

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6添-3-013-14 改0
提出年月日	2023年11月15日

## VI-3-別添 1-8 換気空調設備の強度計算書

2023年11月

東京電力ホールディングス株式会社

## 目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	4
2.4 適用規格	8
3. 強度評価方法	9
3.1 記号の定義	9
3.2 評価対象部位	13
3.3 荷重及び荷重の組合せ	16
3.4 許容限界	18
3.5 評価方法	24
4. 評価条件	32
5. 強度評価結果	37

## 1. 概要

本資料は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、ダンパ、角ダクト、丸ダクト、バタフライ弁及びファンが竜巻時及び竜巻通過後においても、その施設の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

## 2. 基本方針

VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「2.1 評価対象施設」に示す構造計画を踏まえ、ダンパ、角ダクト、丸ダクト、バタフライ弁及びファンの「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

ダンパ、角ダクト、丸ダクト、バタフライ弁及びファンは、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、十分な強度を有する原子炉建屋、タービン建屋海水熱交換器区域及びコントロール建屋内に設置する。

ダンパ、角ダクト、丸ダクト、バタフライ弁及びファンの位置図を図2-1に示す。

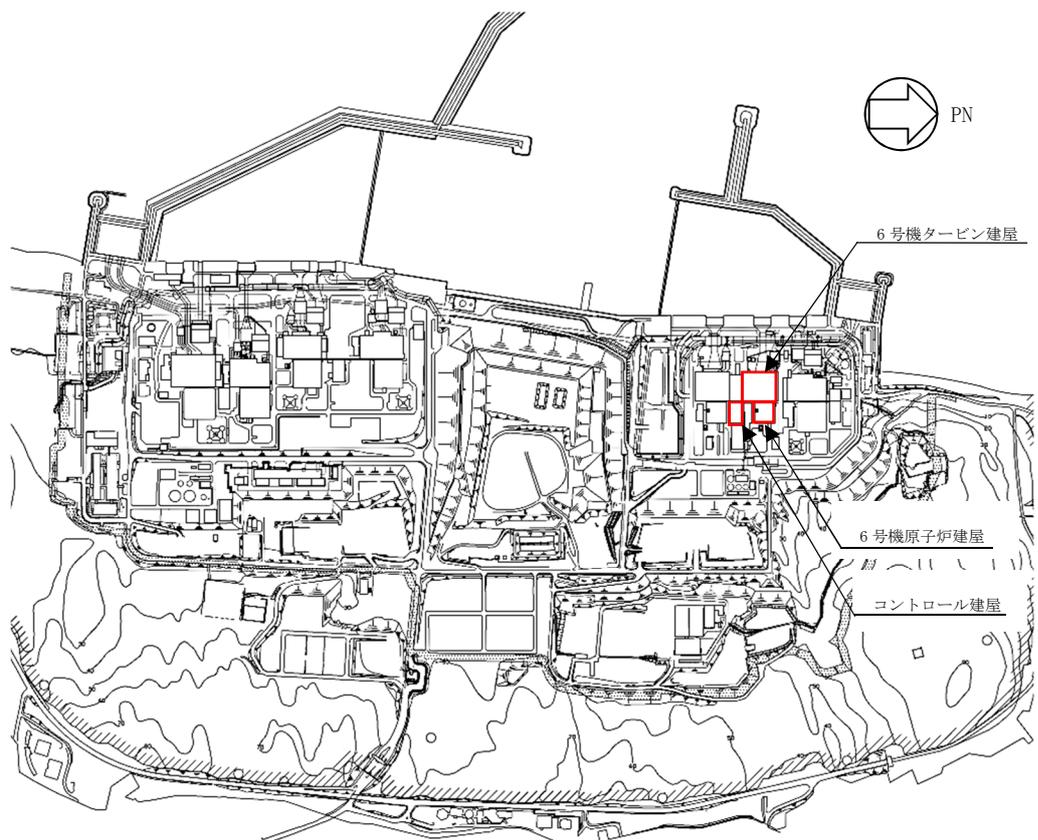


図2-1 ダンパ、角ダクト、丸ダクト、バタフライ弁及びファンの位置図

## 2.2 構造概要

換気空調設備について、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

### (1) ダンパ（換気空調系）の構造概要

ダンパは、鋼製のケーシング、ペーン及びシャフトを主体構造とし、接続ダクトにより支持する。

ダンパの概要図を図 2-2 に示す。

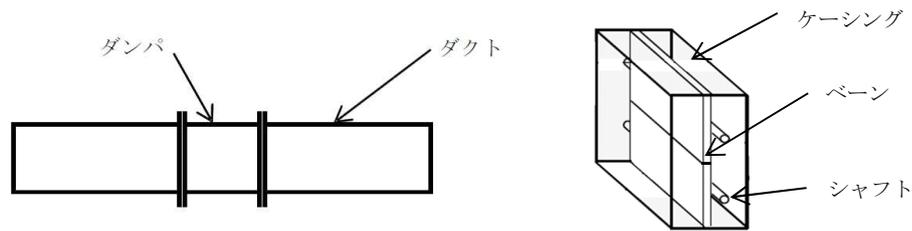


図 2-2 ダンパの概要図

### (2) 角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）の構造概要

角ダクト及び丸ダクトは、鋼製のダクトを主体構造とし、支持構造物により建屋壁、床、梁等に支持する。

角ダクトの概要図を図 2-3 に、丸ダクトの概要図を図 2-4 に示す。

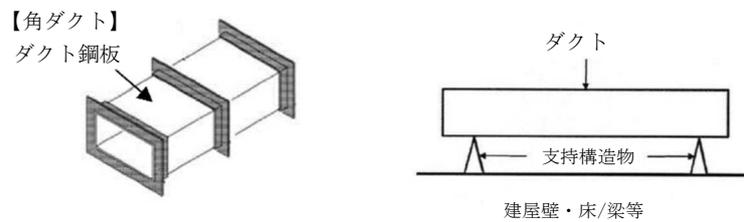


図2-3 角ダクトの概要図

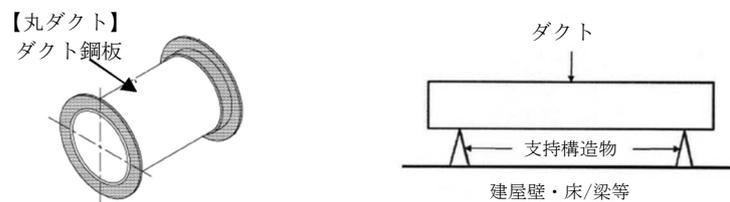


図2-4 丸ダクトの概要図

(3) バタフライ弁（換気空調系）の構造概要

バタフライ弁は，鋼製の弁箱，弁体及び弁棒で構成し，接続ダクトにより支持する。  
バタフライ弁の概要図を図2-5に示す。



図2-5 バタフライ弁の概要図

(4) ファン（換気空調系）の構造概要

ファンは，流路を形成するケーシング，冷却するための空気を送り込む羽根車及び原動機からの回転力を伝達する主軸で形成し，床に基礎ボルトで支持する。

ファンの概要図を図2-6に示す。

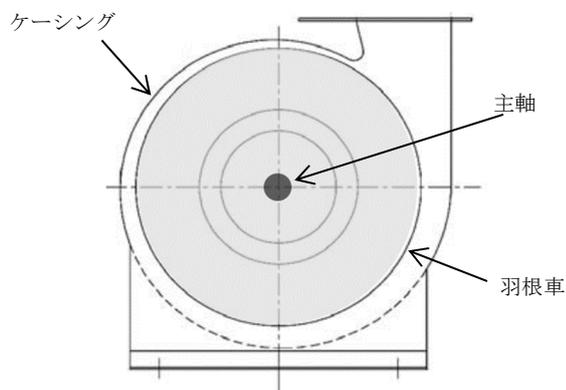


図2-6 ファンの概要図

## 2.3 評価方針

換気空調設備の強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、ダンパ、角ダクト、丸ダクト、バタフライ弁及びファンの各評価対象部位に作用する応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

### (1) ダンパ（換気空調系）の評価方針

ダンパの強度評価フローを図 2-7 に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置されている、外気と繋がっている換気空調設備のうち、ダンパの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

構造強度評価においては、ダンパに対して、常時作用する荷重（自重）と設計竜巻の気圧差による荷重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示すダンパの評価式を用いる。

ダンパの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991追補版」（日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

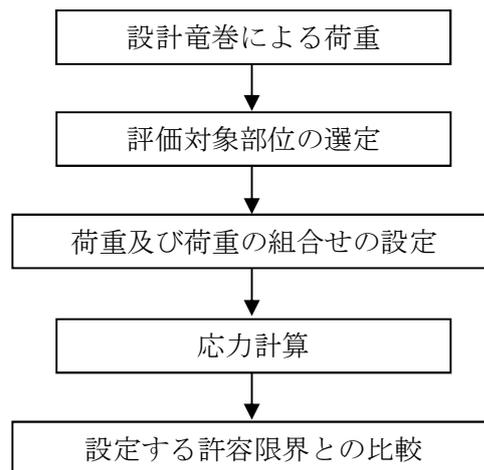


図 2-7 構造強度評価フロー

## (2) 角ダクト（換気空調系）及び丸ダクト（換気空調系）の評価方針

角ダクト及び丸ダクトの強度評価フローを図2-8に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置されている、外気と繋がっている換気空調設備のうち、角ダクト及び丸ダクトの構造強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

角ダクトの構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重と、自重との組合せを考慮して、常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重による応力が許容応力以下であることを確認する。構造強度評価ではVI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

角ダクトの許容限界は、妥当な安全裕度を考慮して、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。ただし、座屈に対しては評価式を満足することを確認する。

丸ダクトの構造強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重と、自重との組合せを考慮して、常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重による応力が評価式を満足していることを確認する。構造強度評価では、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

丸ダクトの許容限界はVI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、クリップリング座屈の算出式に応じた値とする。

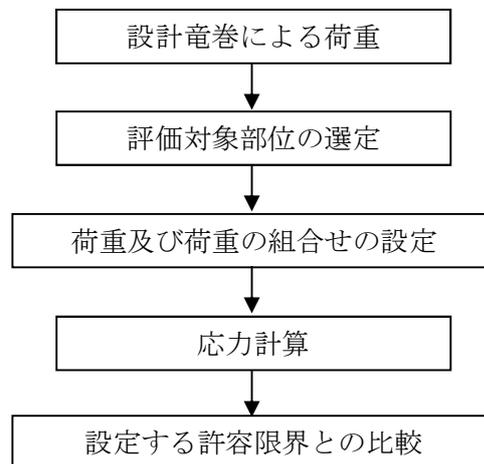


図2-8 構造強度評価フロー

(3) バタフライ弁（換気空調系）の評価方針

バタフライ弁の強度評価フローを図2-9に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置されている、外気と繋がっている換気空調設備のうち、バタフライ弁の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

構造強度評価においては、バタフライ弁に対して、設計竜巻の気圧差が試験圧力以下であることを確認する。構造強度評価では、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示すバタフライ弁の評価方法を用いる。

バタフライ弁の許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、バタフライ弁の試験圧力とする。

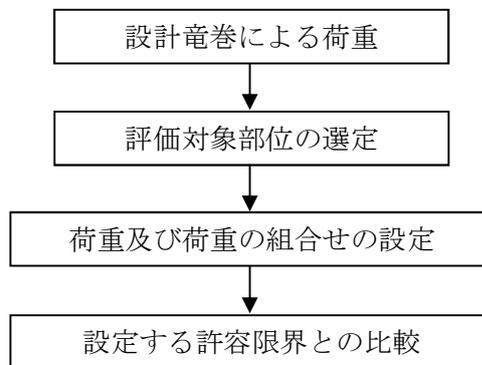


図2-9 構造強度評価フロー

(4) ファン（換気空調系）の評価方針

ファンの強度評価フローを図 2-10 に示す。竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置されている、外気と繋がっている換気空調設備のうち、ファンの強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。

構造強度評価においては、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示すファンの評価式を用いる。

ファンの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、クリッピング座屈の算出式に対応した値とする。

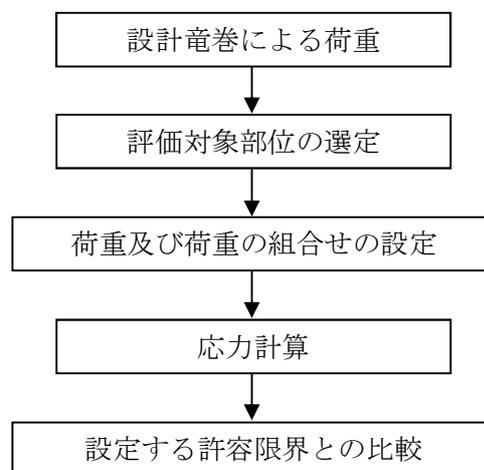


図 2-10 構造強度評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」  
(日本電気協会)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」(日本電気協会)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」(日本電気協会)
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」(日本機械学会) (以下「JSME」という。)
- ・日本産業規格 (JIS)

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

##### (1) ダンパ（換気空調系）

ダンパの構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
$A_s$	$\text{mm}^2$	シャフト断面積
$E$	MPa	ヤング率
$e_c$	mm	ケーシングにおける断面の重心高さ
$F_{1b}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	ベーンの内部圧力による分布荷重
$F_{1c}$	$\text{N}/\text{mm}$	ケーシングの内部圧力による分布荷重
$F_{1s}$	N	内部圧力によりシャフトにかかるせん断荷重
$F_{2b}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	ベーンの自重による分布荷重
$F_{2c}$	$\text{N}/\text{mm}$	ケーシングの自重による分布荷重
$F_{2s}$	N	ベーンの自重によりシャフトにかかるせん断荷重
$g$	$\text{m}/\text{s}^2$	重力加速度
$H_b$	mm	ベーン幅
$I_c$	$\text{mm}^4$	ケーシングの断面二次モーメント
$L_c$	mm	面間寸法
$L_s$	mm	シャフト直径
$l_b$	mm	ベーン長さ
$l_c$	mm	ケーシング長さ
$M_c$	$\text{N}\cdot\text{mm}$	ケーシングに作用する最大曲げモーメント
$m_b$	kg	ベーン質量
$m_c$	kg	ケーシング質量
$P$	MPa	内部圧力
$t_b$	mm	ベーン板厚
$Z_c$	$\text{mm}^3$	ケーシングの断面係数
$\delta_{b\max}$	mm	面外荷重によるベーンの最大変位量
$\Delta P$	$\text{N}/\text{m}^2$	設計竜巻の気圧低下量
$\nu$	—	ポアソン比
$\pi$	—	円周率
$\sigma_{b\max}$	MPa	ベーンの中心に生じる面外荷重による最大応力
$\sigma_{c\max}$	MPa	ケーシングに生じる最大曲げ応力
$\sigma_{s\max}$	MPa	シャフトに生じる最大せん断応力

(2) 角ダクト（換気空調系）

角ダクトの構造強度評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
$D_p$	kg/m <sup>2</sup>	単位面積あたりのダクト鋼板の質量
E	MPa	ヤング率
$f_1$	N	ダクト自重による圧縮荷重
$f_2$	N	面内荷重（外圧）による圧縮荷重
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
$M_p$	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
P	MPa	ダクトにかかる外圧
$P_m$	N	ダクト1枚あたりの限界荷重
$P_0$	Pa	運転圧
t	mm	ダクト板厚
$\delta_{max}$	mm	面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量
$\Delta P$	N/m <sup>2</sup>	設計竜巻の気圧低下量
$\mu$	kg/m	ダクト単位重量
$\nu$	—	ポアソン比
$\pi$	—	円周率
$\sigma_{max}$	MPa	中心に生じる面外荷重による最大応力
$\sigma_y$	MPa	降伏応力

(3) 丸ダクト（換気空調系）

丸ダクトの構造強度評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-3 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
$A_1$	$\text{mm}^2$	ダクト全断面積
$A_2$	$\text{mm}^2$	ダクト板の断面積
$c$	$\text{mm}$	ダクト板の長さ
$d_1$	$\text{mm}$	ダクト内径
$d_2$	$\text{mm}$	ダクト外径
$E$	$\text{MPa}$	ヤング率
$g$	$\text{m/s}^2$	重力加速度
$k_p$	—	座屈係数
$L$	$\text{mm}$	ダクトサポートの支持間隔
$M_p$	$\text{N}\cdot\text{mm}$	自重により作用する曲げモーメント
$M_{c r}$	$\text{N}\cdot\text{mm}$	弾性座屈曲げモーメント
$n$	—	座屈モードの次数
$P$	$\text{MPa}$	ダクトにかかる外圧
$P_o$	$\text{Pa}$	運転圧
$r$	$\text{mm}$	半径
$r_m$	$\text{mm}$	ダクトの平均半径
$t$	$\text{mm}$	ダクト板厚
$Z$	$\text{mm}^3$	断面係数
$Z_c$	—	円筒殻の座屈応力の式における係数
$\beta$	—	円筒殻の座屈応力の式における係数
$\Delta P$	$\text{N/m}^2$	設計竜巻の気圧低下量
$\mu$	$\text{kg/m}$	ダクト単位重量
$\nu$	—	ポアソン比
$\pi$	—	円周率
$\sigma_{c r 1}$	$\text{MPa}$	クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力
$\sigma_{c r 2}$	$\text{MPa}$	弾性座屈曲げ応力
$\sigma_b$	$\text{MPa}$	ダクト自重により作用する曲げ応力
$\sigma_{P b}$	$\text{MPa}$	面内荷重（外圧）による圧縮圧力
$\sigma_{c r i p 1}$	$\text{MPa}$	外圧により生じる周方向応力

(4) バタフライ弁（換気空調系）

バタフライ弁の構造強度評価に用いる記号を表 3-4 に示す。

表 3-4 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
P	MPa	内部圧力
$\Delta P$	N/m <sup>2</sup>	設計竜巻の気圧低下量

(5) ファン（換気空調系）

ファンの構造強度評価に用いる記号を表 3-5 に示す。

表 3-5 構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
c	mm	ファンケーシングの長さ
$k_p$	—	座屈係数
n	—	座屈モードの次数
$P_i$	Pa	運転圧
$P_b$	Pa	ファンケーシングに作用する圧力
r	mm	半径
$r_m$	mm	平均半径
t	mm	ファンケーシングの肉厚
$Z_c$	—	円筒殻の座屈応力の式における係数
$\beta$	—	円筒殻の座屈応力の式における係数
$\Delta P$	N/m <sup>2</sup>	設計竜巻の気圧低下量
$\nu$	—	ポアソン比
$\sigma_\theta$	MPa	周方向応力
$\sigma_{crl}$	MPa	クリッピング座屈が発生する際に生じる周方向応力

### 3.2 評価対象部位

#### (1) ダンパ（換気空調系）の評価対象部位

ダンパの評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻の配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、ケーシング及びベーンに作用し、ベーンを介してシャフトに作用する。

このことから、ケーシング、ベーン及びシャフトを評価対象部位として選定する。

ダンパの強度評価における評価対象部位を、図 3-1 に示す。

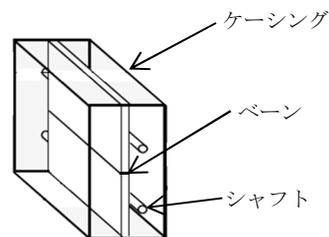


図 3-1 ダンパの評価対象部位

#### (2) 角ダクト（換気空調系）の評価対象部位

角ダクトの評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻の配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、角ダクト本体のダクト鋼板に作用する。

このことから、ダクト鋼板を評価対象部位として選定する。

角ダクトの強度評価における評価対象部位を、図 3-2 に示す。

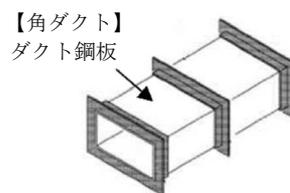


図3-2 角ダクトの評価対象部位

(3) 丸ダクト（換気空調系）の評価対象部位

丸ダクトの評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻の配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、丸ダクト本体のダクト鋼板に作用する。

このことから、ダクト鋼板を評価対象部位として選定する。

丸ダクトの強度評価における評価対象部位を、図3-3に示す。

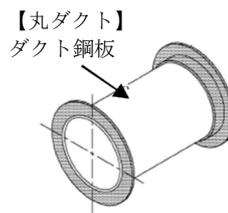


図3-3 丸ダクトの評価対象部位

(4) バタフライ弁（換気空調系）の評価対象部位

バタフライ弁の評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻の配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、バタフライ弁の耐圧部に作用する。

このことから、耐圧部を評価対象部位として選定する。

バタフライ弁の強度評価における評価対象部位を、図3-4に示す。

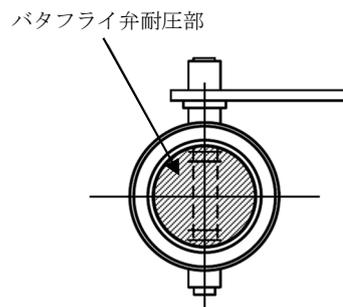


図3-4 バタフライ弁の評価対象部位

(5) ファン（換気空調系）の評価対象部位

ファンの評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻の配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し選定する。

気圧差による荷重は、ファンのケーシングに作用する。

このことから、ケーシングを評価対象部位として選定する。

ファンの強度評価における評価対象部位を図3-5に示す。

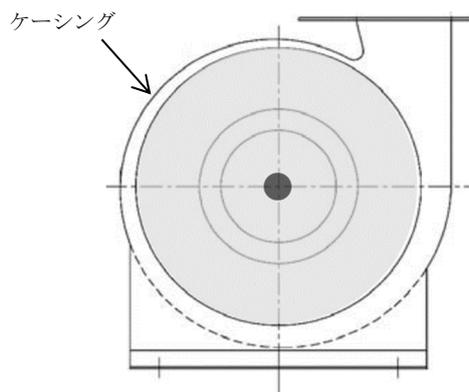


図3-5 ファンの評価対象部位

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえ、換気空調設備の評価対象施設ごとに設定する。

#### (1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

##### a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$\text{自重による荷重} = m \cdot g$$

##### b. 設計竜巻による荷重

外気と繋がっている屋内の施設であるため、気圧差による荷重を考慮する。

##### c. 運転時の状態で作用する荷重

運転時の内圧が給気側は負圧、排気側は正圧となるが、保守性を考慮し気圧差による荷重と同等の向きに作用するものとして、運転時の状態で作用する荷重を考慮する。

#### (2) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せはVI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、評価対象施設ごとに設定する。なお、ダンパ及びバタフライ弁については閉止していることから、運転時の状態で作用する荷重は考慮しない。また、ファン及びバタフライ弁の自重は内圧荷重に比べ十分小さいことから、自重を考慮しない。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	ダンパ (換気空調系)	ケーシング ベーン シャフト	①自重 ②気圧差による荷重
	角ダクト (換気空調系)	ダクト鋼板	①自重 ②気圧差による荷重 ③運転時の状態で作用する荷重
	丸ダクト (換気空調系)	ダクト鋼板	①自重 ②気圧差による荷重 ③運転時の状態で作用する荷重
	バタフライ弁 (換気空調系)	耐圧部	①気圧差による荷重
	ファン (換気空調系)	ケーシング	①気圧差による荷重 ②運転時の状態で作用する荷重

### 3.4 許容限界

#### (1) ダンパ（換気空調系）の許容限界

ダンパの評価対象部位の許容限界は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

ダンパの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、クラス1・クラス2、3・その他の支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E付録材料図表 Part5 の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E付録材料図表 Part5 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

#### a. ダンパに対する許容応力

ダンパの許容限界を表 3-7、許容応力を表 3-8、表 3-9、表 3-10 に示す。

表 3-7 ダンパの許容限界

状態	許容限界		
	一次応力		
	曲げ	せん断	引張
許容応力状態Ⅲ <sub>A</sub> S	$1.5f_b$	$1.5f_s$	$1.5f_t$

表 3-8 ダンパの許容応力（ケーシング）

材料	温度条件 (°C)	$1.5f_b$ (MPa)
SS400	40	282

表 3-9 ダンパの許容応力（ベーン）

材料	温度条件 (°C)	$1.5f_t$ (MPa)
SS400	40	245

表 3-10 ダンパの許容応力（シャフト）

材料	温度条件 (°C)	$1.5f_s$ (MPa)
S35C	40	176

(2) 角ダクト（換気空調系）の許容限界

角ダクトの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

角ダクトの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、クラス1・クラス2、3・その他の支持構造物の許容限界を適用する。設計荷重に対して、当該施設に要求される安全機能を維持できるように弾性設計とするため、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した以下の許容応力を許容限界とする。ただし、妥当な安全裕度を考慮し、座屈を生じないように設定する許容限界は、座屈の算出式に応じた値を許容限界として設定する。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E 付録材料図表 Part5,6 の表にて許容応力を計算する際は、角ダクトの最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表 Part5,6 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

- a. 面外荷重及び外圧による面内荷重に対する許容限界を表 3-11、許容応力を表 3-12 に示す。

表 3-11 角ダクトの許容限界

状態	許容限界
	一次応力
	引張
許容応力状態Ⅲ <sub>A</sub> S	1.5f <sub>t</sub>

表 3-12 角ダクトの許容応力

材料	温度条件 (°C)	1.5f <sub>t</sub> (MPa)
SGCC	40	189

- b. 常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重に対する許容限界

ダクト自重による圧縮荷重 f<sub>1</sub> と設計竜巻による内外差及び運転圧による圧縮荷重 f<sub>2</sub> の和が許容荷重 P<sub>m</sub> 以下であることを確認する。

なお、ダクト自重による圧縮荷重 f<sub>1</sub> はダクト板 1 枚あたりの圧縮荷重として算出され、設計竜巻による内外圧差及び運転圧による圧縮荷重 f<sub>2</sub> はダクト板 4 枚あたりの圧縮荷重として算出される。許容荷重 P<sub>m</sub> はダクト板 1 枚あたりとして算出されるため、関係は以下の式で表わされる。

$$4 \cdot f_1 + f_2 \leq 4 \cdot P_m$$

ここで、

$$P_m = \frac{\pi}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \sqrt{E \cdot \sigma_y \cdot t^2}$$

## (3) 丸ダクト（換気空調系）の許容限界

丸ダクトの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、クリップリング座屈及び弾性座屈曲げ応力の算出式に応じた値とする。

丸ダクトの許容限界は、設計荷重に対して、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、座屈を生じないこととするため、クリップリング座屈の算出式に応じた値を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表 Part5, 6 の表にて許容応力を計算する際は、丸ダクトの最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度が J S M E 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、J S M E 付録材料図表 Part5, 6 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

## a. 外圧に対する許容限界

外圧により生じる周方向応力は、クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力（座屈応力） $\sigma_{cr1}$  を超えないこととする。

外圧によるクリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力  $\sigma_{cr1}$  は、円筒殻の座屈応力の式より算出する。

$$\sigma_{cr1} = \frac{k_P \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{c}\right)^2$$

$$k_P = \frac{(1+\beta^2)^2}{0.5+\beta^2} + \frac{12 \cdot Z_c^2}{\pi^4(1+\beta^2)^2(0.5+\beta^2)}$$

$$\beta = \frac{c \cdot n}{\pi \cdot r}$$

$$Z_c = \frac{c^2}{r \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

ここで、座屈モードの次数  $n$  は  $k_P$  が最小となる時の次数とする。

## b. 常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重に対する許容限界

ダクト自重により作用する曲げ応力  $\sigma_b$  と設計竜巻による内外差圧及び運転圧による軸方向圧縮荷重による応力  $\sigma_{Pb}$  の和が、弾性座屈曲げ応力  $\sigma_{cr2}$  以下であることを確認する。

$$\sigma_b + \sigma_{Pb} \leq \sigma_{cr2}$$

ここで、

$$\sigma_{cr2} = \frac{M_{cr}}{Z}$$

$$M_{c r} = \frac{0.72 \cdot E \cdot r \cdot t^2}{(1 - \nu^2)}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$$

(4) バタフライ弁（換気空調系）の許容限界

バタフライ弁の許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、バタフライ弁の試験圧力に応じた値とする。

バタフライ弁の許容限界は、バタフライ弁の耐圧部に発生する圧力に対して、バタフライ弁の試験圧力を許容限界とする。

(5) ファン（換気空調系）の許容限界

ファンの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、クリップリング座屈の算出式に応じた値とする。

ファンの許容限界は、設計荷重に対して、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、座屈を生じないこととするため、クリップリング座屈の算出式に応じた値を許容限界とする。

a. 外圧に対する許容応力

外圧により生じる周方向応力はクリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力（座屈応力） $\sigma_{cr1}$ を超えないこととする。

外圧によるクリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力 $\sigma_{cr1}$ は円筒殻の座屈応力の式より算出する。



$$\sigma_{cr1} = \frac{k_P \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{c}\right)^2 \boxed{\phantom{0}}$$

$$k_P = \frac{(1+\beta^2)^2}{0.5+\beta^2} + \frac{12 \cdot Z_c^2}{\pi^4(1+\beta^2)^2(0.5+\beta^2)}$$

$$\beta = \frac{c \cdot n}{\pi \cdot r}$$

$$Z_c = \frac{c^2}{r \cdot t} \sqrt{1-\nu^2}$$

### 3.5 評価方法

#### (1) ダンパ（換気空調系）の評価方法

ダンパの強度評価は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定しているダンパの評価式を用いる。

#### a. 計算モデル

##### (a) ダンパ

ケーシングは、ケーシング板材を4辺に分割し、その1辺を同様の断面性能を持つ単純支持梁として計算を行う。ケーシングのモデル図を図3-6に示す。

ベーンは、四辺支持長方形板に等分布荷重がかかるものとし、曲げ応力による計算を行う。ベーンのモデル図を図3-7に示す。

シャフトは、内部圧力及び自重により発生する荷重が両端のシャフトに均等に作用するものとし、シャフト断面についてせん断応力による計算を行う。シャフトのモデル図を図3-8に示す。

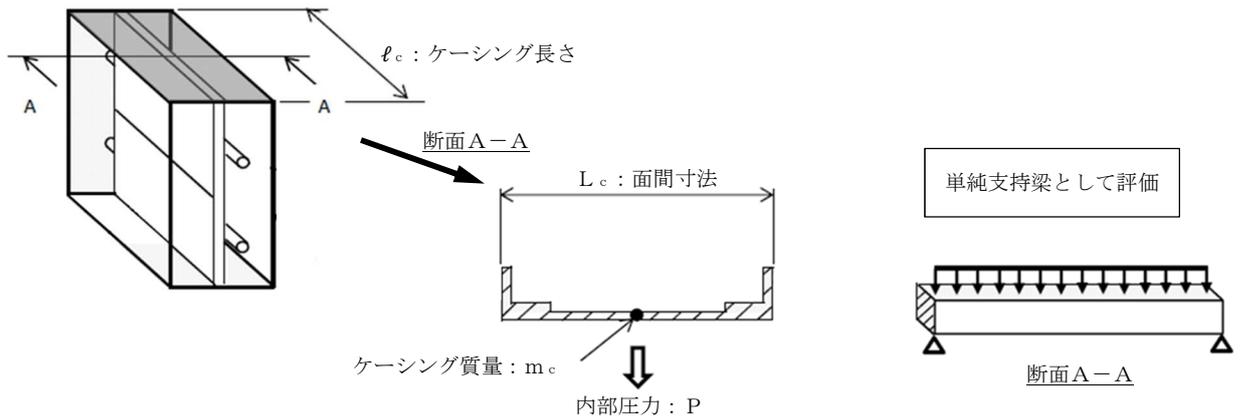


図3-6 ケーシングのモデル図

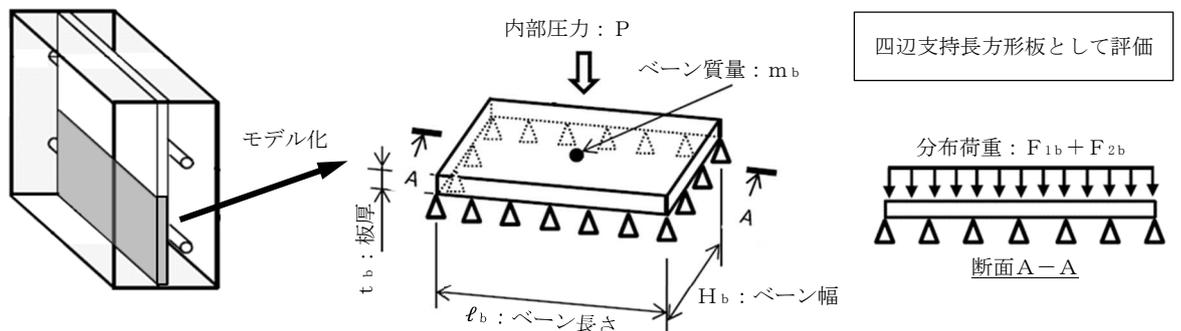


図3-7 ベーンのモデル図

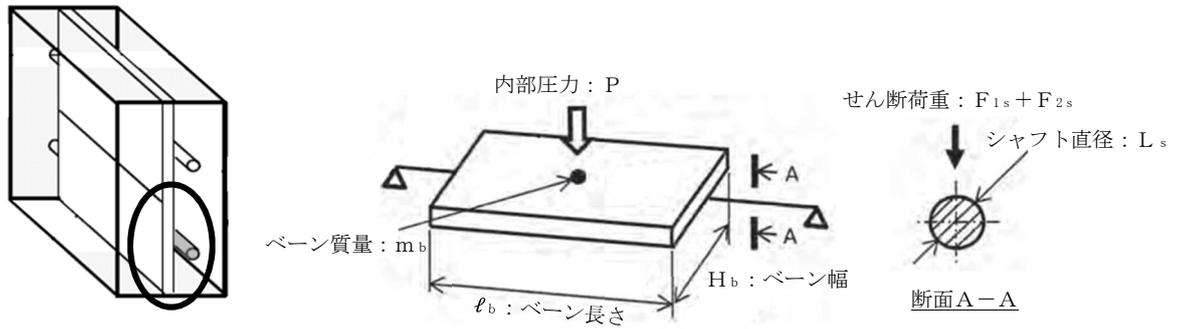


図 3-8 シャフトのモデル図

b. 計算方法

内部圧力は、設計竜巻により発生する気圧差によって発生するので、

$$P = \Delta P$$

(a) ケーシング

ケーシングに作用する最大曲げモーメント

$$M_c = \frac{\ell_c^2 (F_{1c} + F_{2c})}{8}$$

ここで、

$$F_{1c} = P \cdot L_c$$

$$F_{2c} = \frac{m_c \cdot g}{\ell_c}$$

ケーシングに生じる最大曲げ応力

$$\sigma_{c \max} = \frac{M_c}{Z_c}$$

ここで、

$$Z_c = \frac{I_c}{e_c}$$

(b) ベーン

ベーンに生じる発生応力は、四辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合において、中心に生じる外圧及び自重による面外荷重により作用する最大応力  $\sigma_{bmax}$  とその面外荷重によるベーンの最大変位量  $\delta_{bmax}$  との関係は、以下の式で表わされる。

機械工学便覧に記載されている四辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式を引用する。

$$\sigma_{bmax} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_{bmax}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{bmax} + 4t_b}{\ell_b^2} + \frac{\nu(\delta_{bmax} + 4t_b)}{H_b^2} \right\} \dots \dots (3.1)$$

$$\frac{256(1-\nu^2)(F_{1b} + F_{2b})}{\pi^6 E t_b^4} = \frac{4}{3} \left( \frac{1}{\ell_b^2} + \frac{1}{H_b^2} \right)^2 \frac{\delta_{bmax}}{t_b} + \left\{ \frac{4\nu}{\ell_b^2 \cdot H_b^2} + (3-\nu^2) \left( \frac{1}{\ell_b^4} + \frac{1}{H_b^4} \right) \right\} \left( \frac{\delta_{bmax}}{t_b} \right)^3 \dots \dots (3.2)$$

ここで、

$$F_{1b} = P$$

$$F_{2b} = \frac{m_b \cdot g}{\ell_b \cdot H_b}$$

式 (3.2) より得られる  $\delta_{bmax}$  の値を式 (3.1) へ代入し、 $\sigma_{bmax}$  を算出する。

(c) シャフト

シャフトに生じる最大せん断応力

$$\sigma_{smax} = \frac{F_{1s} + F_{2s}}{A_s}$$

ここで、

$$F_{1s} = P \cdot H_b \cdot \ell_b$$

$$F_{2s} = m_b \cdot g$$

$$A_s = \left( \frac{L_s}{2} \right)^2 \cdot \pi$$

(2) 角ダクト（換気空調系）の評価方法

角ダクトの強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している角ダクトの評価式を用いる。

a. 計算モデル

任意のダクト面に着目すると、ダクト面は両サイドをほかの2つの側面のダクト面で、軸方向（流れ方向）を補強部材（及び接続部材）で支持された長方形の板とみなすことができる。そのため、鋼板を補強部材と両サイドのウェブで支持された四辺単純支持長方形板とし評価を行う。自重等によりダクトに生じる曲げモーメントに関し、ウェブでの応力分布が線形で、中立面がフランジの両側から等距離の中央線上にあるとする。角ダクトのモデル図を図3-9に示す。

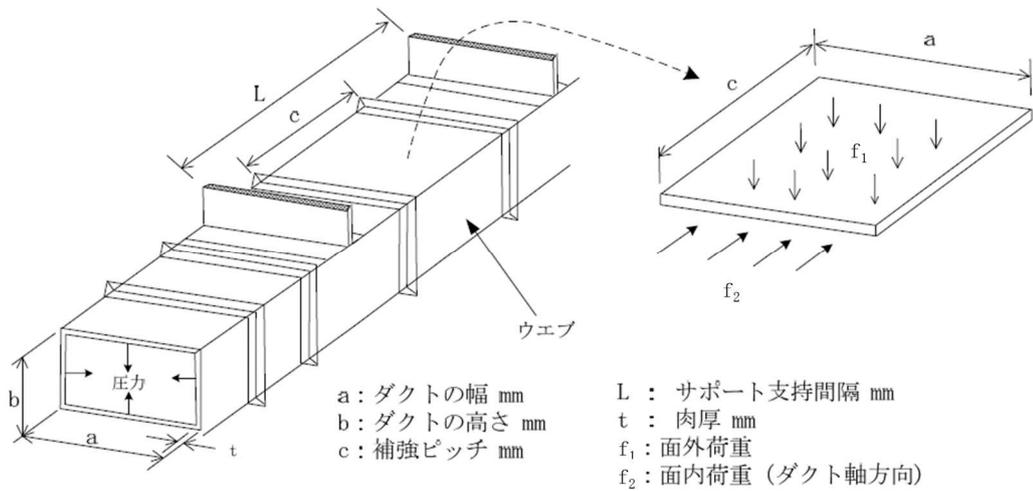


図3-9 角ダクトのモデル図

b. 評価方法

ダクトにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差及び運転圧が影響するので、

$$P = \Delta P + P_0$$

(a) 面外荷重による発生応力

四辺単純支持（周辺で水平，垂直方向の変位拘束，たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において，中心に生じる外圧及び自重による面外荷重により作用する最大応力  $\sigma_{max}$  とその面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量  $\delta_{max}$  との関係は，以下の式で表される。

機械工学便覧に記載されている四辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式を引用する。

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{max} + 4t}{a^2} + \frac{\nu(\delta_{max} + 4t)}{c^2} \right\} \dots (3.3)$$

$$\frac{256(1-\nu^2)}{\pi^6 \cdot E \cdot t^4} (P + g \cdot D_p) = \frac{4}{3} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \frac{\delta_{\max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 \cdot c^2} + (3-\nu^2) \left( \frac{1}{a^4} + \frac{1}{c^4} \right) \right\} \left( \frac{\delta_{\max}}{t} \right)^3 \dots (3.4)$$

式 (3.4) より得られる  $\delta_{\max}$  の値を式 (3.3) へ代入し、 $\sigma_{\max}$  を算出する。

(b) 面内荷重による発生応力

イ. 自重による発生応力

自重によりダクト鋼板に作用する圧縮荷重は、以下の式により算出する。

$$f_1 = \frac{M_p}{b}$$

ここで、

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

ロ. 外圧による発生応力

ダクト面内が受ける気圧差と運転圧による圧縮荷重は、以下の式により算出する。

$$f_2 = (a + 2t) \cdot (b + 2t) \cdot P \cdot 10^{-6}$$

(3) 丸ダクト（換気空調系）の評価方法

丸ダクトの強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している丸ダクトの評価式を用いる。

a. 計算モデル

両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。丸ダクトのモデル図を図3-10に示す。

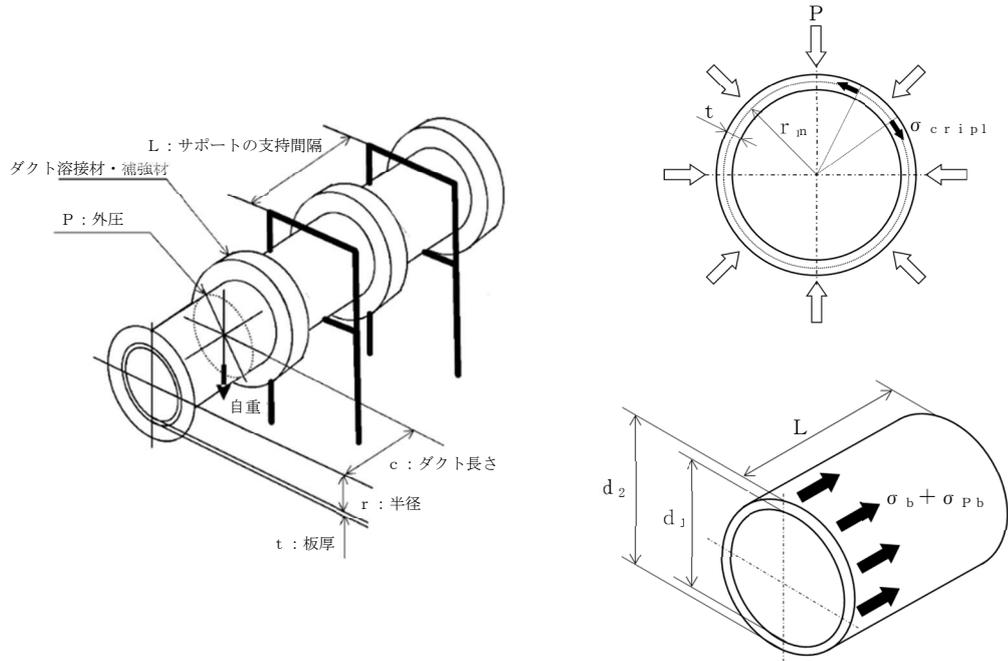


図3-10 丸ダクトのモデル図

b. 評価方法

ダクトにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差及び運転圧が影響するので、 $P = \Delta P + P_o$ 。

(a) 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_{c r i p l} = \frac{P \cdot r_m}{t}$$

(b) 面内荷重による発生応力

イ. 自重による発生応力

自重によりダクト鋼板に作用する曲げ応力は、以下の式により算出する。

$$\sigma_b = \frac{M_p}{Z}$$

ここで,

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$$

ロ. 外圧による発生応力

ダクト面内が受ける気圧差と運転圧による圧縮応力は、以下の式により算出する。

$$\sigma_{pb} = P \cdot \frac{A_1}{A_2}$$

ここで,

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2)$$

(4) バタフライ弁（換気空調系）の評価方法

バタフライ弁の強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定しているバタフライ弁の評価式を用いる。

評価方法は、設計竜巻により発生する気圧差とバタフライ弁の試験圧力との比較を行う。設計竜巻により発生する気圧差は以下のとおり。

$$P = \Delta P$$

(5) ファン（換気空調系）の評価方法

ファンの強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定しているファンの評価式を用いる。

a. 計算モデル

ファンは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。ファンのモデル図を図3-14に示す。

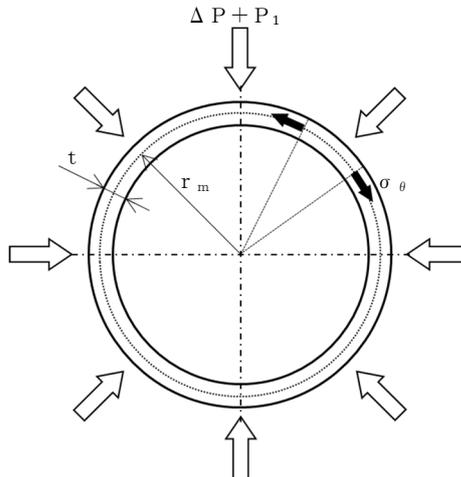


図3-14 ファンのモデル図

b. 評価方法

ファンにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差及び運転圧が影響するので、

$$P_b = \Delta P + P_1$$

(a) 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_b \cdot r_m}{t}$$

#### 4. 評価条件

##### (1) ダンパ（換気空調系）

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

ダンパにおいて、外殻を構成するケーシングの発生応力比が最も厳しくなる系統のダンパについて記載する。

表 4-1 評価条件（ケーシング）

系統		
非常用電気品区域換気空調系		

P (MPa)	$l_c$ (mm)	$L_c$ (mm)
0.0097*	1500	350

$m_c$ (kg)	g (m/s <sup>2</sup> )	$I_c$ (mm <sup>4</sup> )
9.479	9.80665	252000

$e_c$ (mm)
35.6

注記\*：評価上保守的に設計竜巻の気圧低下量 ( $\Delta P = 6400 \text{ (N/m}^2\text{)})$  に、運転圧 (0.0033 (MPa)) を考慮。

表 4-2 評価条件 (ベーン)

系統		
非常用電気品区域換気空調系		

E (MPa)	$t_b$ (mm)	$\ell_b$ (mm)
202000	2.3	1500

$\nu$ (-)	$H_b$ (mm)	P (MPa)
0.3	300	0.0097*

$m_b$ (kg)	g ( $m/s^2$ )
8.1	9.80665

注記\* : 評価上保守的に設計竜巻の気圧低下量 ( $\Delta P = 6400 (N/m^2)$ ) に、運転圧(0.0033 (MPa))を考慮。

表 4-3 評価条件 (シャフト)

系統		
非常用電気品区域換気空調系		

P (MPa)	$H_b$ (mm)	$\ell_b$ (mm)
0.0097*	300	1500

$m_b$ (kg)	g ( $m/s^2$ )	$L_s$ (mm)
8.1	9.80665	13

注記\* : 評価上保守的に設計竜巻の気圧低下量 ( $\Delta P = 6400 (N/m^2)$ ) に、運転圧(0.0033 (MPa))を考慮。

(2) 角ダクト（換気空調系）

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-4 に示す。

角ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは面外荷重であり、その発生応力比が最も厳しくなる系統の角ダクトについて記載する。

表 4-4 評価条件

系統			
非常用電気品区域換気空調系			

$\Delta P$ (Pa)	$P_0$ (Pa)	E (MPa)	$\nu$ (-)
6400	3300	202000	0.3

t (mm)	a (mm)	c (mm)	g (m/s <sup>2</sup> )
0.5	450	1800	9.80665

$D_p$ (kg/m <sup>2</sup> )	b (mm)	$\mu$ (kg/m)	L (mm)
4.169	150	10.8	3200

$\sigma_y$ (MPa)
205

(3) 丸ダクト（換気空調系）

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-5に示す。

丸ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは周方向応力であるため、その発生応力比が最も厳しくなる系統の丸ダクトについて記載する。

表4-5 評価条件

系統			
海水熱交換器区域換気空調系			

$\Delta P$ (MPa)	$P_0$ (MPa)	$r_m$ (mm)	$t$ (mm)
0.0064	0.00098	640.6	1.2

$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu$ (kg/m)	$L$ (mm)	$E$ (MPa)
9.80665	52.584	3000	201200

$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$\nu$ (-)	$c$ (mm)
1280	1282.4	0.3	260

$n$ (-)
19

(4) バタフライ弁（換気空調系）

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-6に示す。

表4-6 評価条件

系統	
中央制御室換気空調系	

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )
6400

(5) ファン（換気空調系）

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-7 に示す。

ファンにおいて、発生応力比が最も厳しくなるファンについて記載する。

表 4-7 評価条件

系統	機器名称
中央制御室換気空調系	中央制御室送風機(A)

$\Delta P$ (MPa)	$P_1$ (MPa)	$r_m$ (mm)	$t$ (mm)
0.0064	0.0033	1682.25	4.5

E (MPa)	$\nu$ (-)	c (mm)	n (-)
201000	0.3	1191	14

r (mm)
1680

## 5. 強度評価結果

### (1) ダンパ（換気空調系）

ダンパの構造強度評価結果を表 5-1～表 5-3 に示す。

ケーシング、ベーン及びシャフトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果（ケーシング）

ケーシングに発生する曲げ応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
138	282

表 5-2 評価結果（ベーン）

ベーンに発生する面外荷重による応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
84	245

表 5-3 評価結果（シャフト）

シャフトに発生するせん断応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
34	176

(2) 角ダクト（換気空調系）

角ダクトの構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

ダクト鋼板に発生する応力は許容応力以下であり，常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重及び運転時の状態で作用する荷重による発生荷重は許容値以下である。

表 5-4 評価結果（角ダクト）

系統	ダクトサイズ (mm)
非常用電気品区域換気空調系	450×150×0.5

面外荷重	
発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
140	189

面内荷重			
自重による発生荷重 $4 \times f_1$ (N)	外圧による発生荷重 $f_2$ (N)	合成発生荷重 $4 \times f_1 + f_2$ (N)	許容値 $4 \times P_m$ (N)
3616	661	4277	12240

(3) 丸ダクト（換気空調系）

丸ダクトの構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

ダクト鋼板に発生する周方向応力は許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（丸ダクト）

系統	ダクトサイズ (mm)
海水熱交換器区域換気空調系	φ 1280×1.2

外圧より生じる周方向応力	
発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
4	39

常時作用する荷重（自重）＋設計竜巻の気圧差による荷重 及び運転時の状態で作用する荷重により発生する応力			
自重による発生応力 (MPa)	外圧による発生応力 (MPa)	合成発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
0.376	1.974	3	94

(4) バタフライ弁（換気空調系）

バタフライ弁の構造強度評価結果を表 5-6 に示す。

バタフライ弁の耐圧部に発生する圧力は許容値以下である。

表 5-6 評価結果

系統	発生圧力 (MPa)	許容値 (MPa)
中央制御室換気空調系	0.0064	0.9806

(5) ファン（換気空調系）

ファンの構造強度評価結果を表 5-7 に示す。

ケーシングに発生する周方向応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（ファン）

ケーシングに発生する周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
4	12