

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 11 R 6
提出年月日	令和 4 年 1 月 26 日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護対策設備の強度計算に関する 飛来物のオフセット衝突について

1. 文章中の下線部は、R 5 から R 6 への変更箇所を示す。
2. 本資料（R 6）は、令和 3 年 9 月 7 日に提示した「竜巻防護対策設備の強度計算書に関する飛来物のオフセット衝突について R 5」に対し、ヒアリングにおける指摘事項であるワイヤロープに対する設計飛来物衝突時の挙動の説明について、記載内容の見直し及び添付「ワイヤロープに飛来物が衝突した際の飛来物の挙動について」の新規追加並びに記載内容の適正化を図ったものである。

目 次

1. 概要	1
2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー	1
3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー	8
4. オフセット衝突時の衝撃荷重	12
5. 参考文献	12

添付1 ワイヤロープに飛来物が衝突した際の飛来物の挙動について

1. 概要

本資料は、再処理施設に対する第1回設工認申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下の添付書類に示す竜巻防護対策設備の強度計算の方針を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-4-2 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」
- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-5-2 竜巻防護対策設備の強度計算書」

本資料では、再処理施設の飛来物防護ネットに対する飛来物の衝突位置として、中央位置からずれた（以下「オフセット」という。）衝突の影響について補足する。

なお、本資料で示す飛来物防護ネットに対する飛来物のオフセット衝突の影響については、今回申請対象以外の再処理施設に係る飛来物防護ネットに対しても適用するものである。

2. 展開方向[※]オフセット衝突時吸収エネルギー

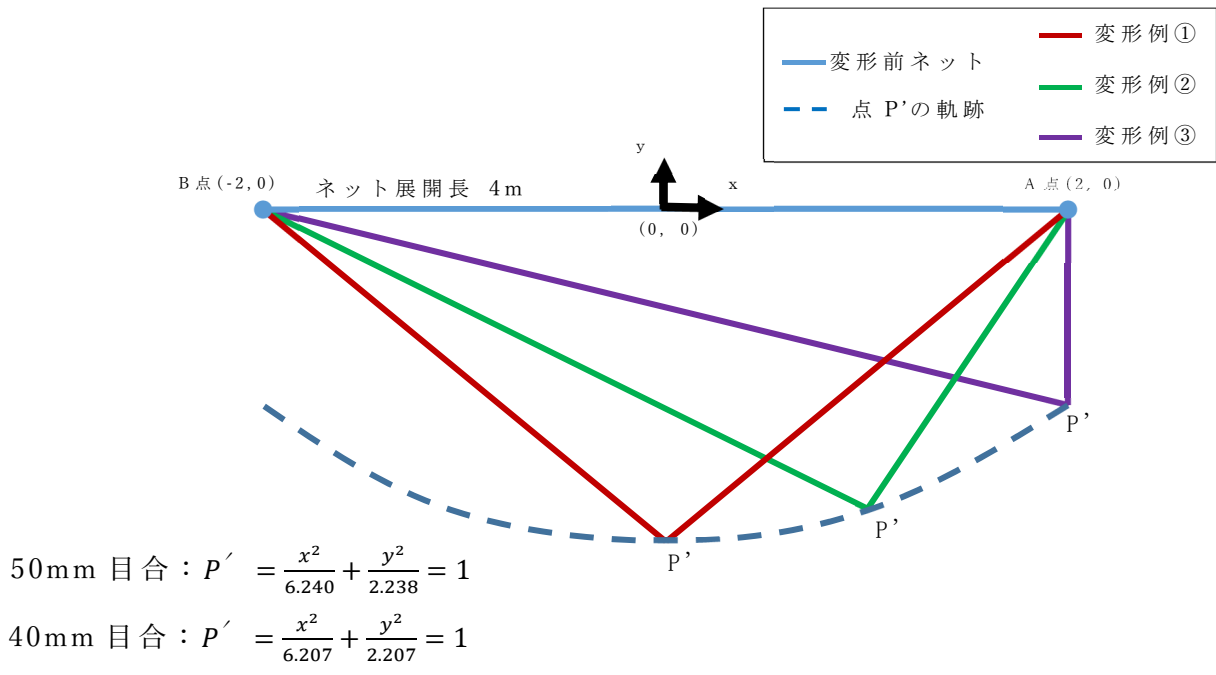
飛来物が防護ネットに対して展開方向オフセット位置で展開方向のネット交点列1列と衝突した場合の展開方向のネット交点列1列の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電力中央研究所（以下「電中研」という。）報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法（総合報告：O01）」及び「竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案（研究報告：N13014）」を参考に、飛来物が展開方向オフセット位置で展開方向のネット交点列1列と衝突した場合の飛来物とネットの挙動を以下のように仮定する。

- ① ネット展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- ② 衝突後の飛来物とネットは衝突点で一体となって推移する。
- ③ 最大変形時のネット全長は破断時展開方向ネット長さとする。

以上の仮定から、破断時のネットの全長は飛来物の衝突位置によらず、破断時展開方向ネット長さで一定となり、最大変形時の衝突位置点（P'）の軌跡は、第2-1図のとおり楕円形状となる。

※ネットはらせん状の硬化線を3次元的に編み込んだ構造であり、硬化線の軸方向を展開方向という。

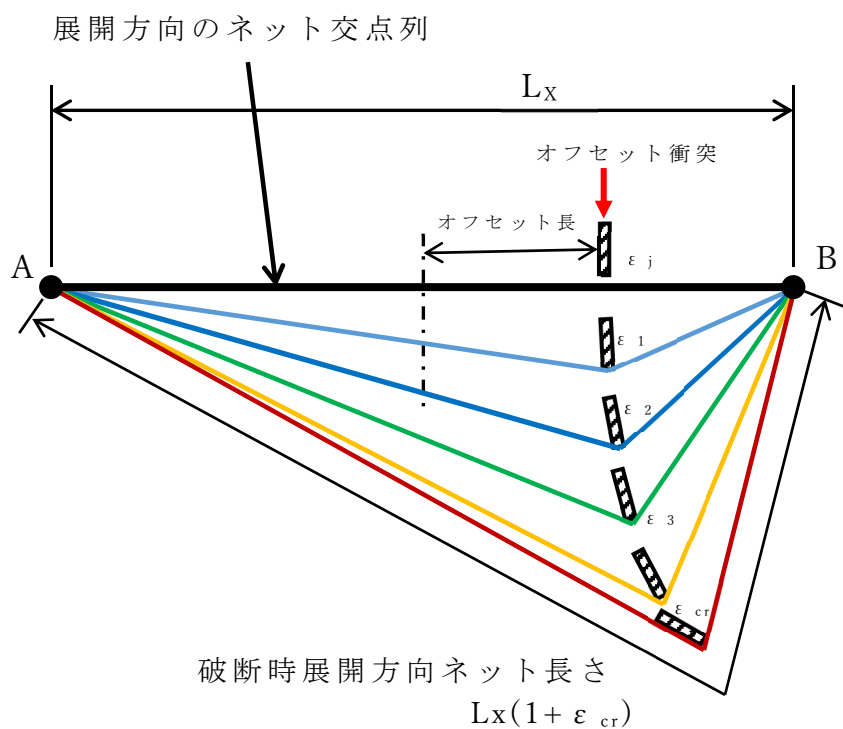


第 2 - 1 図 展開方向のネット交点列 1 列の衝突点 (P') の軌跡

ネットは変位制御により評価可能であることから，第2-2図に示す交点列の伸び率 (ε_j) を0から破断伸び率 (ε_{cr}) まで微小変形を積み重ねさせて，衝突点の移動量と交点列の張力から吸収エネルギーを算出する。ここで，破断伸び率 (ε_{cr}) は，添付書類「VI-1-1-1-2-5-2-1 飛来物防護ネットの強度計算書」に記載の評価条件のネット1目合対角寸法 a とネット1目合の破断変位 a_s より，以下のとおり，求められる。

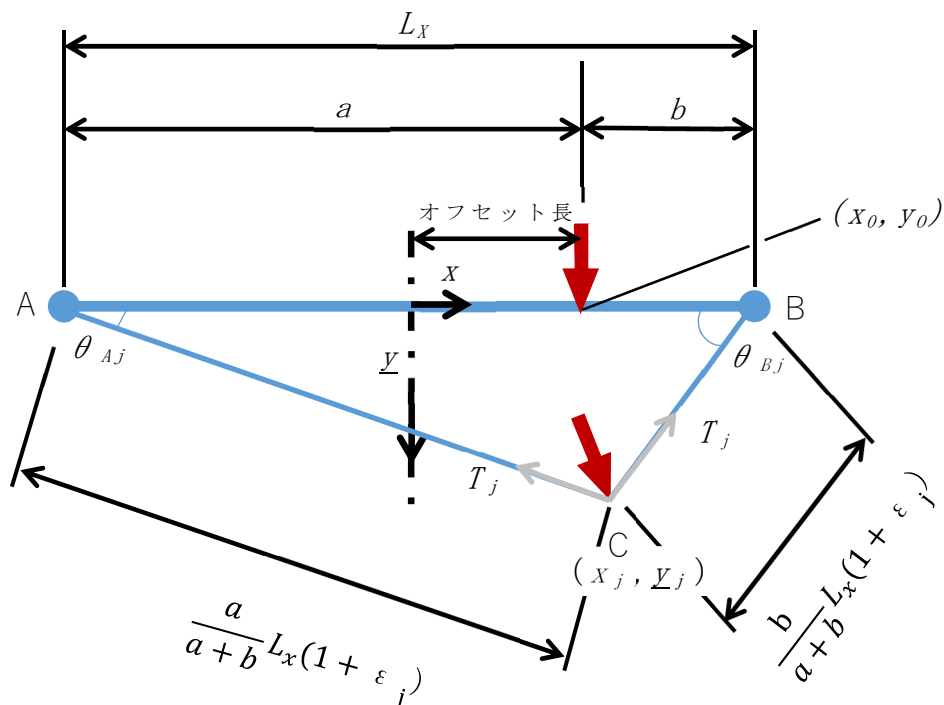
$$\text{目合 } 50\text{mm} : \varepsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{17.6}{70.7} \approx 0.25$$

$$\text{目合 } 40\text{mm} : \varepsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{13.9}{56.6} \approx 0.25$$



第2-2図 展開方向オフセット衝突時の展開方向のネット交点列1列の変位挙動図

また、第2-3図に展開方向にオフセット衝突した場合を想定した伸び率 (ε_j) 時のネット交点列1列の変形状態の模式図を示す。



第2-3図 展開方向オフセット衝突の交点列1列の変形状態の模式図

添付書類「VI-1-1-1-2-5-2-1 飛来物防護ネットの強度計算書」に記載の評価条件のネット1目合対角寸法 (a) 、ネット1目合の等価剛性 (K) とすると、展開方向のネット交点列1列の剛性 (K_x) 、展開方向のネット交点列1列の張力 (T_j) は以下のとおりとなる。

$$K_x = \frac{K}{L_x/a}$$

$$T_j = K_x L_x \varepsilon_j = \frac{K}{L_x/a} L_x \varepsilon_j$$

伸び率が $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$ 間で微小量だけ増加すると、衝突点の座標も (x_{j-1}, y_{j-1}) から (x_j, y_j) と微小量だけ移動し、x方向変位 Δx_j 、y方向変位 Δy_j はそれぞれ $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$ 、 $\Delta y_j = y_j - y_{j-1}$ となる。このとき、展開長を $a : b$ で分割する点を衝突位置とし、伸び率 (ε_j) 時の衝突点の座標を (x_j, y_j) 、A点、B点のたわみ角を $(\theta_{Aj}, \theta_{Bj})$ とすると、伸び率 (ε_j) 時の展開方向のネット交点列の張力 (T_j) を x方向成分と y方向成分に分割でき、それぞれ x方向反力 H_j 、y方向反力 V_j となる。よって、伸び率が $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$ 間で微小量だけ増加した際の吸収エネルギーの増分 (ΔW_j) は、以下のとおりとなる。

$$H_j = T_j \cos \theta_{Aj} - T_j \cos \theta_{Bj}$$

$$V_j = T_j \sin \theta_{Aj} + T_j \sin \theta_{Bj}$$

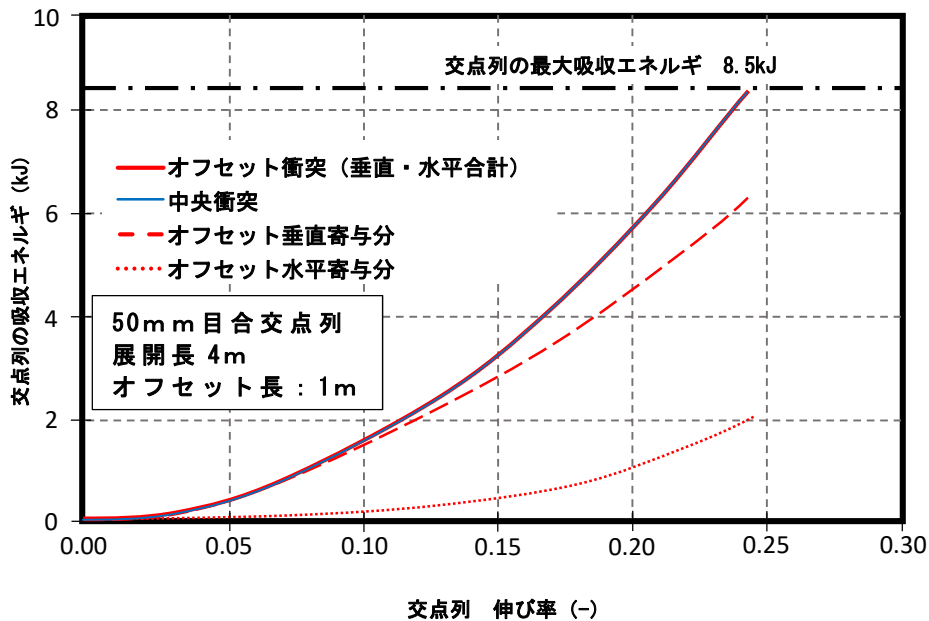
$$\Delta W_j = \frac{1}{2}(H_{j-1} + H_j) \times \Delta x_j + \frac{1}{2}(V_{j-1} + V_j) \times \Delta y_j$$

以上より， ネット交点列 1 列の限界吸収エネルギー (W) は下式となる。

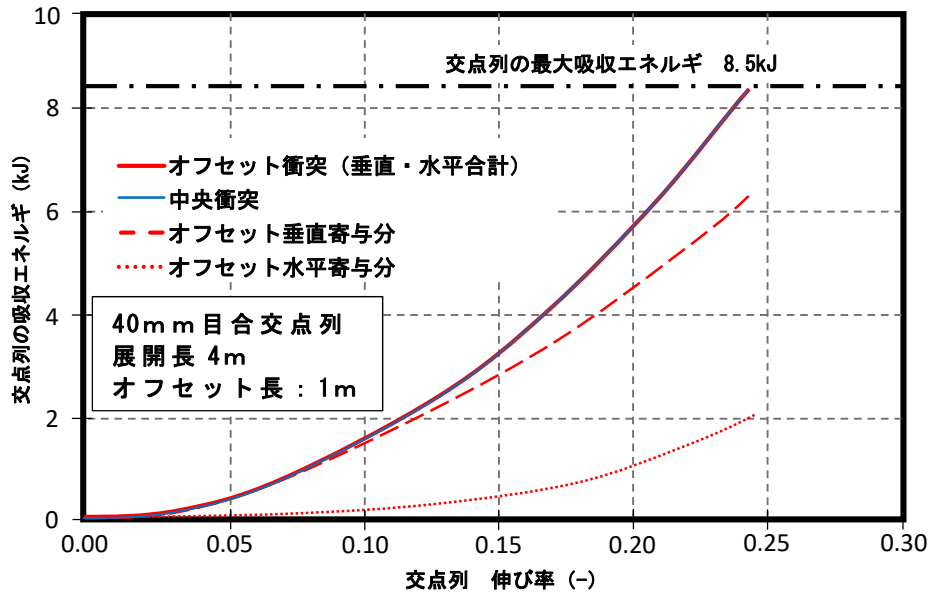
$$W = \sum_j^{\varepsilon_{cr}} \Delta W_j$$

ネット交点列に， 中央衝突， 展開方向 1 / 4 オフセット衝突(展開方向オフセット長 1 m)した場合の吸収エネルギーを比較する。再処理施設の飛来物防護ネットは， 目合 50mm の防護ネット(主ネット)並びに目合 40mm の防護ネット(補助ネット)を用いているため， 両者のケースについて検討した。

第 2-4 図に展開長 4 m， 50mm 目合の防護ネット交点列の伸び率に対する吸収エネルギーを， 第 2-5 図に展開長 4 m， 40mm 目合の防護ネット交点列の伸び率に対する吸収エネルギーを示す。



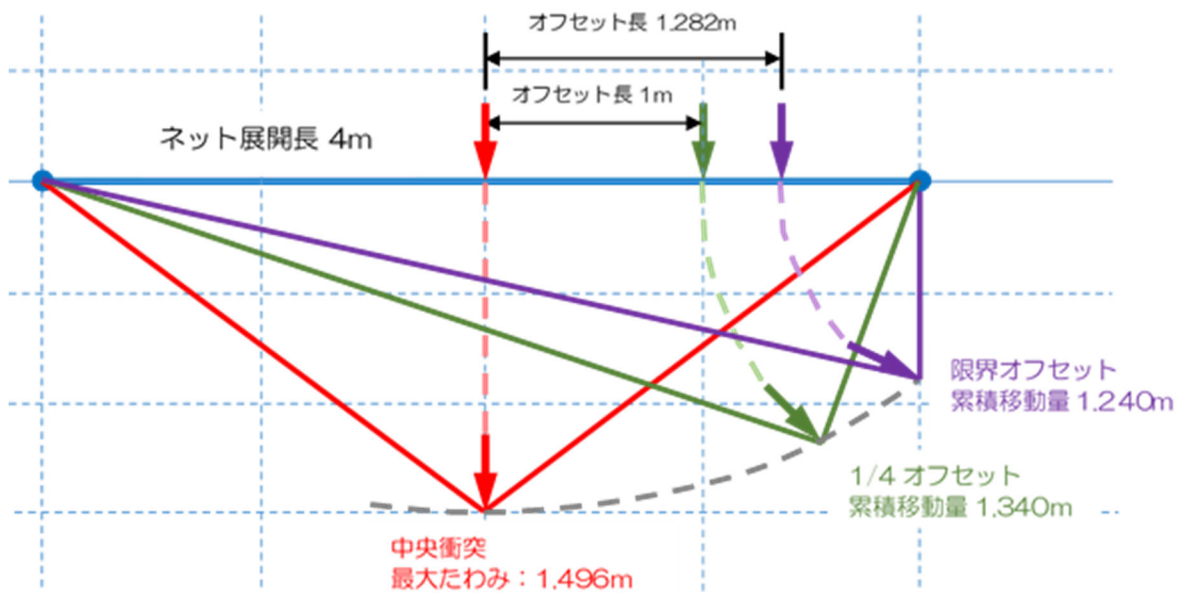
第 2-4 図 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較 (50mm 目合)



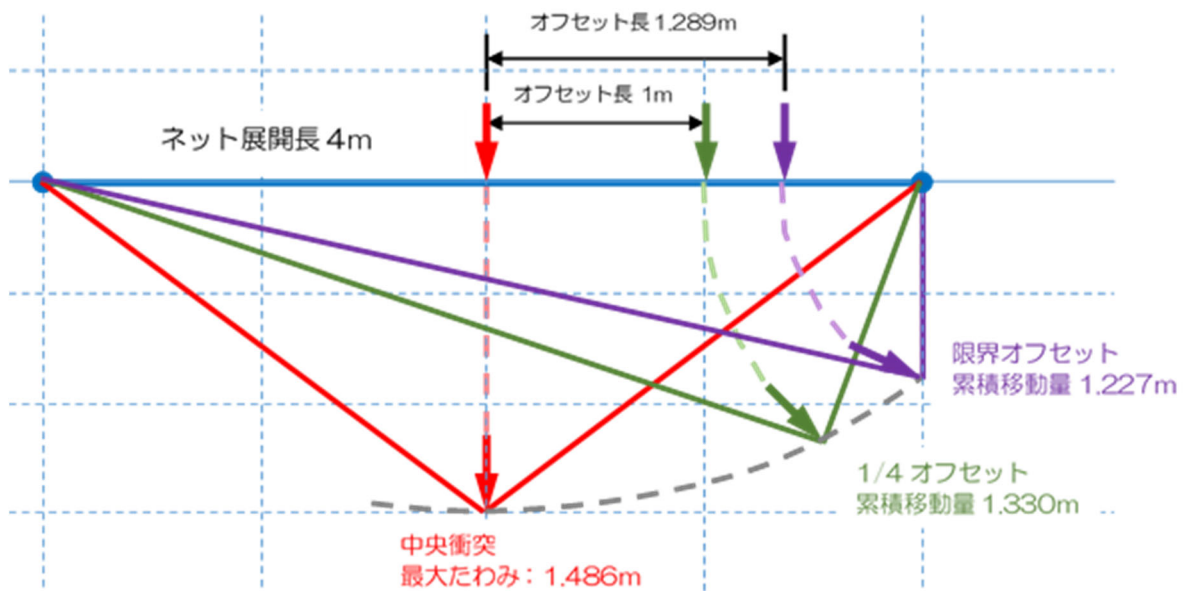
第 2-5 図 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較（40mm 目合）

展開方向オフセット衝突では、垂直方向から飛来物が衝突することから、伸び率が小さな初期の段階では、垂直寄与分吸収エネルギーが支配的である。伸び率 0.1 程度になると、ネット張力の分担から、衝突点は水平方向に移動し、徐々に水平寄与分の吸収エネルギーが増加していく。ネット張力の分担による衝突点の移動に飛来物が追従した場合、中央衝突時と展開方向オフセット衝突時（垂直寄与分と水平寄与分の合計）は、いずれも同等（50mm 目合：7.6kJ，40mm 目合：8.5kJ）となり、衝突点の違いによる吸収エネルギーへの影響はないと考えられる。

第 2-6 図に展開方向オフセット衝突位置の違いによる 50mm 目合交点列最終変位形態及び飛来物が衝突後、停止するまでの軌跡を累積移動量として示す。第 2-7 図に 40mm 目合の場合を示す。



第 2 - 6 図 各衝突位置の交点列最終変形図 (50mm 目合)



第 2 - 7 図 各衝突位置の交点列最終変形図 (40mm 目合)

展開方向オフセット長が大きくなると、交点列の最終形状は次第に直角三角形に近づき、さらに、展開方向オフセット長が大きくなると、衝突点の軌跡がネットの支持部の外に飛び出し飛来物がネット中央に向かって回転しネットで捕捉されることや飛来物が支持架構と衝突することが考えられ、飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することはない。

また、ネット端部であるワイヤロープへ衝突した場合について、添付 1 に示す通り、飛来物がネット中央に向かって回転しネットで捕捉されることや飛来物が支持架構と衝突することが考えられ飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することはない。

以上のことから、展開方向オフセット評価では、交点列の最終形状が直角三角形となる衝突位置(限界オフセット)までを検討範囲とする。

第 2-1 表に各展開方向オフセット長の 50mm 目合の防護ネット並びに 40 mm 目合の防護ネットの交点列における最大吸収エネルギーと累積移動量を示す。

第 2-1 表 展開方向オフセット衝突時の応答値一覧(50mm, 40mm 目合)

展開方向 オフセット長 (m)	交点列最大 吸収エネルギー (kJ)		累積移動量 (m)	
	50 mm 目合	40 mm 目合	50 mm 目合	40 mm 目合
0.000	7.599	8.556	1.496	1.486
1.000	7.599	8.556	1.340	1.330
1.282 (50 mm 目合限界)	7.599	—	1.240	—
1.289 (40 mm 目合限界)	—	8.566	—	1.227

以上より、飛来物の展開方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時と同等となるため、展開方向オフセット衝突時の影響はない。

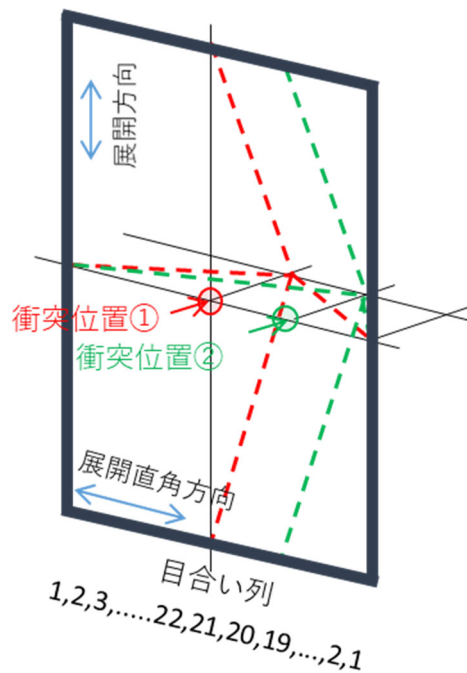
3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が、防護ネットに対して展開直角方向オフセット位置でネットと衝突した場合の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電中研報告書を参考に、飛来物の衝突位置を、中央衝突以外に展開直角方向オフセット衝突位置を以下のとおり設定し、ネット(展開方向 4 m×展開直角方向 3 m)の吸収エネルギーを算出する。

- ① 展開直角方向中央
- ② 展開直角方向 1/4 オフセット

第 3-1 図に上記の 2 種類の衝突位置図を示す。



第 3-1 図 展開直角方向オフセットの衝突位置図

第 3-1 図に示すとおり，衝突位置でネットが最も大きく変形し，そこからネット端部までの間を段階的に減少していくとすると，目合い列ごとの吸収エネルギーは添付書類「VI-1-1-1-2-5-2-1 飛来物防護ネットの強度計算書」に記載の吸収エネルギー評価に示す以下の式により求められる。

$$E_i = 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで， E_i ： i 番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー

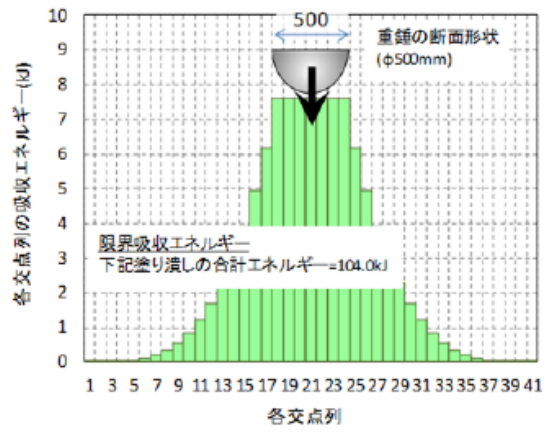
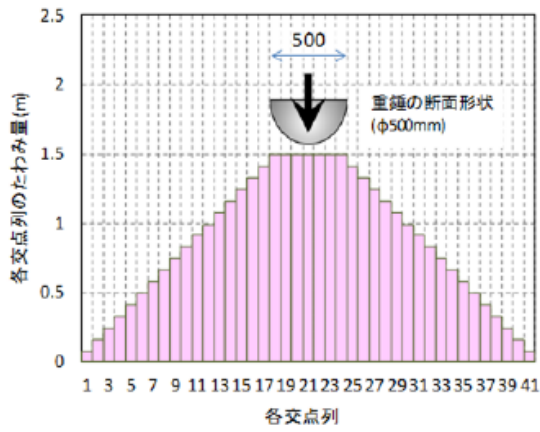
K_x ：ネット 1 目合の展開方向の 1 列の等価剛性

(「2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー」に示す。)

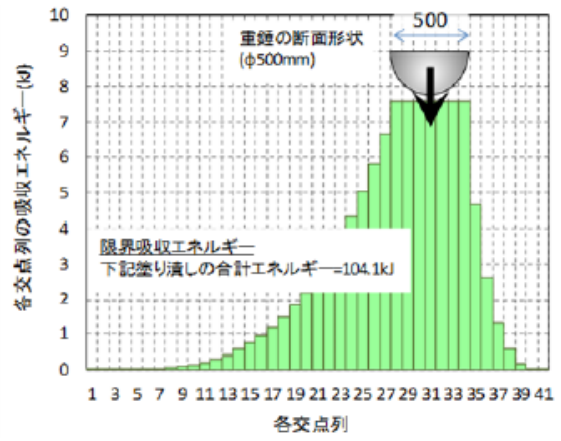
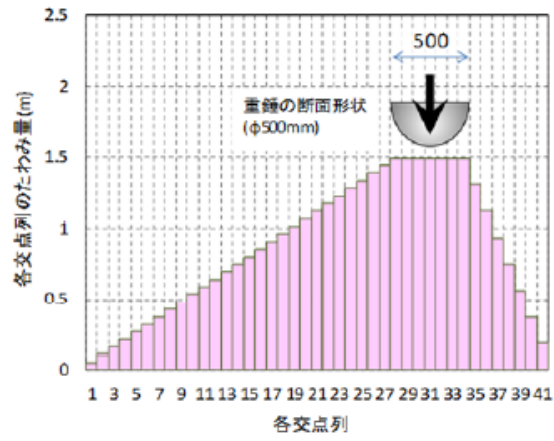
L_x ：ネット展開方向寸法 (4m)

δ_i ： i 番目の列におけるネット変形量

上式より，第 3-2 図，第 3-3 図に各衝突位置におけるネット変形量及び吸収エネルギー分布を，第 3-1 表にネット 1 枚分の吸収エネルギー量を示す。

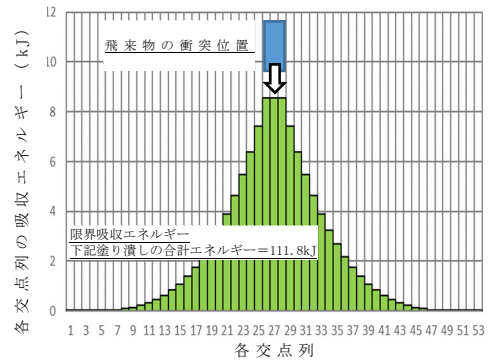
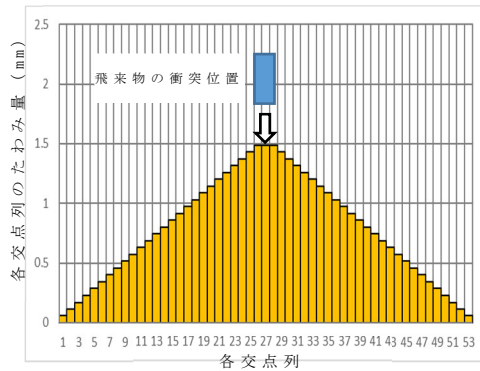


①展開直角方向中央

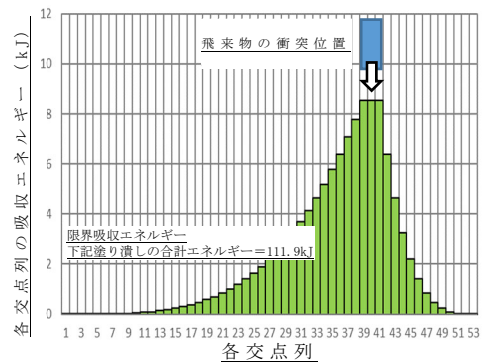
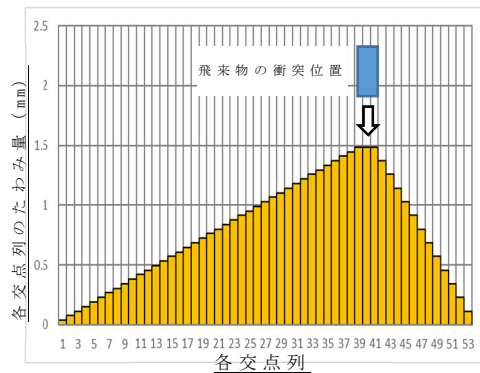


②展開直角方向 1/4 オフセット

第3-2図 展開直角方向オフセットでの各衝突位置における
ネット変形量及び吸収エネルギー分布図 (50目合)



① 展開直角方向中央



② 展開直角方向 1/4 オフセット

第3-3図 展開直角方向オフセットでの各衝突位置における
ネット変形量及び吸収エネルギー分布図 (40目合)

第3-1表 展開直角方向オフセット衝突時の吸収エネルギー量

衝突位置	吸収エネルギー	
	50mm 目合	40mm 目合
① 展開直角方向中央	104.0kJ	111.8kJ
② 展開直角方向 1 / 4 オフセット	104.1kJ	111.9kJ

第3-2図, 第3-3図及び第3-1表のとおり, 展開直角方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突とほぼ同等となることから, 展開直角方向オフセット衝突時の影響はない。

4. オフセット衝突時の衝撃荷重

衝撃荷重 (F_a) については、下式より算出している。

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta}$$

上式より、衝撃荷重 (F_a) は防護ネットのたわみ量 (δ) に反比例していることが分かる。

同じ飛来物の中央衝突とオフセット衝突を比較する場合、第2-1表から、防護ネットの累積移動量(たわみ量)はオフセット衝突の方が短く衝撃荷重が大きくなることから、オフセット衝突における衝撃荷重の増加率は、下式により算出できる。

$$50 \text{ mm 目合} : \text{係数} = \frac{1.496}{1.240} = 1.207$$

$$40 \text{ mm 目合} : \text{係数} = \frac{1.486}{1.227} = 1.212$$

以上のことから、オフセット衝突による衝撃荷重の増加分を踏まえた係数 1.22 を考慮して衝撃荷重を算出する。

5. 参考文献

- ・高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法
総合報告：O01 平成28年3月 電力中央研究所
- ・竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案 研究報告：N13014 平成26年3月 電力中央研究所

添付 1

ワイヤロープに飛来物が衝突した際の
飛来物の挙動について

目 次

1. 飛来物がワイヤロープへ衝突した際の飛来物の挙動について……………1

1. 飛来物がワイヤロープへ衝突した際の飛来物の挙動について

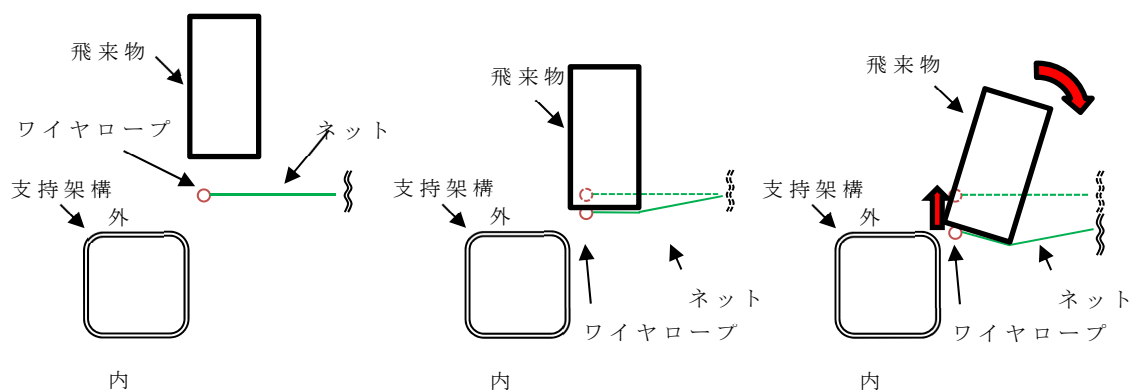
飛来物がワイヤロープに衝突した場合、ワイヤロープの反力によって、飛来物に回転運動の力が加わり転倒することが考えられる。

また、ワイヤロープはネットを支持していることから、飛来物がワイヤロープに衝突した場合、ワイヤロープが、飛来物の進行方向に向かって伸びる際、同時にネットからの張力も受ける。そのため、飛来物には回転運動の力が加わり転倒することが考えられる。

具体的には、衝突後に飛来物がネット中心側に転倒する場合と支持架構側に転倒する場合が考えられることから、各挙動について下記に示す。

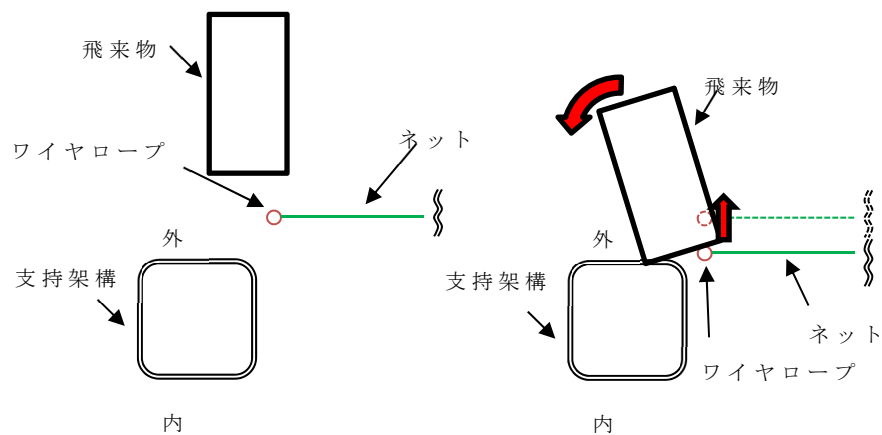
衝突後に飛来物がネット中心側に転倒する場合の挙動を第1-1図に示す。

飛来物がネット中心側に寄った状態でワイヤロープ付近に衝突した場合、ワイヤロープの反力及びワイヤロープ付近のネットがたわみにくいため、飛来物はネット中心側に向かって回転し、最初に衝突した箇所（1次衝突部）だけでなく広い範囲のネットに捕捉される。



第1-1図 飛来物がネット中心側に転倒する場合の挙動

衝突後に飛来物が支持架構側に転倒する場合の挙動を第1-2図に示す。飛来物が支持架構側に寄った状態でワイヤロープ付近に衝突する場合、ワイヤロープから反力を受けた飛来物は支持架構側に回転し、支持架構に衝突する又は隣の防護ネットに捕捉される。



第1-2図 飛来物が支持架構側に転倒する場合の挙動

以上のことから、ワイヤロープへ衝突すると、飛来物は回転運動を行い最初に衝突した箇所(1次衝突部)だけでなく広い範囲でネットに捕捉される。その場合、衝突荷重に対するネットの破断荷重は、転倒しない場合よりも大きいことから、ネットが破断するおそれはない。