

伊方発電所  
岸壁クレーンからの油漏れについて  
(最終報告)

平成23年9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

## 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、欠陥と思われる指示が認められた。

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。

その後、集中応力を適切に評価した上で改良品の仕様を決定し、平成23年7月1日より改良品への取替工事を開始、7月15日に取替完了に伴う所轄労働基準監督署立会による変更検査を受検した。また、受検後に当該部に対して超音波探傷試験を実施し、指示がないことを確認し、取替工事を終了した。

\* 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

平成22年

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え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

岸壁クレーンフッ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ッ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

取り外したフッ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

11月20日～12月 3日

クレーンメーカーによる軸受下部の疲労\*<sup>4</sup>試験実施

11月26日

平成22年7月に取り付けした軸受下部について超音波探傷試験で欠陥と思われる指示を確認

12月10日

改良品への取替を決定し、取替までの間の当該クレーンの使用禁止を周知

平成23年

1月 7日

これまでの経緯と調査結果を中間報告として公表

1月18日

軸受下部における集中応力が適切に考慮されていなかった原因の聞き取り調査と改良型軸受下部の仕様検討を開始

3月 1日～6月20日

改良型フットステップの工場製作

7月 1日～7月15日

改良型フッ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

改良型軸受下部について超音波探傷試験を実施し、指示がないことを確認

7月25日

当該クレーンの使用開始を周知

\*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

軸受下部の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

平成22年7月に取り外したフットステップを点検した結果、軸受下部の円筒根元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

平成22年7月に取り外した軸受下部について破面観察を行った結果を以下に示す。

#### 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様相が確認された。

##### 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

平成22年7月に取り外した軸受下部について、破面に対して直角に切断し、断面観察を行った結果を以下に示す。

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かくなり、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

平成22年7月に取り外した軸受下部について、破面に対して直角に切断し、硬さ分布調査を実施した結果、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

平成22年7月に取り外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（286N/mm<sup>2</sup>＝286MPa）はクレーン構造規格に基づく許容曲げ応力（204.6MPa）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。

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

- ・ 353N/mm<sup>2</sup>：旧 JIS での規格値（36kg/mm<sup>2</sup>）を換算した値であり  
現 JIS 規格値では 355N/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、設計上要求している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、き裂発生部に設計上想定していた応力よりも大き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、当該軸受下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。

旧型軸受下部の設計時における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った結果、設計上想定していた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、設計上想定していた応力よりも大きな応力が発生していた可能性があることから、有限要素法（FEM）を用いて当該部の応力を詳細に評価した。評価にあたっては、応力集中の度合い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に想定していた応力の約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、上記の応力集中を評価した結果、発生する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（150t）の1.25

倍の荷重（187.5 t）を負荷した時に、引張強さ（550 MPa）を超える曲げ応力（約825 MPa）が発生していた。

（添付資料－9）

d. 設計時に応力集中が適切に考慮されていなかった原因調査

設計時に応力集中が適切に考慮されていなかった原因について、クレーンメーカーへの聞き取りによる調査を行った結果は以下のとおりであった。

- （i）当該クレーン設計当時、構造部材のうち、切欠き部や径変化部等、一般的に応力集中の発生が想定される部位については、機械工学便覧に掲載されている形状に応じた応力集中係数により発生応力を割増して想定する等、応力集中を考慮した設計を行っていたが、その他の部位については、類似の構造部品の不具合情報等をもとに詳細検討の可否を判断していた。
- （ii）不具合情報は、当該クレーンメーカー各支店より品質保証部門に集約され、関係部署（品証・設計・製造・工事）において対策検討を行うシステムとなっており、き裂が発生した軸受下部は、当該クレーンメーカーが1960年代から標準形状として採用していたが、これまで不具合事例は全く発生していなかった。
- （iii）また、軸受下部については、径変化部ではあるが、曲率半径の大きなR形状を採用していたことから、発生応力の算定にあたり、応力集中を考慮する必要はないと判断していた。
- （iv）なお、当該クレーンは、当時、他社3プラントで同じ用途を前提に設置されていた岸壁クレーンの仕様を踏襲したものであったが、当該クレーンは他プラント設置のクレーンと比較して作業半径が最も大きく、発生応力もより大きくなることから、機械強度の高い材料を採用することとしたが、上記のことから応力集中についての考慮は不要と判断していた。

また、当社がメーカーの応力評価結果について適切であると判断した原因について考察した結果は以下のとおりである。

- （i）クレーン製造許可書の交付を受けており、メーカーが行った強度設計に問題はないと考えていた。
- （ii）当社の調達要求に以下の項目が含まれていなかった。
  - ・設計にあたっては適用または準拠すべき法令、規格、基準等において評価を要求される部位に加え、設計上応力集中が懸念される部位について強度上問題がないものであることを確認すること。
  - ・また、評価要領について、適用または準拠すべき法令規格、基準等において要求される要領に加え、必要に応じ最新の知見に基づく手法を適用し評価を実施すること。
- （iii）構造および形状に起因する応力集中が考慮され、適切に評価されていることを確認する当社の審査上のチェック項目がなかった。

## (9) 平成22年7月に設置したフートステップの健全性確認

### a. フートステップ部の健全性確認

発生応力の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から、平成22年7月に設置した軸受下部について健全性の確認を行うこととした。

まず、平成22年7月に取り外した軸受下部の調査において超音波探傷試験(UT)により、軸受下部をクレーンに取り付けた状態でき裂を検出することが可能であることが確認できたことから、クレーンに取り付けた状態で平成22年11月に超音波探傷試験を行った。その結果、当該部に欠陥と思われる指示が認められた。

(添付資料-10)

次に、平成23年7月に軸受下部をクレーンから取り外した後に、浸透探傷試験および磁粉探傷試験にて追加調査を行った。しかしながら、指示は確認されなかった。また、超音波探傷試験において指示が認められた部位を切断し、マクロ観察を行ったが、同様に欠陥は確認されなかった。

以上の結果から、超音波探傷試験で捉えた指示は当該部に存在する欠陥を捉えたものではないことが判明したため、この指示について再評価(解析)を行った。その結果、この指示は軸受下部の底面からの反射エコーであることが判明した。

(添付資料-11)

以上より、平成22年7月に設置した軸受下部の円筒付根部表層部に、き裂は発生していないことが確認された。

### b. フートステップ部以外の健全性確認

平成22年7月のフートステップ取替工事に合わせて、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。

## 9. 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。

## 10. 対策

(1) 当該クレーンの軸受下部について応力集中を考慮した仕様に変更し、取替を行った。

### a. 仕様変更内容

#### (a) 軸受下部円筒根元部のR部寸法変更

R部寸法を30Rから70Rに変更することにより、応力集中を緩和した。

#### (b) 軸受下部の材質変更

旧型軸受下部に使用していた溶接構造用鋳鋼品（SCW550）では設計強度が得られないため、材料を機械強度の高い材料（ニッケルクロムモリブデン鋼（SNCM439））に変更した。なお、旧型軸受下部においては質量効果による機械強度のばらつきが見られたが、改良型軸受下部においては材料を鍛鋼品に変更し、適切な熱処理を行うことにより機械強度の均一化を図った。

（添付資料－12）

### b. 仕様変更後の応力評価結果

改良品について有限要素法による応力評価を行い、クレーン構造規格に基づく全ての荷重条件において、許容曲げ応力を満足することを確認した。

（添付資料－13）

(2) 再発防止対策として、以下の対策を実施した。

### a. 調達時点での対策として、標準発注仕様書に以下の項目を追記した。（平成23年3月22日改正済）

- ・設計にあたっては適用または準拠すべき法令、規格、基準等において評価を要求される部位に加え、設計上応力集中が懸念される部位について強度上問題がないものであることを確認すること。
- ・また、評価要領について、適用または準拠すべき法令規格、基準等において要求される要領に加え、必要に応じ最新の知見に基づく手法を適用し評価を実施すること。

### b. 設計の審査段階での対策として、納入図審査手引きに、メーカーの設計図書（納入図）審査における注意事項として、以下のチェック項目を追加した。（平成23年3月22日改正済）

- ・構造および形状に起因する応力集中が考慮され、適切に評価されていることを確認すること。

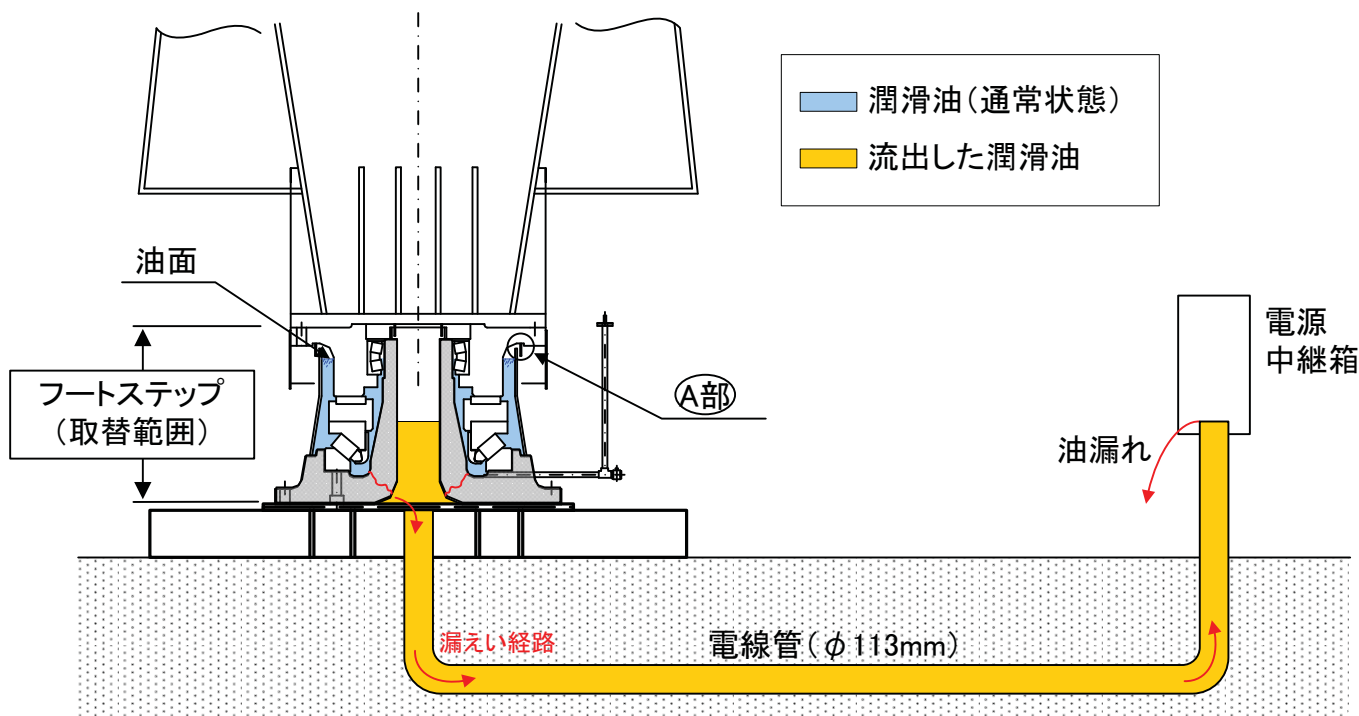
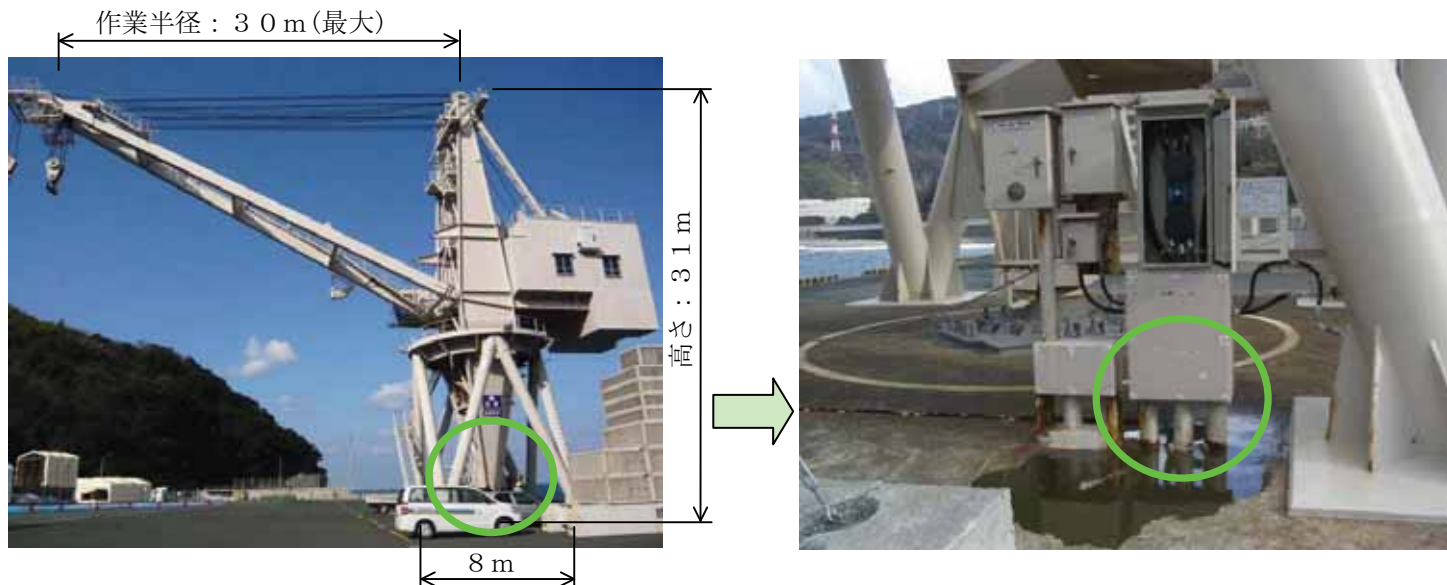
以上

## 添 付 資 料

- 添付資料－ 1 岸壁クレーン廻り概略図
- 添付資料－ 2 岸壁クレーン（軸受下部円筒根元部）損傷状況
- 添付資料－ 3 軸受円筒根元部の破面マクロ観察結果
- 添付資料－ 4 破面SEM観察結果
- 添付資料－ 5 断面（マクロ・ミクロ）観察結果
- 添付資料－ 6 軸受下部根元部断面硬さ分布調査結果
- 添付資料－ 7 化学成分、機械試験調査結果
- 添付資料－ 8 クレーン設置当時の応力計算結果
- 添付資料－ 9 有限要素法による応力解析結果
- 添付資料－ 10 軸受下部の超音波探傷試験結果（平成22年11月実施分）
- 添付資料－ 11 軸受下部の追加調査結果（平成23年7月実施分）
- 添付資料－ 12 改良型軸受下部の仕様変更内容
- 添付資料－ 13 改良型軸受下部の応力評価結果

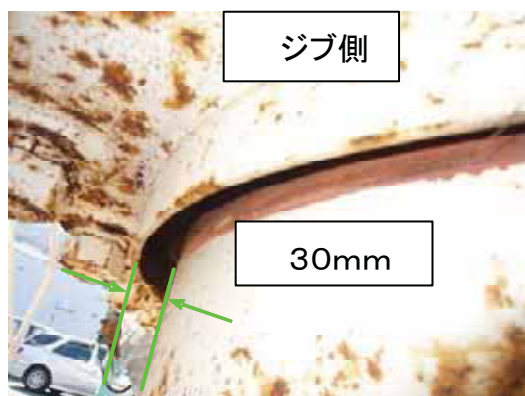


### 岸壁クレーン廻り概略図

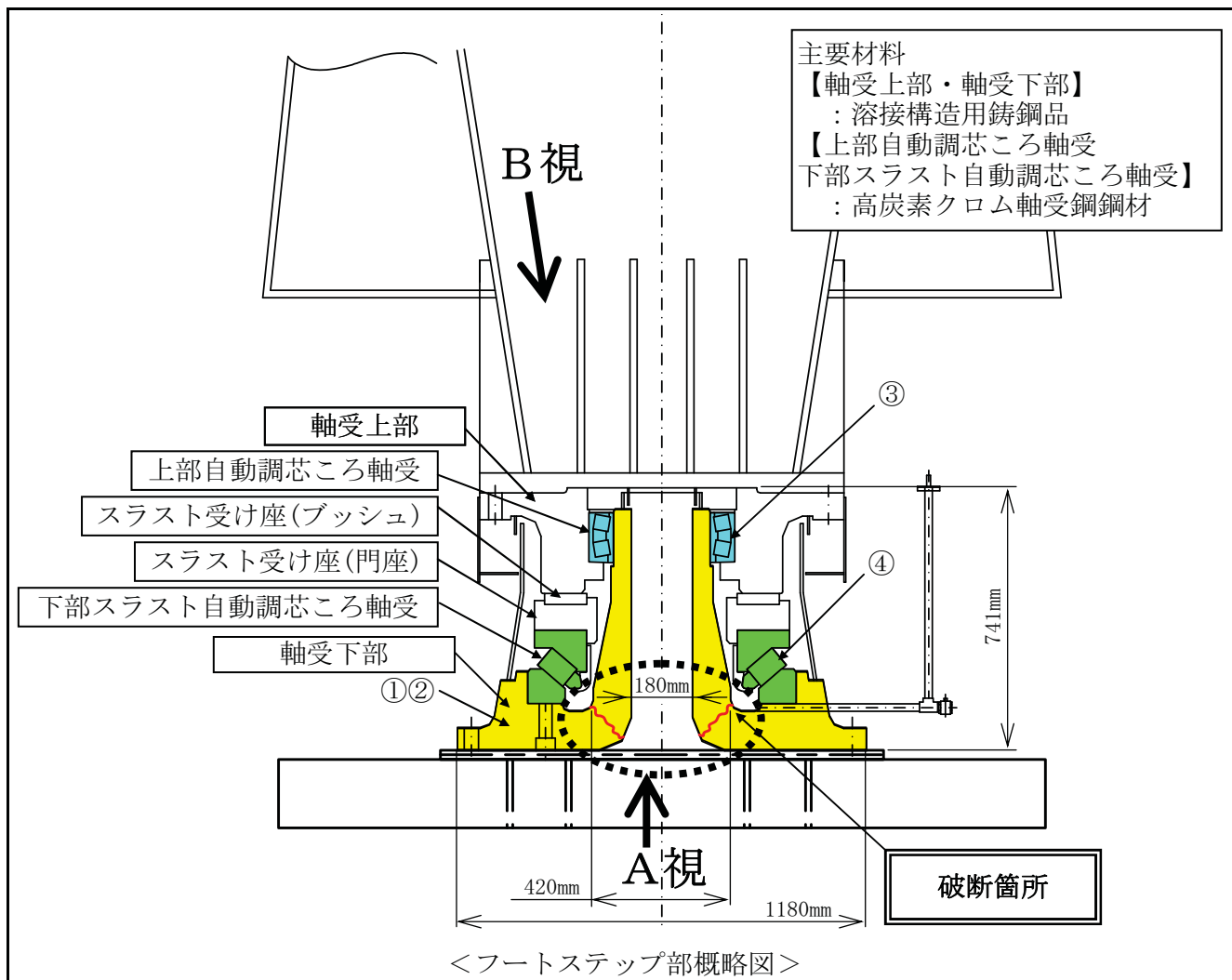


#### Ⓐ部 詳細

回転軸受部(フートステップ)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



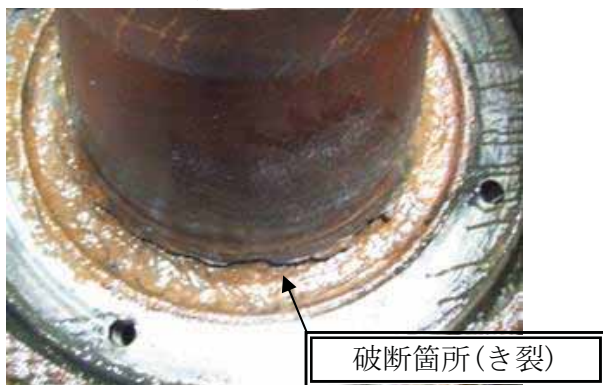
①軸受下部円筒根元部内側（A視）  
全周にわたりき裂が確認された。



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。

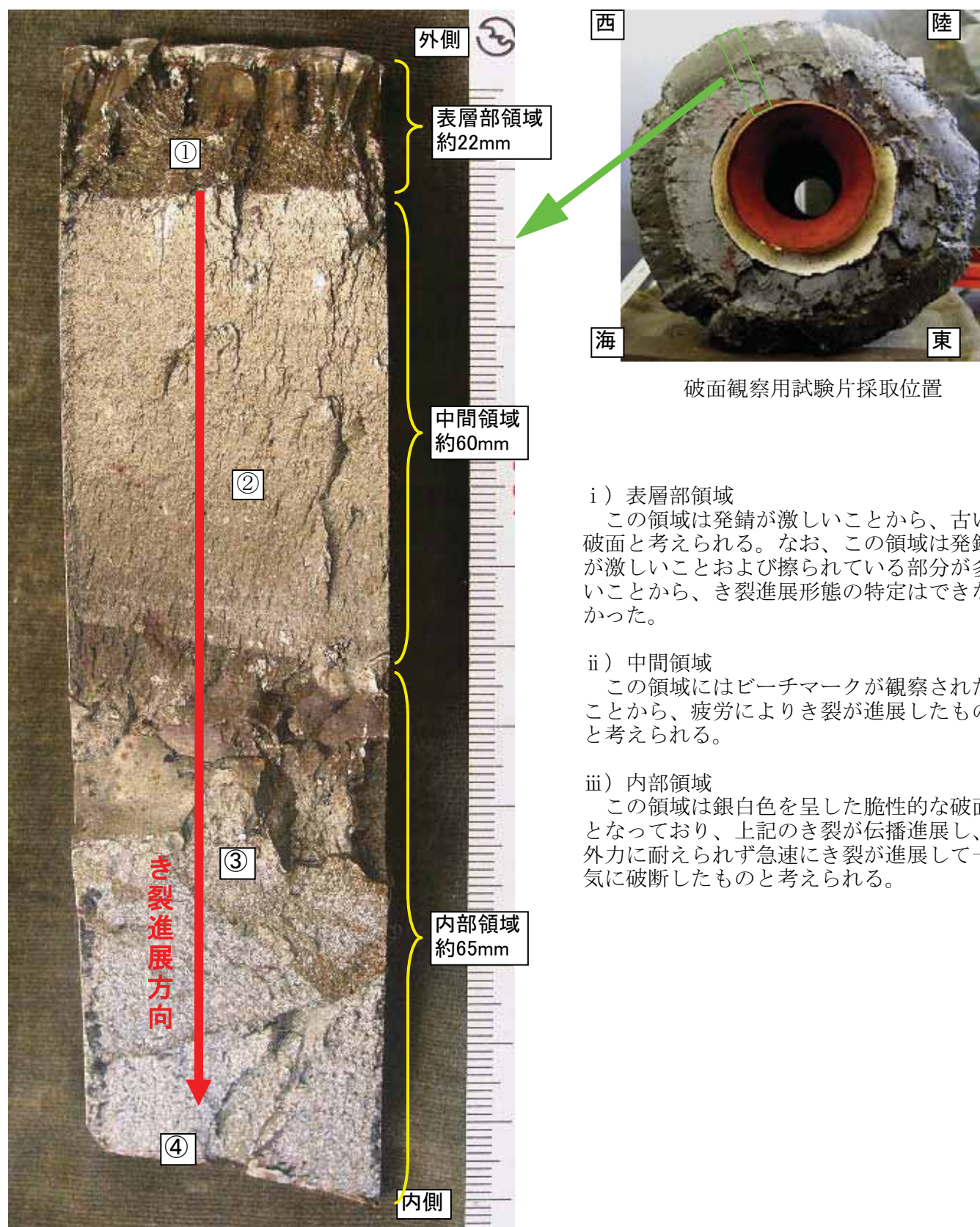


④下部スラスト自動調芯ころ軸受  
異常は認められなかった。





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

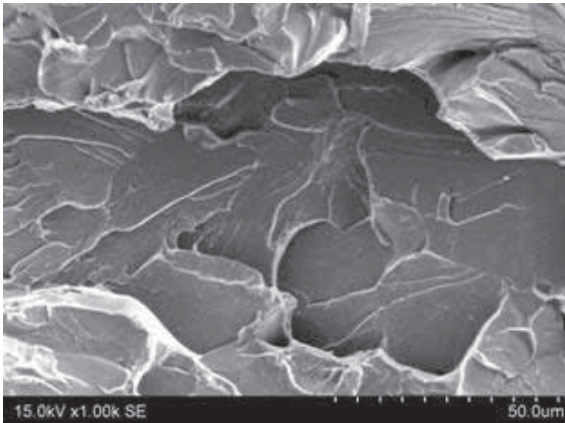
- i) 表層部領域  
この領域は発錆が激しいことから、古い破面と考えられる。なお、この領域は発錆が激しいことおよび擦られている部分が多いことから、き裂進展形態の特定はできなかった。
- ii) 中間領域  
この領域にはビーチマークが観察されたことから、疲労によりき裂が進展したものと考えられる。
- iii) 内部領域  
この領域は銀白色を呈した脆性的な破面となっており、上記のき裂が伝播進展し、外力に耐えられず急速にき裂が進展して一気に破断したものと考えられる。

破面観察用試験片

①②③④ は破面SEM観察位置を示す。



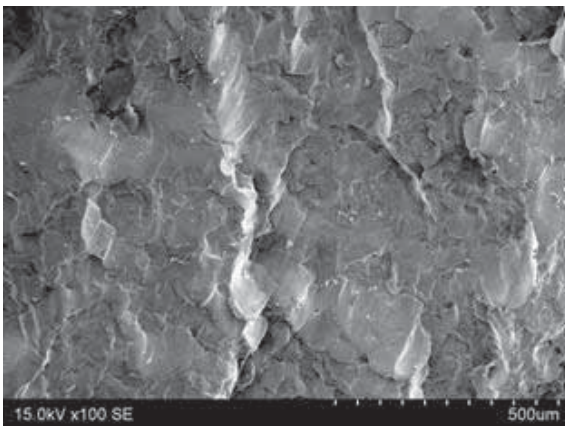
## 破面SEM観察結果



破面位置①：脆性破面（へき開）

i) 表層部領域

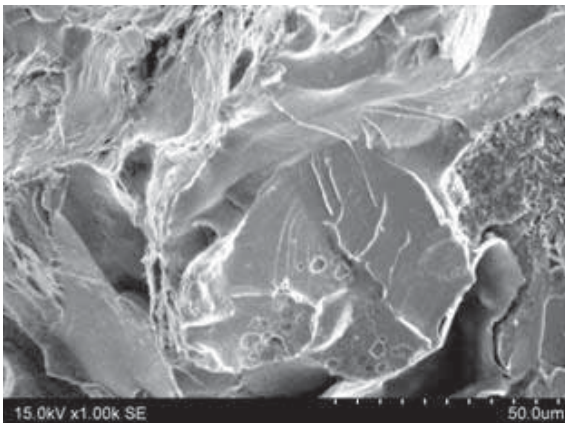
破面には部分的に脆性破面（へき開）が観察されることから、脆性的に破壊したと考えられる。



破面位置②：疲労破面

ii) 中間領域

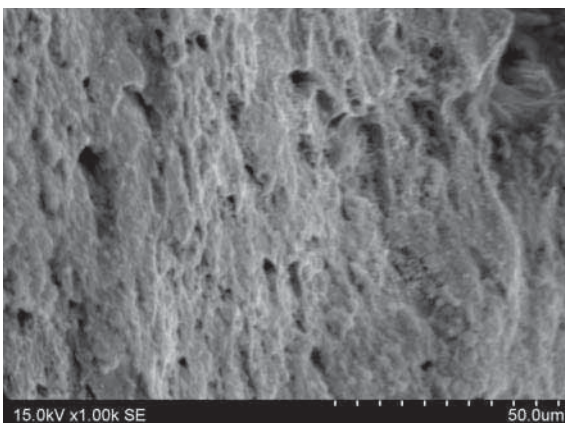
破面には、脆性的な破面形態は観察されず、疲労破面に見られる特徴である筋状の様子が確認された。



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。

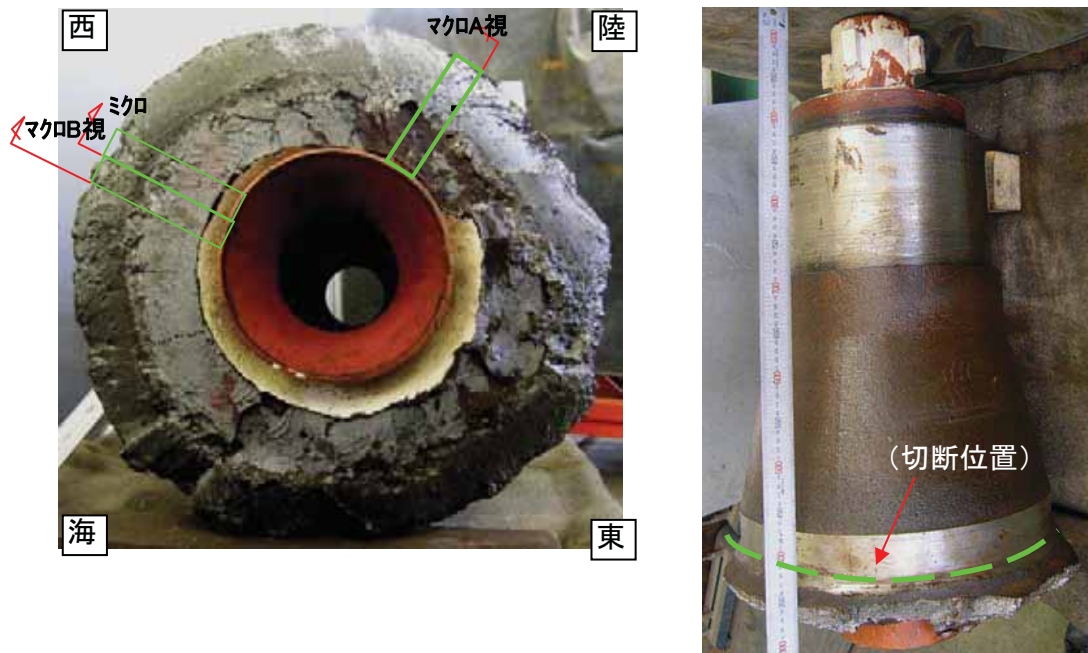


破面位置④：ディンプルパターン破面

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。

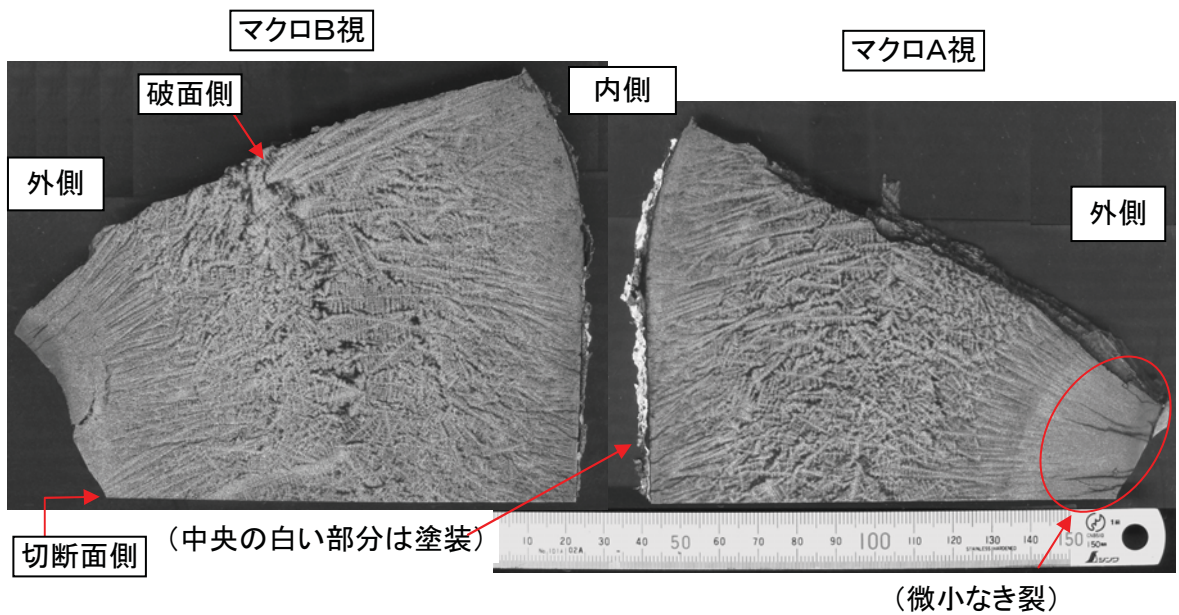
断面マクロ観察結果



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

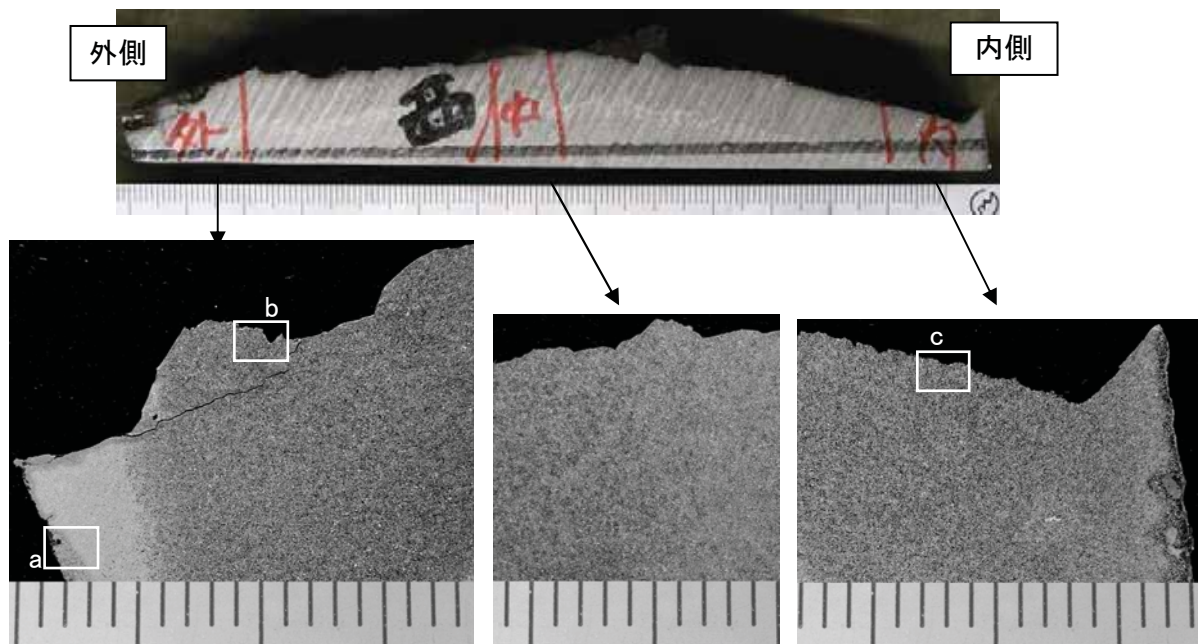
鑄鋼品であり鑄造組織(樹枝状晶)が明瞭に観察されるが、金属組織に特に異常は認められず、鑄造欠陥も認められなかった。また、表層部外面には微小なき裂が数個認められた。



断面マクロ組織

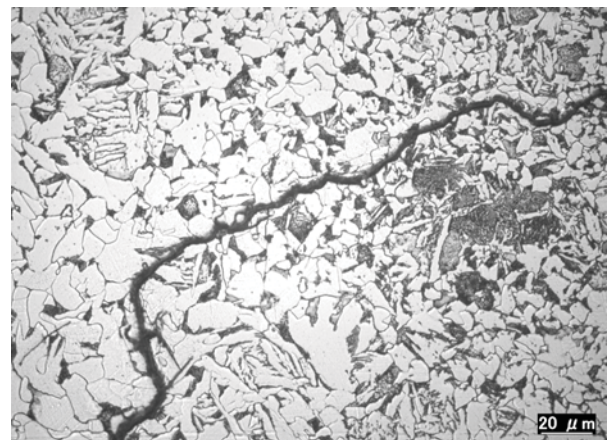


## 断面マイクロ観察結果

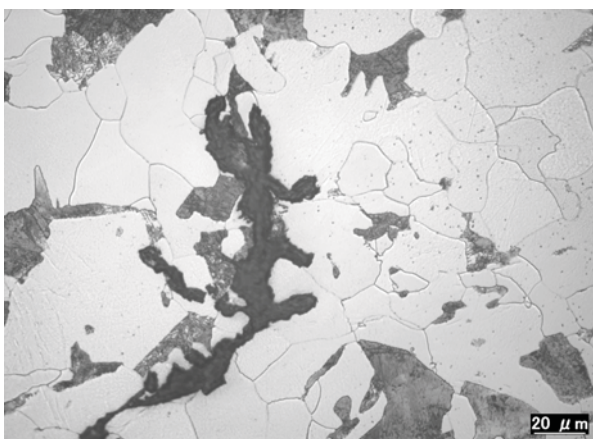


中間領域(b部)および内部領域(c部)には、フェライト+パーライト組織が観察され、特に異常は認められなかった。

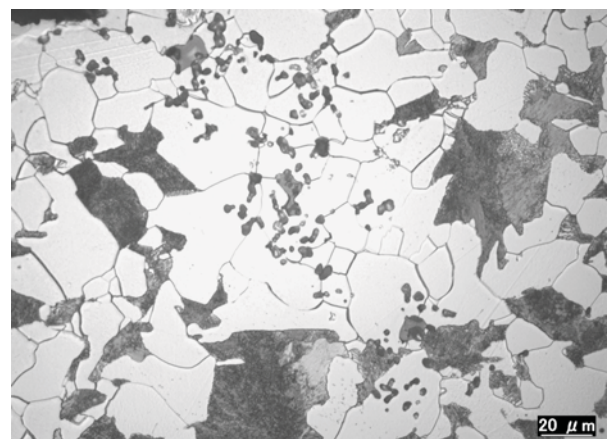
表層部領域(a部)には、中間領域と比較し細かな組織が観察された。このことから、中間領域に比べやや脆弱となっていたと考えられる。また、マクロ観察で認められた微小なき裂はこの領域内に存在していることから、脆性的なものであると考えられる。なお、上記の粒径の違いは熱処理(焼きならし)時の冷却速度の違いにより生じたもので、表層部が早く冷却されたことから粒径が小さくなったものと考えられる。



a部詳細写真(表層部領域)

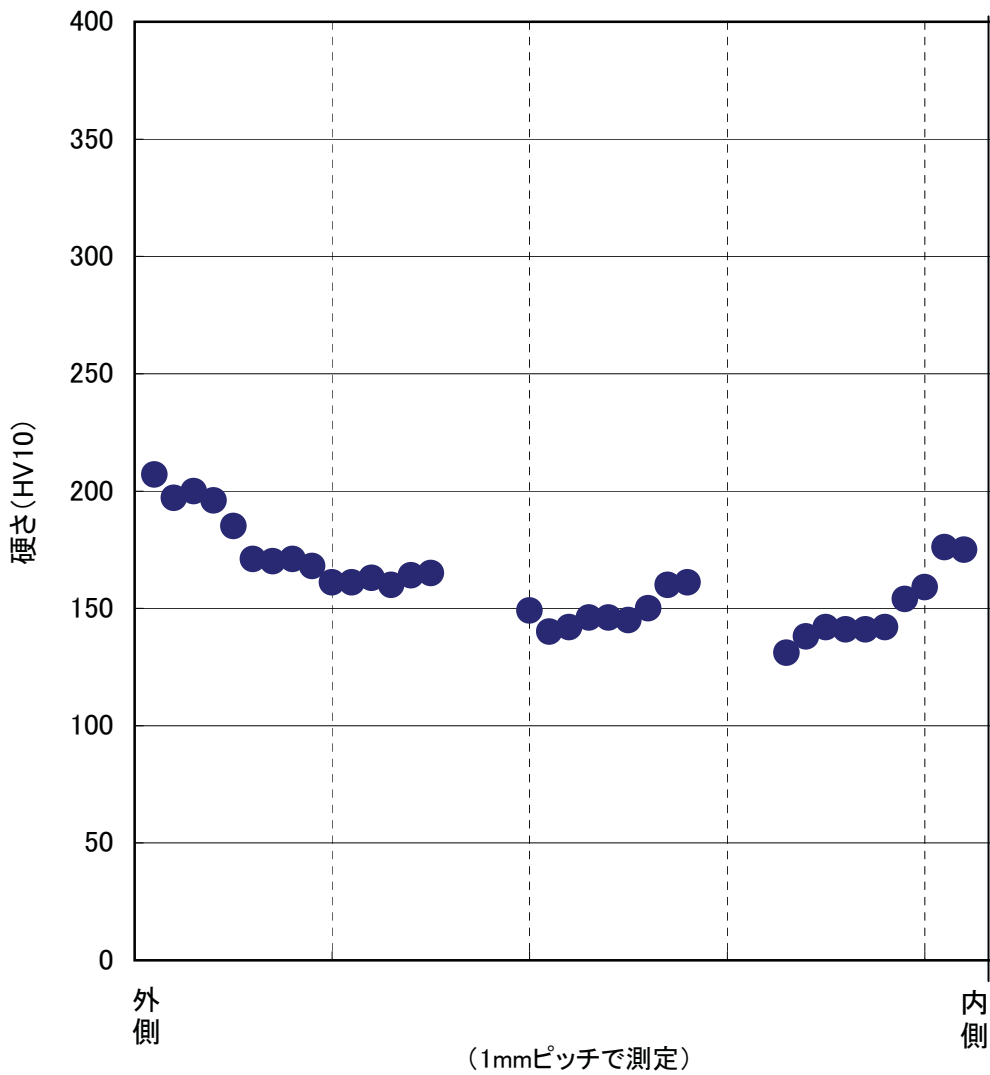
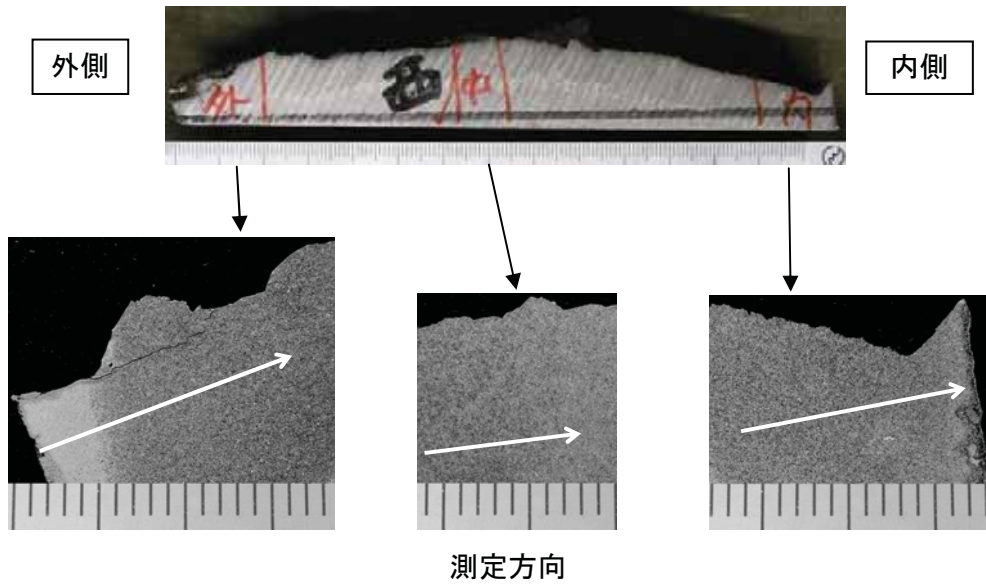


b部詳細写真(中間領域)



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

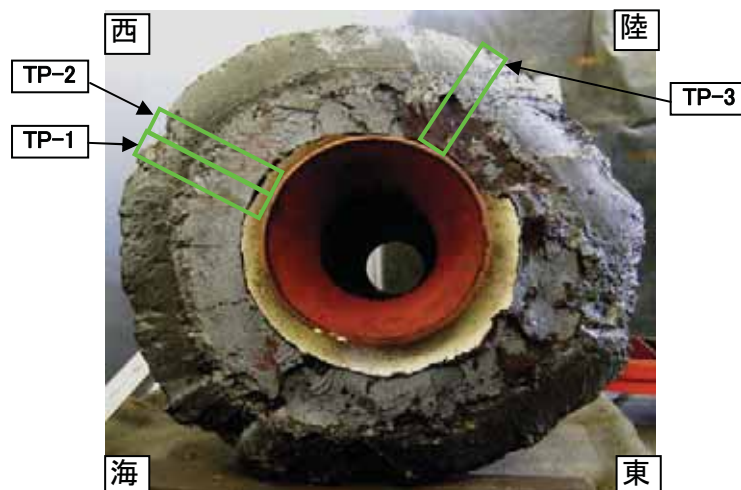
$$\text{炭素当量} = \text{C} + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/40 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{V}/14$$

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	断面積	標点距離	降伏荷重	降伏点	最高荷重	引張強さ	伸び	絞り	破断位置
	mm	mm <sup>2</sup>	mm	N	N/mm <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	%	%	
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 J I S 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 : 垂直静荷重の二十パーセント\*1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。

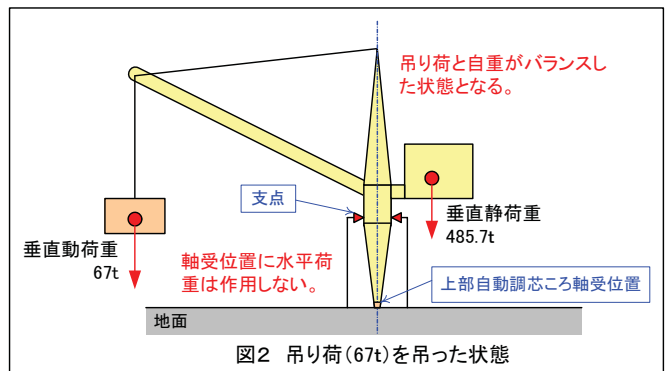
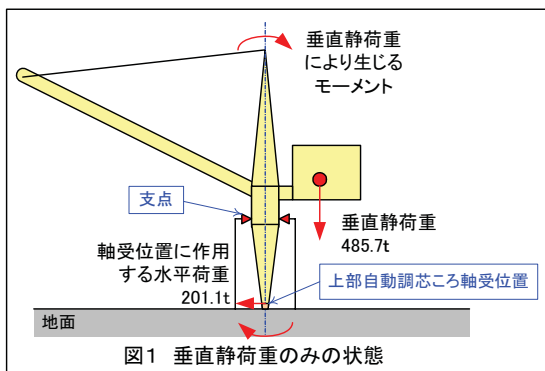
\*1 地震荷重については、旧規格に定める荷重以外に垂直静荷重の三十六パーセントに相当する水平方向の荷重と十八パーセントに相当する垂直方向の荷重が作用するものとして計算した値についても考慮している。

#### 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。

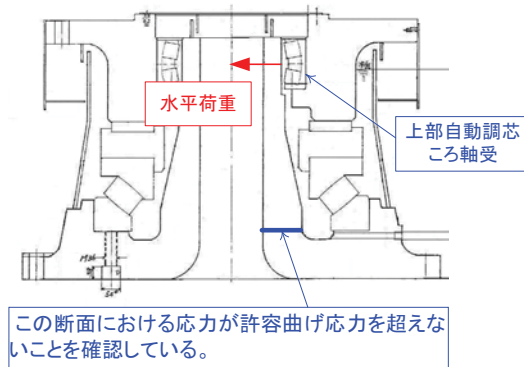


図3 応力評価部位

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*1 $\sigma_a$ [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)	189.4	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	192.5	235.3
	0t×13m	垂直静荷重+風荷重	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	149.3	266.0
	0t×13m	垂直静荷重+休止風荷重	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。

## 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)

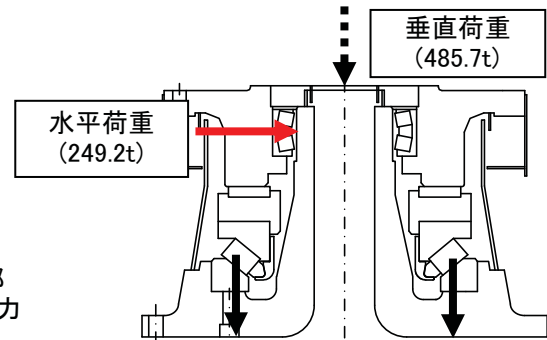


図1. 解析条件概略図

### 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。

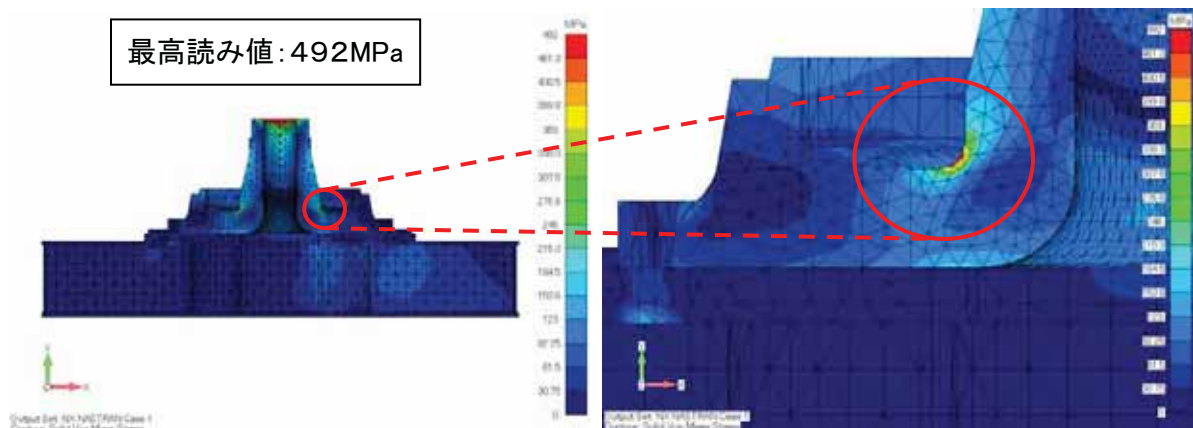


図2-1. 解析図(詳細)

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



## 軸受下部の超音波探傷試験結果 (平成22年11月実施分)

### 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)

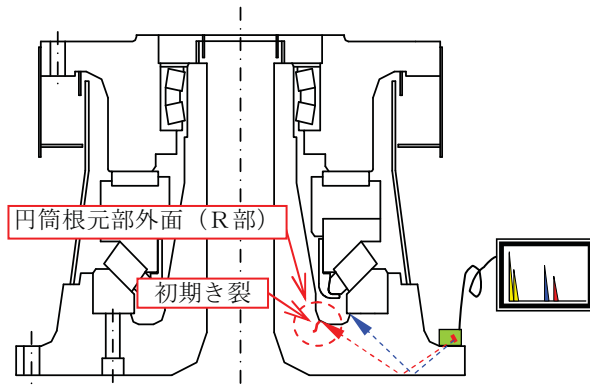


図1. 試験方法概略図

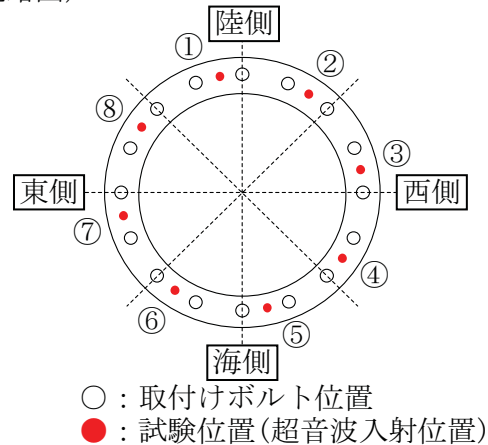


図2. 試験位置概略図

### 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、初期き裂からの反射エコーである可能性が高い。

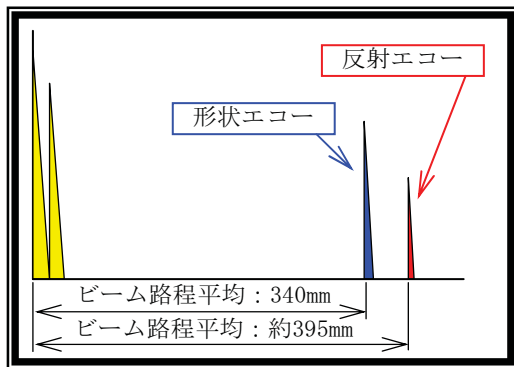


図3. 超音波探傷器画面イメージ図

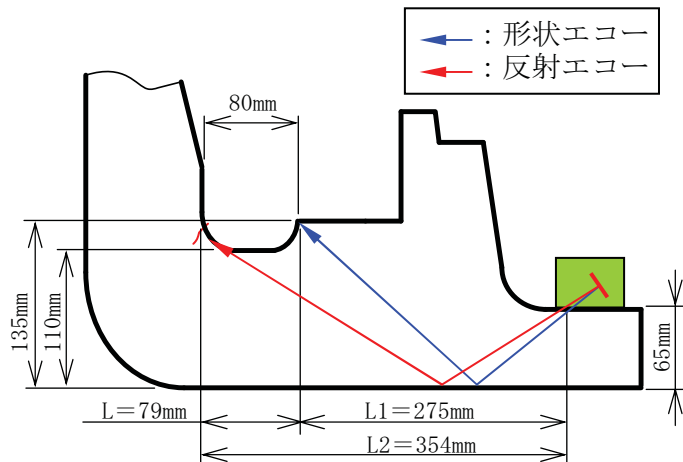


図4. 反射位置推定概略図

#### 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  

$$L = L2 - L1$$

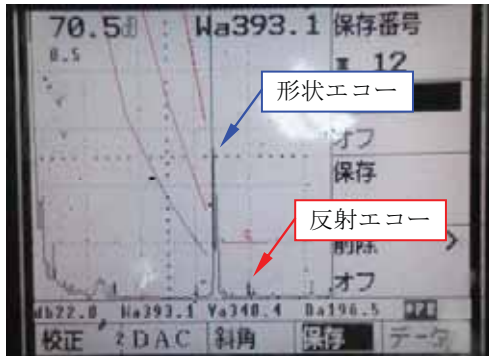
$$= 354 - 275 = 79 [\text{mm}]$$

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)

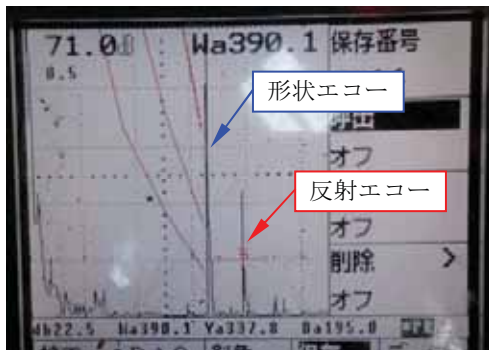
下部軸受フランジ上部に探触子を置き、軸受形状からの形状エコー高さが超音波探傷器(表示画面)全目盛の100%になるよう調整した感度を探傷感度とした。

(2) 超音波探傷器エコー画面：4箇所を抜粋



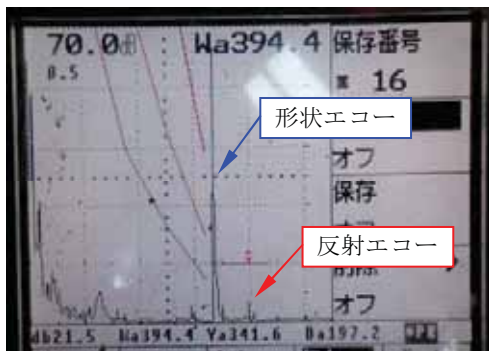
試験位置②

探傷位置：②(陸西側)  
反射エコー高さ：5%



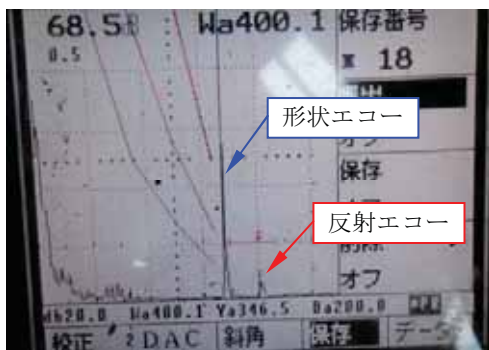
試験位置④

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%

## 軸受下部の追加調査結果 (平成23年7月実施分)

### 1. 浸透探傷試験結果および磁粉探傷試験結果

円筒付根部の表面部（図1）について浸透探傷試験および磁粉探傷試験を行ったが、欠陥は確認されなかった。

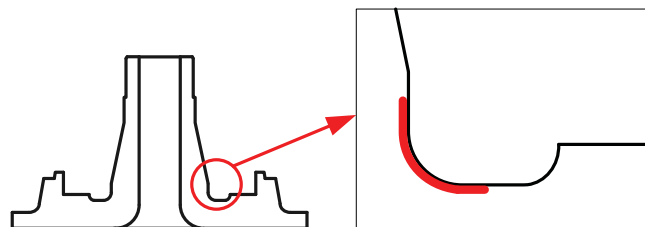


図1 浸透探傷試験および磁粉探傷試験実施範囲

### 2. 断面マクロ観察結果

超音波探傷試験で指示の大きかった位置で軸受下部を切断し（図2）、マクロ観察を行ったが欠陥は確認されなかった。



図2 軸受下部断面写真

### 3. 超音波探傷試験の指示の再評価（解析）結果

超音波探傷試験では、円筒根元部（図3 位置③）に欠陥が存在し、そこからエコーが反射していると推定していたが、上記の調査結果より欠陥が確認されなかったことから、反射エコーについて再評価（解析）を実施した結果、このエコーは下部軸受の底面で反射したエコーを捉えていることが判明した。

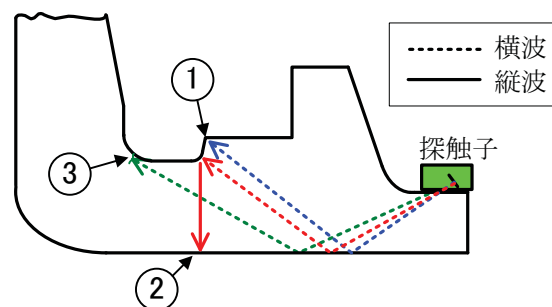


図3 超音波探傷試験 解析図

#### 1. ビーム路程の確認

底面（図3 位置②）で反射した場合のビーム路程は、約395mmとなり、円筒根元部（図3 位置③）に欠陥が存在した場合のビーム路程と等しくなることが確認された。

#### 2. 指にて確認

探傷波形（図4）が表示された状態で、軸受下部の底面（図3 位置②）にオイルを付けた指で接触すると、反射エコーが動くことが確認された。

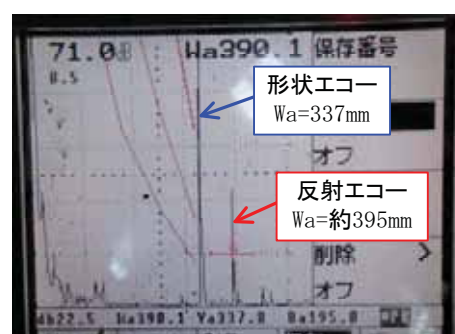
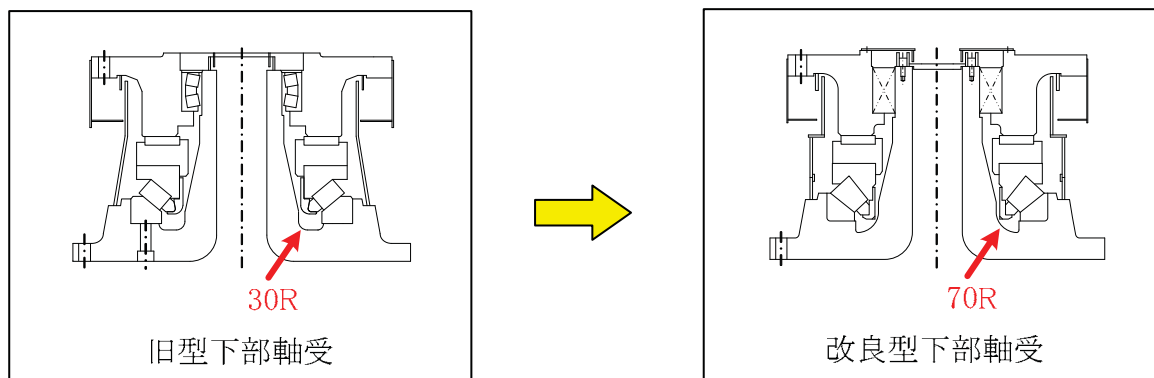


図4 UT探傷波形

## 改良型軸受下部の仕様変更内容

### 1. 円筒根元部のR部寸法変更



### 2. 改良型下部軸受の材料特性

#### (1) 材質

SNCM439 (JIS G 4053)

#### (2) 化学分析結果

分析試料	化学分析値 単位 (%) ※1								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
	>0.39 <0.43	>0.15 <0.35	>0.75 <0.90	MAX 0.025	MAX 0.025	MAX 0.15	>1.80 <2.00	>0.80 <1.00	>0.20 <0.30
改良型下部軸受	0.40	0.28	0.76	0.018	0.018	0.09	1.84	0.81	0.23

※1 化学成分については、JIS規格の要求値よりも厳しい値を要求している。

#### (3) 機械試験結果

機械的特性については、JIS規格において強度規定がないため、設計要求を満足することを実体強度試験により確認している。

試験項目 試験片番号	試験温度 ℃	引張試験 (JIS 14A号標準試験片) (室温20℃)						
		直径 mm	断面積 mm <sup>2</sup>	標点距離 mm	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	絞り %
		—	—	—	—	≥765	≥980 <1130	≥8
改良型下部軸受	20	14	154	70	968	1072	13.7	45.8

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	試験温度 ℃	シャルピー衝撃値 J/cm <sup>2</sup>
	≥285	—	≥34
改良型下部軸受	331	20	99

## 改良型軸受下部の応力評価結果

### 1. 目的

改良型軸受下部の円筒根元部外面のR部における応力集中係数を有限要素法(FEM)応力解析により求め、発生する集中応力を算出する。

### 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+ウェイト重量)

水平荷重：249.2 t

(クレーン自重+ウェイト重量によって生じるモーメントに応じる水平力)

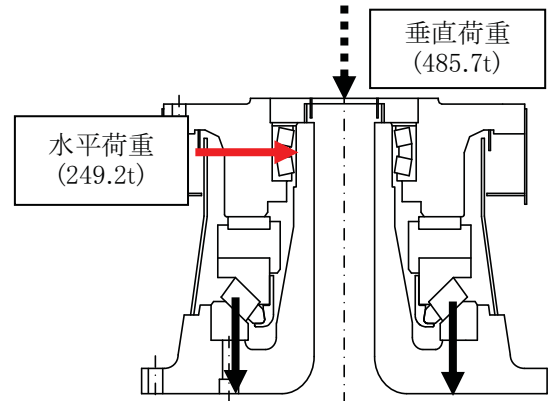


図1. 解析条件概略図

### 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部に応力集中が確認され、最高で355MPaの応力が算出された。

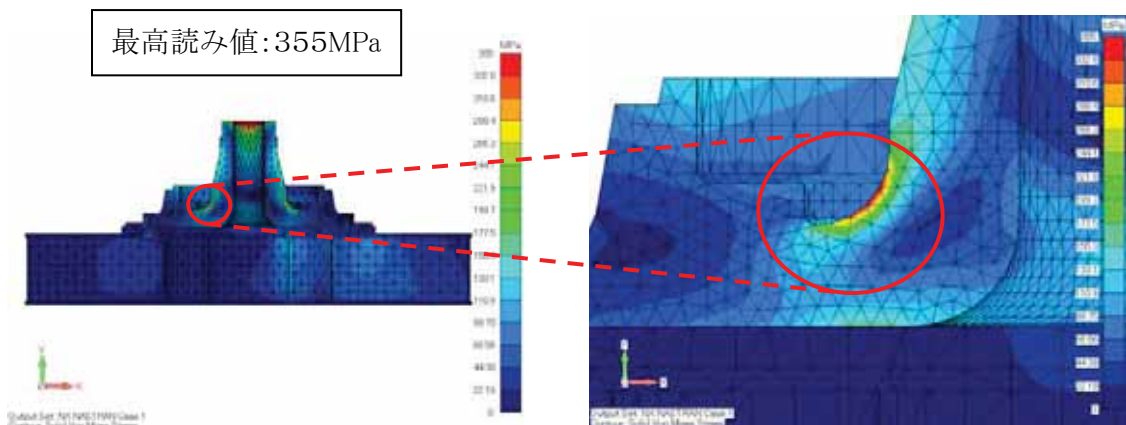


図2-1.解析図(全体)

図2-2.解析図(詳細)

### 4. 応力集中係数の算出

$$\begin{aligned}
 \text{応力集中係数} &= \frac{\text{FEM解析の読み値(最高)}}{\text{規格に基づいて算出した曲げ応力}} \\
 &= \frac{355 \text{ [MPa]}}{161.9 \text{ [MPa]}} \\
 &= \underline{\underline{2.2\text{倍}}}
 \end{aligned}$$

## 5. 集中応力計算結果

FEM応力解析により求めた応力集中係数を用いて集中応力を算出した結果を表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る。

表1 集中応力算出結果

計算区分	荷重*半径	荷重の組合せ	生じる 曲げ応力 $\sigma$ [MPa]	応力集中 係数 [倍]	生じる 集中応力 $\sigma'$ [MPa]	許容曲げ 応力*1 $\sigma_{bac}$ [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	2.2	421	443
	0t×30m	垂直静荷重(通常待機状態)	189.4		417	
	0t×13m	垂直静荷重	161.9		357	
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	192.5		424	510
	0t×13m	垂直静荷重+風荷重	165		363	
許容応力割増:30% S=1.30	0t×30m	垂直静荷重+休止風荷重	149.3		329	576
	0t×13m	垂直静荷重+休止風荷重	199.1		439	
	150t×30m	垂直動荷重+垂直静荷重+地震荷重 I	181.3		399	
	0t×13m	垂直静荷重+地震荷重 I	184.6		407	
	150t×30m	垂直動荷重+垂直静荷重+地震荷重 II	226.1		498	
	0t×13m	垂直静荷重+地震荷重 II	232		511	

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

ただし、 $\sigma_a = \sigma_y / 1.5 = 510$  [MPa]

$\sigma_y = 765$  [MPa] … 設計要求値