇\* 細見 雅生\*\* 岩井憲一\*\*  
 Koji Okada Hajime Tachibana Masao Hosomi Iwai keiichi

太陽光発電は、環境に配慮した再生可能エネルギーとして着目され、普及が進んでいる。太陽光発電モジュールは、各種建築物の屋根部分の他、専用フレームの上に設置するなど様々な形で配置されている。専用フレームを用いる場合、架台は簡易なフレームを用いるが、そのスパンは5m程度であり設置部に平坦な敷地が必要である。本構造では、上記のスパンの制約をより長くすることを目指して、ケーブルで太陽光パネルを吊り下げる構造を提案した。この形式の採用により、支柱間隔に制約のある場合や高低差のある地形に対して太陽光発電モジュールの設置が可能である。本稿では、このようなケーブル構造に対し、風速および風向が複雑な挙動となる自然環境下においても問題ないことを確認するため、強風が発生する頻度の高い地域である千葉県富津市において、本構造の計測を行った結果について報告する。

キーワード：加速度計測，高速フーリエ変換，加振試験，不規則振動

### 1. はじめに

再生可能エネルギーのひとつである太陽エネルギーを利用した太陽光発電は、環境に配慮したシステムとして普及が進んでいる。太陽光発電のモジュールは各種建築物の屋根上に配置される他、専用のフレームの上に設置するなど様々な形で配置される。太陽光のモジュール自体の重量は、タイプにもよるが12kg/m<sup>2</sup>程度と軽く、また建設コストの関係から架台はシンプルなものが多く、支柱間のスパンは5m程度と比較的短いケースが多い。本論文で提案した構造では、大きなスパンを実現するため、ケーブルで太陽光パネルを吊り下げる構造を採用し、支柱間隔に制限がある場合や、高低差のある地形に対して太陽光発電の設置を可能としている。このようなケーブル構造に対し、風速および風向が複雑な挙動となる自然環境下においても耐風安定性に問題がないことを確認するため、強風が発生する頻度の高い地域である千葉県富津市の海岸沿いに位置する弊社工場敷地内に本構造を設置し、計測を実施した<sup>1)</sup>。設置位置は内房の中間部海岸線に位置する強風地域で、建築基準法に提示される設計基準風速は38m/sであり、全国と比べても高い風速となっている。図-1に本構造の一般図を示す。

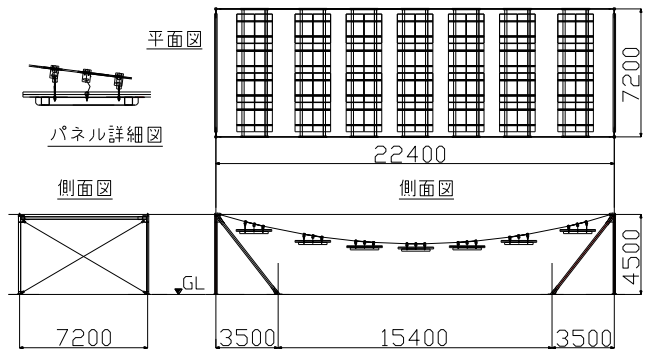


図-1 一般図

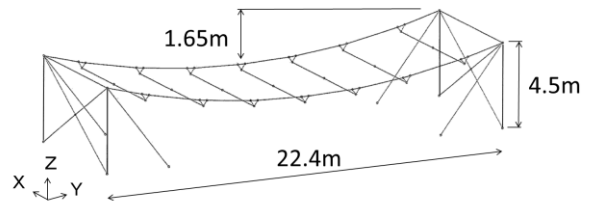


図-2 構造モデル図

り下げており、ケーブル支間長は22.4mとなっている。支柱の高さ4.5mであり、ケーブルのサグは1.65mとしている。設計においては、主構造部材がケーブル部材であり、それを支持するフレームが塔と同等であると考えられることから、小規模吊橋指針<sup>2)</sup>を参照し、ケーブルの張力計算や定着部の設計を行っている。また、荷重お

### 2. 構造概要および計測概要

#### 2.1 構造概要

本構造は、支柱4本に対し、X方向（短手方向）を門型構造とし、Y方向（長手方向）を自旋式ケーブル構造としている。このケーブルに太陽光パネルを等間隔に吊

\* 梁営業本部 橋梁技術研究室  
 \*\* 環境事業部

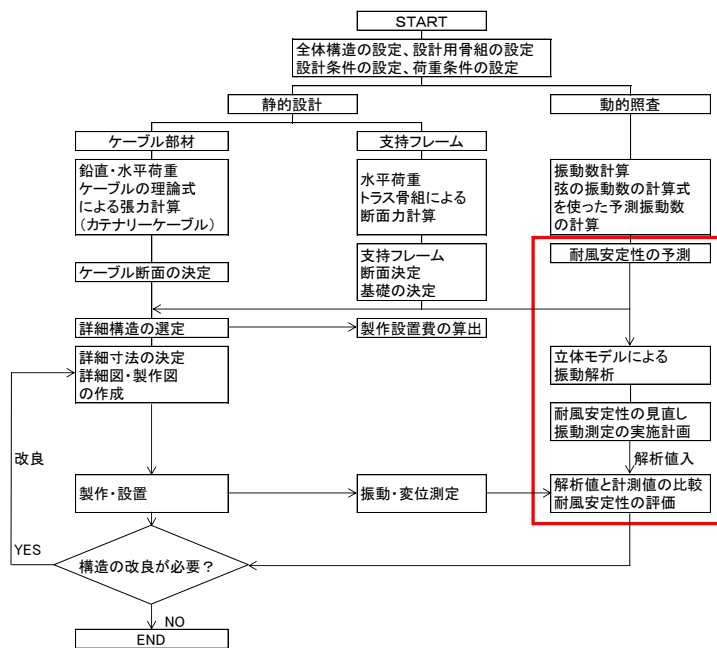


図-3 設計フロー

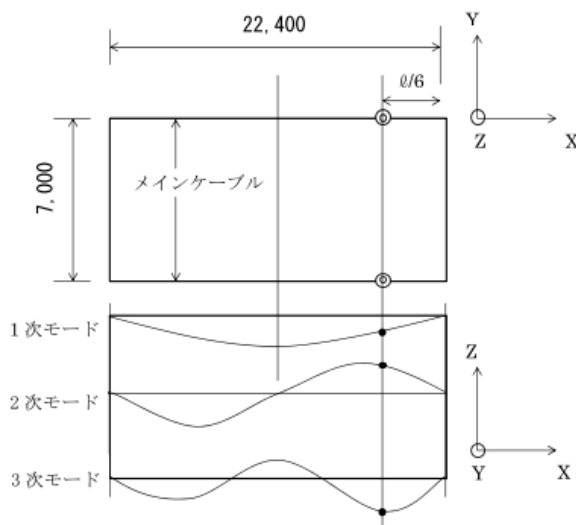


図-4 想定モードおよび計測位置

および許容応力度（制限値）は建築基準法<sup>3)</sup>に準拠している。

太陽光パネル取付構造部は耐風性を配慮した扁平な形状とし、耐風索や浮上り防止索は車両などの通行が目的でないことと経済性を考慮し、設けないことを基本としている。図-2に構造モデル図を示し、図-3に設計フローを示す。今回の構造形式は太陽パネルの架台としては新しい形式であり、風によって振動しやすい構造であると考え、耐風安定性と併せて照査する方針とした。本報告に記載した箇所を赤囲いで示している。

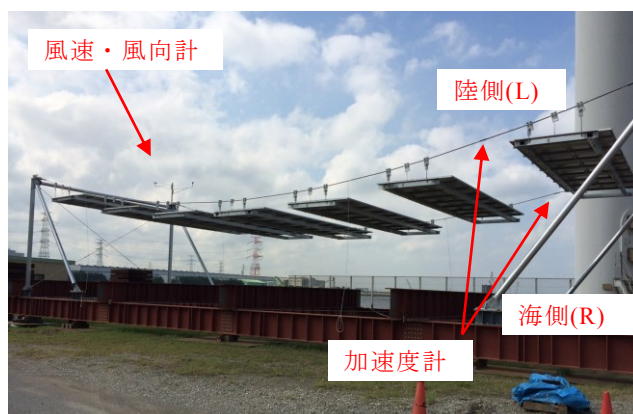


写真-1 構造体および計測器位置

## 2.2 計測概要

本構造物に対する計測は、両側のケーブルに端部からL/6点に取り付けた小型3軸加速度計を用いて行った。加速度計の取り付け位置については、複数のモードが確認できるように、事前に行った振動解析により鉛直方向に卓越した低次のモードの振幅が大きくなる位置としている。図-4に想定モードと計測位置を示す。計測に当たっては、加振試験により基本的な振動特性を明らかにするとともに、支柱上部に設置した風向計及び風速計にて風況を確認し、加速度と同期させることで自然環境下における挙動を確認することとした。なお、自然環境下における加速度の計測については加速度計に0.2G以上の値が検出されてから、約200秒をサンプリング間隔50msecで計測することとしている。写真-1に実際の構造体および各種計測位置を示す。

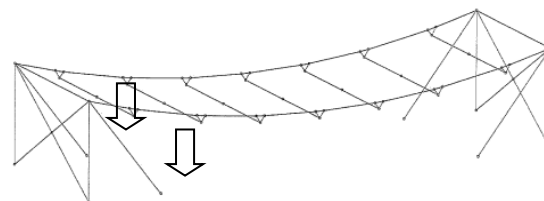
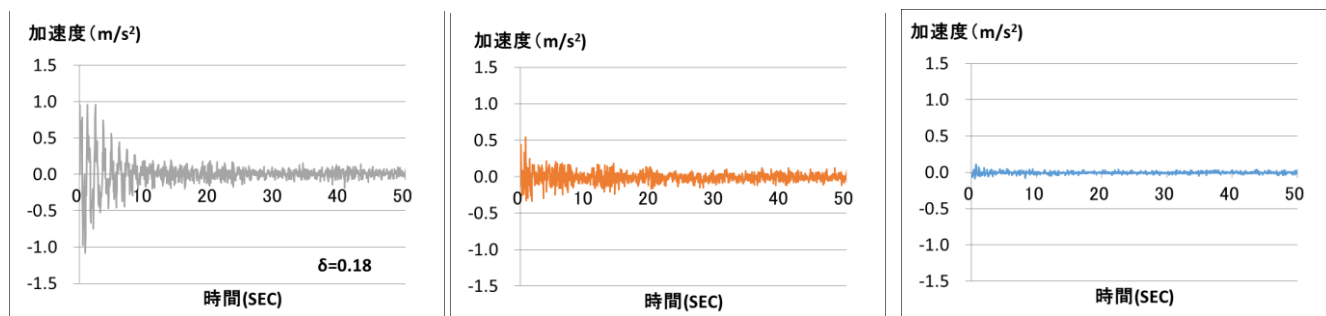


図-5 加振モデル図(鉛直振動)

## 3. 加振試験

本計測では、まず本構造の基本的特性を明らかにするため、加振試験を行った。図-5に加振モデルを示す。加振は、端部からそれぞれのケーブルのL/4点に取り付けたロープを一定方向に引くことにより行った。

図-6に両側のロープを同時に上下に引いた上下加振に



a) 鉛直方向                                      b) 水平方向                                      c) ケーブル軸方向

図-6 加速度波形

より得られた加速度波形を示す。加速度波形より概ね、10秒前後で振動が収まっていることが確認できる。水平方向および軸方向にも振動は計測されているが鉛直と比較してレベルは低く、振動が継続している様子も確認できない。この波形より求めた対数減衰率は、鉛直方向で $\delta=0.18$ であり、十分な減衰性能を持っていることが確認できた。図-7に計測された加速度波形から高速フーリエ変換を用いて算出されたパワースペクトルを示す。卓越している周波数は鉛直方向の0.84Hzおよび1.70Hzであった。この周波数は、表-1に示す事前に行った振動解析の結果ともほぼ一致しており、解析モデルおよび加速度計測のサンプリング間隔および測定時間が妥当であることが確認できた。図-8,9にそれぞれの周波数でのモードを示す。

表-1 振動解析との比較

モード	周波数(Hz)	
	解析値	計測値
逆対称1次	0.79	0.84
対称1次	1.10	-
逆対称2次	1.45	-
対称2次	1.65	1.70

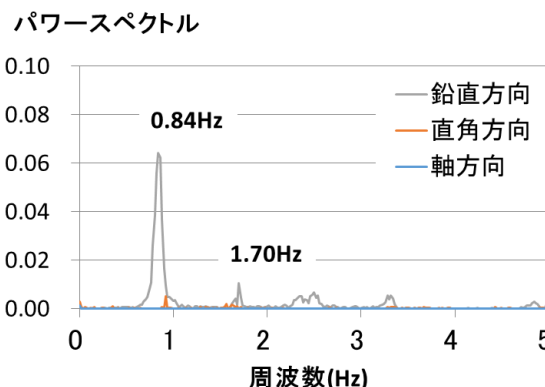


図-7 加振試験における加速度のパワースペクトル

#### 4. 自然環境下における計測

計測を行った富津市の海岸沿いは強風が発生する頻度の高い地域である。2015年10月から翌年6月までの日瞬間最大風速の計測結果を圧縮して図-10に示す。風速

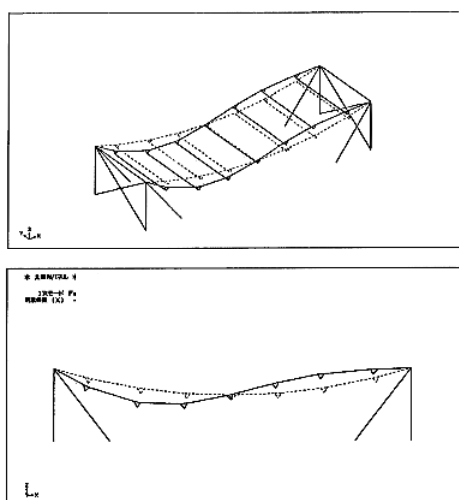


図-8 周波数0.79Hzの振動形状  
逆対称1次モード

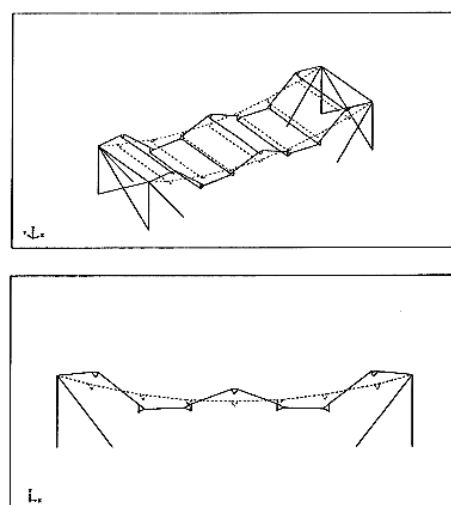


図-9 周波数1.65Hzの振動形状  
対称2次モード

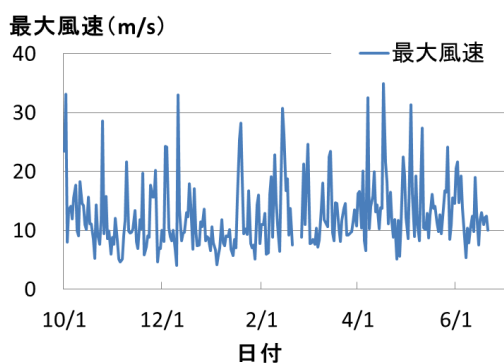


図-10 2015.10～2016.6 風速測定結果

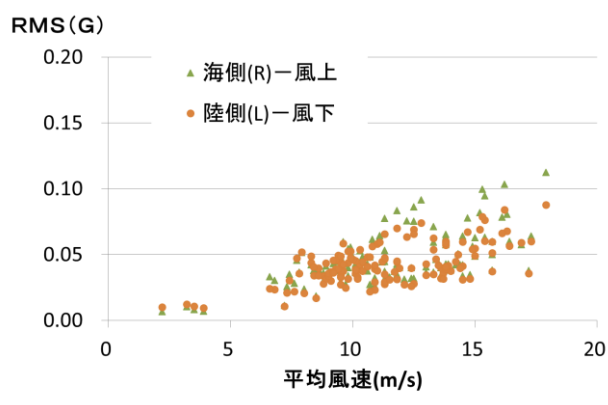


図-11 平均風速と鉛直方向 RMS (270±30°)

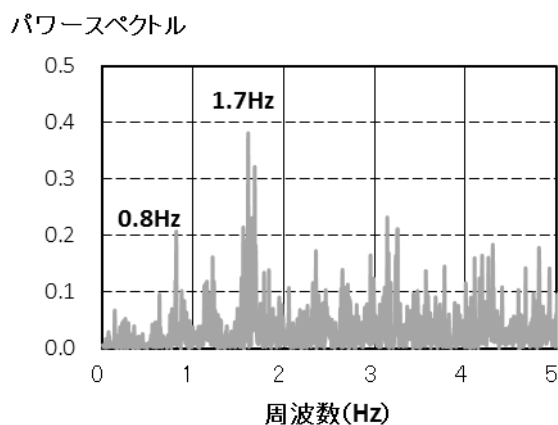


図-12 自然環境下における加速度の鉛直方向パワースペクトル

は最大で 35m/s を記録しているが、強風時の目視観測においても異常な振動は確認されておらず、本構造に特に問題は生じていない。

図-11 に計測で得られた鉛直方向の振動の RMS (二乗平均平方根) と計測区間内(約 200 秒)の平均風速の関係を示す。ここでは、風向の条件を構造体のほぼ直角方向(約 240°)に限定している。風速が強くなるに従い RMS の値は大きくなっていくが、この挙動の特徴から、風の乱れによる不規則振動(パフエッティング)であることを示しており、フラッターやダイバージェンスなどの不安定振動は発生していないことがわかる。次に、計測によって得られた加速度波形より算出した鉛直方向のパワースペクトルの一例を図-12 に示す。実際の振動は複雑な挙動を示すため、様々な振動の影響があるが、加振試験と同様に 0.8Hz, 1.7Hz 前後で卓越する周波数の影響が確認できる。また、各方向の加速度記録よりスペクトル上での積分を行って振動振幅の RMS を算出し、この値を  $\pi/2$  倍して平均求めた片側振幅を表-2 に示す。振幅は鉛直方向が卓越しており、強風時でも 13mm 程度であった。振動時の応力についても振動解析の結果をもとに推定し、疲労強度上からも余裕があることを確認している。

### 5. まとめ

本計測により、強風の発生する頻度の高い地域においても、本構造が高い耐風性能を有していることを確認することができた。また、強風時の不安定現象であるダイバージェンスは発生せず、机上検討も含めて安定していることが確認できた。

### 参考文献

- 1) 岡田幸児, 橋肇, 細見雅生: ケーブル式太陽光発電設備の耐風安定性の計測, 土木学会第 71 回年次学術講演会 講演概要集, I-579, 2016.9
- 2) 社団法人日本道路協会, 小規模吊橋指針・同解説, 1984.4
- 3) 建築基準法, 1950.5

表-2 推定平均片側振幅

平均風速	平均風向	平均加速度(m/s <sup>2</sup> )			推定片側振幅(mm)		
		軸	直角	鉛直	軸	直角	鉛直
5.4	47.5	0.0	0.1	0.1	0.2	1.9	0.8
9.9	248.7	0.1	0.3	0.4	0.9	3.7	3.9
14.9	240.0	0.2	0.5	0.7	2.1	5.9	9.0
19.2	233.8	0.2	0.6	0.9	2.5	6.6	12.8
22.1	240.1	0.3	0.8	1.2	3.3	7.6	12.6