

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 07 R0
提出年月日	令和3年1月29日

設工認に係る補足説明資料

【設計竜巻荷重の設定において考慮する空気密度について】

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	設計竜巻荷重の設定	1
3.	設計竜巻荷重の設定の妥当性評価	1
	(1) 最大風速の設定における保守性	1
	(2) 竜巻発生時の気象状況	2
	(3) ガイド等における空気密度の記載	3
	(4) 竜巻襲来時における気圧低下を想定した空気密度	4
4.	結論	5
5.	参考文献	5

別紙

## 1. はじめに

竜巻に対する設計において考慮する設計竜巻荷重としては、最大風速を  $100\text{m/s}$  とするとともに、空気密度を  $1.22\text{kg/m}^3$  とし、風圧力による荷重及び気圧差による荷重を設定している。想定している空気密度は、常温常圧（ $15^\circ\text{C}$ 程度、 $1013\text{Pa}$ ）を前提としたものである。

一方、冬季において竜巻が発生する場合は、気温の低下に伴って空気密度が大きくなり、より厳しい設計竜巻荷重を与えることになる。

ここでは、空気密度を  $1.22\text{kg/m}^3$  とすることについて、設計竜巻荷重の設定方法、設計竜巻の想定、竜巻が発生する気象状況、竜巻による気圧低下の影響等の観点を検討し、その妥当性を説明する。

## 2. 設計竜巻荷重の設定

事業指定（変更許可）を受けたとおり、設計竜巻荷重として考慮する風圧力による荷重及び気圧差による荷重は以下のとおりとしている。

### ◆ 風圧力による荷重

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$$

$W_w$  : 風圧力による荷重

$q$  : 設計用速度圧

$G$  : ガスト影響係数（ $= 1.0$ ）

$C$  : 風力係数

$A$  : 受圧面積

$\rho$  : 空気密度（ $= 1.22\text{kg/m}^3$ ）

$V_D$  : 設計竜巻の最大風速

### ◆ 気圧差による荷重

$$W_p = \Delta P_{\text{max}} \cdot A$$

$$\Delta P_{\text{max}} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

$W_p$  : 気圧差による荷重

$\Delta P_{\text{max}}$  : 最大気圧低下量

$V_{Rm}$  : 最大接線風速（ $= V_D - V_T$ 、ただし  $V_T = 0.15 \cdot V_D$ ）

## 3. 設計竜巻荷重の設定方法の妥当性評価

### (1) 最大風速の設定における保守性

2. に示すとおり、風圧力及び気圧差による荷重は、風速の2乗に比例し、空気密度に比例する。すなわち、空気密度よりも風速の方が、設計竜巻荷重への寄与は大きいと言える。

また、竜巻検討地域で過去に発生している竜巻の規模はF2クラスであること、竜巻検討地域におけるF3クラス以上の竜巻の発生は極めて発生し難いことが定量的

に評価されていること，そのうえで設計竜巻の最大風速を  $100\text{m/s}$ （年超過確率  $1.86 \times 10^{-8}$ ）と設定していることからすると，空気密度の増減による荷重への影響を考慮したとしても，設計竜巻の最大風速の設定において十分な保守性を確保しているものとする。

## （２）竜巻発生時の気象状況

日本において過去に発生した F 3 竜巻とその発生時における最寄りの気象官署等の気温データを表－１に示す。また，竜巻検討地域及びその周辺で過去に発生した F 2 竜巻とその発生時における最寄りの気象官署等の気温データを表－２に示す。

表－１及び表－２に示す過去の観測データからすると，比較的規模の大きい竜巻が発生する時の気温はそれほど低くなく，せいぜい  $10^{\circ}\text{C}$  を下回る程度であることが分かる。気象学的には，地上気温が高く，上空大気との気温差が大きいほど大気的不安定度が高まる。また，気温が高いほど飽和水蒸気量が指数関数的に増大し，例えば気温  $20^{\circ}\text{C}$  を基準として大気を含みうる水蒸気量は，気温が  $10^{\circ}\text{C}$  低下する毎に約半分になる。これらの表は，設計竜巻の規模の竜巻を引き起こしうる積乱雲に発達するには，比較的高い地上気温をもって下層大気が十分に湿潤でかつ大きな不安定度を有する必要があることを反映したものであるといえる。

また，寒候期（12月～3月）に竜巻検討地域の周辺で発生した竜巻（海上発生分を除く）とその発生時における最寄りの気象官署等の気温データを表－３に示す。これによると，冬季における竜巻の発生例は見られ，表－１，表－２に示した事例に比べて低い気温で発生している事例もあるものの，いずれも竜巻の規模は小さい。氷点下レベルで気温が低くなると大気的不安定度が小さくなり，飽和水蒸気量が大きく減ることで，設計竜巻規模の竜巻を引き起こし得る積乱雲への発達を促す条件とはなり難いため，発生する竜巻の規模が小さくなるだけでなく，竜巻自体の発生数も極端に少なくなる。

表－１ 日本で発生した F 3 竜巻の発生時における気温

発生日時	発生時刻	発生場所	気温
1971年7月7日	7時50分	埼玉県大宮市	データなし
1990年12月11日	19時13分	千葉県茂原市	$14.6^{\circ}\text{C}$ (19:10 茂原)
			$14.6^{\circ}\text{C}$ (19:20 茂原)
1999年9月24日	11時7分	愛知県豊橋市	$25.5^{\circ}\text{C}$ (11:00 豊橋)
			$25.6^{\circ}\text{C}$ (11:10 豊橋)
2006年11月7日	13時23分	北海道網走支庁 佐呂間町	$15.9^{\circ}\text{C}$ (13:20 佐呂間)
			$15.9^{\circ}\text{C}$ (13:30 佐呂間)
2012年5月6日	12時35分	茨城県つくば市	$24.5^{\circ}\text{C}$ (12:30 つくば)
			$24.3^{\circ}\text{C}$ (12:40 つくば)

表－2 竜巻検討地域及びその周辺で発生したF2竜巻の発生時における気温

発生日時	発生時刻	発生場所	最寄りの地点の気温
1965年9月5日	11時40分	青森県むつ市	20.8℃ (9:00 むつ) 21.3℃ (12:00 むつ)
1979年11月2日	1時58分	北海道渡島支庁 松前郡松前町	9.3℃ (24:00 函館) 9.7℃ (3:00 函館)
1980年10月31日	9時00分	北海道日高支庁 門別町	11.1℃ (9:00 浦河) 7.2℃ (12:00 浦河)
1992年5月22日	14時00分	岩手県下閉伊郡 川井村	18.2℃ (14:00 宮古) 14.6℃ (15:00 宮古)
1994年10月5日	6時35分	北海道日高支庁 門別町	16.7℃ (6:30 日高門別) 16.8℃ (6:40 日高門別)
1999年10月29日	19時30分	北海道渡島支庁 松前郡松前町	18.0℃ (19:20 松前) 17.9℃ (19:40 松前)
2003年10月25日	20時00分	北海道胆振支庁 勇払郡厚真町	12.6℃ (19:50 厚真) 13.8℃ (20:10 厚真)
2004年10月22日	16時50分	北海道日高支庁 門別町	14.7℃ (16:40 日高門別) 14.9℃ (17:00 日高門別)

表－3 竜巻検討地域周辺で冬季（12月～3月）に発生した竜巻（海上発生分を除く）の発生時における気温

発生日時	発生時刻	発生場所	Fスケール	最寄りの地点の気温
1968年1月26日	0時30分	青森県北津軽郡 金木町	－	－2.3℃ (24:00 青森) －2.7℃ (3:00 青森)
1983年1月20日	16時20分	北海道渡島支庁 松前町	－	－0.3℃ (16:00 松前) －1.6℃ (20:00 松前)
2009年1月25日	5時00分	北海道日高支庁 日高郡新ひだか町	F1	－0.3℃ (4:50 静内) 0.2℃ (5:10 静内)
2012年12月6日	11時40分	北海道日高地方 様似郡様似町	F0	6.8℃ (11:30 浦河) 7.6℃ (11:50 浦河)
2013年1月2日	18時30分	北海道日高地方 日高郡新ひだか町	F1	－2.0℃ (18:20 静内) －1.6℃ (18:40 静内)

### (3) ガイド等における空気密度の記載

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」には空気密度の値に係る具体的な記載はないが、当該ガイドが参照している文献には空気密度の具体的な値が示されている。いずれに示されている値も  $1.22\text{kg}/\text{m}^3$  と同等である。

- ◆ 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説<sup>(1)</sup>：  $1.22\text{ kg}/\text{m}^3$
- ◆ REGULATORY GUIDE 1.76<sup>(2)</sup>：  $1.226\text{ kg}/\text{m}^3$
- ◆ 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究<sup>(3)</sup>：  $1.226\text{ kg}/\text{m}^3$

(4) 竜巻襲来時における気圧低下を想定した空気密度

ランキン渦モデルを想定した竜巻の気圧は、竜巻から無限遠の位置を標準気圧とすると、以下によって算出できる（下式の導出については別紙参照）。これをもとに、竜巻中心からの距離と気圧低下量の関係を図示したものを図-1に示す。

$$\frac{p}{\rho V_{Rm}^2} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{r}{R_m} \right)^2 - 1 & (r \leq R_m) \\ -\frac{1}{2} \left( \frac{R_m}{r} \right)^2 & (r > R_m) \end{cases}$$

- p : 気圧  
ρ : 空気密度  
V<sub>Rm</sub> : 最大接線風速  
R<sub>m</sub> : 最大接線風速半径  
r : 竜巻中心からの距離

竜巻による最大風速を受ける位置（竜巻の中心から 30m の位置）における気圧低下量は 44 hPa であるから、これを考慮すると竜巻襲来時の気圧は 969 hPa (=1013-44) となる。

一方で、竜巻発生時の低温の影響を考慮するにあたっては、極値ではなく冬季の平均的な気温との組合せを想定する。六ヶ所村における冬季における平均気温の平年値は-2℃程度であり、これをもとに空気密度を評価すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{P \cdot M}{R \cdot T_M} = \frac{0.0034837 \times P}{T + 273.15} \\ &= \frac{0.0034837 \times 96900}{-2 + 273} \\ &= 1.245 \end{aligned}$$

- P : 空気圧力 (Pa)  
M : 空気の平均分子量 (g/mol)  
R : 気体定数 (=8.3142×10<sup>3</sup> Nm/(kmol・K))  
T<sub>M</sub> : 空気の温度 (K)  
T : 空気の温度 (℃)

(出典 : US STANDARD ATMOSPHERE, 1976 <sup>(4)</sup>)

以上より、気温の低下による空気密度の影響は 2%程度とごくわずかである。

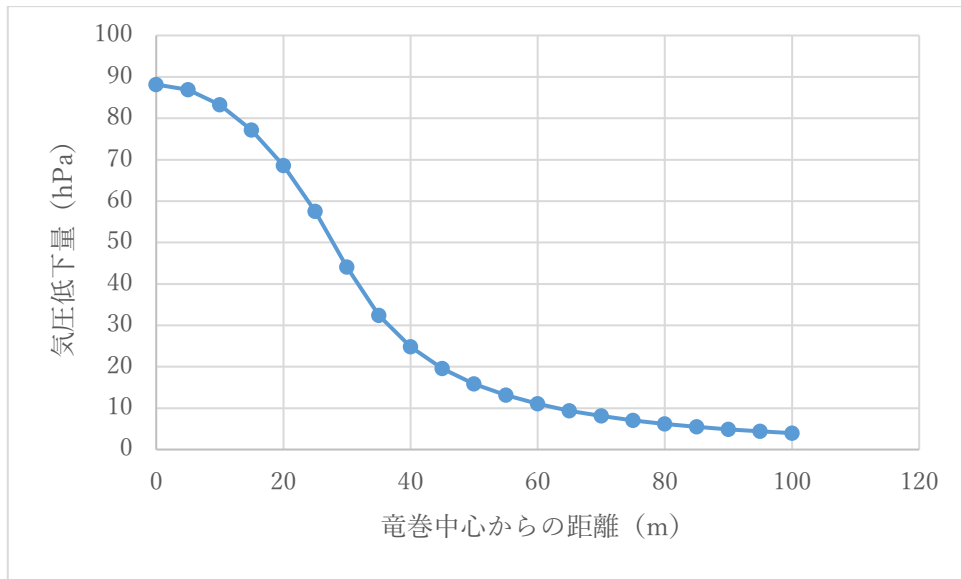


図-1 竜巻による気圧低下量

#### 4. 結論

3. より，設計竜巻のような大規模な竜巻は，それほど低温状況下では発生していないこと，国内外における基準類においても空気密度  $1.22\text{kg}/\text{m}^3$  程度の値を採用していること，仮に竜巻と低温の組合せを想定しても空気密度に及ぼす影響はごくわずかであること，及び以上を踏まえたうえで設計竜巻の最大風速の想定で十分な保守性を考慮していることから，空気密度  $1.22\text{kg}/\text{m}^3$  として設計竜巻荷重を設定することは妥当と考える。

#### 5. 参考文献

- (1) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説，平成 25 年 10 月，独立行政法人原子安全基盤機構。
- (2) REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1, March 2007, U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION.
- (3) 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成 22 年度） 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，平成 23 年 2 月，東京工芸大学。
- (4) US STANDARD ATMOSPHERE, 1976, October 1976, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, UNITED STATES AIR FORCE.

以上

# 別紙



竜巻の気圧分布の算出式について

ランキン渦モデルを想定した竜巻の気圧分布の算出式は、以下のように導出される。  
ランキン渦モデルによる竜巻の風速場は以下のように表される。

$$V_r = \begin{cases} \frac{rV_{Rm}}{R_m} & (r \leq R_m) \\ \frac{R_m V_{Rm}}{r} & (r > R_m) \end{cases} \quad \dots \text{式①}$$

$V_r$  : 半径  $r$  における接線風速,  $V_{Rm}$  : 最大接線風速,  
 $R_m$  : 最大接線風速半径 (=30m),  $r$  : 竜巻中心からの距離

一方、気圧勾配と遠心力のつり合いから以下の式が成り立つ。

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{V_r^2}{r} \quad \dots \text{式②}$$

式①を式②に代入し積分すると以下のようになる。

$$\frac{p}{\rho V_{Rm}^2} = \begin{cases} \int \frac{r}{R_m^2} dr = \frac{1}{2} \frac{r^2}{R_m^2} + C_1 & (r \leq R_m) \\ \int \frac{R_m^2}{r^3} dr = -\frac{1}{2} \frac{R_m^2}{r^2} + C_2 & (r > R_m) \end{cases} \quad \dots \text{式③}$$

竜巻から無限遠における気圧を 0 とし、 $r=R_m$  で気圧が連続であることから  $C_1 = -1$ ,  $C_2 = 0$  とすると、気圧は以下のようになる。

$$\frac{p}{\rho V_{Rm}^2} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{r}{R_m} \right)^2 - 1 & (r \leq R_m) \\ -\frac{1}{2} \left( \frac{R_m}{r} \right)^2 & (r > R_m) \end{cases} \quad \dots \text{式④}$$

以上