



JAEA-Technology

2007-021



JP0750190

JAEA-  
Technology  
K30101

# GTHTR300 磁気軸受支持ターボマシンの振動解析 I

Vibrational Analysis of Magnetic Bearing Support Turbo Machine  
for GTHTR300 Part I

黒河内 直浩 高田 昌二 稲垣 嘉之

Naohiro KUROKOCHI, Shoji TAKADA and Yoshiyuki INAGAKI

原子力基礎工学研究部門  
ガス炉 IS プロセス接続技術開発グループ

HTGR-IS Coupling Technology Group  
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

GTHTR300 磁気軸受支持ターボマシンの振動解析 I

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門

核熱応用工学ユニット

黒河内 直浩※、 高田 昌二、 稲垣 嘉之

(2007年1月25日受理)

本報では、GTHTR300 用ガスタービン発電機を支持する磁気軸受の制御系の設計で使用する回転軸の近似モデル構築に必要な基礎データを取得するため、3次元有限要素解析により、GTHTR300 発電機回転軸の振動特性を模擬した 1/3 スケールモデル磁気軸受開発試験装置による試験データを基に、回転軸の固有振動数の軸受剛性依存性、軸方向振幅分布、高周波固有振動数を予測する解析モデルの検証を行い、その妥当性を明らかにした。

この結果を基に GTHTR300 用ガスタービン発電機回転軸について、固有振動数および軸方向の振動特性を予測できた。

本数値解析結果は、磁気軸受の制御系の設計に必要不可欠である回転軸の近似モデルである「はりモデル」の構築に反映させる計画である。

---

本報告書は、電源開発推進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)が実施した平成17年度「核熱利用システム技術開発」の成果の一部を利用する。

原子力科学研究所(駐在) : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※技術開発協力員

Vibrational Analysis of Magnetic Bearing Support Turbo Machine for GTHTR300  
Part I

Naohiro KUROKUCHI※, Shoji TAKADA and Yoshiyuki INAGAKI

Nuclear Applied Heat Technology Division  
Nuclear Science and Engineering Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 25, 2007)

In order to acquire the fundamental data which is necessary for the approximation model construction of rotor which is used in the design of control system of the magnetic bearing which supports the gas turbine generator for GTHTR300, this paper shows 3 dimensional finite element analysis, the bearing rigid dependency of rotor eigen value was made clear, and axial direction amplitude distribution was made clear. In addition, it made also the higher-order bending vibration eigen value of each bearing rigidity clear. With the comparison and the examination of this numerical analysis result and the test result, it could verify propriety.

This numerical analysis model was applied to the gas turbine generator rotor for GTHTR300, rotor eigen value and axial direction amplitude distribution was estimated.

It is the plan that this numerical analysis result is made to reflect on the construction of the "beam model" that is the approximate model of rotor which is indispensable for the design of control system of the magnetic bearing.

Keywords: Gas Turbine High Temperature Reactor, Magnetic Bearing,  
3 Dimensional Finite Element Analysis, Eigen Value

---

Present study was used a part of study entrusted from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

※Cooperative Staff

## 目 次

1. はじめに	1
2. 解析方法	3
2. 1 1/3 スケール磁気軸受試験の概要	3
2. 2 解析条件	4
2. 3 解析モデルの検証	5
3. GTHTR300 発電機回転軸の固有振動解析結果	7
4. まとめ	8
謝辞	8
参考文献	9
付録	
1. ABAQUS-PATRANでの計算手順詳細	69

## Contents

1. Introduction	1
2. Analysis method	3
2. 1 Outline of 1/3 scale model test	3
2. 2 Analysis Condition	4
2. 3 Verification of analytic model	5
3. Eigenvalue analysis for GTHTR300 generator rotor	7
4. Conclusion	8
Acknowledgement	8
Reference	9
Appendix	
1. The calculation procedure details with ABAQUS-PATRAN	69

## Table List

- Table 2.1 Main specification of 1/3-scale model of magnetic bearing suspended rotor system  
Table 2.2 Physical properties value summary which is used for analysis  
Table 2.3 Comparison with the analytical value and the experimental result in trial process  
Table 2.4 Each critical speed summary for bearing rigidity  
  
Table 3.1 Summary: analytical result of natural frequency value(Actual Rotor)

## Figure List

- Fig. 1 Feature of the bending deformation for the slenderness ratio of the axis  
  
Fig. 2.1 Set-up of 1/3 rotor dynamics test for MB  
Fig. 2.2(a) 3D CAD Model 1/3 rotor test parts  
Fig. 2.2(b) Mesh Model 1/3 rotor test parts(TET4)  
Fig. 2.3 Simulation of magnetic bearing rigidity  
Fig. 2.4 Axial direction amplitude distribution of rotor (rigidity 1E5)  
Fig. 2.5 Axial direction amplitude distribution of rotor (rigidity 1E6)  
Fig. 2.6 Axial direction amplitude distribution of rotor (rigidity 1E7)  
Fig. 2.7 Axial direction amplitude distribution of rotor (rigidity 3.37E7)  
Fig. 2.8 Axial direction amplitude distribution of rotor (rigidity 1E8)  
Fig. 2.9 Axial direction amplitude distribution of rotor (rigidity 1E9)  
Fig. 2.10 Bearing rigid dependency of rotor natural frequency value  
  
Fig. 3.1 Model Geometry of actual rotor  
Fig. 3.2 Mesh Model of actual rotor(TET4)  
Fig. 3.3 Axial direction amplitude distribution of actual rotor (rigidity 1E6)  
Fig. 3.4 Axial direction amplitude distribution of actual rotor (rigidity 1E7)  
Fig. 3.5 Axial direction amplitude distribution of actual rotor (rigidity 1E8)  
Fig. 3.6 Axial direction amplitude distribution of actual rotor (rigidity 1E9)  
Fig. 3.7 Axial direction amplitude distribution of actual rotor (rigidity 1E10.)  
Fig. 3.8 Bearing rigid dependency of rotor natural frequency value(actural rotor)

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、高い安全性を保ちつつ、かつ経済性にも優れた高温ガス炉タービン発電システム（GTHTR300）の設計研究を実施した<sup>1)</sup>。GTHTR300 は熱出力 600MW、原子炉出口温度 850°C のピンインブロック型原子炉、横置型ガスタービン、熱交換器容器と動力変換容器の分離等の日本独自の設計を採用し、発電効率 45.8%<sup>2)</sup>により発電コスト 4 円/kWh を達成できる<sup>3)</sup>。

GTHTR300 は直接サイクルの高温ガス炉ガスタービン発電システムであり、タービン圧縮機や発電機の回転軸に水や油などの液体潤滑材を用いる通常の軸受を使用すると、潤滑剤の 1 次系への進入により、炉心及び炉内構造物の材料である黒鉛が腐食する可能性がある。このため、液体潤滑剤を使用しない磁気軸受の開発が必要である。

一方、GTHTR300 の設計では発電機とターボ圧縮機は、それぞれの回転軸を 2 台のラジアル磁気軸受により支持し、両回転軸をフレキシブルカップリングにより接続することで单軸としている。両回転軸の質量はそれぞれ 52 t、67 t である。定格回転数 (3600rpm) 以下に、発電機回転軸は 2 次曲げモード危険回転数を、ターボ圧縮機回転軸は 1 次曲げモード危険回転数を有する。また、弾性回転軸フレキシブルカップリングにより両回転軸を接続することで、両回転軸間の振動の干渉を抑制している。

既存の磁気軸受支持回転軸の中で質量が最大のものは、東京電力の山崎水力発電所で使用されている水車用タービン回転軸で 35 t である<sup>4)</sup>。この回転軸は定格回転数が 600rpm と低く、曲げモード危険回転数を超えない剛性回転軸である。米国・ロシアの GTMHR でもタービン圧縮機や発電機を磁気軸受支持としているが、磁気軸受設計及びロータライナミックスの解析については詳細な報告がなされていない<sup>5)</sup>。

Fig. 1<sup>6)~15)</sup>は軸の細長比(回転軸断面寸法 D の軸受間距離 L に対する比)と曲げモード危険回転数の次数の関係を示したもので、細長比が小さい領域では曲げ変形が支配的である。一方、GTHTR300 に使用する発電機回転軸は、細長比が約 0.1 と大きく、回転軸の振動に曲げ変形のほかに、せん断変形、ジャイロモーメント、回転慣性が影響する領域にあり、これまでに開発されていない領域にある。

磁気軸受の制御装置設計では、演算時間を所定の時間内にするために、制御装置の状態方程式を構成する制御行列の次数を低くする必要がある。そのため、制御対象である回転軸の振動方程式は、回転軸の振動特性を支配する物理現象を抽出することで、節点数を 100 点程度と少なくできる「はりモデル」により有限要素法に基づき定式化する。有限要素法による 3 次元構造数値解析モデルは、回転軸の振動特性を詳細に解析することが可能であるが、節点数が 10,000 点程度となるため制御行列の次数が非現実的な大きさになるので使用できない。

本検討では「はりモデル」の構築に先立ち、汎用有限要素法解析コード ABAQUS を使用して、3 次元数値解析により、「はりモデル」の構築に必要となる GTHTR300 用発電機回

軸の振動特性を明らかにすることを目的とした。

磁気軸受の制御装置の設計では、制御対象となる回軸の高次の高周波固有振動を制御して、高次固有振動が通常回転時に発振するスピルオーバ不安定の発生を防止する必要がある。そのため、回軸の振動特性として、制御装置の周波数応答領域である1kHz程度まで、回軸の固有振動数と各固有振動数における軸方向振動振幅分布を明らかにする。

数値解析では、はじめに、GTHTR300 発電機回軸の振動特性を模擬した 1/3 スケールモデル磁気軸受開発試験装置<sup>16)</sup>を基に解析モデルを構築し、数値解析により得られた固有振動数と、試験結果とを比較することで、解析モデルの検証を行った。

その後、GTHTR300 用発電機回軸に本数値解析モデルを適用し、回軸の固有振動数の軸受剛性依存性を予測するとともに、軸方向振動振幅分布を予測した。また、軸受剛性毎の高次の曲げ振動固有值も予測した。

## 2. 解析方法

解析対象を、1/3スケールモデル磁気軸受開発試験装置の発電機回転軸とした。そして、本数値解析結果を、別途実施した回転数 1800rpmまでの試験結果と固有振動数を比較することにより解析モデルの検証を行った。解析項目は、回転軸の固有振動数の軸受剛性依存性および振動振幅の軸方向分布である。その後、GTHTR300 実機発電機回転軸の固有振動を予測した。

本検討では、以下のコードを使用した。

- ・ 固有振動解析：汎用有限要素数値解析コード ABAQUS ver 6.5-1<sup>17)</sup>
- ・ メッシュ生成およびポスト処理コード：MCS. Patran 2005 r 2
- ・ 作図用 CAD：PRO/E

### 2. 1 1/3スケール磁気軸受試験の概要

日本原子力研究開発機構では、GTHTR300 実機の振動特性を模擬した1/3スケールモデル磁気軸受開発試験装置を製作して磁気軸受性能確認試験および軸系振動制御性を検証する試験を計画した。

軸系振動特性及び磁気軸受性能の確認並びに軸系設計技術及び振動制御技術の確立を目的とした振動特性試験を行うために、平成13年度から平成16年度まで、1/3スケールモデル磁気軸受開発試験装置の設計、並びに、磁気軸受開発試験装置の発電機回転軸側の試験装置製作を実施してきた。また、磁気軸受制御系に関して、ロバスト制御系を接続するための検討を実施した。

平成17年度には、1/3スケールモデル磁気軸受開発試験装置の最終組み立てを実施するとともに、磁気軸受の支持特性、制御特性を確認する回転試験を実施し、基本性能の確認を行った。

試験装置の主要諸元をTable 2.1に、概略図をFig. 2.1に示す。定格回転数は3600rpmで実機と同等とし、軸受直径、長さ、ならびに軸受間距離を実機の1/3とした。発電機回転軸の質量は、スケールを実機の1/3とすると1/27となるが、集中質量を付加することにより、既存の磁気軸受技術で保持可能な重量として、実機の約1/10となるようにした。

以下は平成17年度に実施した磁気軸受試験の結果のうち、本解析モデル検証の為に必要な固有振動数関連の結果を纏めたものである。

#### 2. 1. 1 試験にて観測された固有振動数

- ・ ハンマリング試験

1650rpm(27.5Hz：回転試験結果より曲げ1次と判断)

## 2. 1. 2 磁気軸受開発試験装置 最大軸受剛性の算出

実験装置の軸受力  $F$  [N] は、

$$F = B^2 \times S / (2\mu_0)$$

$B$  : 磁束密度  $1.0 \sim 1.1$

$S$  : 軸受負荷面積  $\approx 2^{0.5} \times D \times L / 3$

$$= 2^{0.5} \times 0.309 \times 0.4 / 3 = 0.0583 [\text{m}^2]$$

$\mu_0$  : 透磁率(物理定数)  $4\pi 10^{-7}$

$$F = 1.1^2 \times 0.0583 / (2 \times 4 \times 3.14 \times 10^{-7}) = 2.81 \times 10^4 [\text{N}]$$

である。

この軸受力を基に、下記式より、磁気軸受の剛性  $K_{\text{neg}}$  を算出する。

$$K_{\text{neg}} = (1 + (B_{\text{max}}^2 / B_{\text{static}}^2)) \times F / esp$$

$esp$  : 軸受隙間  $0.002 \text{mm}$

$B_{\text{max}}$  : 最大磁束密度  $1.3 [\text{T}]$

$B_{\text{static}}$  : 静的な磁束密度  $1.1 [\text{T}]$

$$K_{\text{neg}} = (1 + (1.3^2 / 1.1^2)) \times 2.81 \times 10^4 / 0.002 = 3.37 \times 10^7 [\text{N/m}]$$

## 2. 2 解析条件

### (1) 解析モデル

1/3 スケールモデル磁気軸受開発試験装置の発電機模擬回転軸の3次元形状を

Fig. 2.1 に示す。

### (2) 材料物性値

発電機模擬回転軸の材料物性値を Table 2.2 に示す。

### (3) メッシュ生成

MSC.Patran の自動メッシュジェネレータにより、4面体(テトラ)要素(TET4(C3D4))を使用してメッシュ分割した。格子点数は約 3,000 である。解析に使用したメッシュ図を、Fig. 2.2 に示す。

### (4) 境界条件

#### ・発電機回転軸

発電機回転軸のカップリング接続端面の  $z$  方向(軸方向)を固定した。また、回転軸全体に重力加速度を印加した。

#### ・軸受剛性

磁気軸受の軸受剛性は、磁気軸受表面に線形バネ要素を  $x$  および  $y$  方向に複数個設定することで模擬した。Fig. 2.3 に線形バネ要素を設定した様子を示す。

各方向( $x$ 、 $y$ )の個々のバネ定数は、その総和が磁気軸受剛性の設定値となるように下式に基づき設定した。

各方向( $x$ 、 $y$ )のバネ定数 = 磁気軸受剛性 ÷ 線形バネ要素の個数

各軸受での線形バネ要素の数は、周方向4、軸方向2の計8点とした。線形バネ要素数とバネ定数の設定方法に関しては、事前にその妥当性を検討した。検討結果については後述する。

## 2. 3 解析モデルの検証

### 2. 3. 1 有限要素モデルの事前検証

最終的に上述の通り、分割・要素モデルはTET4メッシュ(C3D4)、軸受剛性の模擬は円周方向(x y方向)に4分割、長さ方向(z方向)2分割にて解析を行っているが、解析を実施する前段階として、各要素分割法、バネ要素の模擬方法の試行を行った。真値として比較対象としたのはハンマリング試験結果である。試行パターンは以下の通りである。

Patum1 : TET4mesh(C3D4) + 8 springs(4radial×2axial)  
 Patum2 : TET10mesh(C3D10) + 16springs(8radial×2axial)  
 Patum3 : TET4mesh(C3D4) + 16springs(8radial×2axial)  
 Patum4 : TET4mesh(C3D4) + 12springs(4radial×3axial)  
 Patum5 : TET4mesh(C3D4) + 20springs(4radial×5axial)

用いるメッシュ分割の効果の確認をPaturn2と3の比較により、磁気軸受の周方向の分割の効果の確認をPaturn1と3の比較により、磁気軸受の軸方向の分割の効果の確認をPaturn1、4及び5の比較により実施した。

試行結果をTable 2.3に示す。これより、傾向としてはメッシュの格子点数及び磁気軸受の分割数が多くなるほど固有振動数は小さくなっているが、結果的にはどの分割・要素モデル、及びバネ定数設定においても大差なく、計算容量の観点から有利な現状の分割方法Paturn1の採用に至った。

### 2. 3. 2 解析モデルの検証結果

磁気軸受の軸受剛性をパラメータとして固有振動解析を実施した。Table 2.4に固有振動数の数値解析結果を示す。Fig. 2.4~Fig. 2.9に、剛体モードの1次(剛体1次)、2次(剛体2次)、弾性モードの3次(曲げ1次)、4次(曲げ2次)固有振動に関する、回転軸振動振幅の軸方向分布を示す。それぞれの図に、回転軸形状の変形図と、回転軸中心線の変形図を示す。参照として、変形前の軸中心及び磁気軸受の両端位置、すなわち、変位センサー設置位置を記載した。なお、変位は最大変位が1となるように正規化した相対値である。

磁気軸受による振動制御を可能とするためには、回転軸の振動の節が変位センサーの設置位置と磁気軸受設置位置と一致することを避ける必要があることが知られている。各図より、軸受両端において有意な変位が現れることが確認できた。これより、固有振動数に相当する回転数において、軸受両端に設置した変位センサーにより振動

変位を観測できることを明らかにした。

Fig. 2.10 に発電機回転軸固有振動値の軸受剛性依存性に示す。横軸を磁気軸受剛性、縦軸を固有振動数を示す。剛体モードでは、軸受剛性増加とともに固有振動数が増加した。弾性モードでは、低剛性域では一定、高剛性域では増加する傾向を示した。解析モデルの検証のため、1/3 スケールモデル磁気軸受開発試験装置を使用して、回転軸を静止させた状態で実施したハンマリング試験により得られた固有振動数を Fig. 2.10 に示す。磁気軸受の軸受剛性が約  $1 \times 10^7$  の時の 3 次(曲げ 1 次)固有振動数の数値解析結果は 25Hz であり、試験結果 27.5Hz とよく一致しており、数値解析は妥当であり、本解析モデルは妥当であると言える。

### 3. GTHTR300 発電機回転軸の固有振動解析結果

以上の数値解析手法を用いて、実機設計条件を基にモデルを構築し、2.2項の解析条件にて計算を実施した。実機発電機回転軸の3次元形状をFig. 3.1に示す。また、解析に使用したメッシュ図を、Fig. 3.2に示す。

まず、磁気軸受の軸受剛性をパラメータとして固有振動解析を実施した。Table 3.1に固有振動数の数値解析結果を示す。Fig. 3.3～Fig. 3.7に、剛体モードの1次(剛体1次)、2次(剛体2次)、弾性モードの3次(曲げ1次)、4次(曲げ2次)固有振動に関する、回転軸振動振幅の軸方向分布を示す。それぞれの図に、回転軸形状の変形図と、回転軸中心線の変形図を示す。参照として、変形前の軸中心及び磁気軸受の両端位置、すなわち、変位センサー設置位置を記載する。

各図より、2項計算結果と同様に、軸受両端において有意な変位が現れることが確認できた。これより、固有振動数に相当する回転数において、軸受両端に設置した変位センサーにより振動変位を観測するとともに、磁気軸受により回転軸に支持荷重を伝達できることを予測できた。

次に、Fig. 3.8にGTHTR300 発電機回転軸の固有振動数の軸受剛性依存性を示す。本図よりGTHTR300 発電機回転軸の設計での軸受剛性は約 $1 \times 10^9$ [N/m]以下であることから、定格回転数(3600rpm=60Hz)近傍において、2次曲げモードが現れることが予測される。

また、Table 3.1より制御装置の周波数応答領域である1kHz以下には、14個の固有振動数があることを予測できた。

今後、本解析結果を元に、制御装置設計に必要不可欠である、高次高周波固有振動を適切に評価できるはりモデルを構築するとともに、実機発電機回転軸の振動制御を可能とする磁気軸受制御装置の設計に役立てる。

#### 4.まとめ

GTHTR300 用ガスタービン発電機を支持する磁気軸受の制御系の設計で使用する回転軸の近似モデル構築に必要な基礎データを取得するため、3次元有限要素解析により、はじめに、GTHTR300 発電機回転軸の振動特性を模擬した 1/3 スケールモデル磁気軸受開発試験装置を基に解析モデルを構築し、解析により回転軸の固有振動数の軸受剛性依存性、軸方向振幅分布を明らかにした。この固有振動数の数値解析結果と、試験装置を使用したハンマリング試験結果と比較することで解析モデルの妥当性を検証した。磁気軸受の軸受剛性を約  $1 \times 10^7$  とした3次(曲げ1次)の数値解析結果は 25Hz であり、試験結果 27.5Hz とよく一致した。以上の結果から、解析モデルの妥当性を明らかにした。

本数値解析モデルを GTHTR300 用ガスタービン発電機回転軸に適用し、固有振動数および軸方向の振動特性を予測した。

本数値解析結果は、磁気軸受の制御系の設計に必要不可欠である回転軸の近似モデルである「はりモデル」の構築に反映させる計画である。

#### 謝辞

日本原子力研究開発機構 滝塚上級研究主席には、本解析を進めるに当たり有益な助言を頂きました。

ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1)國富一彦, 片西昌司, 高田昌二 他: 日本原子力学会和文論文集, 352(2002).
- (2)高田昌二、滝塚和貴、國富一彦 他: 日本原子力学会和文論文集, 2[4], 341(2003).
- (3)武井正信, 小杉山真一, 毛利智聰: 片西昌司, 國富一彦, 日本原子力学会和文論文集, 5[2], 109(2006).
- (4)S2M: Actidyne News, 8, 3(1998).
- (5)W. A. Simon: IAEA TCM on High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development, Petten, the Netherlands, (Nov. 1997).
- (6)鈴木, 道村, 田村: 日本機械学会論文集C編, 57-537, 1535(1990).
- (7)石田: 日本機械学会論文集C編, 57-537, 1535(1990).
- (8)J. R. Salm: ASME, J. Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 110, 493(1988).
- (9)片山, 川田, 森井, 時安, 池田, 坂井: 三菱重工技報, 25-3, 274(1988).
- (10)島根, 永井, 岡田: 日本機械学会論文集C編, 56-528, 2079(1990).
- (11)高畑, 久保, トーリ, 野波: NEDO ComFESS(2004).
- (12)野波: 日本機械学会論文集C編, 58-553, 2650(1992).
- (13)野波: 日本機械学会論文集C編, 56-528, 2065(1990).
- (14)田, 野波: 日本機械学会論文集C編, 60-580, 4142(1994).
- (15)野波, 山中, 富永: 日本機械学会論文集C編, 54-507, 266(1987).
- (16)高田 他: 日本原子力学会和文論文誌, 2[4], 525(2003).
- (17)Hibbit et al: "ABAQUS/Standard user's manual" Hibbit, Karlsson&Sorensen, INC(1999)

**Table 2.1 Main specification of 1/3-scale model of magnetic bearing suspended rotor system<sup>16)</sup>**

	Turbo-compressor rotor	Generator rotor
Coupling type	Flexible type	Flexible type
Orientation	Horizontal	Horizontal
Rotor mass (kg)	4,800	5,500
Total length (mm)	4,085	4,280
Bearing span length (mm)	3,025	2,730
Inner diameter of radial bearing (mm)	248	300
Length of radial bearing (mm)	250 274 (Generator end) (Turbo-compressor side)	237
Rotor balance quality	ISO 1940 balance quality grade G2.5	
Response amplitude	$\leq 75 \mu\text{m}$ peak to peak at rated speed $\leq 125 \mu\text{m}$ peak to peak at critical speed	
Speed range	Rated speed 3,600 rpm 0–110% of rated speed condition in normal operation	

(出典 16) : 高田 他: 日本原子力学会和文論文誌, 2[4],525(2003).)

**Table 2.2 Physical properties value summary which is used for analysis**

	Rotor (3.5Ni 1.75CrMoV Forging steel)
Young's modulus[N/m <sup>2</sup> ]	2.08E+11
Poisson's ratio[-]	0.33
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	7750

Table2.3 Comparison with the analytical value and the experimental result in trial process

Mode	Ex.Result	Patum1	Patum2	Patum3	Patum4	Patum5
Rigid1st	—	9.4	9.1	7.0	8.0	6.4
Rigid2nd	—	13.7	13.1	10.3	11.6	9.5
Bending1st	27.5	27.2	25.3	25.4	26.0	25.1

MB Rigidity :  $2 \times 10^7$  [N/m]

(parameter)

- Patum1 : TET4mesh(C3D4) + 8 springs(4radial×2axial)
- Patum2 : TET10mesh(C3D10) + 16springs(8radial×2axial)
- Patum3 : TET4mesh(C3D4) + 16springs(8radial×2axial)
- Patum4 : TET4mesh(C3D4) + 12springs(4radial×3axial)
- Patum5 : TET4mesh(C3D4) + 20springs(4radial×5axial)

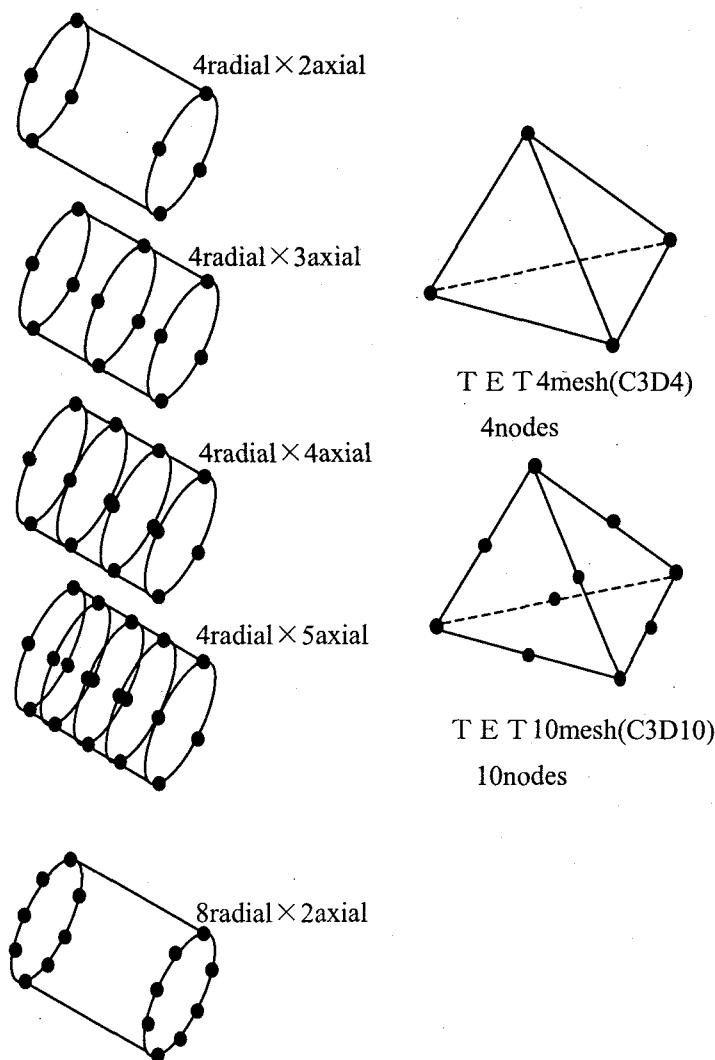


Table 2.4 Each critical speed summary for bearing rigidity

Bearing Rigidity [N/m]	anal. 1st Bending [Hz]	anal. 2nd Bending [Hz]	anal. 1st Rigid [Hz]	anal. 2nd Rigid [Hz]	Hammering test [Hz]
1.00E+05	23.70	58.01	0.74	4.16	
1.00E+06	23.84	58.10	2.34	5.09	
1.00E+07	25.39	59.02	7.04	10.34	
3.37E+07	29.80	61.51	11.35	16.79	
1.00E+08	40.58	68.77	14.88	24.62	
1.00E+09	77.84	126.73	22.72	36.65	
1.00E+05					27.50
1.00E+09					27.50

Table 3.1 (1/5) Summary: analytical result of natural frequency value (Actual Rotor 1E6[N/m])

EIGENVALUE OUTPUT					
MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY (RAD/TIME)	FREQUENCY (CYCLES/TIME)	GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING
1	28.629	5.3506	0.85157	69726.	Rigid 1st
2	798.41	28.256	4.4971	11966.	Rigid 2nd
3	27946.	167.17	26.606	3401.0	Bending 1st
4	1.12896E+05	336.00	53.476	4136.4	Bending 2nd
5	2.65980E+05	515.73	82.081	5319.5	Bending 3rd
6	2.71620E+05	521.17	82.947	37510.	0.0000 (like a z axis spring)
7	1.05732E+06	1028.3	163.65	11775.	Bending 4th
8	1.79838E+06	1341.0	213.43	11901.	0.0000 Bending 5th
9	2.39590E+06	1547.9	246.35	7579.0	0.0000 (like a z axis spring)
10	3.41952E+06	1849.2	294.31	4045.8	Bending 6th
11	5.02135E+06	2240.8	356.64	21665.	0.0000 Bending 7th
12	6.10445E+06	2470.7	393.23	6573.5	0.0000 (like a z axis spring)
13	8.13203E+06	2851.7	453.86	19419.	0.0000 (like a z axis spring)
14	9.13233E+06	3022.0	480.96	2282.7	0.0000 Bending 8th
15	1.35331E+07	3678.7	585.49	9457.8	0.0000 Bending 9th
16	1.76462E+07	4200.7	668.57	19950.	0.0000 (like a z axis spring)
17	1.91444E+07	4375.4	696.37	11373.	0.0000 Bending 10th
18	2.52553E+07	5025.5	799.83	9437.5	0.0000 Bending 11th
19	3.22283E+07	5677.0	903.52	1817.9	0.0000 Bending 12th
20	3.99152E+07	6317.8	1005.5	8053.3	0.0000 Bending 13th

Table 3.1 (2/5) Summary: analytical result of natural frequency value (Actual Rotor 1E7[N/m])

MODE NO	EIGENVALUE	(RAD/TIME)	FREQUENCY (CYCLES/TIME)	GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING	
					OUTPUT	INPUT
1	284.95	16.881	2.6866	68963.	0.0000	Rigid 1st
2	1242.9	35.255	5.6111	11669.	0.0000	Rigid 2nd
3	28120.	167.69	26.689	3407.5	0.0000	Bending 1st
4	1.13223E+05	336.49	53.554	4159.0	0.0000	Bending 2nd
5	2.66246E+05	515.99	82.122	5321.9	0.0000	Bending 3rd
6	2.71620E+05	521.17	82.947	37452.	0.0000	(like a z axis spring)
7	1.05772E+06	1028.5	163.68	11774.	0.0000	Bending 4th
8	1.79873E+06	1341.2	213.45	11899.	0.0000	Bending 5th
9	2.39590E+06	1547.9	246.35	7579.0	0.0000	(like a z axis spring)
10	3.41977E+06	1849.3	294.32	4047.0	0.0000	Bending 6th
11	5.02160E+06	2240.9	356.65	21667.	0.0000	Bending 7th
12	6.10445E+06	2470.7	393.23	6573.5	0.0000	(like a z axis spring)
13	8.13203E+06	2851.7	453.86	19419.	0.0000	(like a z axis spring)
14	9.13268E+06	3022.0	480.97	2283.0	0.0000	Bending 8th
15	1.35333E+07	3678.8	585.49	9458.1	0.0000	Bending 9th
16	1.76462E+07	4200.7	668.57	19950.	0.0000	(like a z axis spring)
17	1.91445E+07	4375.4	696.37	11374.	0.0000	Bending 10th
18	2.52554E+07	5025.5	799.83	9437.4	0.0000	Bending 11th
19	3.22286E+07	5677.0	903.53	1818.0	0.0000	Bending 12th
20	3.99153E+07	6317.9	1005.5	8053.1	0.0000	Bending 13th

Table 3.1 (3/5) Summary: analytical result of natural frequency value (Actual Rotor 1E8 [N/m])

MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY (RAD/TIME)	(CYCLES/TIME)	OUTPUT	
				GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING
1	2718.0	52.134	8.2974	63418.	0.0000 Rigid 1st
2	5532.3	74.380	11.838	8785.0	0.0000 Rigid 2nd
3	30025.	173.28	27.578	3527.3	0.0000 Bending 1st
4	1.16575E+05	341.43	54.340	4397.8	0.0000 Bending 2nd
5	2.68927E+05	518.58	82.535	5346.9	0.0000 Bending 3rd
6	2.71621E+05	521.17	82.947	36277.	0.0000 (like a z axis spring)
7	1.06176E+06	1030.4	164.00	11761.	0.0000 Bending 4th
8	1.80220E+06	1342.5	213.66	11887.	0.0000 Bending 5th
9	2.39591E+06	1547.9	246.35	7579.0	0.0000 (like a z axis spring)
10	3.42232E+06	1850.0	294.43	4059.4	0.0000 Bending 6th
11	5.02409E+06	2241.4	356.74	21679.	0.0000 Bending 7th
12	6.10445E+06	2470.7	393.23	6573.5	0.0000 (like a z axis spring)
13	8.13204E+06	2851.7	453.86	19419.	0.0000 (like a z axis spring)
14	9.13621E+06	3022.6	481.06	2285.8	0.0000 Bending 8th
15	1.35353E+07	3679.0	585.54	9461.3	0.0000 Bending 9th
16	1.76462E+07	4200.7	668.57	19950.	0.0000 (like a z axis spring)
17	1.91462E+07	4375.6	696.41	11376.	0.0000 Bending 10th
18	2.52569E+07	5025.6	799.85	9437.0	0.0000 Bending 11th
19	3.22314E+07	5677.3	903.57	1818.5	0.0000 Bending 12th
20	3.99163E+07	6317.9	1005.5	8050.5	0.0000 Bending 13th

Table 3.1 (4/5) Summary: analytical result of natural frequency value (Actual Rotor 1E9 [N/m])

E I G E N V A L U E   O U T P U T					
MODE NO	EIGENVALUE (RAD/TIME)	FREQUENCY (CYCLES/TIME)	GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING	
1	16641.	129.00	20.531	41418.	Rigid 1st
2	30383.	174.31	27.742	2216.0	Rigid 2nd
3	65908.	256.73	40.859	19669.	Bending 1st
4	1.57254E+05	396.55	63.113	8457.8	Bending 2nd (like a z axis spring)
5	2.71623E+05	521.17	82.947	38341.	Bending 3rd (like a z axis spring)
6	2.97649E+05	545.57	86.831	5510.2	Bending 4th
7	1.10160E+06	1049.6	167.04	11636.	Bending 5th
8	1.83985E+06	1355.3	215.70	11776.	Bending 6th
9	2.39594E+06	1547.9	246.35	7576.9	Bending 7th
10	3.44787E+06	1856.8	295.53	4186.7	Bending 8th
11	5.04920E+06	2247.0	357.63	21810.	Bending 9th
12	6.10447E+06	2470.7	393.23	6573.4	(like a z axis spring)
13	8.13208E+06	2851.7	453.86	19419.	Bending 10th
14	9.17118E+06	3028.4	481.98	234.1	Bending 11th
15	1.35561E+07	3681.9	585.99	9492.8	Bending 12th
16	1.76464E+07	4200.8	668.57	19955.	Bending 13th
17	1.91632E+07	4377.6	696.71	11395.	(like a z axis spring)
18	2.52714E+07	5027.1	800.08	9432.9	Bending 14th
19	3.22589E+07	5679.7	903.95	1823.3	Bending 15th
20	3.99265E+07	6318.7	1005.7	8024.4	Bending 16th

Table 3.1 (5/5) Summary: analytical result of natural frequency value (Actual Rotor 1E10[N/m])

MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY (RAD/TIME)	FREQUENCY (CYCLES/TIME)	GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING
1	42400.	205.91	32.772	4041.1	0.0000 Rigid 1st
2	60624.	246.22	39.187	2151.3	0.0000 Rigid 2nd
3	2. 71650E+05	521.20	82.952	38520.	0.0000 (like a z axis spring)
4	2. 89331E+05	537.89	85.609	24225.	0.0000 Bending 1st
5	6. 61098E+05	813.08	129.41	4140.7	0.0000 Bending 2nd
6	7. 30385E+05	854.63	136.02	6116.5	0.0000 Bending 3rd
7	1. 45525E+06	1206.3	191.99	11678.	0.0000 Bending 4th
8	2. 17451E+06	1474.6	234.69	12008.	0.0000 Bending 5th
9	2. 39621E+06	1548.0	246.37	7497.5	0.0000 (like a z axis spring)
10	3. 69896E+06	1923.3	306.10	5825.2	0.0000 Bending 6th
11	5. 31798E+06	2306.1	367.02	18715.	0.0000 Bending 7th
12	6. 10461E+06	2470.8	393.23	6573.1	0.0000 (like a z axis spring)
13	8. 13243E+06	2851.7	453.87	19421.	0.0000 (like a z axis spring)
14	9. 49749E+06	3081.8	490.48	2607.9	0.0000 Bending 8th
15	1. 37577E+07	3709.1	590.33	9814.7	0.0000 Bending 9th
16	1. 76475E+07	4200.9	668.59	19963.	0.0000 (like a z axis spring)
17	1. 93252E+07	4396.0	699.65	11586.	0.0000 Bending 10th
18	2. 54141E+07	5041.2	802.34	9409.3	0.0000 Bending 11th
19	3. 25182E+07	5702.5	907.58	1871.4	0.0000 Bending 12th
20	4. 00228E+07	6326.4	1006.9	7775.5	0.0000 Bending 13th

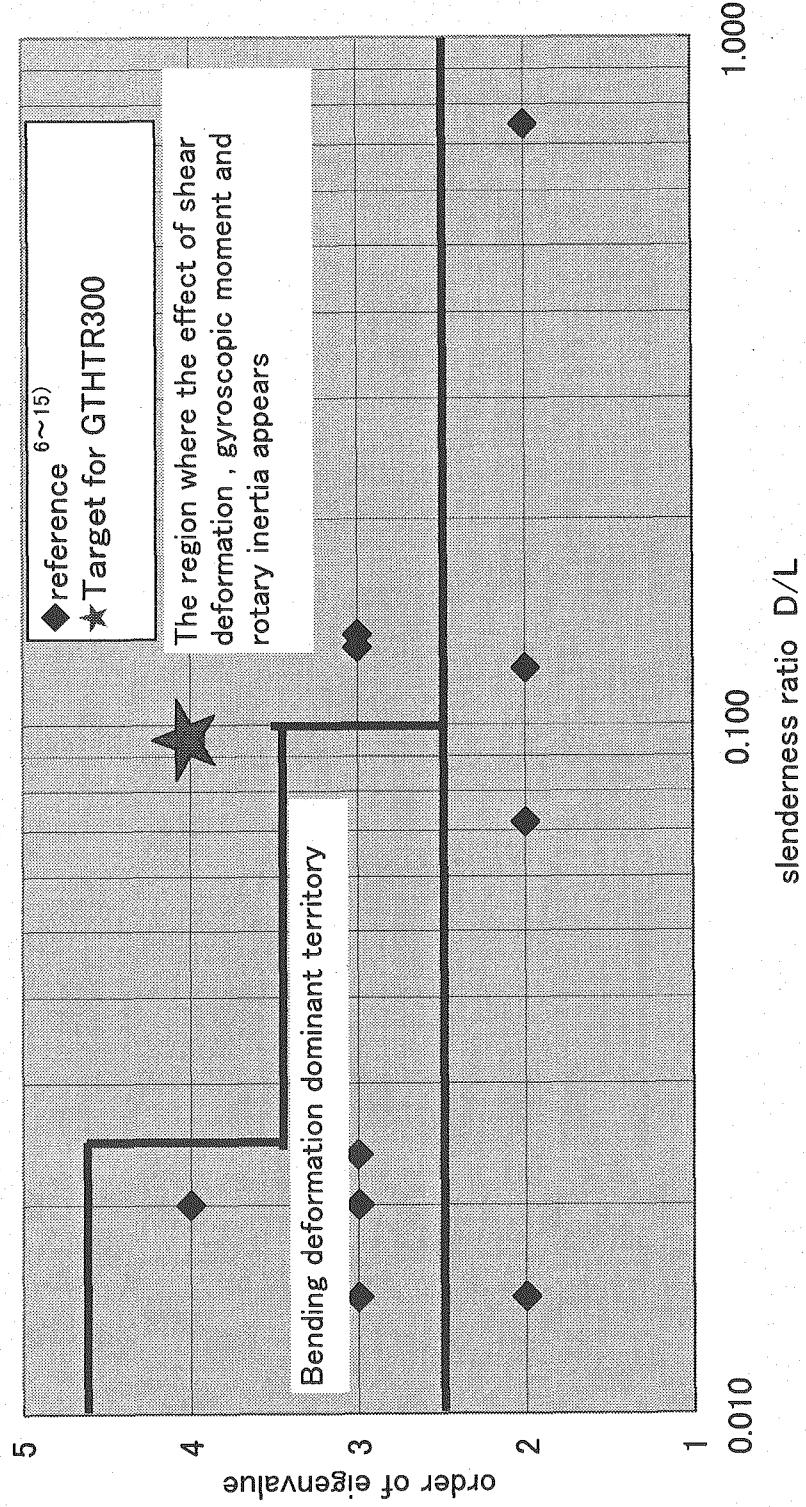


Fig. 1 Feature of the bending deformation for the slenderness ratio of the axis

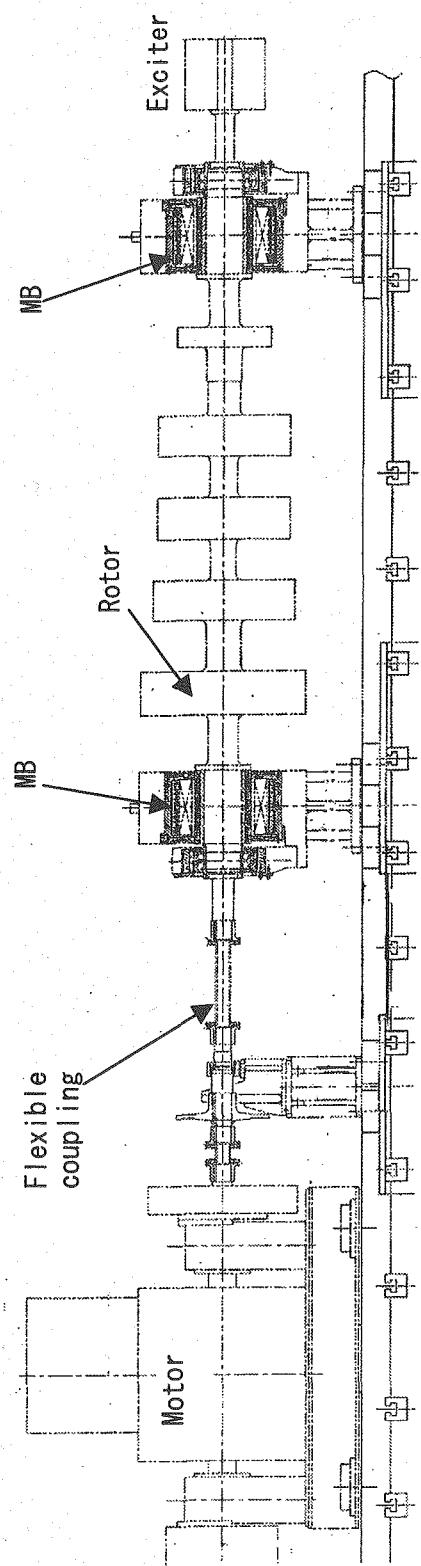


Fig. 2.1 Set-up of 1/3 rotor dynamics test for MB

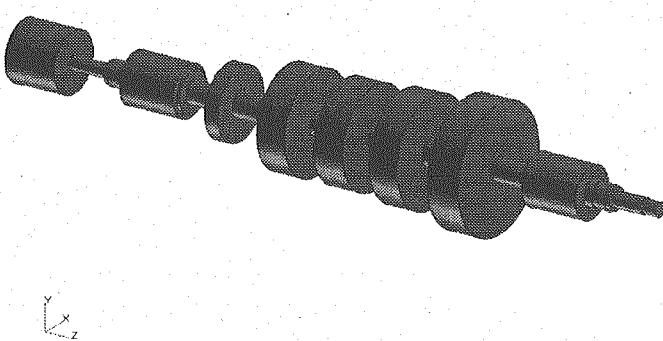


Fig. 2.2(a) 3D CAD Model of 1/3 rotor test parts

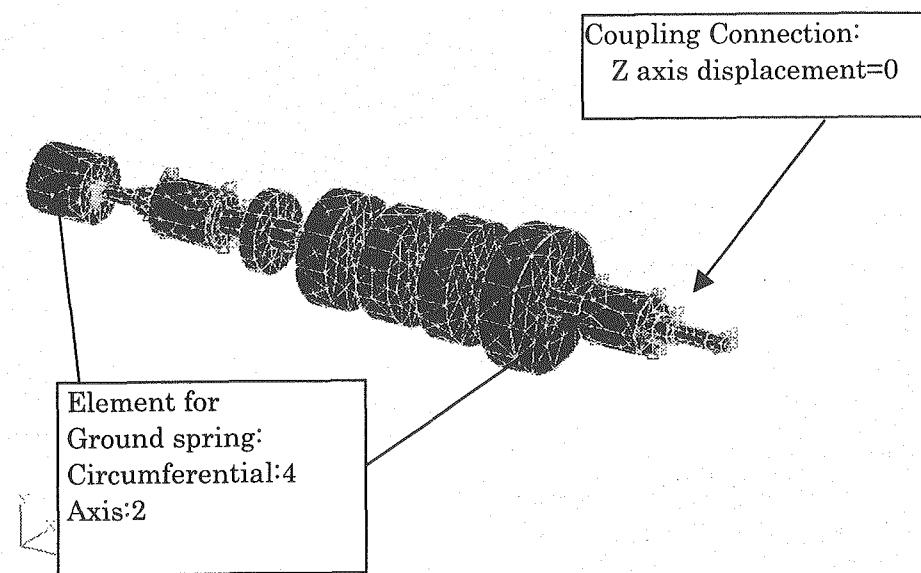


Fig. 2.2(b) Mesh Model of 1/3 rotor test parts(TET4)

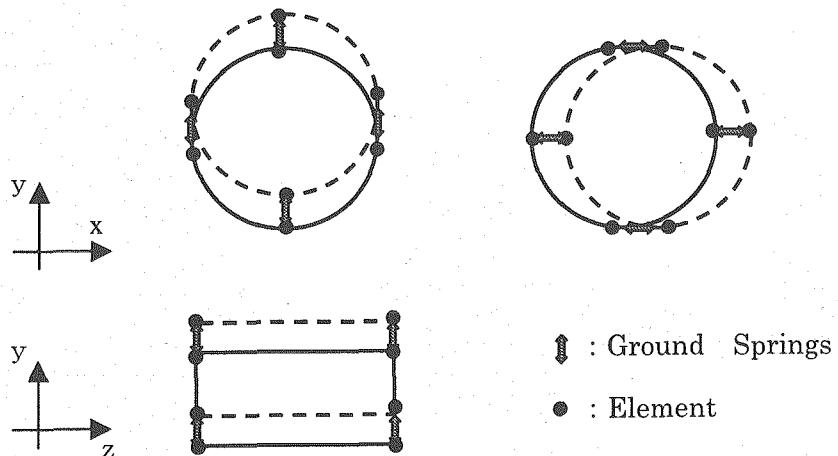
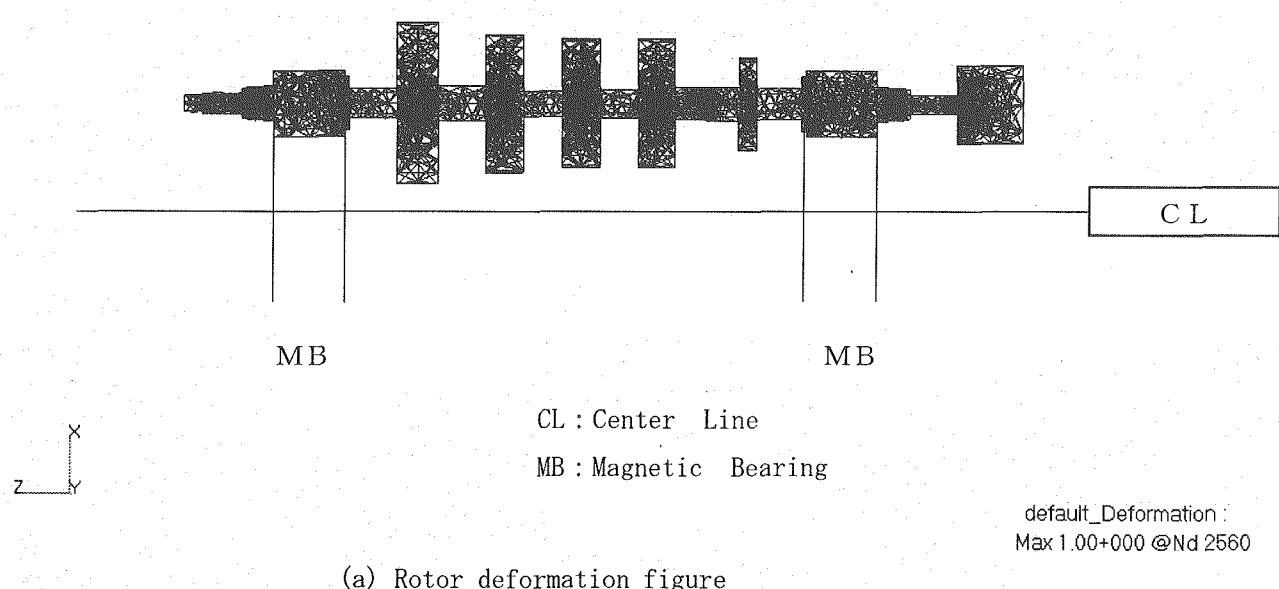


Fig. 2.3 Simulation of magnetic bearing rigidity

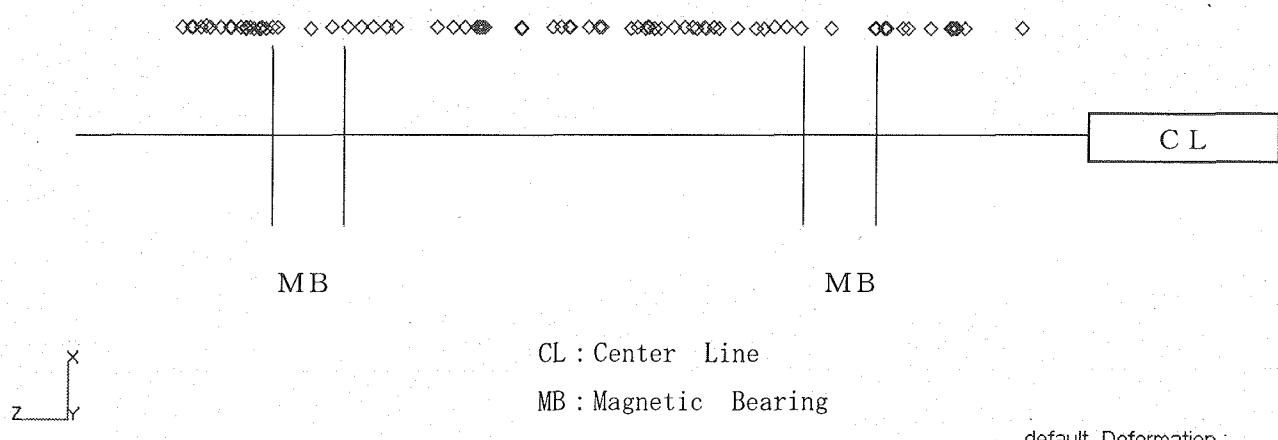
MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 14:14:35

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=0.74226Hz, Deformation, Displacements,



MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 14:16:59

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=0.74226Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

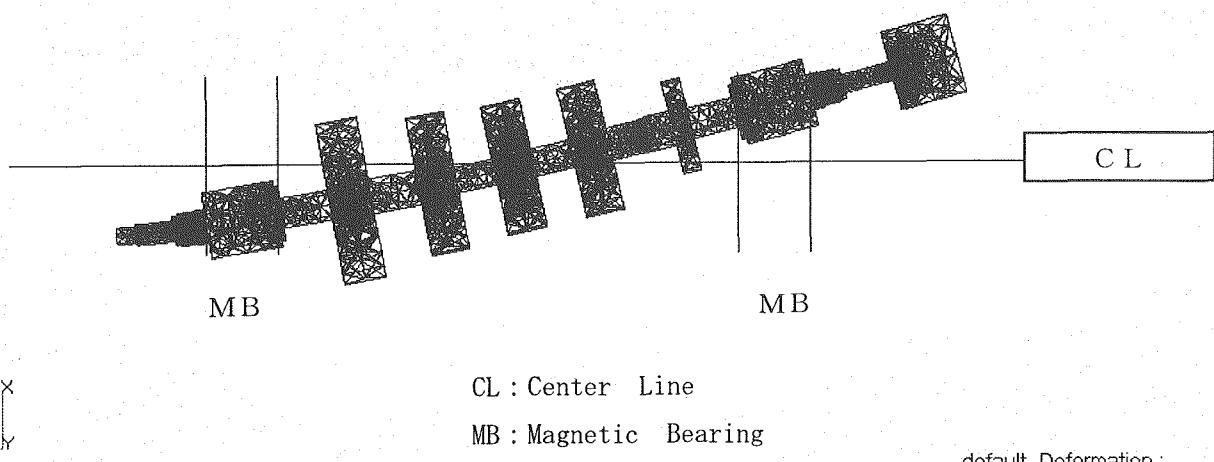


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.4(1/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E5 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 14:15:05

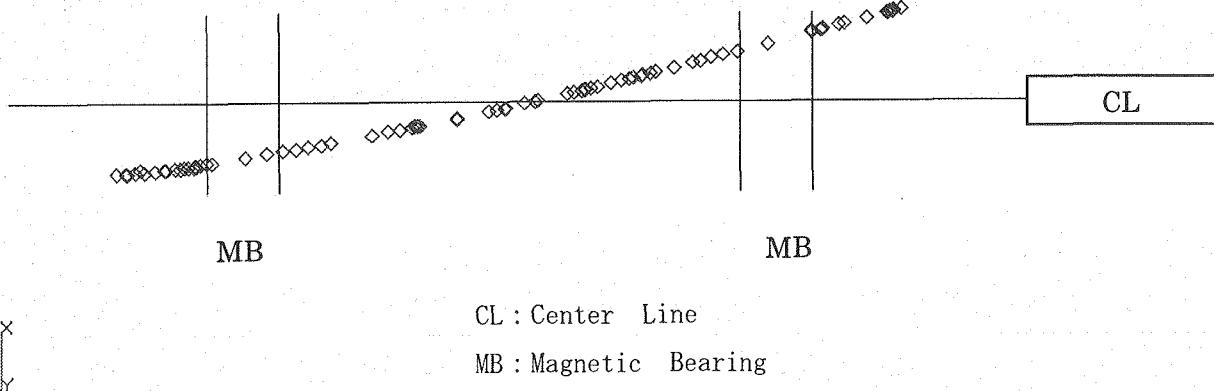
Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=4.1619Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 14:17:15

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=4.1619Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)

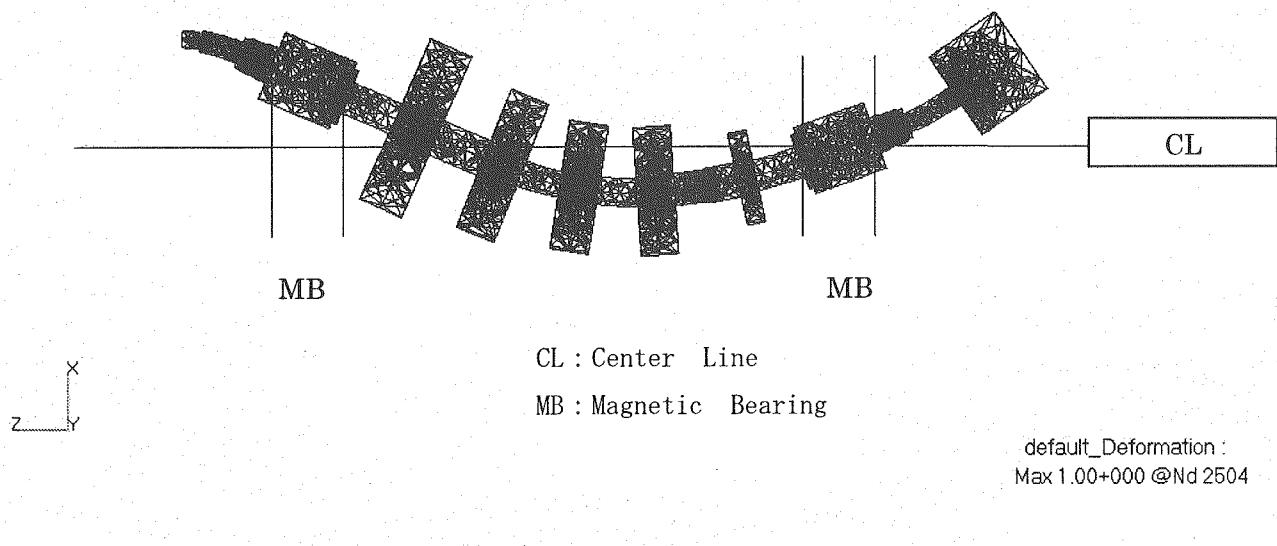


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.4(2/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E5 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 14:15:18

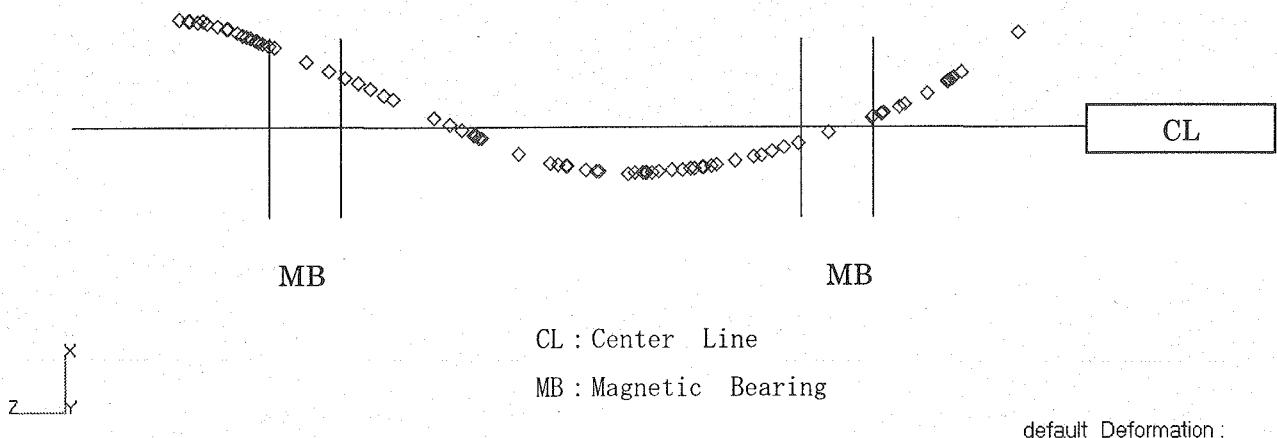
Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=23.698Hz, Deformation, Displacements.



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 14:17:26

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=23.698Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



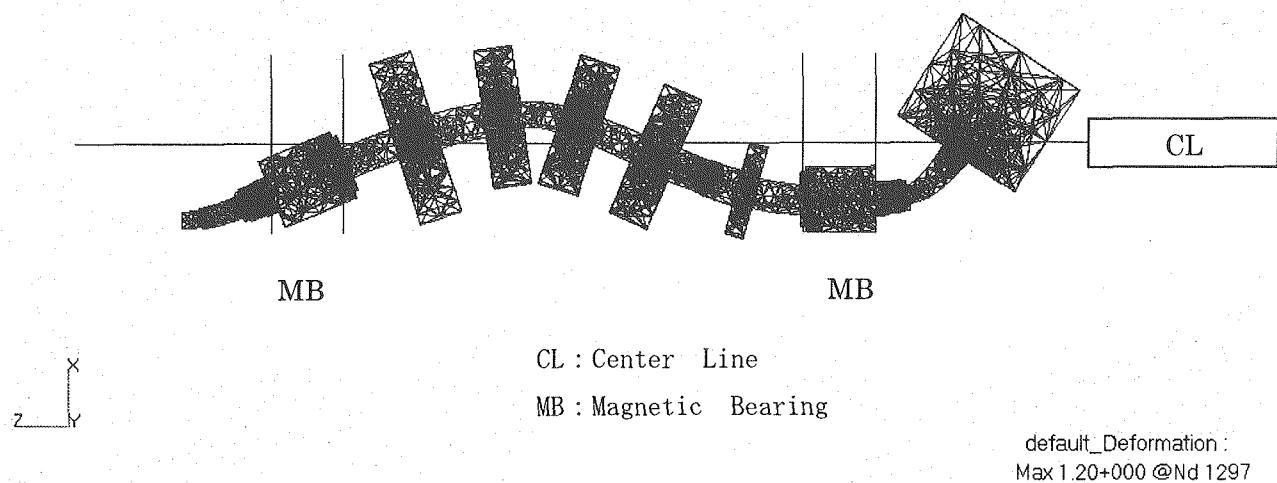
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.4(3/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 1E5 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 14:15:29

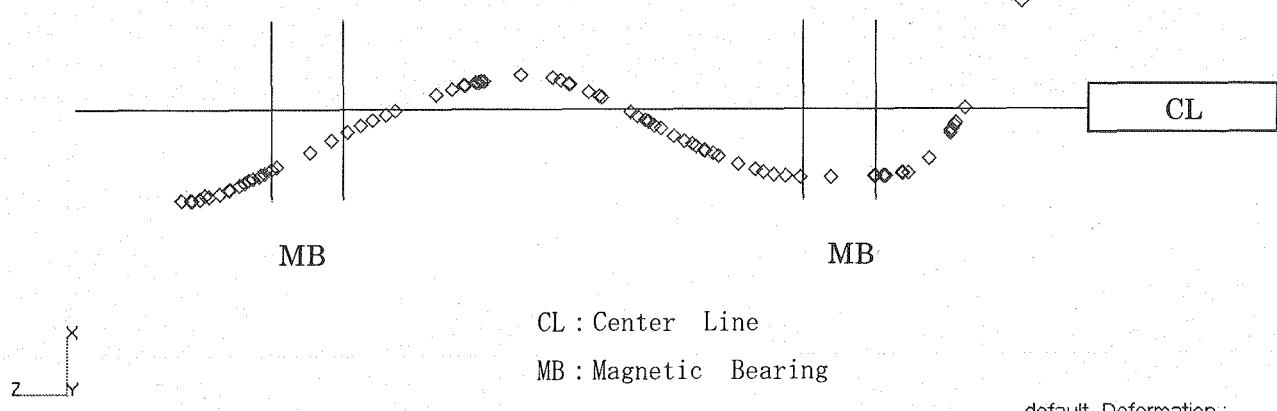
Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=58.013Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 14:17:42

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=58.013Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)



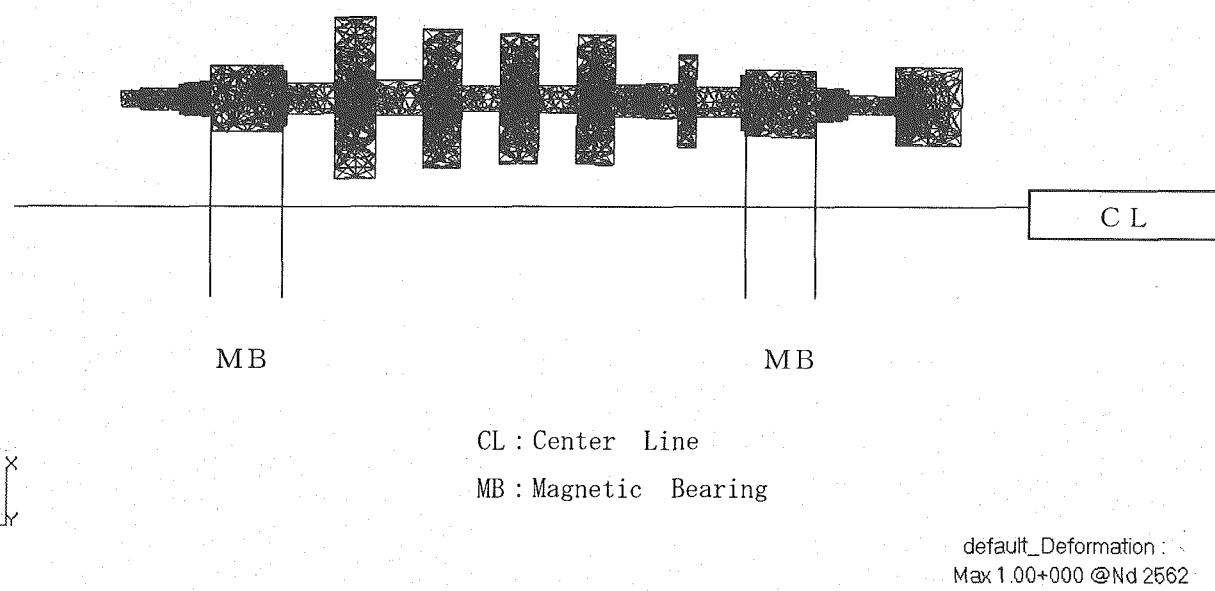
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.4(4/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 1E5 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:50:16

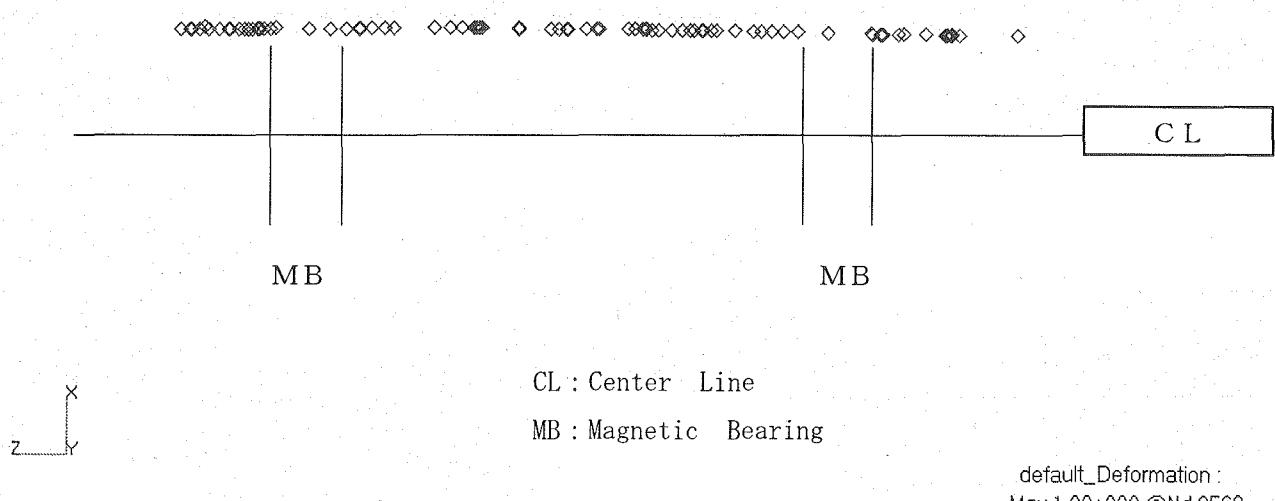
Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=2.3359Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:53:59

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=2.3359Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

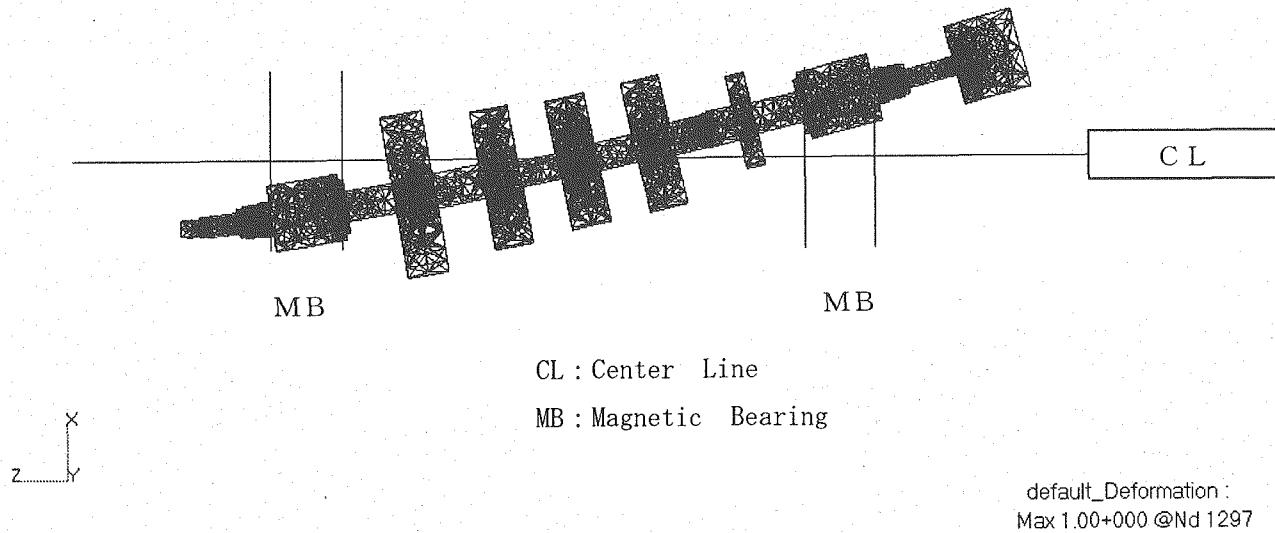


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.5(1/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E6 rigidlst)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:51:13

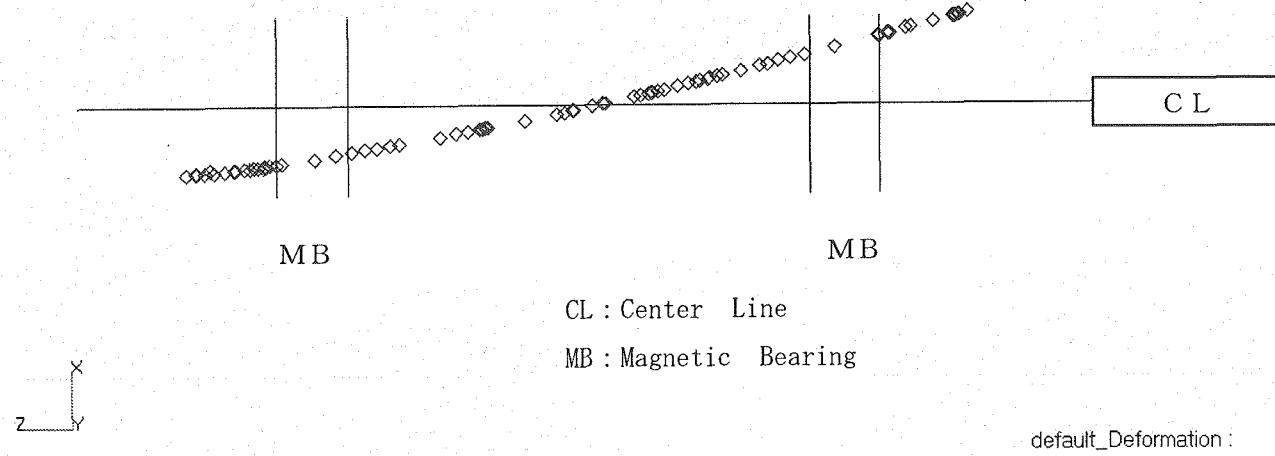
Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=5.0931Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:54:22

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=5.0931Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

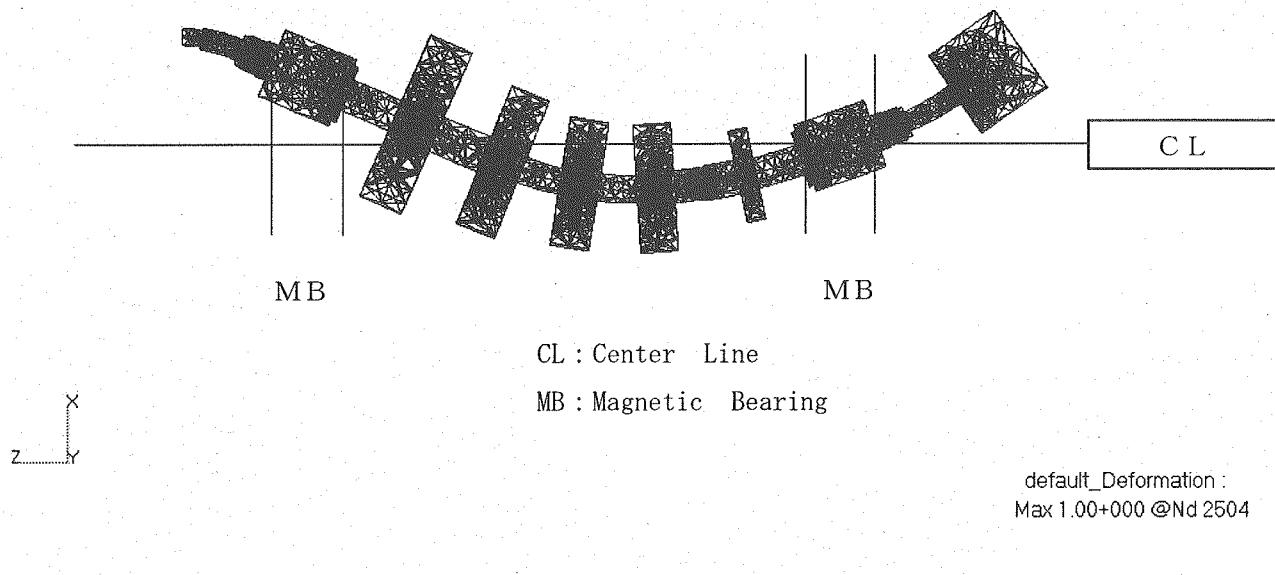


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.5(2/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E6 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:51:25

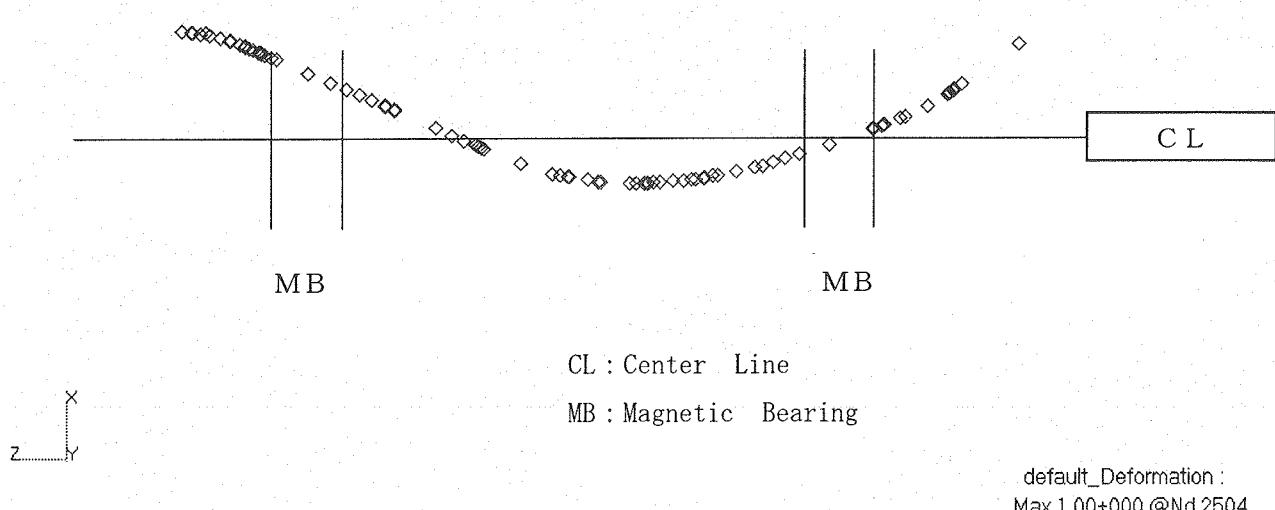
Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=23.844Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:54:35

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=23.844Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



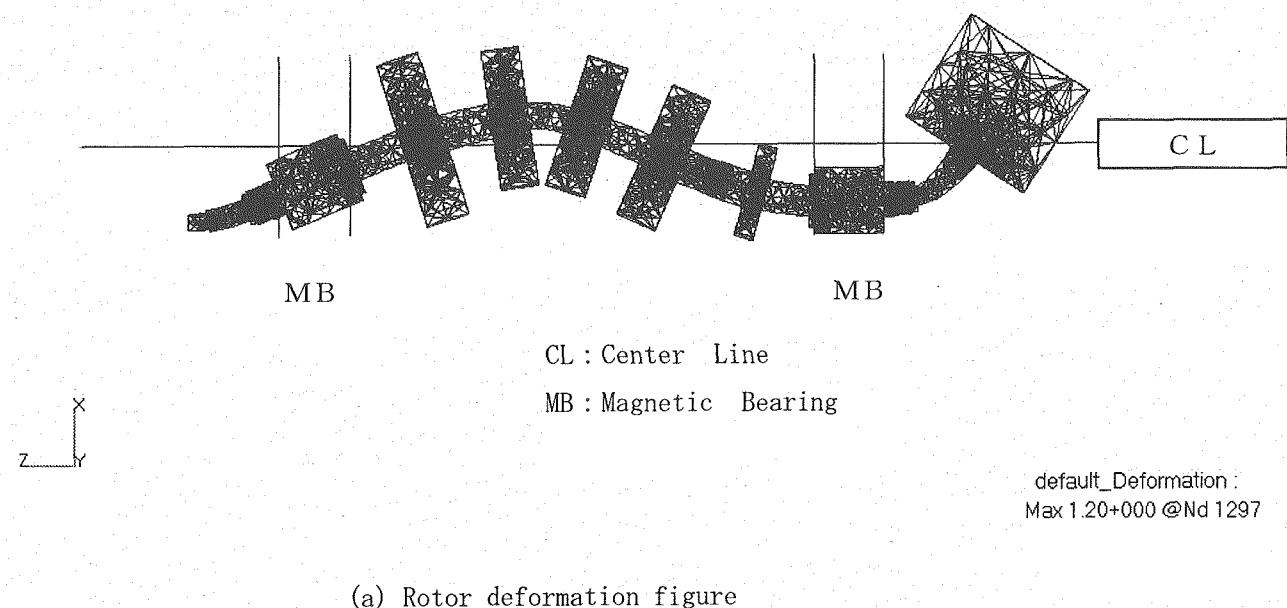
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.5(3/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 1E6 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:51:35

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=58.104Hz, Deformation, Displacements.



MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:54:45

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=58.104Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

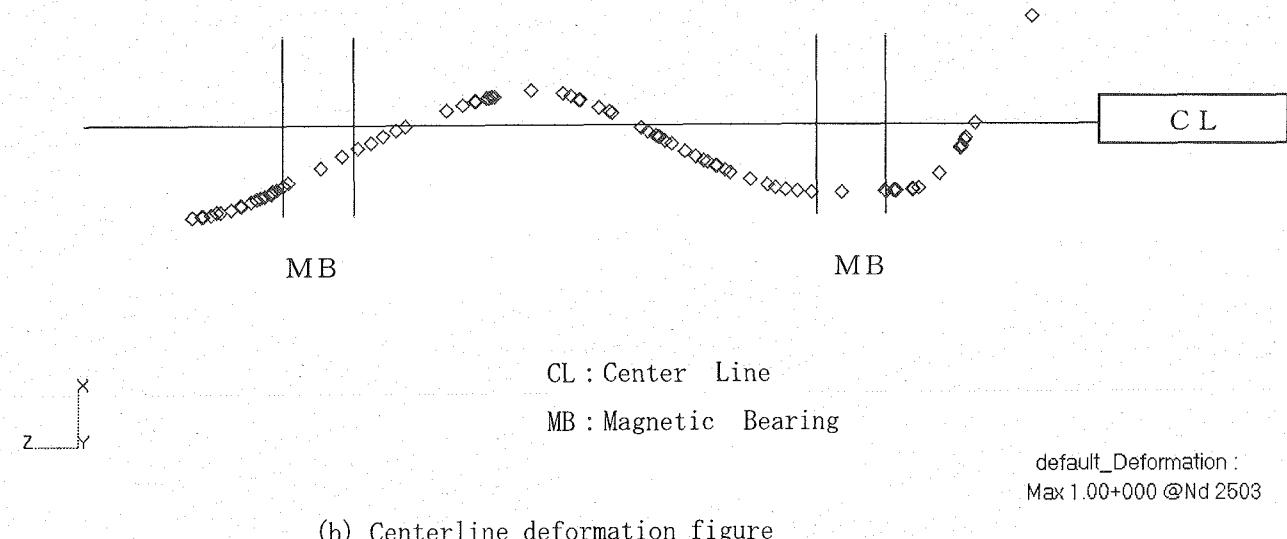
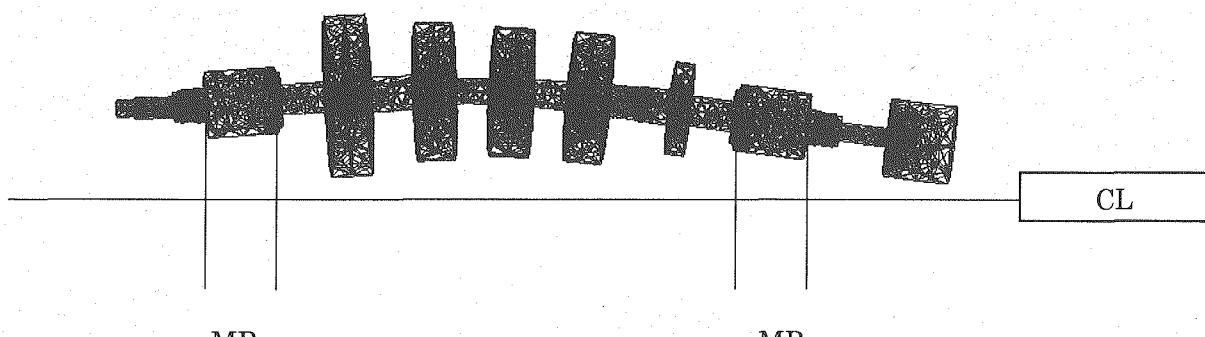


Fig. 2.5(4/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E6 bending2nd)

MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 10:21:38

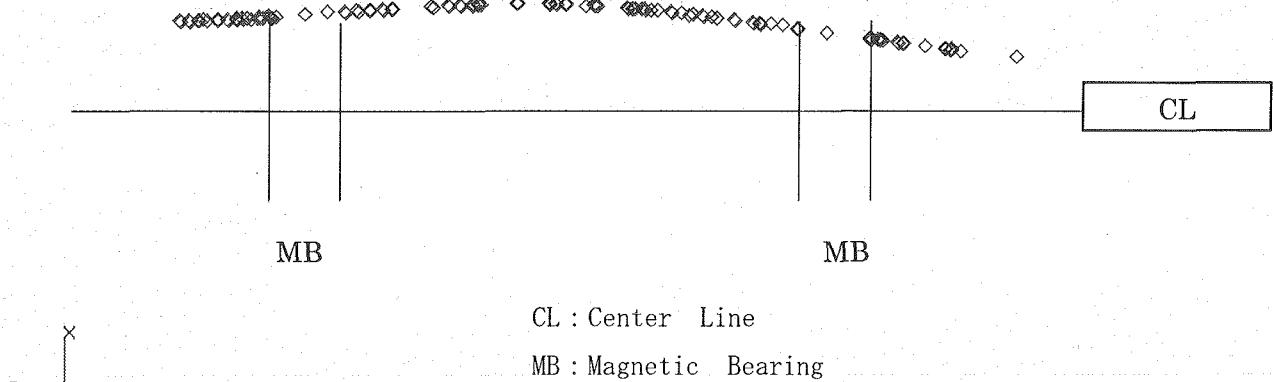
Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=7.0352Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 10:20:38

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=7.0352Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)

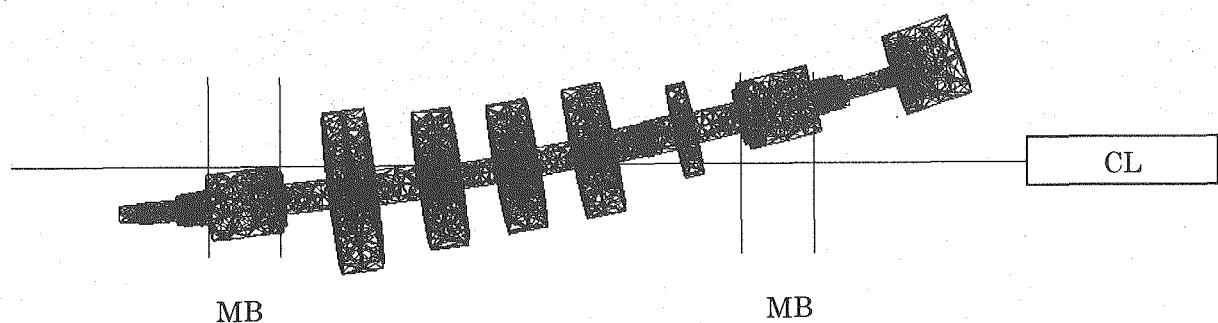


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.6(1/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E7 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 11:04:28

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=10.336Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

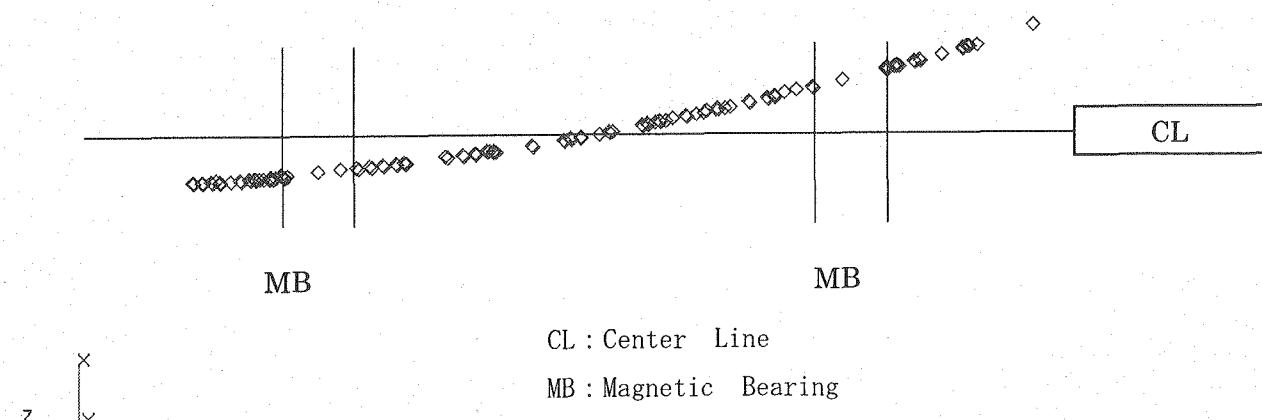


(a) Rotor deformation figure

default\_Deformation:  
Max 1.01+000 @Nd 1276  
Max 1.00+000 @Nd 2503

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 11:10:00

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=10.336Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



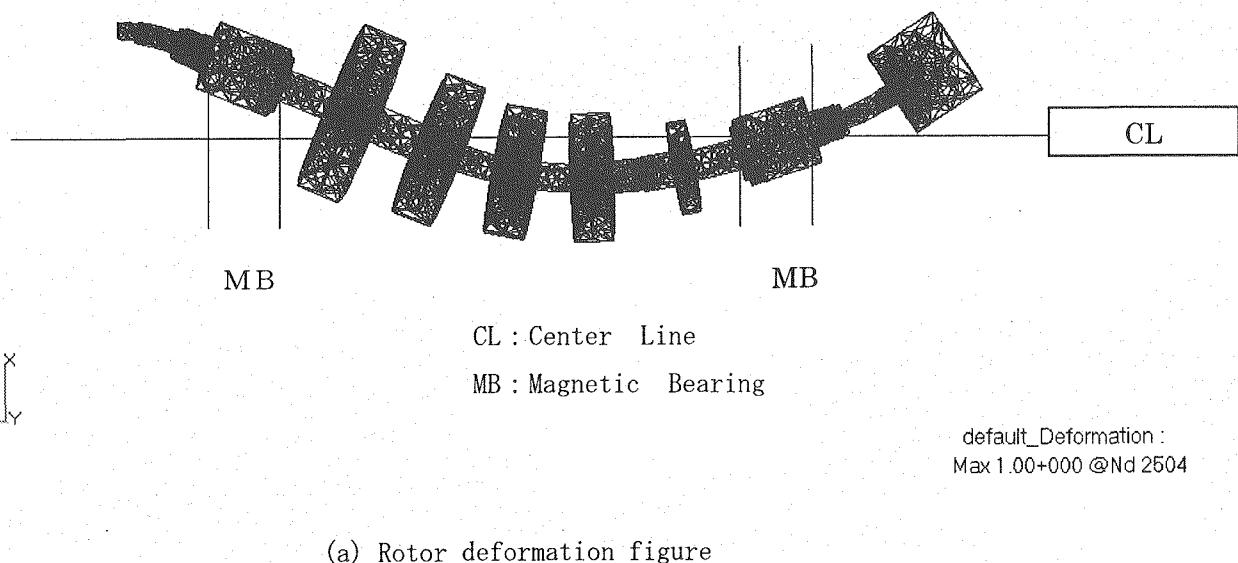
(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2503

Fig. 2.6(2/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E7 rigid2nd)

MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 11:04:51

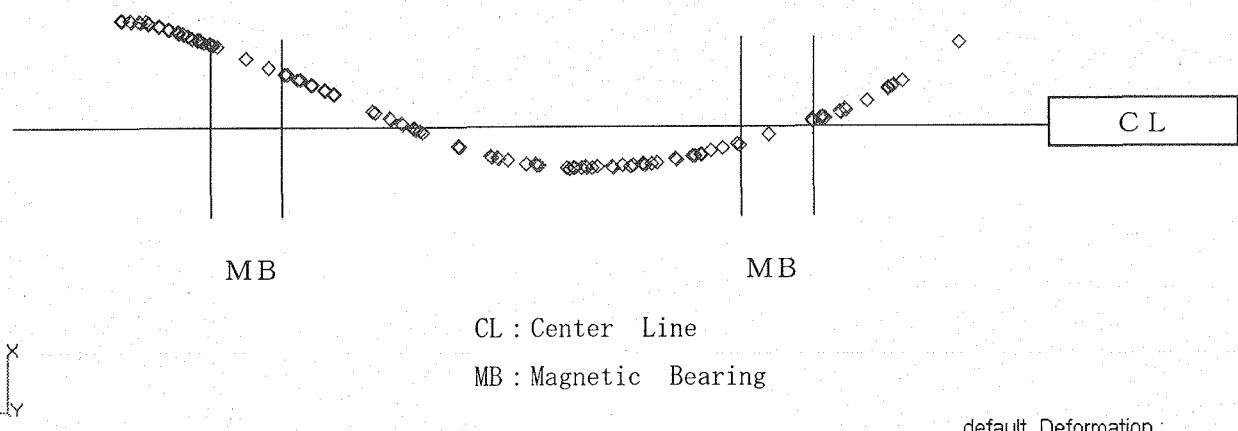
Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=25.389Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 11:09:49

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=25.389Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)

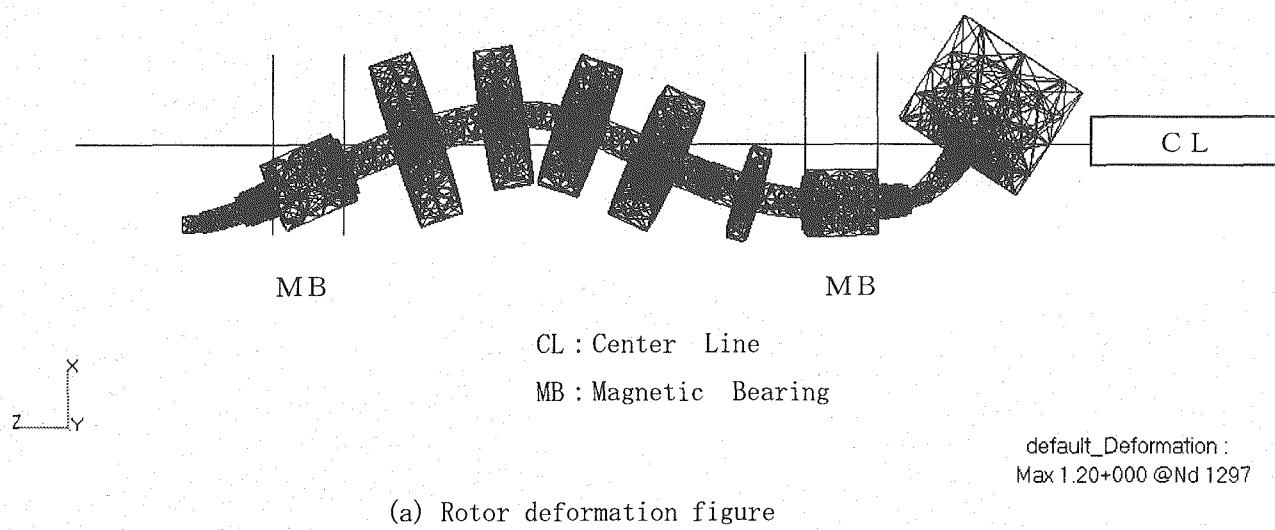


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.6 (3/4)Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E7 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 11:05:04

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=59.018Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)



MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 11:09:12

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=59.018Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)

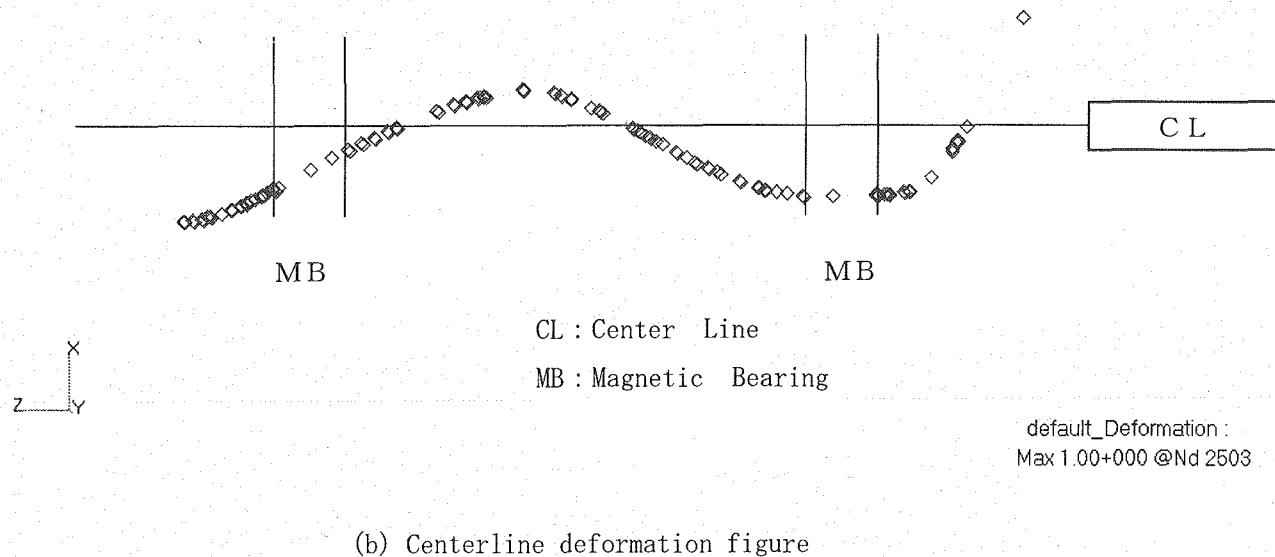
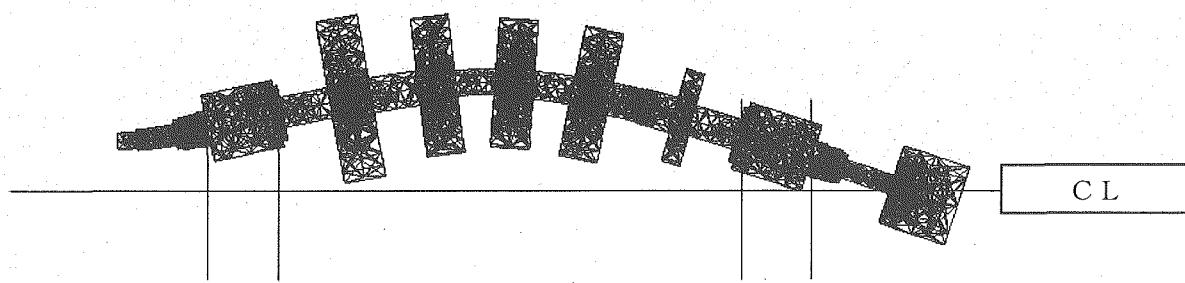


Fig. 2.6(4/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E7 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 11:40:50

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=11.35Hz, Deformation, Displacements,



MB

MB

CL

CL : Center Line

MB : Magnetic Bearing

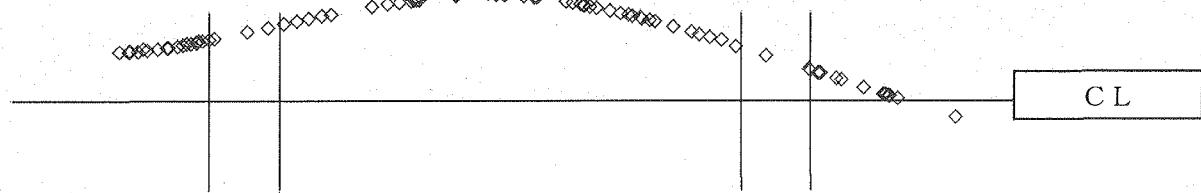


default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 466

(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:12:01

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=11.35Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



MB

MB

CL

CL : Center Line

MB : Magnetic Bearing



default\_Deformation:  
Max 9.99-001 @Nd 2556

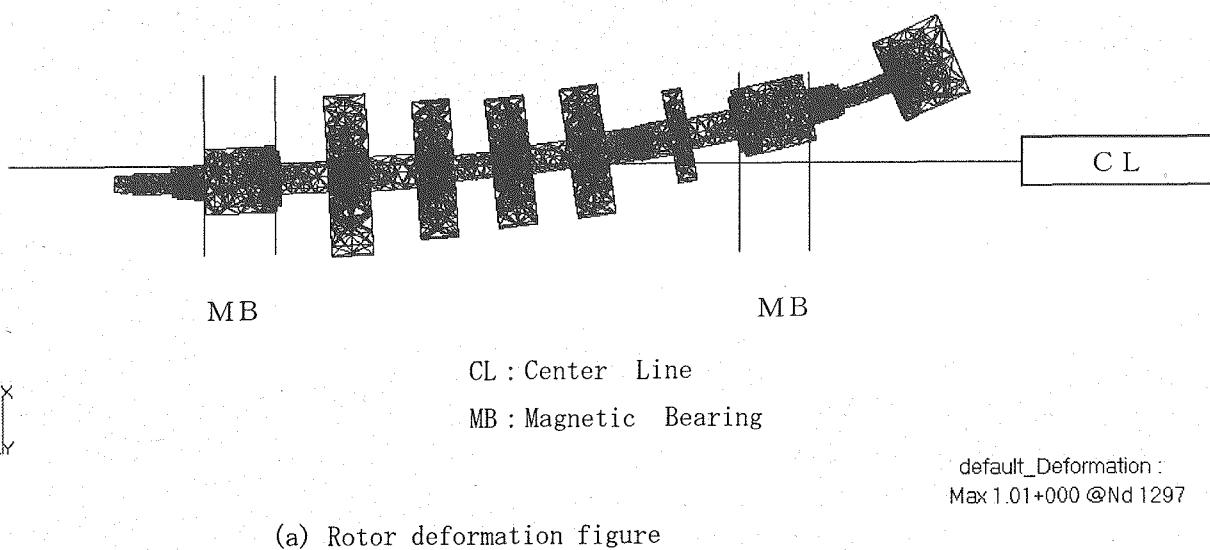
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.7(1/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 3.37E7 rigid1st)

MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 11:42:15

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=16.785Hz, Deformation, Displacements,



MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 13:12:17

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=16.785Hz, Deformation, Displacements.,(NON-LAYERED)

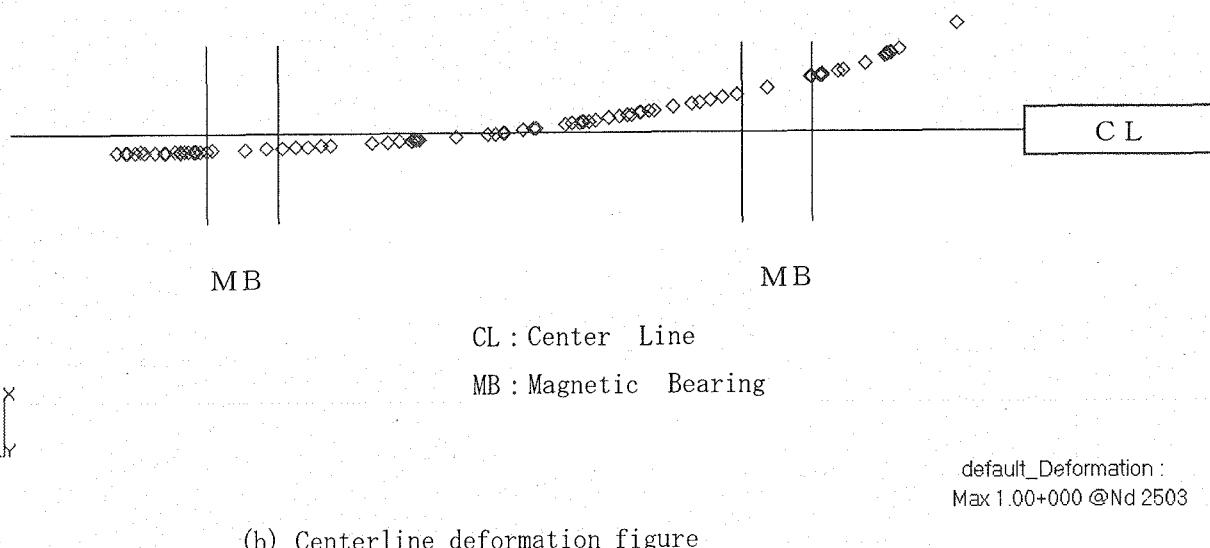
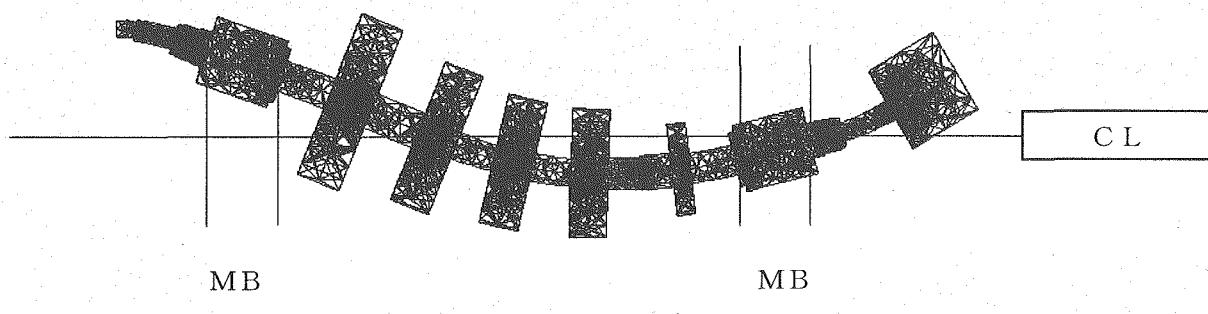


Fig. 2.7(2/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 3.37E7 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 11:42:29

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=29.797Hz, Deformation, Displacements,



CL : Center Line

MB : Magnetic Bearing

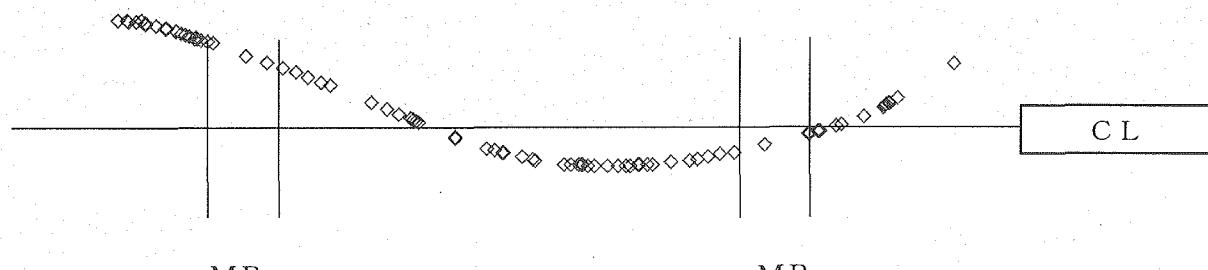


default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2504

(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 15-Feb-06 13:12:34

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=29.797Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



CL : Center Line

MB : Magnetic Bearing



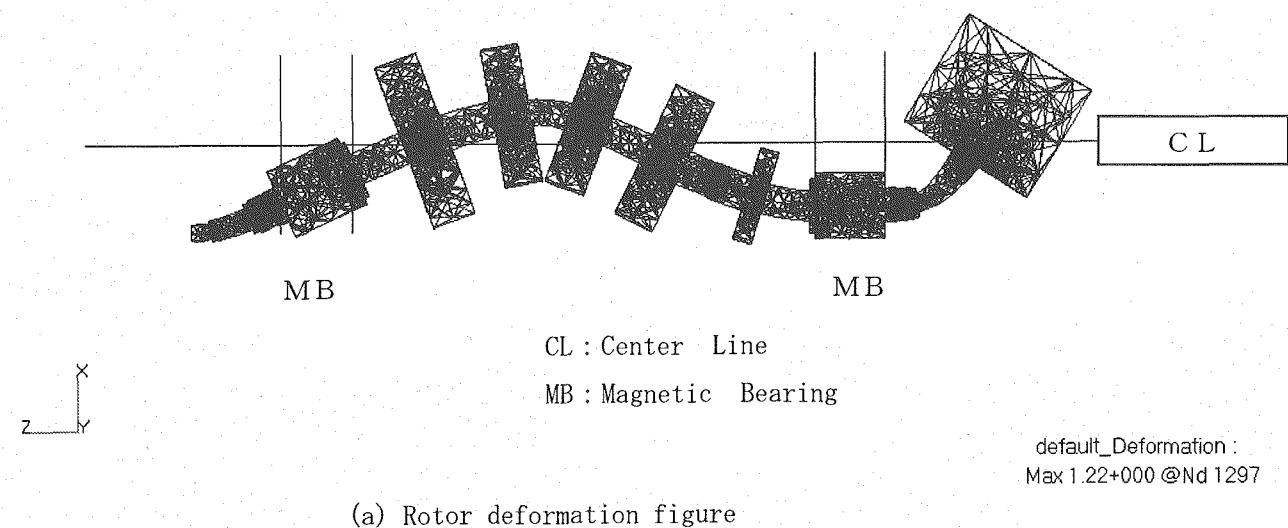
default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2504

(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.7(3/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity3.37E7 bending1st)

MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 11:42:43

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=61.506Hz, Deformation, Displacements.



MSC.Ptran 2005 r2 15-Feb-06 13:12:45

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=61.506Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

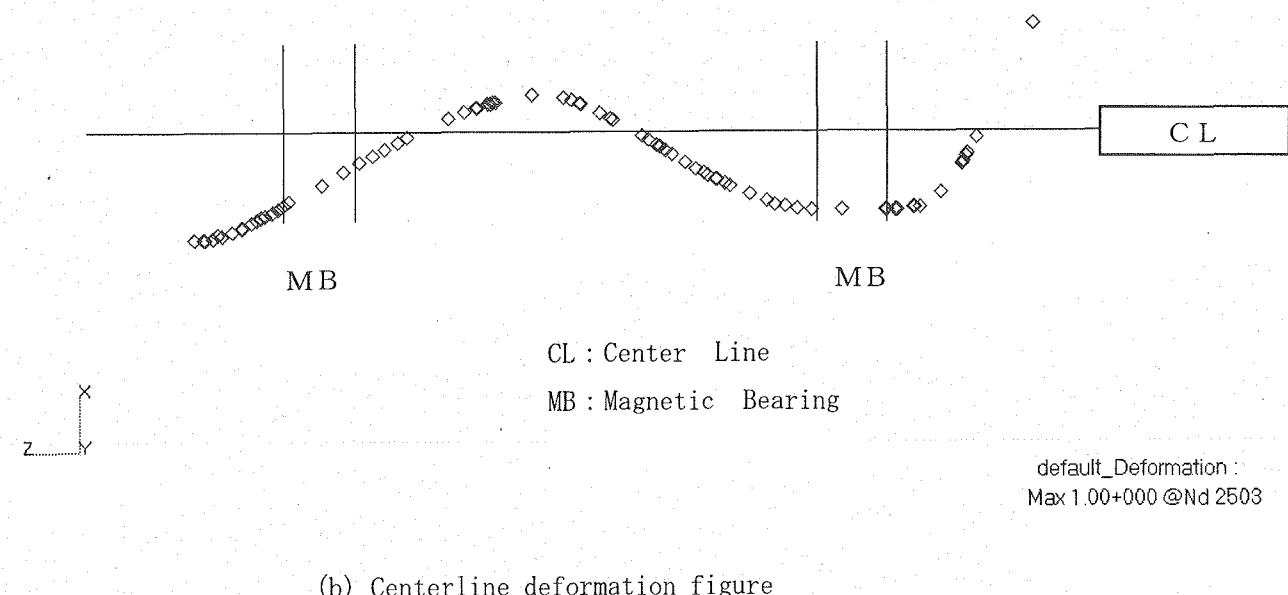
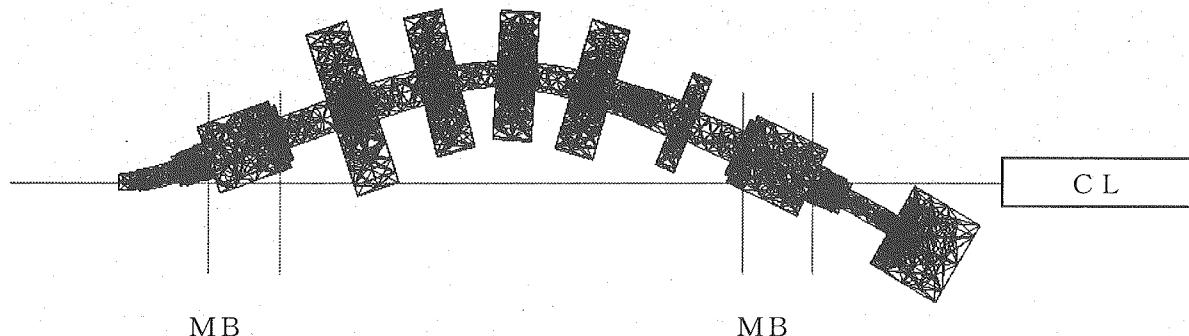


Fig. 2.7(4/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity3.37E7 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:41:50

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=14.882Hz, Deformation, Displacements,



MB CL MB

CL : Center Line

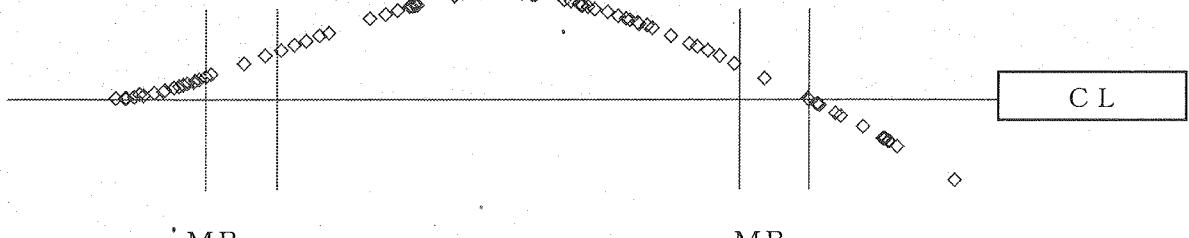
MB : Magnetic Bearing

default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2556

(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:45:20

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=14.882Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



MB CL MB

CL : Center Line

MB : Magnetic Bearing

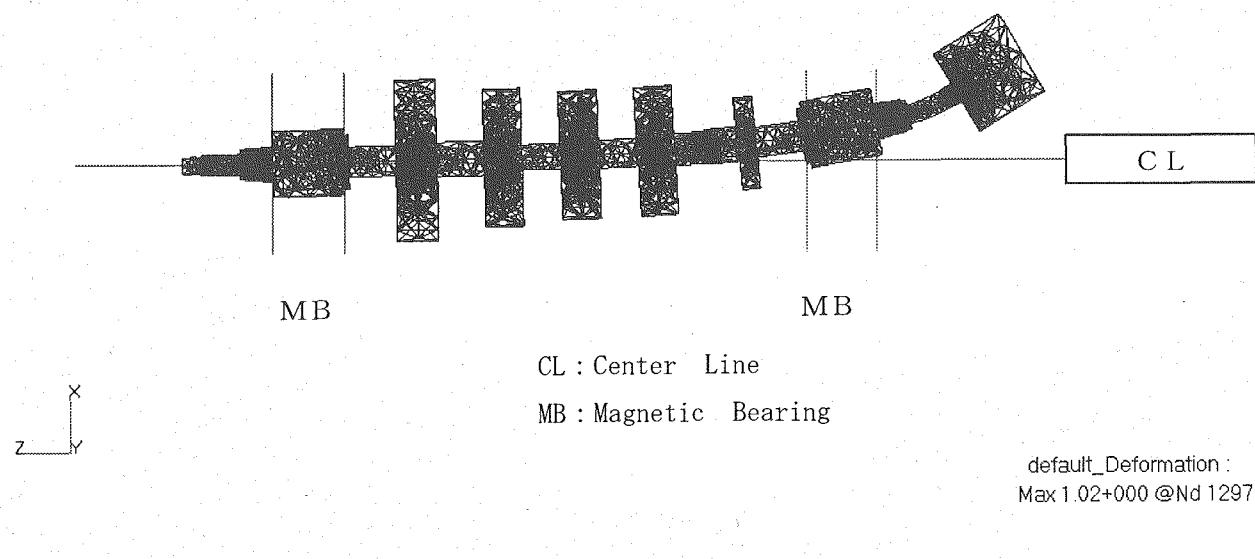
default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2556

(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.8(1/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E8 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:42:17

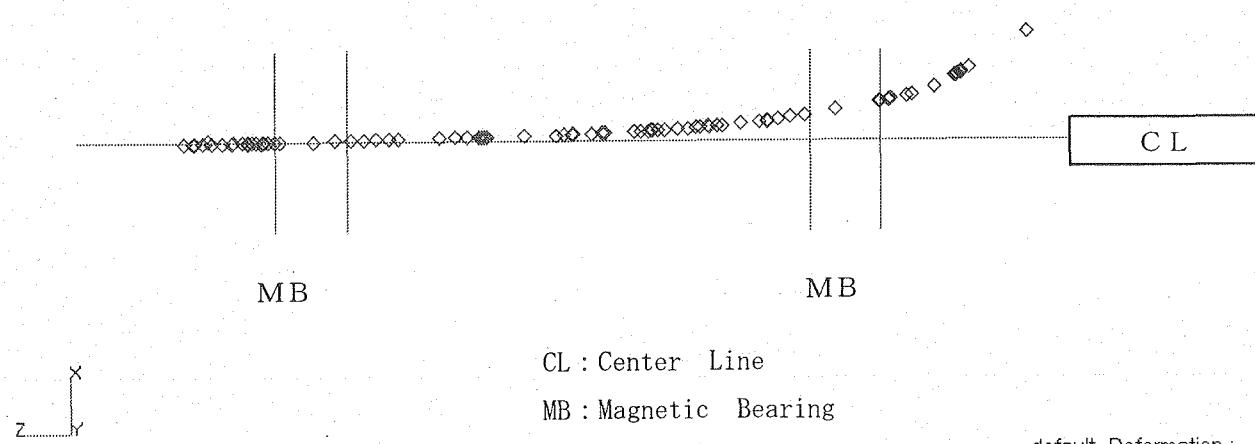
Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=24.624Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:45:42

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=24.624Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

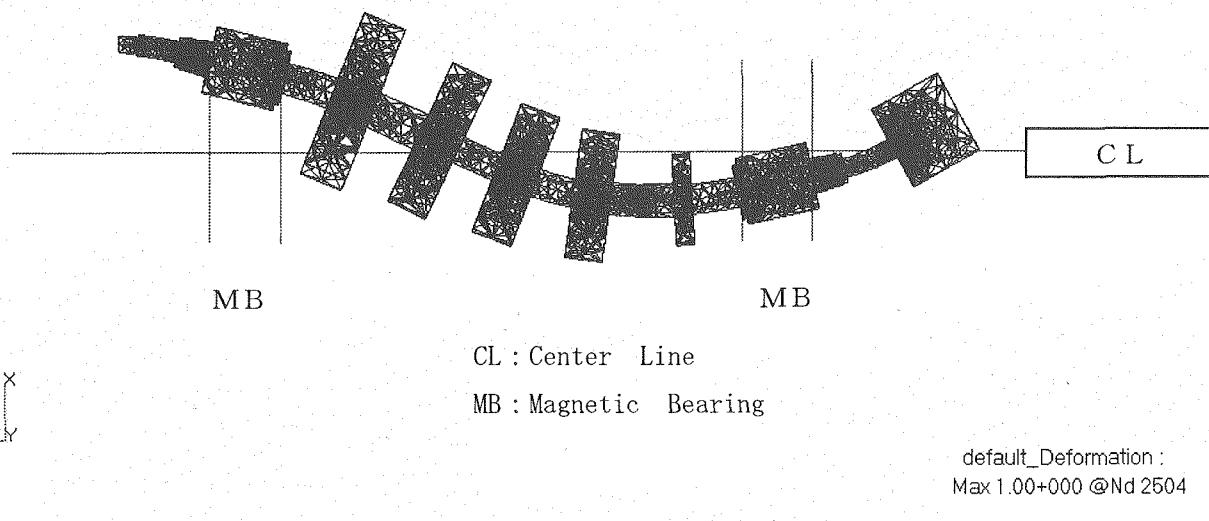


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.8(2/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E8 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:42:28

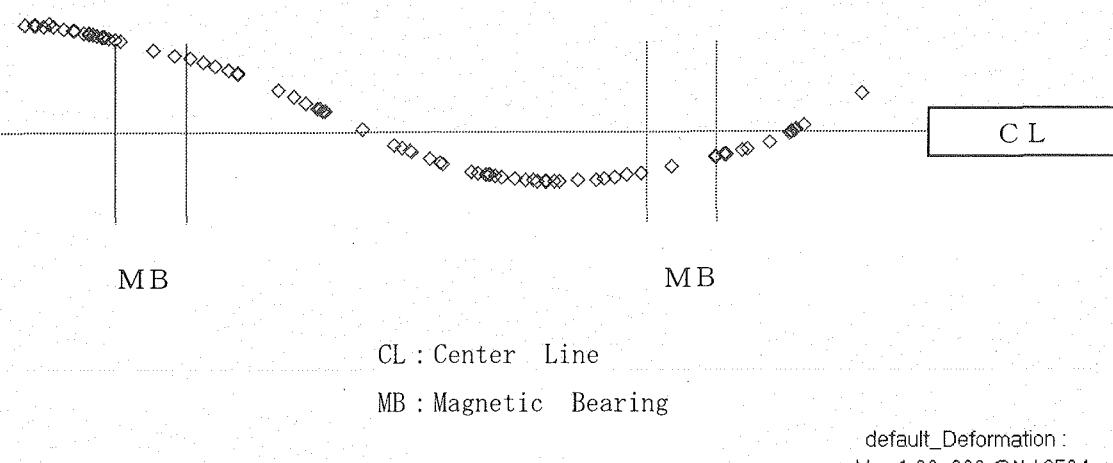
Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=40.582Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:45:54

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=40.582Hz, Deformation, Displacements,,(NON-LAYERED)



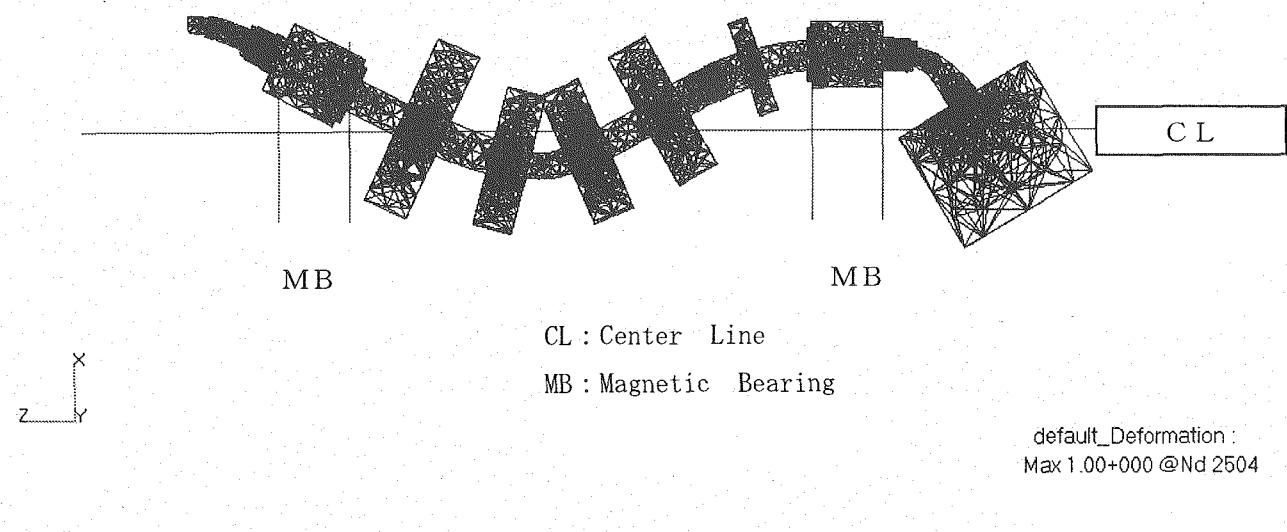
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.8(3/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 1E8 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:42:39

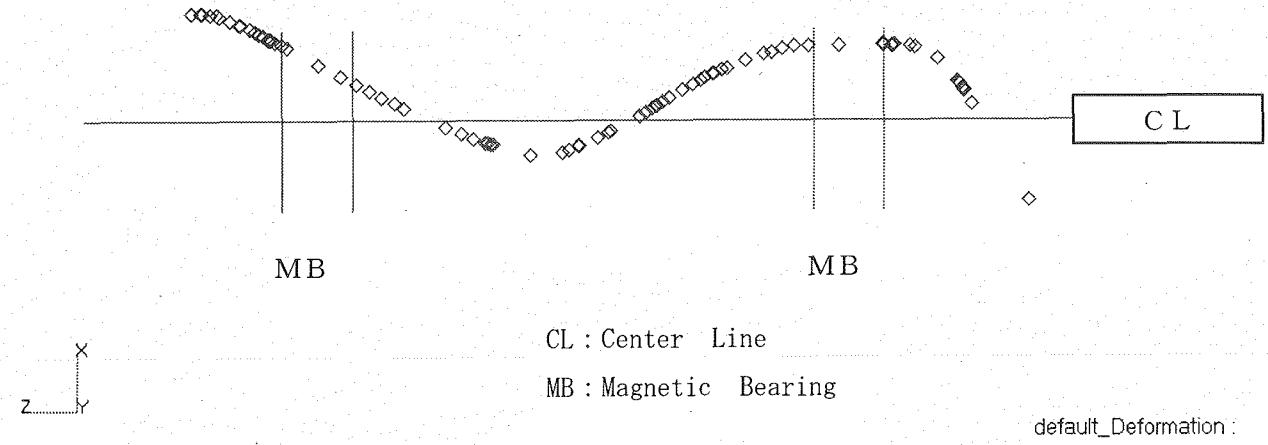
Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=68.765Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 09:46:03

Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=68.765Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

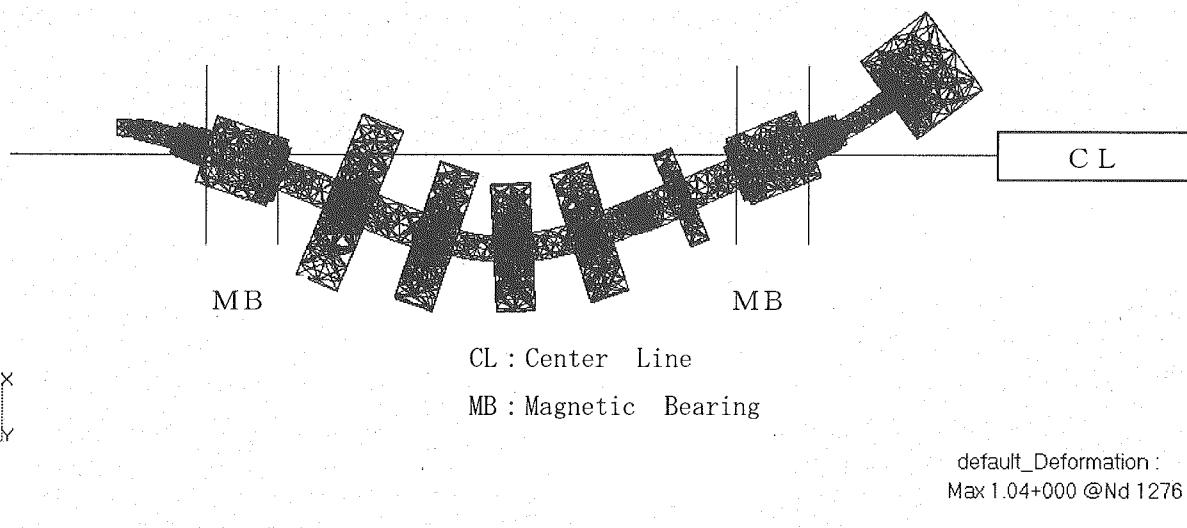


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.8(4/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E8 bending2nd)

MSC.Ptran 2005 r2 17-Feb-06 19:02:21

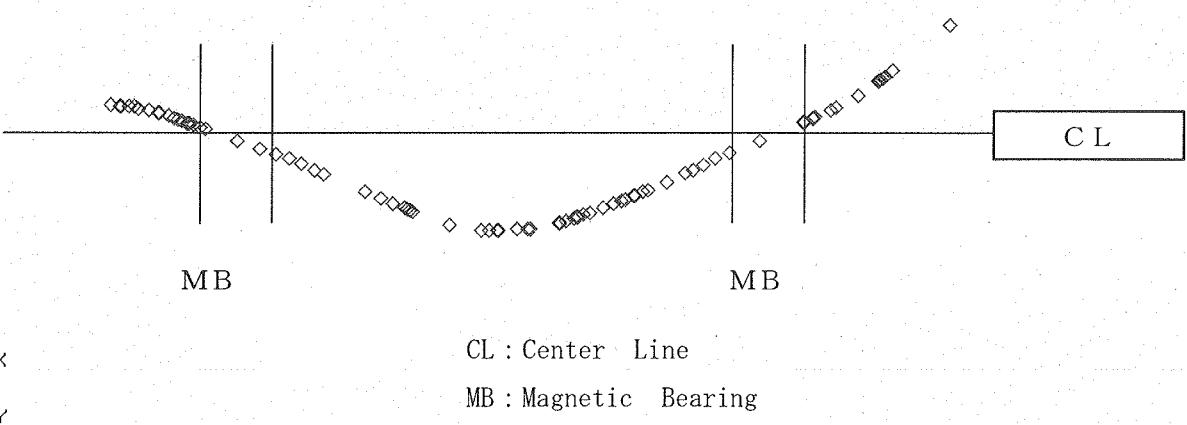
Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=22.715Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Ptran 2005 r2 17-Feb-06 19:05:07

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=22.715Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

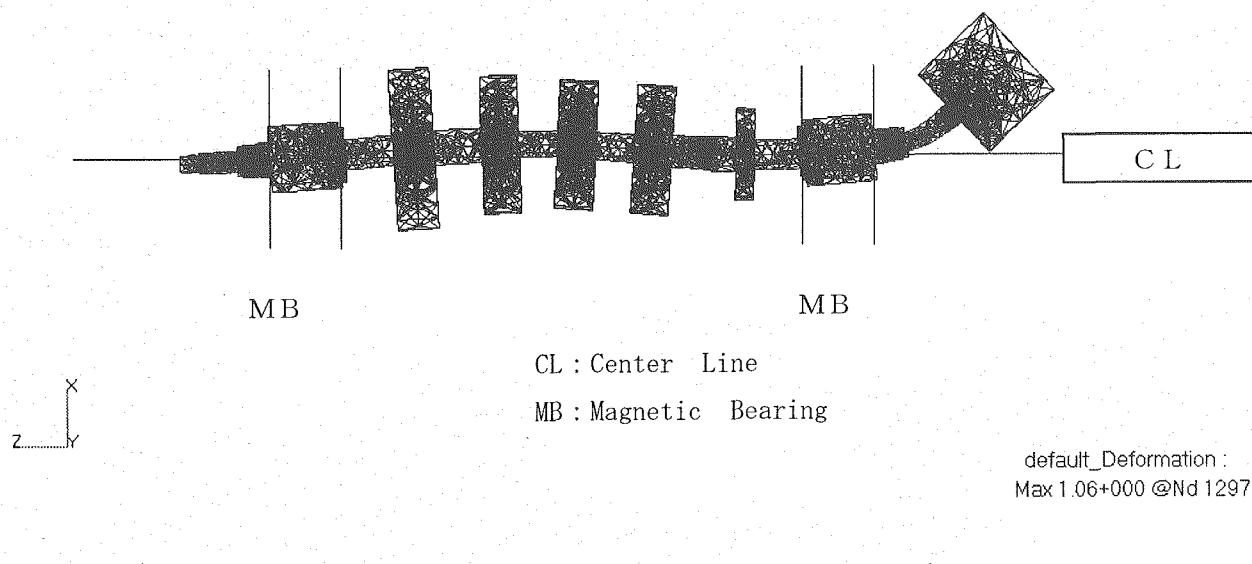


(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.9(1/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E9 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r217-Feb-06 19:03:04

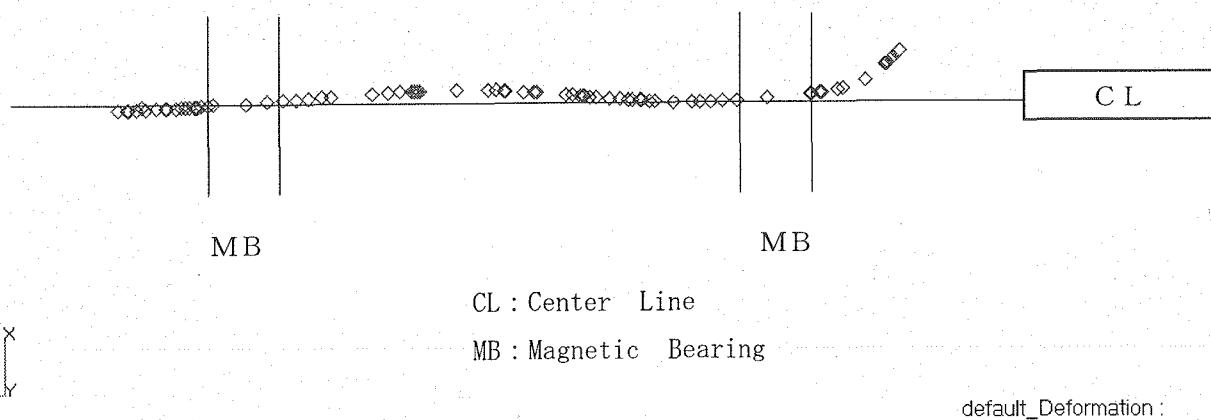
Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=36.651Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r217-Feb-06 19:05:32

Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=36.651Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



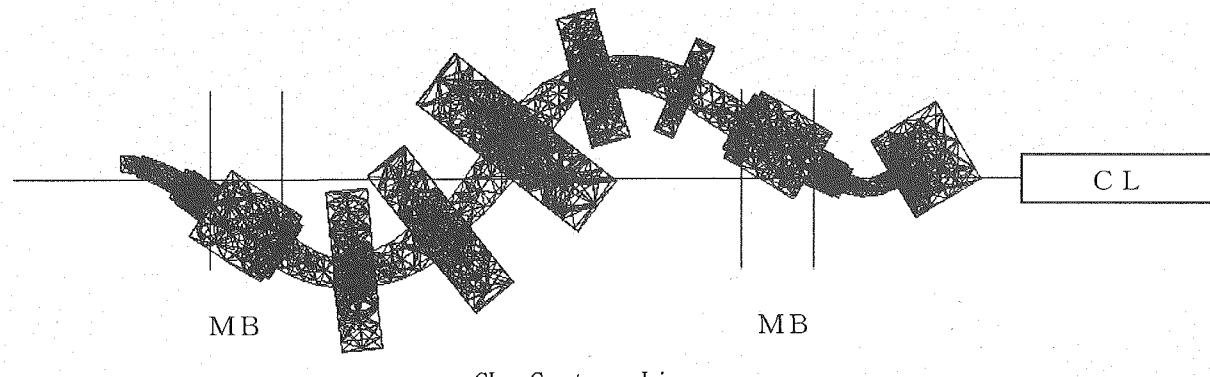
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.9(2/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 1E9 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 19:03:18

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=77.835Hz, Deformation, Displacements,



CL : Center Line

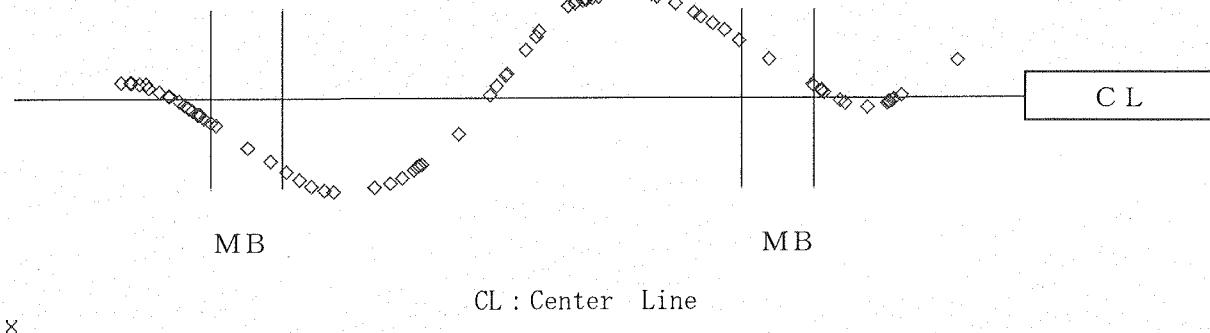
MB : Magnetic Bearing

default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2592

(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 19:05:51

Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=77.835Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



CL : Center Line

MB : Magnetic Bearing

default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 2592

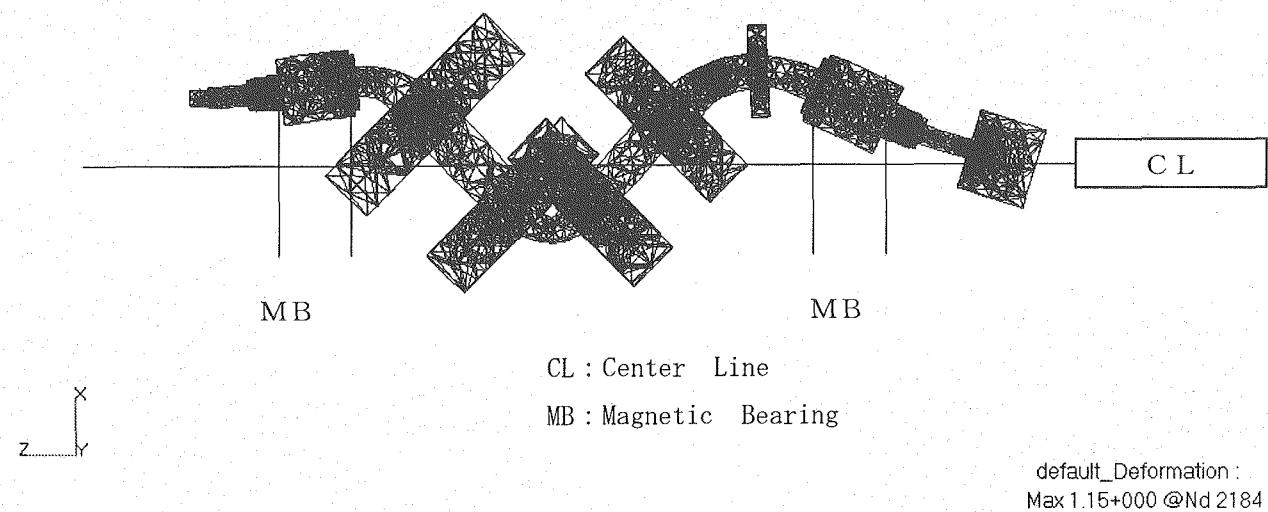
(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.9(3/4) Axial direction amplitude distribution of rotor

(rigidity 1E9 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 19:03:38

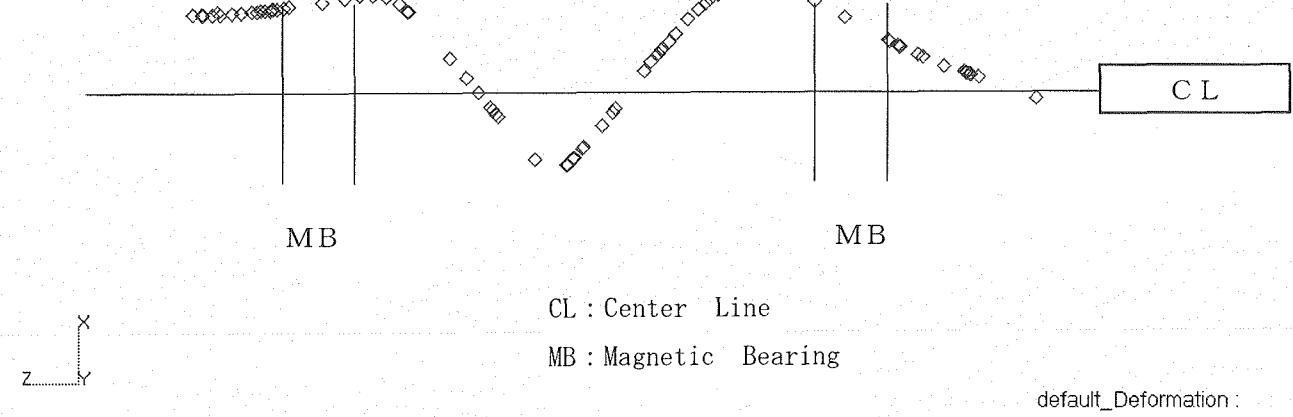
Deform: Frequency, Step1,Mode5,Freq=126.73Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 17-Feb-06 19:06:12

Deform: Frequency, Step1,Mode5,Freq=126.73Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



(b) Centerline deformation figure

Fig. 2.9(4/4) Axial direction amplitude distribution of rotor  
(rigidity 1E9 bending2nd)

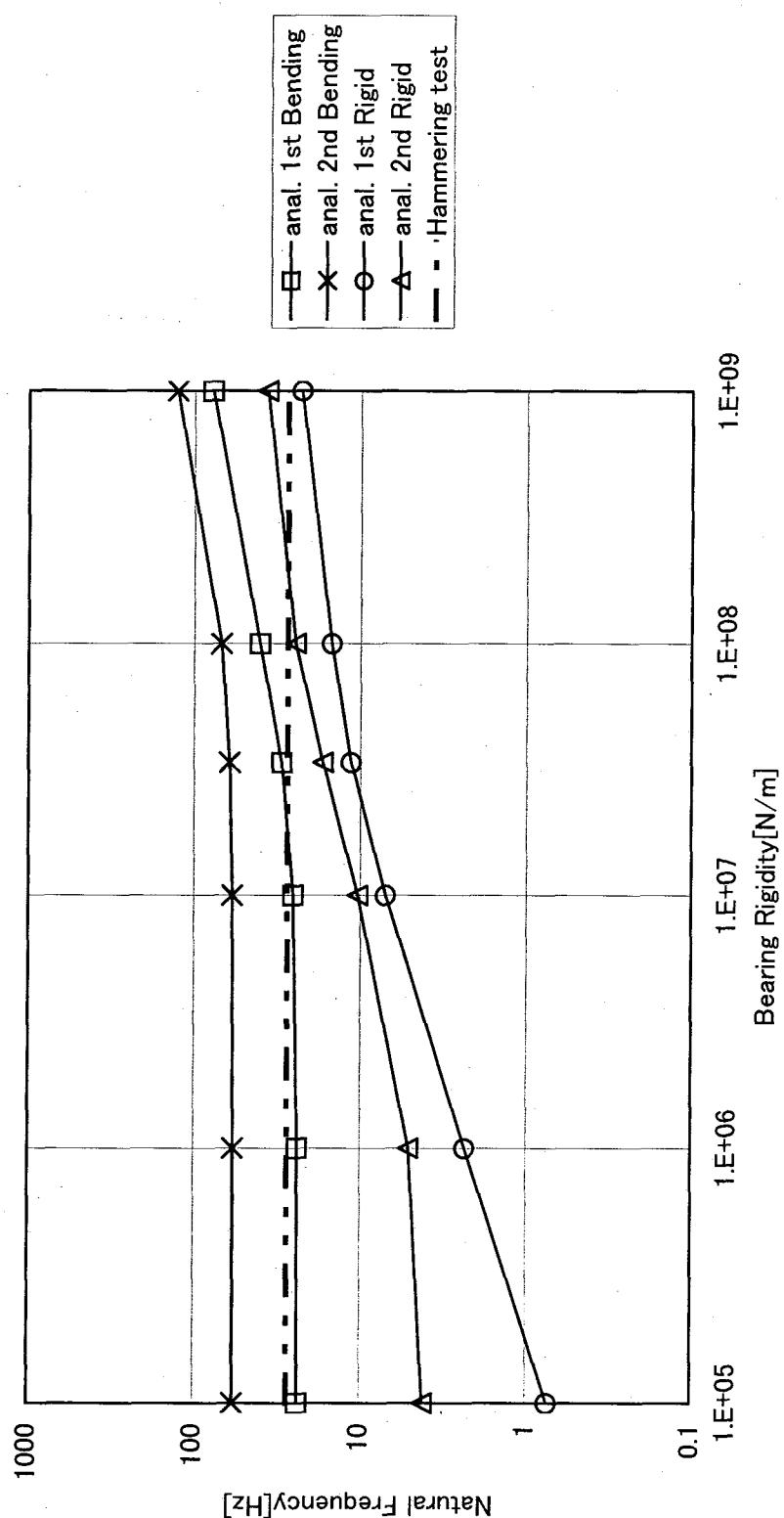
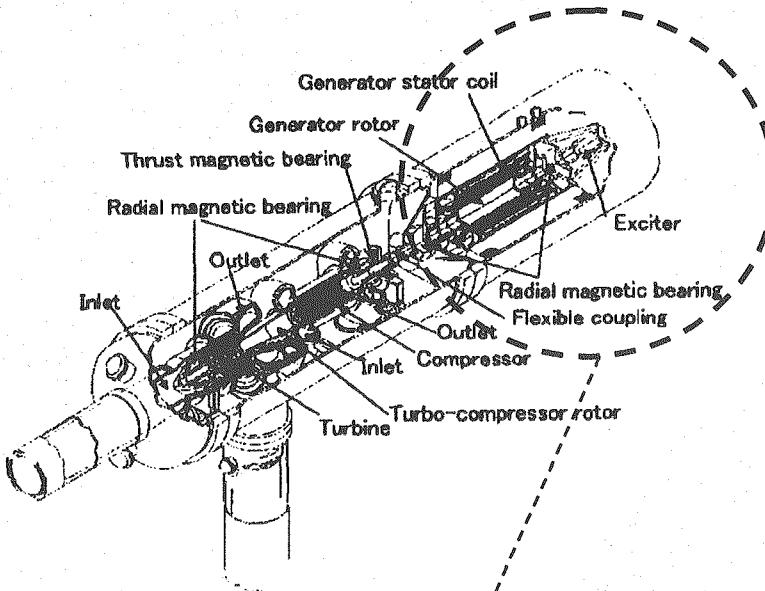
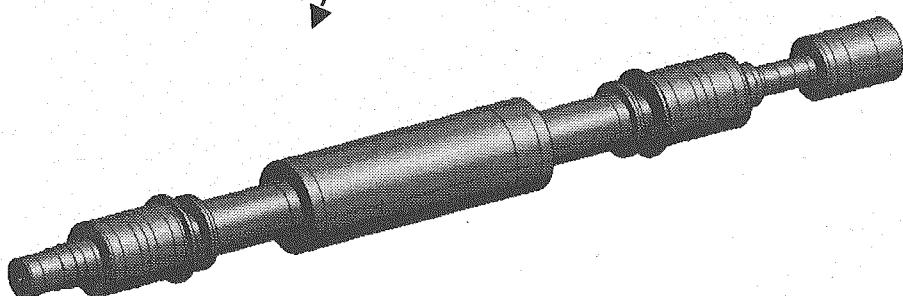


Fig. 2.10 Bearing rigid dependency of rotor natural frequency value



Outline of power conversion system for GTHTTR300

16)



Actual Rotor CAD model



Fig. 3.1 Model Geometry of actual rotor

(出典16): 高田 他: 日本原子力学会和文論文誌, 2[4], 525(2003).)

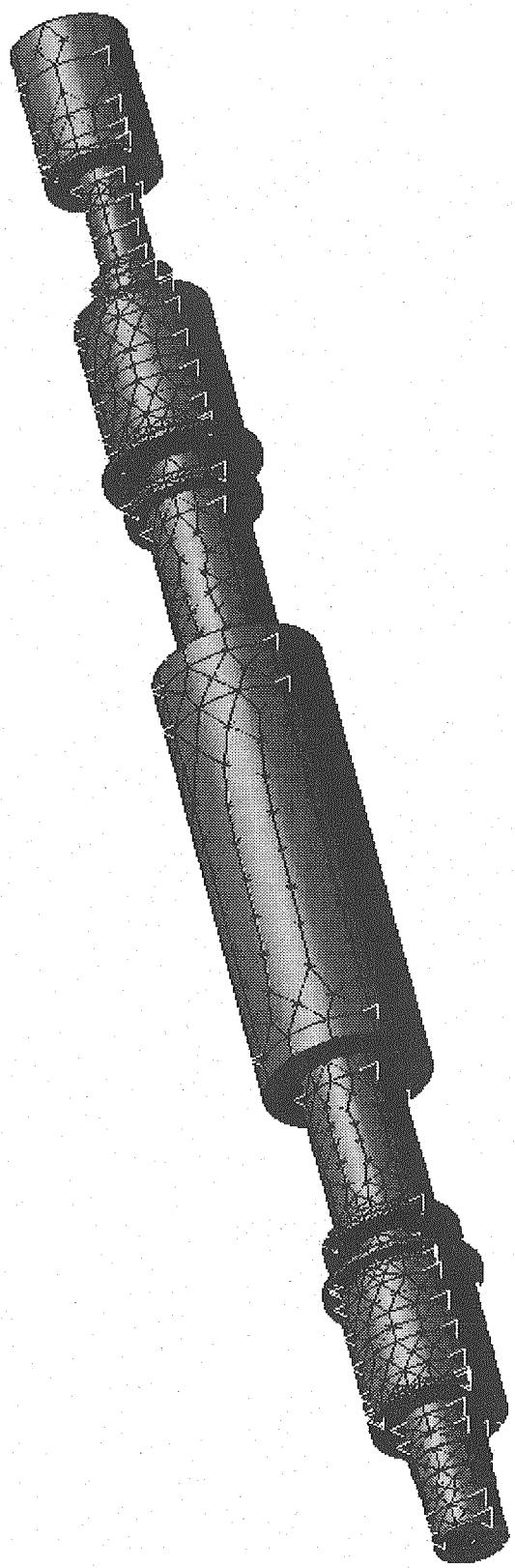
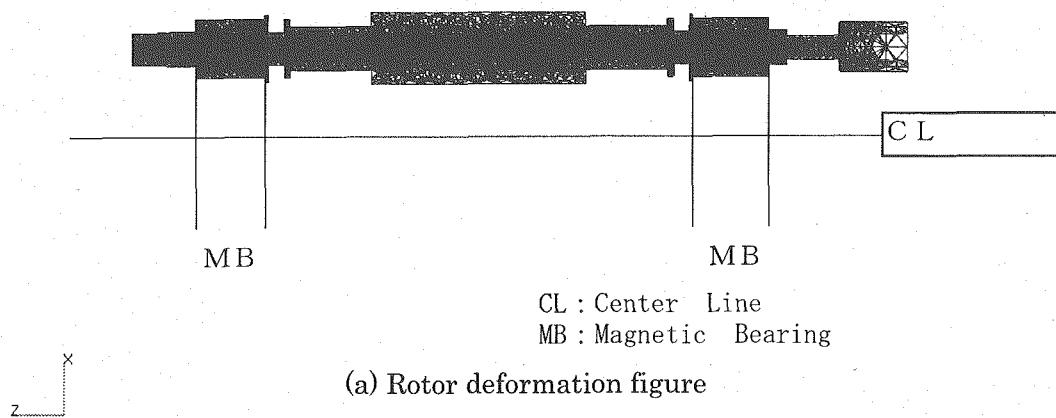


Fig. 3.2 Mesh Model of actual rotor(TET4)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:14:01  
 Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=0.85157Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:15:37  
 Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=0.85157Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)

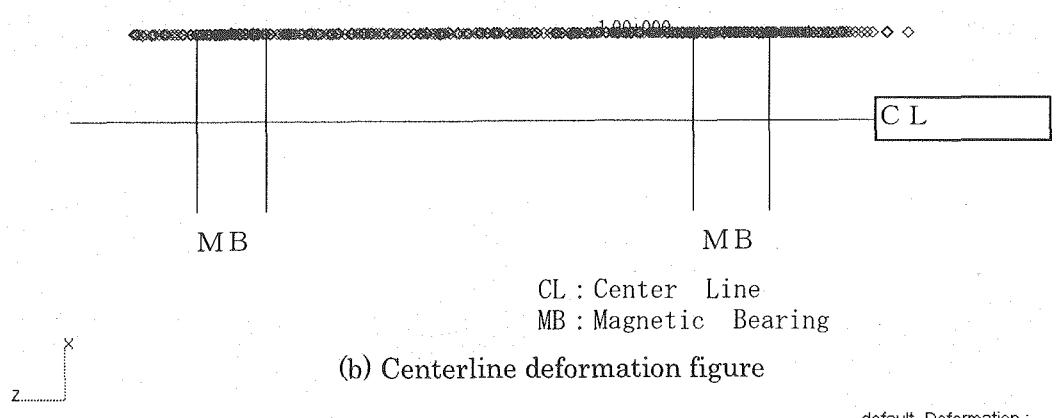
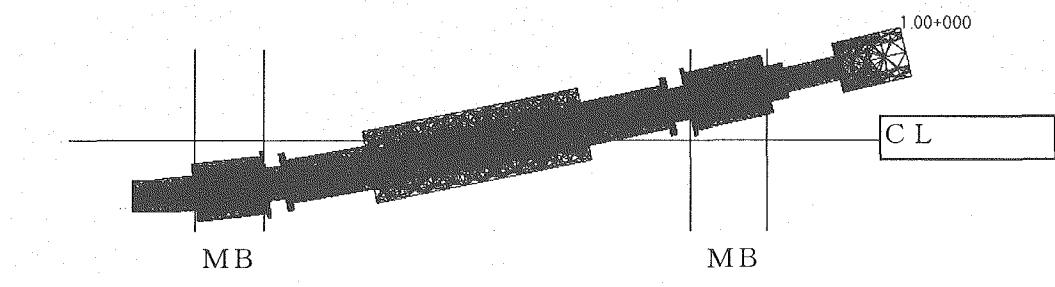


Fig. 3.3(1/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E6 rigid1st)

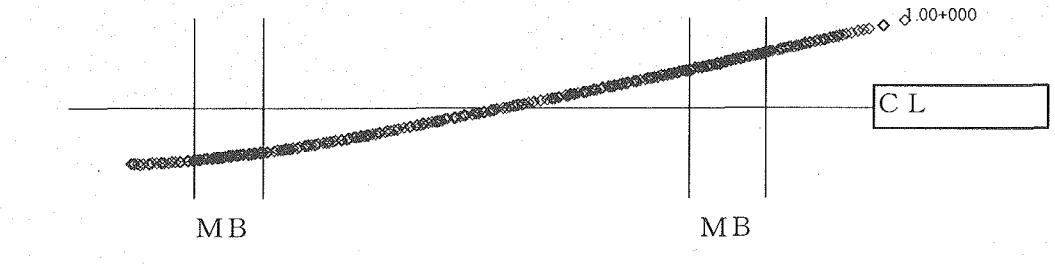
MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:14:33  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=4.4971Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 33315

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:15:50  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=4.4971Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)

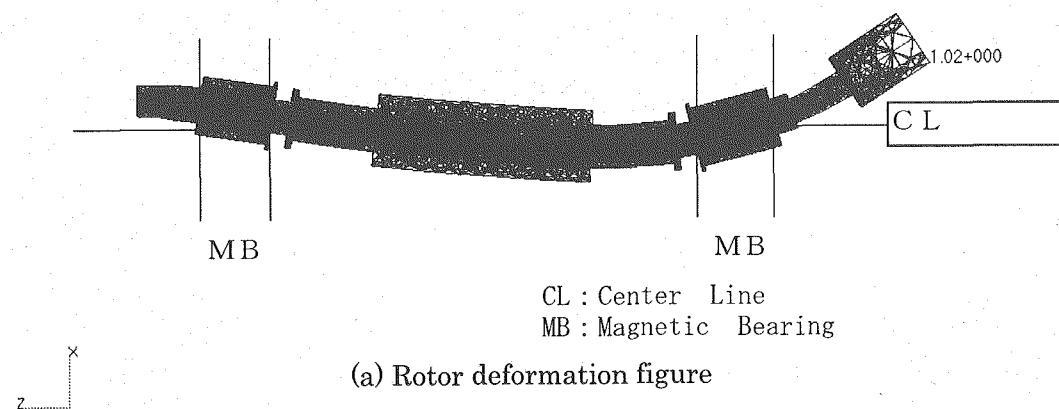


(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 32594

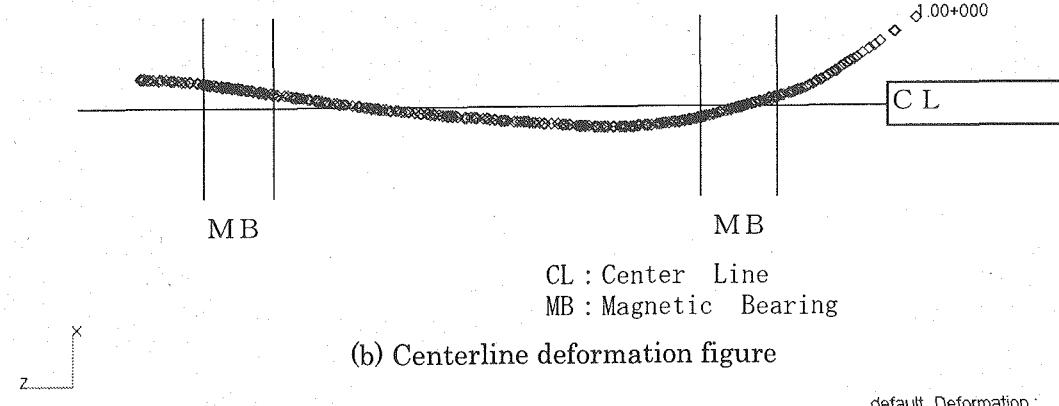
Fig. 3.3(2/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E6 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:14:43  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=26.606Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)



default\_Deformation:  
 Max 1.02+000 @Nd 33190

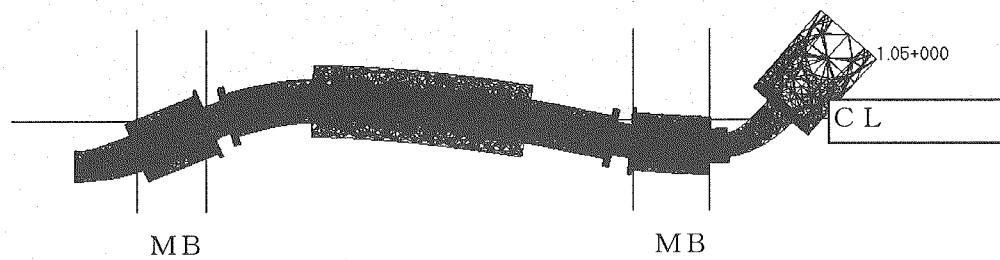
MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:16:00  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=26.606Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)



default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 32594

Fig. 3.3(3/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E6 bending1st)

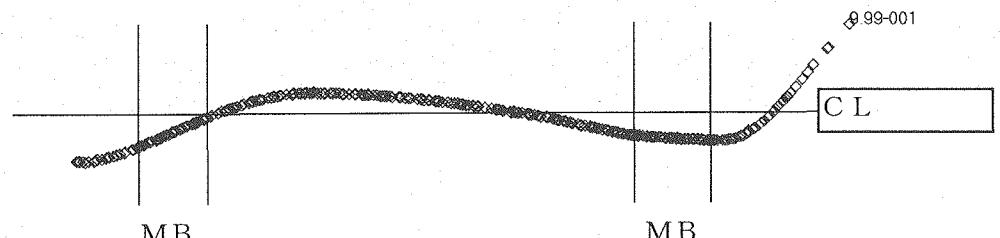
MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:14:56  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=53.476Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.05+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:16:10  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=53.476Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

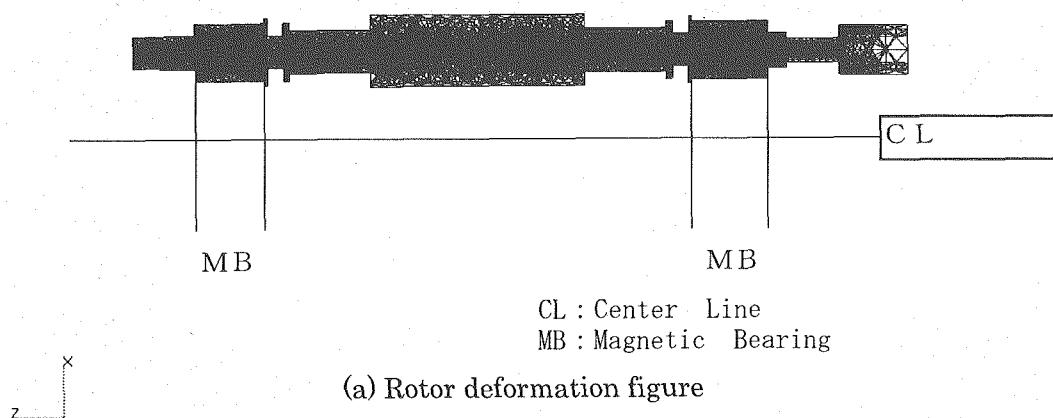


(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 9.99-001 @Nd 32594

Fig. 3.3(4/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E6 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:59:46  
 Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=2.6866Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:01:09  
 Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=2.6866Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

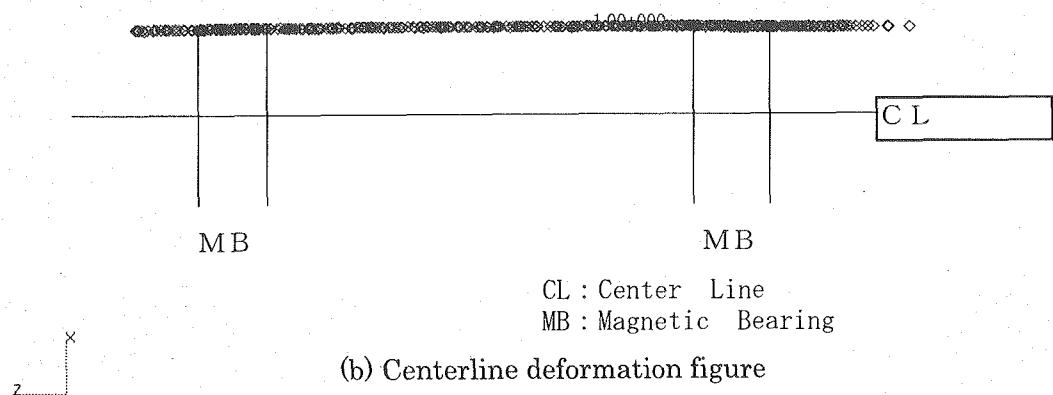
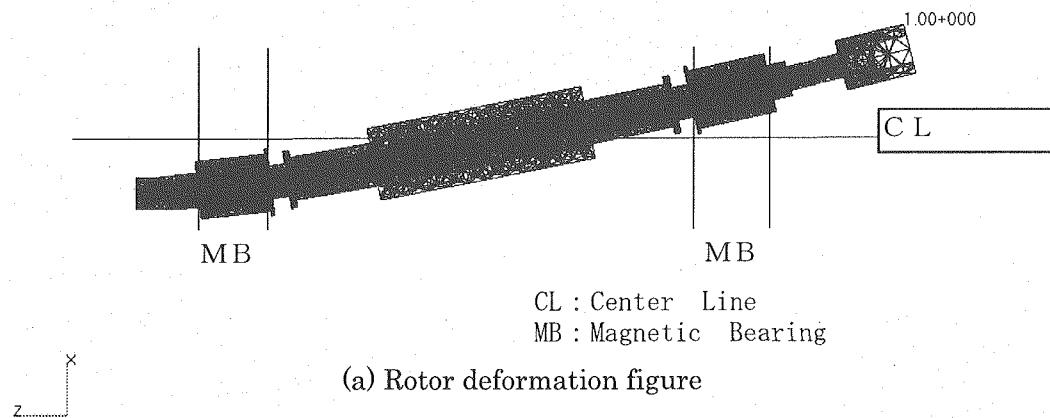


Fig. 3.4(1/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E7 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:00:08  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=5.6111Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:01:21  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=5.6111Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

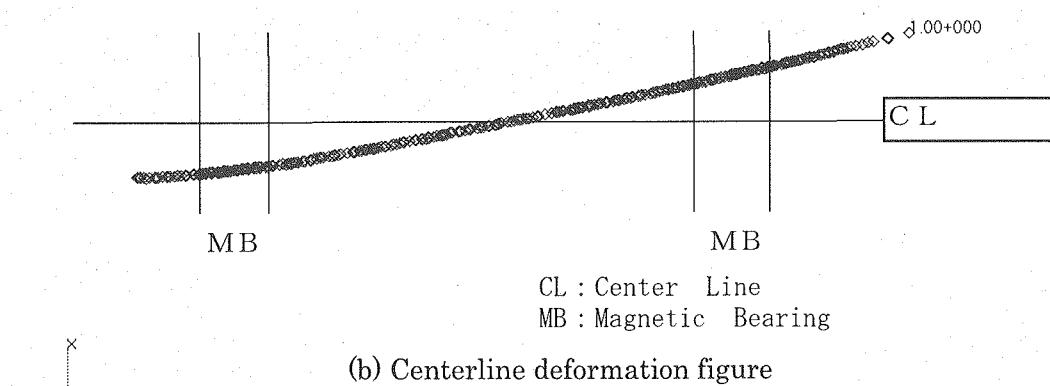
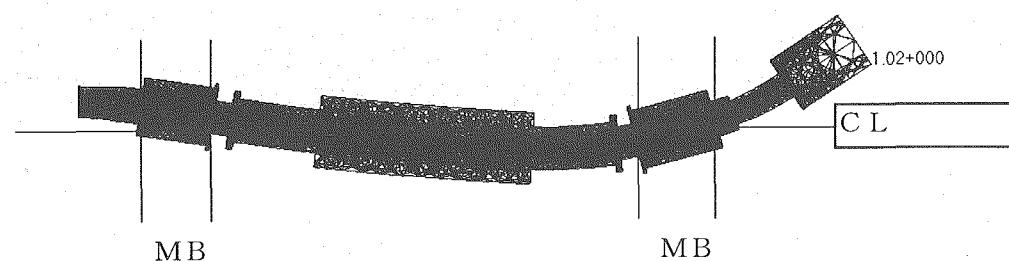


Fig. 3.4(2/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E7 rigid2nd)

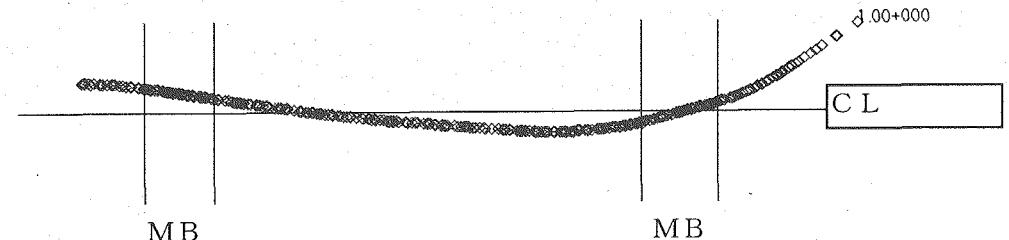
MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:00:17  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=26.689Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.02+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:01:31  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=26.689Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

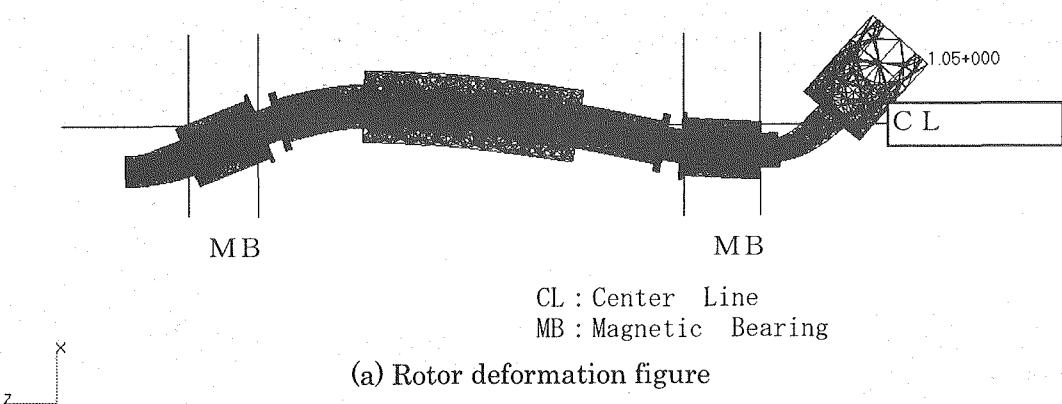


(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 32594

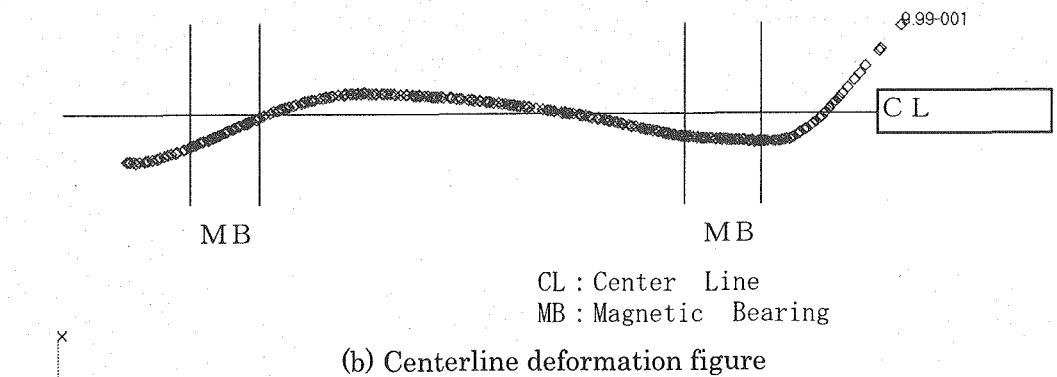
Fig. 3.4(3/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E7 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:00:30  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=53.554Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



default\_Deformation:  
 Max 1.05+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 16:01:41  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=53.554Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

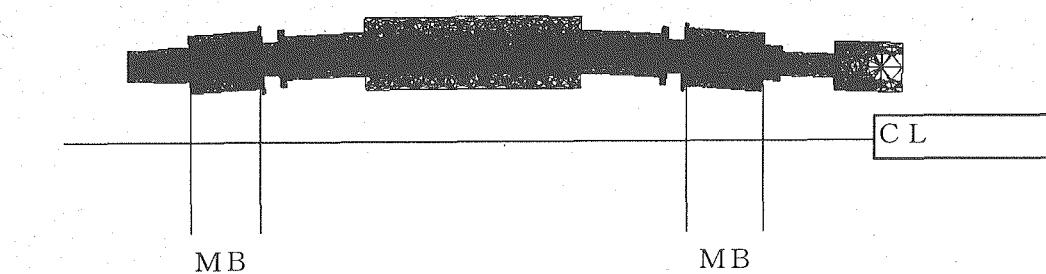


default\_Deformation:  
 Max 0.99-001 @Nd 32594

Fig. 3.4(4/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E7 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:50:56

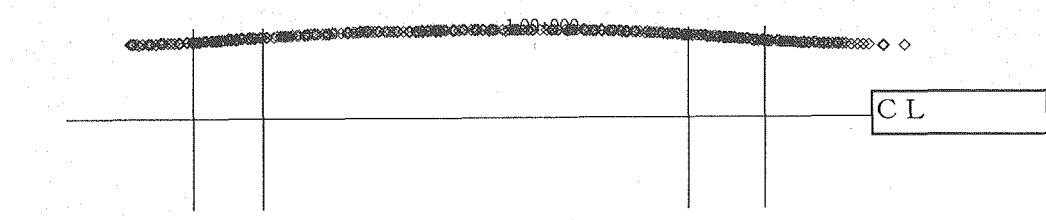
Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=8.2974Hz, Deformation, Displacements,



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:53:48

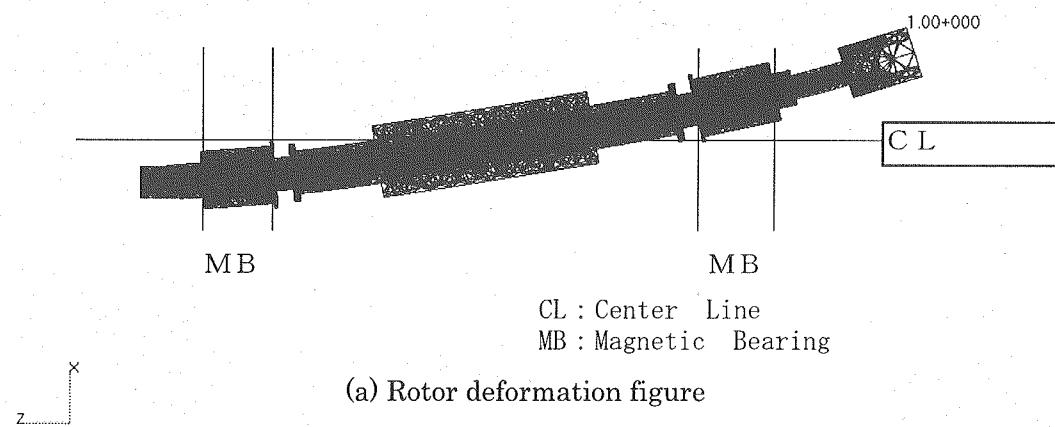
Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=8.2974Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)



(b) Centerline deformation figure

Fig. 3.5(1/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
(rigidity 1E8 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:51:21  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=11.838Hz, Deformation, Displacements.



MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:54:04  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=11.838Hz, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)

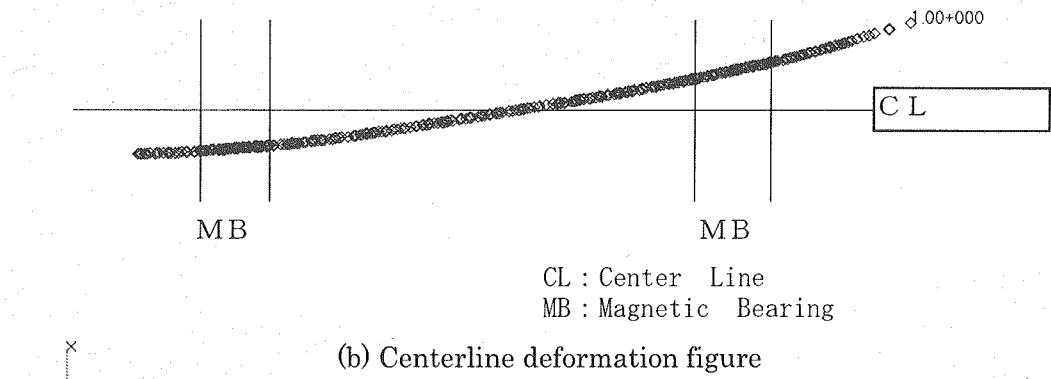
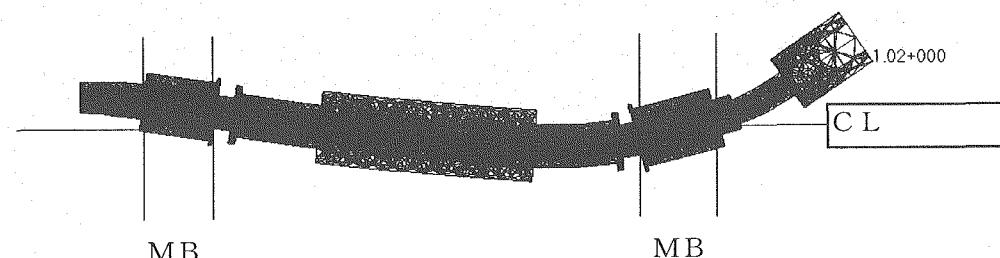


Fig.3.5(2/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E8 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:51:37  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=27.578Hz, Deformation, Displacements.

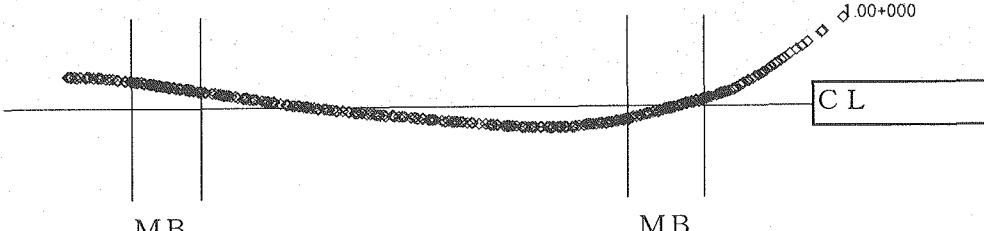


(a) Rotor deformation figure

CL : Center Line  
 MB : Magnetic Bearing

default\_Deformation:  
 Max 1.02+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:54:14  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=27.578Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



(b) Centerline deformation figure

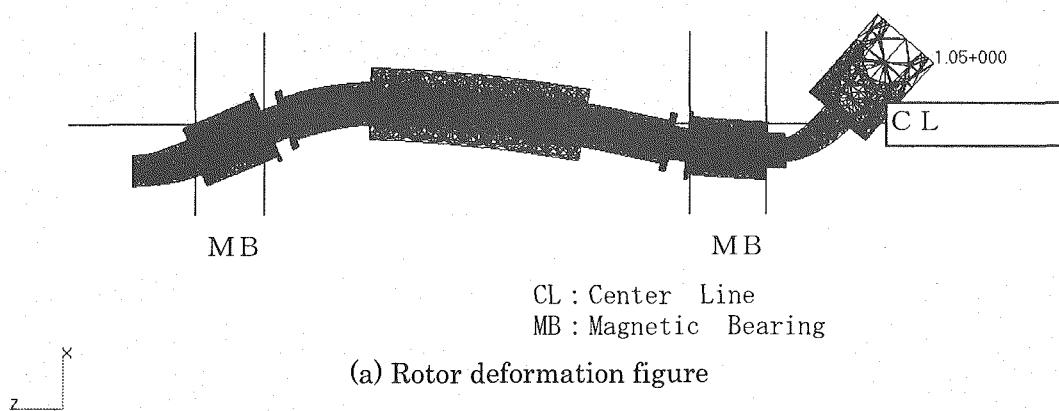
CL : Center Line  
 MB : Magnetic Bearing

default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 32594

Fig.3.5(3/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E8 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:51:50

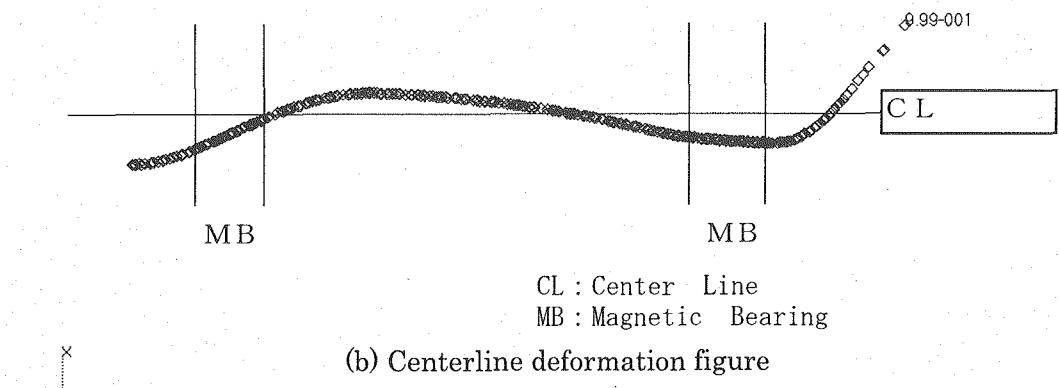
Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=54.34Hz, Deformation, Displacements,



default\_Deformation:  
Max 1.05+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 14:54:24

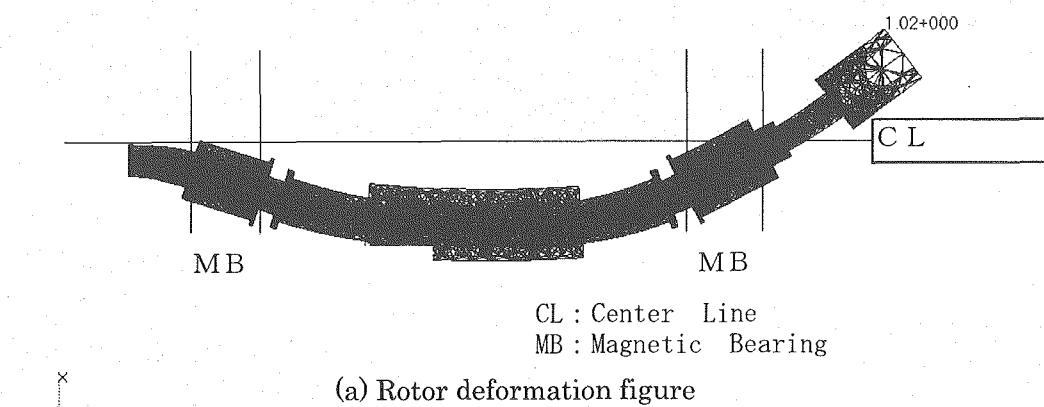
Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=54.34Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



default\_Deformation:  
Max 9.99-001 @Nd 32594

Fig.3.5(4/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
(rigidity 1E8 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:12:54  
 Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=20.531Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:14:48  
 Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=20.531Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

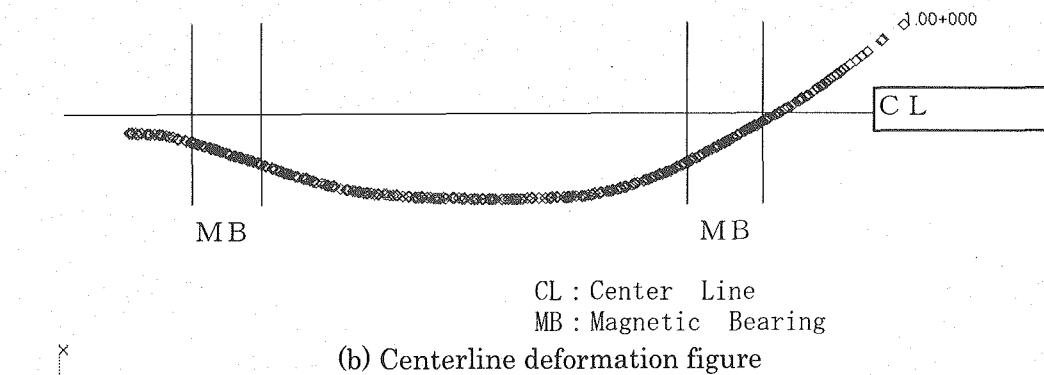
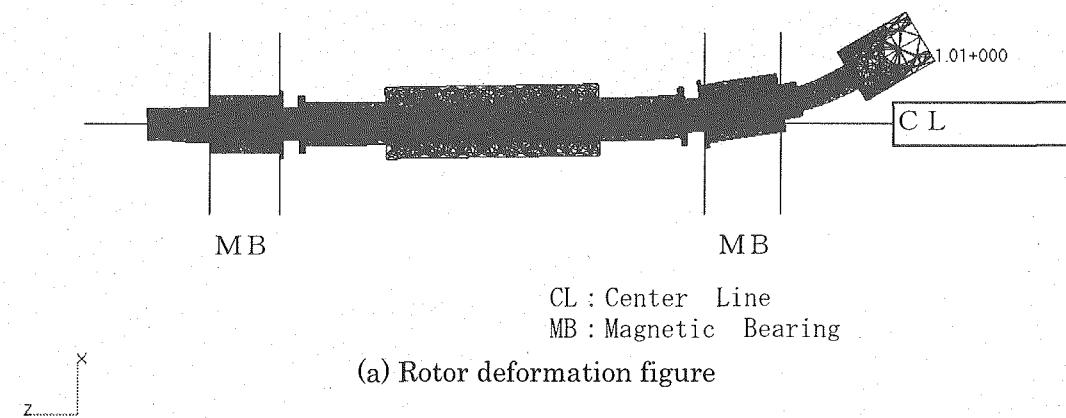


Fig. 3.6(1/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E9 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:13:20  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=27.742Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:15:02  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=27.742Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

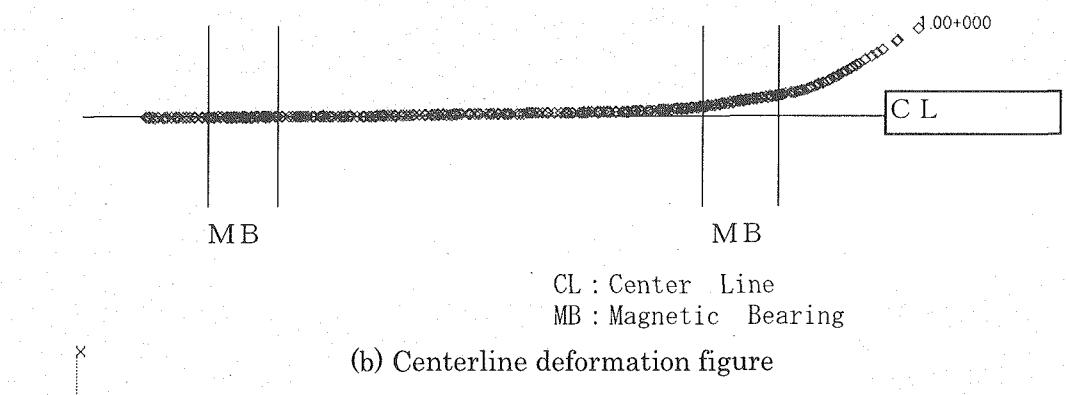
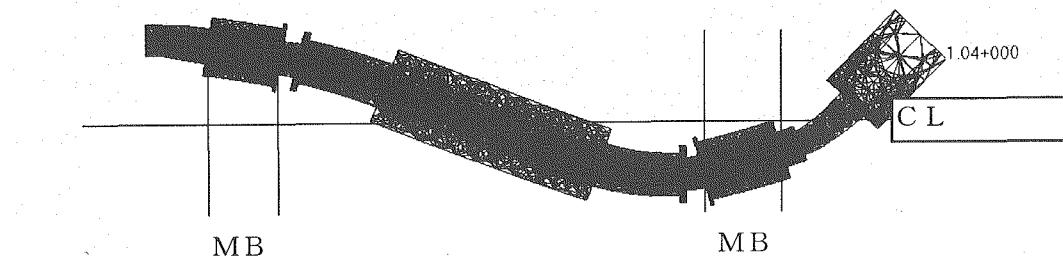


Fig. 3.6(2/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E9 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:13:31  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=40.859Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

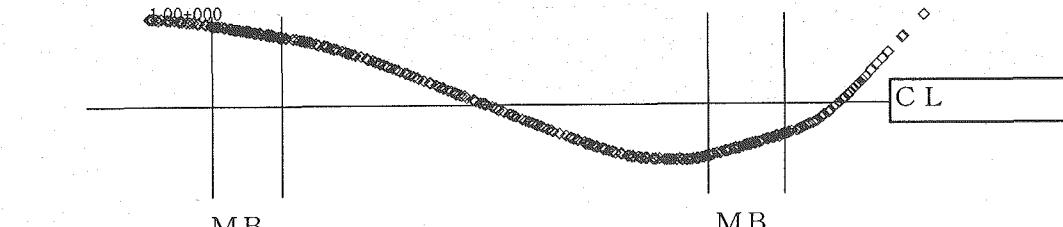


CL : Center Line  
 MB : Magnetic Bearing

(a) Rotor deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.04+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:15:15  
 Deform: Frequency, Step1,Mode3,Freq=40.859Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



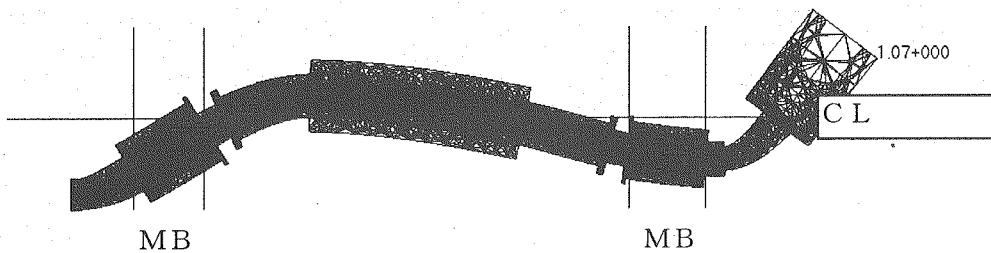
CL : Center Line  
 MB : Magnetic Bearing

(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 37452

Fig. 3.6(3/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E9 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:13:44  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=63.113Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

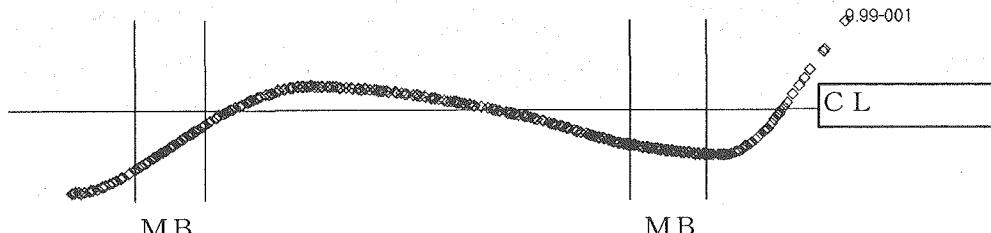


CL : Center Line  
 MB : Magnetic Bearing

(a) Rotor deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.07+000 @Nd 33190

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:15:32  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=63.113Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



CL : Center Line  
 MB : Magnetic Bearing

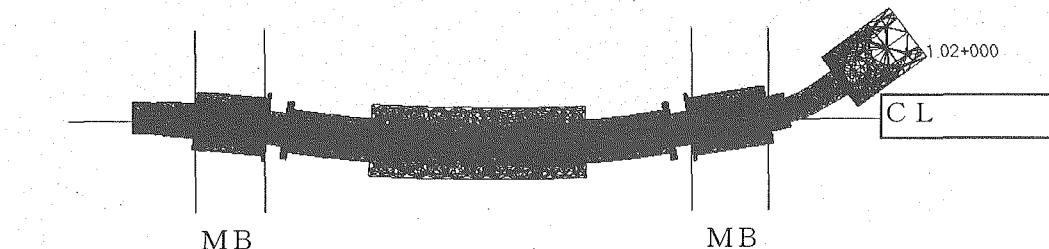
(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 9.99-001 @Nd 32594

Fig. 3.6(4/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E9 bending2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:45:15

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=32.772Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)

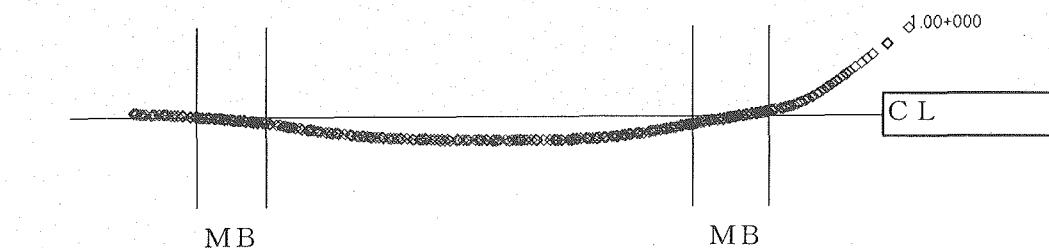


CL : Center Line  
MB : Magnetic Bearing

(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:47:04

Deform: Frequency, Step1,Mode1,Freq=32.772Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



CL : Center Line  
MB : Magnetic Bearing

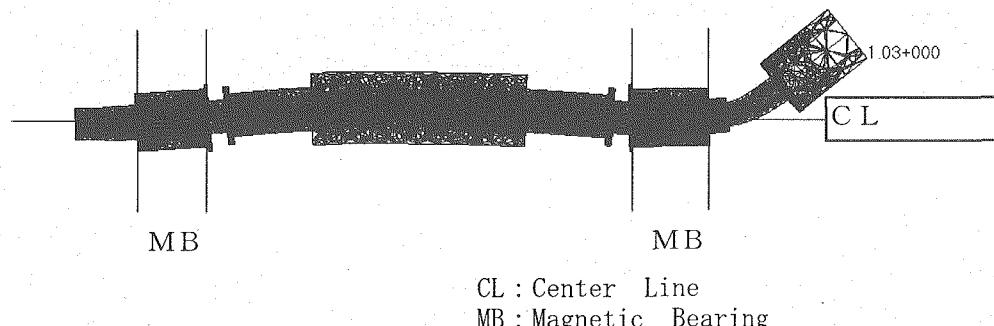
(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
Max 1.02+000 @Nd 33190

default\_Deformation:  
Max 1.00+000 @Nd 32594

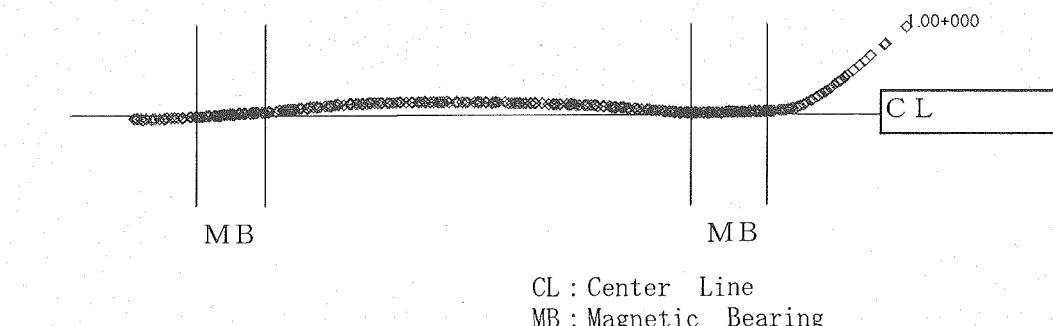
Fig. 3.7(1/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
(rigidity 1E10 rigid1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:45:39  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=39.187Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:47:16  
 Deform: Frequency, Step1,Mode2,Freq=39.187Hz, Deformation, Displacements,, (NON-LAYERED)



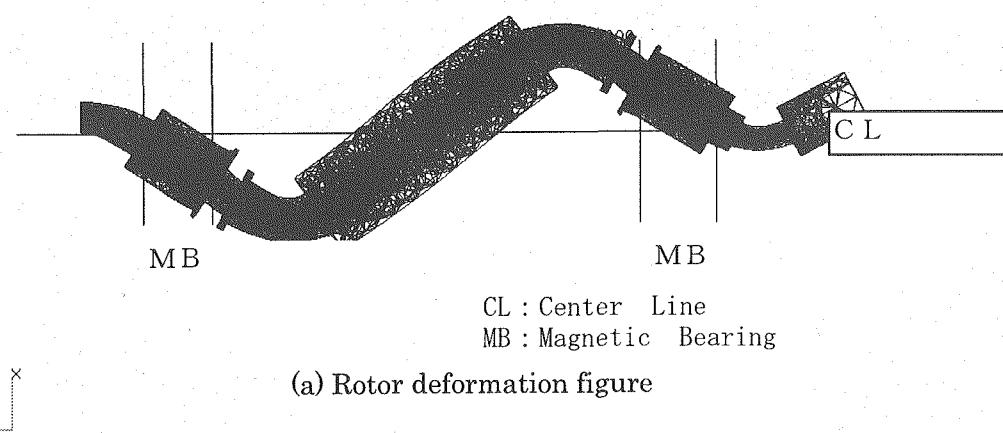
(b) Centerline deformation figure

default\_Deformation:  
 Max 1.03+000 @Nd 33190

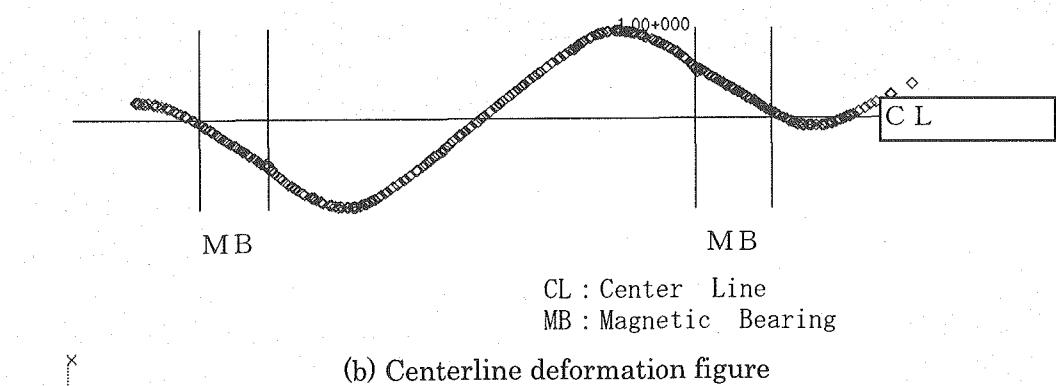
default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 32594

Fig. 3.7(2/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E10 rigid2nd)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:45:53  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=85.609Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



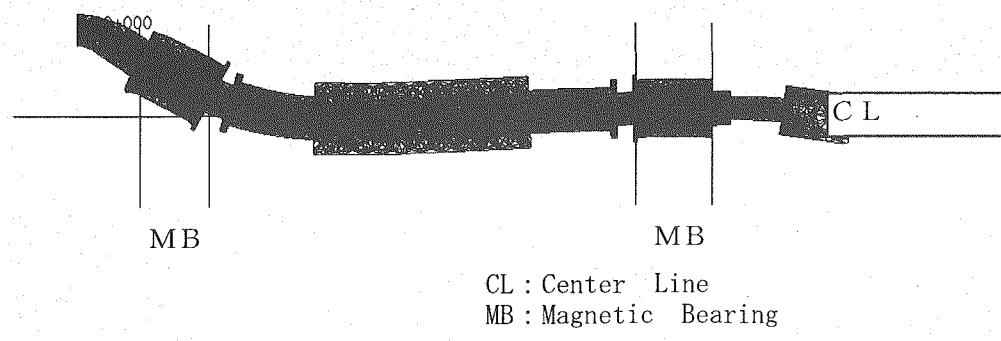
MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:47:29  
 Deform: Frequency, Step1,Mode4,Freq=85.609Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



default\_Deformation:  
 Max 1.00+000 @Nd 37302

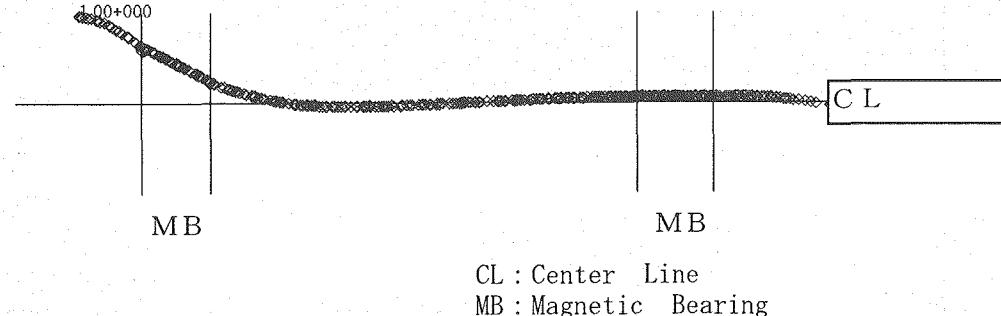
Fig. 3.7(3/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E10 bending1st)

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:46:10  
 Deform: Frequency, Step1,Mode5,Freq=129.41Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



(a) Rotor deformation figure

MSC.Patran 2005 r2 26-Oct-06 15:47:40  
 Deform: Frequency, Step1,Mode5,Freq=129.41Hz, Deformation, Displacements., (NON-LAYERED)



(b) Centerline deformation figure

Fig. 3.7(4/4) Axial direction amplitude distribution of actual rotor  
 (rigidity 1E10 bending2nd)

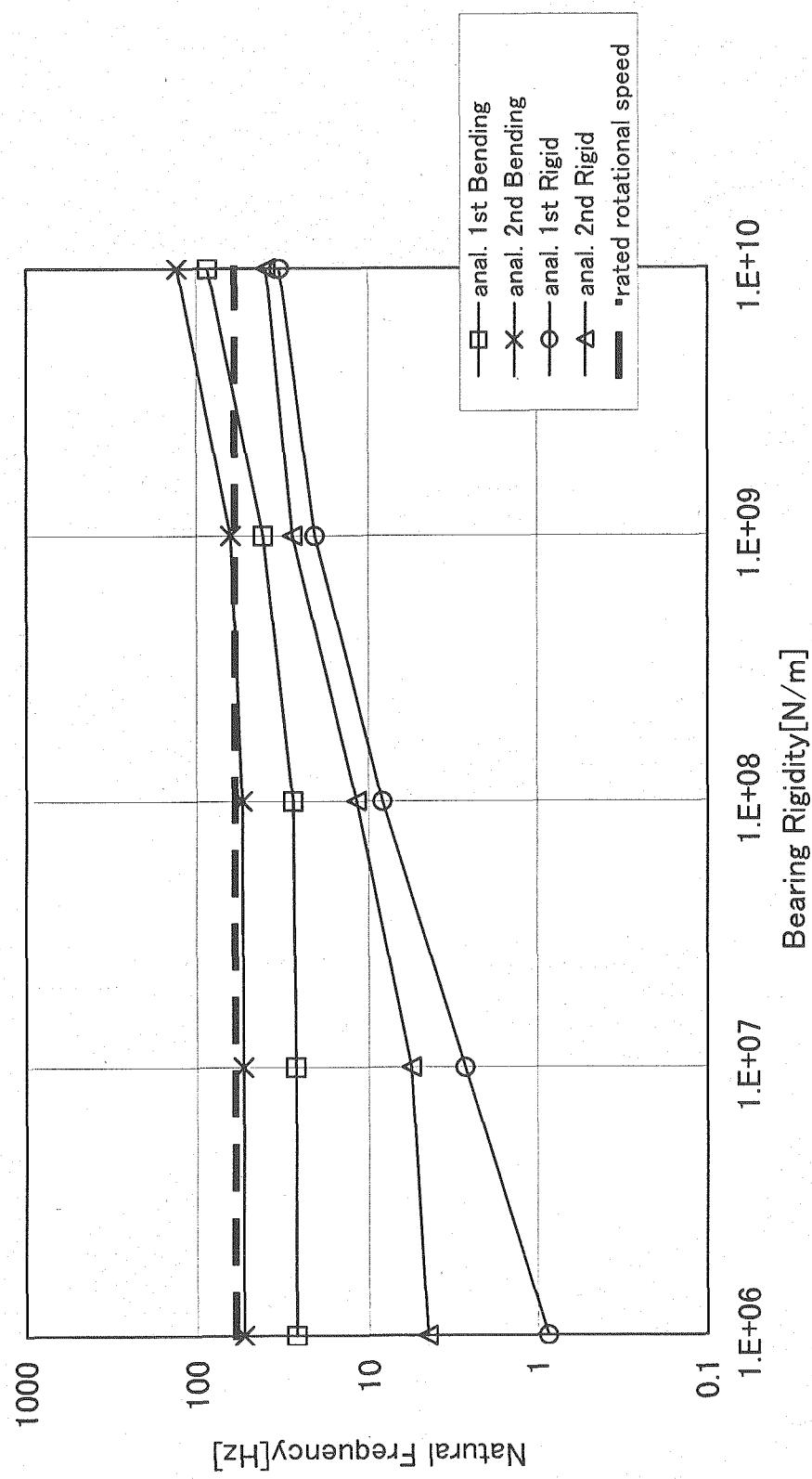
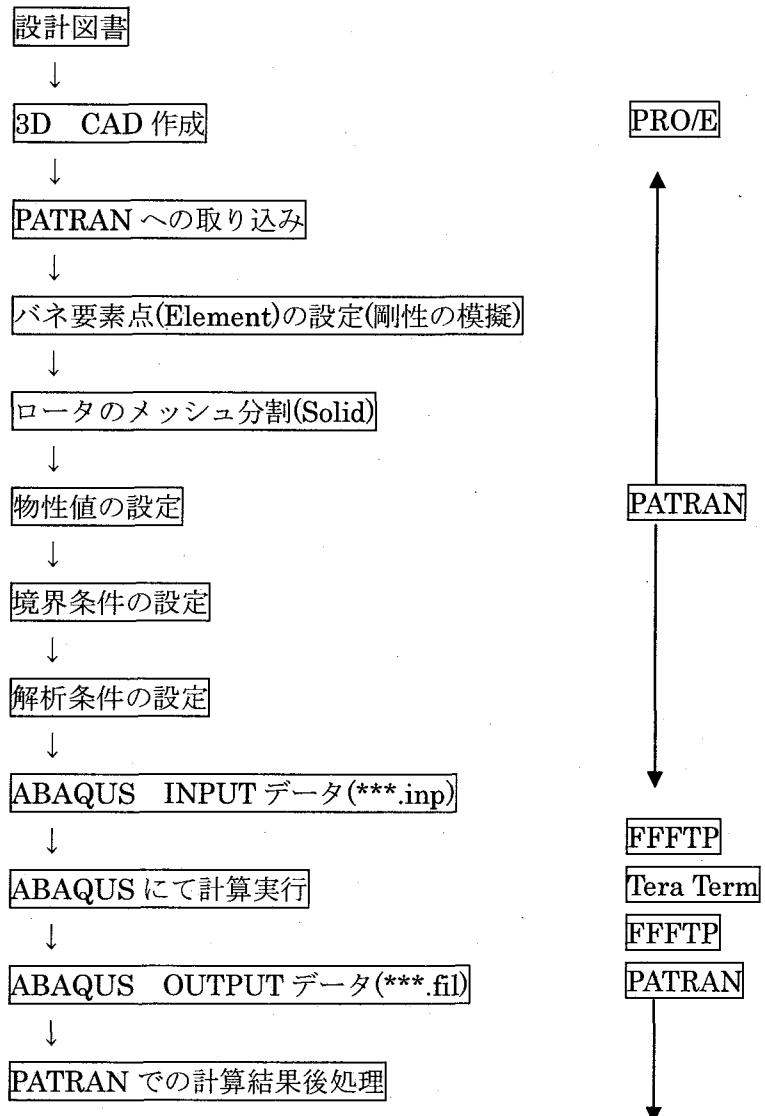


Fig. 3.8 Bearing rigid dependency of rotor natural frequency value(actual rotor)

## 付録 1 : ABAQUS-PATRAN での計算手順詳細

以下に、固有値計算実施手順の詳細を示す。概略フローは以下のとおりである。  
尚、手順については、多少 PATRAN の操作の経験を有することを前提に記す。



## 1. PATRAN ファイル 新規作成

- ①File → New → 任意のファイル名 → Tolerance : Default 選択  
→ Abaqus、Structure 選択 → OK

## 2. PATARAN への 3D-CAD 取り込み

- ①File → Import → Source : PRO/E 選択 → PRO/E OPTION → Module unit  
→ Module unit override : 1m を選択 → ファイル(\*\*\*.prt\*\*)選択 → Apply
- (確認) Geometry → Show → Curve → 任意の辺 pick  
→ length が m 単位になっていることを確認

## 3. バネ要素点の設定

ロータ磁気軸受部表面に Element を設定するため、まず、磁気軸受部表面に Surface Mesh を作成し、Node 点を Element 化する。その後、Surface Mesh 及び Mesh seed 削除、最後に Element の重複分を削除する。

- ①Element → Create → Mesh seed  
→ Surface Mesh を作成するにあたり必要な Mesh seed を設定
- ②Element → Create → Mesh → Surface → Surface Mesh 作成面を選択 → apply  
上記を必要面分、繰り返す。
- ③Element → Create → Element → (auto execute を外す)  
→ 範囲として全体選択 → apply  
まずははじめに作成された Element 群(Elm \*\* : \*\*)を x 方向バネと考える。  
更に、Apply を押すと、もう 1 群の Element 群(Elm \*\* : \*\*)が作成されるので、これを Y 方向バネと考える。
- ④Element → Delite → mesh → Surface → 範囲として全体選択 → apply
- ⑤Element → Delite → mesh seed → 範囲として全体選択 → apply

以降は CAD の作成方法にもよるが、現状では磁気軸受部表面は 2 個の半円筒で作成されており、その境界部にはそれぞれの Surface Mesh より Element を作成したため、境界線上に同一点に重複して Element が設定されているため、X、Y 方向バネ要素 Element 群毎に重複分の削除を行う(この作業を怠ると、剛性を分割数にて除して模擬しているため、分割数を見誤り、硬いバネを設定することに陥る)

- ⑥Element → Delite → Element → 重複分を選択 → apply
- (確認) Element → Show → Element  
→ total の Element 数が、x y バネの合計となっていることを確認
- ⑦Property → Create → 0D → Grounded Spring  
任意の property 名設定 → Input properties →

→剛性入力(1個あたりのバネ剛性(詳細本文参照))  
→select member →③にて作成した Element 郡入力  
(x バネなら x 郡、y バネなら y 郡)  
→add →apply

上記⑥の作業を x、y バネ個々に実施する。

#### 4. ロータのメッシュ分割

①Element →Delite →mesh →Solid →TET 及び TET4 選択  
(Global Edge length は auto) →全体を選択 →apply

#### 5. 物性値の設定

①Material →Create →任意の物質名設定 →Input properties →  
→ヤング率、ポアソン比、密度入力(SI 単位) →apply  
②Properties →Create →3D →Solid →任意の Property 名設定  
→Input properties →①で設定した物質名選択 →select members  
→範囲として全体選択 →add →apply

#### 6. 境界条件の設定

・カップリングとの接続模擬 z 拘束  
①Load/B.C. →Create →Displacement →任意の名称設定  
→Input data →Z 拘束なら translation に< , , 0 >を入力  
→Select Application Region としてカップリング接続面(Surface)選択 →add →apply

#### ・重力設定

①Load/B.C. →Create →Acceleration →→任意の名称設定  
→Input data →- y を重力方向とし< , -9.8, >と入力  
→Select Application Region として全範囲選択 →add →apply

#### 7. 中心線(node)の抽出

①Element →Show →node →Location →  
→xy 投影面にて x=0 の範囲選択 →Node List にピックアップされたものを Note Pat 等  
にメモとして添付・保存。  
(本作業で取得したリストは解析結果の後処理にて使用する)

#### 8. 解析条件の入力

①Analysis →Optical control →アウトプットを ODB(テキスト)と FIL(PATRAN 後処理)とする  
→apply

- ②Analysis → step creation → 任意の step 名入力 → Natural Frequency 選択  
→ Solution parameter にて求めたい最大モード数入力(デフォルト 1)  
→ Output Request にて Strain を none に(容量低減) → apply
- ③Analysis → step selection → ②で作成の step とする → apply
- ④Apply → (Patran 内演算) → フォルダにインプットファイル(\*\*\*.inp)が出来ていること確認

## 9. 解析実行

- ①Abaqus へのインプットファイルの転送
- ②Abaqus での演算実行
- ③Abaqus 計算結果の確認 → テキストデータ(\*\*\*.dat)にて正常に計算できたことの確認
- ④Abaqus からのアウトプット(\*\*\*.fil)の転送

## 10. 解析結果処理(PATRAN)

- ・全体描写
  - ①Analysis → Action : Read Result → Object : both → Method : Translate  
Select Result file にてアウトプット(\*\*\*.fil)選択 → apply(結果取り込み)
  - ②Result → Create → Quick Plot  
→ Select Result Case にて選択したい固有振動値選択  
→ Select Deformation Result にて Displacement 選択 → apply
- ・中心線描写
  - ①Display → Plot/Erase → All Erase  
→ Select Entities にて 7. 項の node を貼り付け → plot
  - ②Result → Create → Deformation  
→ Select Result Case にて選択したい固有振動値選択  
→ Select Deformation Result にて Displacement 選択  
→ Target Entities を node とし 7. 項の node を貼り付け apply
- ・その他、色変化等については割愛する。尚、中心線、軸受両端の線は Geometry にて線画している。

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率(数の)	1	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ピースカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率、放熱束	ワット	W	$N \cdot m$
電荷、電気量	クーロン	C	J/s
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	アンドレード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シemenス	S	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	$A/V$
インダクタンス	ヘンリ	H	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/m^2$
光束度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー	ベクレル	Bq	$Wb/A$
ギー分与、カーマ	グレイ	Gy	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	$J/kg$
人線量当量、組織線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測定では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg·s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン每秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン每平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エンタルピー	每ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱質量エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジユール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	c
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	T	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^9$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	p
$10^6$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アトト	a
$10^2$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) ln10 (Np)$

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dm^2=10^{-2} m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
オンストローク	A	$1A=0.1nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1b=100fm^2=10^{-28} m^2$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ポアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストップス	St	$1 St=1cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^8 Wb$
スチール	sb	$1 sb=1cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホット	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-2} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 IX unit=1.002 \times 10^{-4} fm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トーラル	Torr	$1 Torr=(101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101.325 Pa$
カリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$