

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 11 R1
提出年月日	令和3年4月12日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護設計の基本方針に関する  
飛来物のオフセット衝突について

## 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. 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後次回申請を含めた竜巻防護対策設備等の強度計算の方針について補足説明するものである。

ここでは、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、説明する。

再処理施設の飛来物防護ネットには、目合い 50mm の防護ネット(主金網)並びに目合い 40mm の防護ネット(補助金網)を用いている。

また、本資料は、第 1 回申請(令和 2 年 12 月 24 日申請)のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・ V-別添 1-3 竜巻防護対策設備の強度計算の方針
- ・ V-別添 1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書

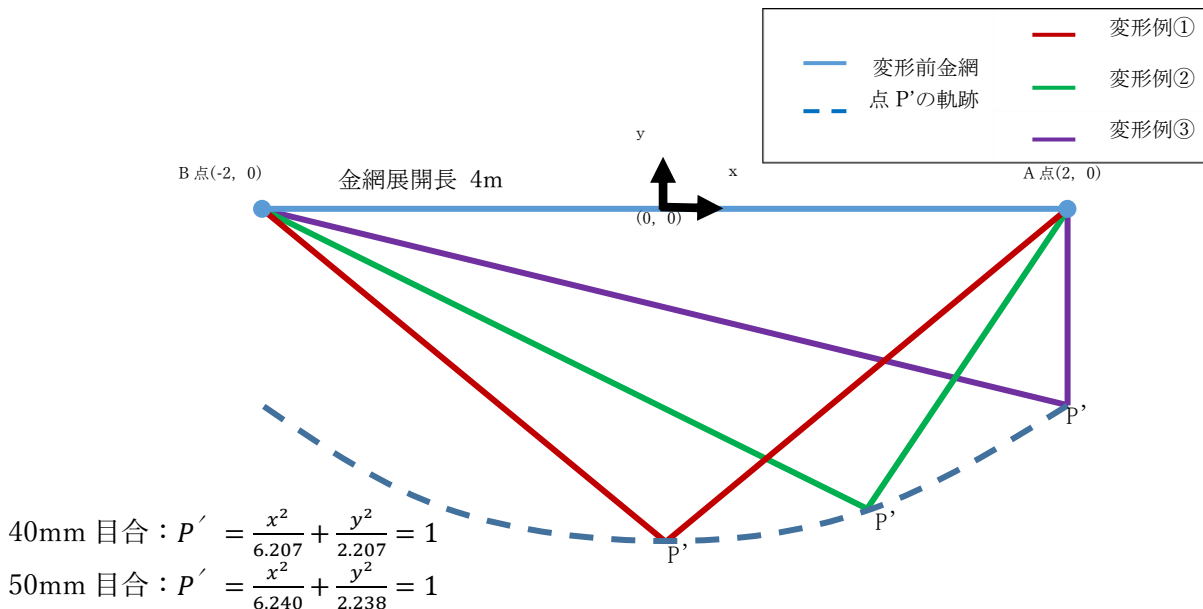
## 2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー

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金網交点列 1 列と衝突した場合の展開方向の金網交点列 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金網交点列 1 列と衝突した場合の飛来物と金網の挙動を以下のように仮定する。

- ① 金網展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- ② 衝突後の飛来物と金網は衝突点で一体となって推移する。
- ③ 最大変形時の金網全長は破断時展開方向金網長さとする。

以上の仮定から、破断時の金網の全長は飛来物の衝突位置によらず、破断時展開方向金網長さで一定となり、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。

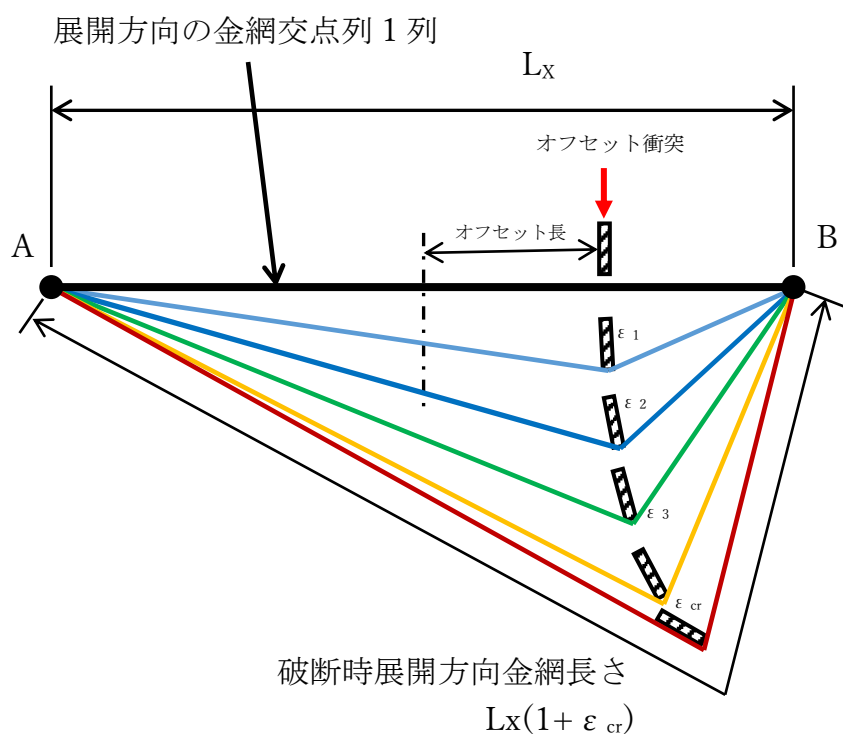


第 2-1 図 展開方向の金網交点列 1 列の衝突点 P' の軌跡

金網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  $\epsilon_j$  を0から破断伸び率  $\epsilon_{cr}$  まで微小変形の積み重ねとして、徐々に変化させ、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  $\epsilon_{cr}$  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目合い対角寸法  $a$  とネット1目合いの破断変位  $a_s$  より、以下のとおり、求められる。

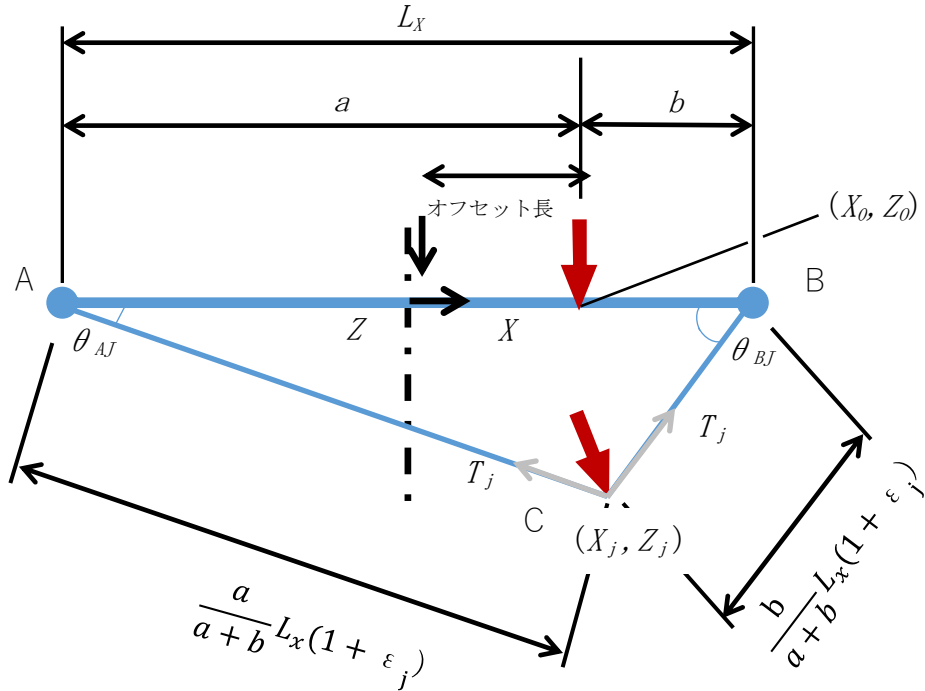
$$\text{目合 } 50\text{mm} : \epsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{17.6}{70.7} \approx 0.25$$

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



第2-2図 展開方向オフセット衝突時の展開方向の金網交点列1列の変位挙動図

また、第2-3図に展開方向に展開方向オフセット衝突した場合を想定した伸び率  $\varepsilon_j$  時の金網交点列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目合い対角寸法  $a$ 、ネット1目合いの等価剛性  $K$  とすると、展開方向の金網交点列1列の剛性  $K_x$ 、展開方向の金網交点列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  $\Delta x_j$ 、 $y$  方向変位  $\Delta y_j$  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  $\varepsilon_j$  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  $\varepsilon_j$  時の展開方向の金網交点列1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  $\Delta W_j$  は、以下のとおりとなる。

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

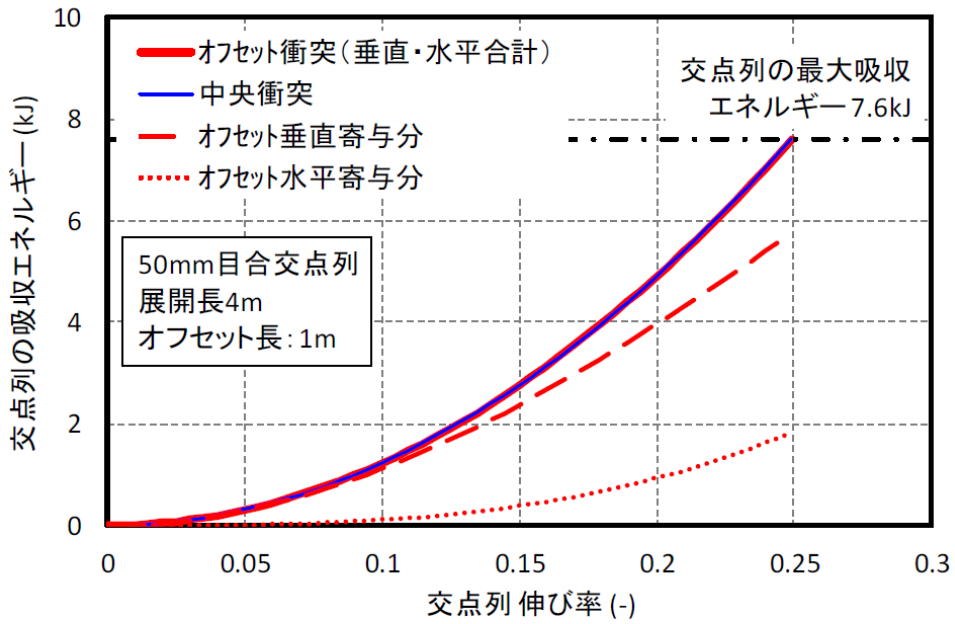
$$V_j = T_j \sin \theta_{Aj} + T_j \sin \theta_{Bj}$$

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

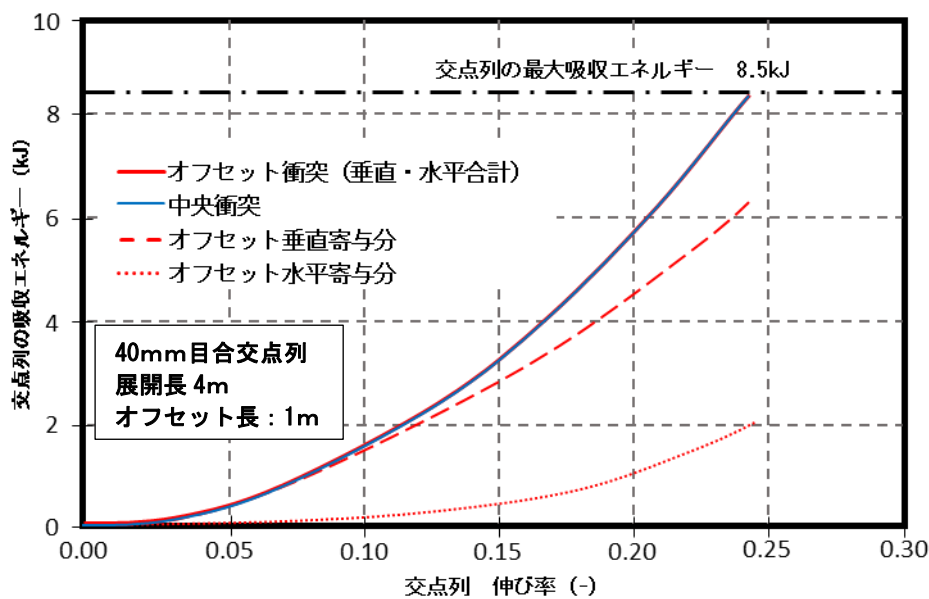
以上より，1金網交点列の限界吸収エネルギーは下式となる。

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

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1m)した場合の吸収エネルギーを比較する。第2-4図に展開長4m，目合50mm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4m，目合40mm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。



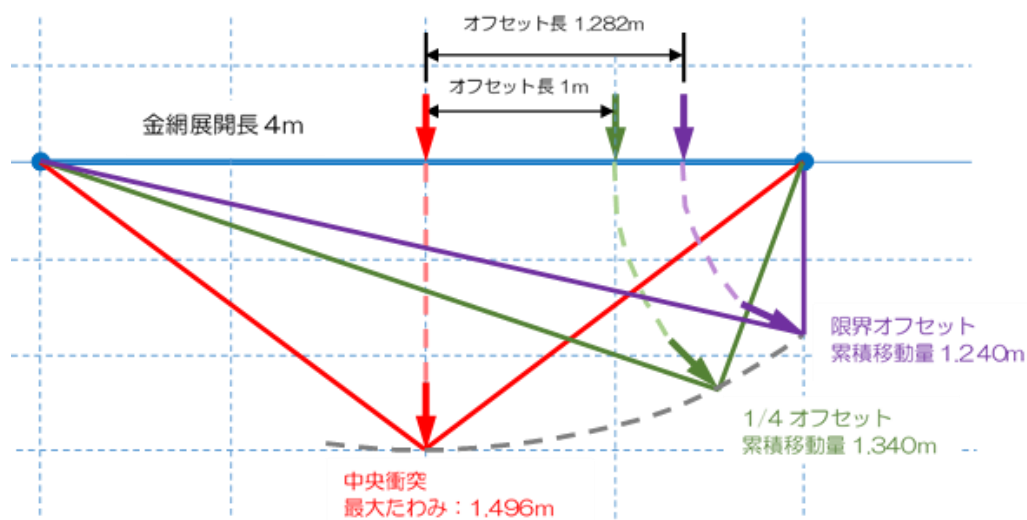
第2-4図 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較 (目合50mm)



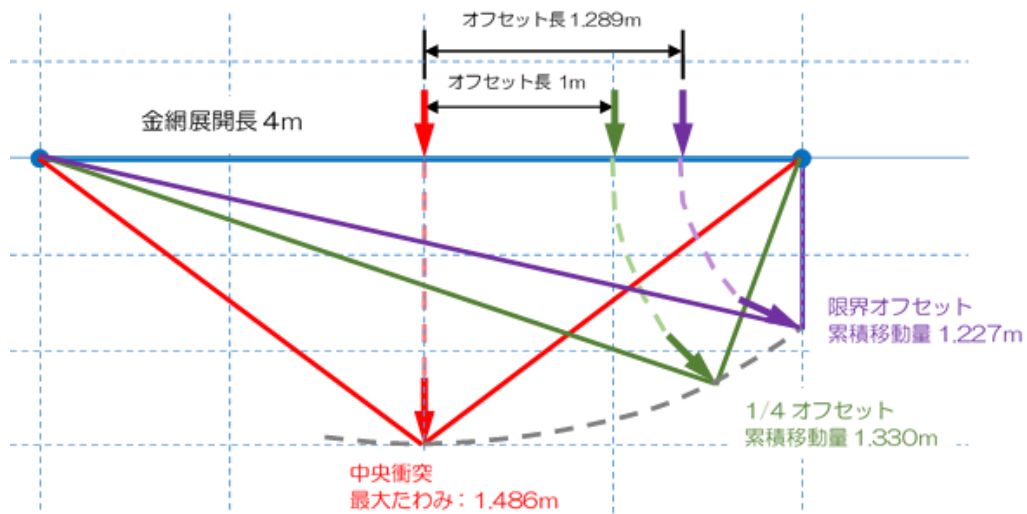
第2-5図 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較 (目合40mm)

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、金網張力の分担から、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。金網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(7.6kJ)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 各衝突位置の交点最終変位図 (50mm目合)



第2-7図 各衝突位置の交点最終変形図 (40mm 目合)

金網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、架台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目合い50mmの防護ネット並びに目合い40mmの防護ネットの1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 目合い)

展開方向 オフセット長 (m)	1 交点列最大 吸収エネルギー (kJ)		累積移動量 (m)	
	50 mm 目合い	40 mm 目合い	50 mm 目合い	40 mm 目合い
0.000	7.599	8.556	1.496	1.486
1.000	7.599	8.556	1.340	1.447
1.282 (50 mm 目合限界)	7.599	—	1.240	—
1.289 (40 mm 目合限界)	—	8.566	—	1.227

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  $\delta$  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。

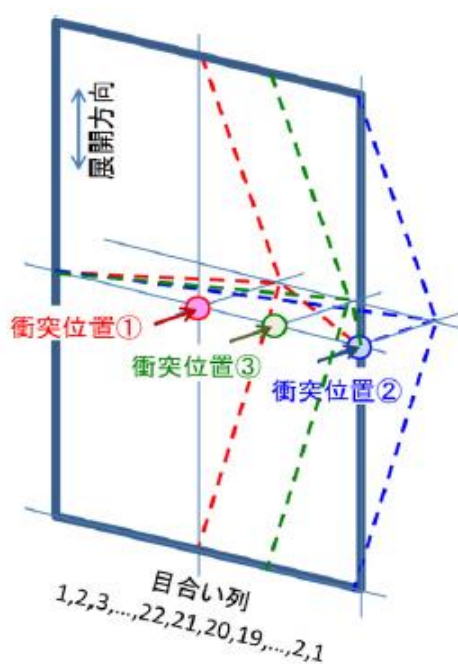
### 3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー

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金網と衝突した場合の吸収エネルギー算出結果を以下に示す。

電力中央研究所報告書を参考に、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、金網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衝突位置図

第3-1図に示すとおり、衝突位置で金網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1列ごとの吸収エネルギーは「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

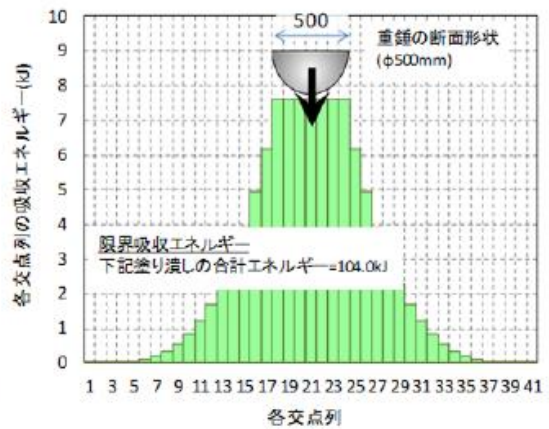
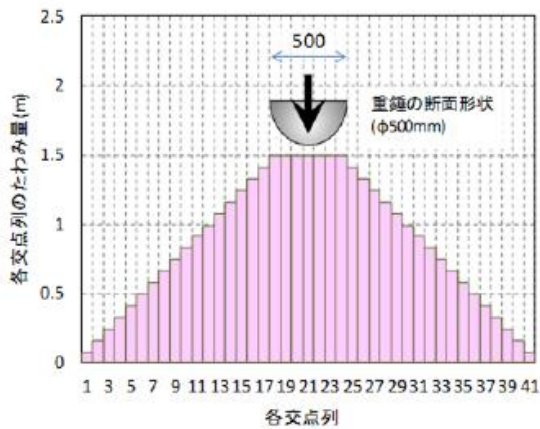
$K_x$  : ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性

(「2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー」に示す。)

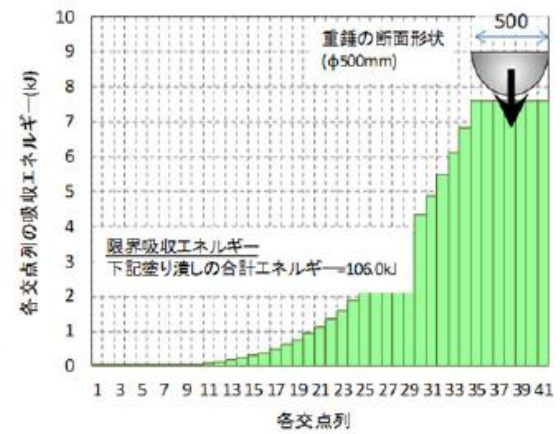
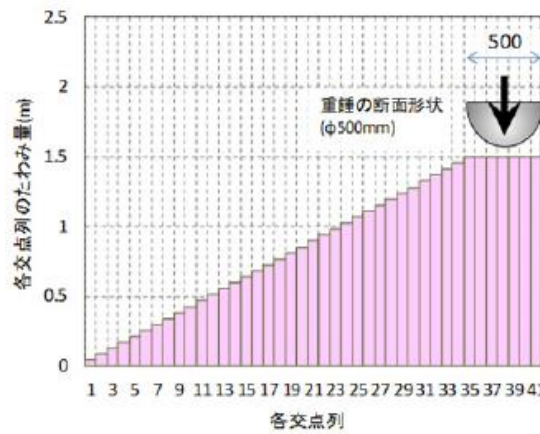
$L_x$  : ネット展開方向寸法 (4m)

$\delta_i$  :  $i$  番目の列における金網変形量

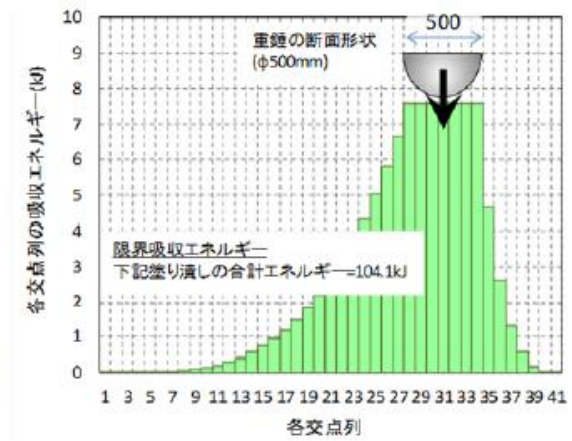
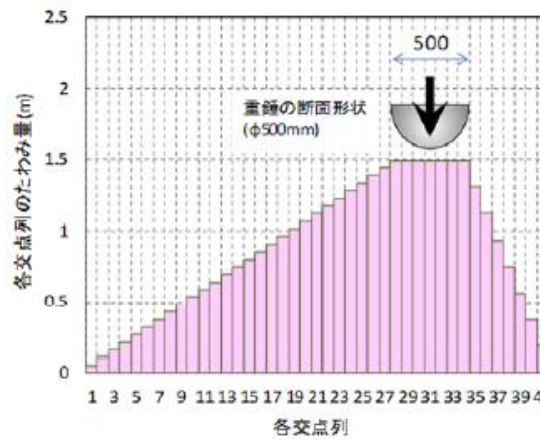
上式より、第3-2図に各衝突位置における金網変形量及び吸収エネルギー分布を、第3-1表に金網1枚分の吸収エネルギー量を示す。



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金網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では，衝突位置の違いによる金網の吸収エネルギーへの影響は小さい。

#### 4. 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