

伊方発電所  
岸壁クレーンからの油漏れについて  
(中間報告)

平成23年 1月  
四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所 岸壁クレーンからの油漏れについて（中間報告）

2. 事象発生の日時

平成22年1月8日 16時00分頃

3. 事象発生の設備

岸壁クレーン

4. 事象発生時の運転状況

1号機 通常運転中

2号機 通常運転中

3号機 第12回定期検査中

5. 事象の概要

伊方発電所第1、2号機は通常運転中、伊方発電所第3号機は第12回定期検査中のところ、1月8日16時00分頃、保守員が伊方発電所の荷揚岸壁に設置している岸壁クレーン\*<sup>1</sup>の基礎部近傍にある電源中継箱の下部に少量の油漏れがあることを確認した。

その後、漏えいした油をウエスで拭き取るとともに、外部への漏えい防止の応急措置を同日18時40分に完了した。

1月9日に油の漏えい原因を調査したところ、旋回軸受部（以下「フートステップ」という。）の隙間が不均一（全周11mmの隙間のところ機械室側が密着）となっていたことから、軸受の損傷により潤滑油\*<sup>2</sup>が漏れ出し、電線管を通じて当該電源中継箱より漏えいしたものと判断した。

なお、本事象による作業員の被ばくおよび環境への放射線による影響及び海への油流出はなかった。

（添付資料－1）

このため、フートステップ一式の取替を行うこととし、所轄労働基準監督署に必要な届出を行った上、7月5日より従来品と同仕様のフートステップへの取替工事を開始し、7月30日、取替完了に伴う所轄労働基準監督署立会による検査を受検し取替工事を終了した。

その後、損傷したフートステップの調査結果および詳細解析結果から、油漏れの原因は、フートステップ軸受下部（以下「軸受下部」という。）に設計上想定していなかった集中応力が作用し、軸受下部の円筒根元部が破断したためと推定した。

このことから、取替えた軸受下部についても、同様に損傷が発生する可能性があり、また、クレーンメーカーで実施した検証試験にて組立て状態で超音波探傷試験により軸受下部当該部の状況を確認できることがわかったことから、取替えた軸受下部について超音波探傷試験を行ったところ、初期き裂を示す指示が認められた。

このため、軸受下部については、同様な事象が発生しないよう設計からやり直したうえで、集中応力を考慮した改良品に取替えることとし、取替完了までの間、当該クレーンを使用しないこととした。

\* 1 岸壁クレーン（1、2、3号機共用）

海上輸送された大型機器の搬入等に使用するクレーン

種類・型式：塔形ジブクレーン

定格荷重：主巻(150 t)／補巻(30 t)

最大作業半径：主巻(30m)／補巻(33.5m)

\* 2 潤滑油の役割

フートステップ部に組み込まれている軸受けの潤滑

## 6. 事象の時系列

1月 8日

16時00分頃 岸壁クレーンの基礎部近傍にある電源中継箱の下部に少量の油が漏れいしているのを保修員が確認

16時20分 漏れた油の拭き取り、軸受油の抜き取りを実施

16時58分 岸壁および雨水排水溝に油がないことを確認

18時40分 油漏えい拡大防止措置完了

1月 9日

岸壁クレーンフートステップ部外観調査実施（軸受の損傷が原因で油が流出した可能性が高いと判断し、取替用の軸受製作を開始）

7月 5日～ 7月30日

従来と同じ仕様のフートステップに取り替えを実施し、労働基準監督署によるクレーン変更検査を受検

8月 2日

旧フートステップ部解体調査開始（損傷状態確認）

8月20日～ 9月15日

クレーンメーカーによる材料試験および応力評価・有限要素法<sup>\*3</sup>（FEM）解析

9月21日～10月11日

クレーンメーカーによる調査結果とりまとめおよび当社への結果報告

損傷部位である軸受下部の円筒根元部に許容応力を上回る集中応力が発生することが判明

1 1月20日～12月 3日

クレーンメーカーによる旧フートステップ試験片での疲労\*<sup>4</sup>試験

1 1月26日

取替えた軸受下部について超音波探傷試験で初期き裂を示す指示を確認

\* 3 有限要素法

コンピューターによって物理シミュレーション行うための手法の一種。連続な物体を有限個の「要素」に分割し、各要素の特性を単純な数学モデルで近似し、連立方程式の形にして全体の挙動を解析する。

\* 4 疲労

金属材料に作用する力が弾性域内であっても、繰返し作用する場合、き裂が生じたり、破壊に至る現象

## 7. 調査結果

損傷の原因について、以下の調査を行い、要因の検討を実施した。

### (1) 外観観察

取り外したフートステップを点検した結果、フートステップ軸受下部の円筒根元部で全周破断していることを確認した。当該部の外表面は、通常の鋳物肌であり、巣等の存在等、異常は認められなかった。

また、その他の構成部品については特に異常は認められなかった。

(添付資料－2)

### (2) 破面観察

#### a. 破面マクロ観察

##### i) 表層部領域

この領域は発錆が激しいことから、古い破面と考えられる。なお、この領域は発錆が激しいことおよび擦られている部分が多いことから、き裂進展形態の特定はできなかった。

##### ii) 中間領域

この領域にはビーチマーク\*<sup>5</sup>が観察されたことから、疲労によりき裂が進展したものと考えられる。

##### iii) 内部領域

この領域は銀白色を呈した脆性的な破面となっており、上記のき裂が伝播進展し、外力に耐えられず急速にき裂が進展して一気に破断したものと考えられる。

(添付資料－3)

## b. 破面SEM観察

### i) 表層部領域

破面には部分的に脆性破面（へき開<sup>\*6</sup>）が観察されることから、脆性的に破壊したと考えられる。

### ii) 中間領域

破面には、脆性的な破面形態は観察されず、疲労破面に見られる特徴である筋状の模様が確認された。

### iii) 内部領域

破面には部分的に脆性破面（へき開）が観察されることから、脆性的に破壊したと考えられる。

また、内側縁部には最終破断部を示すディンプルパターン破面<sup>\*7</sup>領域が確認されたことから、当該部が最終破断部位と考えられる。

（添付資料－4）

#### \*5 ビーチマーク

き裂が徐々に進展した場合に破面に残る貝殻模様をいう。

#### \*6 へき開

脆性破壊面に見られ、特定の方位の弱い格子面に沿って生じる引張り分離をいう。

#### \*7 ディンプルパターン破面

延性破壊を起こした破面に現れる御椀形の模様

## (3) 断面観察

### a. 断面マクロ観察

鋳鋼品であり鋳造組織（樹枝状晶<sup>\*8</sup>）が明瞭に観察されるが、金属組織に特に異常は認められず、鋳造欠陥も認められなかった。また、表層部外面には微小なき裂が数個認められた。

（添付資料－5）

### b. 断面ミクロ観察

中間領域および内部領域には、フェライト＋パーライト組織が観察され、特に異常は認められなかった。

表層部領域には、中間領域と比較し細かな組織が観察された。このことから、中間領域に比べやや脆弱となっていたと考えられる。また、マクロ観察で認められた微小なき裂はこの領域内に存在していることから、脆性的なものであると考えられる。なお、上記の粒径の違いは熱処理（焼きならし）時の冷却速度の違いにより生じたもので、表層部が早く冷却されたことから粒径が小さくなったものと考えられる。

#### \*8 樹枝状晶

凝固速度が速いほど結晶粒が細くなり、結晶粒内は樹の枝のようになっているため、樹枝状晶（デンドライト）という

#### (4) 断面硬さ分布調査

内部と比較して表層部の硬化傾向が確認された。

(添付資料－6)

#### (5) 材料調査

損傷した軸受下部より採取した試験片にて化学分析および機械試験を実施し、得られた結果と当該軸受材料の JIS 規格 (JIS G5102 溶接構造用鋳鋼品) とを比較検討した。

##### a. 化学分析結果

全ての化学成分について、JIS に定める各成分の規定値を満足していた。

##### b. 機械試験結果

鋳物特性である質量効果\*<sup>9</sup>により降伏点および引張強さに若干の低下が見られるが、試験で得られた降伏点 (286 N/mm<sup>2</sup> = 286 MPa) はクレーン構造規格に基づく許容曲げ応力 (204.6 MPa) を上回っており、設置時の応力評価方法に照らして評価した結果、強度に問題はなかった。

$$\text{許容曲げ応力 (204.6 MPa)} = \frac{\text{JIS に定める降伏点 (下限値 : 353 N/mm}^2\text{)}}{\text{クレーン構造規格に定める安全係数 (1.5} \times \text{1.15)}}$$

- ・ 353 N/mm<sup>2</sup> : 旧 JIS での規格値 (36 kg/mm<sup>2</sup>) を換算した値であり  
現 JIS 規格値では 355 N/mm<sup>2</sup>
- ・ 降伏点に対する安全係数が 1.5
- ・ 許容応力に対する安全係数が 1.15

(添付資料－7)

#### \* 9 質量効果

鋳込みおよび熱処理後の冷却過程において、鋳物各部位の肉厚、形状等に起因して各部位の冷却速度に違いが生じることにより、部位毎に強度が異なる特性であり、冷却速度が遅い部位ほど機械強度は低くなる。

以上のとおり、損傷した軸受下部のき裂発生部についての調査において

- ・ 破面観察の結果から、脆性的なき裂が軸受円筒外表面から発生し、疲労により内面方向に進展した後、外力に耐えられなくなり、脆性的に破断したものと考えられること。
- ・ 破面観察、断面硬さ分布調査および材料調査の結果から、表層部領域については、その他の領域と比較すると硬度が高く、やや脆弱な組織であったと考えられるが、設計上考慮している応力以上の材料強度は確保しており、き裂が発生することは考えられないこと。

から、軸受下部の破断は、き裂発生部に過大な応力が作用したことにより、き裂が発生し、進展したことによるものと考えられる。

なお、当該軸受部は当初の設計どおり作成されていることを確認している。

## (6) 保守状況の調査

昭和57年に設置して以降、クレーン等安全規則に基づき1回/月の月例点検時に外観点検（発錆の有無・ボルトの緩み、脱落・潤滑油量・油漏れの有無）および無負荷運転（旋回・起伏等）での異常の有無確認、1回/年の年次点検時に月例点検に加え定格荷重での運転確認および1回/2年の官庁検査を行っており、過去の点検および検査において異常は確認されていない。

なお、当該軸受は1回/3年の頻度で潤滑油の取替を行っており、至近では平成21年7月の年次点検時に取替えている。

## (7) 運転履歴の調査

昭和57年に設置して以降、年間の稼働回数は約60回（無負荷運転：50回/年、負荷運転：10回/年）で、その他は点検のために動作させる程度である。また、負荷させた荷重においても、定格荷重150tに対して使用済燃料搬出時の約120～130tが最も大きく、その搬出回数は27年間で約40回程度であった。

以上より、設計に対して過大な負荷をかけた実績は無かった。

## (8) 発生応力の評価

### a. 当該クレーン設計時の評価内容

クレーンの構造、強度については、「クレーン構造規格」に規定されており、強度評価に係る事項としては、以下の項目が定められている。

- ・許容応力
- ・計算に使用する荷重の種類
- ・強度計算に係る荷重の組み合わせ

当該クレーンの強度設計にあたっては、当該規格を適用し、評価を行っている。

ただし、各構造部材に発生する応力の具体的な算定方法、評価部位等は、構造、形状に応じクレーンメーカーが適切な手法を選定し実施している。

設計時における当該クレーンの応力算定方法について、クレーンメーカーに聞き取り調査を行くクレーンメーカー妥当性を検証した結果、発生応力は全て許容値を満足していた。

(添付資料－8)

### b. 有限要素法による破損部の評価

破損部の確認結果より、過大な応力がかかっている可能性があることから、破損部について有限要素法(FEM)にて当該部の応力集中の詳細評価を実施した。評価にあたっては、応力集中は荷重条件の影響を受けないことから、クレーン構造規格に基づく荷重条件の1つである垂直静荷重（無負荷(0t)＋最小作業半径(13m)）を代表とした。

評価の結果、破損部にはクレーン設置当時の計算結果の約3倍の集中応力が発生することを確認した。

(添付資料－9)

### c. 発生応力の評価

上記の応力集中を考慮して発生応力の評価を行い、以下のことを確認した。

- ・ クレーン構造規格に基づくすべての荷重評価条件において、上記の集中応力を評価した結果、発生する曲げ応力は許容曲げ応力を超えていた。
- ・ 集中応力を考慮したうえで、実際の運転状況で発生する応力と当該材料（溶接構造用鋳鋼品）の限界値を比較した結果、通常の運転では、初期き裂が発生する引張強さ（ $550\text{N/mm}^2 = 550\text{MPa}$ ）を超える運転はなかったが、当該クレーン設置時の落成検査及び今回のフートステップ取替工事における変更検査時の荷重試験における定格荷重（ $150\text{t}$ ）の $1.25$ 倍の荷重（ $187.5\text{t}$ ）を負荷した時に、引張強さ（ $550\text{MPa}$ ）を超える曲げ応力（約 $825\text{MPa}$ ）が発生していた。

（添付資料－ 9）

### d. 損傷部位に係わる設計時の評価

クレーンメーカーへの聞き取り調査を行った結果、当該岸壁クレーンと同型式の大型クレーンで使用実績のある形状を採用しており、これまで当該軸受に関するトラブルの経験がなかったことから、応力集中の発生については想定していなかったとのことであったが、その詳細については今後も調査を継続する。

## （9）フートステップ取り替え後の健全性確認

応力評価において表層部き裂発生領域では比較的早い時期にき裂が発生していた可能性が否定できないこと、旧軸受での調査により超音波探傷試験（UT）でき裂の検出が可能であることが確認できたため、今回取替えたフートステップについて超音波探傷試験を行った結果、欠陥指示が認められた。

なお、今回取替えを行った軸受下部については、ミルシートにより素材の適合を確認しているとともに、非破壊試験により製作時の健全性を確認している。

（添付資料－ 10）

## （10）フートステップ部以外の健全性について

今回のフートステップ取替工事に合せて、外観・構造部点検を行っており、主要構造物の外観点検・肉厚測定等の結果に異常は認められなかった。

## 8. 推定原因

フートステップ軸受下部に設計上想定していなかった集中応力が作用したことから、クレーン設置後の比較的早い段階で、フートステップ軸受下部の円筒根元部外面に過大な応力が作用したことにより、表層部に初期き裂が発生した。

さらに、クレーンの運転に伴う繰り返し応力による疲労によりき裂が進展し、外力に耐えられずに急速にき裂が進展して破断に至り、軸受部の潤滑油がフートステップ下部に接続された電線管を通じて電源中継箱より漏えいしたものと推定される。



## 9. 対 策

フートステップ軸受下部について、集中応力を考慮したうえで設計をやり直し、1年以内を目途に形状変更等により応力集中を緩和するとともに強度の高い材料を使用した改良品に取替えることとし、それまでの間、当該クレーンを使用しないこととした。

また、軸受下部の改良品については、当該部への応力集中を適切に評価した設計であることを確認する。

なお、現在、当該クレーンに取付けているフートステップ軸受下部には初期き裂を示す指示が認められているが、急激に進行する可能性はないこと、また、地震および強風時を考慮した安全性評価を行った結果、仮に破断に至ったとしても倒壊等の恐れはないことを確認したことから、安全上の問題はない。

(添付資料－11)

## 10. 今後の対応

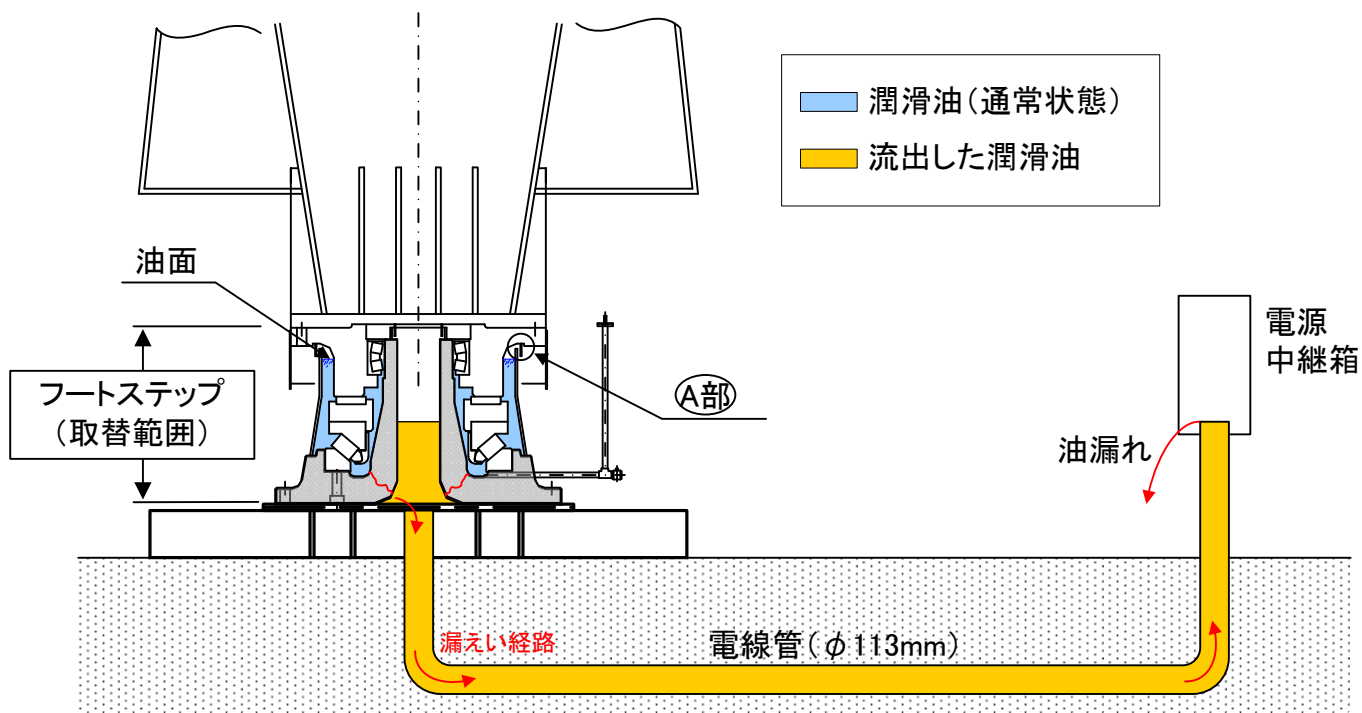
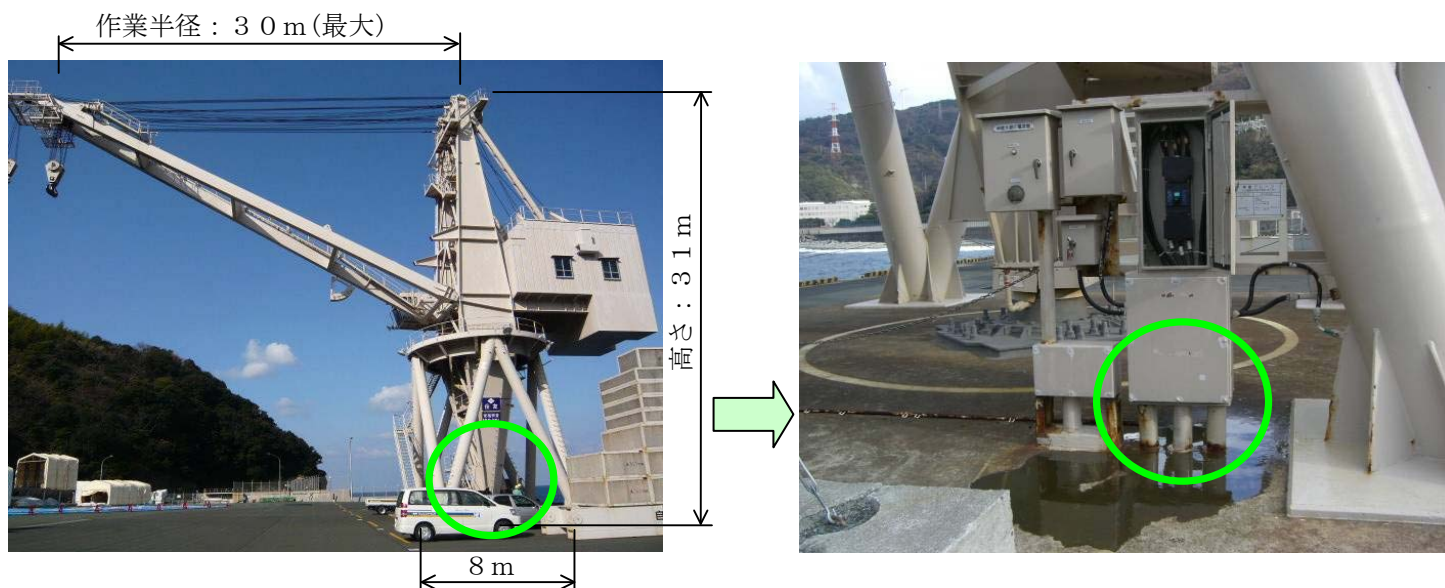
設計時にフートステップ軸受下部の応力集中の発生について想定していなかった原因、改良品への取替後の健全性確認結果ならびに再発防止対策については、最終報告時にとりまとめることとする。

以 上

## 添 付 資 料

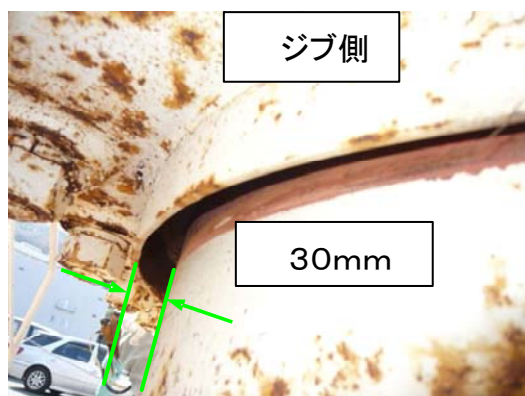
- 添付資料ー 1 岸壁クレーン廻り概略図
- 添付資料ー 2 岸壁クレーン（軸受下部円筒根元部）損傷状況
- 添付資料ー 3 軸受円筒根元部の破面マクロ観察結果
- 添付資料ー 4 破面SEM観察結果
- 添付資料ー 5 断面（マクロ・ミクロ）観察結果
- 添付資料ー 6 軸受下部根元部断面硬さ分布調査結果
- 添付資料ー 7 化学成分、機械試験調査結果
- 添付資料ー 8 クレーン設置当時の応力計算結果
- 添付資料ー 9 有限要素法による応力解析結果
- 添付資料ー 10 軸受下部円筒根元部外面の非破壊試験結果
- 添付資料ー 11 現状のクレーンが倒壊しないことの評価

### 岸壁クレーン廻り概略図

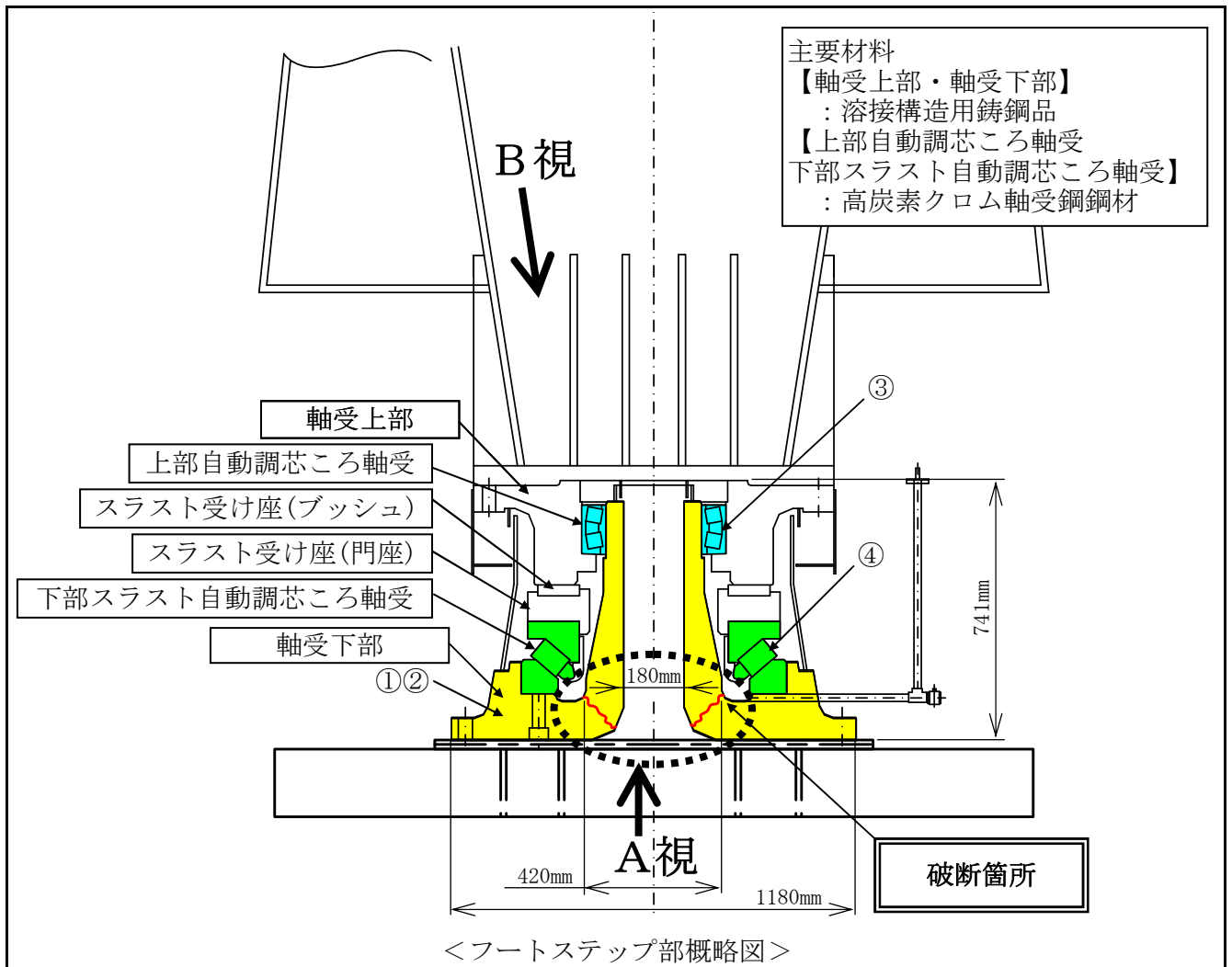


#### Ⓐ部 詳細

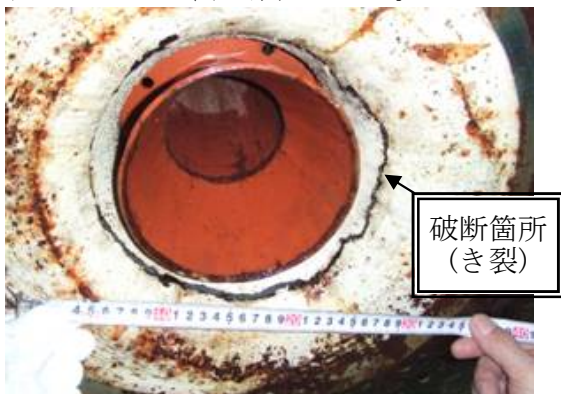
回転軸受部(フットステップ)の隙間(図面寸法:11mm)が不均一となっていたことから、軸受の損傷により潤滑油が漏れ出し、電線管を通じて当該電源中継箱より漏えいしたものと判断した。



岸壁クレーン（軸受下部円筒根元部）損傷状況



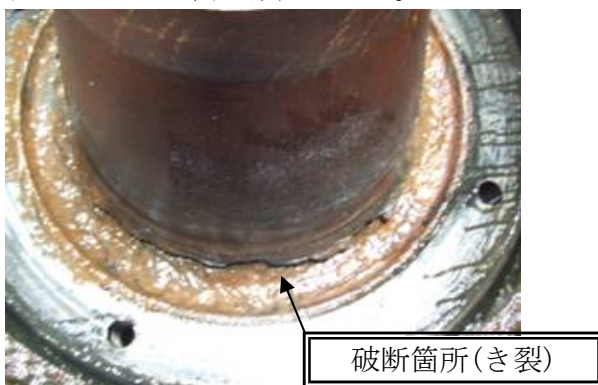
①軸受下部円筒根元部内側（A視）  
全周にわたりき裂が確認された。



③上部自動調芯ころ軸受  
異常は認められなかった。



②軸受下部円筒根元部外側（B視）  
全周にわたりき裂が確認された。

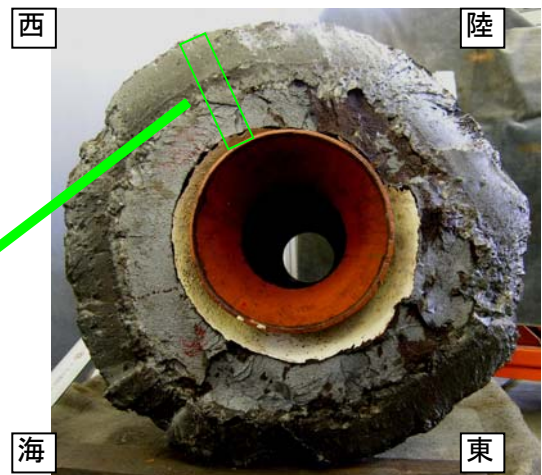
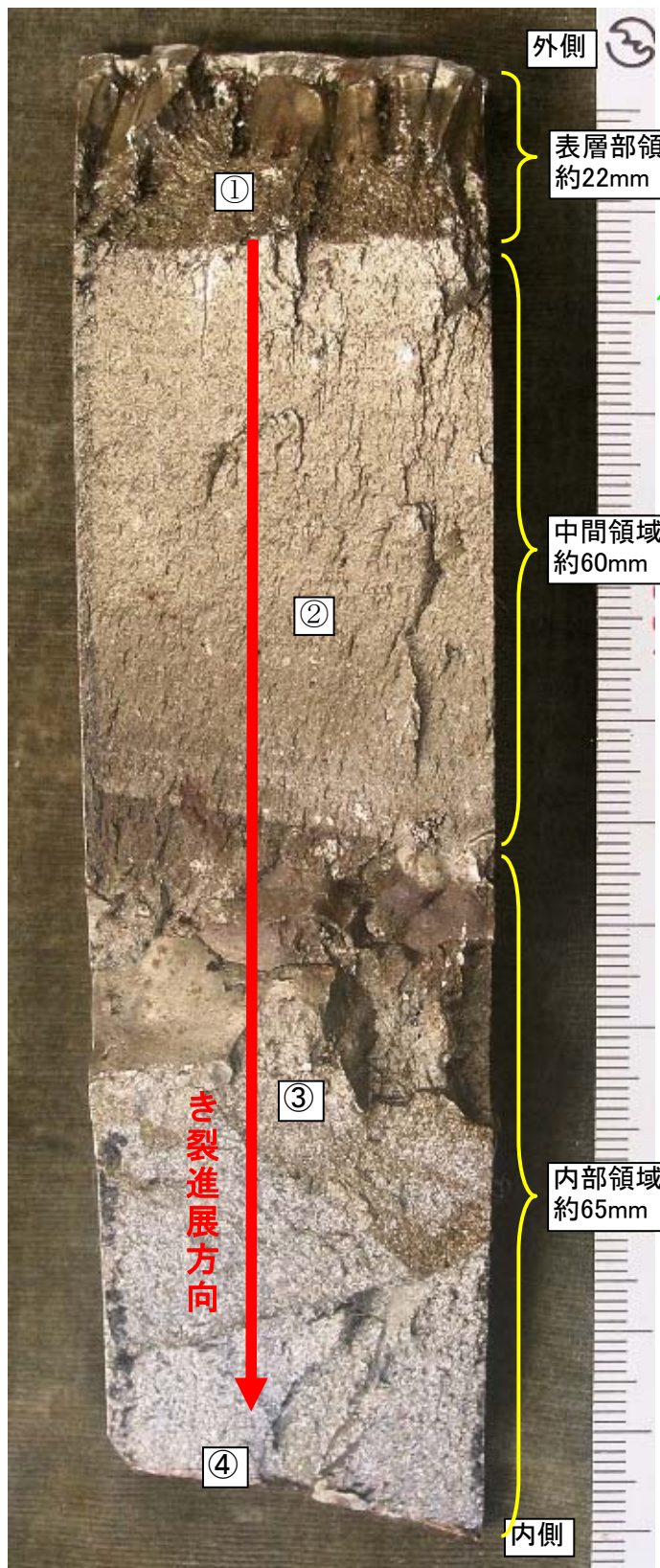


④下部スラスト自動調芯ころ軸受  
異常は認められなかった。





軸受下部円筒根元部の破面マクロ観察結果



破面観察用試験片採取位置

i) 表層部領域

この領域は発錆が激しいことから、古い破面と考えられる。なお、この領域は発錆が激しいことおよび擦られている部分が多いことから、き裂進展形態の特定はできなかった。

ii) 中間領域

この領域にはビーチマークが観察されたことから、疲労によりき裂が進展したものと考えられる。

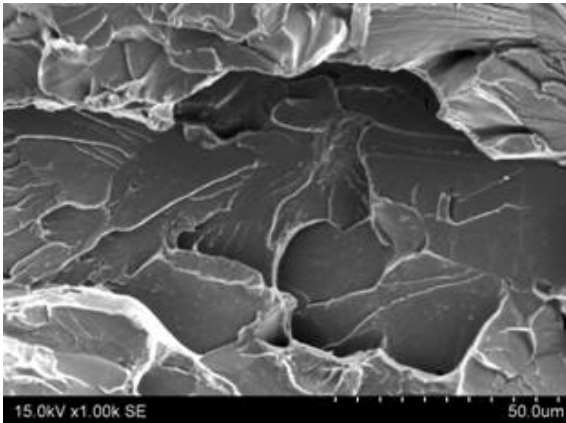
iii) 内部領域

この領域は銀白色を呈した脆性的な破面となっており、上記のき裂が伝播進展し、外力に耐えられず急速にき裂が進展して一気に破断したものと考えられる。

破面観察用試験片

①②③④ は破面SEM観察位置を示す。

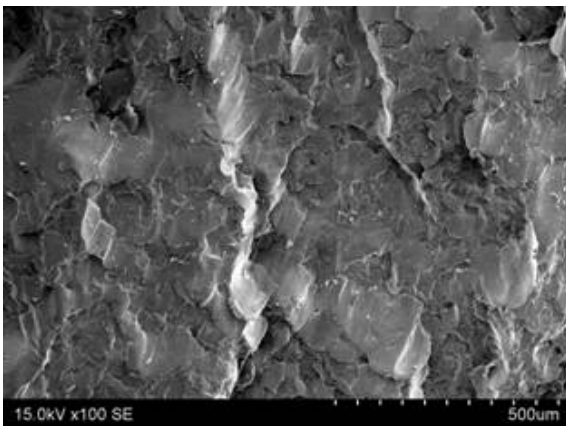
## 破面SEM観察結果



破面位置①：脆性破面（へき開）

### i) 表層部領域

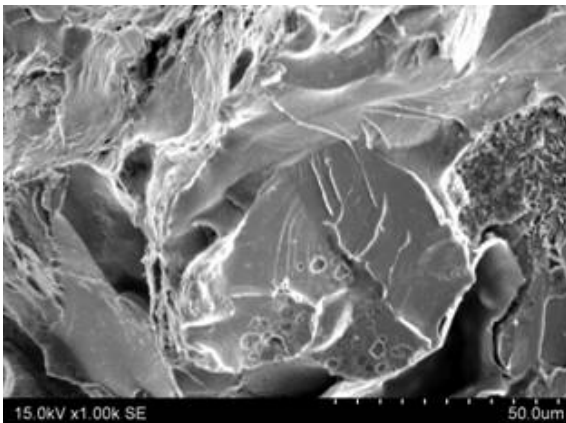
破面には部分的に脆性破面（へき開）が観察されることから、脆性的に破壊したと考えられる。



破面位置②：疲労破面

### ii) 中間領域

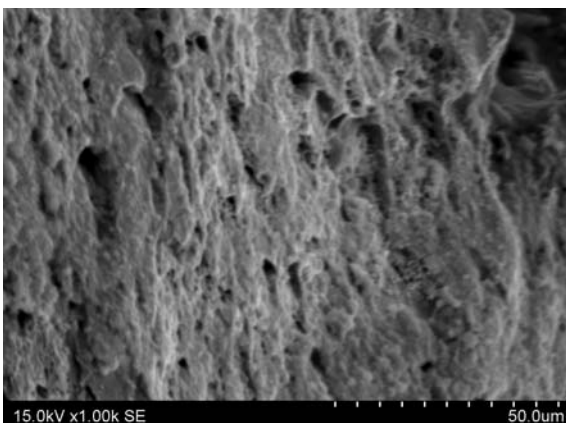
破面には、脆性的な破面形態は観察されず、疲労破面に見られる特徴である筋状の様相が確認された。



破面位置③：脆性破面（へき開）

### iii) 内部領域

破面には部分的に脆性破面（へき開）が観察されることから、脆性的に破壊したと考えられる。



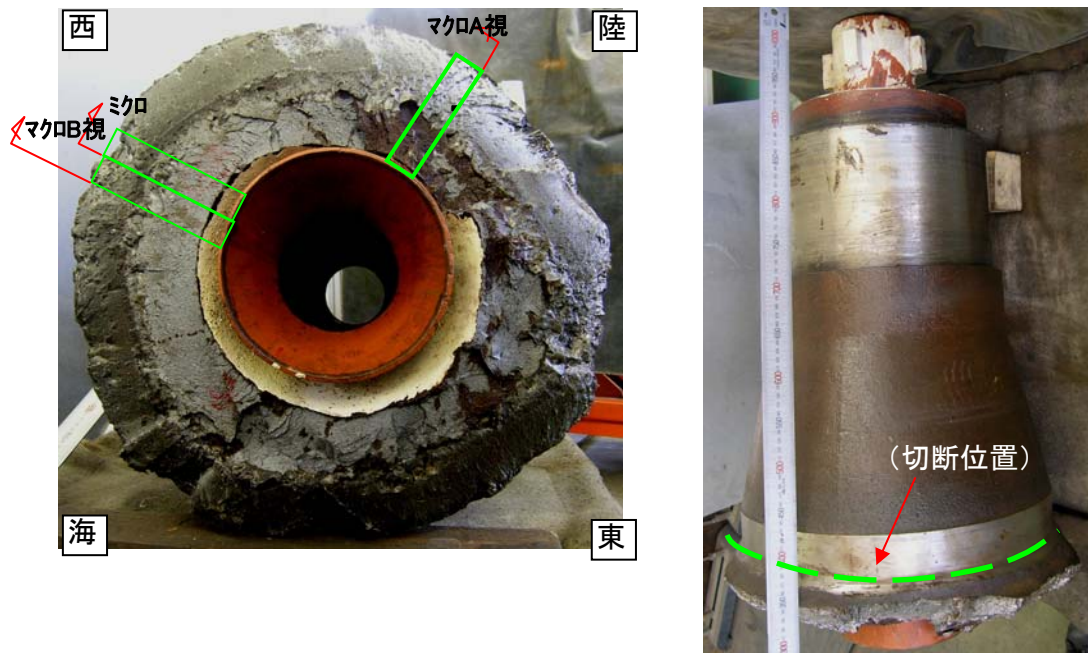
破面位置④：ディンプルパターン破面

### iii) 内部領域（内側縁部）

内側縁部には最終破断部を示すディンプルパターン破面が確認されたことから、当該部が最終破断部位と考えられる。



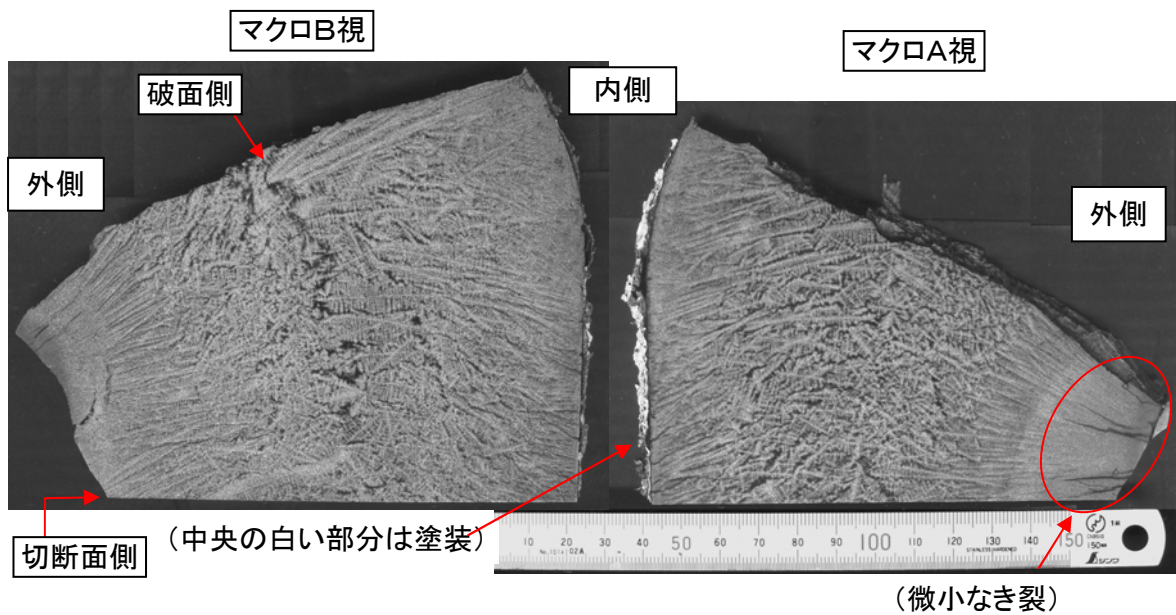
断面マクロ観察結果



切断、試験片採取位置およびミクロ、マクロ観察矢視

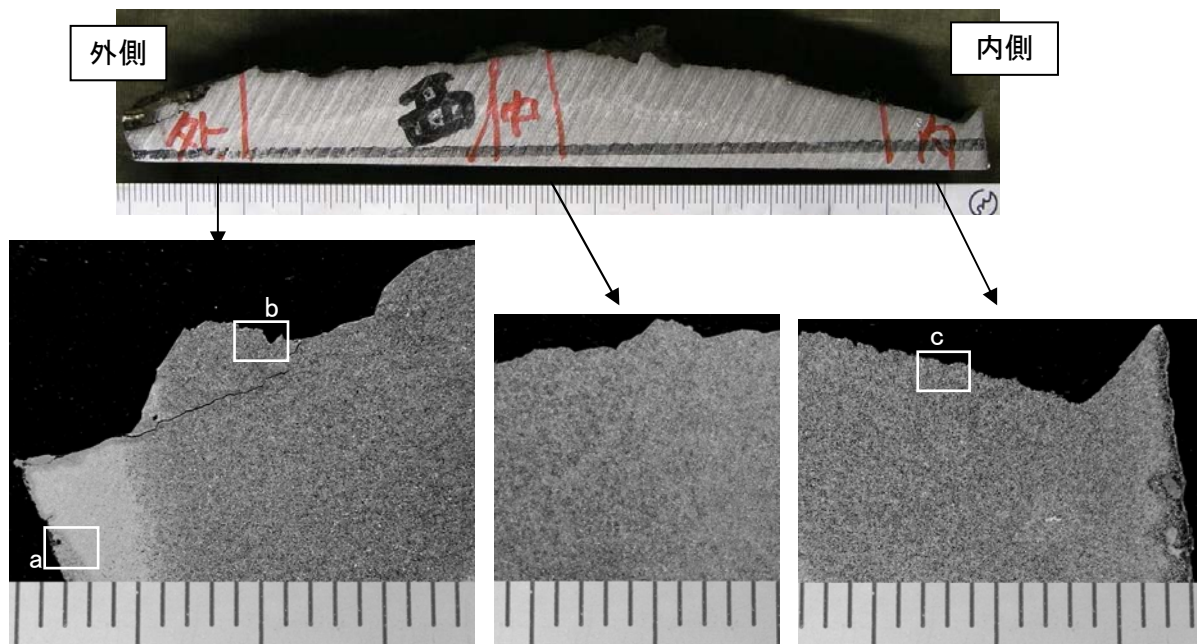
a. 断面マクロ観察

鑄鋼品であり鑄造組織(樹枝状晶)が明瞭に観察されるが、金属組織に特に異常は認められず、鑄造欠陥も認められなかった。また、表層部外面には微小なき裂が数個認められた。



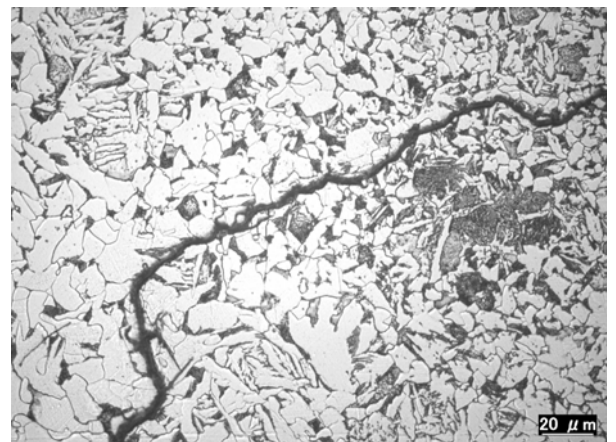
断面マクロ組織

## 断面ミクロ観察結果

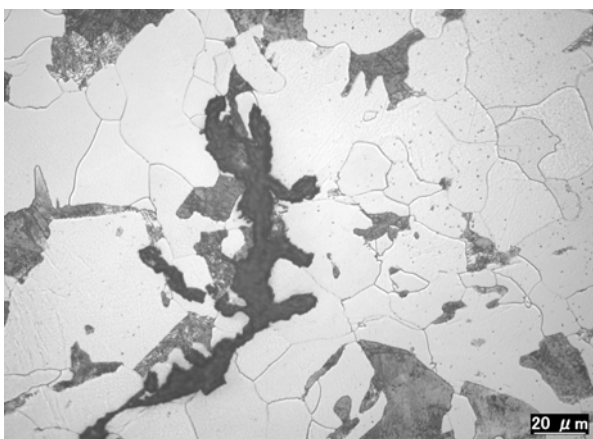


中間領域(b部)および内部領域(c部)には、フェライト+パーライト組織が観察され、特に異常は認められなかった。

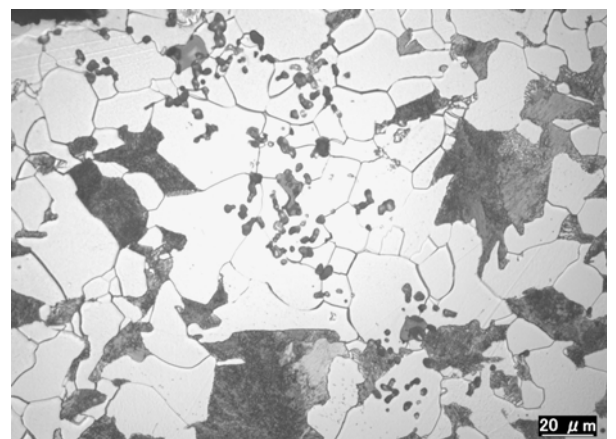
表層部領域(a部)には、中間領域と比較し細かな組織が観察された。このことから、中間領域に比べやや脆弱となっていたと考えられる。また、マクロ観察で認められた微小なき裂はこの領域内に存在していることから、脆性的なものであると考えられる。なお、上記の粒径の違いは熱処理(焼きならし)時の冷却速度の違いにより生じたもので、表層部が早く冷却されたことから粒径が小さくなったものと考えられる。



a部詳細写真(表層部領域)



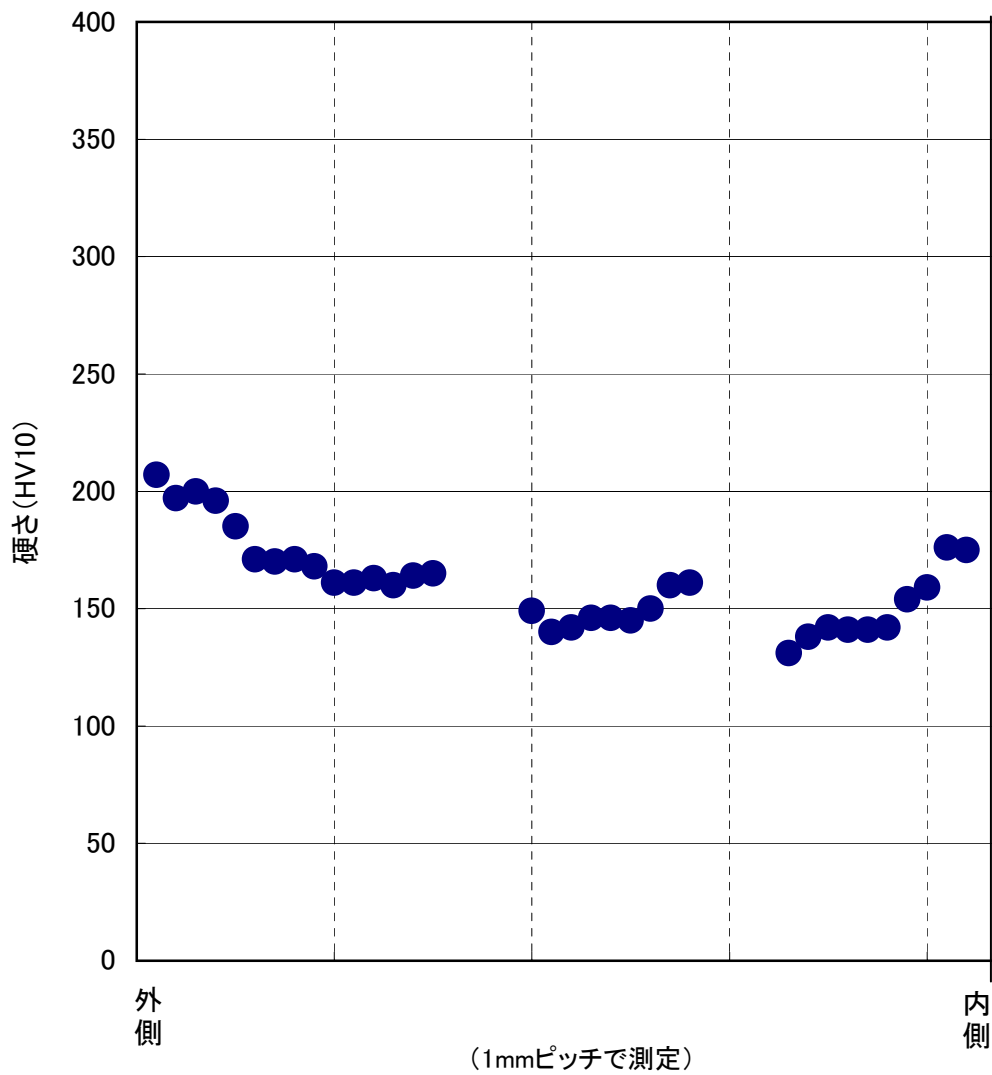
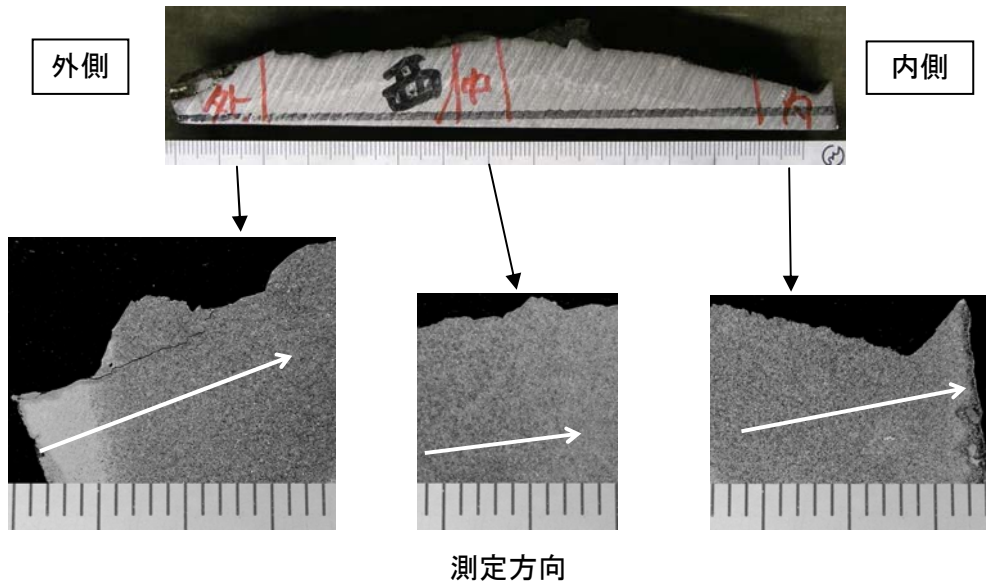
b部詳細写真(中間領域)



c部詳細写真(内部領域)



軸受下部根元部断面硬さ分布調査結果



## 化学成分、機械試験調査結果

1. 材質 SCW56(JIS G5102 SCW550相当)

2. 化学分析結果

分析試料	化学分析値 単位 (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	炭素当量
	<0.22	<0.80	<1.50	<0.040	<0.040	<2.50	<0.50	<0.30	<0.20	<0.48
下部軸受 (TP-1)	0.18	0.39	1.22	0.018	0.015	0.10	0.19	0.04	0.003	0.45

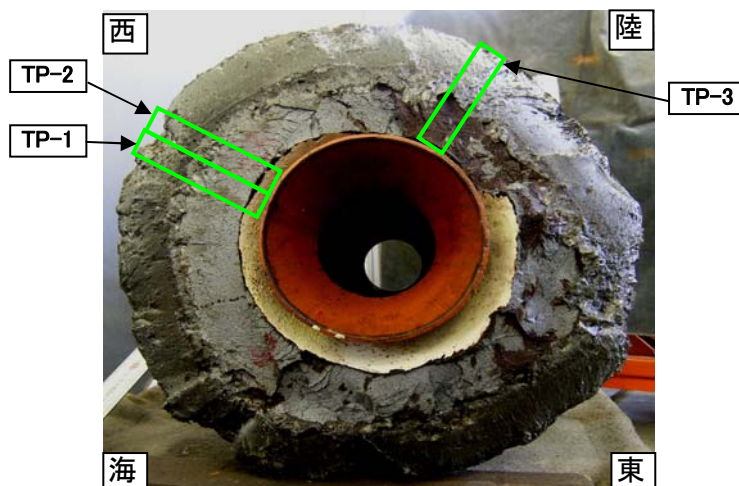
$$\text{炭素当量} = \text{C} + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/40 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{V}/14$$

3. 機械試験結果 (室温27°C)

試験項目 試験片番号	引張試験 (JIS 14A号標準試験片)									
	直径 mm	断面積 mm <sup>2</sup>	標点距離 mm	降伏荷重 N	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	最高荷重 N	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	絞り %	破断位置
	—	—	—	—	≥355	—	≥550	≥18	—	—
TP-1 (西側)	14	154	70	45200	294*	76000	494*	25	64.0	B
TP-2 (西側)	14	154	70	45000	292*	76000	494*	24	51.0	B
TP-3 (陸側)	14	154	70	44000	286*	76200	495*	20	34.8	A

\*. 降伏点および引張り強さが、鋳物特性である質量効果に起因する若干の低下によりJISの規定値を下回っているが、強度上問題となるものではない。

試験項目 試験片番号	硬さ試験	衝撃試験 (JIS 4号標準試験片)			
	HB 10/3000	試験温度 °C	振上り角度	J	Ave.
	—	—	—	—	≥27
TP-1 (西側)	137	0	118.0	57	52
TP-2 (西側)	137	0	121.5	48	
TP-3 (陸側)	137	0	120.5	50	



【試験片採取位置】

## クレーン設置時の応力評価結果

### 1. 計算方法

#### 1.1 適用規格

クレーン構造規格(昭和五十一年労働省告示第八十号)(以下、「旧規格」という。)に規程される荷重の種類および荷重の組み合わせを全て考慮し、応力評価を実施していた。

#### 1.2 荷重の種類

旧規格の第八条(計算に使用する荷重の種類)に基づき、以下の荷重を考慮していた。

- ① 垂直動荷重 : 吊り荷の荷重
- ② 垂直静荷重 : クレーンの自重
- ③ 水平動荷重 : クレーンの旋回に伴う慣性力によって生じる荷重
- ④ 風荷重 : クレーンが風を受けることによって生じる荷重
- ⑤ 地震荷重\*1 : 垂直静荷重の二十パーセントに相当する荷重がクレーンに対して水平方向に作用するものとして計算。(地震荷重Ⅰ)

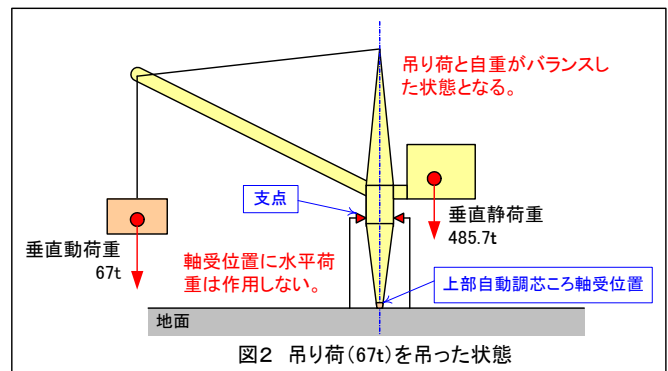
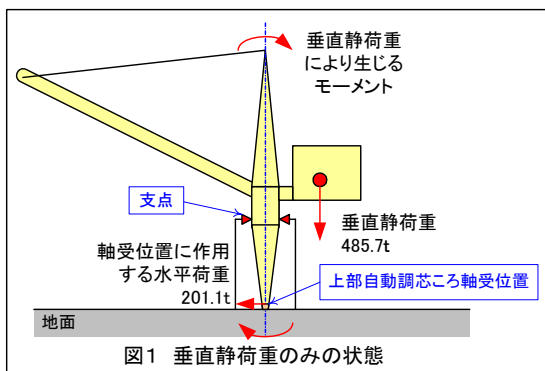
\*1 地震荷重については、旧規格に定める荷重以外に垂直静荷重の三十六パーセントに相当する水平方向の荷重と十八パーセントに相当する垂直方向の荷重が作用するものとして計算した値についても考慮している。(地震荷重Ⅱ)

#### 1.3 荷重の組み合わせ

旧規格の第十一条(強度計算に係る荷重の組み合わせ)に基づき、以下の荷重の組み合わせを考慮していた。

- ① 衝撃係数×垂直動荷重＋垂直静荷重＋水平動荷重
- ② 衝撃係数×垂直動荷重＋垂直静荷重＋水平動荷重＋クレーンの作動時における風荷重
- ③ 垂直静荷重＋クレーンの停止時における風荷重
- ④ 垂直動荷重＋垂直静荷重＋地震荷重
- ⑤ 垂直静荷重＋地震荷重
- ⑥ 垂直静荷重\*2 (図1参照)

\*2 垂直静荷重のみでの評価は、旧規格に要求されていないが、当該クレーンは吊り荷を吊っていない状態(図1参照)でも、重心が機械室側にあり、水平荷重が作用する特殊な構造をしていることから、評価を実施した。なお、吊り荷(67t)を吊った状態(図2参照)でクレーンはバランスする。



#### 1. 4 応力評価部位

上部自動調芯ころ軸受に水平荷重が作用した場合に生じる軸受下部の円筒根元部（図3参照）の曲げ応力が、クレーン構造規格で規定されている許容曲げ応力を超えないことを確認していた。

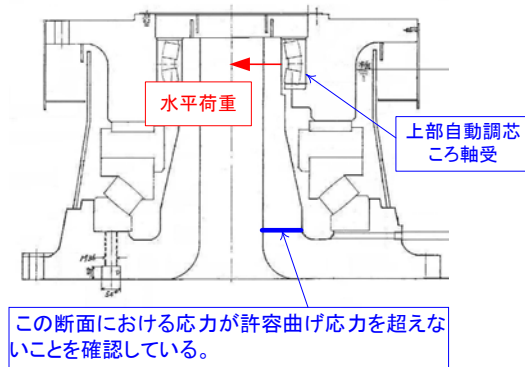


図3 応力評価部位

軸受下部の円筒根元部に生じる曲げ応力は以下の式により算出していた。

$$\text{曲げ応力: } \sigma = M / Z$$

M : 水平荷重により軸受下部に生じる曲げモーメント

Z : 断面係数

#### 2. 応力計算結果

上記の条件で応力計算を行った結果を表1に示す。なお、応力計算は各荷重の組合せにおいて、荷重の大きさおよびジブの作業半径毎に行っていた。

表1 応力評価結果

計算区分	荷重*半径	荷重の組合せ	生じる曲げ応力 $\sigma$ [MPa]	許容曲げ応力 <sup>*1</sup> $\sigma_a$ [MPa]
許容応力割増: なし S=1.00	150t×30m	1.1*垂直動荷重+垂直静荷重+水平動荷重	191.0	204.6
	0t×30m	垂直静荷重(通常待機状態)	130.7	204.6
	0t×13m	垂直静荷重	161.9	204.6
許容応力割増: 15% S=1.15	150t×30m	1.1*垂直動荷重+垂直静荷重+水平動荷重+風荷重 <sup>*2</sup>	192.6	235.3
	0t×13m	垂直静荷重+風荷重 <sup>*2</sup>	165.0	235.3
許容応力割増: 30% S=1.30	0t×30m	垂直静荷重+休止風荷重 <sup>*3</sup>	149.3	266.0
	0t×13m	垂直静荷重+休止風荷重 <sup>*3</sup>	199.1	266.0
	150t×30m	垂直動荷重+垂直静荷重+地震荷重 I	181.3	266.0
	0t×13m	垂直静荷重+地震荷重 I	184.6	266.0
	150t×30m	垂直動荷重+垂直静荷重+地震荷重 II	226.1	266.0
	0t×13m	垂直静荷重+地震荷重 II	232.0	266.0

\*1 許容曲げ応力:  $\sigma_a = S \times \sigma_y / (1.5 \times 1.15)$  …… クレーン構造規格第3条による。

ただし、 $\sigma_y = 3.6$  [t/cm<sup>2</sup>] …… 旧 JIS 規格による。

\*2 クレーン作動時における風荷重 : 16 [m/sec]

\*3 クレーン停止時における風荷重 : 55 [m/sec]

## 有限要素法による応力解析結果

### 1. 目的

軸受下部の円筒根元部外面のR部に過大な応力が加わったと推定されることから、応力集中係数を算出するため、有限要素法によるFEM解析を実施した。

なお、応力集中係数は形状により決まる値であり、荷重条件の影響を受けないことから、解析条件は任意に無負荷・最小作業半径状態を選定した。

### 2. 解析条件

無負荷・最小作業半径状態における荷重条件

吊荷負荷: 0 t (無負荷)

作業半径: 13m (最小)

垂直荷重: 485.7 t (クレーン自重)

水平荷重: 249.2 t (クレーン自重によって生じるモーメントに応じた水平力)

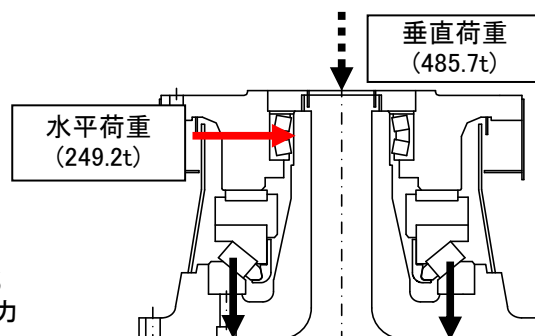


図1. 解析条件概略図

### 3. 解析結果

解析図に示す様に軸受下部の円筒根元部外面のR部(破損部)に応力集中が確認され、最高で492MPaの応力が算出された。

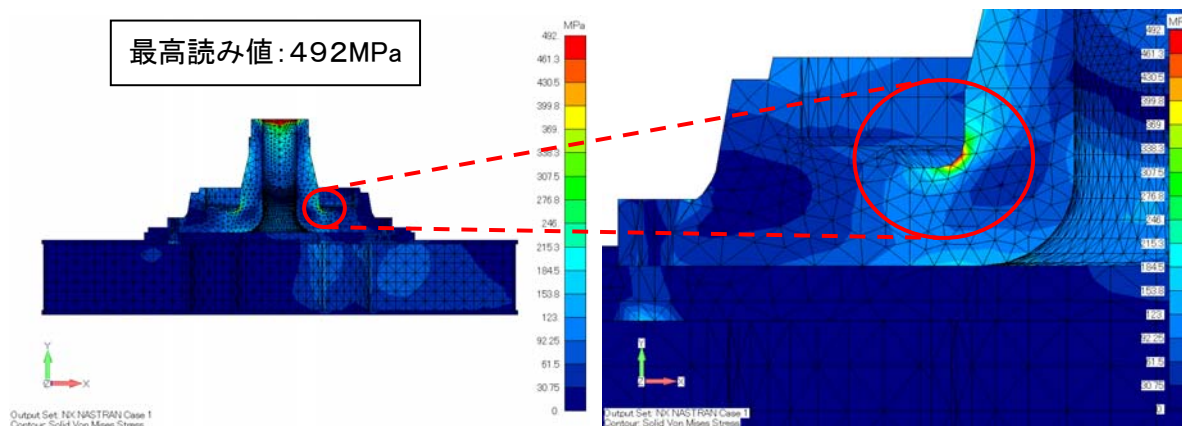


図2-1. 解析図(詳細)

図2-2. 解析図(全体)

### 4. 応力集中係数の算出

有限要素法による応力解析(FEM解析)の結果から、クレーン設置当時に算出していた応力値に対して約3倍の応力が、R部(破損部)に集中することを確認した。

$$\begin{aligned}
 \text{応力集中係数} &= \frac{\text{FEM解析の読み値(最高)}}{\text{規格に基づいて算出した曲げ応力}} \\
 &= \frac{492[\text{MPa}]}{161.9[\text{MPa}]} \\
 &= 3.04
 \end{aligned}$$

### 5. 落成検査および変更検査時の応力評価

上記の応力集中を考慮すると、当該クレーン設置時の落成検査およびフットステップ取替後の変更検査時において、軸受下部の表層部には、当該材料の破損発生の限界値として規定される引張強さ(550[N/mm<sup>2</sup>])を超える集中応力が作用していたものと考えられる。

$$\begin{aligned}
 \text{軸受下部の表層部に作用する応力} &= 271.4[\text{MPa}]^{*1} \times 3.04 \\
 &= 825[\text{MPa}] > 550\text{N/mm}^2 = 550\text{MPa}(\text{引張強さ})
 \end{aligned}$$

\*1 クレーン設置当時と同じ算出方法で求めた応力値

## 軸受下部円筒根元部外面の非破壊試験結果

### 1. 試験方法

軸受下部フランジ上面の任意の8点(図2. 試験位置概略図の①~⑧)から超音波探傷試験(斜角法: 60度)を実施し、軸受下部円筒根元部外面のR部について、初期き裂の有無を確認した。(図1. 試験方法概略図)

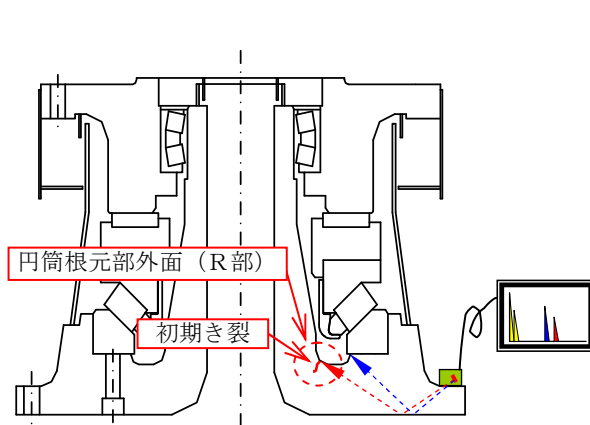


図1. 試験方法概略図

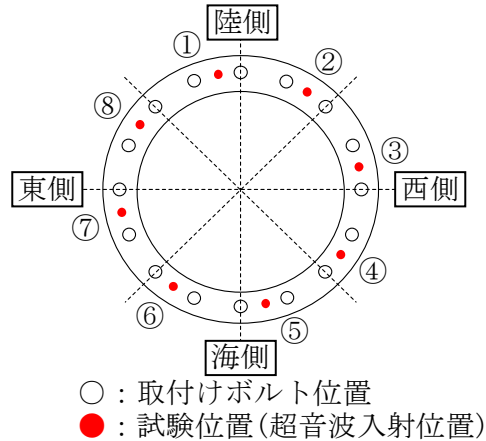


図2. 試験位置概略図

### 2. 試験結果

全試験位置(8箇所)において、軸受下部の形状による形状エコーとは異なる反射エコーが確認された。当該エコーは、形状エコー反射位置から軸受中心方向約79mmの位置から反射されており、形状エコー反射位置から円筒根元部外面(R部)までの距離(図面寸法: 80mm)と近似していることから、R部に初期き裂が発生していると判断される。

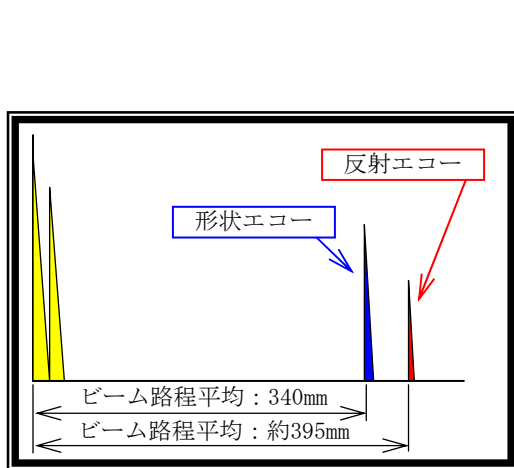


図3. 超音波探傷器画面イメージ図

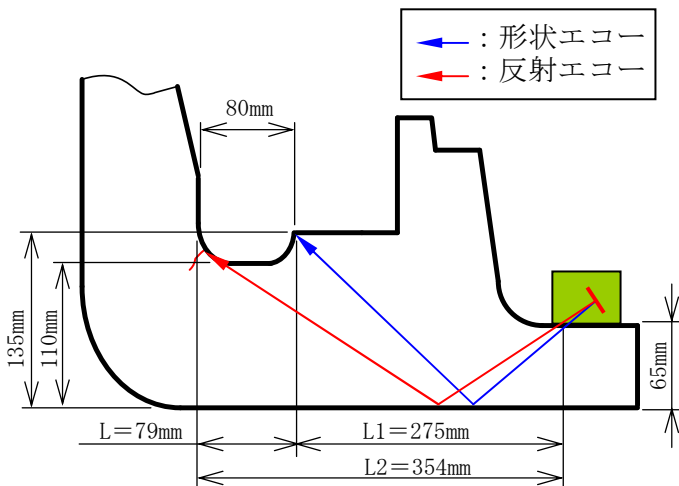


図4. 反射位置推定概略図

#### 反射位置推定の計算式

- ①形状エコー反射位置と超音波入射点の距離:  $L1$   
 $L1 = 275 [\text{mm}] = \sqrt{340^2 - (65 + 135)^2}$
- ②反射エコー反射位置と超音波入射点の距離:  $L2$   
 $L2 = 354 [\text{mm}] = \sqrt{395^2 - (65 + 110)^2}$
- ③形状エコー反射位置と反射エコー反射位置の距離:  $L$   
 $L = L2 - L1$   
 $= 354 - 275 = 79 [\text{mm}]$

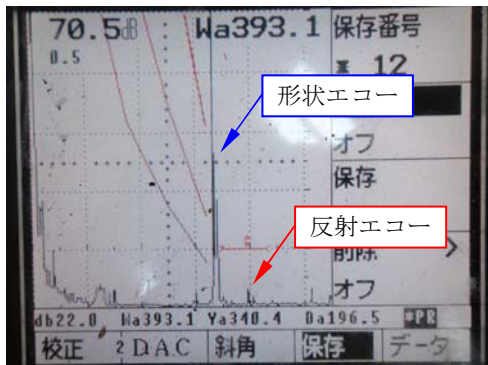


3. 結果詳細(超音波探傷器エコー画面)

(1) 探傷条件(探傷感度)

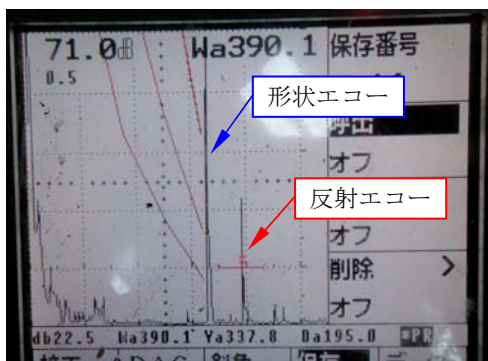
下部軸受フランジ上部に探触子を置き、軸受形状からの形状エコー高さが超音波探傷器(表示画面)全目盛の100%になるよう調整した感度を探傷感度とした。

(2) 超音波探傷器エコー画面：4箇所を抜粋



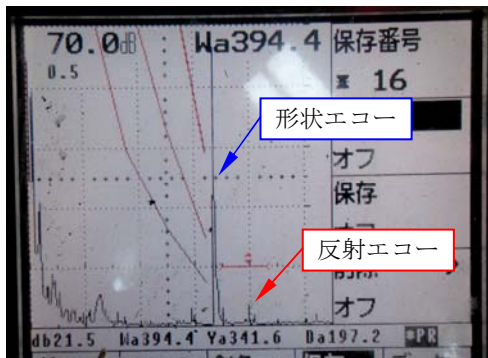
試験位置②

探傷位置：②(陸西側)  
反射エコー高さ：5%



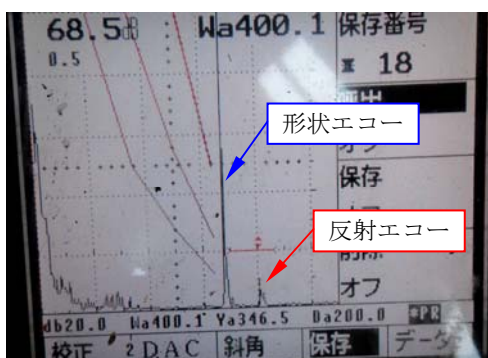
試験位置④

探傷位置：④(海西側)  
反射エコー高さ：45%



試験位置⑥

探傷位置：⑥(海東側)  
反射エコー高さ：10%



試験位置⑧

探傷位置：⑧(陸東側)  
反射エコー高さ：10%

## 現状のクレーンが倒壊しないことの評価

### 1. 目的

現状において、軸受下部の円筒根元部の全周破断には至っていないと推定されるが、今後き裂が進展し、全周破断に至ったとしても当該クレーンが倒壊しないことを確認する。

### 2. 全面破断後の荷重状況

軸受下部の円筒根元部で全周破断した場合、上部自動調芯ころ軸受で受けていた水平荷重は下部スラスト自動調芯ころ軸受に負荷される。また、垂直荷重については、常に下部スラスト自動調芯ころ軸受に負荷される。(図1参照)

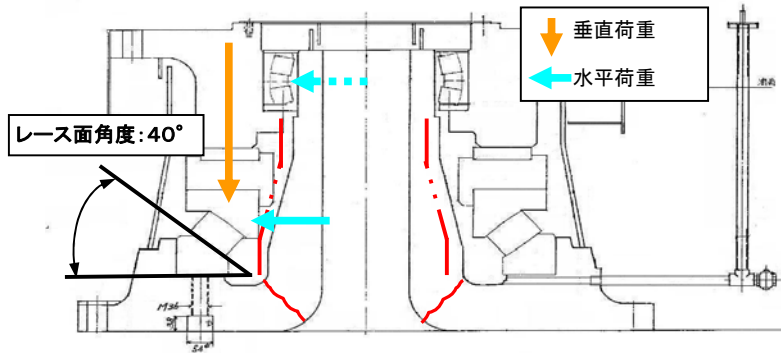


図1 全面破断時の荷重状況

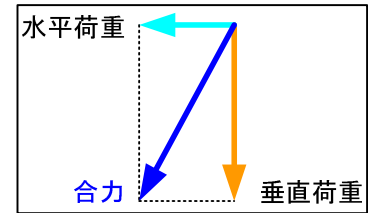


図2 下部スラスト自動調芯ころ軸受に作用する荷重

### 3. 安定性評価

#### (1) 倒壊しない条件

下部スラスト自動調芯ころ軸受に作用する荷重(青実線(図2参照): 垂直荷重と水平荷重の合力)の作用方向が、レース面に垂直な方向より内側向きであること。

#### (2) 評価条件

クレーン構造規格で規定されている荷重条件のうち、最も保守的な条件<sup>\*1</sup>である「垂直静荷重+地震荷重」にて評価を実施した。

- ・垂直荷重：485.7t (図3参照) … 垂直静荷重(クレーン自重)を考慮した。
- ・水平荷重：291.5t<sup>\*3</sup> (図4参照) 垂直静荷重および地震荷重<sup>\*2</sup>により生じたモーメントが、支点を介して上部自動調芯ころ軸受位置に作用する場合の水平荷重を考慮した。なお、水平荷重は、垂直静荷重と地震荷重から生じるモーメントにより生じる荷重であるため、垂直静荷重と地震荷重を足した値とは異なる。

- \*1 合力のレース面垂直方向に対する角度が最も小さくなる条件
- \*2 クレーン構造規格で規定された地震荷重の約3倍の荷重を考慮した。
- \*3 水平荷重の計算方法を添付資料-11(2/2)に示した。

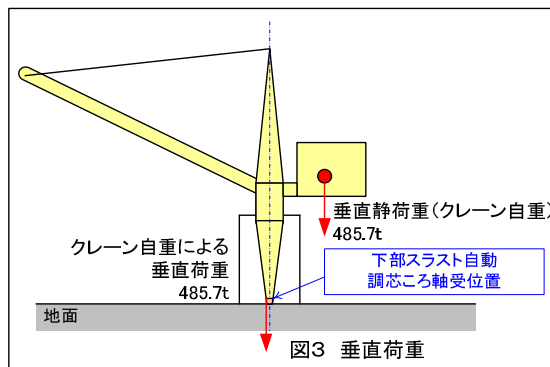


図3 垂直荷重

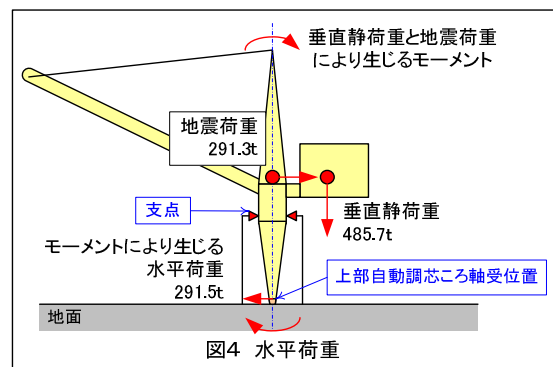


図4 水平荷重

#### (3) 評価結果

合力は、荷重作用面(レース面)の垂直方向と比較すると、約9度内側向きに傾くため、外側に滑り出すことはない。(図5参照)

したがって、き裂が進展し、全周破断に至った場合において、クレーン構造規格で規定された地震荷重の約3倍の地震を想定した場合でも当該クレーンは倒壊しない。また、強風時(55m/s)を考慮しても増加する水平荷重は約29t程度であり地震荷重の割り増し評価内に包括される。

なお、摩擦抵抗(約20%程度)が更に作用するため、より倒壊しにくい状況である。

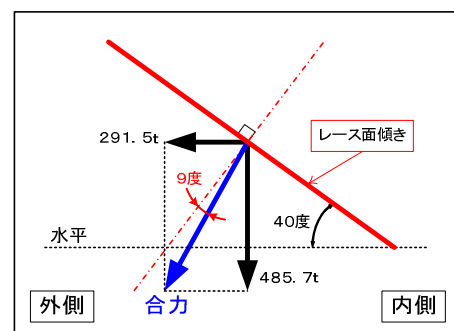
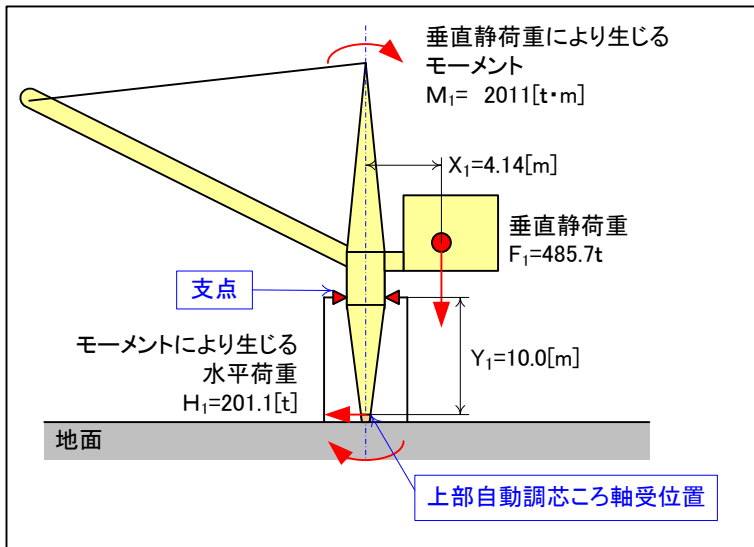


図5 荷重作用面と合力の関係図



## 水平荷重の計算方法



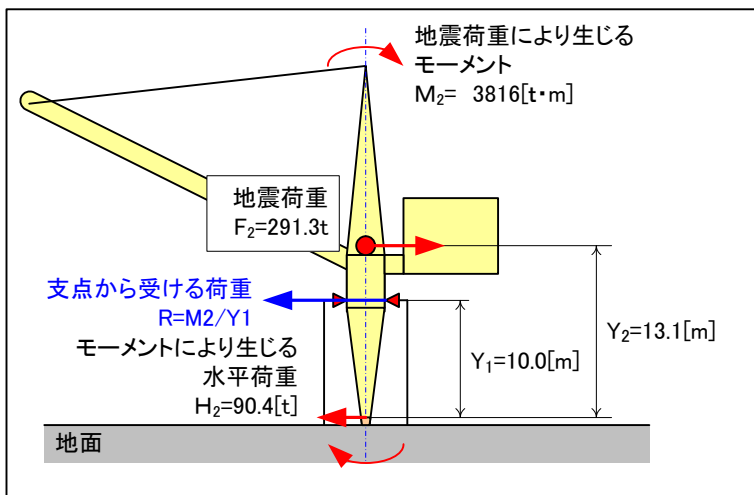
(1) 垂直静荷重により生じる水平荷重を算出する。

垂直静荷重により生じるモーメント $M_1$ は、

$$\begin{aligned} M_1 &= F_1 \times X_1 \\ &= 485.7[t] \times 4.14[m] \\ &= 2010.798[t \cdot m] \end{aligned}$$

モーメント $M_1$ により生じる水平荷重 $H_1$ は、

$$\begin{aligned} H_1 &= M_1 \div Y_1 \\ &= 2010.798[t \cdot m] \div 10.0[m] \\ &= 201.1[t] \text{ (切上げ)} \end{aligned}$$



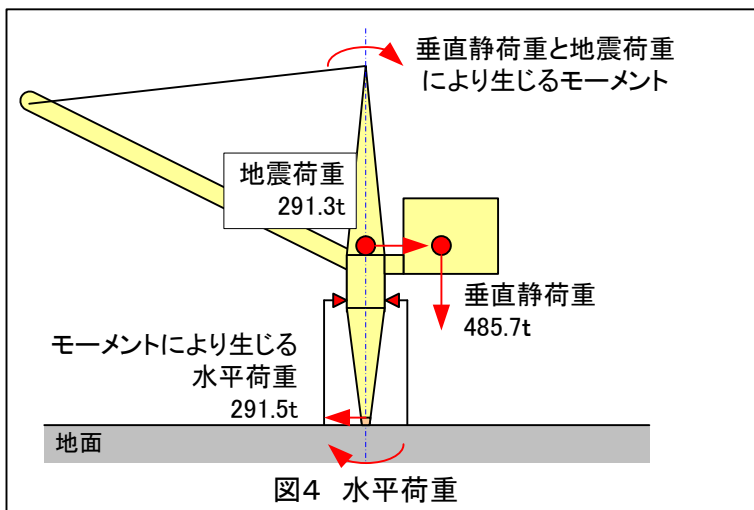
(2) 地震荷重により生じる水平荷重を算出する。

地震荷重により生じるモーメント $M_2$ は、

$$\begin{aligned} M_2 &= F_2 \times Y_2 \\ &= 291.3[t] \times 13.1[m] \\ &= 3816.03[t \cdot m] \end{aligned}$$

モーメント $M_2$ と地震荷重により生じる水平荷重 $H_2$ は、

$$\begin{aligned} H_2 &= R - F_2 \\ &= (M_2 \div Y_1) - F_2 \\ &= 3816.038[t \cdot m] \div 10.0[m] - 291.3[t] \\ &= 381.6038[t] - 291.3[t] \\ &= 90.4[t] \text{ (切上げ)} \end{aligned}$$



(3) (1)と(2)の結果より、垂直静荷重と地震荷重により生じる水平荷重 $H$ を算出する。

$$\begin{aligned} H &= H_1 + H_2 \\ &= 201.1[t] + 90.4[t] \\ &= 291.5[t] \end{aligned}$$