

UDC 539.31.4:
621.452.322

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-361

ファンジェットエンジン FJR710/10 ロータの
曲げ剛性試験*

祖父江 靖 ・ 宮地 敏雄

DP-55

1978年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ファンジェットエンジンFJR710/10ロータの 曲げ剛性試験*

祖父江 靖**・宮地敏雄**

1. まえがき

ロータのつくりあいに起因するロータの振動の解析および振動の低減対策の基礎資料としてロータの曲げ剛性を求めることが必要である。ロータの曲げ剛性分布が不適当な場合にはエンジンの運転に際し、ロータの振動による変形がある限度を越え、動翼とケーシング間に異常接触を起し運転不能となるなどの重大な欠陥を生ずる。設計時には理論解析によって求めた曲げ剛性によって、これらの変形は検討されているが、ロータは数個の複雑な形状の部品がボルト結合によって構成されたものであり、このような構造物の曲げ剛性を図面から理論解析によって求めることは非常に困難である。従って振動によって起る前述のような不測の事態を回避するためには、ロータの曲げ剛性分布を実測しておくことが必要である。このような経験的資料を蓄積することによって設計時に精度の高い曲げ剛性分布を求めることも可能となる。

本報告は、FJR710/10エンジンのロータの曲げ剛性試験について述べる。なお、このエンジンは高圧ロータおよび低圧ロータからなる二軸エンジンであるためこれら二個のロータについて測定を行った。

2. 試験体

曲げ剛性を測定するロータは、力を伝達する強度部品および全体の剛性に寄与するフランジ等を組立てたもので曲げ剛性に関係のない部品は取り外したものをを用いた。また、軸受は曲げ変形を拘束しない、単純支持に近い支持条件を与えるため複列自動調心型コロ軸受を使用した。各軸受のハウジングは上下二つ割りとし、ボルトを締めることによって軸受外輪に上下方向の圧力を加え外輪をわずかながら変形させて軸受の半径方向の遊びを無くした。

曲げ剛性を測定するロータの詳細を図に示す。図1は高圧圧縮機ロータ部分、図2は高圧タービンロータ部分、

図3は低圧タービンロータのタービン1段ディスクを取り外したものである。

高圧ロータは圧縮機前端、圧縮機とタービンの中間およびタービンの後端を軸受で支持されている。これらの軸受を前から順に№1軸受、№2軸受および№3軸受と呼ぶことにする。

低圧ロータはファン部も含めると4個の軸受で支持されている。これらの軸受を前から順に№01軸受、№02軸受、№03軸受および№04軸受と呼ぶ。

3. 測定の方法および結果

ロータの曲げ剛性の測定は、複列自動調心型コロ軸受を架台に取り付けロータの荷重負荷位置に容量500kgの引張り測定用リング形荷重計の付いた金具(ワイヤーロープまたは鋼製ベルト)を掛け、これをチェンブロックで引張って所定の荷重を荷重し、この時のロータ各標点の変位をダイヤルゲージで測定する方法によって行った。

この実験では最大荷重を約500kgとし、百分の数mm程度の僅かなたわみから剛性を算出している。この理由は、これらのロータが剛性試験後もエンジンに組み込んで使用するものであるため、万一にも永久変形を生じてはならないので、十分安全な応力の範囲で試験を行う必要があったためである。なお、たわみが小さいため測定値の相対誤差が大きくなることは避けられないが、後述するようにこの試験の目的に対しては満足な値が得られた。

図4は高圧圧縮機ロータの剛性試験の様子を示したものである。変形を測定するためロータの上下にダイヤルゲージ固定用のはりを設け、これにダイヤルゲージ取付棒がロータに対して垂直に取り付けられる。最小目盛0.01mmのダイヤルゲージは、既製の触針に代へ先端を円錐とした直径4mmのドリルロッドを用いて長さを調整し、供試ロータの各測定標点に垂直に接触させる。

高圧ロータは、圧縮機部分とタービン部分から構成される3個の軸受を持ったロータである。3個の軸受を持つロータの曲げ剛性を測定するため前端あるいは後端の軸受の支持を外し、変形を拘束しないようにして高圧圧

*昭和53年5月10日 受付

**原動機部

縮機ロータと高圧タービンロータとについて別々に試験を行った。高圧圧縮機ロータの実験は№1軸受(23024B)と№2軸受(23022B)を固定し、荷重を圧縮機5段のダブル溝にワイヤーロープを掛け負荷する場合と圧縮機6段の同様な位置に負荷する場合について行った。測定回数はいずれも3回ごとにロータを180°回転させることによって荷重方向を変え、残留変形の有無を調べながらそれぞれ12回行った。その平均荷重は、圧縮機5段に負荷した場合は503 kg、6段の場合は502 kgである。なお、残留変形の測定は3回の測定後ロータを180°回転させた最初の測定時に行った。すなわち無負荷時のダイヤルゲージの指示値を記録しておき、所定の荷重を負荷し除荷した後の指示値の記録とを比較し、その差異の有無を調べる方法によった。高圧タービンロータの実験は№2軸受と№3軸受(23022B)を固定し、タービン1段ディスクの外周に鋼製ベルトを掛けて荷重を加えた場合について行った。測定回数は高圧圧縮機ロータの場合と同様の方針で合計12回行った。その平均荷重は510 kgである。

低圧タービンロータは、ファンを駆動するための長い中空軸とタービンロータ部分で構成されている。実験は№03軸受(23022B)と№04軸受(23024B)を固定し、タービンロータ部分のみについて行った。荷重の負荷はタービン3段ディスクの外周に鋼製ベルトを掛け3回ごとにロータを180°回転させ合計15回行った。その平均荷重は508 kgである。

上に述べた方法による測定結果を表1に示す。この表に示した計測値は数回の実験における実測値の平均値であり、実際のたわみは計測値から軸受の変位を補正したロータの正味のたわみである。

なお、全ての試験において参考文献(1)に報告されているような供試ロータの残留変形は全く認められなかった。

4. 剛性分布の求め方およびその結果

ロータの曲げ剛性分布は、ロータの各標点のたわみの測定値に最小二乗法により多項式の近似曲線をあてはめ、この曲線の曲率とロータに作用する曲げモーメント分布から求める。なお、一例として高圧圧縮機6段に502kg負荷した場合の圧縮機ロータの曲げモーメント分布と曲率分布を図5と図6に示す。

最小二乗法の計算を行うにあたっては測定値の分布の中で著しく外れている値がある場合には、この測定値を除外した。また、たわみの測定標点が中央部に片寄りしており、この少数の測定値の分布から計算したのでは負の曲率となる部分が生ずる場合には軸受部附近に測定値分

布から内挿した値も計算に使用した。なお、この計算では10mm間隔で剛性分布を求めている。

次に上記の方法によって求めた各供試ロータの多項式近似曲線と剛性分布を図示する。図7-1は高圧圧縮機ロータの圧縮機5段に503 kg負荷した場合、図8-1は同じロータの圧縮機6段に502 kg負荷した場合を示す。また、図9-1は高圧タービンロータのタービン1段に510 kg負荷した場合、図10-1は低圧タービンロータのタービン3段に508 kg負荷した場合をそれぞれ示す。

5. たわみ曲線の計算方法および計算結果

ロータのたわみ曲線は、ロータのつりあいによって生ずる振動の計算プログラム(2)を利用して求めた。この計算プログラムを利用した理由は、たわみを計算するプログラムを新規に作成しなくても、このプログラムを応用して容易に、かつ、精度よくたわみ曲線を求めることが可能であったためである。

この計算プログラムでは、ロータの軸方向に沿った曲げ剛性分布と任意断面に偏重心と質量で定めたつりあい量を与えるとそのロータの強制振動による振幅の分布が求まる。

振動の計算では1区間の剛性は一定とするので、支点間をいくつかの任意の区間に区切り曲率と曲げモーメント分布から求めた曲げ剛性分布についてその区間に含まれる剛性分布の平均値をその区間の剛性とする。従って、たわみ曲線を求めるための曲げ剛性分布は例えば図7-1そのものではなく、上記の方法によって近似した階段状の曲げ剛性分布、例えば図7-2を使用する。

各供試ロータのたわみ曲線は、そのロータの曲げ剛性分布と荷重負荷位置に荷重に相当するつりあい量(偏重心は全て 10^4 mm、質量は荷重503 kgの場合1.1238 kg、荷重502 kgの場合は1.1216 kg、荷重510 kgの場合は1.1395 kg、荷重508 kgの場合は1.135 kg)を与えて求めた。なお、この計算での回転数は200 rpmとした。これらの供試ロータの一次曲げ固有振動数はいずれも10000 rpm以上であるから、200 rpm程度の回転数におけるつりあい振動の振幅は静荷重によるたわみと等しいと考えられる。従って、この計算で求めた振幅の分布を静荷重の負荷によって生ずるたわみとみなした。

各供試ロータについて振動計算プログラムに与えた剛性分布を表2に示す。また、上記の剛性分布と計算の結果求められたたわみ曲線を図示する。すなわち、図7-2は高圧圧縮機ロータの圧縮機5段に503 kg負荷した場合、図8-2は同じロータの圧縮機6段に502 kg負荷した場合であり、図9-2は高圧タービンロータのタービン1

段ディスクに 510 kg 負荷した場合、図10-2は低圧タービンロータのタービン3段ディスクに 508 kg 負荷した場合の剛性分布と計算によるたわみ曲線である。なお、たわみの実測値もあわせて示した。

また、曲げ剛性分布の差異がたわみ曲線に及ぼす影響について調べるため次の方法で高圧圧縮機ロータのたわみ曲線を求めた。(1)曲げ剛性分布は圧縮機5段に負荷して求めた値とし、荷重は圧縮機6段に負荷した場合、(2)これらの条件の逆の場合すなわち剛性分布は6段負荷で求めた値とし、荷重は5段負荷とした場合について行った。(1)については図7-3、(2)については図8-3に示す。さらに曲げ剛性分布は二種の剛性分布を平均した分布とし、荷重は(3)圧縮機5段に負荷した場合、(4)圧縮機6段に負荷した場合についても行った。(3)を図7-4、(4)を図8-4にそれぞれ示した。なお、参考のため各測定標点のたわみの実測値と計算値を表3に比較して示した。

6. はり理論による曲げ剛性

はり理論による曲げ剛性は、図面に示された寸法から求めた各断面の断面2次モーメントと材料の縦弾性係数の積として得られた曲げ剛性分布である。

断面2次モーメントを求める場合に次の点に注意を払った。供試ロータの断面は軸方向に複雑に変化しているので、断面2次モーメントの軸方向分布も複雑になるが、ロータの全体的な剛性分布に大きい誤差が生じない程度に代表的な断面を抽出し、その断面2次モーメントを求めた。また、実際の曲げ剛性分布には、ディスクの部分の剛性はあまり影響しないと考えられるが、純粋にはり理論によって曲げ剛性分布を求めた場合どのようにするか調べるためディスクの部分についても代表的断面の断面2次モーメントを求めた。

このように断面2次モーメントの計算は、実物の詳細な形状について行ったものではなく、代表的断面の連なった実物を理想化したモデルについて行った。

図11は断面2次モーメントを求めるため高圧ロータをモデル化した図であり、図12は低圧タービンロータの同様なモデル化を示す。

また、図11に高圧ロータ、図12に低圧タービンロータの材質および縦弾性係数もあわせて示した。図11に示すように高圧圧縮機ロータはTi-6Al-4V(6%Al, 4%V, 残Ti), AM355(15.5%Cr, 4.5%Ni, 3%Mo, 残Fe), A286(25%Ni, 15%Cr, 2%Ti, 1.5%Mn, 1.3%Mo, 0.3%V, 残Fe)の3種で構成され、高圧タービンロータはAM355, Inconel 718(19%Cr, 17

%Fe, 5%Cb, 3%Mo, 0.8%Ti, 0.6%Al, 残Ni)の2種で構成されている。低圧タービンロータは図12に示すようにInconel 718のみである。

図13は、はり理論による曲げ剛性分布を高圧ロータについて求めたものであり、図14は、同じく低圧タービンロータについて求めたものである。

また、はり理論による曲げ剛性分布とたわみの実測値から求めた曲げ剛性分布を比較した図を図15および図16に示す。なお、この図は図13、図14の曲げ剛性の尺度を拡大したものである。図15、図16を見るとたわみの実測値から求めた曲げ剛性分布は、はり理論で求めた曲げ剛性分布に比べ著しく小さな部分がある。このような現象が生ずる原因としては、供試ロータが図1、図2、図3の断面図から明らかなように曲げ変形を起こしやすい蛇腹状の部分があること、また、ボルト結合部があることなどによって生じていると考えられる。

7. 考 察

不つりあいによって生ずる振動の計算プログラムに実験で求めたロータの曲げ剛性分布を与えて振幅の分布を求めると図7-2、図8-2、図9-2、図10-2に示すように実際のたわみと良く一致している。

実験方法の妥当性を検討するため高圧圧縮機ロータに2種の荷重負荷位置を設定し、それぞれについて実験を行った。この結果完全に同一の曲げ剛性分布は得られなかったが、かなり良く一致している(図7-1、図8-1参照)。また、剛性分布に上記のような差異がある場合に、たわみ曲線がどの程度異なるか(図7-3、図8-3、図7-4、図8-4および表2参照)調べたが、計算と実験のたわみの誤差は大部分が2~4%以内で最大でも約7%の誤差である。

測定点の変位が最大0.07mm程度の小さい値であることおよびダイヤルゲージによる測定精度等を考慮すれば、ここで求めた剛性分布は、本実験方法の範囲で十分に信頼性のあるものである。

高次の曲げ振動を対象とする計算に対しては、曲げ剛性の長さ方向の分布をより詳細に求めることが必要であるが、本報告で取扱ったファンジェットエンジンFJR710/10の運転で問題となるのは各スパンの一次曲げ固有振動数前後の回転数であるから、ここで求めた剛性分布で振動解析に充分役立つものと思われる。

なお、この種の構造物の曲げ剛性分布を純粋にはり理論で求めると図13、図14から明らかなように、ディスクの部分は極端に大きい値となるが、実際にはこのような分布になることはないと考えられる。そこで、ディス

クの部分の剛性を除外し、殻構造部分の値だけを連ねた包絡線と実際の曲げ剛性分布を比較すると、図15、図16に示すように、実際の曲げ剛性分布は包絡線より更に低い値であることがわかる。このような構造物の曲げ剛性分布を考える場合には、はり理論による曲げ剛性分布の値よりも大幅に低くなることに注意すべきである。

8. あとがき

本報告は、ファンジェットエンジン F J R 710/10 のロータの曲げ剛性分布の測定について述べたものである。ここに述べた方法によって求めた曲げ剛性は、前述の検証からみて一応十分な精度をもっていると思われる。

なお、本試験に供したエンジンは通商産業省工業技術院の大型工業技術開発による航空用エンジンの研究開発第1期計画により試作されたものである。

本試験にあたり、当所原動機部松木正勝部長、航空機

公害研究グループ鳥崎忠雄総合研究官の指導をいただいた。また、本試験の計画については F J R 710 デザインセンター井上利昭氏、山本伸一氏、横田晴臣氏の協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 宮地, 小河, 星谷, 祖父江, ジェットエンジン用薄肉組立ロータの曲げ剛性(静荷重試験と振動試験による測定と有限要素法による計算)航空宇宙技術研究所報告 TR-329 (1973年7月)
- 2) 宮地, 星谷, 祖父江, ロータのつりあいによって生ずるジェットエンジンの振動の研究(第1報単軸ジェットエンジンに関する実験と理論解析)航空宇宙技術研究所報告 TR-487 (1977年2月)

表1. 実 験 結 果

注記； 下表においてHC2Rは高圧圧縮機2段，HT1Rは高圧タービン1段ディスク，LT2Rは低圧タービン2段ディスクを表わす。

(1) 高圧圧縮機ロータの圧縮機5段に503 kg 負荷した場合

単 位 mm

| 測 定 ケ 所 | №1軸受 | HC2R | HC3R | HC4R | HC6R | HC7R | HC8R | №2軸受 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 計 測 値 | 0.0114 | 0.0517 | 0.0663 | 0.0708 | 0.0708 | 0.0678 | 0.0623 | 0.0161 |
| 実 際 の た わ み | 0.0 | 0.0393 | 0.0534 | 0.0576 | 0.0565 | 0.0536 | 0.0478 | 0.0 |
| №1軸受からの距離 | 0 | 140 | 202 | 255 | 345 | 388 | 425 | 647 |

(2) 高圧圧縮機ロータの圧縮機6段に502 kg 負荷した場合

| 測 定 ケ 所 | №1軸受 | HC2R | HC3R | HC4R | HC5R | HC7R | HC8R | №2軸受 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 計 測 値 | 0.0102 | 0.0497 | 0.0643 | 0.0686 | 0.0748 | 0.0718 | 0.0668 | 0.0190 |
| 実 際 の た わ み | 0.0 | 0.0376 | 0.0514 | 0.0549 | 0.0605 | 0.0563 | 0.0508 | 0.0 |
| №1軸受からの距離 | 0 | 140 | 202 | 255 | 301 | 388 | 425 | 647 |

(3) 高圧タービンロータのタービン1段ディスクに508 kg 負荷した場合

| 測 定 ケ 所 | №2軸受 | フランジ1 | フランジ2 | フランジ3 | HT1R | HT2R | №3軸受 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 計 測 値 | 0.0104 | 0.0201 | 0.0268 | 0.0295 | 0.0391 | 0.0352 | 0.0118 |
| 実 際 の た わ み | 0.0 | 0.0095 | 0.0160 | 0.0186 | 0.0277 | 0.0237 | 0.0 |
| №2軸受からの距離 | 0 | 100 | 159 | 216 | 425 | 497 | 618 |

(4) 低圧タービンロータのタービン3段ディスクに508 kg 負荷した場合

| 測 定 ケ 所 | №03軸受 | LT2R | LT3R | LT4R | 5 | 6 | №04軸受 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 計 測 値 | 0.0128 | 0.0249 | 0.0264 | 0.0209 | 0.0204 | 0.0182 | 0.0079 |
| 実 際 の た わ み | 0.0 | 0.0132 | 0.0156 | 0.0110 | 0.0110 | 0.0092 | 0.0 |
| №03軸受からの距離 | 0 | 92 | 165 | 238 | 276 | 306 | 399 |

表2. 供試ロータのたわみ(振幅の分布)の計算に与えた曲げ剛性分布

| 高圧圧縮機ロータ | | | | 高圧タービンロータ | | 低圧タービンロータ | |
|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| 高圧圧縮機5段に負荷の場合 | | 高圧圧縮機6段に負荷の場合 | | 高圧タービンディスク1段に負荷の場合 | | 低圧タービンディスク3段に負荷の場合 | |
| √1軸受中心からの距離 mm | 曲げ剛性 kg·mm ² | √1軸受中心からの距離 mm | 曲げ剛性 kg·mm ² | √2軸受中心からの距離 mm | 曲げ剛性 kg·mm ² | √603軸受中心からの距離 mm | 曲げ剛性 kg·mm ² |
| 0~50 | 2.0×10 ¹⁰ | 0~50 | 2.2×10 ¹⁰ | 0~50 | 1.73×10 ¹⁰ | 0~92 | 1.13×10 ¹⁰ |
| 50~100 | 2.2×10 ¹⁰ | 50~100 | 2.7×10 ¹⁰ | 50~100 | 6.32×10 ¹⁰ | 92~125 | 2.99×10 ¹⁰ |
| 100~140 | 2.6×10 ¹⁰ | 100~140 | 3.1×10 ¹⁰ | 100~125 | 1.43×10 ¹¹ | 125~165 | 4.74×10 ¹⁰ |
| 140~202 | 3.2×10 ¹⁰ | 140~202 | 3.6×10 ¹⁰ | 125~159 | 1.5×10 ¹¹ | 165~276 | 6.18×10 ¹⁰ |
| 202~255 | 4.3×10 ¹⁰ | 202~255 | 4.2×10 ¹⁰ | 159~175 | 1.82×10 ¹¹ | 276~306 | 5.67×10 ¹⁰ |
| 255~301 | 5.5×10 ¹⁰ | 255~301 | 4.8×10 ¹⁰ | 175~250 | 2.02×10 ¹¹ | 306~325 | 5.05×10 ¹⁰ |
| 301~425 | 6.3×10 ¹⁰ | 301~400 | 5.7×10 ¹⁰ | 250~275 | 1.84×10 ¹¹ | 325~350 | 4.12×10 ¹⁰ |
| 425~450 | 6.2×10 ¹⁰ | 400~450 | 5.3×10 ¹⁰ | 275~300 | 1.65×10 ¹¹ | 350~399 | 1.75×10 ¹⁰ |
| 450~500 | 5.7×10 ¹⁰ | 450~500 | 4.7×10 ¹⁰ | 300~350 | 1.37×10 ¹¹ | | |
| 500~550 | 4.4×10 ¹⁰ | 500~550 | 4.1×10 ¹⁰ | 350~425 | 1.0×10 ¹¹ | | |
| 550~600 | 2.4×10 ¹⁰ | 550~600 | 3.3×10 ¹⁰ | 425~450 | 7.14×10 ¹⁰ | | |
| 600~647 | 1.0×10 ¹⁰ | 600~647 | 1.8×10 ¹⁰ | 450~475 | 5.1×10 ¹⁰ | | |
| | | | | 475~497 | 3.67×10 ¹⁰ | | |
| | | | | 497~618 | 1.53×10 ¹⁰ | | |

表 3. 実際のたわみと計算値の比較

注記； 下表においてHC2Rは高圧圧縮機2段，HT1Rは高圧タービン1段ディスク，LT2Rは低圧タービン2段ディスクを表わす。

(1) 高圧圧縮機ロータの圧縮機5段に503 kg 負荷した場合

単 位 mm

| 測定ケ所 | №1軸受 | HC2R | HC3R | HC4R | HC6R | HC7R | HC8R | №2軸受 |
|--------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 実際のたわみ | 0.0 | 0.0393 | 0.0534 | 0.0576 | 0.0565 | 0.0536 | 0.0478 | 0.0 |
| HC5Rに荷重を負荷して求めた剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0409 | 0.0520 | 0.0570 | 0.0566 | 0.0530 | 0.0485 | 0.0 |
| HC6Rに荷重を負荷して求めた剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0407 | 0.0527 | 0.0587 | 0.0592 | 0.0557 | 0.0511 | 0.0 |
| 上記二種の剛性分布を平均した剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0406 | 0.0521 | 0.0576 | 0.0576 | 0.0541 | 0.0495 | 0.0 |

(2) 高圧圧縮機ロータの圧縮機6段に502 kg 負荷した場合

| 測定ケ所 | №1軸受 | HC2R | HC3R | HC4R | HC5R | HC7R | HC8R | №2軸受 |
|--------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 実際のたわみ | 0.0 | 0.0376 | 0.0514 | 0.0549 | 0.0605 | 0.0563 | 0.0508 | 0.0 |
| HC6Rに荷重を負荷して求めた剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0385 | 0.0502 | 0.0566 | 0.0591 | 0.0561 | 0.0519 | 0.0 |
| HC5Rに荷重を負荷して求めた剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0385 | 0.0493 | 0.0547 | 0.0567 | 0.0533 | 0.0492 | 0.0 |
| 上記二種の剛性分布を平均した剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0382 | 0.0495 | 0.0553 | 0.0575 | 0.0543 | 0.0501 | 0.0 |

(3) 高圧タービンロータのタービン1段ディスクに510 kg 負荷した場合

| 測定ケ所 | №2軸受 | フランジ1 | フランジ2 | フランジ3 | HT1R | HT2R | №3軸受 |
|--------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 実際のたわみ | 0.0 | 0.0095 | 0.0160 | 0.0186 | 0.0277 | 0.0237 | 0.0 |
| HT1Rに荷重を負荷して求めた剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0100 | 0.0150 | 0.0194 | 0.0278 | 0.0243 | 0.0 |

(4) 低圧タービンロータのタービン3段ディスクに508 kg 負荷した場合

| 測定ケ所 | №03軸受 | LT2R | LT3R | LT4R | 5 | 6 | №04軸受 |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 実際のたわみ | 0.0 | 0.0132 | 0.0156 | 0.0110 | 0.0110 | 0.0092 | 0.0 |
| LT3Rに荷重を負荷して求めた剛性分布からたわみを計算した値 | 0.0 | 0.0133 | 0.0157 | 0.0137 | 0.0114 | 0.0091 | 0.0 |

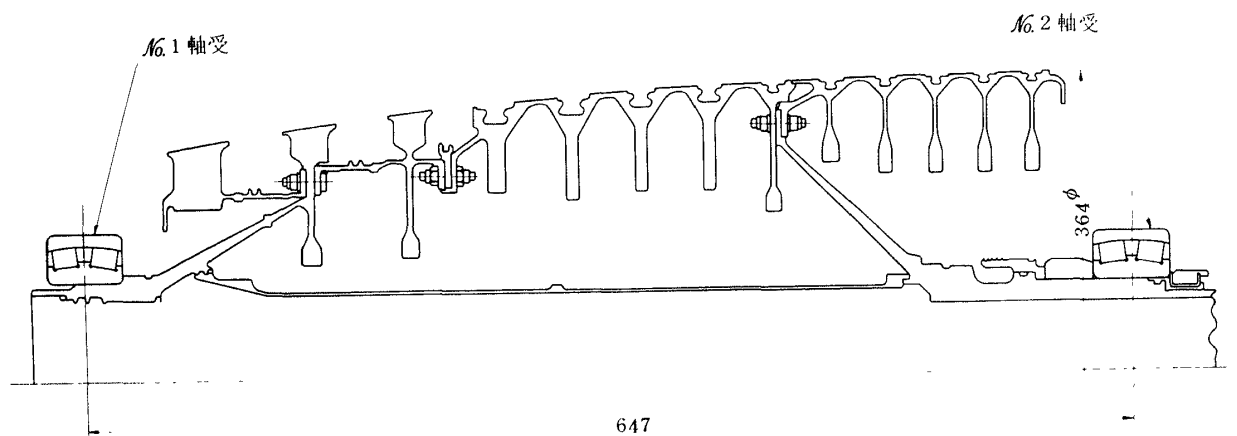


図 1. 高圧圧縮機ロータ断面図

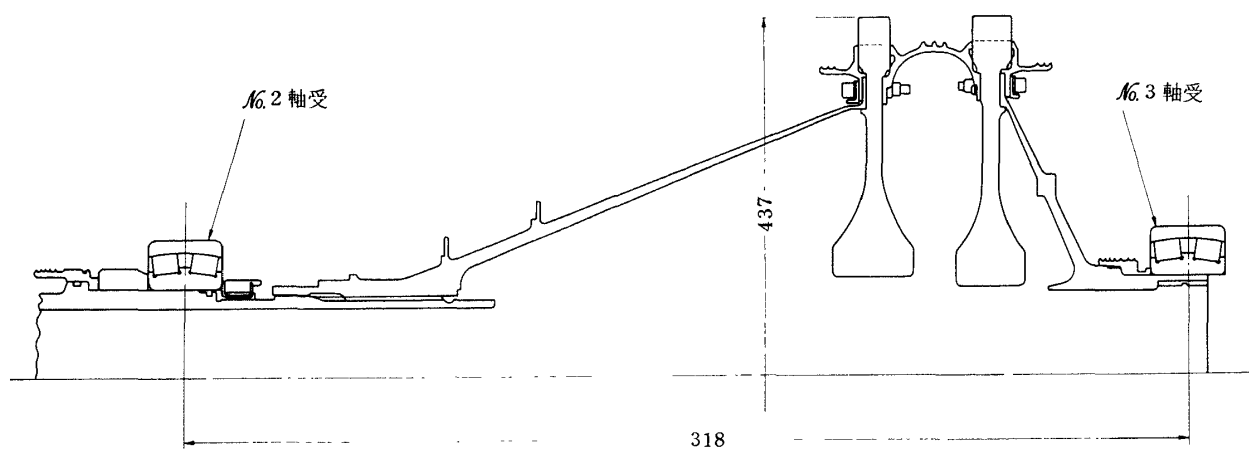
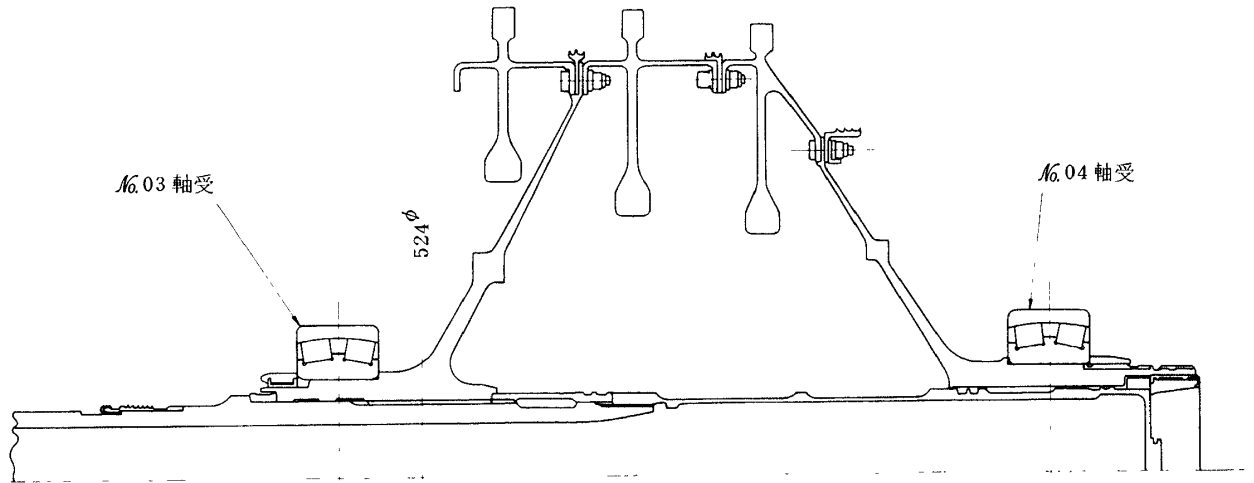


図 2. 高圧タービンロータ断面図



399

図3. 低圧タービンロータ断面図

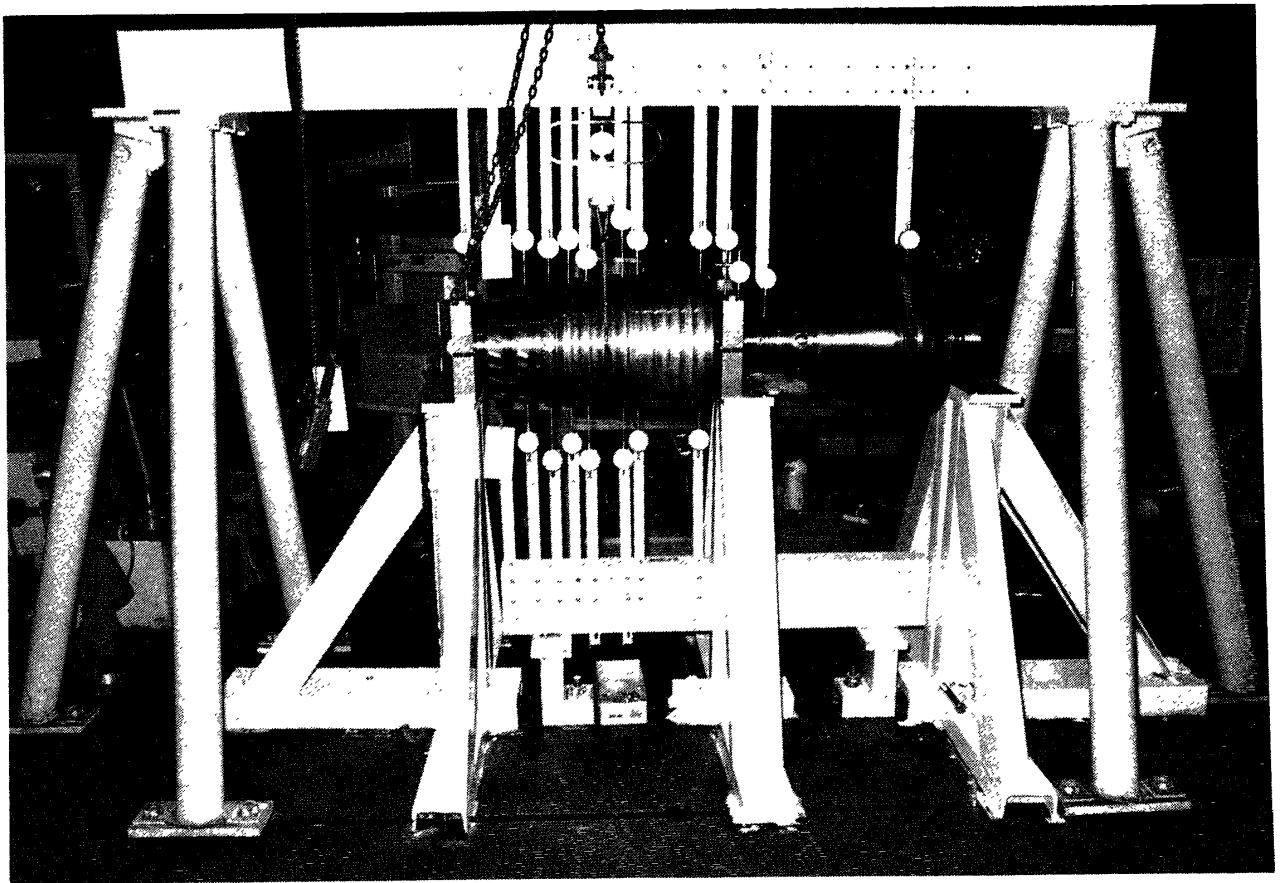


図4. 高圧圧縮機ロータの剛性試験

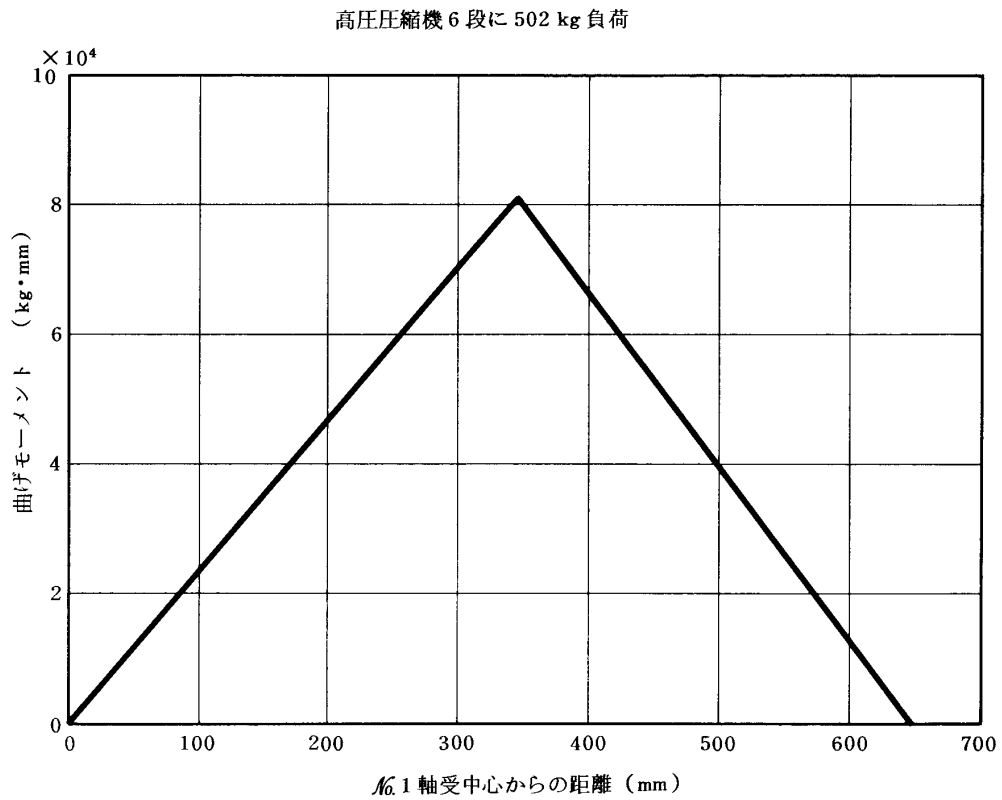


図 5. 高圧圧縮機ロータの曲げモーメント分布

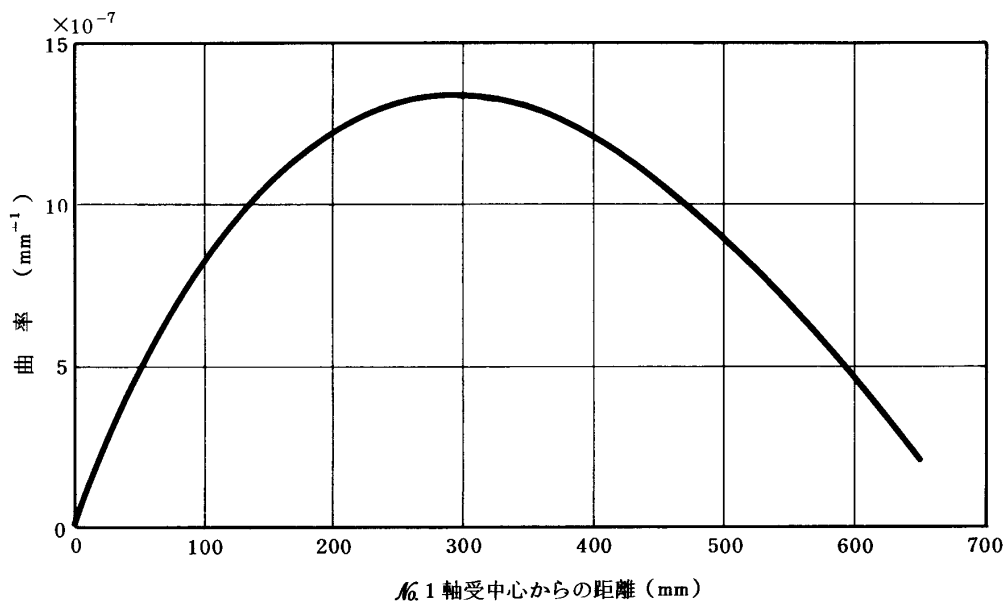


図 6. 高圧圧縮機ロータの曲率分布

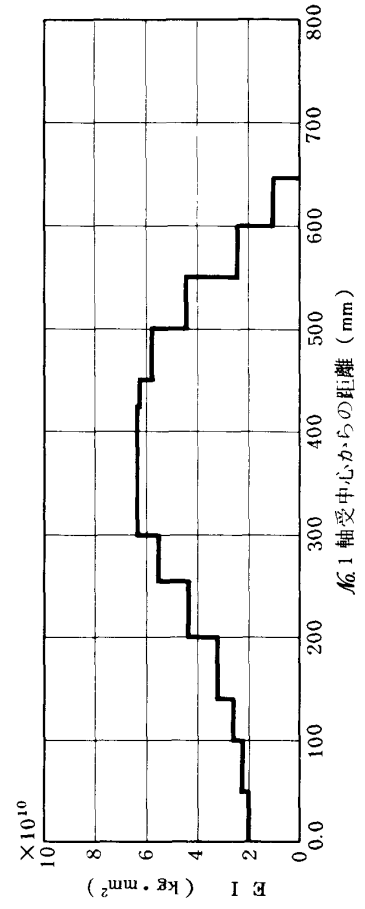
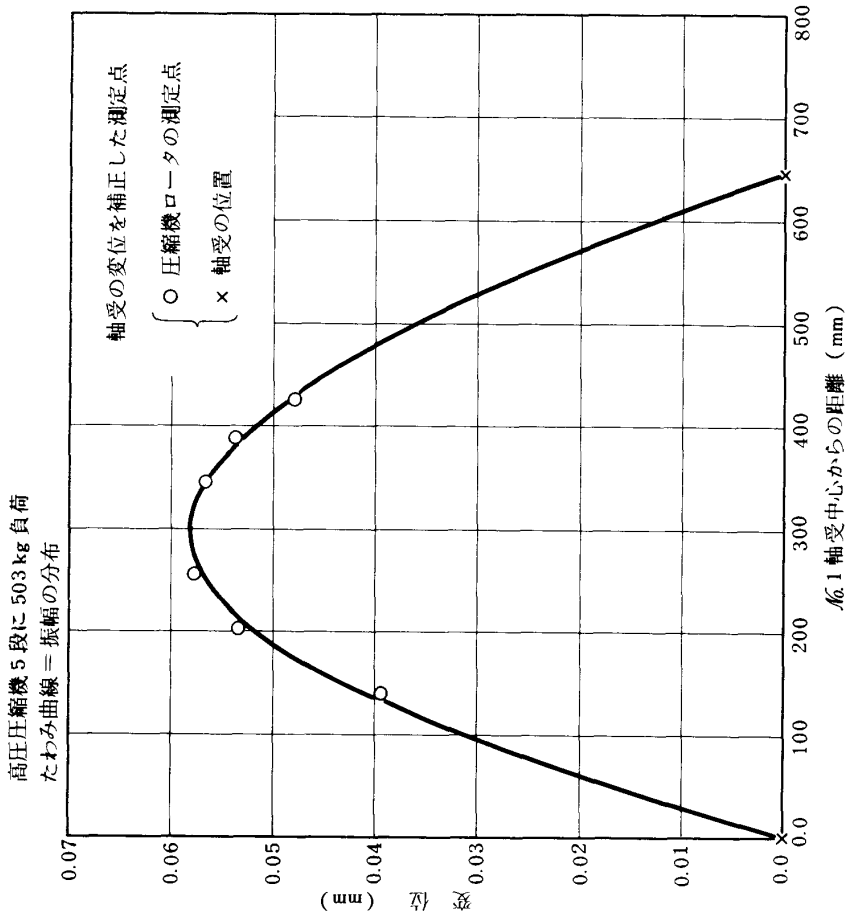


図 7-2

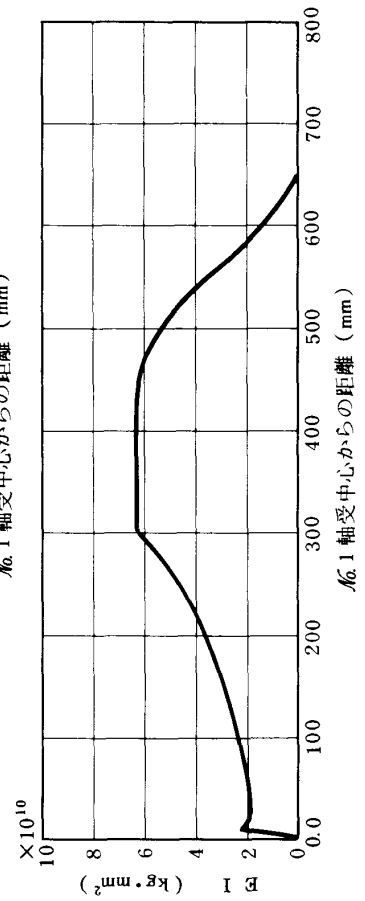
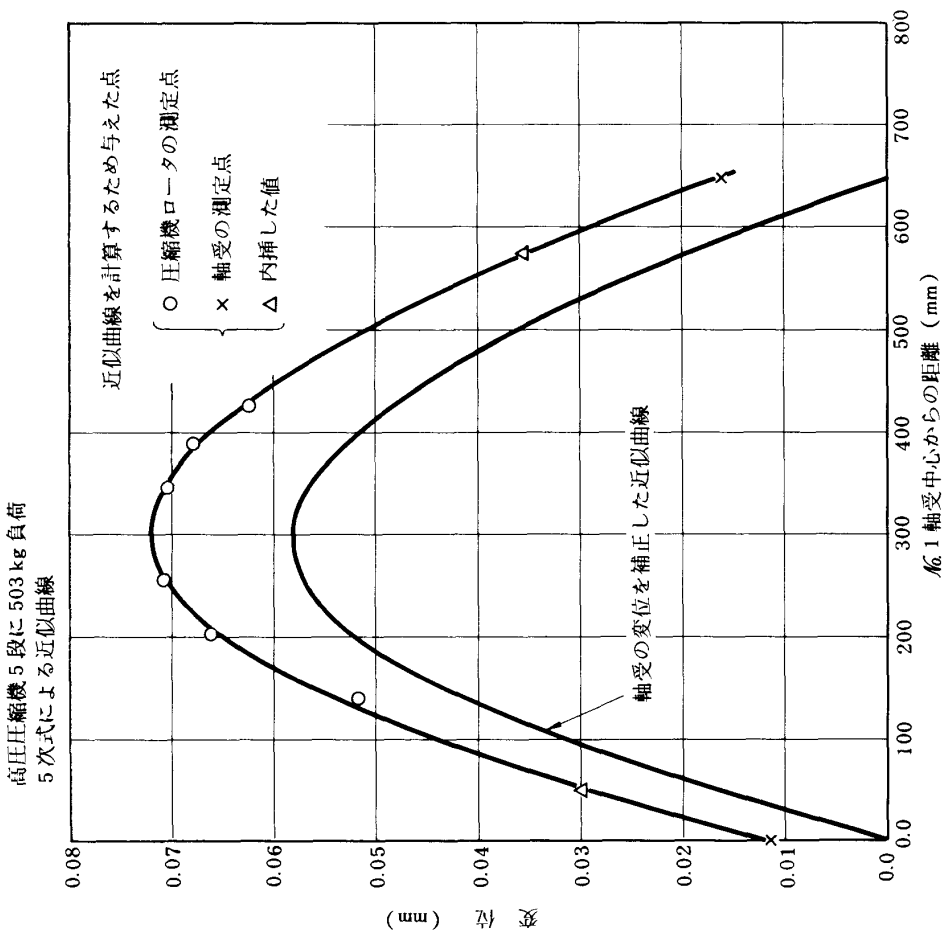


図 7-1

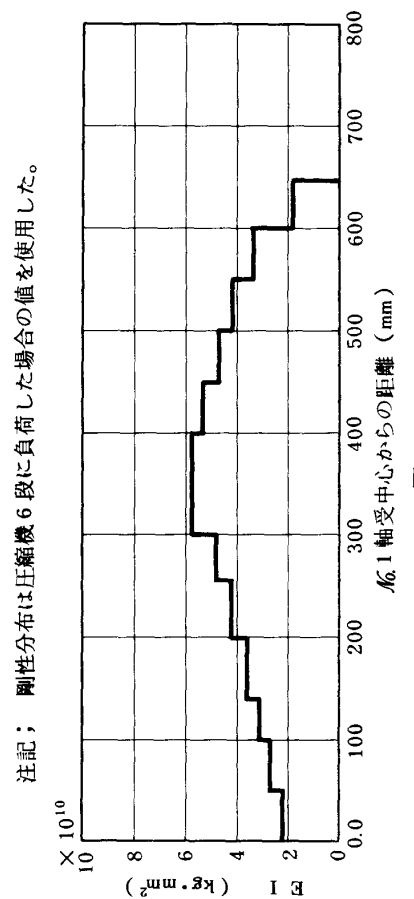
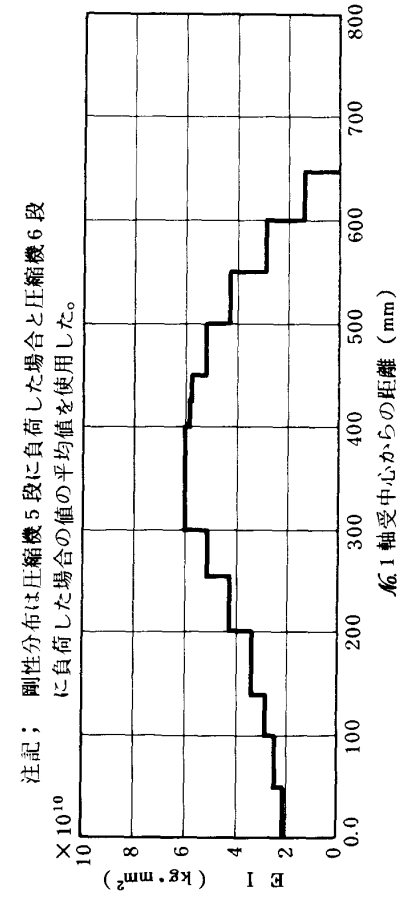
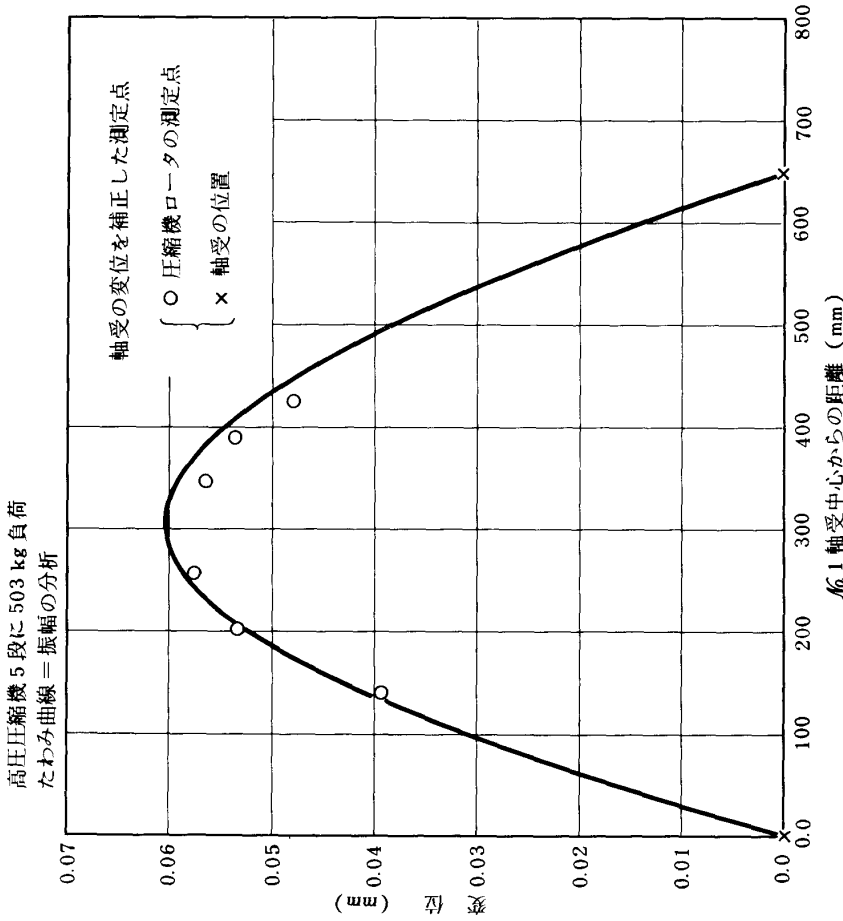
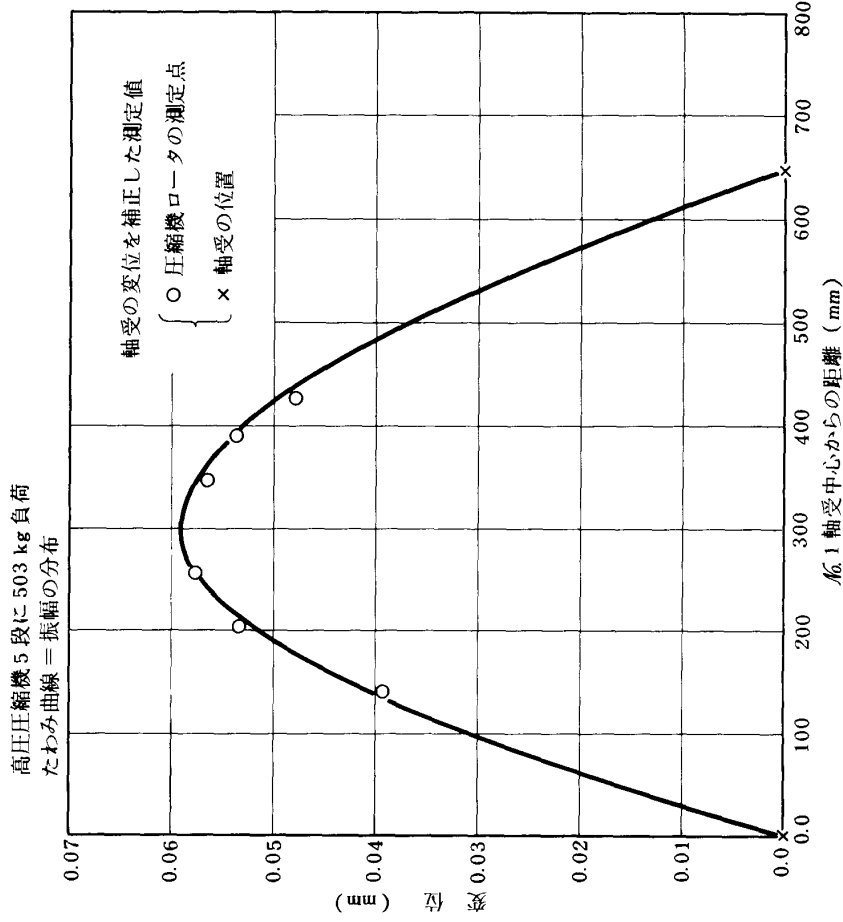


図 7 - 4

図 7 - 3

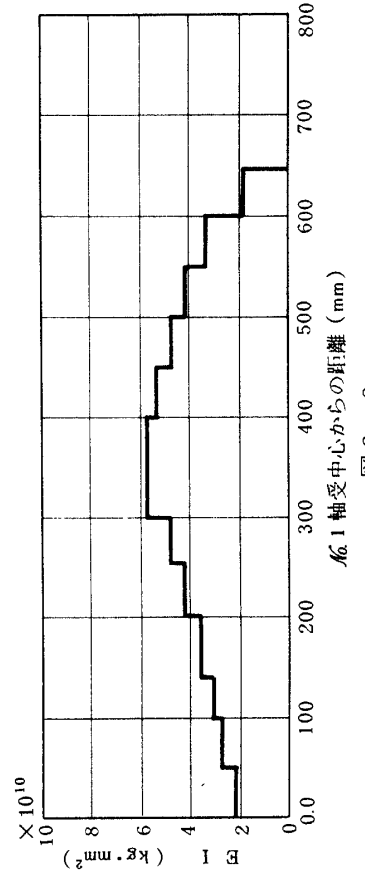
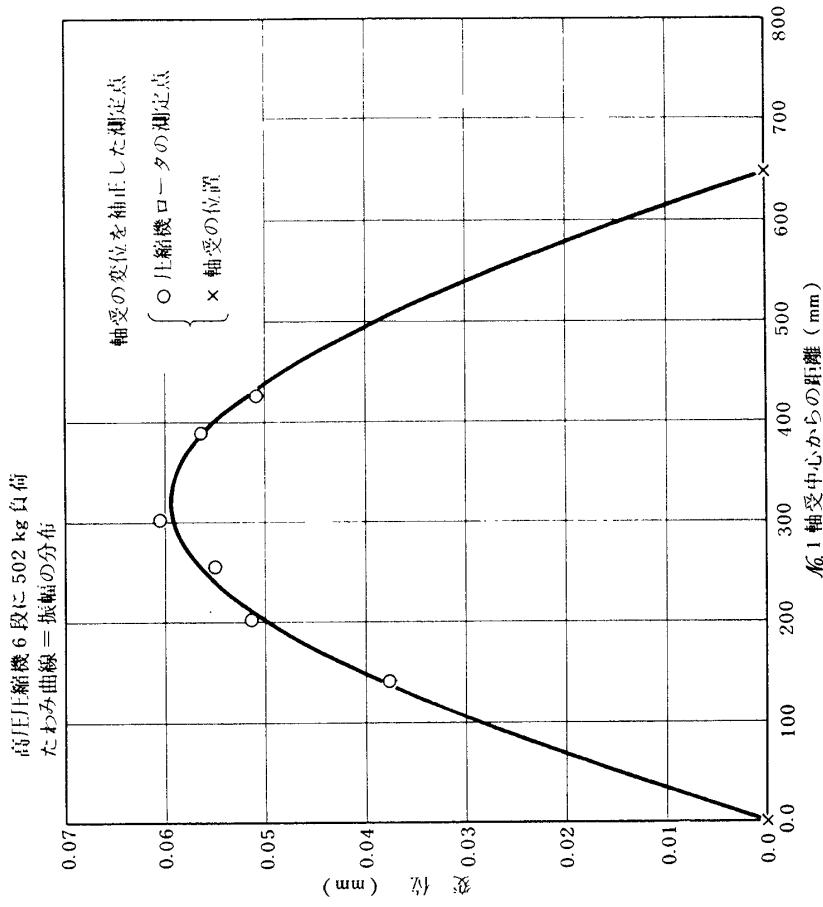


図 8-2

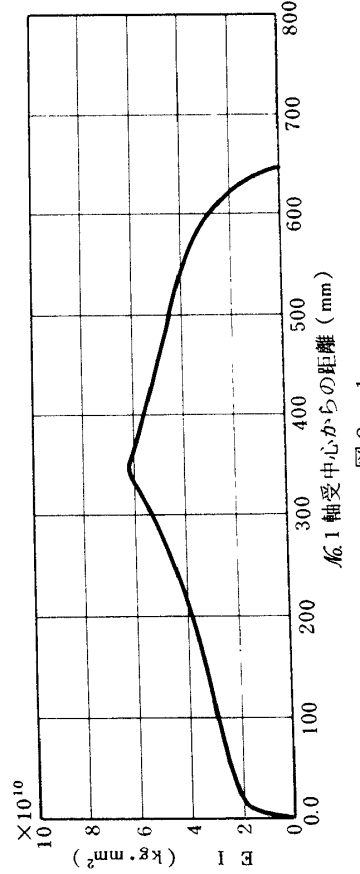
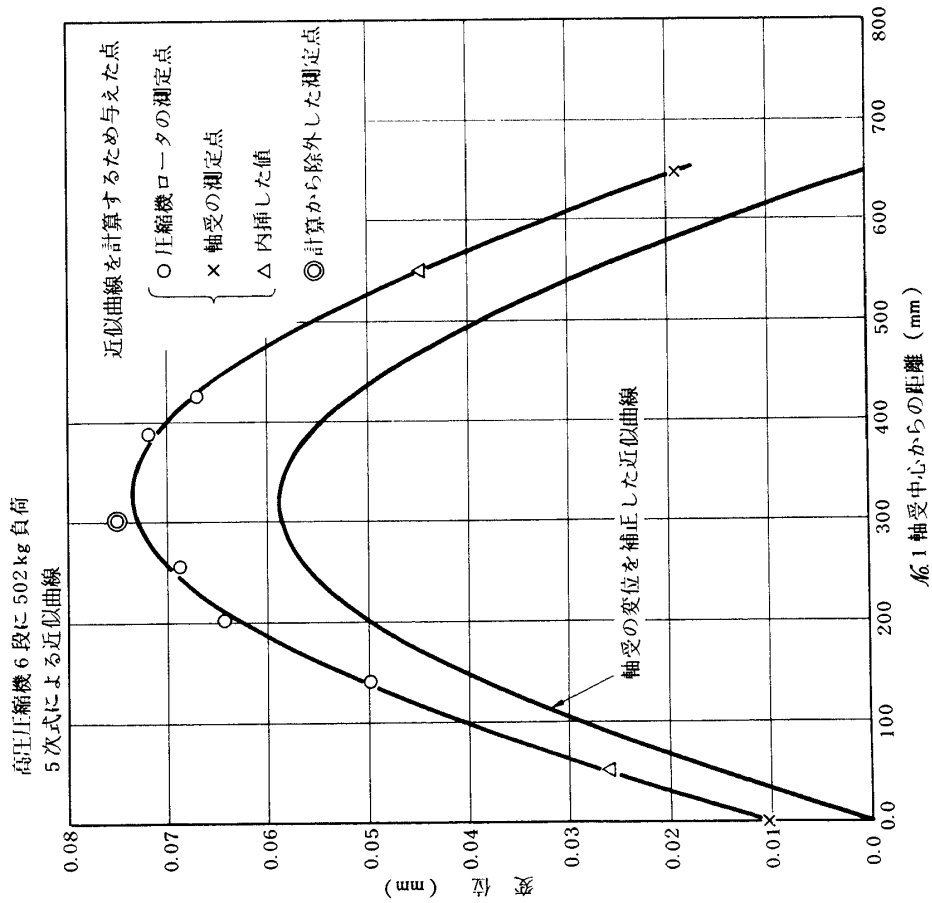


図 8-1

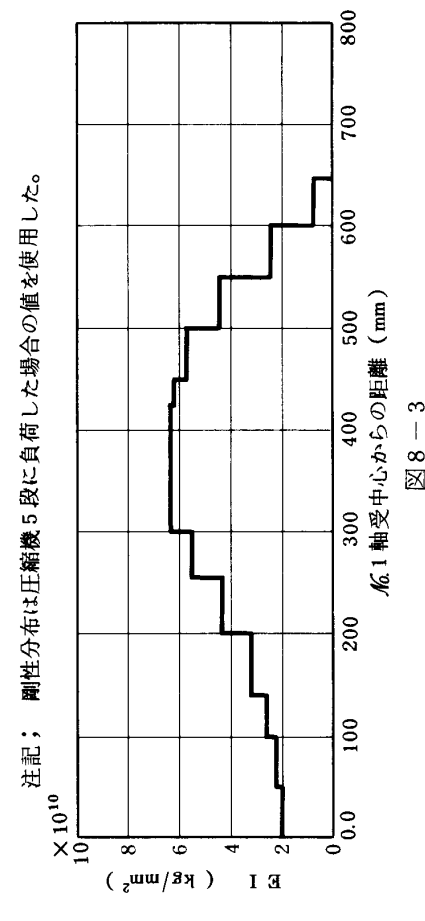
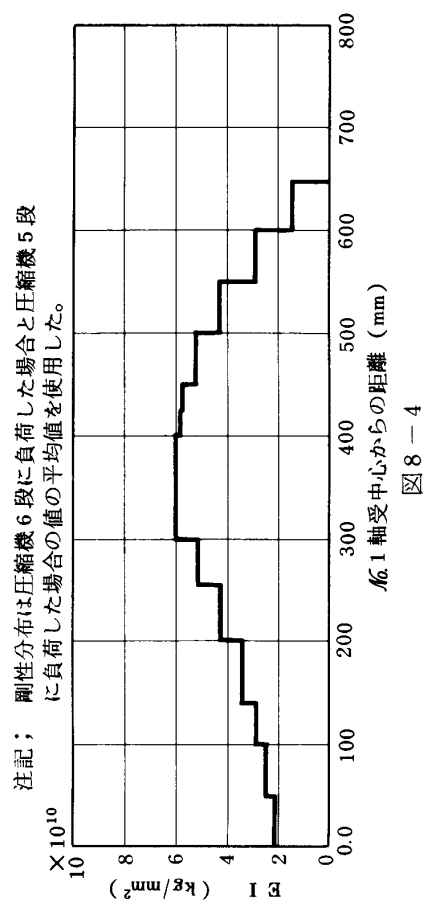
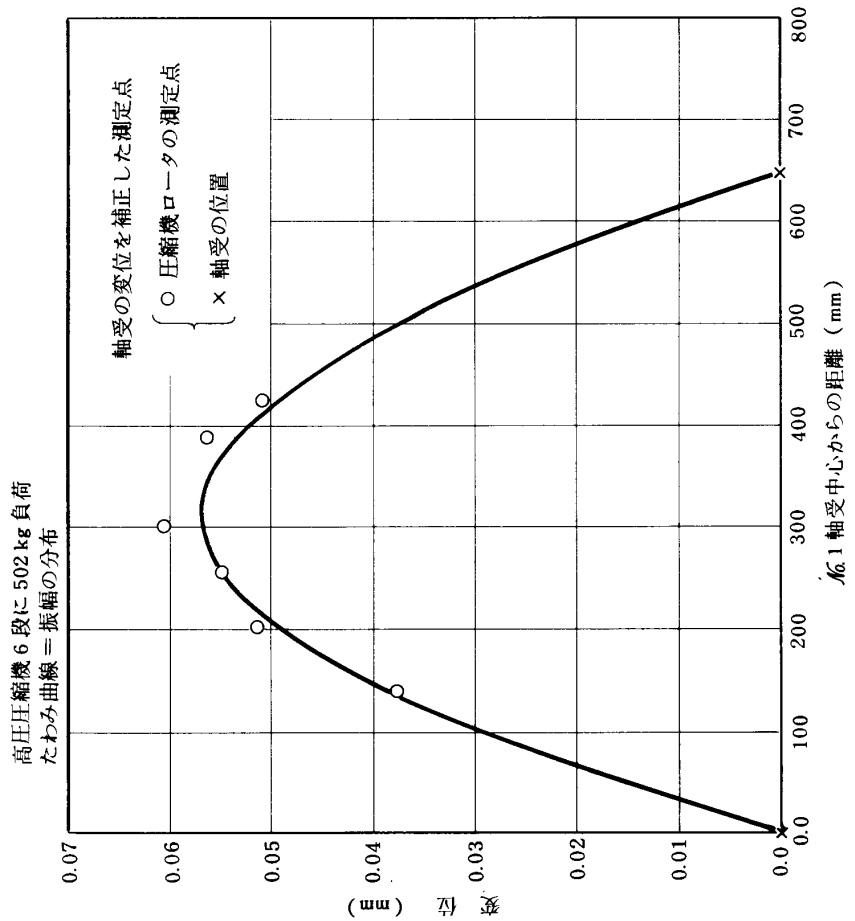
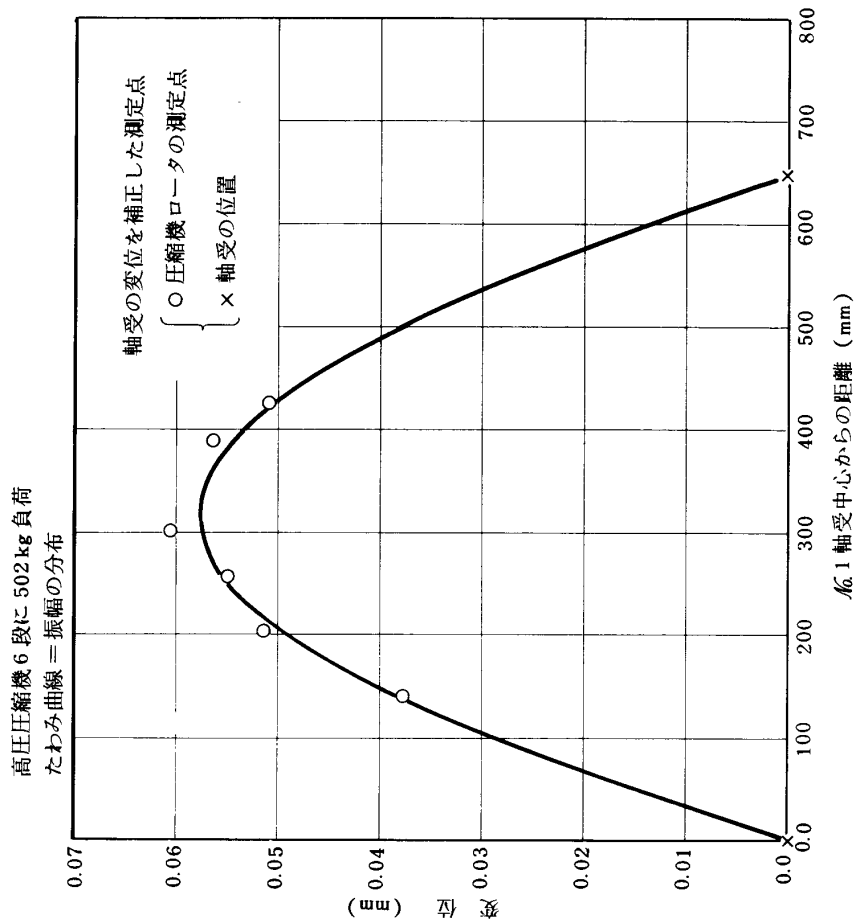
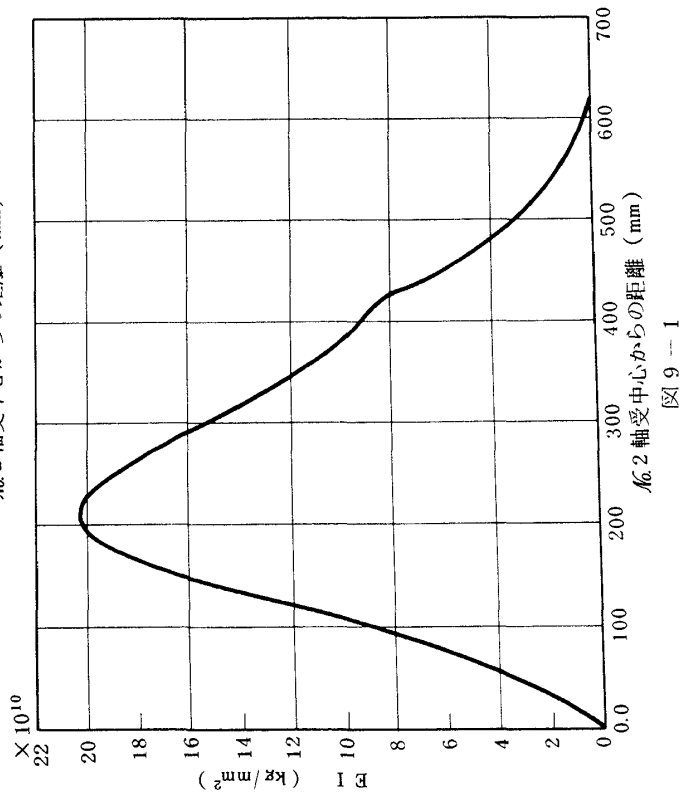
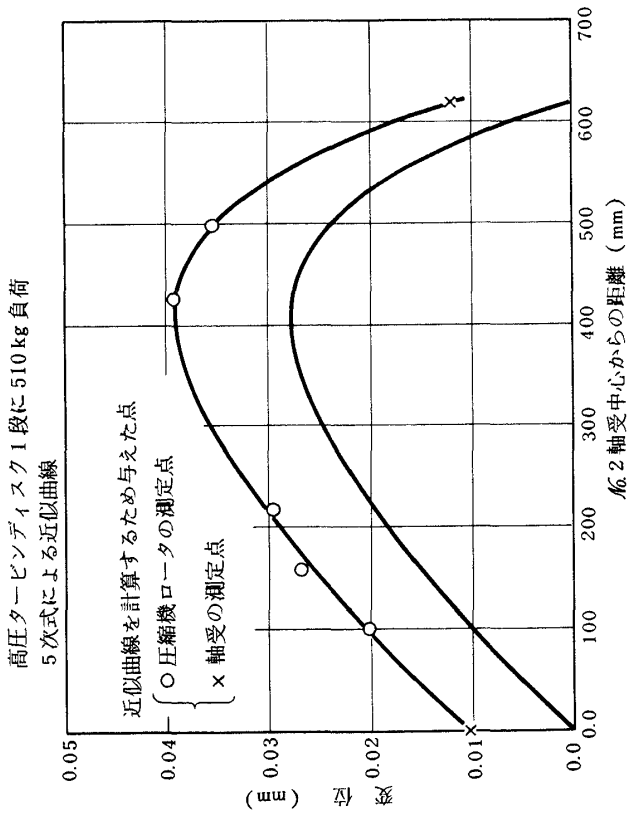
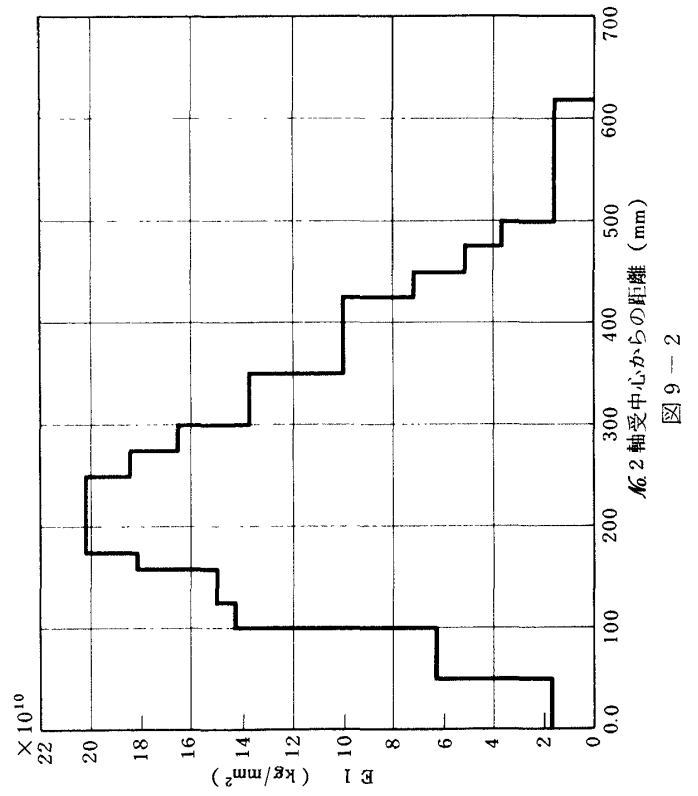
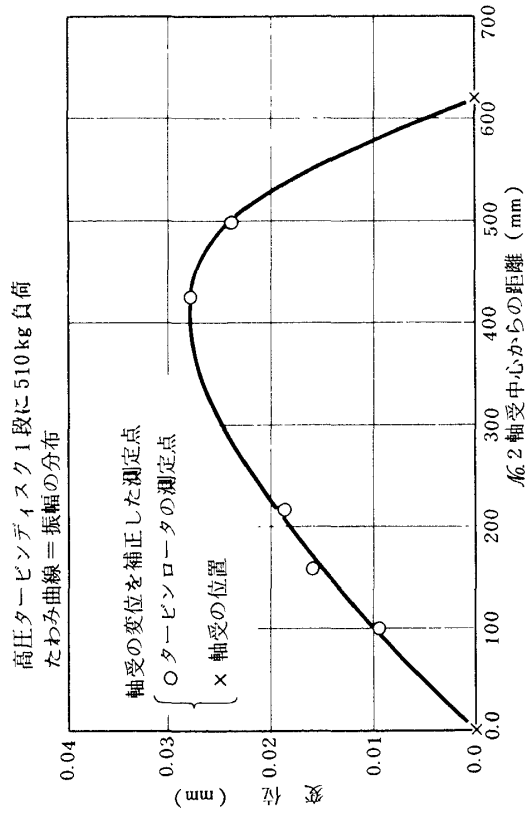
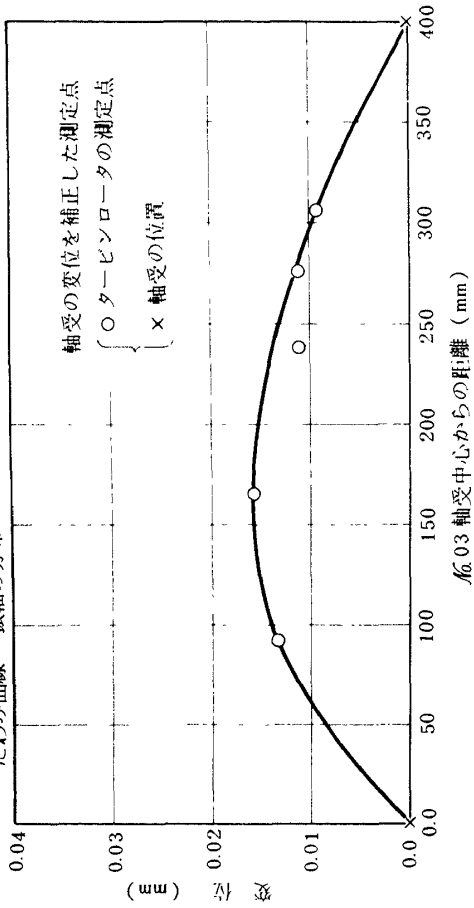


図 8-4

図 8-3



低圧タービンディスク3段に508kg負荷
たわみ曲線 = 振幅の分布



低圧タービンディスク3段に508kg負荷
4次式による近似曲線

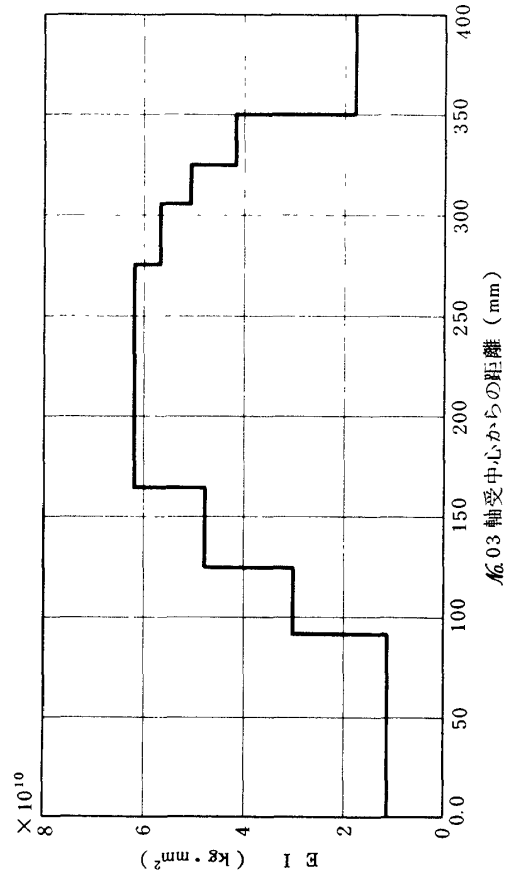
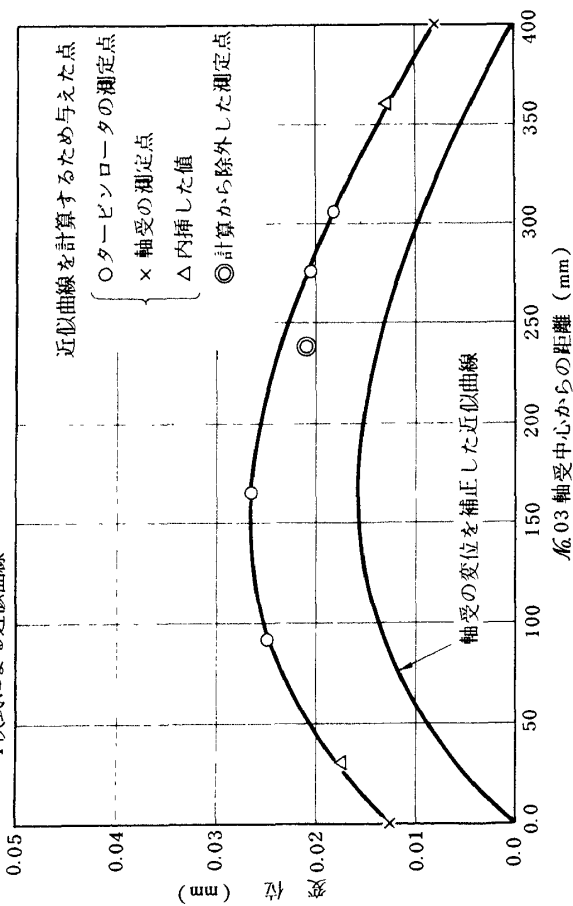


図 10 - 2

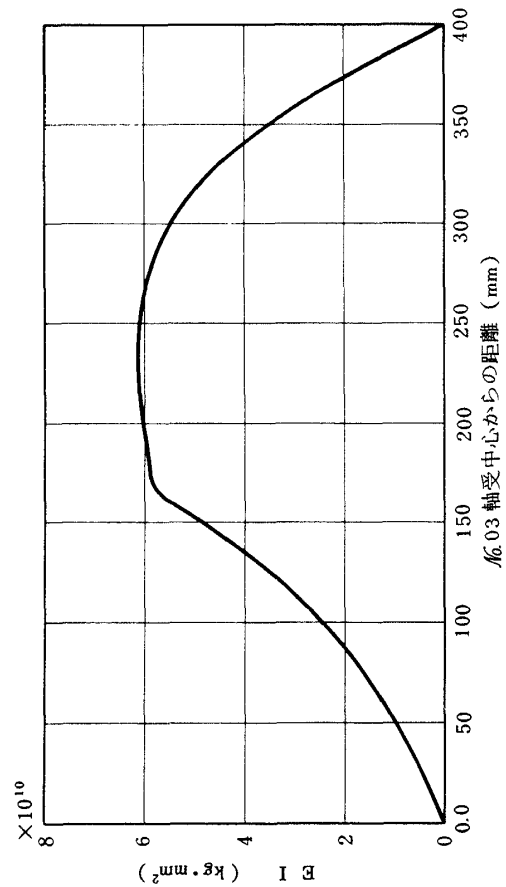


図 10 - 1

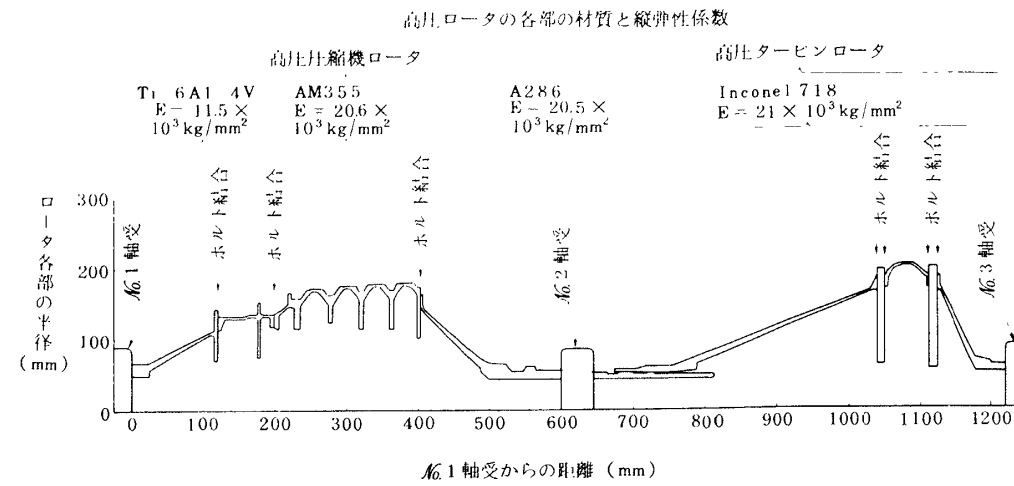


図 11. はり理論による曲げ剛性を求めるためのモデル

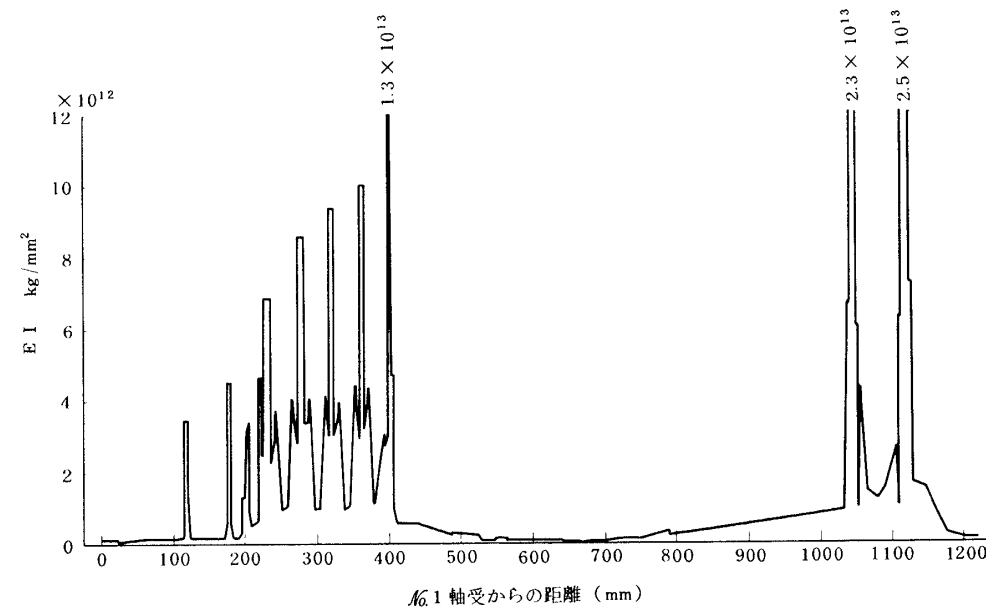


図 13. 高圧ロータのはり理論による曲げ剛性

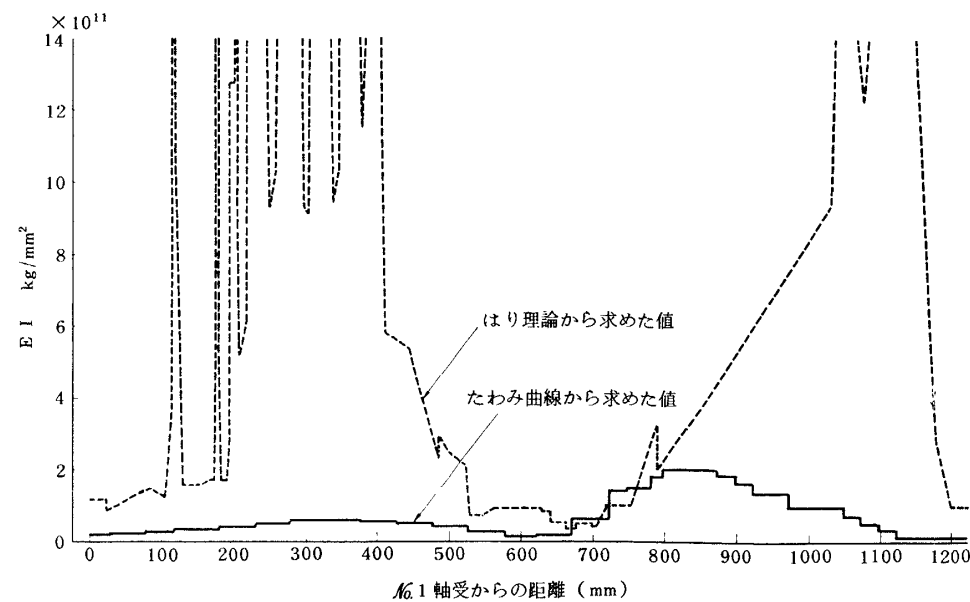


図 15. 高圧ロータにおけるはり理論およびたわみ曲線から求めた曲げ剛性分布の比較

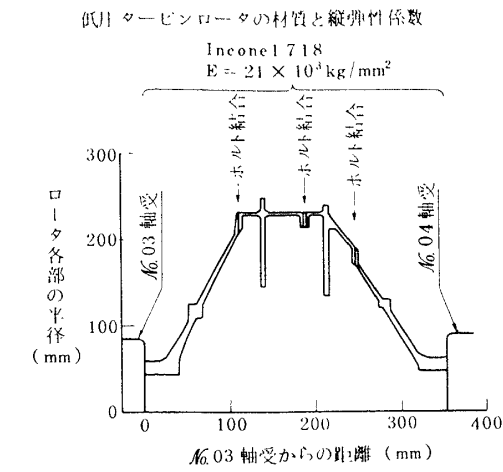


図 12. はり理論による曲げ剛性を求めるためのモデル

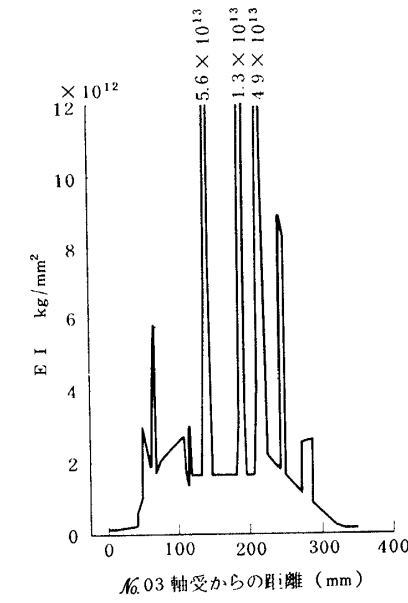


図 14. 低圧ロータのはり理論による曲げ剛性

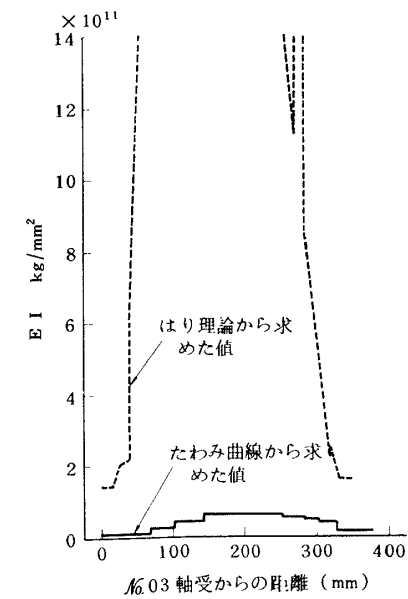


図 16. 低圧ロータにおけるはり理論およびたわみ曲線から求めた曲げ剛性分布の比較

航空宇宙技術研究所資料361号

昭和53年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.