

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 11 R4
提出年月日	令和3年8月13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

文中の____線部は R3 から R4 への差替え箇所を示す。

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	11
5.	参考文献	11

1. 概要

本資料は、再処理施設の設計基準対象施設に対する第1回申請（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「V-別添1-3 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「V-別添1-4 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オフセット衝突の影響について補足する。

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、後次回申請の再処理施設の飛来物防護ネットに対しても適用されるものである。

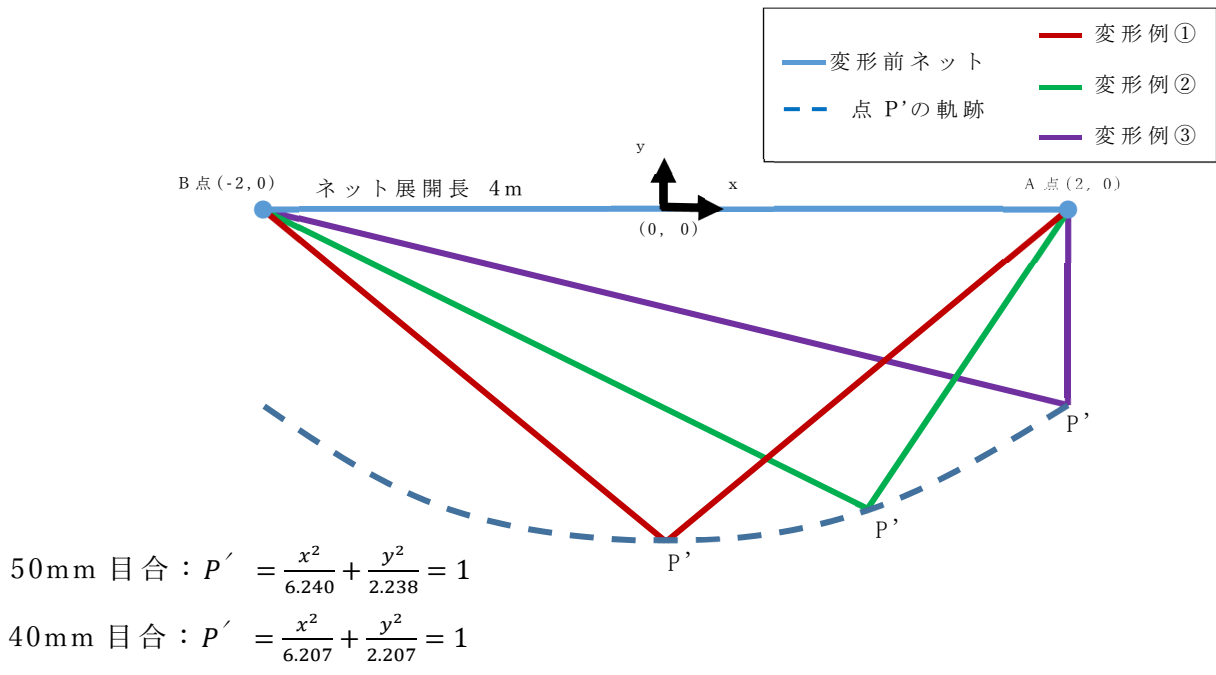
2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー

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。

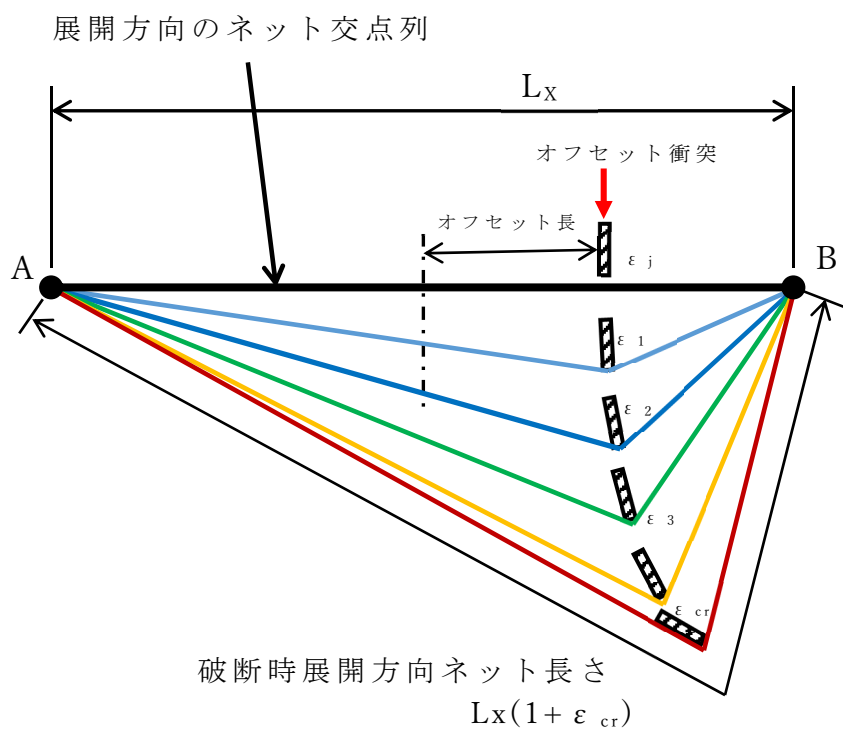


第 2 - 1 図 展開方向のネット交点列 1 列の衝突点 P' の軌跡

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「V-別添1-4-1 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。

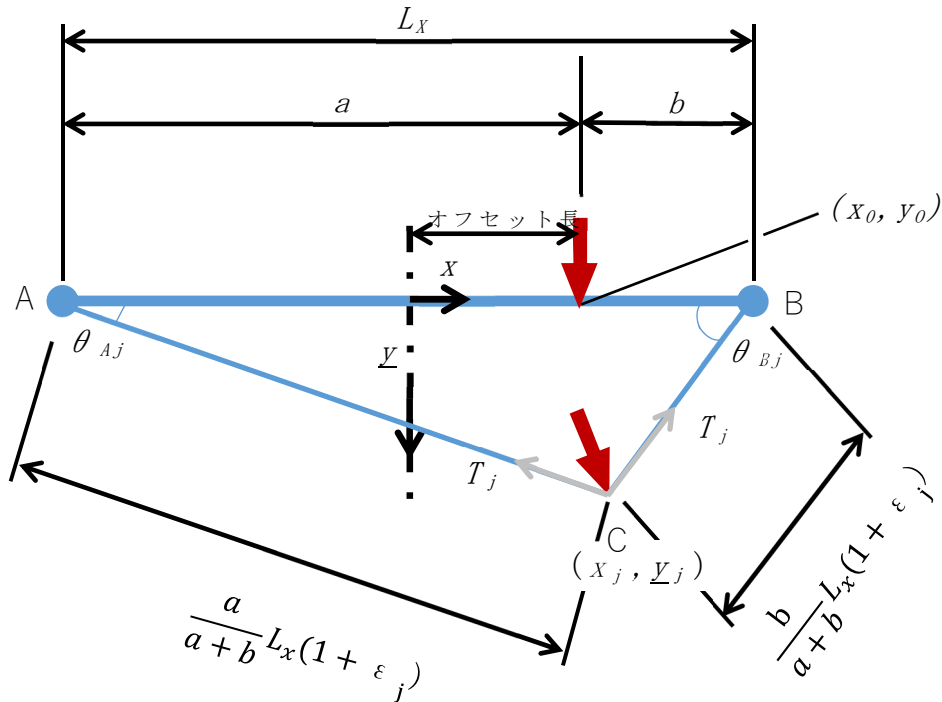
$$\text{目合 } 50\text{mm} : \varepsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{17.6}{70.7} \approx 0.25$$

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



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「V-別添1-4-1 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 θ_{Aj} 、 θ_{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。

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

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

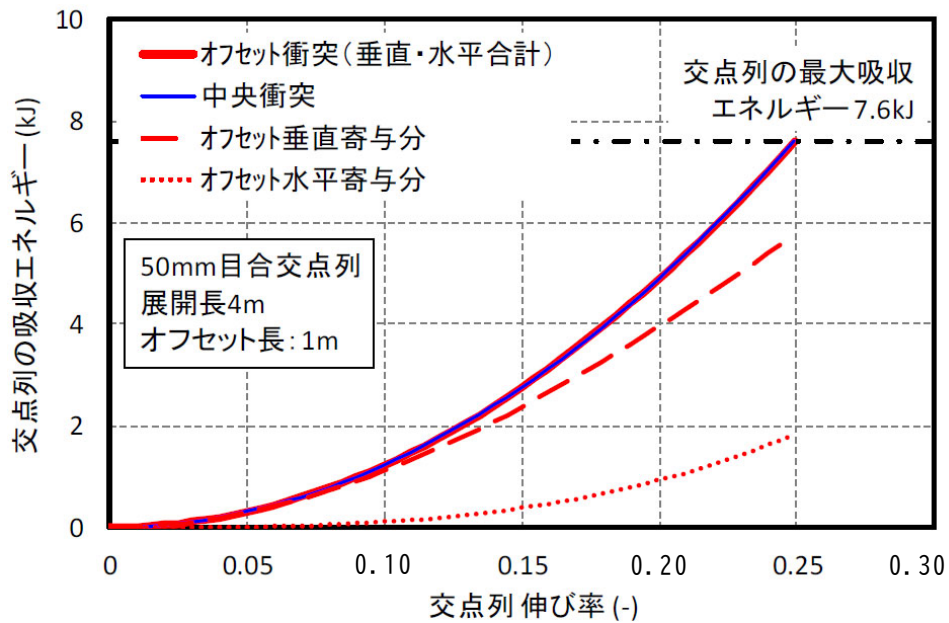
$$\Delta W_j = \frac{1}{2}(H_{j-1} + H_j) \times \Delta x_j + \frac{1}{2}(V_{j-1} + V_j) \times \Delta y_j$$

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。

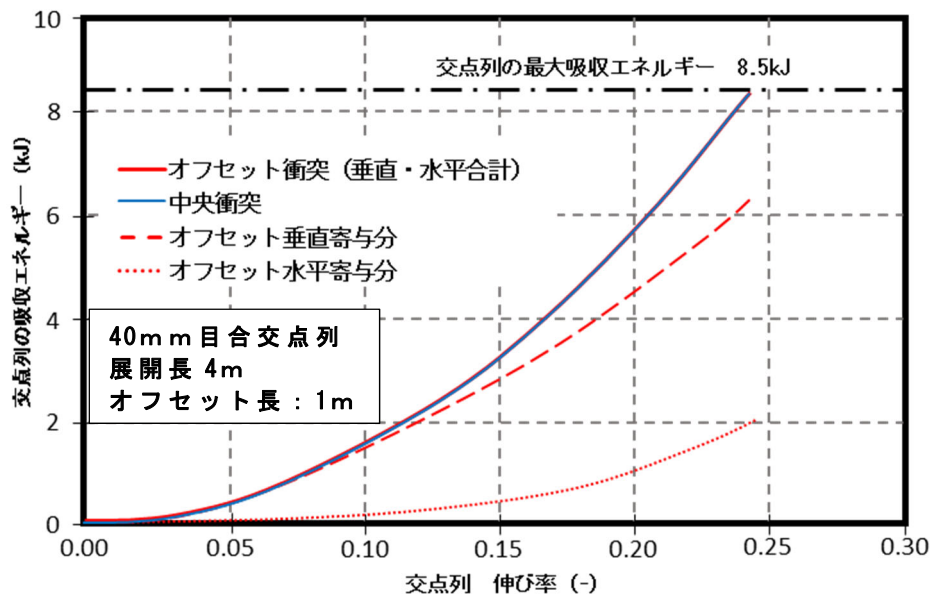
$$W = \sum_j^{\varepsilon_{cr}} \Delta W_j$$

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 目合の防護ネットの交点列の伸び率に対する吸収エネルギーを示す。



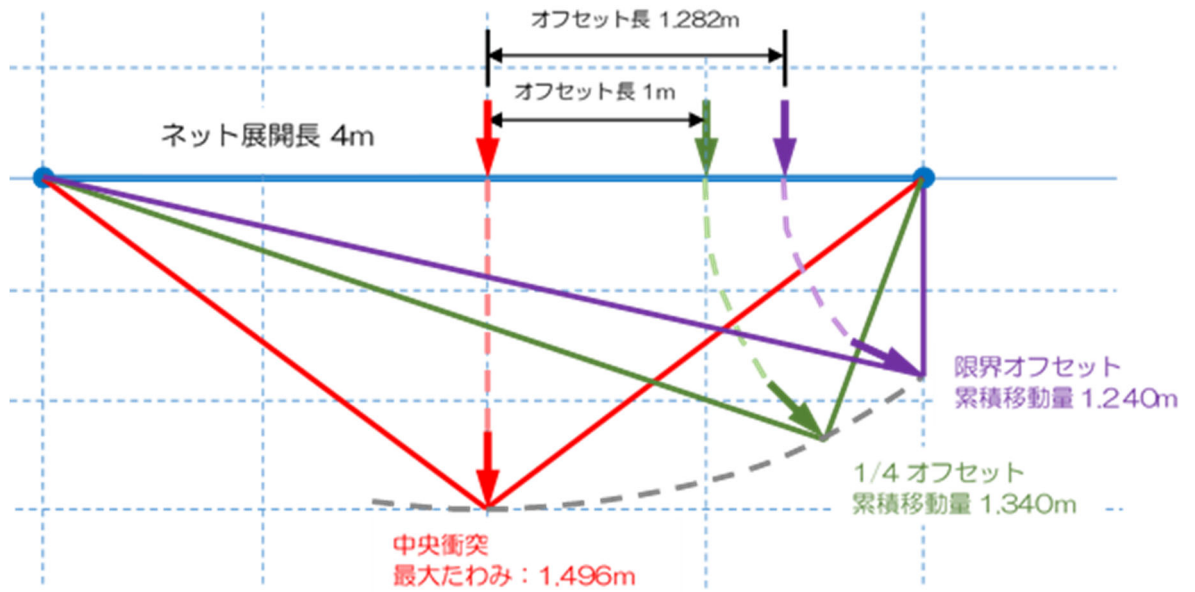
第 2-4 図 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較 (50mm 目合)



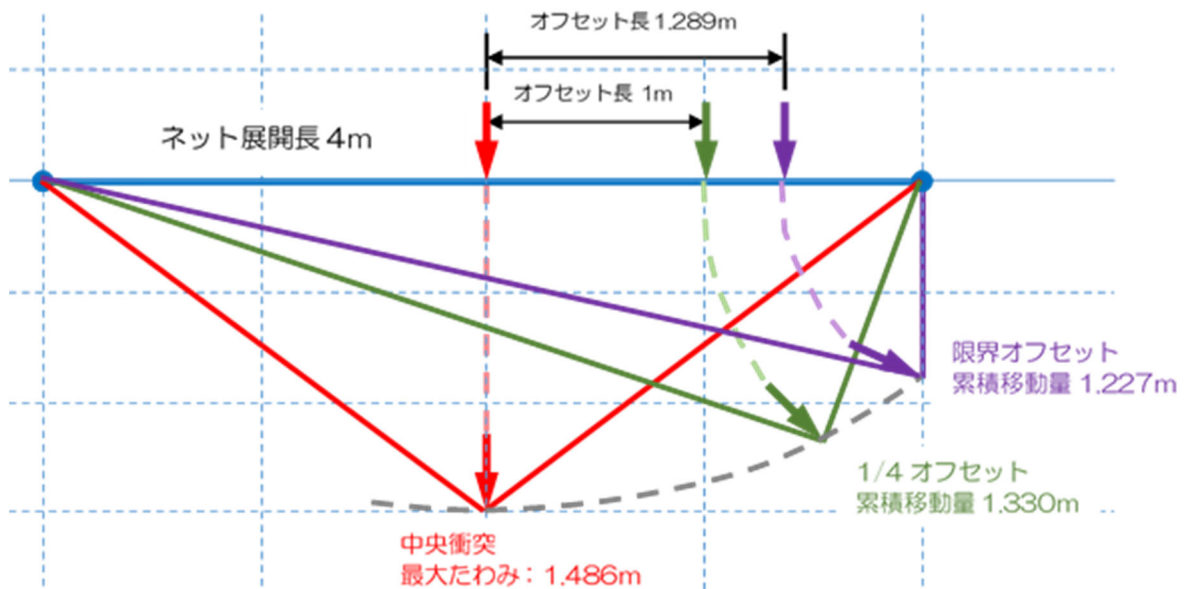
第2-5図 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較 (40mm目合)

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。ネットの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。

また、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)

ネット中央からの衝突点までの距離(以下、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、衝突点の軌跡が支持部の外に飛び出し、支持架構と衝突することが考えられるため、飛来物が防護対象施設に衝突することはないと考えられる。よって、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40mm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。

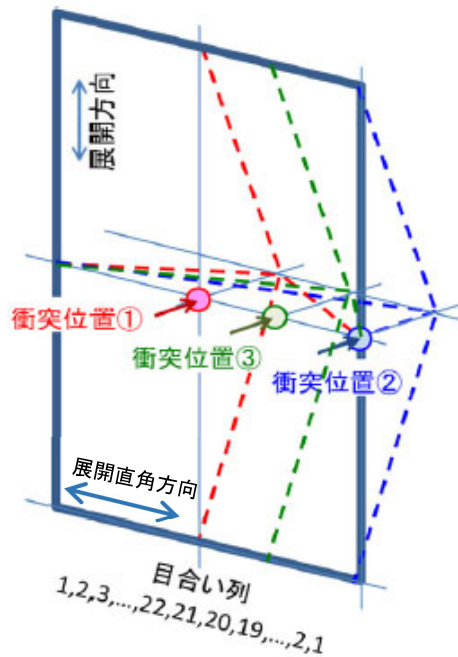
3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー

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4m×展開直角方向3m)の吸収エネルギーを算出する。

- ① 展開直角方向中央
- ② 端部
- ③ 展開直角方向1/4オフセット

第3-1図に上記の3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「V-別添 1-4-1 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

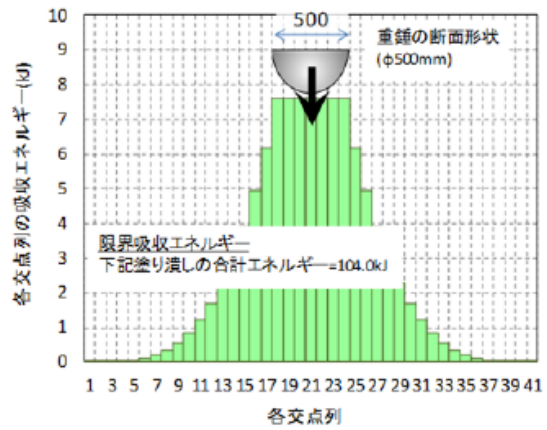
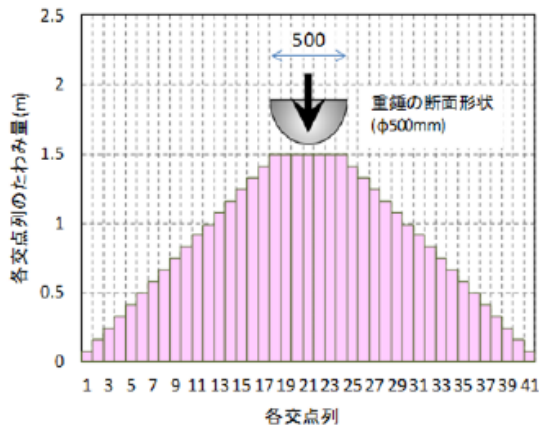
K_x ：ネット 1 目合の展開方向の 1 列の等価剛性

(「2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー」に示す。)

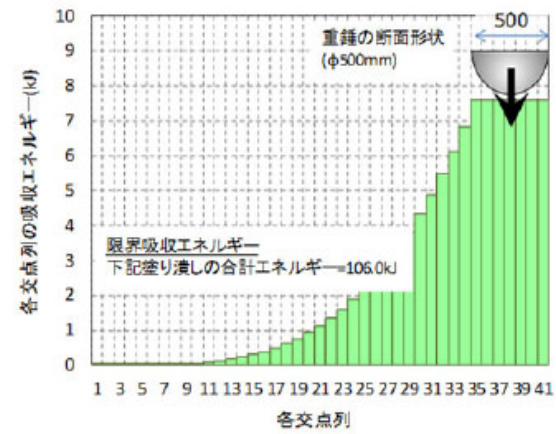
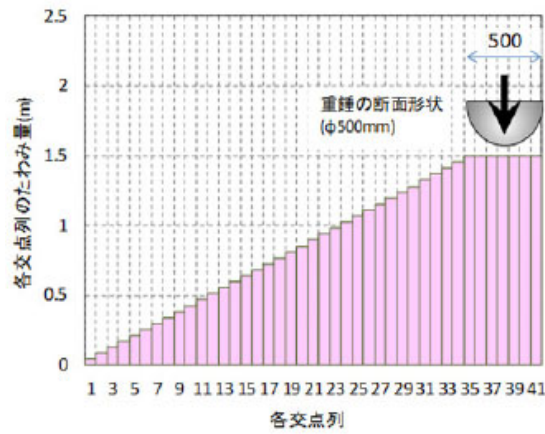
L_x ：ネット展開方向寸法 (4m)

δ_i ： i 番目の列におけるネット変形量

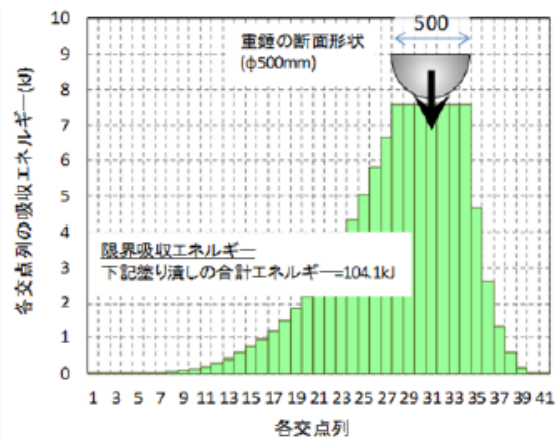
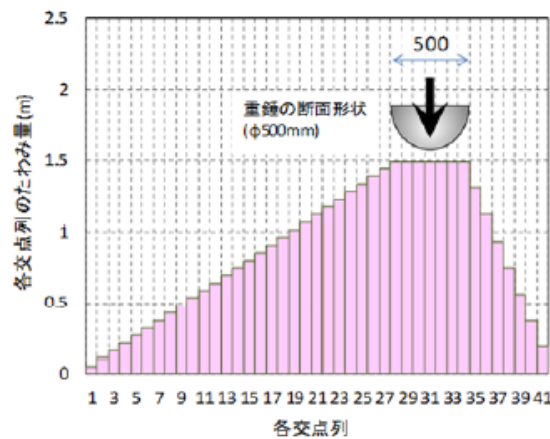
上式より，第 3-2 図に各衝突位置におけるネット変形量及び吸収エネルギー分布を，第 3-1 表にネット 1 枚分の吸収エネルギー量を示す。



① 展開直角方向中央



② 端部



③ 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

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(50mm目合)

衝突位置	吸収エネルギー (kJ)
① 展開直角方向中央	104.0kJ
② 端部	106.0kJ
③ 展開直角方向1/4オフセット	104.1kJ

第3-2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。また，40mm目合においても構造上の違いは無くオフセット衝突と中央衝突時の吸収エネルギーはほぼ同等となる。

以上のことから，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 研究報告書：N13014 平成26年3月 電力中央研究所