

# 断路器地震被害メカニズムの解明と耐震性向上策

■ 大山 友幸

Tomoyuki Oyama

■ 神田 一彦

Kazuhiko Kanda

■ 永田 清志

Kiyoshi Nagata

## 1 はじめに

近年わが国で観測した最大規模の地震として、東北地方太平洋沖地震および熊本地震がある。これらの地震により変電所の設備が損壊する事象がみられ、その中には断路器の損壊も含まれた。いずれも設計基準を大幅に上回る地震動での損傷であるが、本稿では2016年の熊本地震で被害のあった、240 kVパンタグラフ形断路器損壊の原因究明および対策を実施した取り組みを紹介する。

## 2 被害状況

2016年の熊本地震において、10台の240 kVパンタグラフ形断路器が被害を受け、30相のうちの25相分が損壊した。その被害様相は25相分の導電部の損壊と3相分のがいし装置（ひだ欠けのみは除く）の損壊であった。損壊した機器はいずれもブレードが上部アルミパイプ母線（以下、上母線という。）に接続された投入状態であり、開放状態での損壊はなかった。当該器の開閉状態および部位名称を図1に示す。導電部は、主にブレードヒン

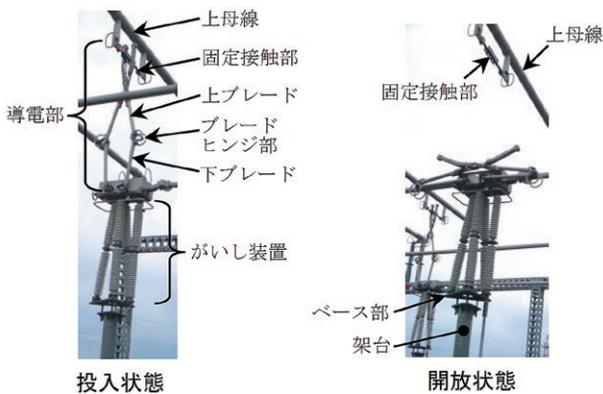


図1 開閉状態および部位名称

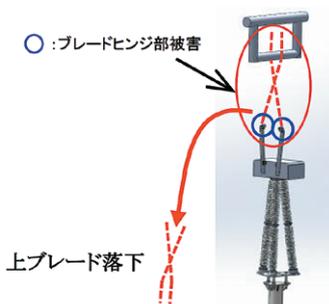


図2 ブレードヒンジ部の被害

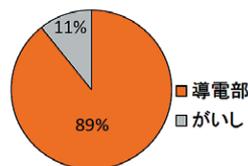


図3 損壊部位の割合

ジ部が破損し上ブレード部が脱落する事象がほとんどであった（図2参照）。機器損壊部位の割合を図3に示す。

## 3 破損部の構造および検証方法

### 3.1 破損部の構造

パンタグラフ形断路器の導電部は、図4(a)のとおり長身であるため、一般的に弱点部位は下ブレードの下部と考えられる。しかし、今回の破損部の状況は、導電部の中腹となるブレードヒンジ部の破損が多かった。同部は、上継手と下継手をピン接合する構造である。

そこで今回の導電部破損は、ピン拘束方向に大きな地震動が入り継手部が破損したものと仮説を立て検証を進めた。ブレードヒンジ部の構造および部位名称を図4(b)に示す。

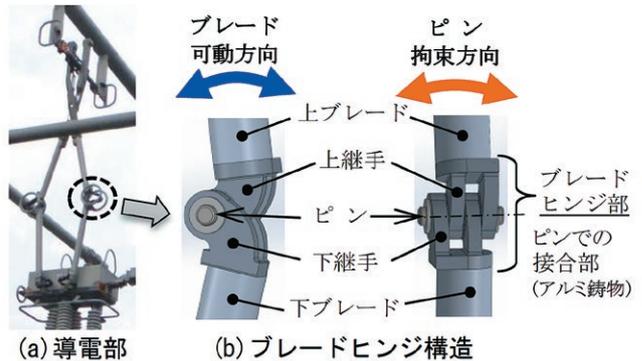


図4 パンタグラフ形導電部構造

### 3.2 過去の開発試験および今回の特性データ採取実験

当該器について過去の開発試験では、実加振試験による耐震性評価を実施している。当時はデータ記録装置の都合上、測定点数に上限があったため、弱点部と考えられる上位数個所の耐震強度評価を設計基準  $3 \text{ m/s}^2$  共振正弦3波で実施し、その結果ががいし部が最弱点部となった。

なお、過去の開発試験ではブレードヒンジ部の上継手・下継手個所の強度は確認していなかった。さらに、耐震設計基準に対する検証にとどめ、設計基準を超えた機器破壊までの過酷加振を実施しなかったこともあり、真の最弱点部の把握ができていなかったことが分かった。

そこで今回、熊本地震での被害状況を踏まえた解析による耐震強度検証を行うため、まず、当該器の特性データ採取実験を行った。振動するブレードの挙動を詳細に把握するために測定点数は開発試験時の2倍以上とし

た。なお、同実験は供試器のがいし頂部をワイヤで引っ張り切断することで強制振幅させる方法とした。過去の開発試験および今回の特性データ採取実験データ測定点を図5に示す。

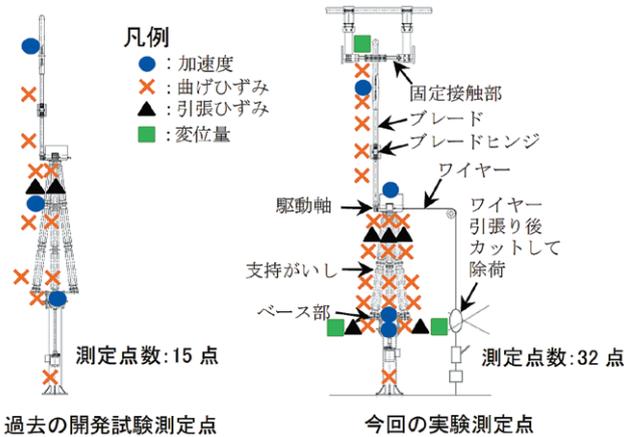


図5 開発試験および機器特性データ採取実験の測定点

### 3.3 解析による破損事象の検証

解析モデル作成においては、実器の剛性に合うよう必要に応じシェル要素を用い、ばね設置箇所・各所ばねの回転設定・ばね定数を調整し細部まで合わせ込み、実験の機器挙動をより詳細に模擬した。この精緻化解析モデルに熊本地震推定波を入力して、解析による各部位ごとの応答結果から当該器の発生応力分布を調査し損壊事象の検証を行った。解析は、熊本地震での被害状況を踏まえ断路器投入状態で実施し、ブレードが上母線部固定接触部と“接触状態あり”および地震により接触部が離脱した“接触状態なし”の二つの条件で行った。波形入力方向は、現地条件に合わせて熊本地震推定波のNS波/X, EW波/Y, UD波/Z波形を同時に入力し検証を行った。解析モデル条件を図6に示す。

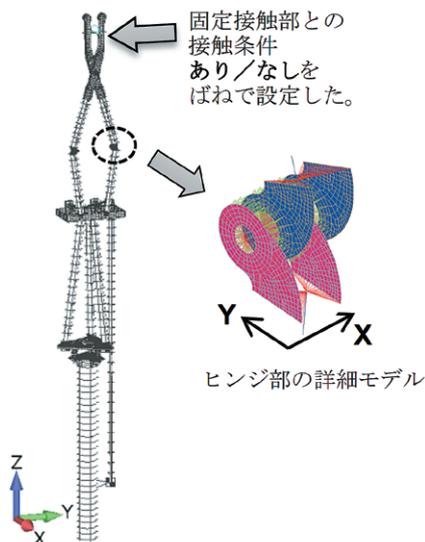


図6 精緻化解析モデル

## 4 損壊メカニズムの解明

精緻化解析モデルで実施した地震応答解析の結果を表1に、ブレード部発生応力分布を図7に示し、熊本地震推定波の加速度応答スペクトルグラフを図8に示す。

表1 地震応答解析の結果

入力波形		熊本地震想定波	
入力方向		X + Y + Z	
固定接触部との接触状態		あり	なし
上ブレード	SF / f	25/3.3 Hz	3.3/2.0 Hz
ブレードヒンジ	SF / f	80/3.3 Hz	0.85/2.0 Hz
下ブレード	SF / f	21/3.3 Hz	1.5/2.0 Hz
支持がいし	SF / f	6.1/3.3 Hz	1.4/3.2 Hz

凡例 SF : 安全率の意, f : 固有振動数の意

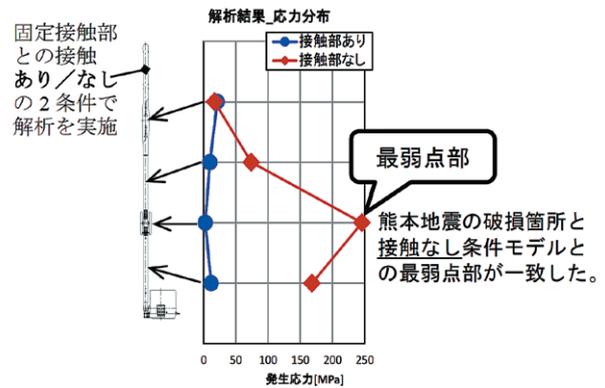


図7 ブレード部の発生応力分布

熊本地震推定波を入力した解析結果からブレードと固定接触部との接触状態がなし条件では、ブレードヒンジ部の継手部が最小安全率0.85となり安全率1.0を切る結果となった。この結果は、熊本地震による破損事例のブレードヒンジ部が破損した例と一致した。ここで、図8に示す加速度応答スペクトルを確認すると、ブレードヒンジ部のX方向(図6参照)に入力したNS波は、接

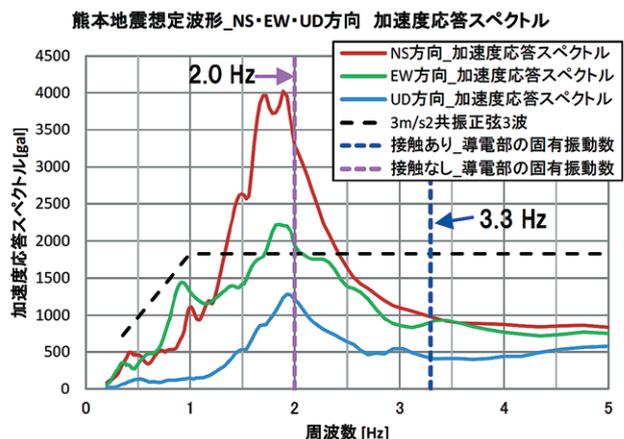
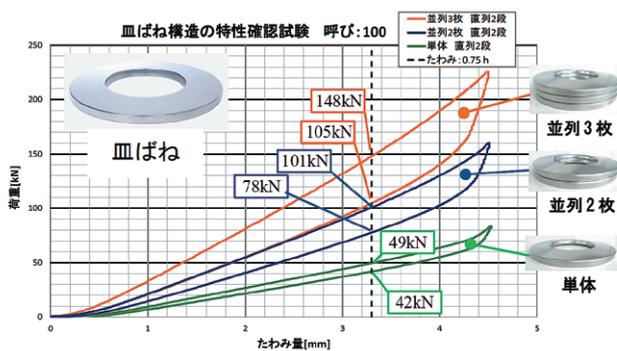


図8 熊本地震推定波の加速度応答スペクトル

触状態なしでのブレード部固有振動数に相当する 2.0 Hz 近辺に大きな応答を示しており、その応答は設計基準 1,830 Gal の約 1.8 倍に相当する。このことから、地震によって接触部離脱が起これ、ブレード頂部の制約がなくなることでブレード固有振動数が 3.3 Hz から 2.0 Hz に変化し、2.0 Hz 近辺の NS 波の地震波と共振して、ブレードヒンジ部が破損に至ったものと推定できる。

## 5 耐震性向上策

耐震性向上策としてパンタグラフ形断路器の振動を抑制するため、高い減衰性を持つ皿ばね装置を断路器ベース下部に搭載することを検討した。皿ばね単体実験にてばねの並列枚数を多くするほど、ヒステリシスループが大きくなる傾向が確認できた。ヒステリシスループの加荷値と減荷値を図 9 に示す。並列枚数を多くすることで減衰性の増加が期待できるが、今回のパンタグラフ形断路器の耐震性向上策は、既設に適用するという条件があったため装置取付けスペースに制約があり、その制約の下、皿ばねの寸法および枚数を決めることとなった。精緻化解析モデルに皿ばね枚数別ごとでそれぞれのばね条件を設定し、おのおの熊本地震推定波での解析で耐震強度を検証した結果、皿ばね並列枚数は 3 枚に決定した。なお、同条件での耐震解析結果は、ブレードヒンジ部の安全率が 1.0 となり、皿ばね装置の減衰効果によって、耐震性が向上することが確認できた。今回の損壊メカニズムの解明および耐震性向上策のプロセスを図 10 に示す。



たわみ量 0.75h : 設計の目安値(使用値)を示す。

図 9 皿ばねのヒステリシスグラフ

## 6 今後の展開

断路器は、がいし装置が機器の最弱点部となるよう製作しており、パンタグラフ形断路器についても同様で、開発試験でもそのことを確認していた。しかし今回、熊本地震損壊実例および地震応答解析を用いた詳細な耐震性評価の結果、同断路器の最弱点部はがいし装置ではなくブレード部であることが確認され、これは新たな知見

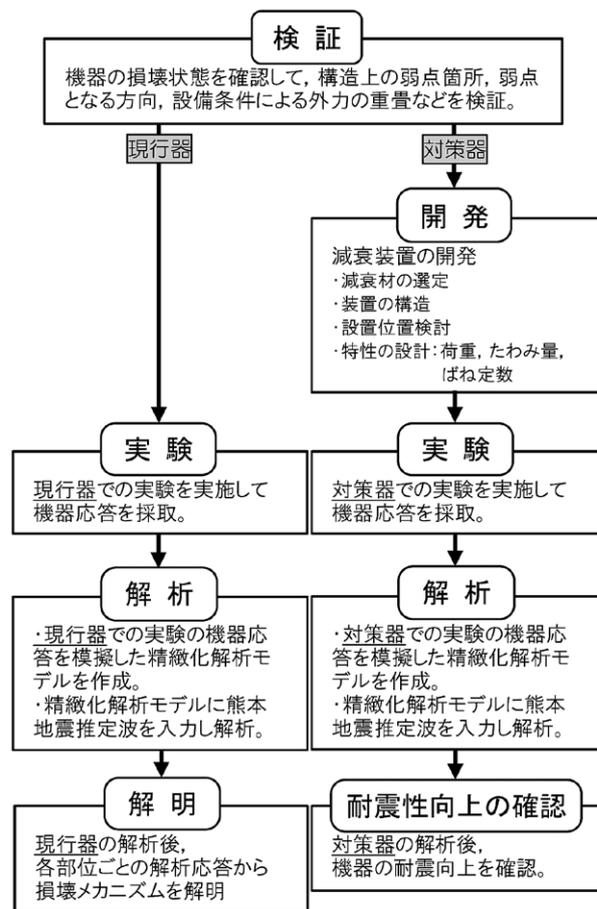


図 10 損壊メカニズムの解明・耐震向上策のプロセス

となった。今後は、さらに振動抑制効果の高い装置の検討を進め、既設器に適用可能かつ取付け作業を容易に行える構造も考慮した製品化に向けて研究を進めていく。

### 謝辞

本稿は、九州電力株式会社との委託研究の成果をまとめたものである。その中の熊本地震推定波は、一般財団法人電力中央研究所よりご提供いただいた。本研究にあたり多大なご協力を頂き心より感謝の意を表す。

### 参考文献

- 一般社団法人電気学会平成 30 年電気学会全国大会：永田清志他「パンタグラフ形断路器損壊メカニズムの解明および耐震性向上策」
- 一般社団法人日本電気協会日本電気技術規格委員会：「変電所等における電気設備の耐震設計指針」, JEAG5003-2010

### 大山 友幸

電力プラント事業本部 断路器製造部 設計グループ 所属

### 神田 一彦

技術開発本部 技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

### 永田 清志

電力プラント事業本部 断路器製造部 設計グループ 所属