断続溶接部近傍の残留応力測定結果

（ひび割れ③，⑳に隣接する健全部）

○：歪みゲージ(多軸)

歪みゲージ取付位置

断続溶接部近傍の残留応力測定結果

[応力値単位：MPa]

測定部位	歪みゲージNo. / 残留応力(注)	溶接左端部		溶接中央部		溶接右端部	
		1	2	3	4	5	6
ひび割れ③近傍	σ_{XX}方向（溶接方向）	82	31	-39	111	64	63
	σ_{XY}方向（溶接方向に対し45°）	80	-51	35	30	51	79
	σ_{YY}方向（溶接方向に対し90°）	188	37	220	48	89	19
ひび割れ⑳近傍	σ_{XX}方向（溶接方向）	29	21	65	29	221	54
	σ_{XY}方向（溶接方向に対し45°）	62	38	109	75	54	34
	σ_{YY}方向（溶接方向に対し90°）	215	108	168	8	231	78

（注）残留応力の符号
正：引張応力成分
負：圧縮応力成分
応力値は計測された歪みより、一般的な材料定数を元に計算した値

ひび割れ③，⑳に隣接する健全部の断続溶接部近傍の残留応力を測定した結果、降伏応力程度の残留応力が発生し得る（降伏歪み程度の残留歪みが発生し得る）ことを確認した。
（参考）
ステンレス鋼（SUS304）の降伏応力：$\sigma_{0.2}$=205MPa［規格値］

補助建家排気筒の振動計測結果

補助建家排気筒水平ダクト部及び鉛直ダクト部について、ひび割れを確認した付近の振動計測（変位計測）を実施した。

単位（μm^{P-P}）

		正面板	側面板
鉛直ダクト部	⑨	300	－
	⑧	300	－
	⑦	380	－
	⑥	200	－
	⑤	620	180
	④	980	54
	③	1300	200
	②	380	200

		上面板	側面板
水平ダクト部	①	1800	1600

①および③～⑤はダクト板の最大値を示す
②および⑥～⑨はダクト板のほぼ中央部の計測値を示す

補助建家排気筒ダクト振動計測位置（概要図）

格納容器排気筒調査結果
破面マクロ観察（ひび割れ㉑）

写真B
観察方向

写真A

写真B

A部拡大

B部拡大

【観察結果】
・ひび割れ㉑は、溶接金属のほぼ中央を貫通しており、破面表面は腐食により変色している。
・シール溶接金属部の接続鋼材も著しい腐食を受けている。

格納容器排気筒調査結果
断面ミクロ観察（ひび割れ㉑）

A部

B部

C部

【観察結果】
・ひび割れ㉑の断面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められる。

格納容器排気筒調査結果
破面ＳＥＭ観察（ひび割れ㉑ 接続鋼材側）

ひび割れ㉑ 破面ＳＥＭ観察位置

A部拡大

拡大

拡大

【観察結果】
・ひび割れ㉑破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

格納容器排気筒調査結果
破面ＳＥＭ観察（ひび割れ㉑ 中央部）

ひび割れ㉑ 破面ＳＥＭ観察位置

B部拡大

拡大

拡大

【観察結果】
・ひび割れ㉑破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

格納容器排気筒調査結果
硬度測定（ひび割れ㉑）

		硬度（ビッカース換算）	
		平均	最高
測定値	ひび割れ㉑ 近傍部	約 385	416
	一般部	約 175	185

炭素鋼（SS41）の硬さ規格値はなし。

［測定結果］
・ひび割れ㉑近傍の溶接金属部の硬度を測定した結果、硬化した部位が認められた。

格納容器排気筒調査結果
ＥＰＭＡによる分析（ひび割れ ㉑の破面元素分析）

[単位：重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
ひび割れ㉑	0.25	2.21	1.33	0.72	0.44	0.37	1.01	93.66

(参考)

[単位：重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
一般部 (炭素鋼)	0.29	2.04	1.63	0.07	0.64	0.53	1.34	93.46

【分析結果】
・ひび割れ㉑破面の元素分析を行った結果、鉄鋼材料に有害な不純物は一般部とほぼ同等であることが確認された。

格納容器排気筒の振動計測結果

格納容器排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部について、ひび割れを確認した付近の振動計測（変位計測）を実施した。

単位（μm^{P-P}）

		正面板	側面板
鉛直ダクト部	⑨	56	66
	⑧	36	80
	⑦	60	72
	⑥	66	53
	⑤	71	75
	④	64	52
	③	35	54
	②	28	34

		下面板	側面板
水平ダクト部	①	90	60

①～⑨全てダクト板のほぼ中央部の測定値を示す

①の上面板は狭隘なため下面を測定

格納容器排気筒ダクト振動計測位置（概要図）

格納容器排気筒の断続溶接部に関する考察

格納容器排気筒（以下、「Ｃ／Ｖ排気筒」という）の断続溶接部については、補助建家排気筒（以下、「Ａ／Ｂ排気筒」という）で認められた低応力高サイクルによるひび割れは確認されていない。

この要因について検討した結果、Ｃ／Ｖ排気筒については、

ａ．口径は１，５００mm×１，０００mmであり、Ａ／Ｂ排気筒（口径２，５００mm×１，０００mm）に比べて小さく剛性が高い

ｂ．設計風速は約１８ｍ／秒であり、Ａ／Ｂ排気筒（約２０ｍ／秒）に比べて小さい

ｃ．Ｃ／Ｖ排気筒の振動計測（変位の両振幅）を行った結果、水平ダクト部下面は最大で９０μｍ、鉛直ダクト部正面は最大で７１μｍであり、Ａ／Ｂ排気筒の約１／２０程度と小さい

ことから、Ｃ／Ｖ排気ファンの運転に伴い発生する変動応力は小さく、ひび割れが認められなかったと推定される。

補助建家排気筒の配置上の特徴

＜振動計測結果＞

単位（μm^{P-P}）

		正面板
鉛直ダクト部	⑨	300
	⑧	300
	⑦	380
	⑥	200
	⑤	620
	④	980
	③	1300
	②	380

		上面板
水平ダクト部	①	1800

・水平ダクト部は、曲がり部の後流部であり、圧力変動が発生しやすく、また、補強鋼材の間隔が長く振動が大きくなりやすい。

・鉛直ダクト部は、短い間隔で連続した曲がり部の後流部であり、圧力変動が増加し振動が大きくなりやすい。

また、ひび割れ発生箇所の曲がり部からの距離は、ダクト短辺1000mmをDとすると、

水平ダクト部は約1.5～3Dの間

鉛直ダクト部は約2.5～3.5Dの間

であり、圧力変動が生じやすい範囲にあり、これは振動計測結果ともほぼ一致している。

高サイクル疲労によるひび割れの発生に関する評価結果（ひび割れ③部および⑳部）

1．目的

補助建家排気筒の水平ダクト部および鉛直ダクト部のひび割れ発生部の詳細調査結果から、ひび割れの発生要因として、低応力高サイクル疲労が抽出されたことから、ダクト内の圧力変動による振動で発生する変動応力を算出するとともに疲労限を推定し、疲労評価を実施する。

2．検討項目

（1）振動による変動応力の算出

ａ．振動応答解析

・ダクト内の圧力変動を規格化した圧力変動パワースペクトルと実機のダクト内の圧力計測結果より、実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定する。

・ 対象ダクトを板要素でモデル化し、実機解析用圧力変動パワースペクトルを入力としたＦＥＭ解析により、ひび割れ③部および⑳部の変動応力（公称応力）を算出する。

ｂ．変動応力推定

・ 上記で得られた公称応力に、断続溶接部周辺をソリッド要素でモデル化したＦＥＭ解析から得られた断続溶接部の形状不連続による応力割増を考慮して、変動応力を算出する。

（2）疲労限の推定

・ 詳細調査で得られた硬さにおける材料強度（0.2%耐力$\sigma_{0.2}$および引張強さσ_B）を求める。

・ 引張強さσ_Bより定まる疲労限S_wに断続溶接部の応力集中（応力集中係数K_t）を考慮し、疲労限σ_w（＝S_w／K_t）を求める。

・ 以上の材料強度から修正グッドマン線図により、平均応力σ_m（詳細調査で得られた残留応力、内圧・自重による応力）を考慮した疲労限$\sigma_{w'}$を求める。

（3）疲労評価

・ 変動応力と疲労限を比較し、疲労破壊の可能性を評価する。

３．結果

解析および評価を実施し、以下の結果を得た。

（１）振動による変動応力の算出・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《別紙１》

ａ．振動応答解析結果

・ ひび割れ③部変動応力（公称応力）：３１．２ＭＰａ
・ ひび割れ⑳部変動応力（公称応力）：２９．３ＭＰａ

ｂ．変動応力推定結果

・ 形状不連続による応力割増係数：１．６・・・・・・・・《別紙１参考資料》
・ ひび割れ③部変動応力：５０ＭＰａ
・ ひび割れ⑳部変動応力：４７ＭＰａ

（２）疲労限の推定・・《別紙２》

・ ひび割れ③部：４３ＭＰａ
・ ひび割れ⑳部：４３ＭＰａ

（３）疲労評価

水平ダクト部上面板および鉛直ダクト部正面板の断続溶接部に発生する変動応力は、疲労限を上回り疲労破壊が発生し得ることを確認した。

疲労評価結果

	変動応力（ＭＰａ）	疲労限（ＭＰａ）	疲労破壊の可能性
ひび割れ③部	５０	４３	有り
ひび割れ⑳部	４７	４３	有り

振動による変動応力の算出結果
（ひび割れ③部および⑳部）

1．概要

補助建家排気筒の水平ダクト部および鉛直ダクト部のひび割れ発生部について、ダクト内の圧力変動による振動で発生する断続溶接部の変動応力を算出する。

2．解析方法

（1）解析フロー

解析は対象ダクトを板要素でモデル化し、ダクト曲がり部に発生する圧力変動をメーカ試験結果より規格化した圧力変動パワースペクトルと実機圧力計測結果を基に実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定し、振動応答解析を実施する。振動応答解析で得られた変動応力（公称応力）に形状不連続による応力割増を考慮し、ひび割れ③部および⑳部の溶接止端部に発生する変動応力を算出する。解析フローを以下に示す。

解析モデル	平板モデル：ダクトの補強鋼材間のダクト面を板要素で分割
⇩	
入力条件	圧力変動の設定： 規格化した圧力変動パワースペクトル（試験結果）と実機諸元および実機圧力計測結果を基に実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定
⇩	
振動応答解析	実機解析用圧力変動パワースペクトルを入力し、ひび割れ③部および⑳部の変動応力（公称応力）を算出
⇩	
変動応力算出	形状不連続による応力割増係数を掛けて、ひび割れ③部および⑳部の断続溶接止端部に発生する変動応力を算出

（2）解析モデル

ダクトの補強鋼材間のダクト面を対象に、板要素を用いてダクト面を平板にモデル化した。

拘束条件として、ダクト板と補強鋼材の断続溶接部およびダクト板コーナ部を固定とした。解析箇所および解析モデル図（水平ダクト部上面板、鉛直ダクト部正面板）を図１に示す。

図1　解析箇所および解析モデル図

（３）解析条件

ａ．入力条件

ダクト内においては、ダクトの曲がり、拡大等によって風の流れが乱れ、ランダムな圧力変動が生じる。この圧力変動はメーカ試験結果から規格化した圧力変動パワースペクトルとして以下の式[1)]で整理されている。これを基に実機諸元および実機圧力計測結果を反映した実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定した。

圧力変動パワースペクトル

$$\phi(\omega)U/p^2D = c^2/(fD/U+X)^2$$

ここで、$\phi(\omega)$：圧力変動パワースペクトル
U　：平均流速
$\sqrt{p^2}$：変動圧力の RMS 値
f　：振動数
D　：ダクト代表幅
c　：係数（＝0.65）
X　：定数（＝0.2）

解析に用いた圧力変動パワースペクトルを図２に示す。

表1　圧力変動の入力諸元

項目	諸元
平均流速　U	20 m/s
ダクト代表幅　D	1 m
変動圧力の RMS 値　$\sqrt{p^2}$ （実機圧力計測結果より）	水平ダクト部：21.5Pa 鉛直ダクト部：24.9Pa

図2　圧力変動パワースペクトル

---

1) 猫本・西村ほか、空調ダクトの動的設計手法の開発、日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集Ⅴ（2001）

３．振動応答解析結果

実機解析用圧力変動パワースペクトルを入力し、ダクト板のスペクトル応答解析により変動応力（公称応力）を算出した。（表２参照）

４．変動応力算出結果

振動応答解析で得られた変動応力（公称応力）に形状不連続による応力割増係数を考慮して、断続溶接止端部に発生する変動応力を算出した。（表２参照）

発生する変動応力は、

ひび割れ③部：５０ＭＰａ

ひび割れ⑳部：４７ＭＰａ

と推定された。

表2　振動による変動応力の算出結果

項目		単位	評価箇所		備考
			ひび割れ③部	ひび割れ⑳部	
振動応答解析による変動応力（公称応力）		MPa	31.2	29.3	（A）
変動応力推定	応力割増係数	－	1.6	1.6	（B）
	実機変動応力	MPa	50	47	（A×B）

形状不連続による応力割増係数について

１．概要

断続溶接部近傍は形状不連続により一般部より応力が大きくなる。このため、断続溶接部をＦＥＭ解析（ソリッド要素）によりモデル化し、

$$\text{形状不連続による応力割増係数} = \frac{\text{形状不連続による局部応力}}{\text{公称応力}}$$

を求める。

２．評価手法

シェルモデルの振動応答解析結果から得られる１次モードの振動変位により断続溶接止端部に発生する応力について、シェルモデルおよびソリッドモデルによる解析結果の比較を行い、形状不連続による応力割増係数を評価する。

３．シェルモデルによる応力解析

水平ダクト部上面板の応力解析に使用した解析モデル（シェルモデル）により、1 次モードに対する変位および発生応力を求めた。

１次モードで正規化された変位に対する最大応力は 8.5MPa となった。

４．ソリッドモデルによる応力解析

（１）解析モデル

シェルモデルの中央位置の断続溶接部（すみ肉溶接）について接続鋼材部を含めモデル化し、応力を算出した。解析モデルを図１に、境界条件を図２に示す。

図1 解析モデル

[境界条件]
・①～③部：振動解析で得られた上下変位を設定
・④部（接続鋼材、ダクト）：固定

図2 境界条件

（２）解析方法

シェルモデルによる振動応答解析（１次モード）で得られた変位により断続溶接部に発生する応力を算出する。

５．形状不連続による応力割増係数

４．ソリッドモデルによる応力解析により得られた応力分布を図３に示す。最大応力は 17.2MPa であるが、これには断続溶接部の応力集中効果が含まれていると考えられるため、断続溶接止端部の局部最大応力は 13.7MPa とし、３．シェルモデルの最大応力値と比較した。

その結果は表１に示すとおりであり、形状不連続による応力割増係数は 1.6 程度と考えられる。

図3 ソリッドモデルによる応力分布

表1 最大応力の比較

解析モデル	最大応力[ＭＰａ]	応力割増係数
シェルモデル	［A］ ８．５	［B／A］ １．６
ソリッドモデル	［B］ １３．７	

断続溶接部の疲労に関する検討結果
（ひび割れ③部および⑳部）

１．疲労限の求め方

疲労限は、材料の硬さ、使用温度、応力集中係数および平均応力に影響を受ける。以下に、上記各要因を考慮した疲労限を求める手順を記載する。

（１）材料強度から疲労限の推定

ａ．硬さ測定データから室温の引張強さを推定する。

ｂ．使用温度での引張強さを求める。

ｃ．引張強さと疲労限の関係から、使用温度での疲労限を推定する。

（２）応力集中の影響を考慮した疲労限（（１）ｃで求めたもの）の補正

（３）平均応力の影響を考慮した疲労限（（２）で求めたもの）の補正

（１）a,b　硬さ測定データから室温※における 0.2%耐力$\sigma_{0.2}$および引張強さσ_Bを求める

（室温での硬さと 0.2%耐力および引張強さの関係図による）

※：当該部設計温度 40℃における$\sigma_{0.2}$およびσ_Bは室温の値に同じ

（１）c　硬さから推定された引張強さσ_Bに基づく疲労限S_Wを求める

（引張強さと疲労限の関係図による）

（２）　応力集中(応力集中係数K_t)を考慮した疲労限σ_Wを求める

（３）　修正グッドマン線図により、平均応力σ_mにおける疲労限$\sigma_{W'}$を求める

修正グッドマン線図

２．材料強度からの疲労限の推定

材料強度から疲労限の評価を行うには、損傷部の使用温度における引張強さのデータが必要である。

しかしながら、損傷部の使用温度における引張強さを直接的に求めることはできないので、下記の手順で推定する。

（１）ひび割れ③部、⑳部の金属調査において測定した硬度測定データ（ひび割れ近傍部の硬さ）から、図１より引張強さを推定する。なお、図１は室温にて採取されたデータである。

（２）損傷部の設計温度は40℃※である。告示第501号別表10に記載のSUS304(冷間圧延ｽﾃﾝﾚｽ鋼板及び帯板)の設計引張強さは-30～40℃において同じ値であるため、ひび割れ部の使用温度での引張強さは（１）で求めた値を用いる。

※：補助建家排気筒ダクトの設計温度は40℃である。これは補助建家の設計温度(40℃)から定められている。

（３）（２）の引張強さから図２より使用温度での疲労限を推定する。

材料強度からの疲労限の推定結果を表１に示す。

表1　硬さから求めた疲労限

	硬さ (HV)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	引張強さ σ_B (MPa)	硬さから求めた疲労限 S_W (MPa)
ひび割れ③部	238	530	770	284
ひび割れ⑳部	236	523	766	284

図1　室温での硬さと0.2%耐力および引張強さの関係
（出典：ステンレス鋼便覧　第3版）

図2　引張強さと疲労限の関係
（出典：材料学会「金属材料疲労限データ集」および三菱重工業（株）社内データ）

３．応力集中の影響を考慮した疲労限の補正

溶接部のように材料表面に不連続部がある場合には、応力集中による疲労限の低下を考慮する必要がある。１項で求めた疲労限を応力集中係数K_tで除したものが、補正後の疲労限σ_Wとなる。補正後の疲労限σ_Wを表２に示す。

表２　応力集中の影響を考慮した疲労限

	硬さから求めた疲労限S_W (MPa)	応力集中係数K_t	応力集中を考慮した疲労限σ_W (MPa)
ひび割れ③部	284	2.6	109
ひび割れ⑳部	284	2.6	109

４．平均応力の影響を考慮した疲労限の補正

４．１　平均応力として考慮すべきもの

ひび割れが発生した断続溶接部に平均応力として作用するものは、（１）残留応力、（２）内圧および自重による応力がある。

（１）残留応力

ひび割れ③部、⑳部に隣接する健全部の断続溶接部近傍の残留応力測定結果から、当該部には降伏応力程度の残留応力が発生し得ることを確認した。これより、当該部の残留応力について、硬度測定結果を考慮して推定した結果を表３に示す。

表３　残留応力推定結果

	硬さ※1 (HV)	残留応力※2 (MPa)
ひび割れ③部	200	400
ひび割れ⑳部	204	420

※１：ひび割れ③部、⑳部の一般部（ひび割れ付近）の測定硬度平均値
※２：硬さから定まる 0.2%耐力（降伏応力相当）を右図から求めた

室温での硬さと 0.2%耐力および引張強さの関係
（出典：ステンレス鋼便覧　第3版）

（２）内圧および自重による応力

運転時内圧およびダクトの自重により断続溶接部に発生する応力は、運転時内圧によるダクト板面の挙動による応力評価、ダクトの支持構造を考慮して求めた。この結果、内圧および自重による応力はひび割れ③部で 63MPa、ひび割れ⑳部で 44MPa であった。

以上より平均応力を纏めると表４のとおりとなる。

表4　平均応力の纏め

	［A］ 残留応力 (MPa)	［B］ 内圧および自重による応力 (MPa)	［A］＋［B］ 平均応力σ_m (MPa)
ひび割れ③部	400	63	463
ひび割れ⑳部	420	44	464

４．２　平均応力の影響を考慮した疲労限の補正方法

平均応力は疲労限を低下させることから、その影響を修正グッドマン線図にて補正した。修正グッドマン線図※による補正方法の概要を以下に示す。

※　：疲労限に影響を及ぼす平均応力の影響は、図３のようにＸ軸に平均応力を、Ｙ軸に平均応力が零の時の疲労限σ_wをとって、右下がりの直線で表される。この直線を「修正グッドマン線図」という。
そこで、任意の平均応力σ_mでの疲労限$\sigma_{w'}$は、その平均応力値に立てた垂線が修正グッドマン線図と交わる高さで与えられる。

- 平均応力を考慮した疲労限（$\sigma_{w'}$）は下式で求められる。

  $\sigma_{w'}=\sigma_w\times((\sigma_B-\sigma_m)/\sigma_B)$ ・・・・・・①式（図３　直線①）

- ただし、平均応力（σ_m）を考慮した疲労限（$\sigma_{w'}$）と平均応力（σ_m）の和が 0.2%耐力（$\sigma_{0.2}$）を超えることはない（塑性領域に入るため）。

  $\sigma_{w'}+\sigma_m\leqq\sigma_{0.2}$ ・・・・・・②式（図３　直線②とＸ，Ｙ軸で囲まれる範囲）

- したがって、①式を②式に代入することにより、平均応力の最大値（σ_{m0}）が求まる。

  $\sigma_{m0}=\sigma_B\times(\sigma_{0.2}-\sigma_w)/(\sigma_B-\sigma_w)$

- 平均応力（σ_m）が平均応力の最大値（σ_{m0}）を超える場合には、$\sigma_m=\sigma_{m0}$として平均応力を考慮した疲労限（$\sigma_{w'}$）を求める。

  $\sigma_{w'}=\sigma_w\times(\sigma_B-\sigma_{0.2})/(\sigma_B-\sigma_w)$

図３　修正グッドマン線図

４．３　平均応力の影響を考慮した疲労限の補正結果

平均応力の影響を考慮した疲労限の補正結果を表５に示す。

表５　平均応力の影響を考慮した疲労限

	応力集中を考慮した疲労限σ_W※1 (MPa)	平均応力σ_m (MPa)	平均応力を考慮した疲労限$\sigma_{w'}$ (MPa)
ひび割れ③部	109	463	43
ひび割れ⑳部	109	464	43

※：平均応力を考慮しない疲労限

事象発生の推定メカニズム（疲労損傷）
（ひび割れ①～⑪、⑬～⑳）

製造時

①断続溶接
- 断続溶接部近傍での残留応力発生。
- 断続溶接端部で応力集中する形状となっている。

②補強鋼材間隔
水平ダクト部の補強鋼材の間隔を確認した結果、約1，４００mmであり、他の部位より間隔が長かった。

運転中

- ダクト曲がり部後流は圧力変動による振動が大きくなりやすい。
- 水平ダクト部は、補強鋼材の間隔が長く振動が大きくなりやすい。
- 鉛直ダクト部は、短い間隔で連続した曲がり部の後流部であり、圧力変動が増加し振動が大きくなりやすい。

事象発生の推定メカニズム（腐食損傷）
（ひび割れ⑫㉑　）

A部

C部

B部

補助建家排気筒・格納容器排気筒復旧概要図
(補助建家排気筒)

既設設備図
(撤去部分図)

復旧設備図
(取替等部分図)

補助建家排気筒・格納容器排気筒復旧概要図
(格納容器排気筒)

既設設備図
(撤去部分図)

復旧設備図
(取替等部分図)