

平成 1 9 年度

次世代 LNG 船用超高压給水ポンプ設備の技術開発

報告書

平成 2 0 年 3 月

社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成19年度に社団法人日本船用工業会が実施した「次世代LNG船用超高压給水ポンプ設備の技術開発」事業の成果をとりまとめたものである。

LNG船の主機はほぼ蒸気タービンが採用されているが、最近デュアル燃料ディーゼルエンジンを採用した電気推進機関や再液化装置を搭載した油焚きディーゼルエンジンが建造されはじめている。

しかし、メンテナンス等の理由により、蒸気タービン船の燃費が15%改善できれば採用したいという船主の要求も強い。そこで、蒸気タービン主機を高温高压化することで、効率アップは可能であり、その実現に不可欠な次世代型の超高压ボイラ給水ポンプを、(株)シンコーが開発したものである。

現在、LNG船の主機蒸気タービンは日本のメーカーが寡占しており、LNG船主機市場における日本の船用工業の優位性を確保するとともに、LNG船市場における日本の韓国等に対する優位性を強化することに寄与することを目指して開発を行ったものである。

今回、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団にここに御礼申し上げる次第である。

平成20年3月

社団法人 日本船用工業会

目 次

| | |
|--|----|
| 1 . 技術開発の目的 | 1 |
| 2 . 技術開発の目標 | 2 |
| 3 . 実施経過 | 2 |
| 3.1 開発仕様の検討 | 2 |
| 3.2 超高圧給水ポンプ試作機的设计 | 2 |
| 3.3 増速機試作機的设计 | 3 |
| 3.4 ポンプ及び増速機の試作 | 3 |
| 3.5 試験及び評価 | 3 |
| 3.6 実施期間 | 4 |
| 3.7 実施場所 | 4 |
| 4 . 実施内容 | 4 |
| 4.1 給水ポンプ | 4 |
| 4.1.1 給水ポンプ的设计 | 4 |
| 4.1.2 給水ポンプの製作 | 10 |
| 4.1.3 給水ポンプの水圧試験 | 15 |
| 4.1.4 給水ポンプのボリュートケーシング合せ面強度の解析 | 16 |
| 4.2 増速機 | 16 |
| 4.2.1 増速機的设计・製作 | 16 |
| 4.2.2 増速機の性能試験要領 | 16 |
| 4.2.3 試験結果 | 16 |
| 4.2.4 評価及び考察 | 16 |
| 4.3 結合性能試験 | 17 |
| 4.3.1 給水ポンプ及び増速機の仕様 | 17 |
| 4.3.2 駆動機の仕様 | 17 |
| 4.3.3 試験装置 | 17 |
| 4.3.4 試験内容 | 18 |
| 4.3.5 結合試験結果 | 20 |
| 4.3.6 解放検査 | 28 |
| 5 . まとめ | 32 |
| 5.1 目標の達成について | 32 |
| 5.2 今後の予定 | 33 |
| 添付書類 | 34 |
| 1. 組立外形図 | 35 |
| 2. 組立断面図 | 36 |
| 3. 次世代 LNG 船用超高圧給水ポンプのケーシング合わせ面 及び締め付けボルトの熱挙動と強度評価 | 37 |
| 4. 次世代 LNG 船用超高圧給水ポンプ設備の技術開発 超高圧給水ポンプ駆動用 SG2800H 形増速機成果報告書 (株式会社 日立ニコトランスミッション製) | 83 |

1. 技術開発の目的

従来、LNG船の主機はほぼ全ての場合で蒸気タービンが採用されている。

これは積荷のLNGが -163 でタンク内に放置しておくことで温度上昇によってボイルオフガス（気化ガス）が発生するが、タービンプラントではこのガスをボイラで燃焼させて蒸気を作り、蒸気タービンを回して船の推進に使用できるため、気化ガスの船内処理が安全かつ有効であり、また、回転機械であるタービンの信頼性が非常に高いことなどが蒸気タービン採用の大きな理由である。

これに対して、最近ではデュアル燃料ディーゼルエンジン（DFD）を採用した電気推進機関や再液化装置を搭載した油焚きディーゼルエンジンがフランスや韓国で建造されはじめている。

主機が蒸気タービンからディーゼルエンジンに替わると燃費は、 $20 \sim 30\%$ 良くなると言われており一見、大幅な改善に見受けられる。

しかし、ディーゼルエンジンの場合、シリンダー数が多くまた、ピストンリングの寿命が約 $12,000$ 時間であるため、その取換えに多大な労力を要する上、一方最近のLNG船は $30 \sim 40$ 年も使用されるので、船の一生で莫大な部品費用を要する。

また、航行中気化した天然ガスを液化させる再液化装置の作動時、ディーゼルエンジンの振動と相俟ってタンクにクラックの発生が懸念され、また、再液化装置は $140,000 \sim 150,000\text{m}^3$ のLNG船で $3,000 \sim 4,000$ kWの動力が必要になる。

これらの理由から、燃費が 15% 改善できれば蒸気タービンにしたいという要求が船主側にあることが市場調査で判明している。

蒸気タービン主機については高温高圧化することで 15% 程度の効率アップは可能であり、その実現に不可欠な次世代型の吐出圧力 150 kgf/cm^2 ・給水温度 151 の新しい超高压ボイラ給水ポンプを開発することが今回の目的である。

現在、LNG船の主機蒸気タービンは、日本のメーカーが寡占しており、次世代型の超高压給水ポンプを開発することでLNG船主機市場における日本の船用工業の優位性を確保するとともに、LNG船市場における日本の韓国等に対する優位性を強化することに寄与するものである。

L N Gの消費量の現状は全世界で年間約 1 億 2 千万トンであり、今後数年間で倍増すると見られている。それはアメリカのL N Gの消費量が過去 1 0 年間で 3 5 %の伸びを示しており、 2 0 年後には現在の世界供給量に匹敵する 1 億トン規模まで需要が拡大し、また、中国ではそれより更に速いピッチで需要拡大すると言われており、早急な開発が望まれているところである。

2 . 技術開発の目標

- 1)吐出圧力 150kgf/cm²、給水温度 151 の超高压給水ポンプを開発する。
- 2)超高压ではあるが、これを水平分割構造で実現し、上下二つ割れケーシングによって従来と同じく解放・組立ての容易さを確保する。
- 3)インペラの段数を抑えるため 7400rpm の高速回転のものを開発する。
- 4)従来は蒸気タービン駆動であったが、全体効率の観点から、電動機駆動のポンプとして開発する。このため、1800rpm の電動機から 7400rpm に増速する増速機が新たに必要になり、これを試作し、ポンプと増速機を組み合わせた全体について安定した運転を検証する。

3 . 実施経過

3.1 開発仕様の検討

基本仕様は下記とし細目について検討を加えていく。

| No. | 項 目 | 従来仕様 | 開発仕様 |
|-----|------------------------------|-----------------------------|---------|
| 1 | ボイラ圧力 (kgf/cm ²) | 6 0 | 1 2 0 |
| 2 | 給水ポンプ | 吐出圧力 (kgf/cm ²) | 1 5 0 |
| 3 | | 吐出量 (m ³ /h) | 1 8 0 |
| 4 | | 回転数 (rpm) | 6 1 0 0 |
| 5 | 原動機 | 種 類 | 蒸気タービン |
| 6 | | 駆動方式 | 直結 |
| 7 | | 出 力 (kW) | 6 0 0 |
| | | | 1 0 5 0 |

3.2 超高压給水ポンプ試作機の設計

試作機の設計を行った。

従来と異なり超高压になることから、以下の開発課題がある。

(1)ポンプケーシングの設計

水平分割構造のケーシング、特に超高压化に伴う分割面のシール性、耐圧性を確保することが必要。

(2)高速回転

初段のインペラを両吸込みとし、吸込み性能を犠牲にすることなく高速回転として段数を抑え船内配置に支障のない大きさとする。

(3)軸封装置

給水温度が 151 と高温になるが、これに対応した軸封装置が必要。

(4)スラストバランス

超高压化にともない、インペラの発生するスラスト力も大きくなるため、その対策が必要。

3.3 増速機試作機的设计

従来の LNG 船では給水ポンプは蒸気タービン直結であったが、電動機駆動のため増速機が新たに必要となることから、これを設計した。

この増速機は省エネのために速度可変で運転されることから、可変速制御範囲(70%～100%速度)での安定性、追従性、軸振動、等につきポンプと組み合わせた検証が必要であった。

3.4 ポンプ及び増速機の試作

超高压ボイラ給水ポンプ及び増速機の試作を実施した。

3.5 試験及び評価

試作した機器を組み合わせ、工場内で試験し、評価を行った。

評価項目は、給水ポンプのケーシング水平分割面面圧の変化及びボルト応力解析、漏洩のないことの確認、吐出弁開度を変えて最小流量から最大流量までの回転数、吸込・吐出圧力、吸込温度及びトルクを計測した。

また、ポンプ及び増速機について軸受など各部の振動、温度及び騒音を計測した。

可変速範囲(100%～70%)において回転制御の安定性、回転数変更による回転数追従性の速さの確認も行った。

なお、試験用の駆動機としては工場試験設備である蒸気タービンを電動機の代わりに使用した。

3.6 実施期間

開始：平成 19 年 4 月 1 日

終了：平成 20 年 2 月 28 日

3.7 実施場所

- (1)給水ポンプの設計・製作・組合試験：(株)シンコー本社、府中工場、大州工場
- (2)増速機の設計・製作・無負荷試験：(株)日立ニコトランスミッション大宮事業所

4 . 実施内容

4.1 給水ポンプ

4.1.1 給水ポンプの設計

(1) ポンプケーシング

日本機械学会の高圧ポンプ適用範囲によれば、上下 2 つ割れケーシングは吐出圧力 100 kgf/cm²までとし、100 ~ 350kgf/cm²の吐出圧力に対してはバレル形が推奨されている。バレル形は内部ケーシングを製作し、厚肉円筒型のバレルに挿入して特大のフランジでカバーして高圧に耐える方式となっている。このため、バレル形ポンプは解放時、軸方向に内部ケーシングを引抜く必要があり、船用では機関室が狭いため採用が極めて困難である。電力会社の給水ポンプは、吐出圧力が 200 kgf/cm²以上で容量も船用に対して数倍も大きいことからバレル形給水ポンプが常識的に採用されている。

このたびの吐出圧力 150 kgf/cm²のボイラ給水ポンプは、船用の特殊性から敢えてバレル式を避けて上下 2 つ割れケーシングを採用するものでケーシング合わせ面から高温水が絶対漏洩しない設計が強く要求される。

ポンプケーシングは、船内でのポンプ解放・点検を容易にするため、上下水平分割形とし、下部ケーシングに吸込及び吐出口を設けて外部配管を取り外す必要をなくした。

ボイラ給水ポンプは、ボイラの効率低下を防ぐため高温の 151 で給水される。したがって、ポンプケーシングの材質は、線膨張係数が小さいマルテンサイトステンレス鋼鋳物(SCS1)を使用することにした。ポンプは高温下で運転されるため、ケーシングは図 1 の通りセンターサポート式とし、カップリング側ケーシング下部はキングピンによりペDESTALに固定し、軸端側ケーシング下部にはキーを設けてペDESTALの溝をスライドすることにより自由に熱膨張

させるよう考慮した。

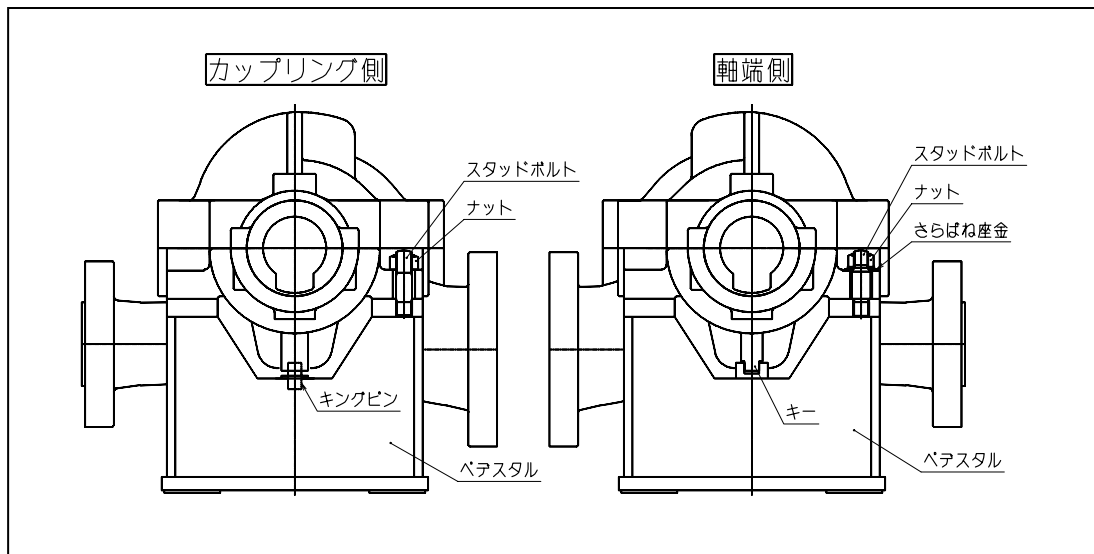


図1 . ポンプケーシングの支持方法

インペラが内装されるケーシング部は静粛な運転を図るため、4段とも図2の通りシングルボリュートでなくダブルボリュート式を採用し、インペラに作用するラジアル荷重をほぼバランスさせてシャフトの撓み発生を防止している。

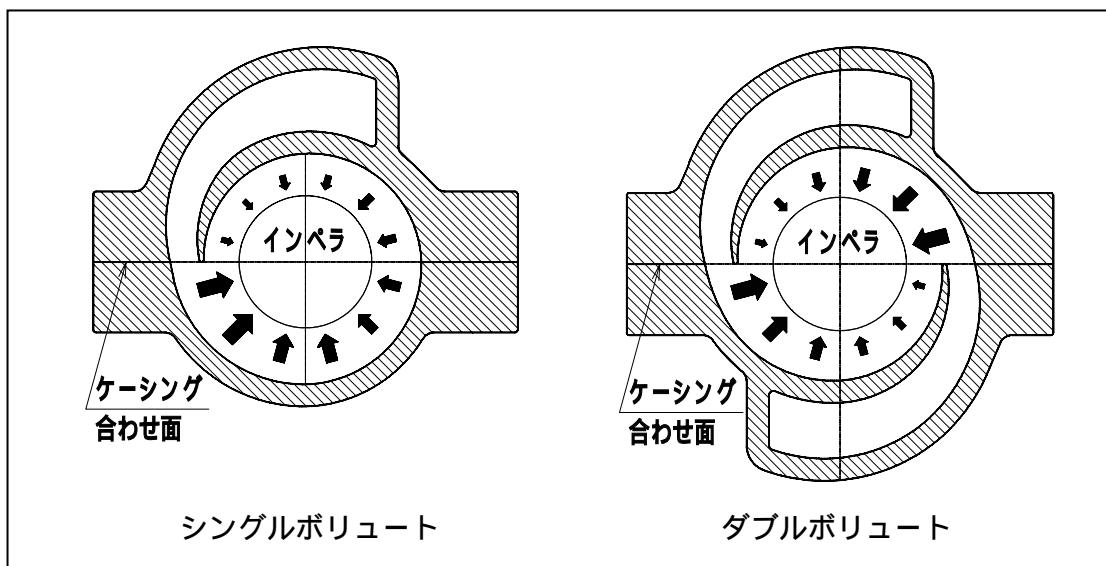


図2 . ボリュートケーシング形状

ポンプケーシング合わせ面の水圧試験時の応力分析及び運転中高温下で十分な耐圧性と安全性を有していることを確認するため、コンピュータソフトにより次の解析と安全性の確認を実施した。

- a. ポンプケーシング機械加工後の水圧試験圧力 225kgf/cm² の時、ポンプケーシング合わせ面及びボルトの応力解析
- b. ポンプ高温運転中、吐出圧力 150 kgf/cm² の時、各段のポンプケーシング合わせ面及びボルトの応力解析と安全性

インペラ

ポンプの小形化を図るため、回転数は 7400rpm を選定し、段数は 4 段となった。1 段インペラは、NPSH に十分な余裕をもたせるため両吸込形とした。キャビテーションを防ぐための Req. NPSH は、次の式で計算することができる。

$$\text{Req. NPSH} = \{ N(Q / 60)^{1/2} / S \}^{4/3}$$

ここに

N : 回転数 (7400rpm)

Q : 吐出量 (両吸込の場合 : 155 / 2 = 77.5m³/h)

S : 吸込比速度 (給水ポンプの場合、1200 m³/min. m, rpm)

上の Req. NPSH 式より Q が小さいほど Req. NPSH は小さくなること分かる。したがって、1 段インペラは両吸込形であるため、Req. NPSH は 13.4m となる。1 段は両吸込式であることから軸方向の推力は、バランスしている。2 段から最終の 4 段までのインペラは、図 3 の通り 3 枚とも片吸込式で同一方向に配置されているため矢印の方向に大きな軸方向推力が生じる。これに対して、インペラ最終段に対抗してバランスピストンを設けて、吐出圧力を掛け釣り合わせさせている。

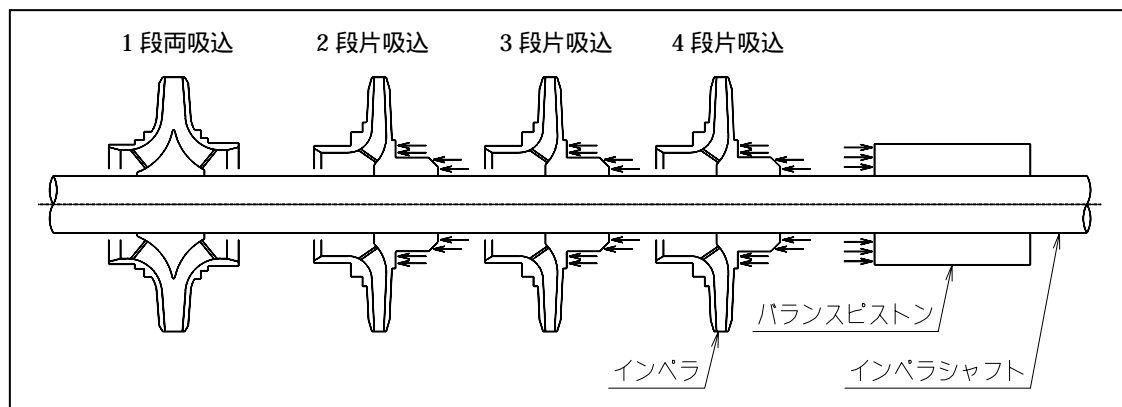
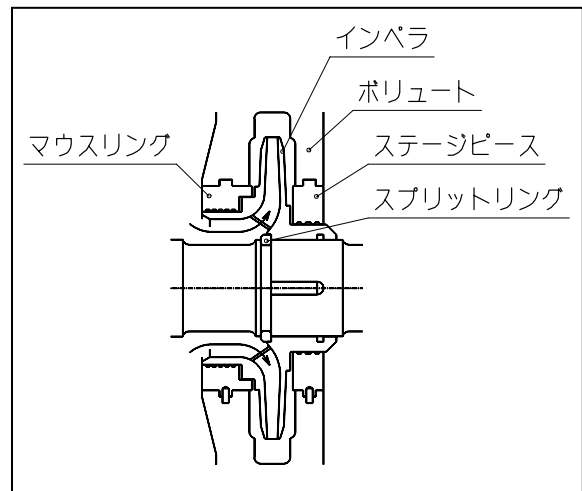


図 3. 軸推力のバランス方法

インペラの材質は、ポンプケーシング同様 SCS1 を選定した。SCS1 の限界

周速度は、130m/sec である。今回の設計では、インペラの周速度は 89.1m/sec で安全性は極めて高い。

インペラは、鋳造後、機械加工され静的及び動的バランス試験が行われ、図4の方法でインペラシャフトにキー及び SPLIT RING を装着した後、インペラボス部が焼嵌めされる。



(3) 軸封装置

ポンプの軸封装置としては、グラウンドパッキン式、メカニカルシール式、スロットルブッシュ式及びフロートリング式の4種類がある。

図4.インペラのシャフトへの固定方法

高温水で高速回転の場合、フロートリング式が最も信頼性が高いと思われる。フロートリングから 151 の高温水が大気側に噴出しないようフロートリング中央部当りにシーリングリングが装備され主復水ポンプから 33 の封水が送られるよう設計されている。

図5にフロートリング形軸封装置の構造を示す。この軸封装置は、非接触形であるため周速に制限がなく高速ポンプに適合している。主復水ポンプからの封水圧力は、ポンプ吸込圧力より 1 ~ 2 kg/cm² 高く調節されてランタンリングに送水され、ポンプ吸込側の熱水が噴出しないよう2個のシールリングを通して押し込み、一方、ランタンリング内の一部の封水は3個のシールリングを通して反ポンプ吸込側方向に漏洩させて集水室を通過してドレンタンクに回収される。このようにして、軸から外部への漏洩が防止される。

シールリングは、17%Cr ステンレス鋼 (SUS430) 製でシールリングリテーナ内に装備され、外周に打たれたピンにより回り止めされている。シールリングとリテーナ間には板ばねが、装備されてメタルタッチ部で軸方向の漏洩が防止され、スリーブとシールリング間の直径隙間は、スリーブ外径の約 1/1000 mm として漏洩量を最低限に抑えている。なお、スリーブ外周には硬度の高いクロムメッキが施工されている。

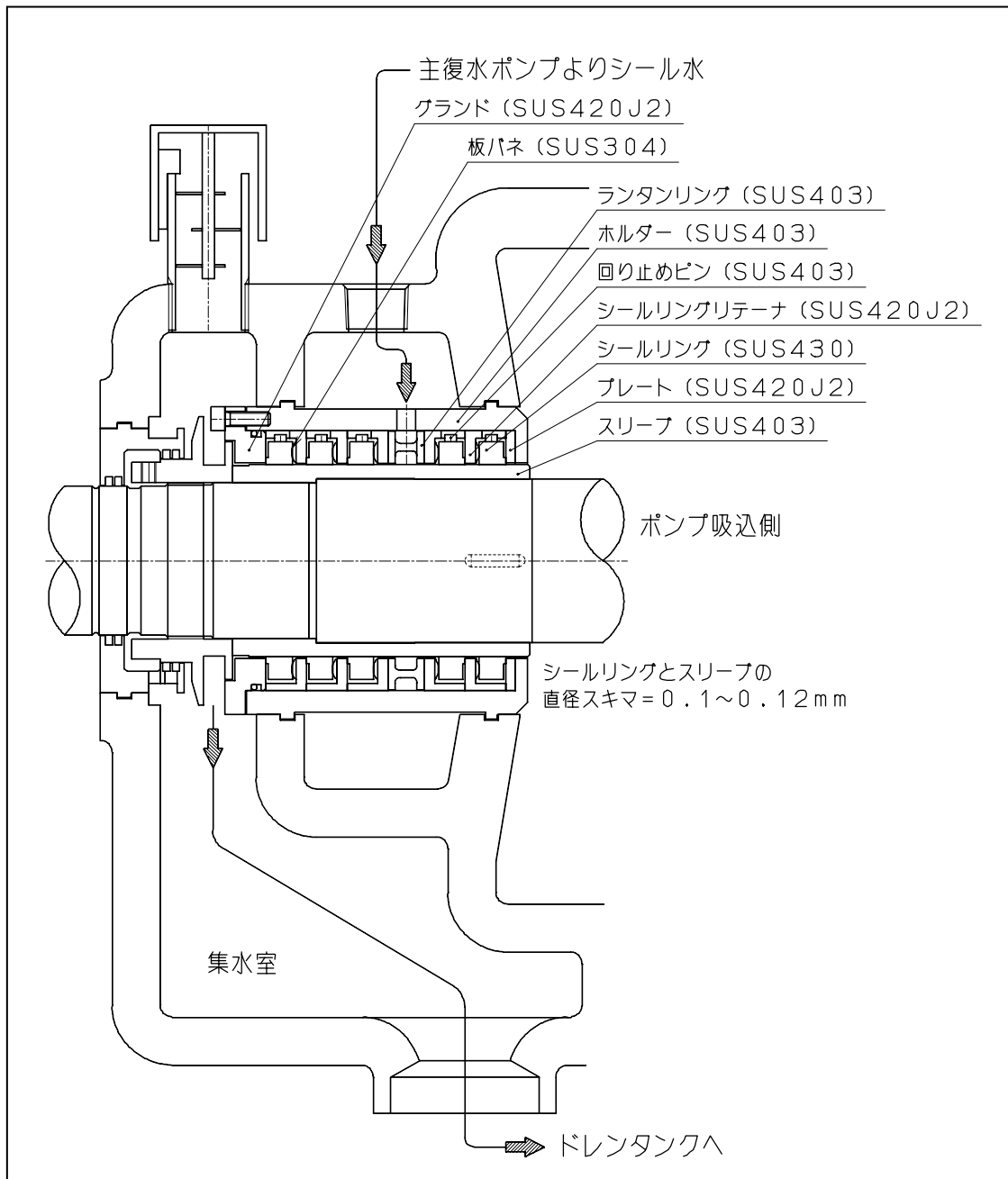


図5 フローティングリング形軸封装置

(4) インペラシャフト

インペラシャフトには、4枚のインペラが取り付けられて高温液中で7400rpmの高速で回転する。インペラシャフトは、両端に設けられたプレナム軸受で支持されている。

インペラシャフトの材質は、高温液中での使用を考慮して線膨張係数の小さい

マルテンサイトステンレス鋼（SUS403）を採用している。

シャフトは回転数を上げていくと異常な振動が発生する 1 次危険速度ゾーンがあり、2 次危険速度は 1 次危険速度の 4 倍あたりにそのゾーンがある。高速回転ポンプでは、定格回転数を 1 次危険速度以下とすると大きな軸径となり、インペラ入口径が大きくなって吸込性能の低下を来たすことになる。したがって、軸径の選定は 1 次危険速度が 3600rpm、そして 2 次危険速度が 14400rpm になるよう決定し、実使用回転数 5100～7400rpm に悪影響を与えない撓み軸として設計されている。

(5) スラスト軸受

1 段インペラは、両吸込のため軸方向の推力は発生しない。しかし、2～4 段目のインペラは片吸込であるから概略 11 トンの推力が軸方向に作用する。この推力に対抗させるため最終段インペラ背面にバランスピストンを装備して吐出圧力を掛けバランスさせている。また、吸込またはボイラ側の予期しない圧力変動に備えてポンプ軸端には約 1 000kg に耐えるミッチェル形スラスト軸受を備えている。

(6) 高速軸用カップリング

従来の LNG 船用給水ポンプのカップリングは、タービン駆動であったためタービン側の潤滑油を導き、強制給油式のギアカップリングを採用していた。今回は回転数が 7400rpm と従来の 6300rpm より 17% 高速であるため、無給油のダイアフラムカップリングを採用した。

このカップリングは、図 6 の通りスペーサタイプになっており、2 箇所のフランジ部に Ni-Cr-Mo 鋼製のダイアラムを挟み込みポンプと増速機間のミスアライメントを吸収し、かつポンプケーシングの熱膨張による軸方向の伸びに対してもダイアラムの伸縮で ±2.4 mm 吸収することができる。

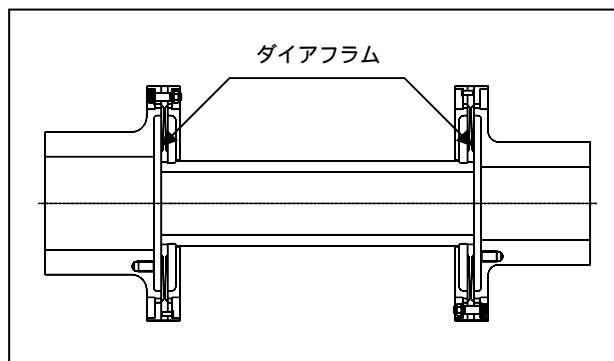


図 6 . ダイアフラムカップリング

4.1.2 給水ポンプの製作

(1) 主要部品の製作

a. ポリユートケーシング

ポリユートケーシングは、上下2つ割れ形であるため写真1の通り、上下別々に木型を製作し、砂型を造形してステンレス鋼鑄物を鑄造した。

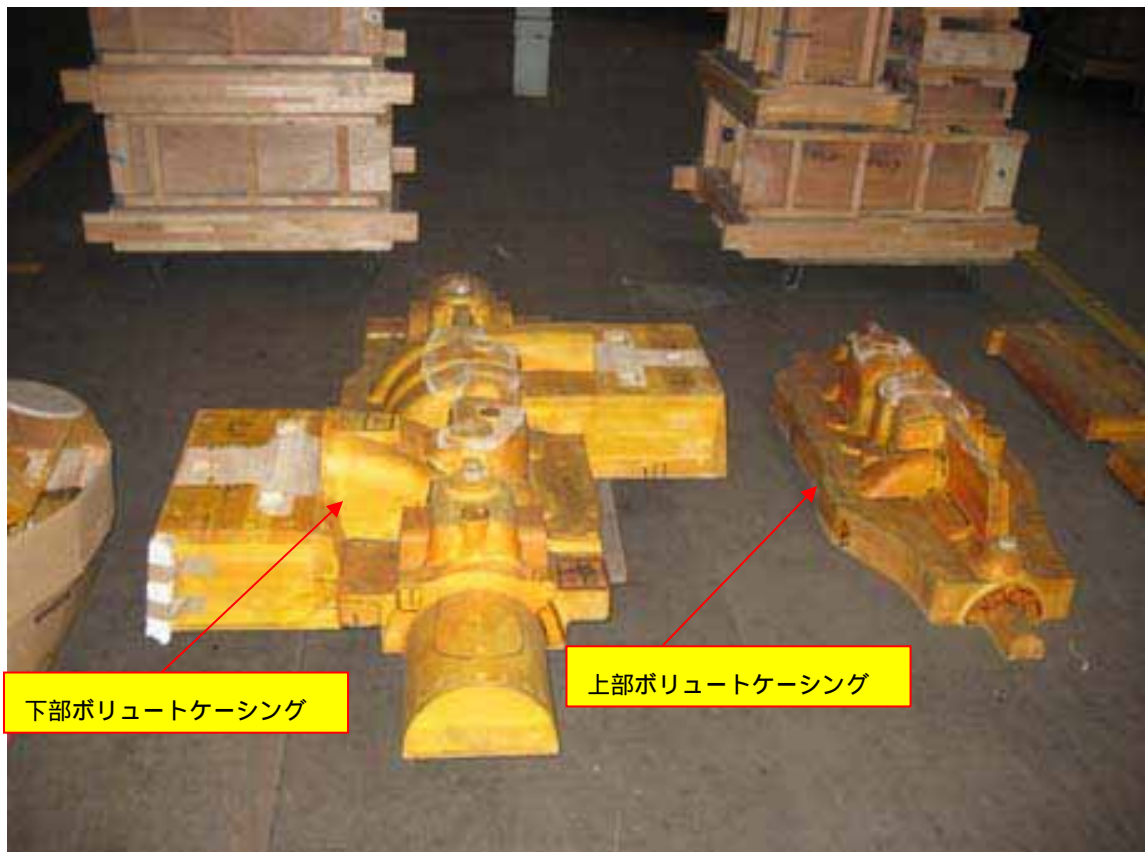


写真1 ポリユートケーシングの木型

そして、下部ポリユートケーシング及び上部ポリユートカバー合わせ面の機械加工を行った後、両者を合わせて内部のマウスリング等溝部のボーリングを行い、11ページの写真2及び写真3が完成した。

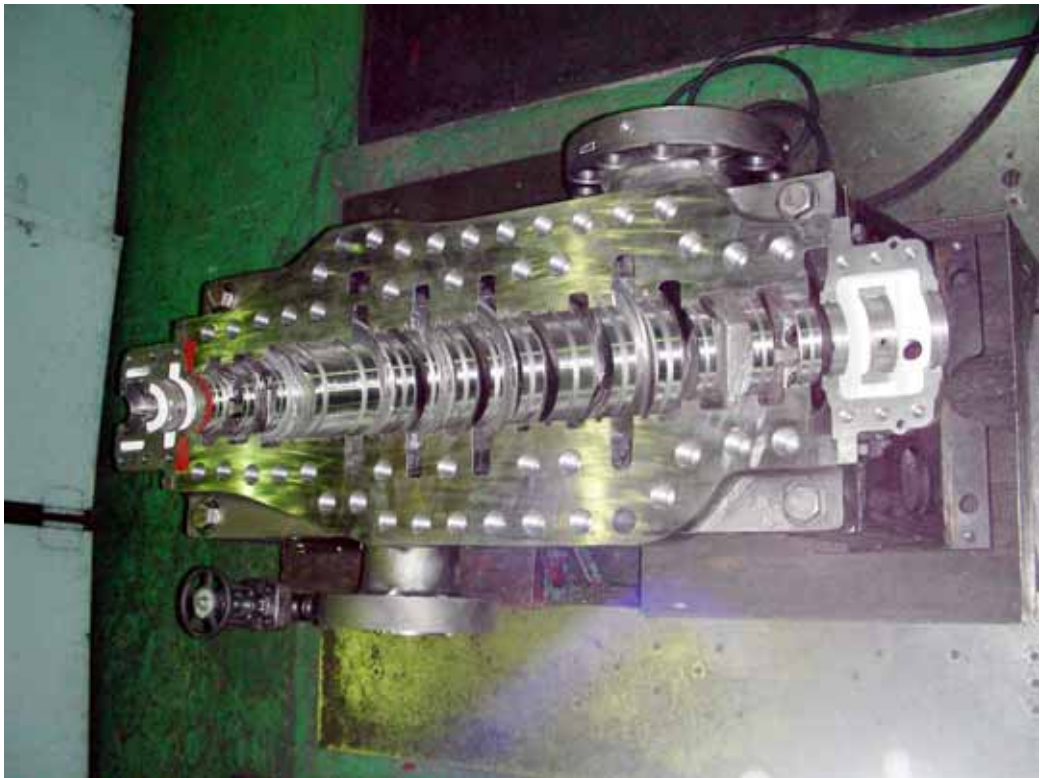


写真2．下部ポリユートケーシング

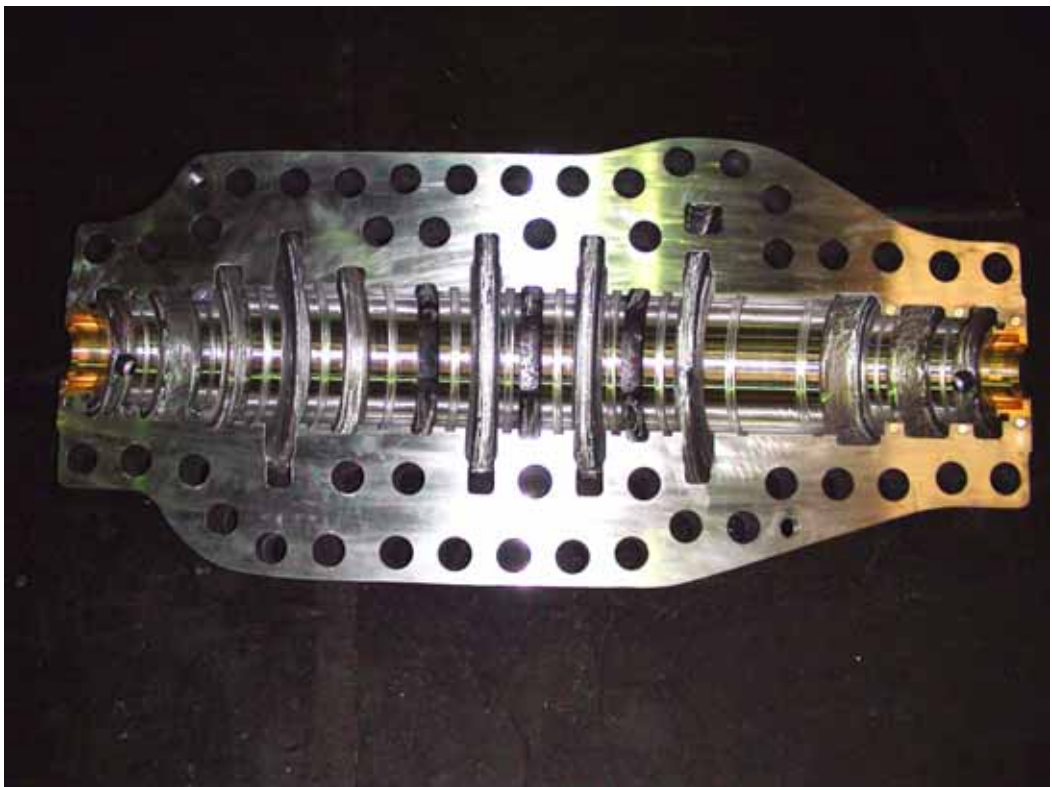


写真3．上部ポリユートケーシングカバー

(2) インペラ

インペラは、木型を製作し、砂型を造形してステンレス鋼铸件を铸造した。そして、機械加工後、静的バランスを取り、続いてダイナミック釣り合い試験機に掛けて動的バランスを取って完成した。

(3) インペラシャフト

インペラシャフトは、マルテンサイトステンレス鋼（SUS403）の素材を購入し、焼き入れを行った後、機械加工して完成した。写真4は、インペラシャフトに1～4段のインペラの装備状態を示す。軸振れ記録は、13ページの通りである。

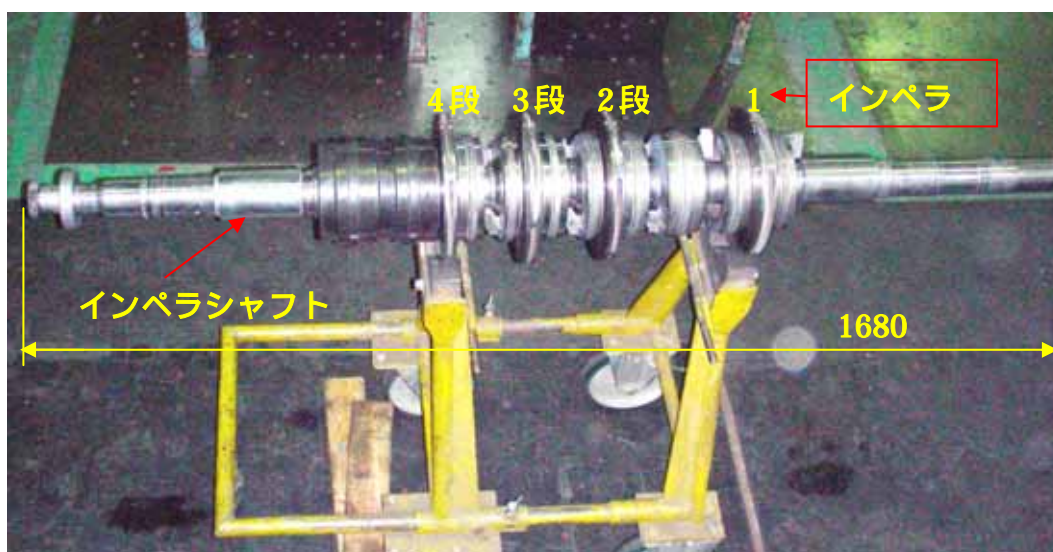


写真4 . インペラを装備したインペラシャフト

(4) ベアリングハウジング

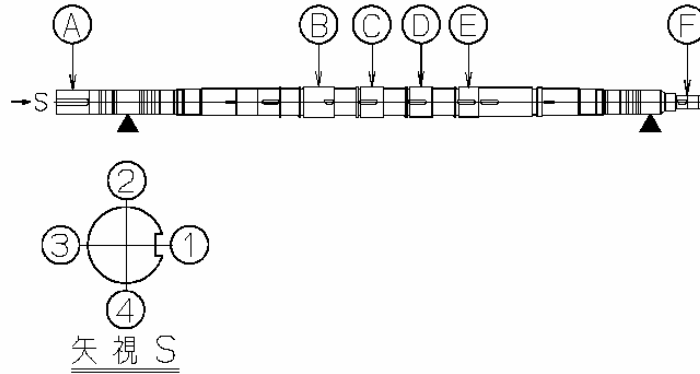
インペラシャフトを二箇所です支えるベアリングハウジングは、鋳鉄で铸造後、機械加工され内部に購入されたベアリングメタルが装備されている。軸端側にはスラストパッドも装備されている。写真5は、組立状態のベアリングハウジングを示す。



写真5 . ベアリングハウジング

軸振れ検査記録

名称 : 次世代 LNG 船用超高压給水ポンプ
 機名 : DMG100-4G
 数量 : 1 台
 検査月日 : 平成 20 年 1 月 28 日



ダイヤルゲージの読み値

単位 : 1/100 mm

| 測定箇所 | A (カップリング) | B (1段インペラ) | C (2段インペラ) | D (3段インペラ) | E (4段インペラ) | F (スラスト軸受) | 判定 |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----|
| ① | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 合格 |
| ② | 0 | +0.5 | +1.0 | 0 | +0.5 | 0 | |
| ③ | 0 | -0.5 | +1.0 | +0.5 | +1.0 | 0 | |
| ④ | 0 | -1.0 | +1.0 | -0.5 | +1.0 | 0 | |

許容値 : $\pm 3/100$ mm

SHINKO IND.LTD.

(5) 吸込ストレーナー

高速ポンプにおいては、ポンプ内に異物を混入させることは禁物である。そこでポンプ吸込側に装備する写真6のストレーナーを製作した。ストレーナーにはステンレス製60メッシュのネットが内臓されている。



写真6. 吸込ストレーナー

(6) ダイアフラムカップリング

写真7のダイアフラムカップリングは、イーグル工業(株)から購入した。



写真7. ダイアフラムカップリング

(7) 潤滑油冷却器

写真 8 の潤滑油冷却器は、シンコーで設計し、協力会社で製作した。



写真 8 . 潤滑油冷却器

4.1.3 給水ポンプのポリウレタンケーシングの水圧試験(写真 9)

下部ポリウレタンケーシング合わせ面に M36 の植込みボルト 4 5 本を立て込んだ後、ケーシング合わせ面に液状パッキンを塗布した後、上部ポリウレタンケーシングカバーを取り付けて、軸貫通部の開口部両端にも閉止フランジを取り付けた後、3 分間以上 22.5MPa の水圧試験を実施し漏洩のないことを確認した。



写真 9 . 水圧試験中のポリウレタンケーシング

4.1.4 給水ポンプのポリュートケーシング合せ面強度の解析

ポリュートケーシング合せ面は、運転中、150 の給水温度と 150 kg/cm² の超
高圧に耐えなければならないため、十分な強度解析が必要である。そこでこの道
の権威者である神戸大学・大学院 海事科学研究科・工学博士 福岡 教授殿のご
指導を仰ぎ、ポリュートケーシング合せ面の高温時の強度を有限要素法による解
析と線膨張係数の異なる材質の締め付けボルト 3 種類についての解析手法を教
授願ひ、ケーシング材質 13Cr ステンレス鋼については、SUS630 ステンレス鋼
の締め付けボルトが最適であることを見出すことができた。その詳細は、添付「次
世代 LNG 船用超高压給水ポンプのケーシング合せ面及び締め付けボルトの熱
挙動と強度評価」の通りである。

4.2 増速機（写真 10 参照）

4.2.1 増速機的设计・製作

添付「株式会社ニコトランスミッションの成果報告書」の通り。

4.2.2 増速機の性能試験要領

添付「株式会社ニコトランスミッションの成果報告書」の通り。

4.2.3 試験結果

添付「株式会社ニコトランスミッションの成果報告書」の通り。

4.2.4 評価及び考察

添付「株式会社ニコトランスミッションの成果報告書」の通り。



写真 10 . 増速機完成品

4.3 結合性能試験

4.3.1 給水ポンプ及び増速機の仕様

| No. | 給水ポンプ | | No. | 増速機（日立ニコトランスミッション製） | |
|-----|-----------------------------|-----------|-----|------------------------------|----------|
| 1 | 機名 | DMG100-4G | 1 | 機名 | SG2800H |
| 2 | 吐出量 (m ³ /h) | 155 | 2 | 定格出力 (kW) | 1050 |
| 3 | 吐出圧力(kgf/cm ² G) | 150 | 3 | 回転数（入力側）(min ⁻¹) | 1788 |
| 4 | 吸込圧力(kgf/cm ² G) | 5.61 | 4 | 同上(出力側) min ⁻¹ | 7400 |
| 5 | 全圧力 (kgf/cm ²) | 144.39 | 5 | 歯車比 | 4.139 |
| 6 | 吸込温度 () | 151.9 | 6 | 潤滑方式 | 強制給油 |
| 7 | Req. NPSH | 13.4 | 7 | 潤滑油 | ISO VG68 |
| 8 | 回転数 (min ⁻¹) | 7400 ± 3% | 8 | 潤滑圧力 (kgf/cm ² G) | 1.5 |
| 9 | 予想ポンプ効率(%) | 65 | 9 | 予想増速機効率(%) | 98 |

注. 予想ポンプ効率は、増速機の効率を含む。ポンプ単体の予想ポンプ効率
 $p_p = 65 / 0.98 = 66.3 \%$ である。

4.3.2 駆動機の仕様

駆動機の計画は、電動機使用なるも手持機がないため、ポンプの試験は設備用蒸気タービンを使用して行う。

したがって、蒸気タービンは高速回転で回し、減速機により 1788min⁻¹ に減速して中間軸を介してポンプが駆動される。

| No. | 機名 | 設備用蒸気タービン |
|-----|-----------------------------|-----------|
| 1 | 定格出力 (kW) | 1050 |
| 2 | 高速軸回転数 (min ⁻¹) | 6569 |
| 3 | 低速軸回転数 (min ⁻¹) | 1788 |

4.3.3 試験装置（18ページの図7参照）

給水ポンプの吸込側に密閉タンクを設け、清水を外部から供給して蒸気により約 151 まで昇温し、圧縮空気ですポンプ吸込圧力が約 5.61 kgf/cm²G になるよう調節される。給水ポンプの吐出側には、吐出流量を調節する吐出弁が設けられ、

その下流側には吐出量計測用のフローノズルが装備されている。フローノズル出入口の主配管から小配管が取り出され、前後差圧計に接続されてパソコンにより吐出量が計算される。また、過熱防止オリフィスの下流側にもフローノズルが設けられ、吐出弁締切時、主配管と同様な方法により過熱防止流量がパソコンにより計算される。2つのフローノズルを通過した流量は密閉タンクに返される。

蒸気タービンの減速機と給水ポンプの増速機を接続する中間軸には、トルクメータが設けられ運転中のトルクが計測され、パソコンにより軸動力が算出される。

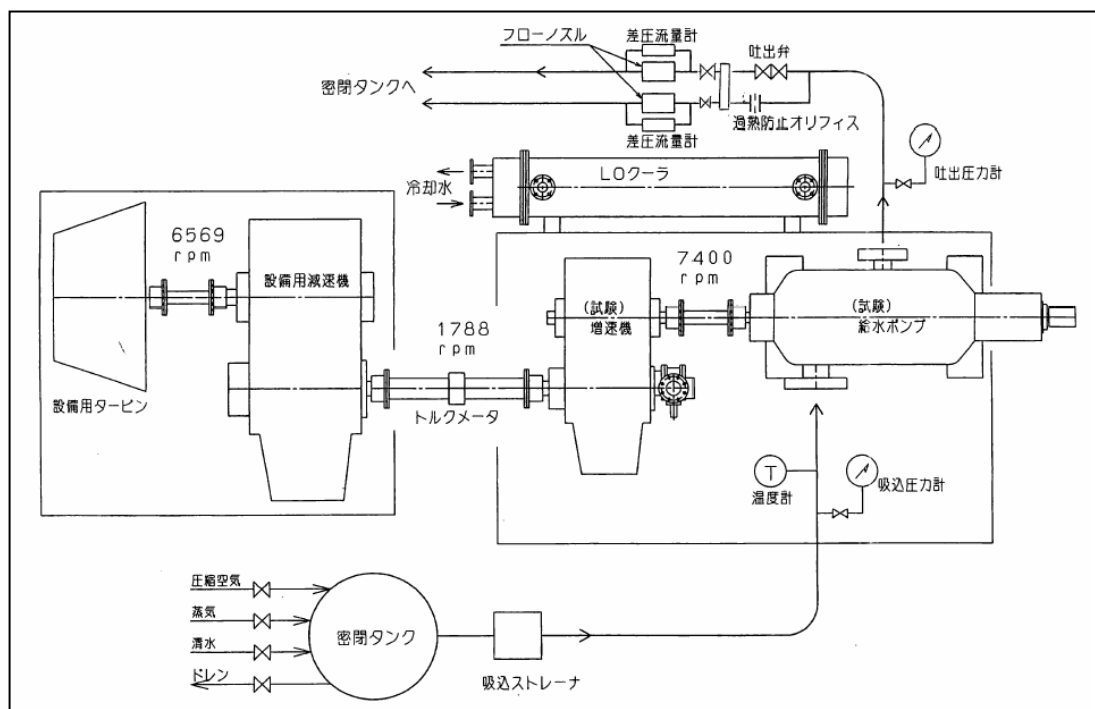


図 7. 試験装置

4.3.4 試験内容

(1) 性能試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、吐出圧力 $150 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ を保って締切から計画点を含む異なる吐出量 5 点についてポンプ吐出弁を調節して試験を行う。

各計測点の吐出量、吐出圧力、回転数、トルク、吸込圧力及び吸込温度を記録用紙に記入しポンプ軸動力及びポンプ効率を計算・記録する。

(2) 吐出弁締切過熱防止試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、吐出圧力 150 kgf/cm^2 を保

ってポンプ吐出弁を全閉して 10 分間保持し、加熱防止ラインから吸込タンクへ戻る液温を計測し、上昇温度 10 以下であることを確認する。

(3) 回転数変更試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、回転数をポンプ定格点の 100%から 95%、90%、85%、80%、75% 及び 70%回転数(吐出圧力、約 70 kgf/cm²G)まで徐々に下げて、各点の吐出量、吐出圧力、回転数、吸込圧力及び吸込温度を計測して、LNG 船搭載の場合、異常なく差圧制御が行われることを確認する。また、各計測値は記録用紙に記入する。

(4) Req.NPSH での確認運転

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、ポンプ回転数を上昇させて定格に設定した後、ポンプ吸込側密閉タンクの空気圧を徐々に下げて Req.NPSH (吸込圧力 : 5.31 kgf/cm²G) の点で 10 分間運転を行い、吐出圧力及び吸込圧力計に異常な触れがないこと、そして軸受の振動値に異常がないことを確認する。

(5) 継続運転試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、ポンプ回転数を上昇させて定格に設定して 1 時間の継続運転を行う。

継続運転中、ポンプ及び増速機の軸受部の振動値は、始動時と停止前の 2 回、そして軸受温度は 10 分毎に計測する。各軸受における振動値は、ポータブル計測器で軸受箱の上部、軸方向及び横方向の 3 方向を計測する。また、ポンプ停止前にポンプ及び増速機から 1 m 離れた位置で騒音を計測する。

なお、軸受の振動・温度の許容値及び騒音の参考値は次の通りとする。

- * 軸受部・振動の許容値 : 4.5 mm/sec(R.M.S.)
- * 軸受部・温度の許容値 : 75 以下
- * 騒音の参考値 : 110 d B (A)

4.3.5 結合試験結果

(1) 性能試験

給水ポンプの性能試験は、写真11の通りポンプ配管を行い、写真12の増速機と接続し、続いて写真13の工場設備用タービンと接続して実施した。吐出弁は、超高圧による振動・騒音を減じるため2つの弁を装備し2段絞りとした。試験結果は、図8及び表8-1の通りである。

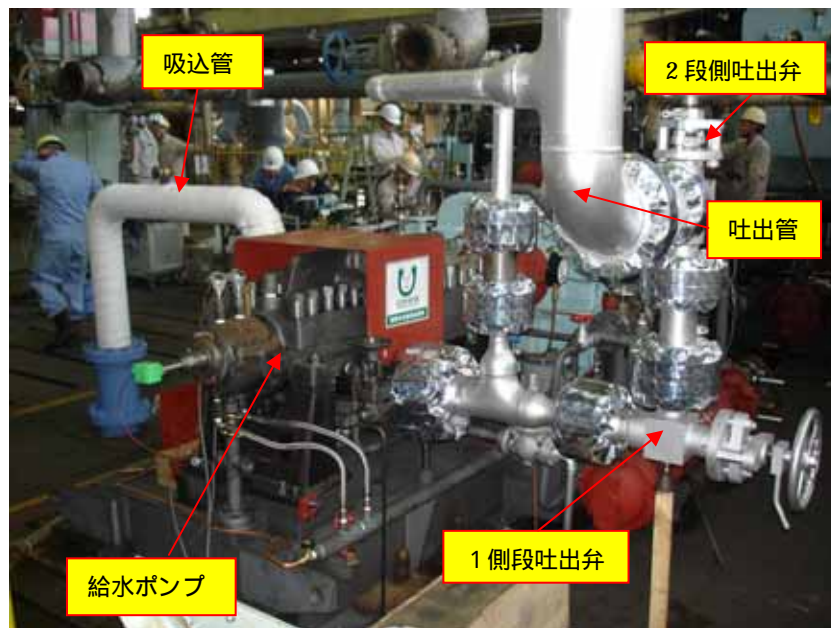


写真11．性能試験中の給水ポンプ



写真12．性能試験中の給水ポンプ用増速機

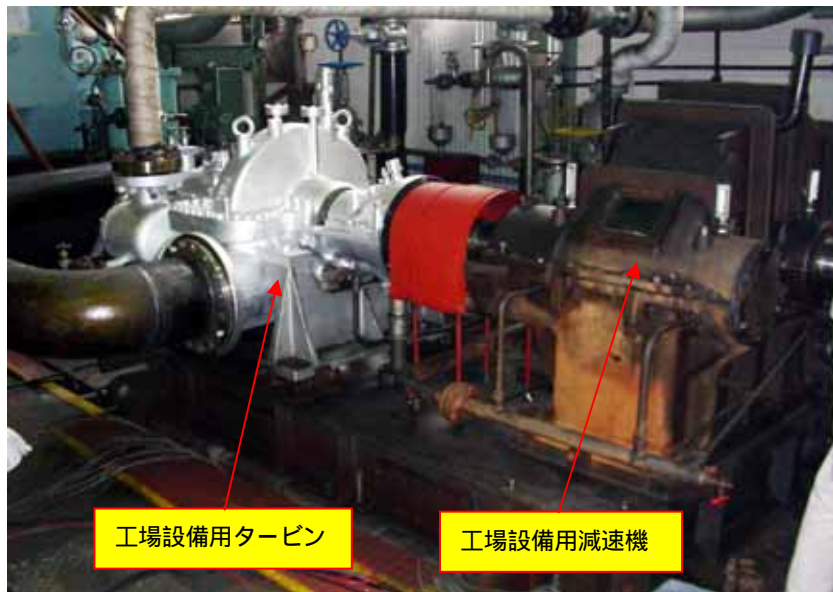


写真 1 3 . 性能試験中の給水ポンプ駆動タービン及び減速機

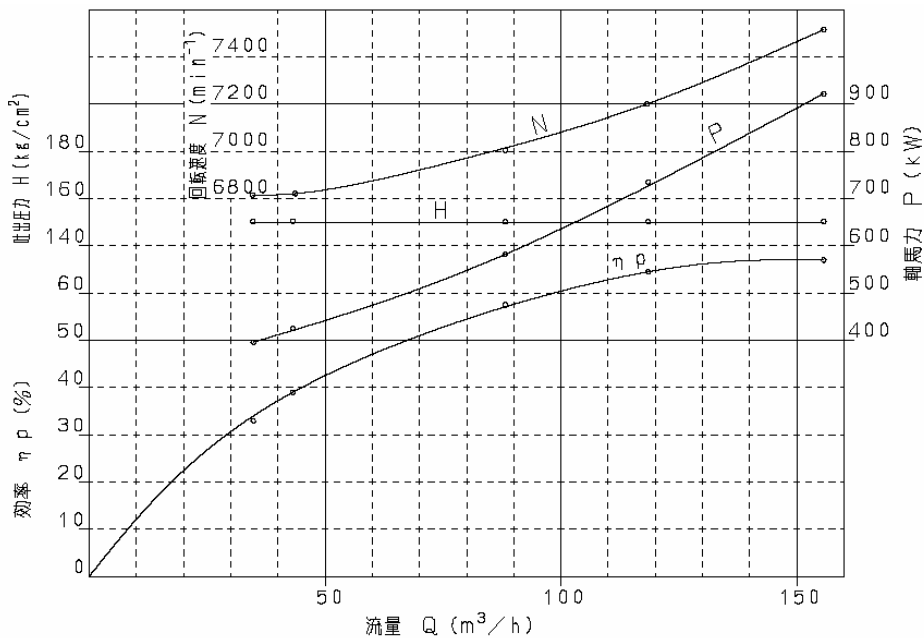


図 8 . 一定吐出圧力時の性能曲線

表 8 - 1 一定吐出圧力時の性能表

| | Q 容量 (³/h) | N 回転速度 (min ⁻¹) | H 吐出圧力 (kg/cm ²) | Hs 吸入圧力 (kg/cm ²) | P 軸馬力 (kW) | ηp 効率 (%) |
|---|---------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------|--------------|
| 1 | 155.7 | 7516 | 150.3 | 5.6 | 922 | 67 |
| 2 | 118.5 | 7206 | 150.4 | 5.7 | 735 | 64.5 |
| 3 | 88.2 | 7005 | 150.1 | 5.7 | 582 | 57.5 |
| 4 | 43.2 | 6821 | 150.2 | 5.7 | 425 | 38 |
| 5 | 34.8 | 6808 | 150.4 | 5.7 | 396 | 33 |

(2) 吐出弁締切過熱防止試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、吐出圧力 150 kgf/cm² を保ってポンプ吐出弁を全閉して 10 分間保持した時、加熱防止ラインからミニフローオリフィスを通して吸込タンクへ戻る液温は、150 で締切り 10 分後も同一温度であった。ミニフロー量を 30 m³/h で計画したが実測値は 34.8 m³/h であった。

(3) 回転数変更試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、回転数をポンプ定格点の 100% から 95%、90%、85%、80%、75% 及び 70% 回転数(吐出圧力、約 70 kgf/cm² G)まで徐々に下げて、各点の吐出量、吐出圧力、回転数、吸込圧力及び吸込温度を計測した。その試験結果は、図 9 及び表 9-1 の通りである。

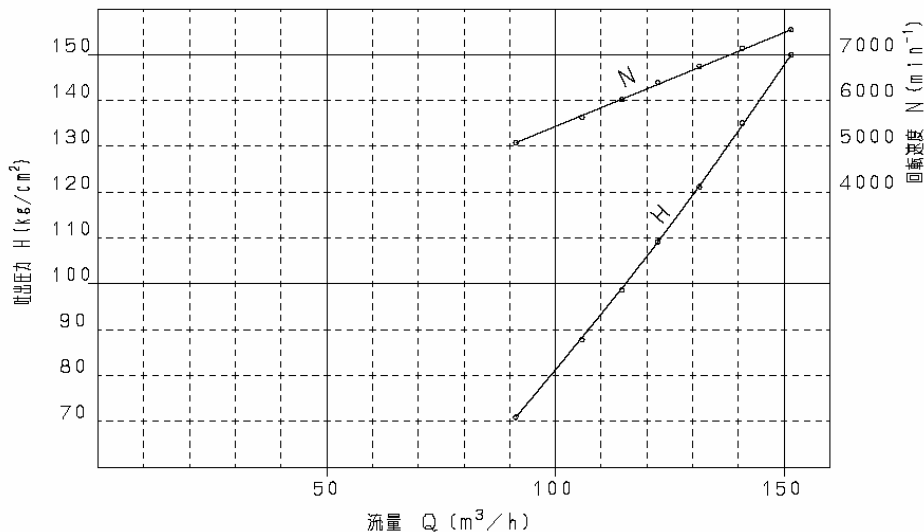


図 9. 100 ~ 70% 回転数変更時の性能曲線

表 9-1 100 ~ 70% 回転数変更時の性能表

| | Q 容量 (m ³ /h) | N | | H 吐出圧力 (kg/cm ²) |
|---|-----------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|
| | | 回転速度 (min ⁻¹) | 回転速度の割合 (%) | |
| 1 | 151.5 | 7545 | 100 | 150 |
| 2 | 140.8 | 7144 | 94.7 | 135.1 |
| 3 | 131.5 | 6755 | 89.5 | 121.2 |
| 4 | 122.4 | 6395 | 84.7 | 109.2 |
| 5 | 114.5 | 6022 | 79.8 | 98.6 |
| 6 | 105.8 | 5637 | 74.7 | 87.8 |
| 7 | 91.3 | 5078 | 67.3 | 70.9 |

(4) Req.NPSH での確認運転

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、ポンプ回転数を上昇させて定格に設定した後、ポンプ吸込側密閉タンクの空気圧を徐々に下げて Req.NPSH 13.4m (吸込圧力 : 5.31 kgf / cm²G) の点で 10 分間運転を行い、異常なく運転できることを確認した。

(5) 継続運転試験

給水ポンプの吸込条件を定格状態に合わせた後、ポンプ回転数を上昇させて定格に設定して 1 時間の継続運転を行った。

継続運転中、ポンプ及び増速機の軸受部の振動速度(R.M.S)及び振幅は、始動時と停止前の 2 回計測した。その計測記録は、24 ページ及び 25 ページの通りである。そして軸受温度及び潤滑油温度等は、約 10 分毎に計測した。その計測記録は、26 ページの通りである。また、ポンプ停止前にポンプ及び増速機から 1 m 離れた位置で騒音を計測した。その計測記録は、27 ページの通りである。

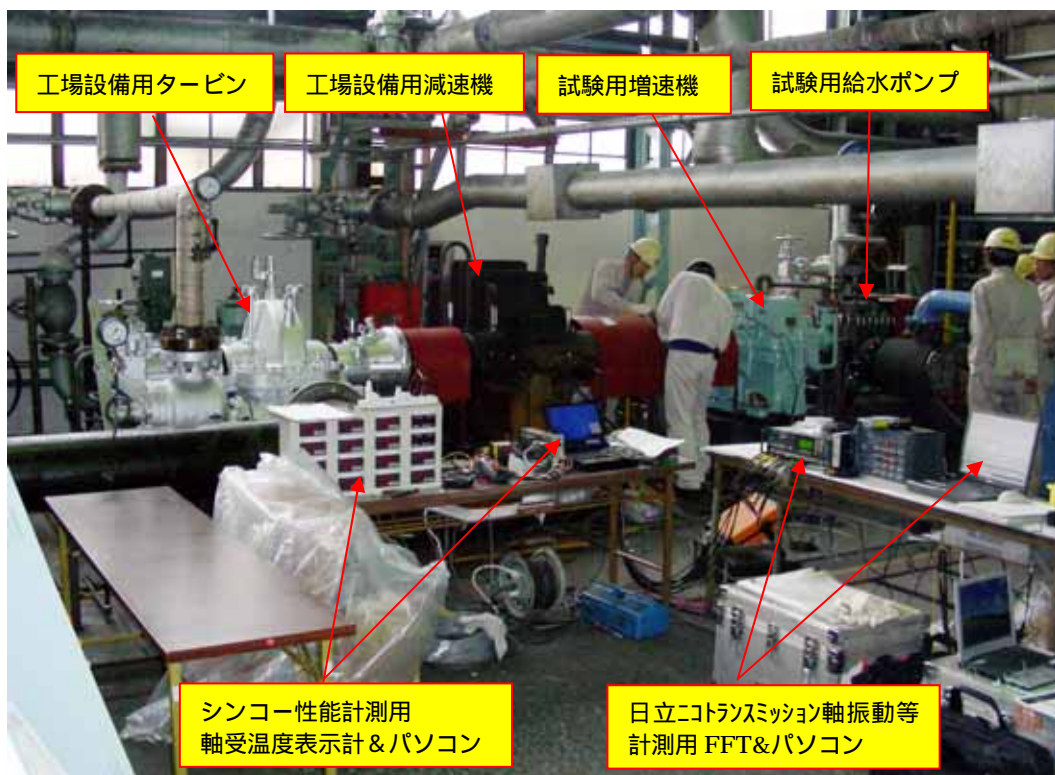
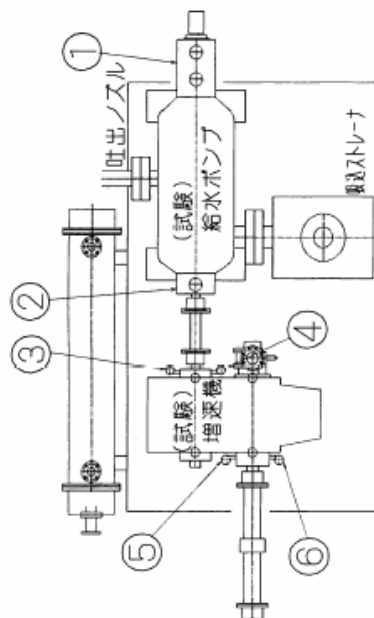


写真 14 . 給水ポンプ性能試験全体装置

超高压给水ポンプ・増速機振動計測記録

(定格運転開始時)

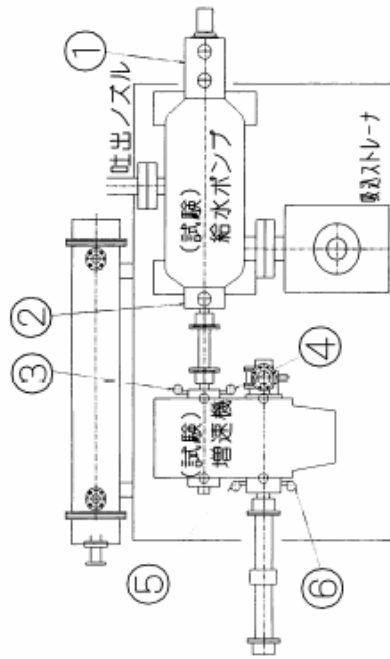


測定位置
軸受箱外部
測定機器

ハンディタイプ振動計：国際機械振動研究所VM-3314A(単位 μm)

| 振動値・・・振動速度、単位mm/sec(R.M.S) ・ 両振幅、単位V・・・上下方向 L・・・軸方向 T・・・左右方向 | | 測定位置・方向 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|---------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | ① | | | ② | | | ③ | | | ④ | | | ⑤ | | | ⑥ | | | | | |
| | | V | L | T | V | L | T | V | L | T | V | L | T | V | L | T | V | L | T | | | |
| 振動速度 mm/sec(R.M.S) | 0.7 | 1 | 3.8 | 1 | 0.8 | 0.2 | 4.0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.7 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| 両振幅 μm | 6 | 7 | 14 | 6 | 6 | 2 | 15 | 3 | 3 | 3 | 6 | 6 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |

超高压给水ポンプ増速機振動計測記録 (定格運転終了時)

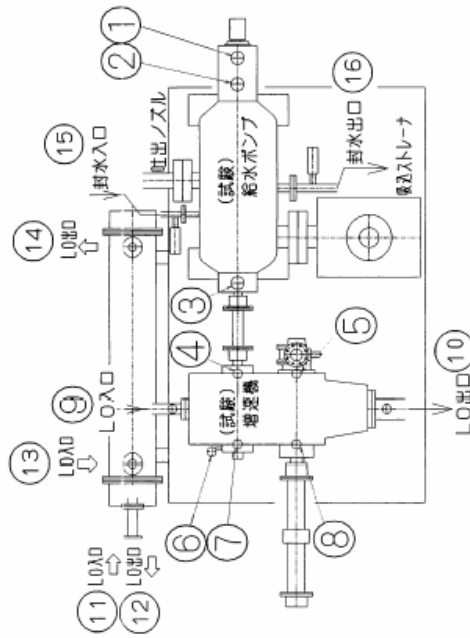


測定位置
軸受箱外部
測定機器

ハンディタイプ振動計 : 国際機械振動研究所VM-3314A(単位 μm)

| 振動値・・・振動速度、単位mm/sec(R.M.S) | | V・・・上下方向 | | L・・・軸方向 | | T・・・左右方向 | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|----------|-----|---------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 測定位置・方向 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ① | | ② | | ③ | | ④ | | ⑤ | | ⑥ | | | | | | | | | | |
| V | L | V | L | V | L | V | L | V | L | V | L | | | | | | | | | |
| 0.3 | 0.9 | 4 | 0.8 | 0.1 | 3.8 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 1.9 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.7 | 0.7 | 1.5 | 0.4 |

超高压给水ポンプ・増速機軸受温度及び潤滑温度計測記録 (連続運転時)

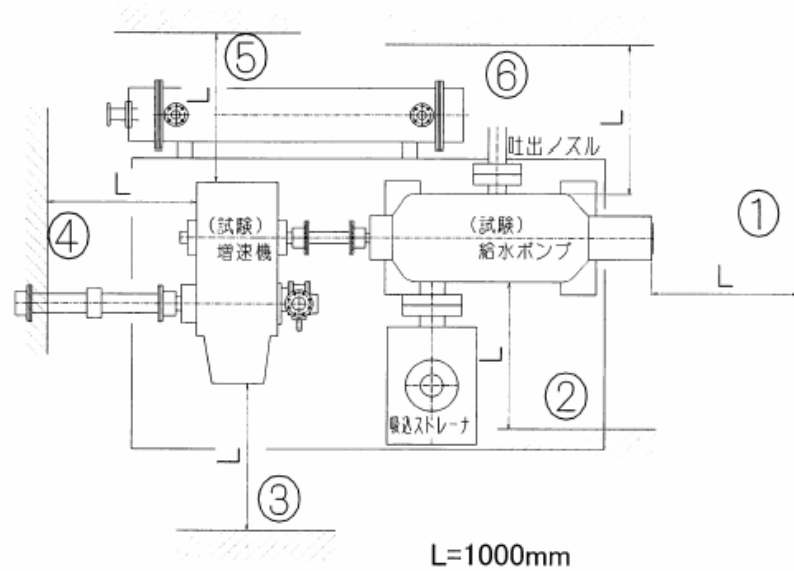


測定機器
温度センサ: 明陽電機 PTR-L(0~200°C)

温度単位: °C

| 時間 | ポンプ | | | | | | 増速機 | | | | | | LOクーラ | | | | | |
|-------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------|------|------|------|-----------|-----------|
| | 軸受箱 | | | 封水 | | | 軸受箱 | | | 潤滑油 | | | 潤滑油 | | 冷却水 | | | |
| | スラスト 軸受 | ラジアル 軸受 | ラジアル 軸受 | 封水 入口 | 封水 出口 | 封水 出口 | 入力軸 出力側 | 出力軸 出力側 | 入力軸 出力側 | 出力軸 スラスト | 出力軸 入力側 | 入力軸 入力側 | LO入口 | LO出口 | LO入口 | LO出口 | 冷却水 入口 | 冷却水 出口 |
| 13:12 | 52 | 45 | 44 | 17 | 20 | 20 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 11 | 12 | 41 |
| 13:25 | 53 | 45 | 46 | 17 | 20 | 20 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 11 | 12 | 42 |
| 13:35 | 54 | 46 | 47 | 18 | 21 | 21 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 11 | 12 | 43 |
| 14:05 | 54 | 46 | 47 | 18 | 22 | 22 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 11 | 12 | 43 |
| 14:15 | 54 | 46 | 47 | 18 | 22 | 22 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 11 | 12 | 43 |
| 14:25 | 54 | 46 | 47 | 18 | 22 | 22 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 11 | 12 | 43 |

超高压给水ポンプ・増速機騒音計測記録
(定格運転時)



測定機器
騒音計: リオン株式会社
型式: NA-09

騒音値: 単位 dB(A)

| 測定箇所 | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|
| ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ |
| 97 | 96 | 97 | 97 | 98 | 99 |

4.3.6 解放検査

給水ポンプ及び増速機の性能試験終了後、解放検査を実施した。結果は、写真15～22通り極めて良好であった。



写真15. 下部ポリュートケーシング及びポンプローター



写真16. 上部ポリュートケーシング



写真 17. 吸込ストレーナー



写真 18. 軸端側ラジアル及びスラスト軸受



写真 19. カップリング側ラジアル軸受



写真 20. スラストパッド



写真 2 1. 軸端側ラジアルメタル



写真 2 2. カップリング側ラジアルメタル

5. まとめ

5.1 目標の達成について

事業の目標は、4項目でいずれについても次の通り達成することができた。

(1) 吐出圧力 150kg/cm²、給水温度 151 の超高压給水ポンプの開発

この第1の目標に対して、ポンプ完成後、吐出圧力 150kg/cm²、給水温度 151 の実負荷を掛けて性能試験及び継続試験を実施したところ、ポンプ及び増速機共極めて安定しており、次世代 LNG 船用超高压給水ポンプとして実用化の目途が付き、目標を達成することができた。

(2) 超高压ではあるが、水平分割で実現し、上下二つ割れケーシングによって従来と同じく解放・組立ての容易さの確保

従来の LNG 船の給水ポンプは、吐出圧力が 83kg/cm² であった。Re-heat 船の吐出圧力は、150kg/cm² と言われておりケーシング合わせ面の漏れ対策が最も重要であると考えられた。そこで神戸大学の福岡教授殿のご指導を仰ぎ有限要素法により解析した結果、ケーシング材質の 13Cr ステンレス鋼に対しては、SUS630 ステンレス鋼の締め付けボルトが最適であることが分り、この材料を使用することにより工場試験時、151 の液温下において 150kg/cm² の圧力に耐え、ケーシング合わせ面からの漏洩は全くなく成功裡に終わることができた。

したがって、ポンプケーシングは水平分割構造で上下2つ割れとし、従来と同じく解放・組立の容易さが確保でき、2つ割れケーシングの課題を克服することができた。

(3) インペラの段数を押さえるため、7400min⁻¹の高速回転のものの開発

従来の LNG 船の給水ポンプは、段数3段で回転数は 6300~6500min⁻¹ であった。今回、段数は4段とし回転数は 7400min⁻¹ を選定したが、容量 155m³/h x 吐出圧力 150kg/cm² に対して若干の容量不足を来たしたため、回転数を 7545 min⁻¹ と約2%上げることで性能を満足することができた。回転数の許容値は、±3%としていたため計画以内に収めることができた。

また、NPSHについても 13.4m で安定して運転できることを確認した。したがって、7400min⁻¹ + 2%高速回転に対しての課題は、克服できた。締切り時の過熱防止については、34.8m³/h のバイパス量を流すことにより液温は全く上昇しないことを確認した。

(4) 従来は蒸気タービン駆動であったが、全体効率の観点から、電動機駆動用として開発する。このため、1800 min⁻¹の電動機昇速化の増速機が必要で、ポンプと増速機との組み合わせの安定化の検証

従来は、蒸気タービン直結であったが全体効率向上を図るため、1800 min⁻¹電動機と増速機との組み合わせにより7400min⁻¹の回転数を得ることで計画した。増速機との組み合わせに不具合がないことを検証するため、次の試験を行った。

LNG 船では、給水ポンプの回転数は差圧制御により70～100%の間で使用される。この70～100%回転数変更を行ったが、ポンプ及び増速機共不具合ゾーンはなく追従性は極めて良好であることを確認した。

ポンプ効率については、増速機の効率も含めて65%を予想していたが実測では67%と好成績を得ることができ、全体効率向上も達成することができた。

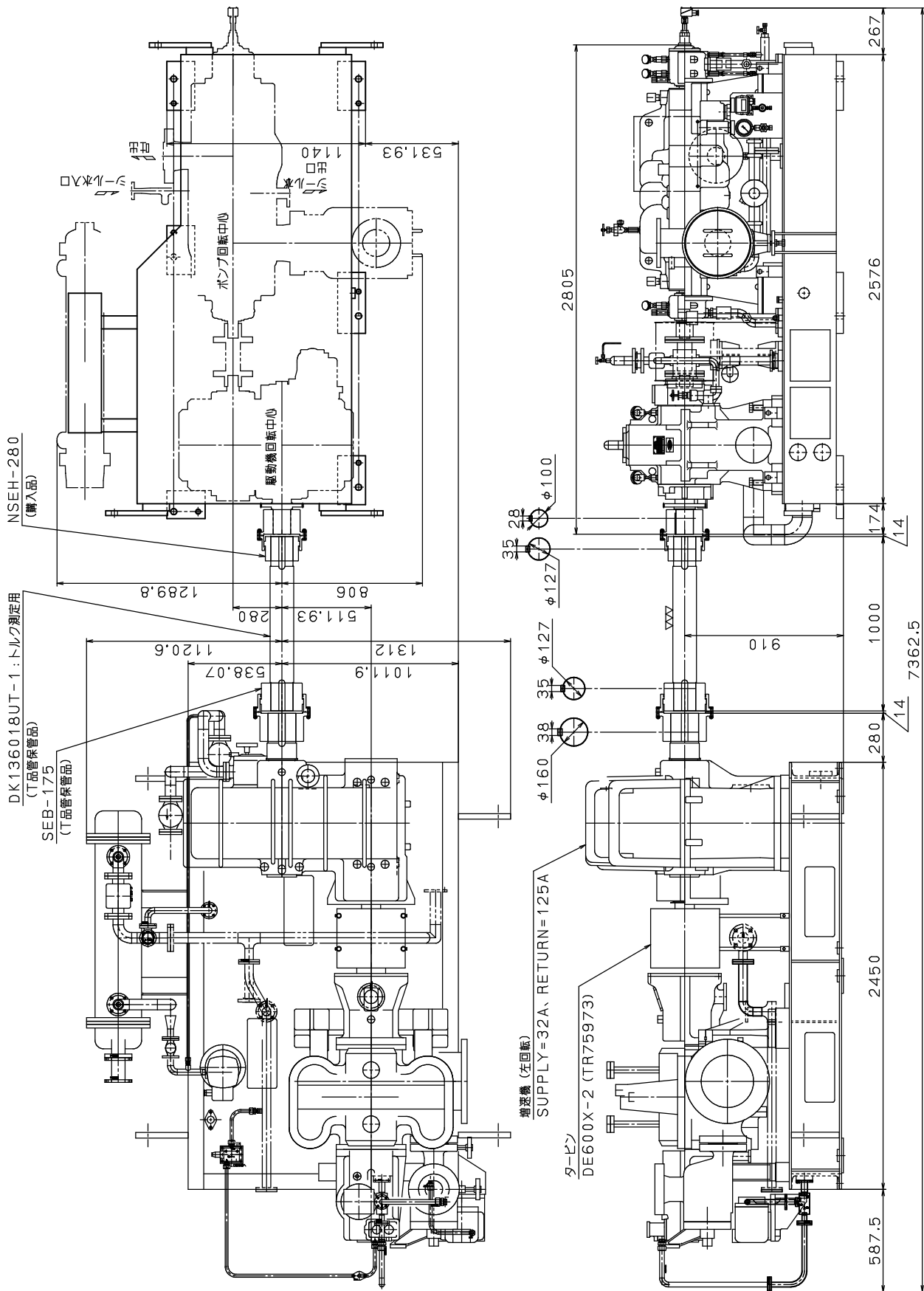
5.2 今後の予定

今回の超高压給水ポンプの試作機を作成することにより、実用に供することが確認できたため、今後は、商品化をはかり早期にLNG 船向けの事業として展開していきたい。

この研究開発でご指導いただいた神戸大学の福岡教授殿及びご協力いただいた株式会社日立ニコトランスミッション殿に対して深く感謝申し上げます。

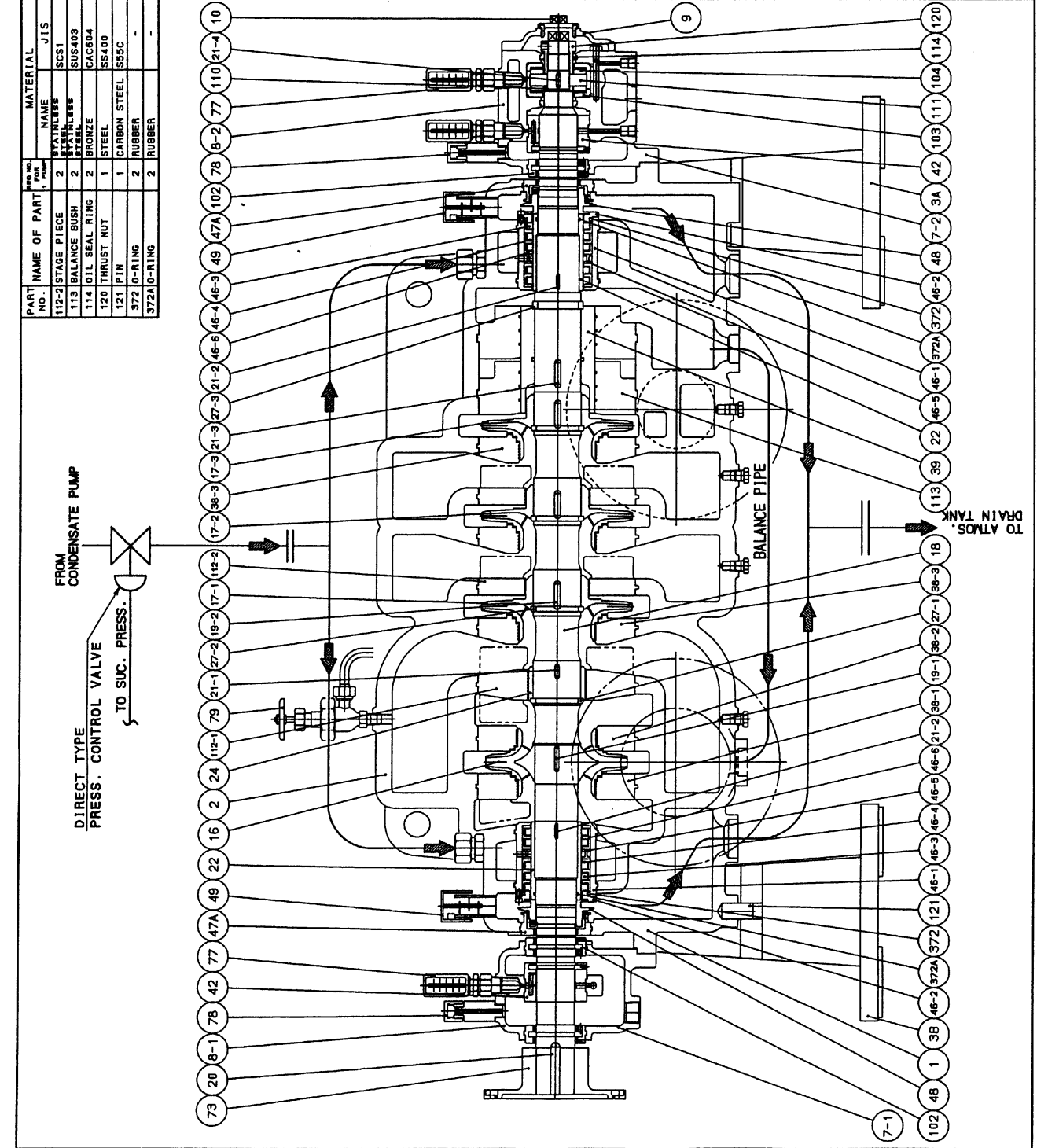
以上

添 付 書 類



超高压给水ポンプ/テストレイアウト
 DMG100-4G 1台

| PART NO. | NAME OF PART | QTY | MATERIAL | | PART NO. | NAME OF PART | QTY | MATERIAL | |
|----------|---------------|-----|--------------|--------|----------|--------------------|-------|--------------|----------|
| | | | NAME | JIS | | | | NAME | JIS |
| 112-2 | STAGE PIECE | 2 | SPAINLERS | SCS1 | 1 | VOLUTE CASING | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| 113 | BALANCE BUSH | 2 | SPAINLERS | SUS403 | 2 | VOLUTE COVER | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| 114 | OIL SEAL RING | 2 | BRONZE | CAC604 | 3A | PEDESTAL | 1 | STEEL | SS400 |
| 120 | THRUST NUT | 1 | STEEL | SS400 | 3B | PEDESTAL | 1 | STEEL | SS400 |
| 121 | PIN | 1 | CARBON STEEL | S55C | 7-1 | BEARING HOUSING | 1 | CAST IRON | FC200 |
| 372 | O-RING | 2 | RUBBER | - | 7-2 | BEARING HOUSING | 1 | CAST IRON | FC200 |
| 372A | O-RING | 2 | RUBBER | - | 8-1 | BEARING CAP | 1 | CAST IRON | FC200 |
| | | | | | 8-2 | BEARING CAP | 1 | CAST IRON | FC200 |
| | | | | | 9 | BEARING COVER | 1 | CAST IRON | FC200 |
| | | | | | 10 | BEARING COVER PLUG | 1 | STEEL | SS400 |
| | | | | | 16 | IMPELLER | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| | | | | | 17-1 | IMPELLER | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| | | | | | 17-2 | IMPELLER | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| | | | | | 17-3 | IMPELLER | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| | | | | | 18 | IMPELLER SHAFT | 1 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 19-1 | IMPELLER KEY | 1 | SPAINLERS | SUS304 |
| | | | | | 19-2 | IMPELLER KEY | 3 | SPAINLERS | SUS304 |
| | | | | | 20 | COUPLING KEY | 1 | CARBON STEEL | S45C |
| | | | | | 21-1 | SLAVE KEY | 1 | SPAINLERS | SUS304 |
| | | | | | 21-2 | SLEEVE KEY | 2 | SPAINLERS | SUS304 |
| | | | | | 21-3 | BALANCE KEY | 1 | SPAINLERS | SUS304 |
| | | | | | 21-4 | PELLAW KEY | 1 | STEEL | SUS304 |
| | | | | | 21-4 | PELLAW KEY | 1 | CARBON STEEL | S55C |
| | | | | | 22 | SLEEVE | 2 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 24 | STAGE SLEEVE | 1 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 27-1 | SPLIT RING | 1 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 27-2 | SPLIT RING | 3 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 27-3 | SPLIT RING | 1 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 38-1 | MOUTH RING | 1 | SPAINLERS | SCS1 |
| | | | | | 38-2 | MOUTH RING | 1 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 38-3 | MOUTH RING | 3 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 39 | BALANCE PISTON | 1 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 42 | BEARING METAL | 2SETS | CARBON STEEL | SCS1 |
| | | | | | 46-1 | HOLDER | 2 | SPAINLERS | - |
| | | | | | 46-2 | HOLDER COVER | 2 | SPAINLERS | - |
| | | | | | 46-3 | SEAL RING | 10 | SPAINLERS | - |
| | | | | | 46-4 | SPRING | 10 | SPAINLERS | - |
| | | | | | 46-5 | LANTERN RING | 2 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 46-6 | SEAL RING RETAINER | 10 | SPAINLERS | SUS420J2 |
| | | | | | 47 | ISLAND BUSH | 2 | BRONZE | CAC403 |
| | | | | | 48 | FLINGER | 2 | SPAINLERS | SUS403 |
| | | | | | 49 | VENT CAP | 2 | CARBON STEEL | S45C |
| | | | | | 73 | COUPLING FLANGE | 1 | Cr-Mn STEEL | SCM435 |
| | | | | | 77 | THERMOMETER | 3 | - | - |
| | | | | | 78 | VENT VALVE | 2 | BRASS | C3604 |
| | | | | | 102 | OIL GUARD | 1 | FORGED STEEL | SFA40 |
| | | | | | 103 | CARRIER RING | 3SETS | BRONZE | CAC406 |
| | | | | | 104 | THRUST PAD | 2SETS | CARBON STEEL | ST3C |
| | | | | | 110 | ADJUSTING RING | 1 | STEEL | SS400 |
| | | | | | 111 | THRUST COLLAR | 1 | CARBON STEEL | S30C |
| | | | | | 112-1 | STAGE PIECE | 1 | SPAINLERS | SCS1 |



SECTIONAL DRAWING
FOR
MAIN FEED PUMP

MODEL DMG100-4G
DRAW. NO. CB-10401A

SHINKO IND.LTD.

次世代 LNG 船用超高压給水ポンプのケーシング合せ面 及び 締め付けボルトの熱挙動と強度評価

1.1 緒言

Fig.1.1.1 に示すような LNG 船の主機には、通常蒸気タービンが採用されている。次世代 LNG 船では更なる燃費削減を目指すため、主機タービンプラントの高圧化が進められている。近い将来、ボイラ圧力 12MPa のボイラの出現が必須で、この高圧に対応した超高压ボイラ用給水ポンプの開発は急務である。さらに、給水ポンプ内部には高温の流体が流れており、内圧と同時に大きな熱負荷を受けている。

一方、給水ポンプのケーシング部の締結には多数のボルトが使用されている。しかしながら、これらのボルトは内圧と熱負荷を同時に受けるという非常に厳しい使用状況にあり、ケーシング締結部の熱および力学挙動を評価することは安全面の観点から非常に重要である。

そこで本章では、開発中の給水ポンプを対象に、内圧と熱負荷を受けるボルト締結体としてケーシングのシール性能を評価した。

1.2 ケーシング部のモデル化

Fig.1.2.1 は現在開発中の給水ポンプのケーシング合わせ面を模式的に示したものである。図の給水ポンプは4段式で、シール性能が最も問題となるのは最終段(4段目)の周辺である。このような複雑な形状を有する給水ポンプの完全な3次元モデルを作成することは容易ではない。そこで、図中に示した最終段付近の断面(A-A')を対象として、簡略化したモデルを作成する。左右1本ずつのボルトで締結された部分を取り出し、ケーシングがボルト中央断面に対して軸方向に对称で、さらにケーシングの合わせ面についても対称であると仮定する。Fig.1.2.2 は、その結果得られた給水ポンプの1/4有限要素モデルである。節点数は4636、要素数は3748で、8節点6面体要素を使用した。ボルトはM36、ポリウレタンケーシング部の寸法は、平均内径348mm、肉厚28mmである。

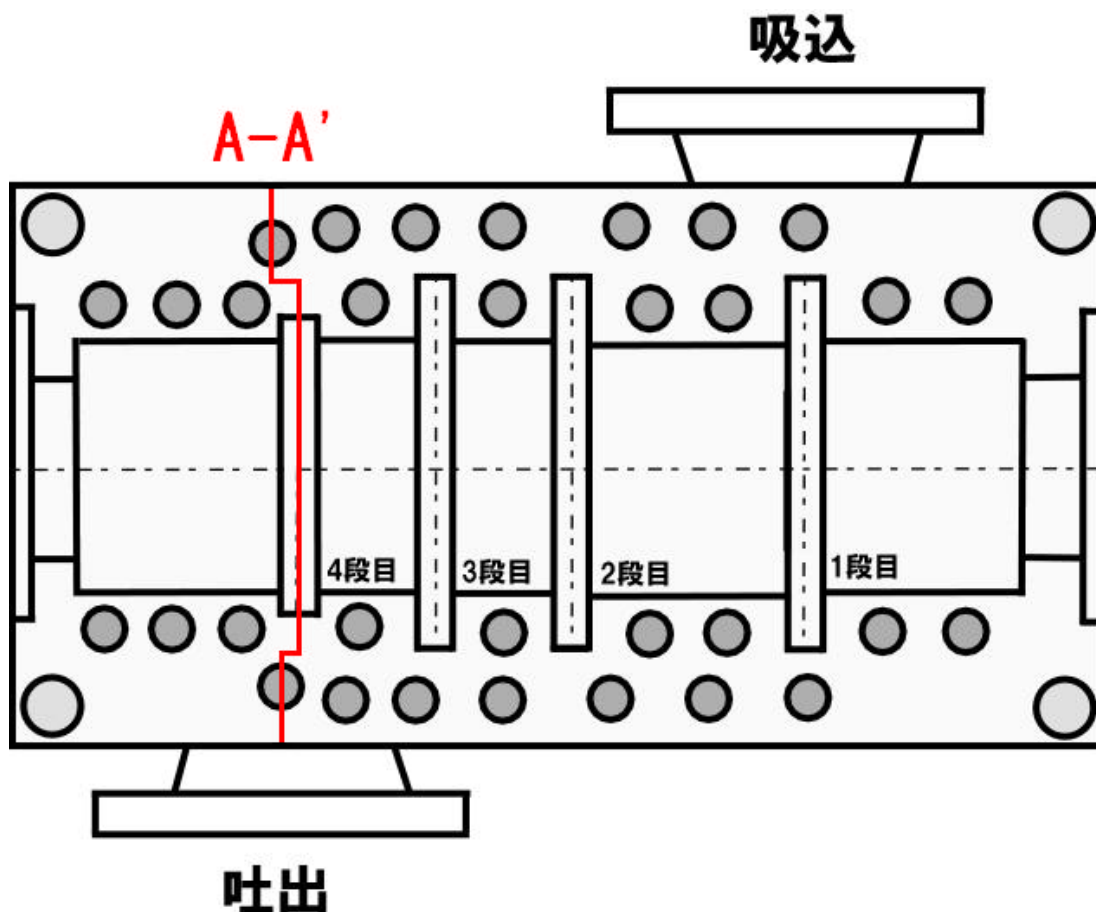


Fig1.2.1 Top view of lower casing

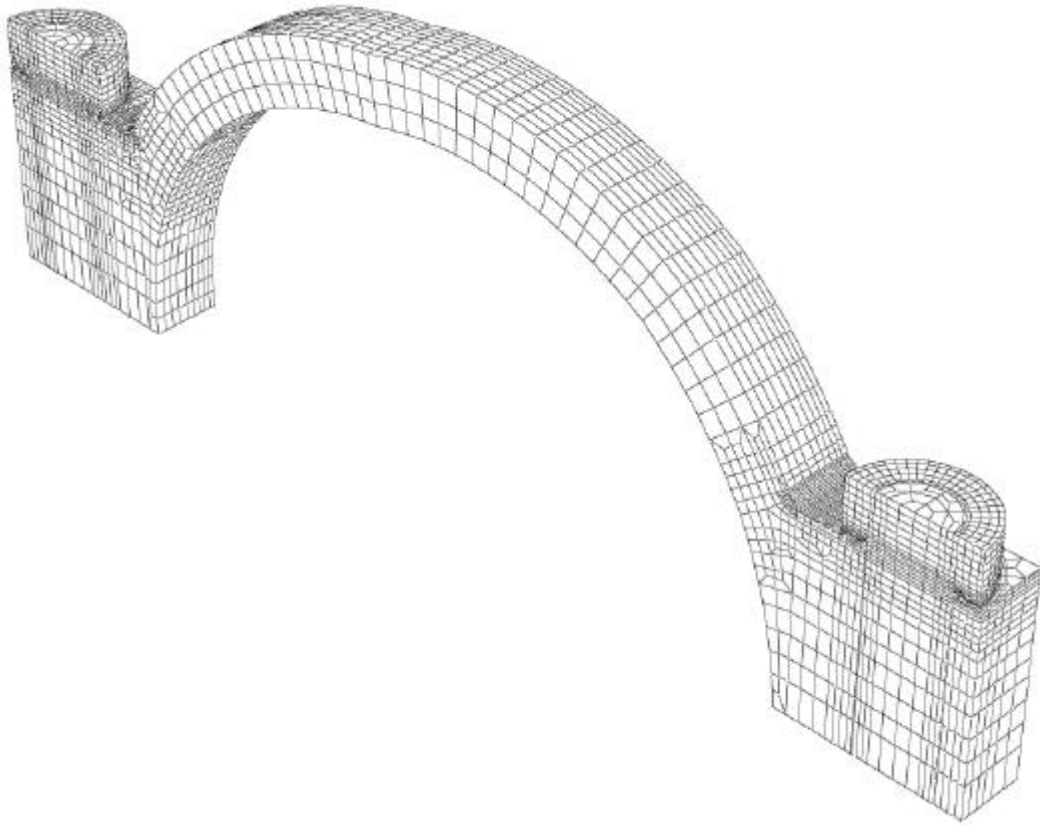


Fig1.2.2 Finite Element model

1.3 解析方法と解析条件

パラメトリックな解析を行うため、標準解析条件を以下のように設定した。

ボルトに初期軸応力 250MPa を与え(Step 1)、内圧 15MPa を付加(Step2)する。その後、流体温度を考慮して内部流体温度を 150 (Step3)として熱負荷を与えた。給水ポンプが内圧 15MPa を受けた場合、軸方向に引張り応力が発生するため、ケーシングの断面に軸方向引張り応力 46.6MPa も同時に与える。軸方向引張り応力は以下の方法で算出した。

$$\text{内圧を受ける薄肉円筒の軸方向応力：} \quad \sigma_z = \frac{pd}{4t}$$

上式に内圧 $p=15$ [MPa]、内径 $d=348$ [mm]、肉厚 $t=28$ [mm]、を代入して σ_z を求めた。

$$\sigma_z = \frac{pd}{4t} = \frac{15 \times 348}{4 \times 28} = 46.6[\text{MPa}]$$

ケーシング内部表面熱伝達率は $1000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、ケーシング・ボルト頭部の表面熱伝達率は $25\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、雰囲気温度は 20 、その他の面は断熱境界とした。また、接触面の中心線平均あらさは $Ra_t = Ra_1 + Ra_2 = 6.4\mu\text{m}$ ($Ra = 3.2\mu\text{m}$)、摩擦係数は 0.15 と仮定した。

今回解析対象とした給水ポンプは、ケーシング部にマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403、ボルトに低合金鋼 SCM435 が使用されている(Type2)。これら材質の影響を見るためにケーシング部、ボルト共に機械構造用炭素鋼 S45C を想定した Type1 を比較対象とした。また、ケーシング部に SUS403、ボルトに析出硬化系ステンレス鋼 SUS630 を用いた Type3 についても解析を行った。

次に、内部流体温度による影響をみるため、ケーシング内部流体温度を 100 、 200 とした場合についても解析を行った。また内圧の影響を見るために、設計内圧 15MPa 、試験内圧 22.5MPa 、比較のために内圧零の場合についても解析を行った。さらに、品質のばらつきによる線膨張係数の違いの影響をみるために、ボルトのみ線膨張係数を 0.5×10^{-6} 変化させて解析を行った。

Table1.3.1 に解析に用いた材料定数を示す。表中の α は線膨張係数、 k は熱伝導率、 ρ は密度、 c は比熱、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。なお、材料定数の温度依存性は考慮していない。

Fig.1.3.1 に Type 別の材料の組み合わせ、Fig.1.3.2 ~ Fig.1.3.4 に境界条件を示す。

Table 1.3.1 Material properties of the objective bolted joint

| Materials | | | | c | E | |
|---------------|-----------------------|--------|----------------------|----------|----------|-----|
| | (1/K) | (W/mK) | (kg/m ³) | (J/kgK) | (GPa) | |
| S45C | 11×10^{-6} | 43 | 7800 | 466 | 200 | 0.3 |
| SCM435 | 11.7×10^{-6} | 48.3 | 7840 | 473 | 200 | 0.3 |
| SUS403 | 9.74×10^{-6} | 26.9 | 7740 | 442 | 200 | 0.3 |
| SUS630 | 10.5×10^{-6} | 16 | 7900 | 450 | 200 | 0.3 |

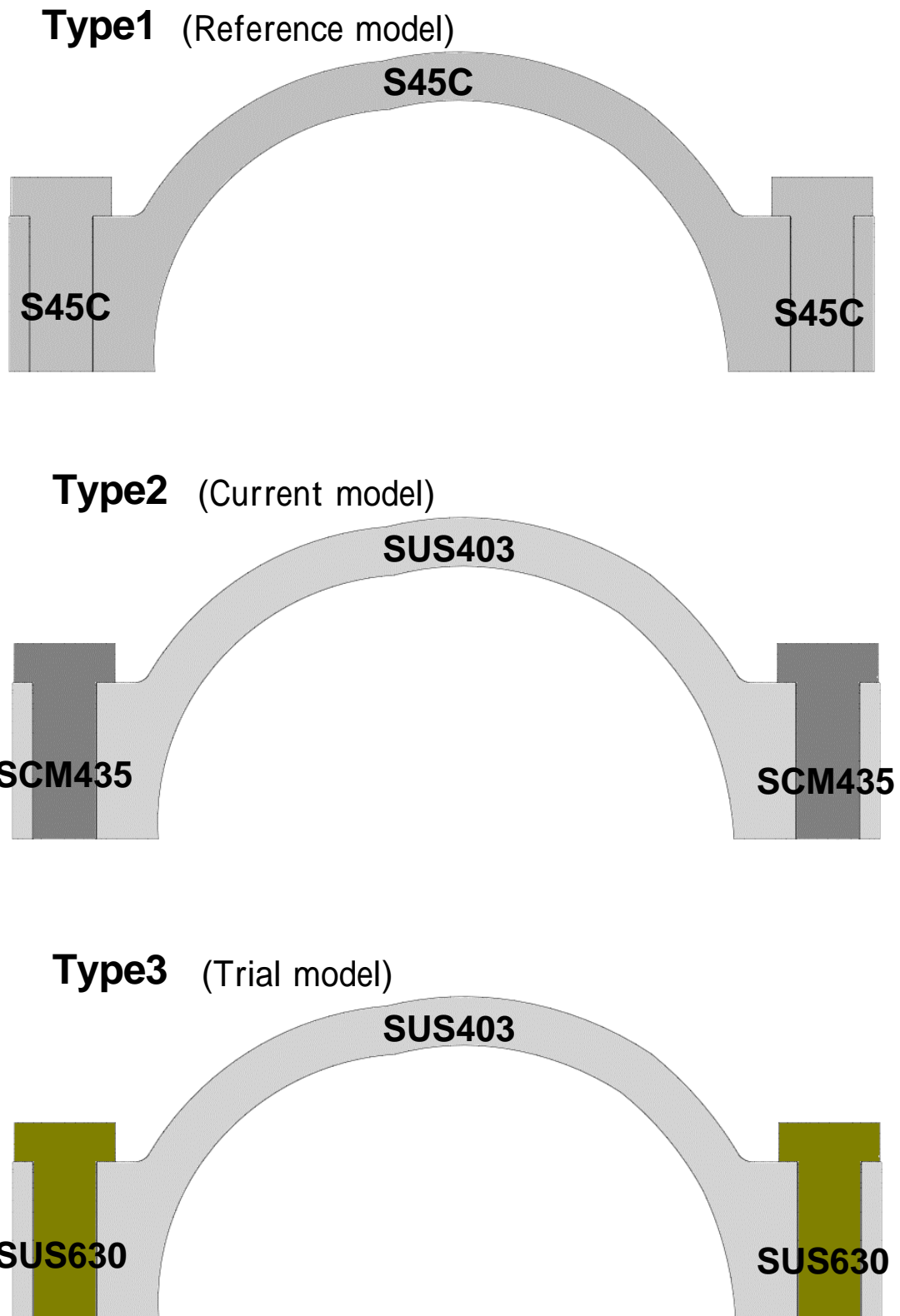


Fig1.3.1 Combination of materials for each analytical model

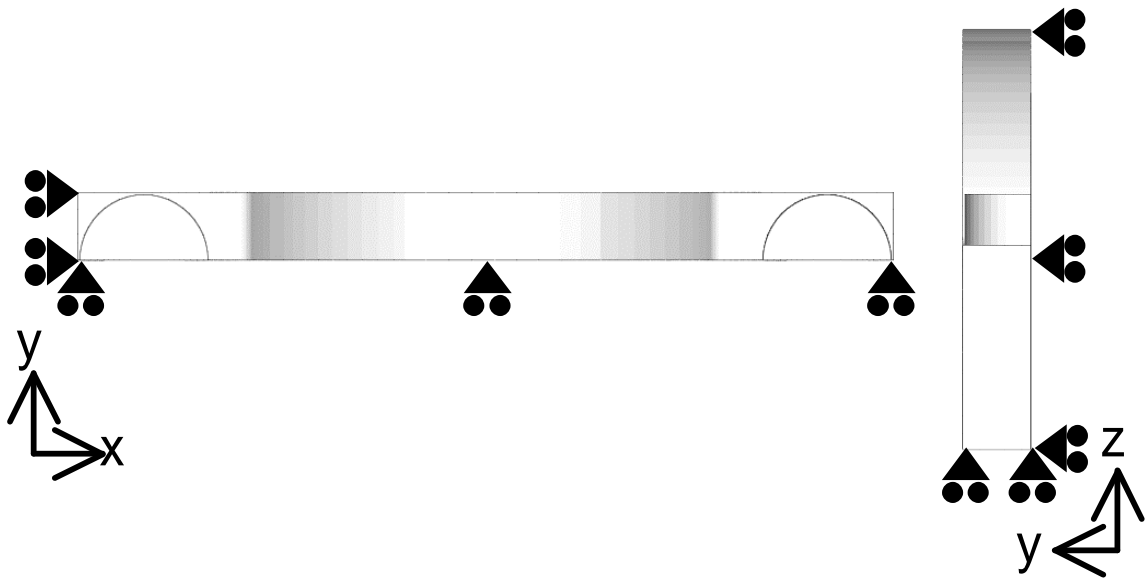


Fig 1.3.2 Displacement-constrained boundary conditions

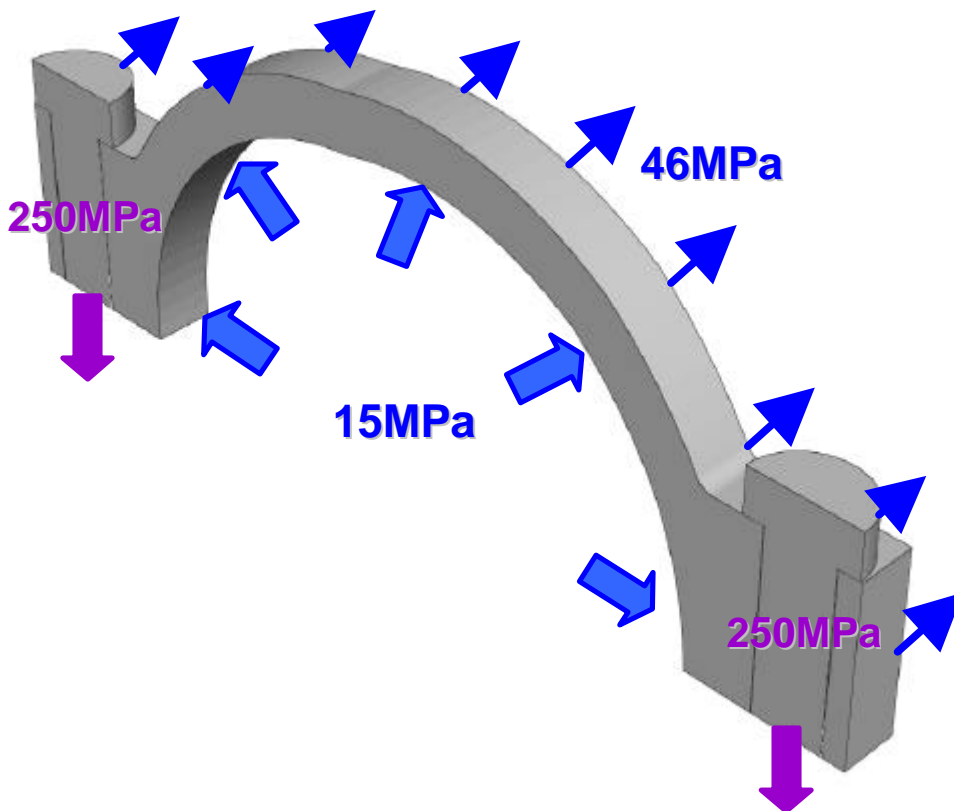
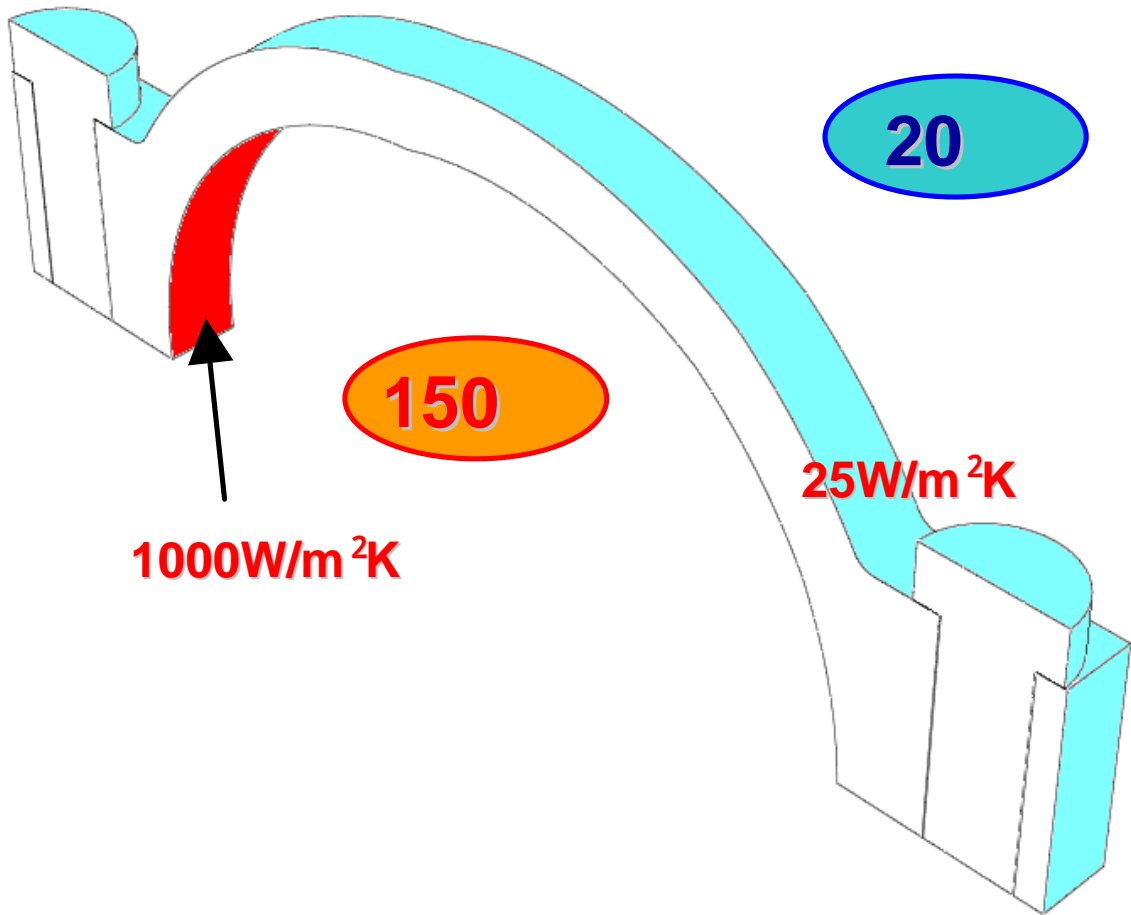


Fig 1.3.3 Boundary conditions for internal pressure and bolt stress (standard condition)



**Fig 1.3.4 Boundary conditions for thermal field
(standard condition)**

1.4 解析結果

1.4.1 材質の影響

・温度分布図

Fig.1.4.1 ~ Fig.1.4.3 に **Type1**(ケーシング：S45C , ボルト：S45C) , **Type2**(ケーシング：SUS403 , ボルト：SCM435) , **Type3**(ケーシング：SUS403 , ボルト：SUS630)の場合の加熱後 **7200s** の温度分布図を示す．解析はいずれも標準解析条件で行っている．

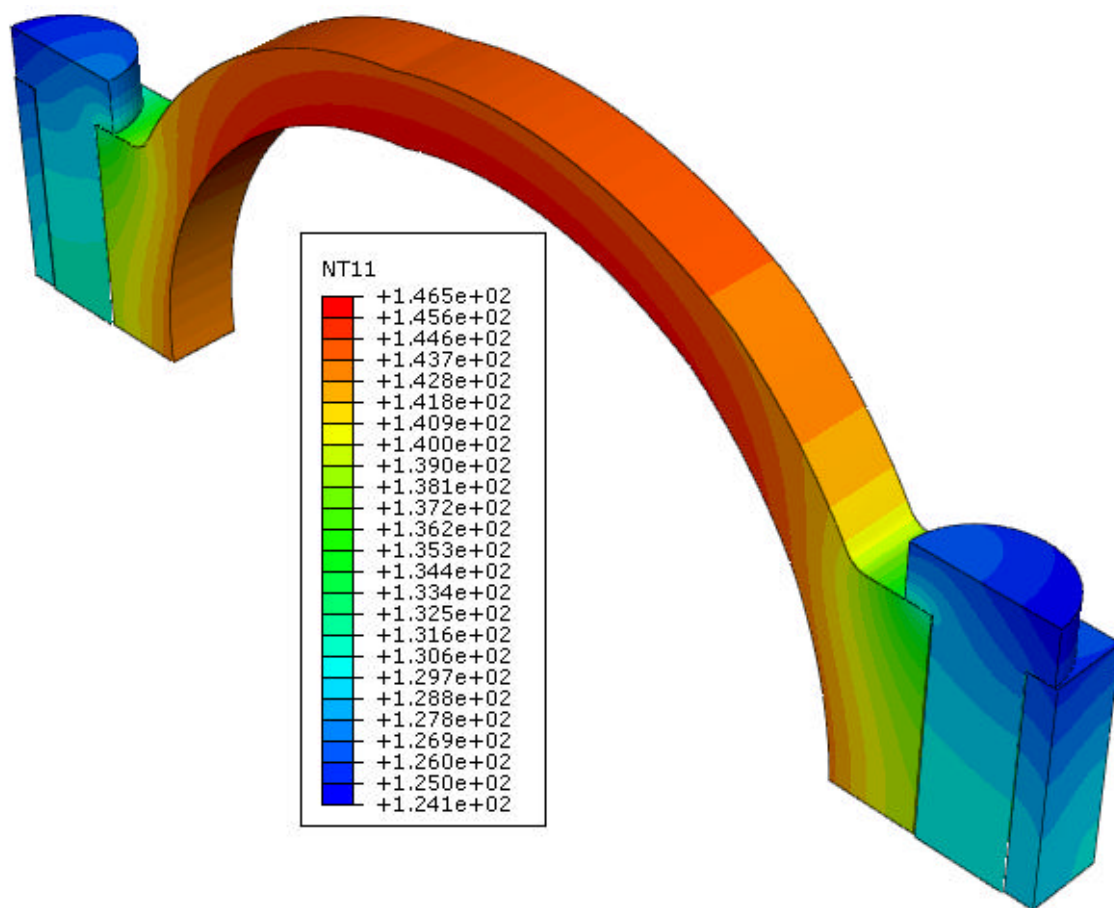


Fig1.4.1 Temperature distributions in case of Type1

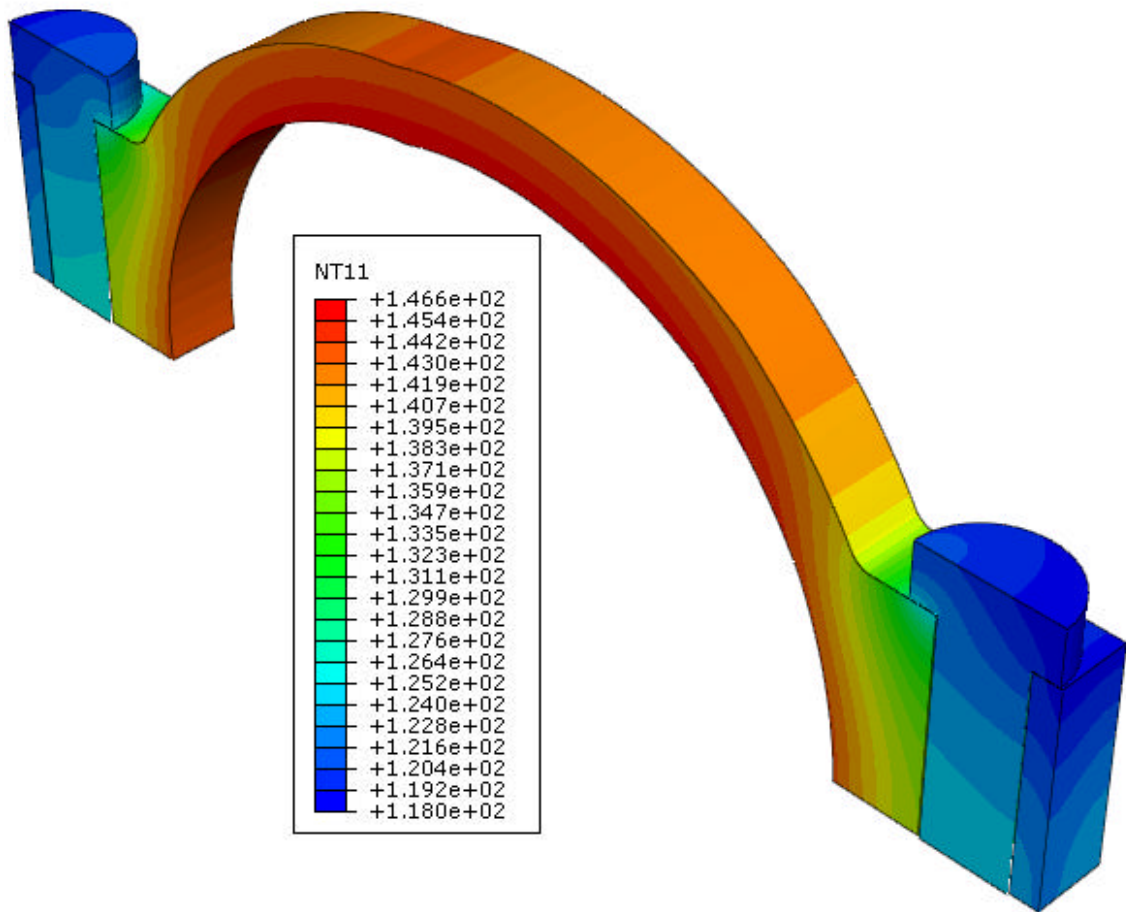


Fig1.4.2 Temperature distributions in case of Type2

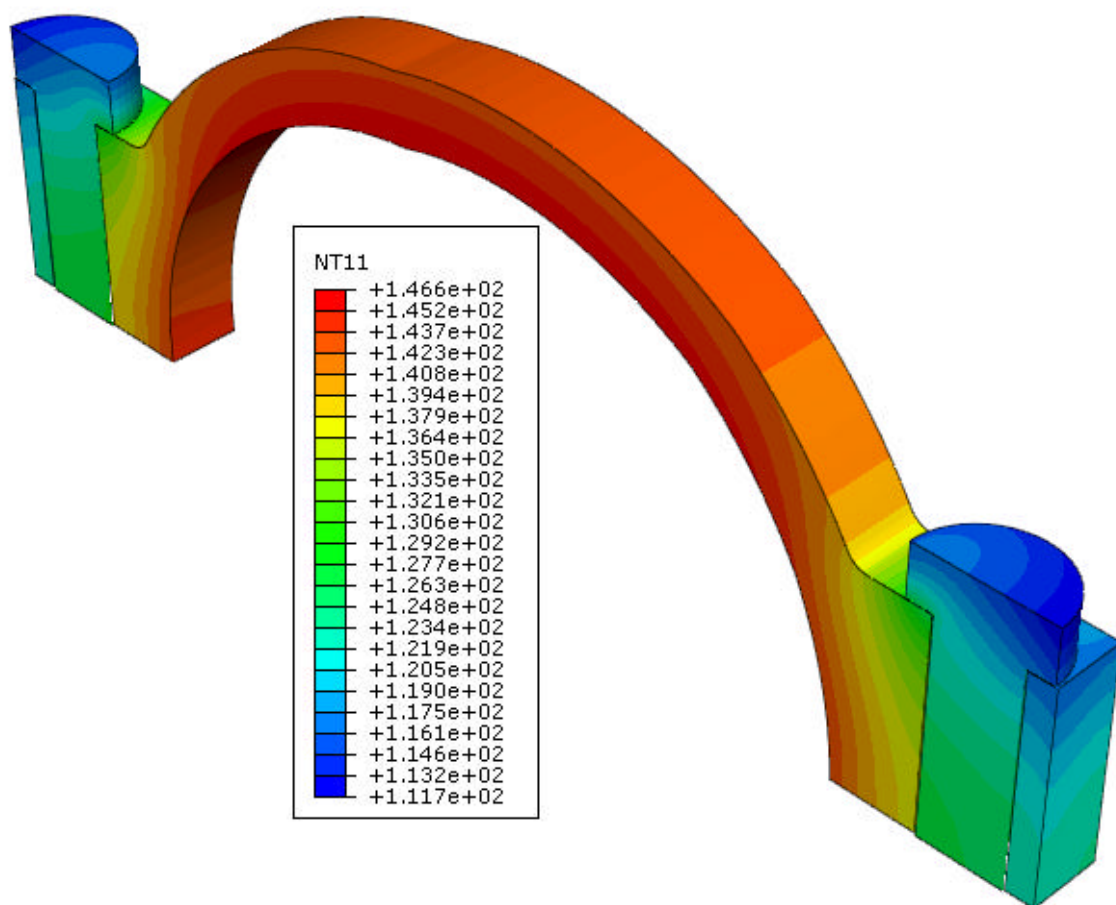


Fig1.4.3 Temperature distributions in case of Type3

Type1 , Type2 , Type3 の順にボルト温度が低くなっていることが分かる . さらに , 前述の順にボルト内の温度差が大きくなっている . このことは , ボルトの熱伝導率に起因すると考えられる . また , Type2 のボルト (SCM435) については Type1 のボルト (S45C) に比べて熱伝導率の大きいにもかかわらず , ボルト温度が低いのはケーシングの材質が熱伝導率の小さい SUS630 であるため , ボルトに十分熱が伝わらないためと考えられる .

・ ボルト軸応力の時間変化

Fig.1.4.4 にボルト軸応力の時間変化を示す。縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である。

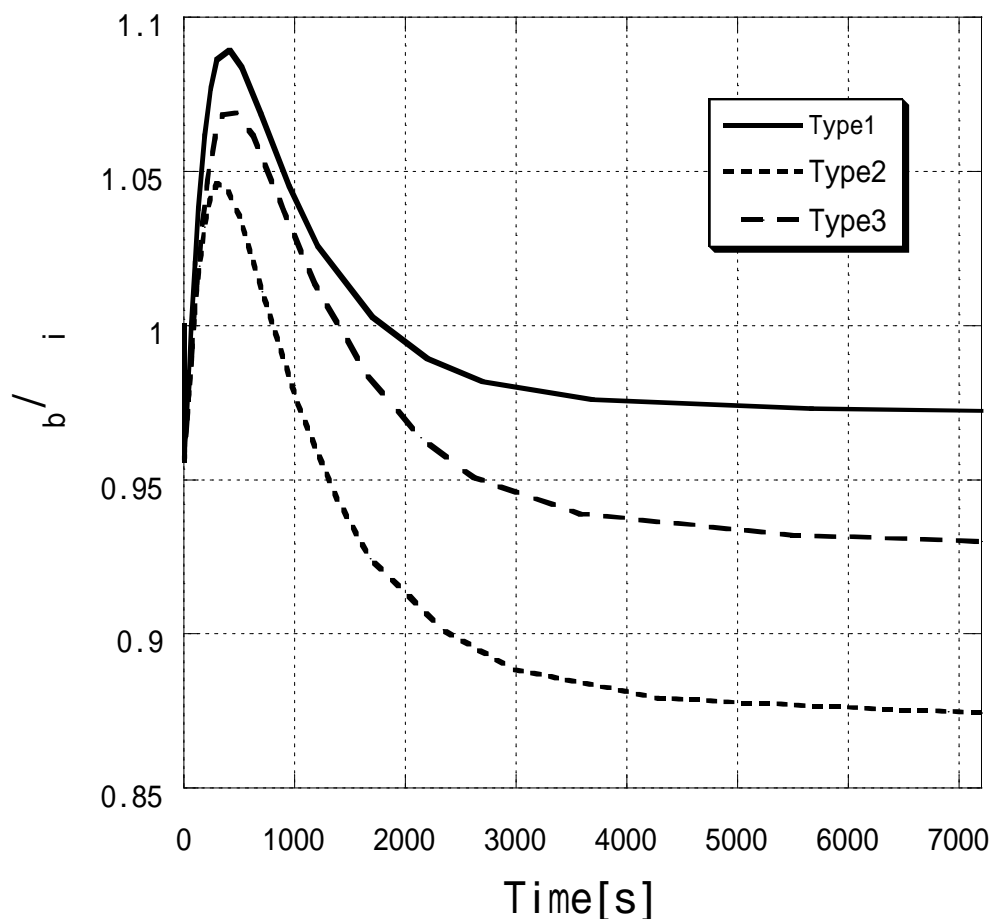


Fig1.4.4 Variations of bolt stress with time

Fig.1.4.4 より，内圧負荷(15MPa)後の軸応力が低下していることが分かる。このことは，内圧負荷時に発生する軸方向引張り応力によると考えられる。

また，Type1，Type3，Type2 の順に熱負荷後の軸応力低下量が大きくなっていく。このことは，ケーシングとボルトの材質が異なることによる線膨張係数の差に起因すると考えられる。Type2 のように，ボルト(SCM435)がケーシング(SUS403)に比べ相対的に伸びやすい場合，ボルト軸応力が大幅に低下し漏洩につながる可能性があることが分かる。

・面圧分布の変化

Fig.1.4.5 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸はボルト軸方向の面圧 $-z$ で, 横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

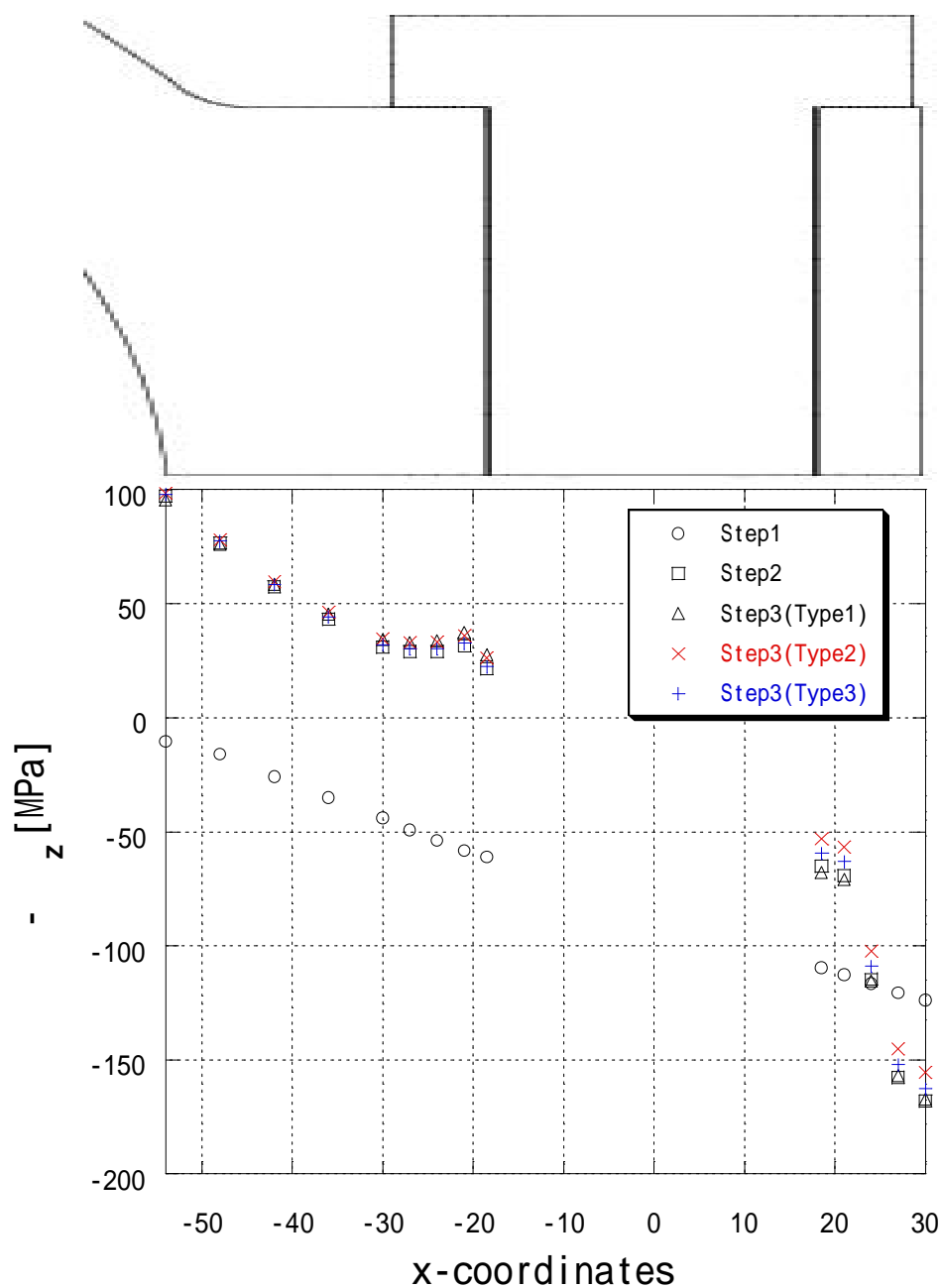


Fig1.4.5 Distributions of contact pressure at casing interface

Fig.1.4.5 より，内圧負荷(Step2)後の面圧分布が締め付け(Step1)後に比べて，大きく変化していることが分かる．また，ケーシング合わせ面内側に引張り応力が発生しており，離れる可能性があることが分かる．熱負荷後にケーシング外側の引張り応力が最も増加しているのは Type2 である．このことは，Type2 のボルトの線膨張係数がケーシングよりも大きく，熱負荷による伸び量が相対的に大きいためである．しかしながら，熱負荷によるケーシング面圧の低下はわずかであり，ケーシング面圧低下に関しては内圧が支配的であることが分かる．

1.4.2 内部流体温度の影響

・ 温度分布図

) Type 1 の場合

Fig.1.4.6 ~ Fig.1.4.8 に内部流体温度を 100 , 150 , 200 とした場合の加熱後 7200s の温度分布図を示す .

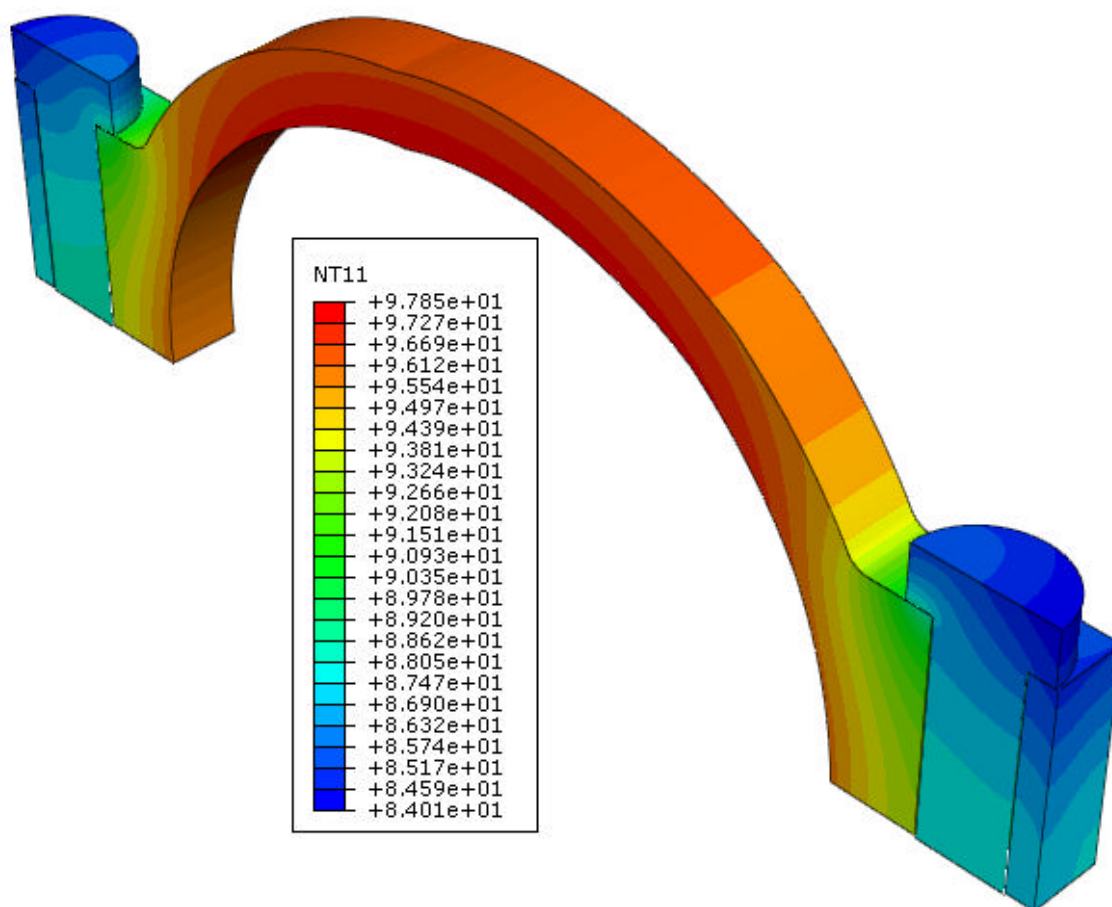


Fig1.4.6 Temperature distributions for varying fluid temperature

(100)

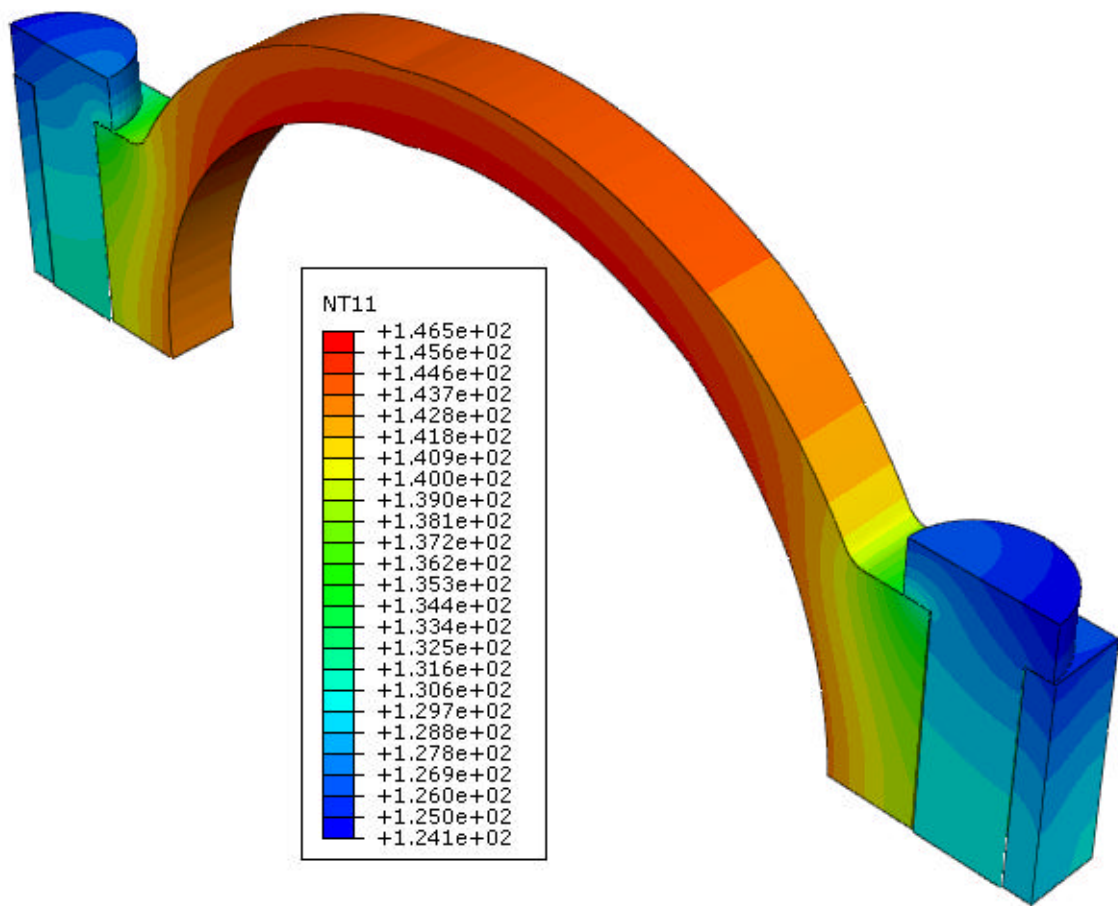


Fig1.4.7 Temperature distributions for varying fluid temperature

(150)

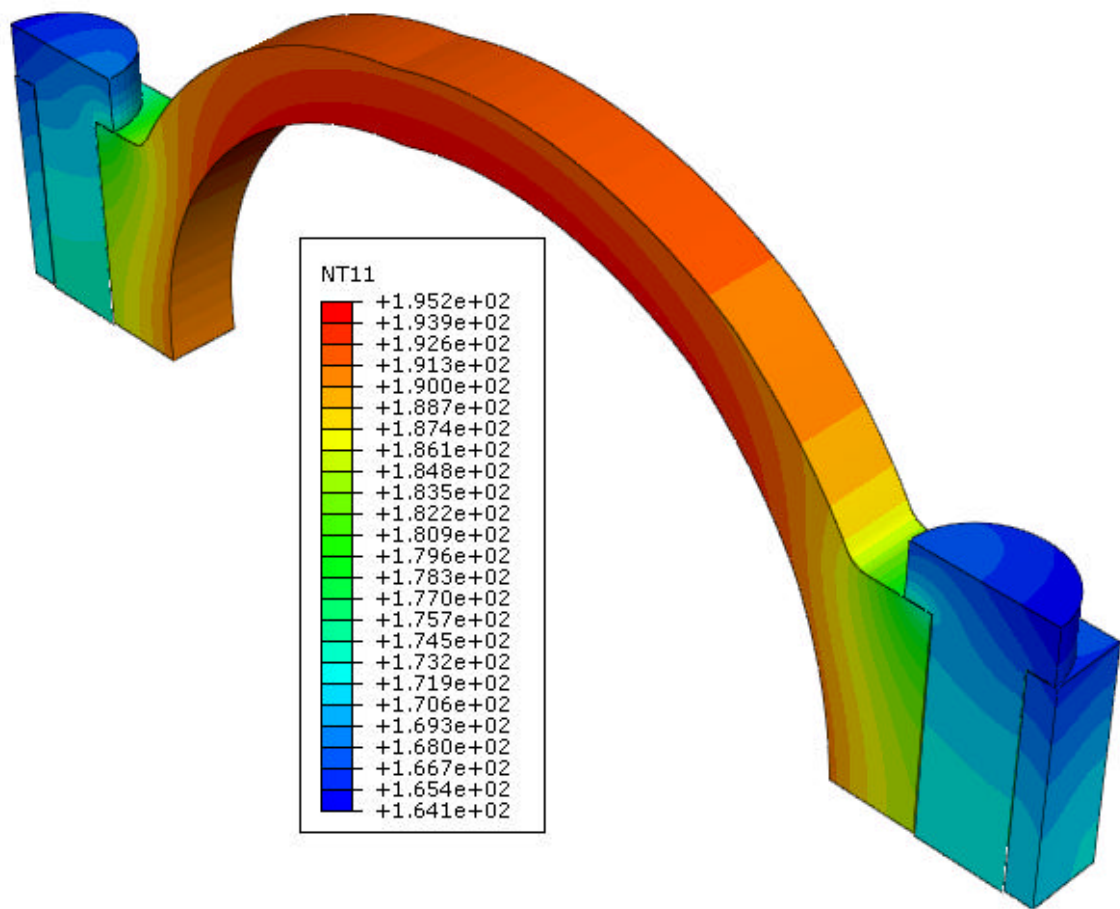


Fig1.4.8 Temperature distributions for varying fluid temperature

(200)

) Type2 の場合

Fig.1.4.9 ~ Fig.1.4.11 に内部流体温度を 100 , 150 , 200 とした場合の加熱後 7200s の温度分布図を示す .

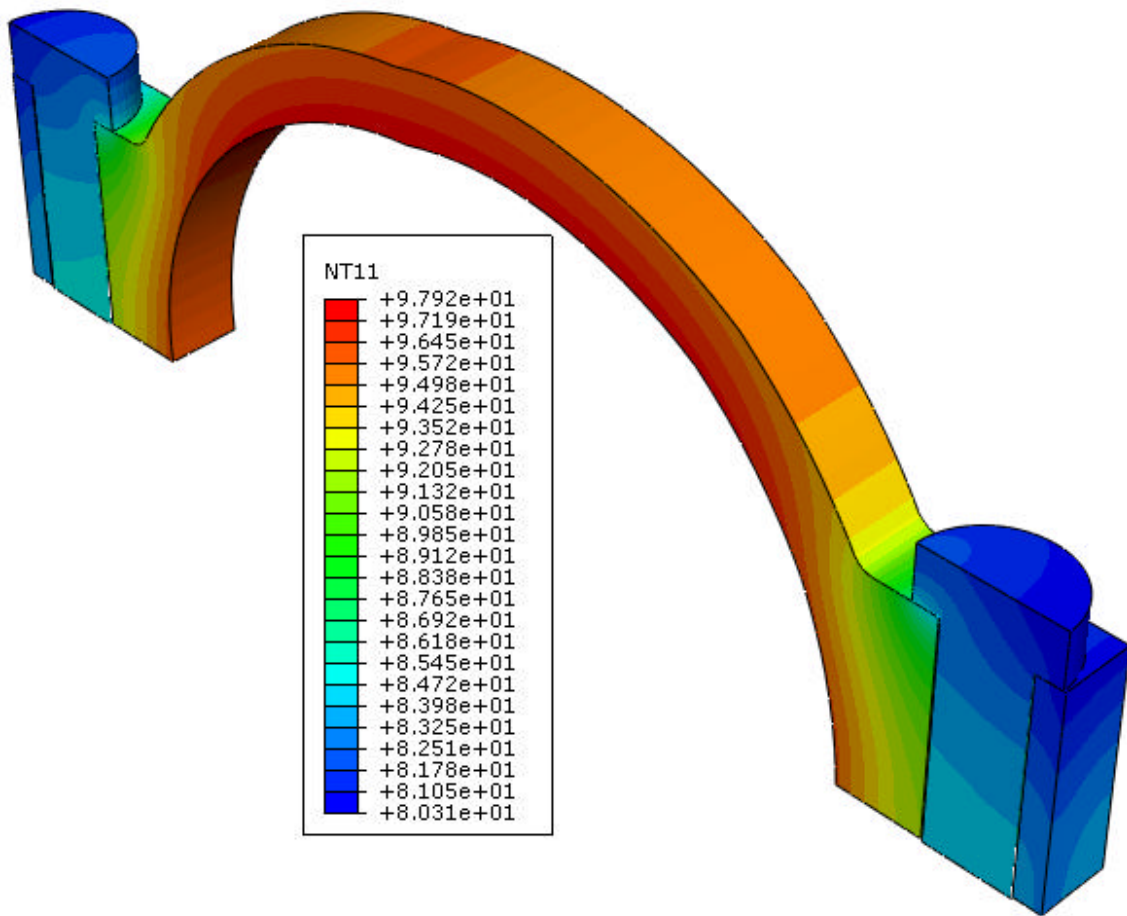


Fig1.4.9 Temperature distributions for varying fluid temperature

(100)

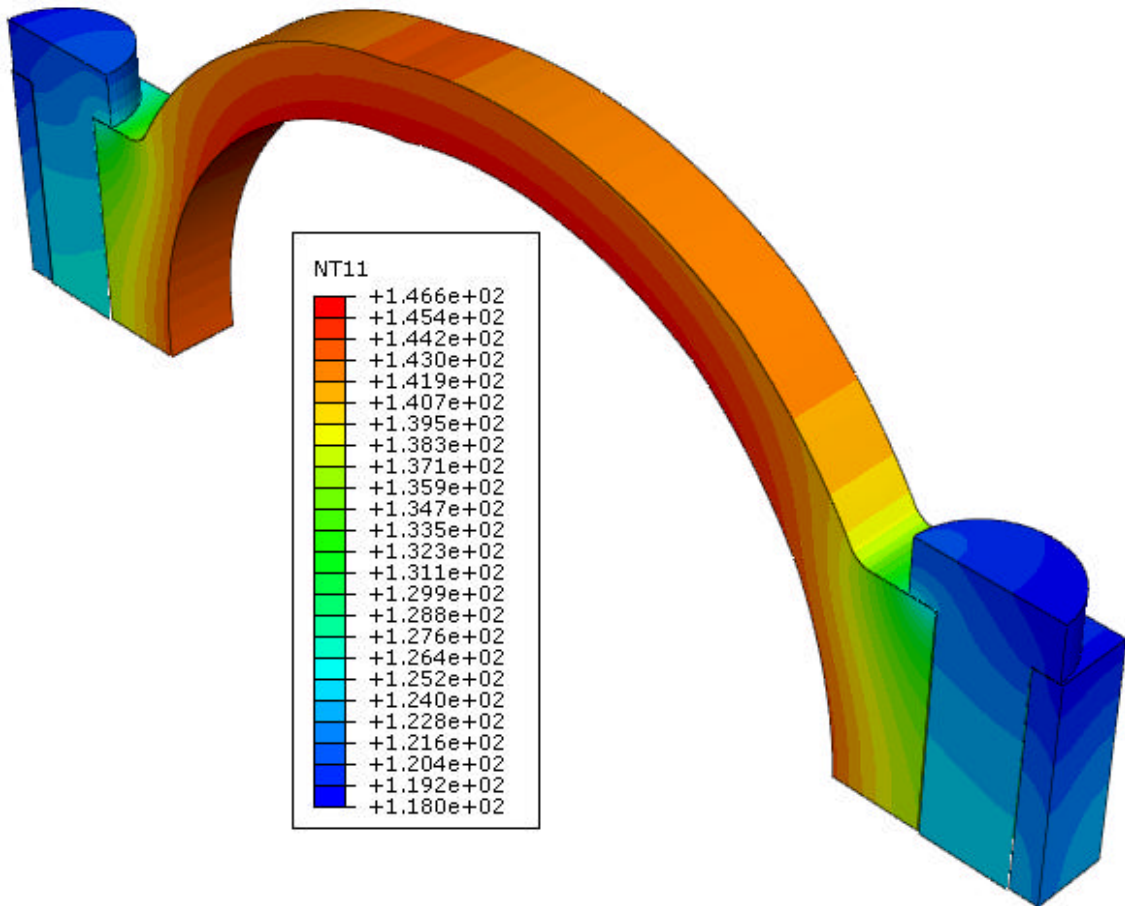


Fig1.4.10 Temperature distributions for varying fluid temperature (150)

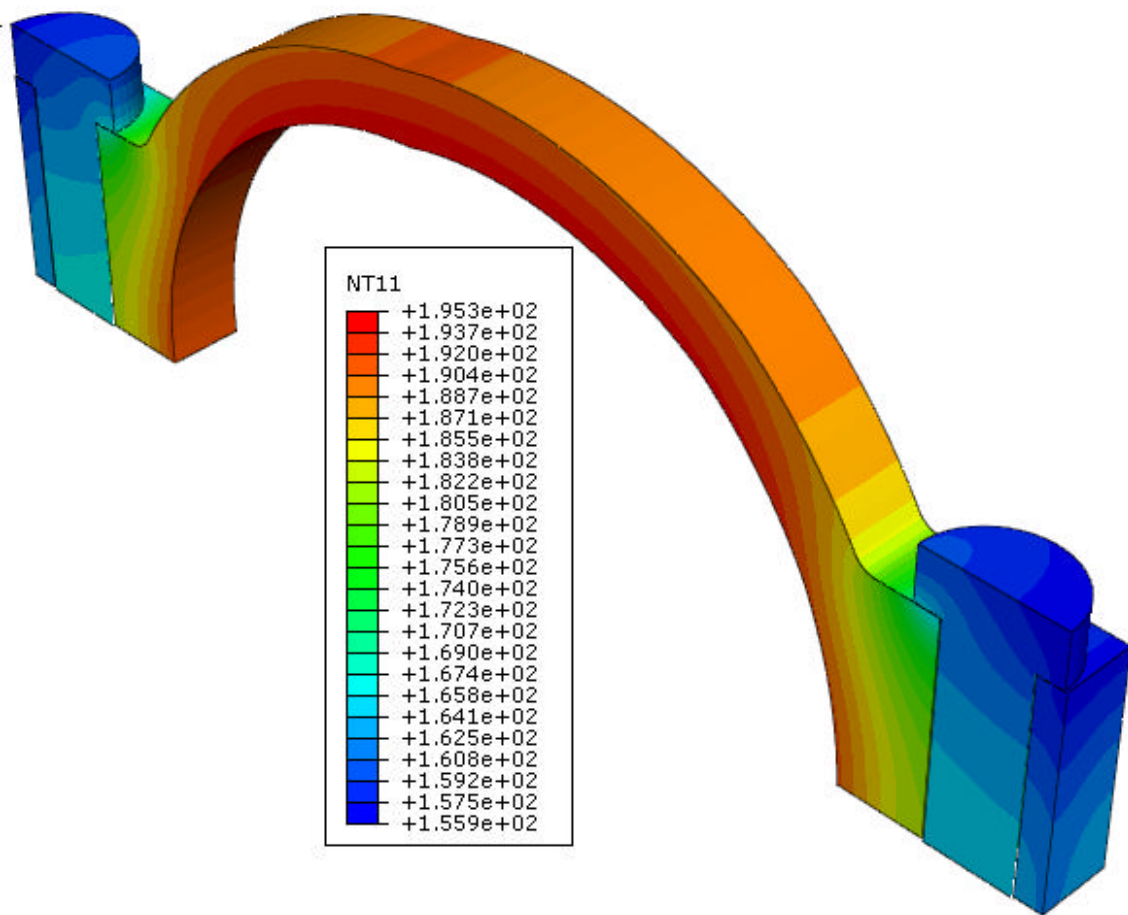


Fig1.4.11 Temperature distributions for varying fluid temperature (200 °C)

) Type3 の場合

Fig.1.4.12 ~ Fig.1.4.14 に内部流体温度を 100 , 150 , 200 とした場合の加熱後 7200s の温度分布図を示す .

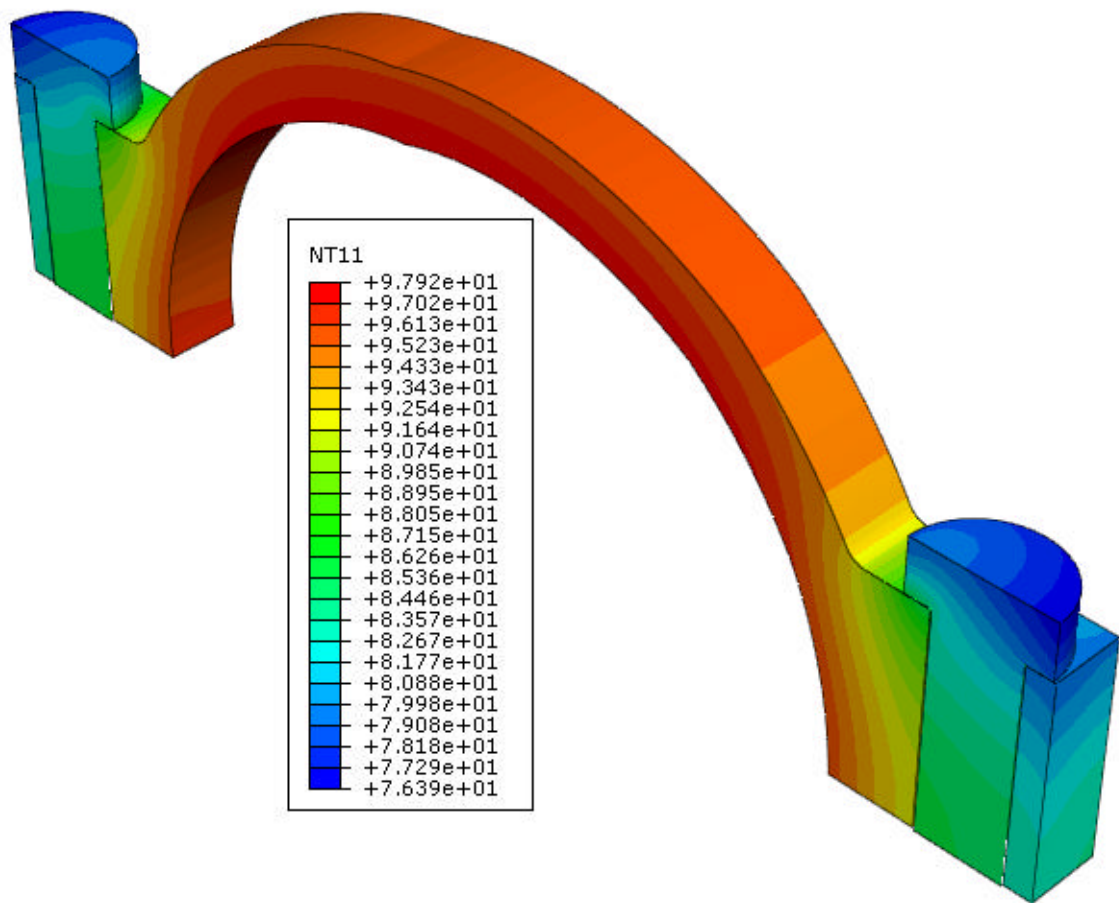


Fig1.4.12 Temperature distributions for varying fluid temperature (100)

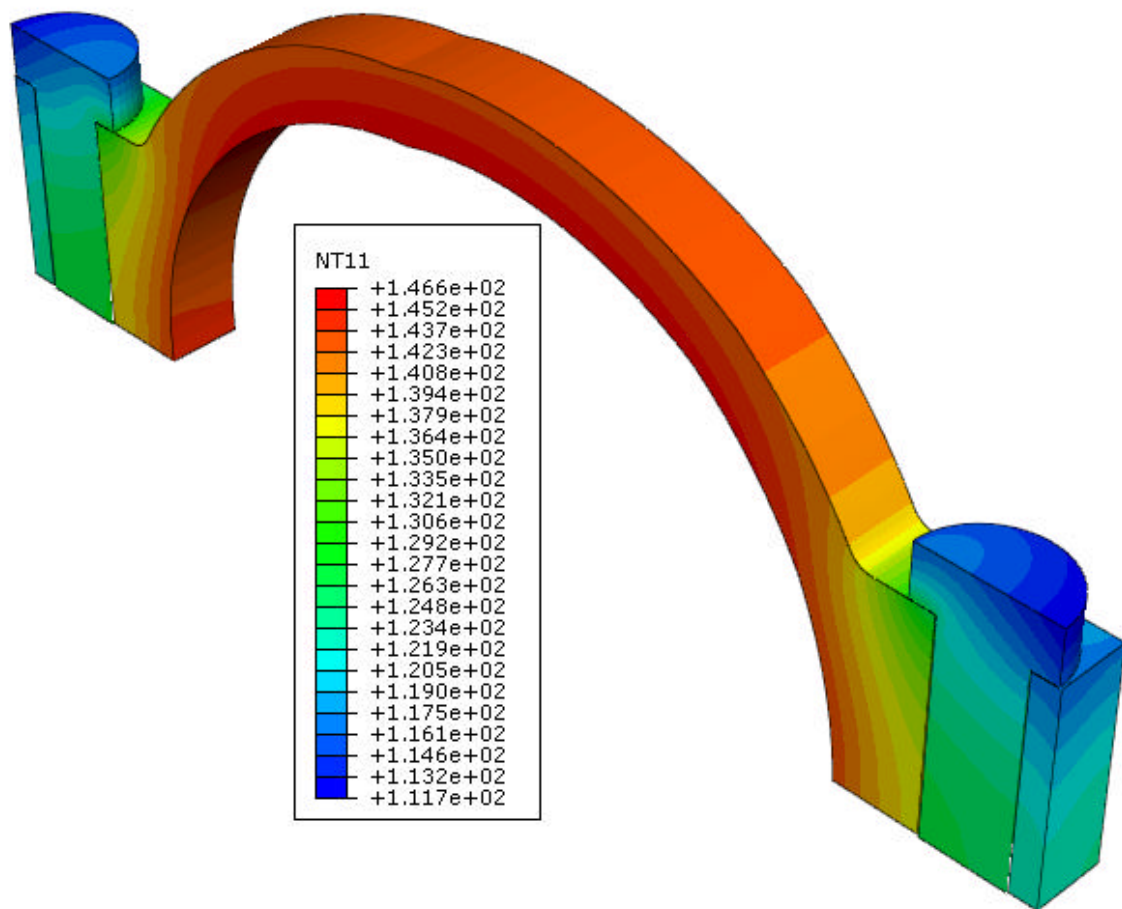


Fig1.4.13 Temperature distributions for varying fluid temperature (150)

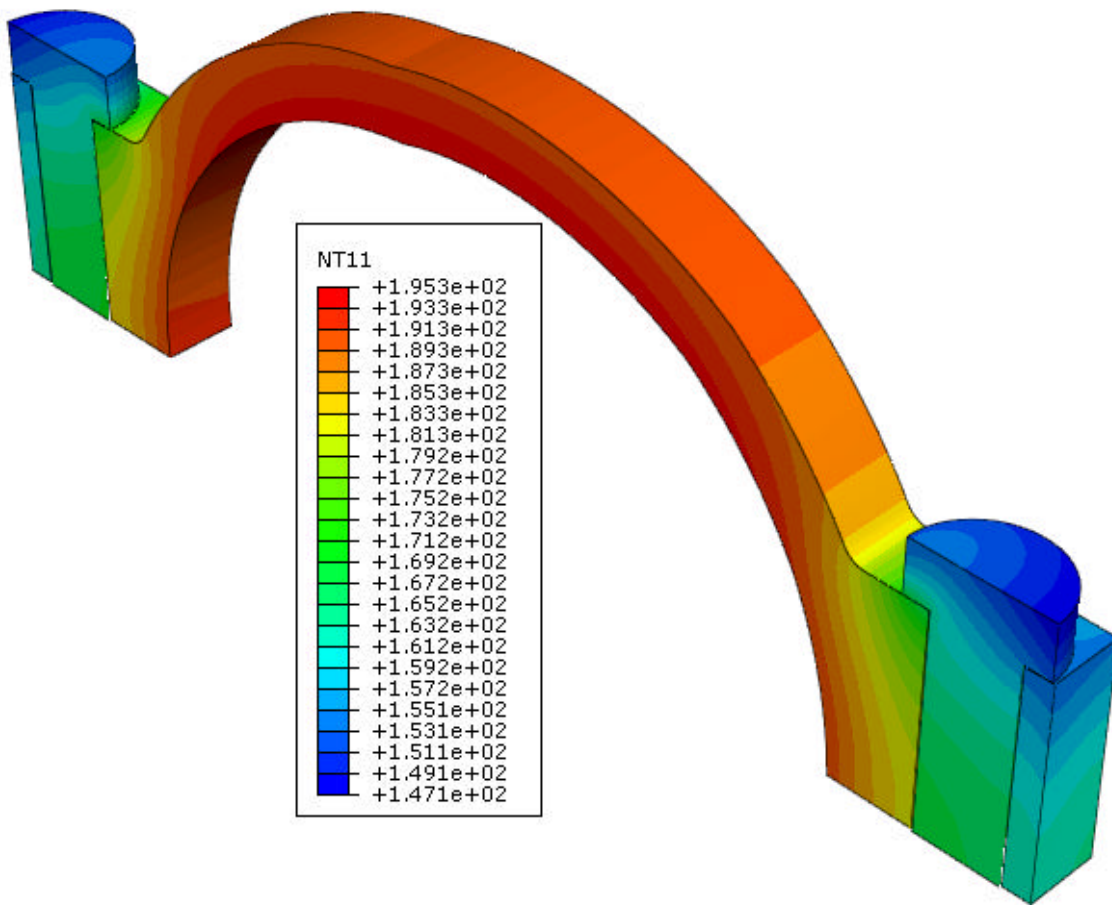


Fig1.4.14 Temperature distributions for varying fluid temperature (200)

・ ボルト軸応力の時間変化

） Type 1 の場合

Fig.1.4.15 にボルト軸応力の時間変化を示す .縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値 ,横軸は時間である .

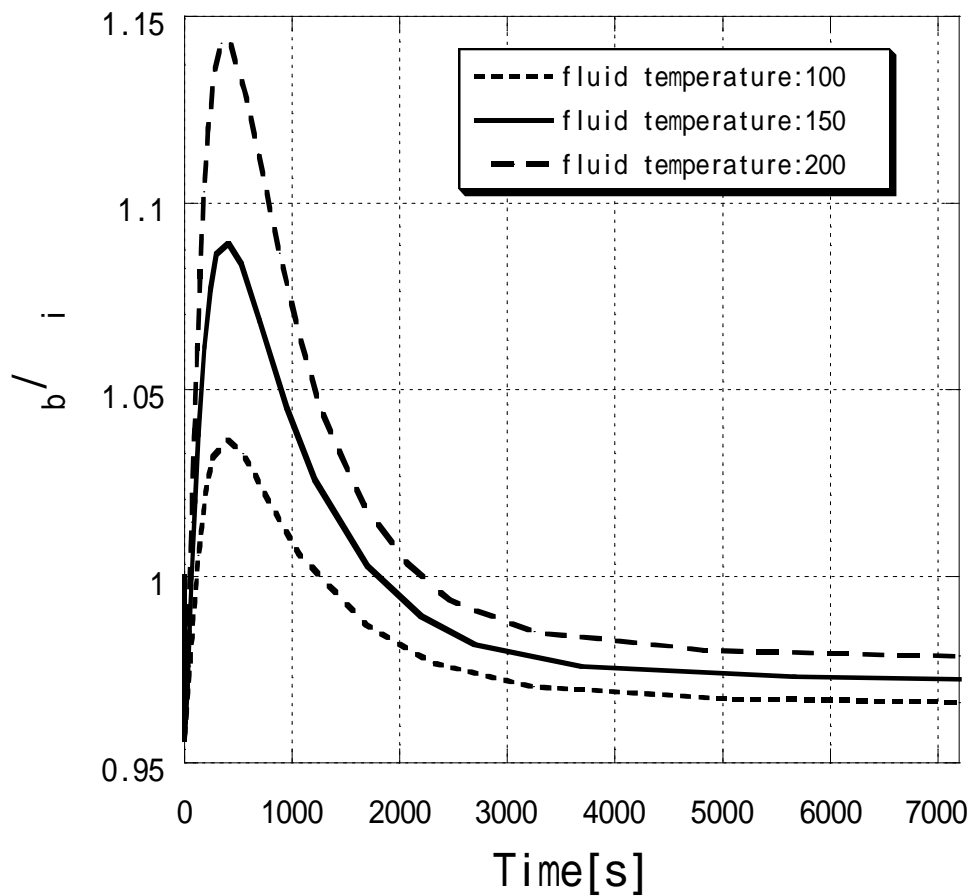


Fig1.4.15 Variations of bolt stress with time

) Type2 の場合

Fig.1.4.16 にボルト軸応力の時間変化を示す。縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である。

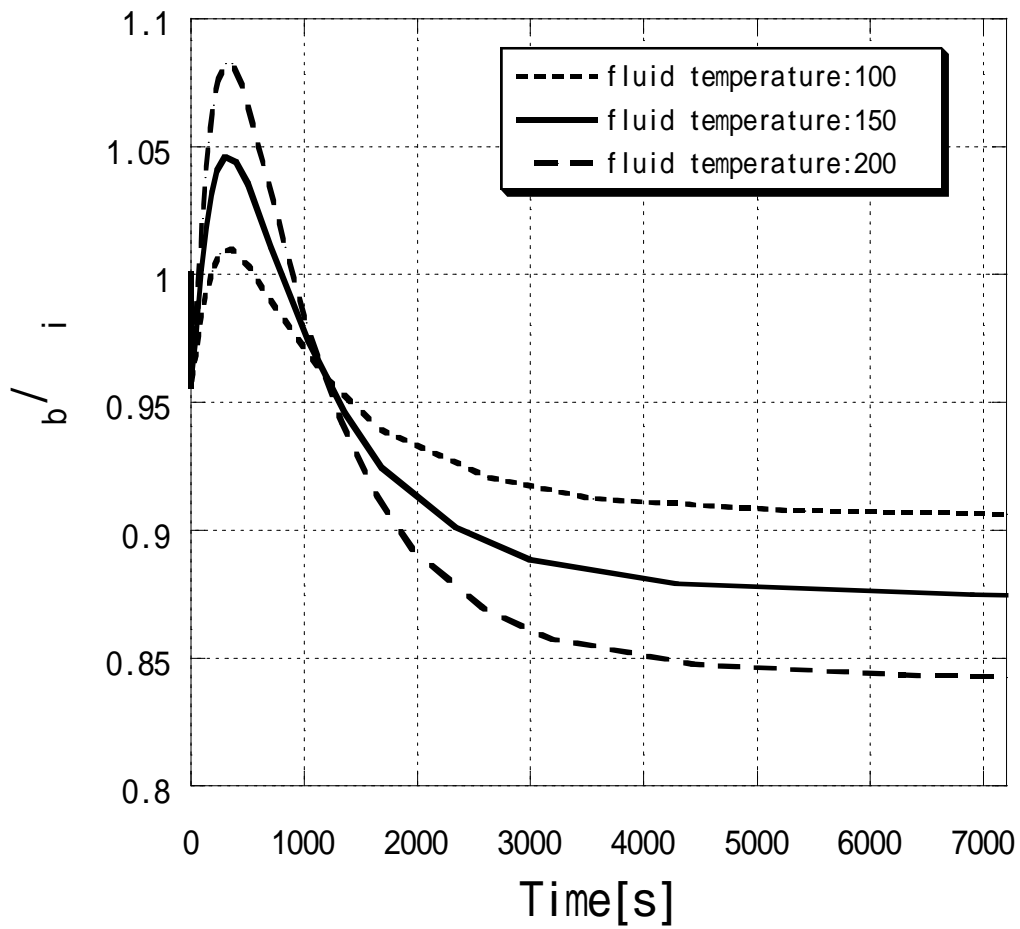


Fig1.4.16 Variations of bolt stress with time

) Type3 の場合

Fig.1.4.17 にボルト軸応力の時間変化を示す。縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値、横軸は時間である。

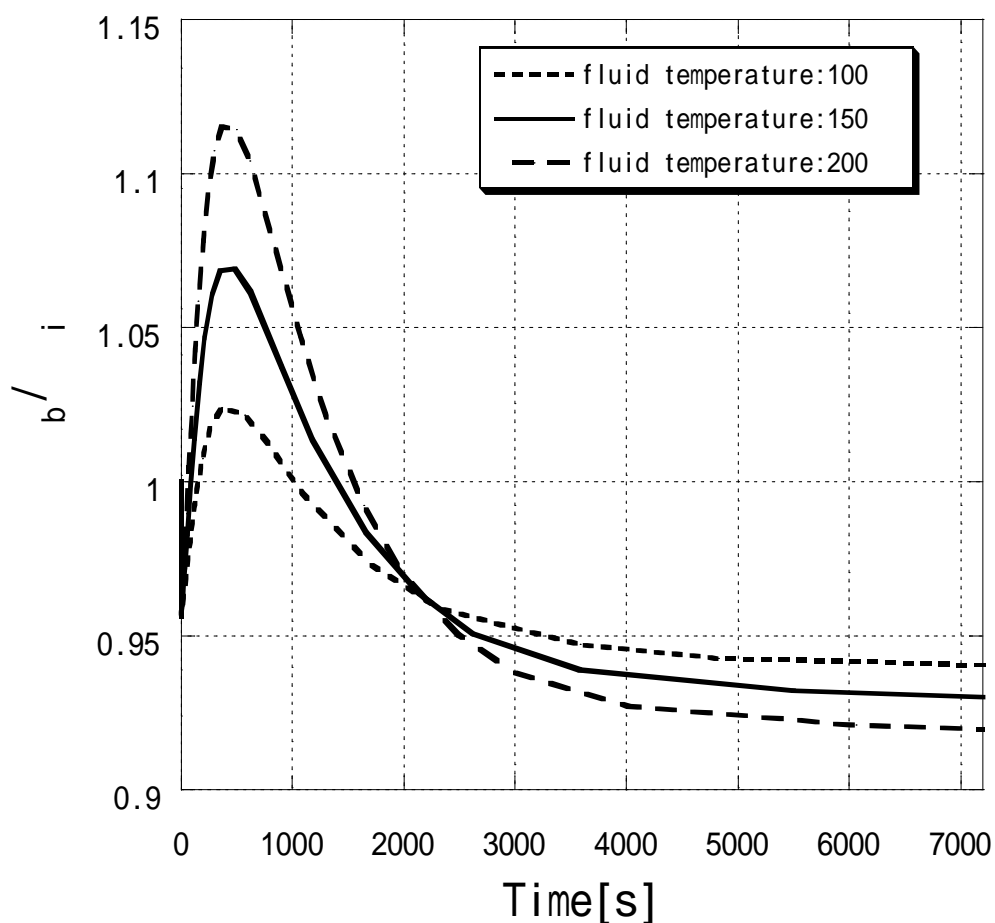


Fig1.4.17 Variations of bolt stress with time

いずれの Type についても、内部流体温度が高くなるとボルト軸応力のピーク値が大きくなるのが分かる。このことは、ボルトに熱が伝わるまでに、ケーシングの熱膨張量が相対的に増加することによると考えられる。また、熱負荷後のボルト軸応力変化について、Type2、Type3 は Type1 と異なり、内部流体が高温になるにつれてボルト軸応力が大幅に低下している。このことから、内部流体温度が高温になるにつれて、ケーシングとボルトの線膨張係数の差が大きく影響してくることが分かる。

・面圧分布の変化

) Type 1 の場合

Fig.1.4.18 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸は引張り応力 σ_z で, 横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

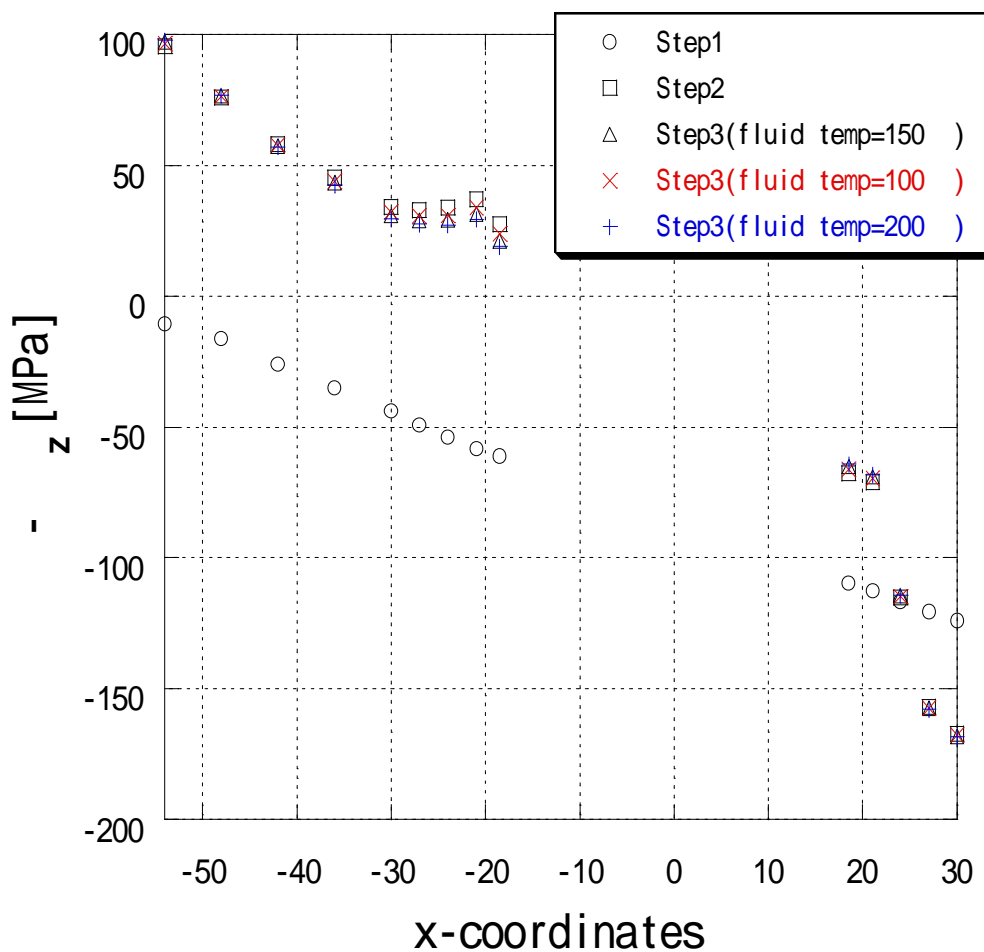


Fig1.4.18 Distributions of contact pressure at casing interface

) Type2 の場合

Fig.1.4.19 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸は引張り応力 σ_z で, 横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

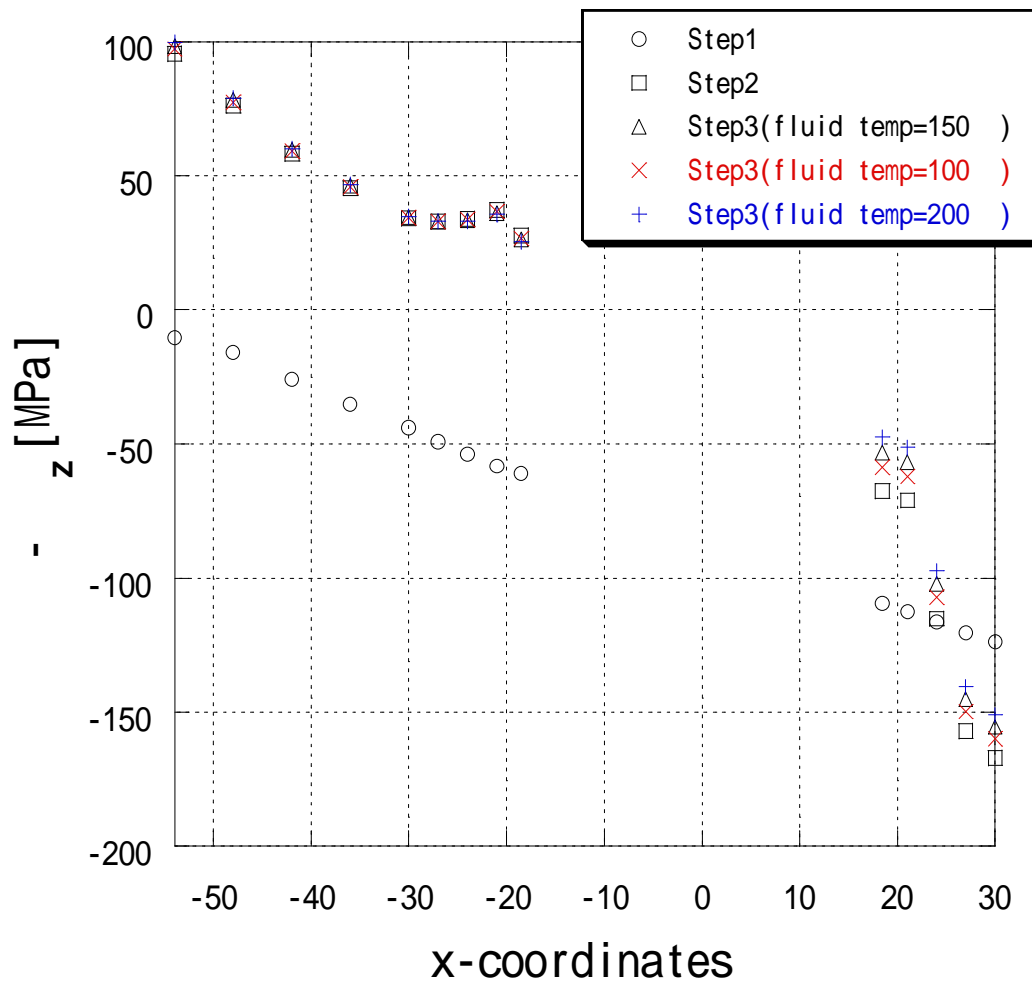


Fig1.4.19 Distributions of contact pressure at casing interface

）Type3 の場合

Fig.1.4.20 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時，Step2：内圧付加時，Step3：熱負荷時) ごとの変化を示す．縦軸は引張り応力 σ_z で，横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である．

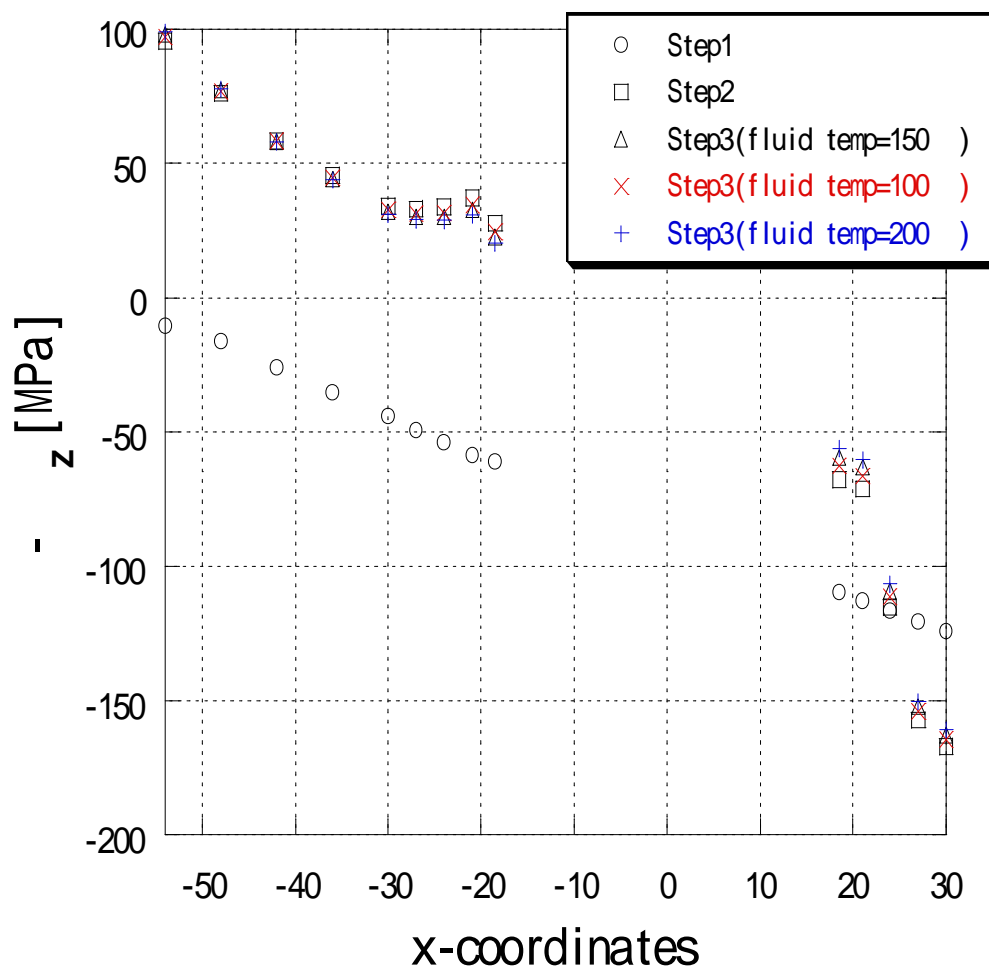


Fig1.4.20 Distributions of contact pressure at casing interface

いずれの Type についても，内部流体温度が高温になるにつれてケーシング面圧の変化が大きくなっていることがわかる．このことは，熱負荷が大きくなることによる熱膨張の増加に起因すると考えられる．また，熱膨張によりボルト外側の面圧がわずかであるが低下することも確認できる．この現象がもっとも顕著に現れたのは Type2 である．このことは，ボルトとケーシングの線膨張係数の差がもっとも大きいことに起因すると考えられる．

1.4.3 内圧の影響

・ ボルト軸応力の時間変化

） Type 1 の場合

Fig.1.4.21 にボルト軸応力の時間変化を示す。縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である。

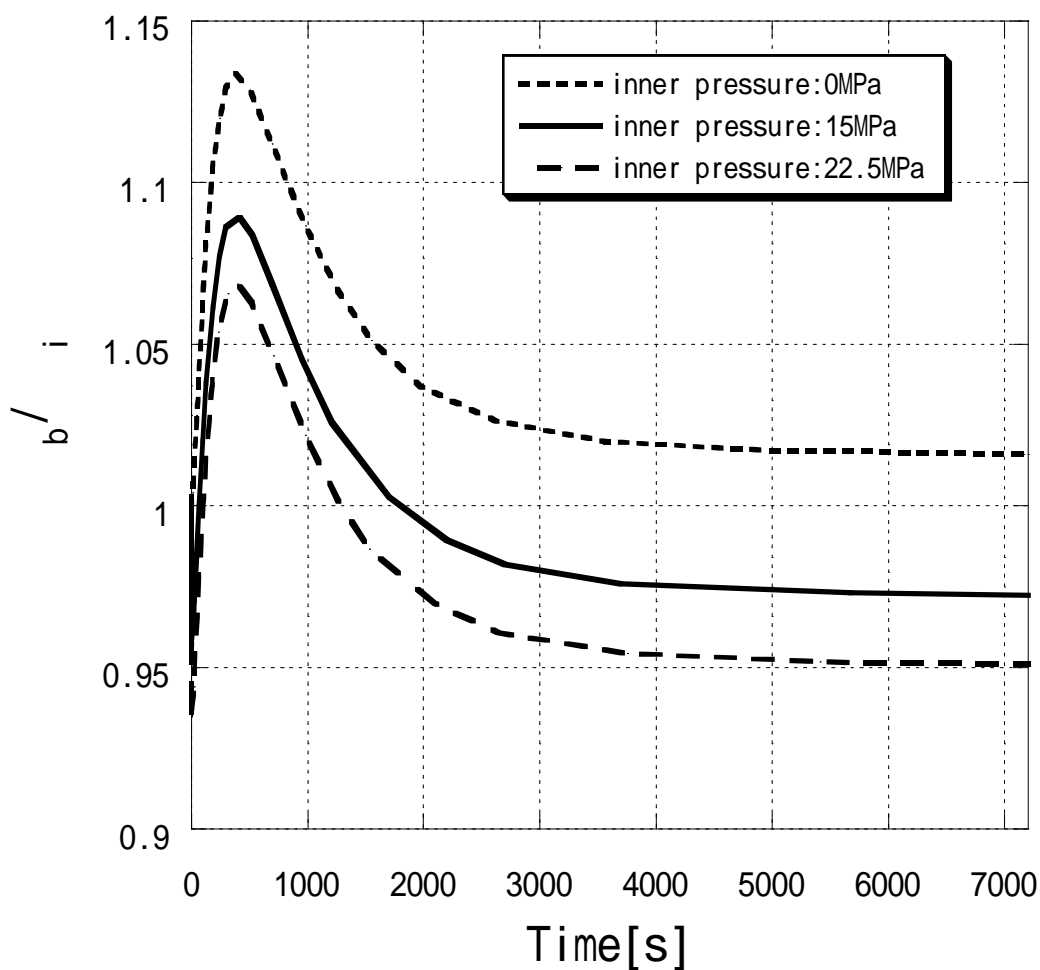


Fig1.4.21 Variations of bolt stress with time

) Type2 の場合

Fig.1.4.22 にボルト軸応力の時間変化を示す。縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値、横軸は時間である。

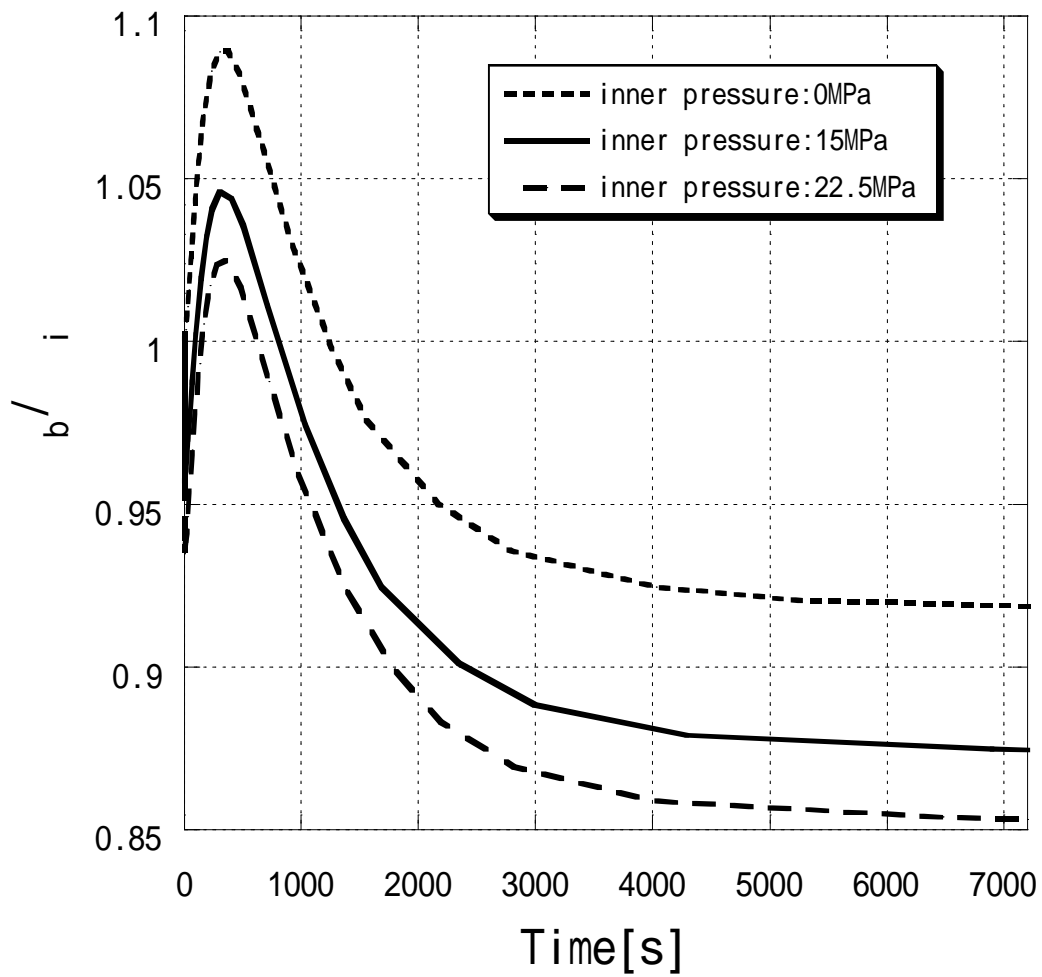


Fig1.4.22 Variations of bolt stress with time

) Type3 の場合

ig.1.4.23 にボルト軸応力の時間変化を示す．縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である．

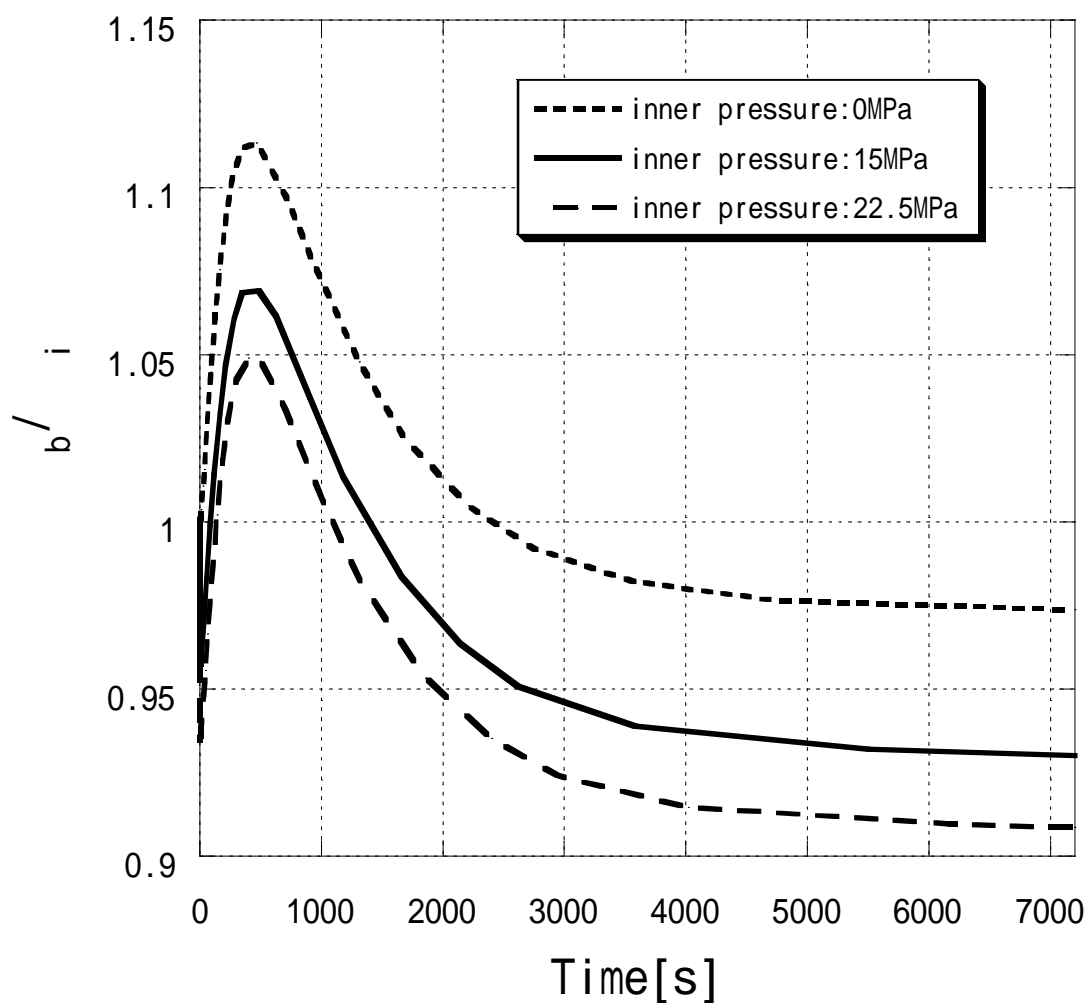


Fig1.4.23 Variations of bolt stress with time

いずれの Type においても内圧が高くなると，軸応力が大幅に低下することが分かる．このことは，軸方向引張応力の増加によると考えられる．また，その軸応力低下は熱負荷後にもそのまま影響していることも分かる．

・ 面圧分布の変化

） Type 1 の場合

Fig.1.4.24 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸は引張り応力 σ_z で,横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

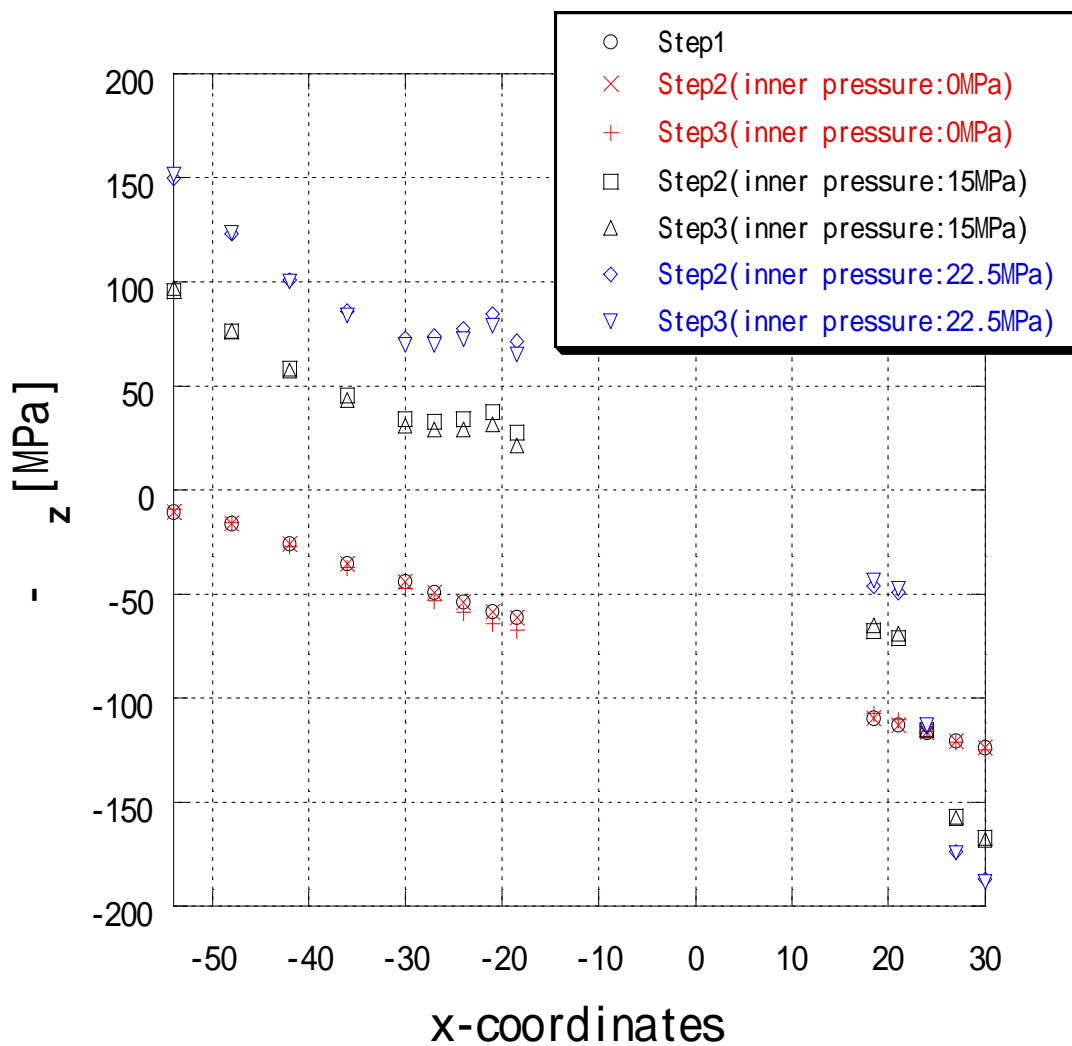


Fig1.4.24 Distributions of contact pressure at casing interface

) Type2 の場合

Fig.1.4.25 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時 , Step2 : 内圧付加時 , Step3 : 熱負荷時) ごとの変化を示す . 縦軸は引張り応力 σ_z で , 横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である .

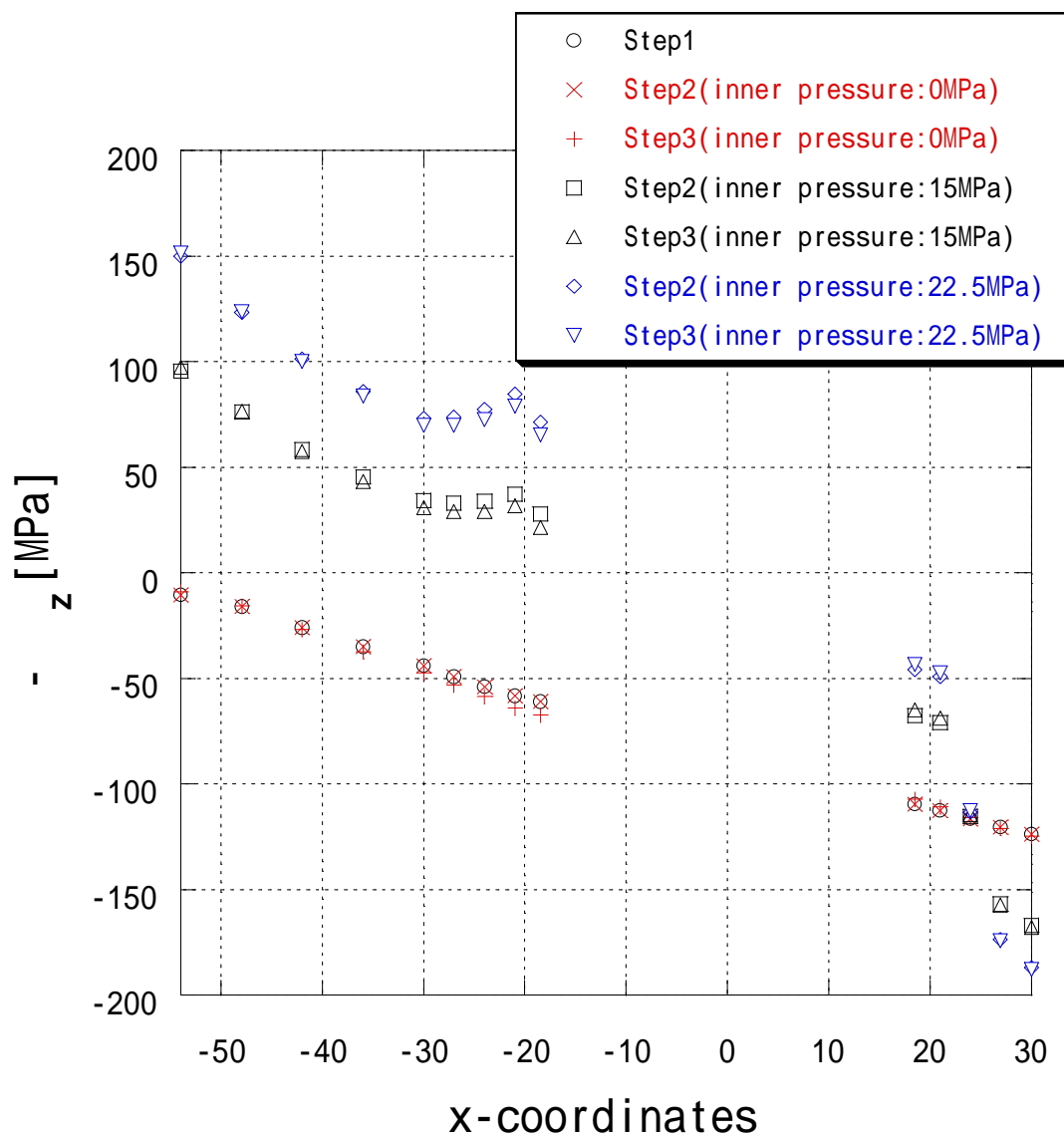


Fig1.4.25 Distributions of contact pressure at casing interface

） Type3 の場合

Fig1.4.26 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時，Step2：内圧付加時，Step3：熱負荷時) ごとの変化を示す．縦軸は引張り応力 σ_z で，横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である．

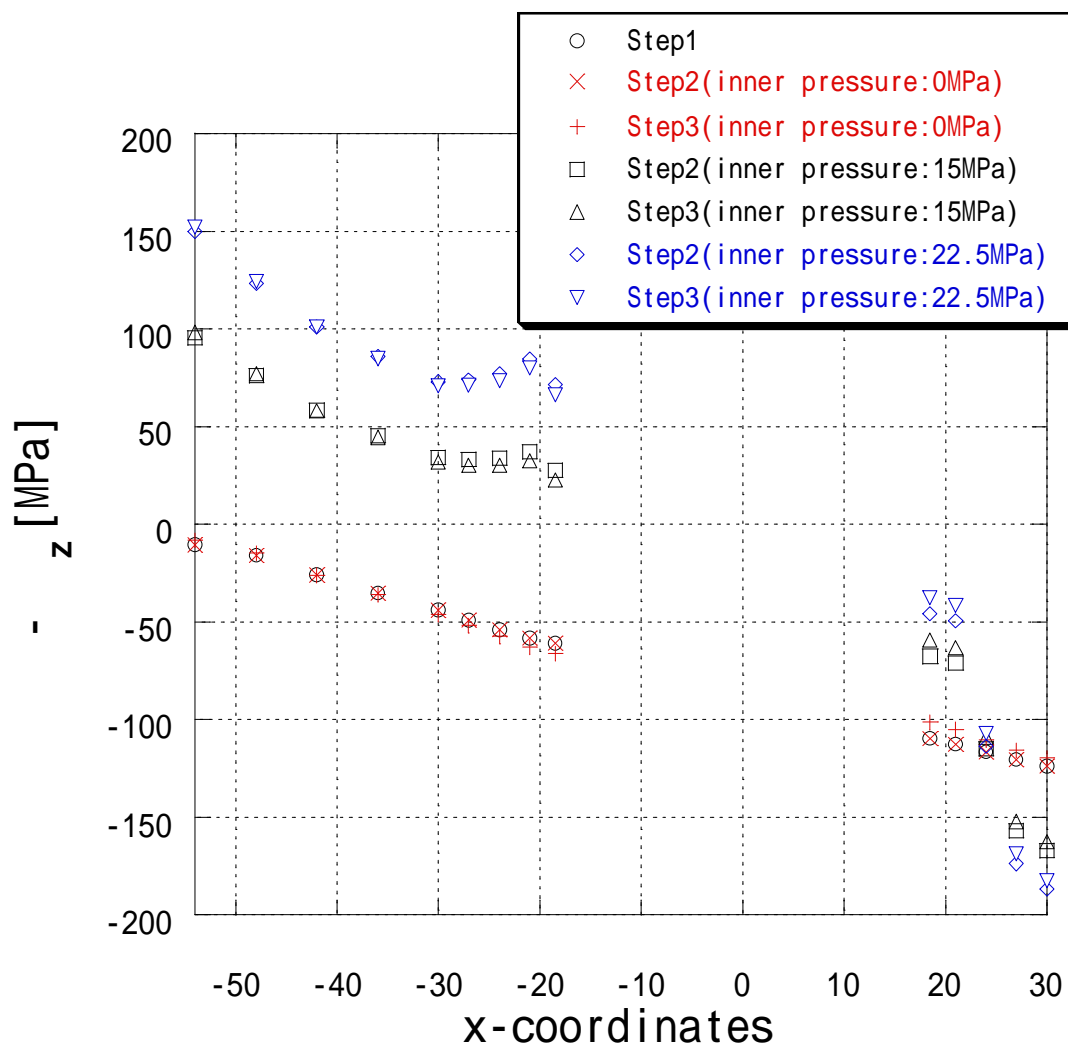


Fig1.4.26 Distributions of contact pressure at casing interface

いずれの Type についても，内圧が高くなるにつれてケーシング面圧の変化が大きくなっていることが分かる．また，ケーシング合わせ面に発生する引張り応力がより増加している．このことは，軸方向引張応力の増加に起因すると考えられる．

1.4.4 線膨張係数の影響

・ ボルト軸応力の時間変化

) Type 1 の場合

Fig.1.4.27 にボルト軸応力の時間変化を示す．縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である．

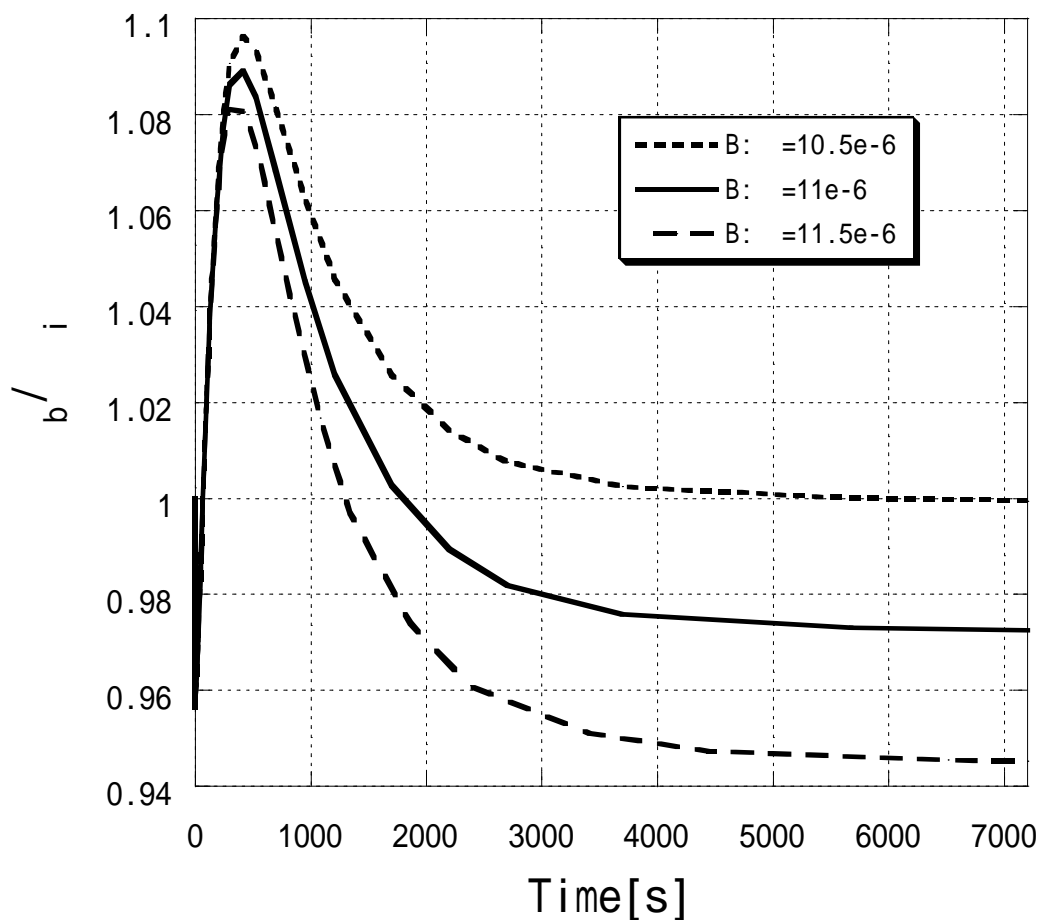


Fig1.4.27 Variations of bolt stress with time

) Type2 の場合

Fig.1.4.28 にボルト軸応力の時間変化を示す．縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である．

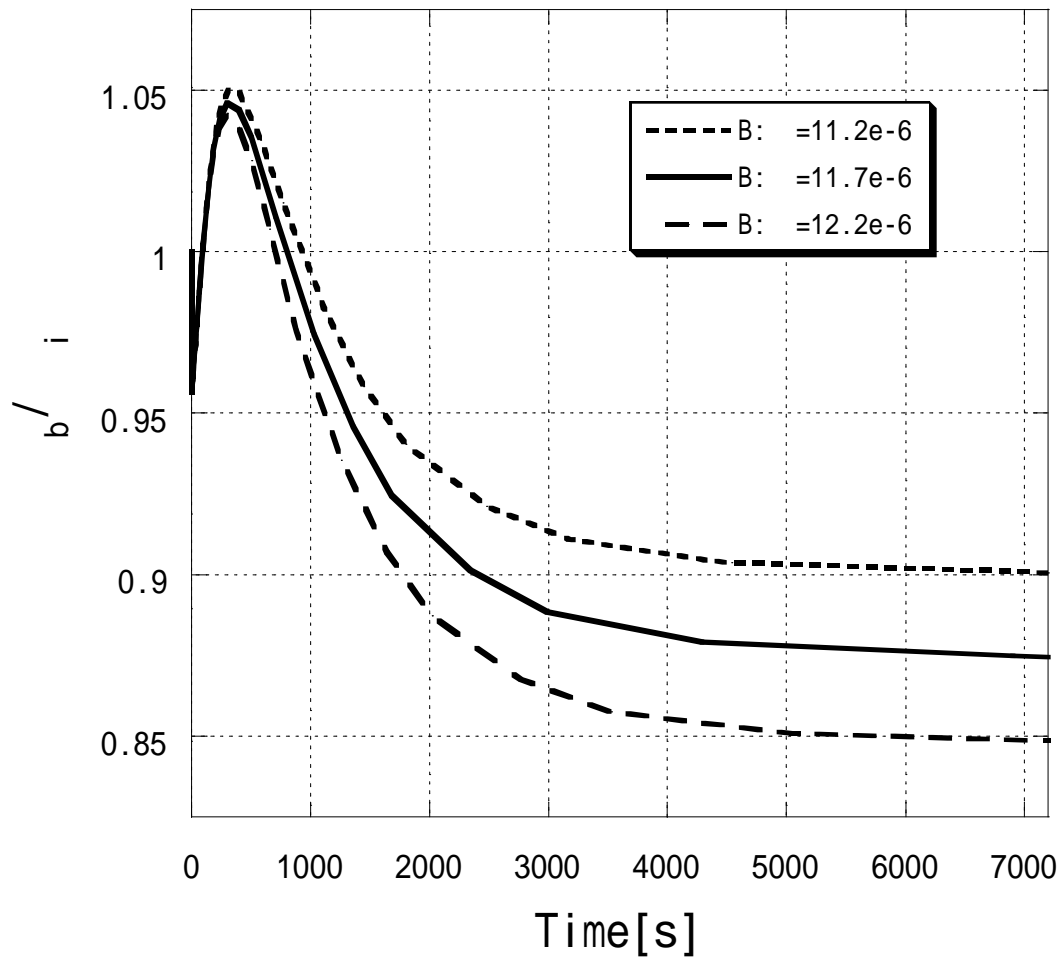


Fig1.4.28 Variations of bolt stress with time

) Type3 の場合

Fig.1.4.29 にボルト軸応力の時間変化を示す．縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である．

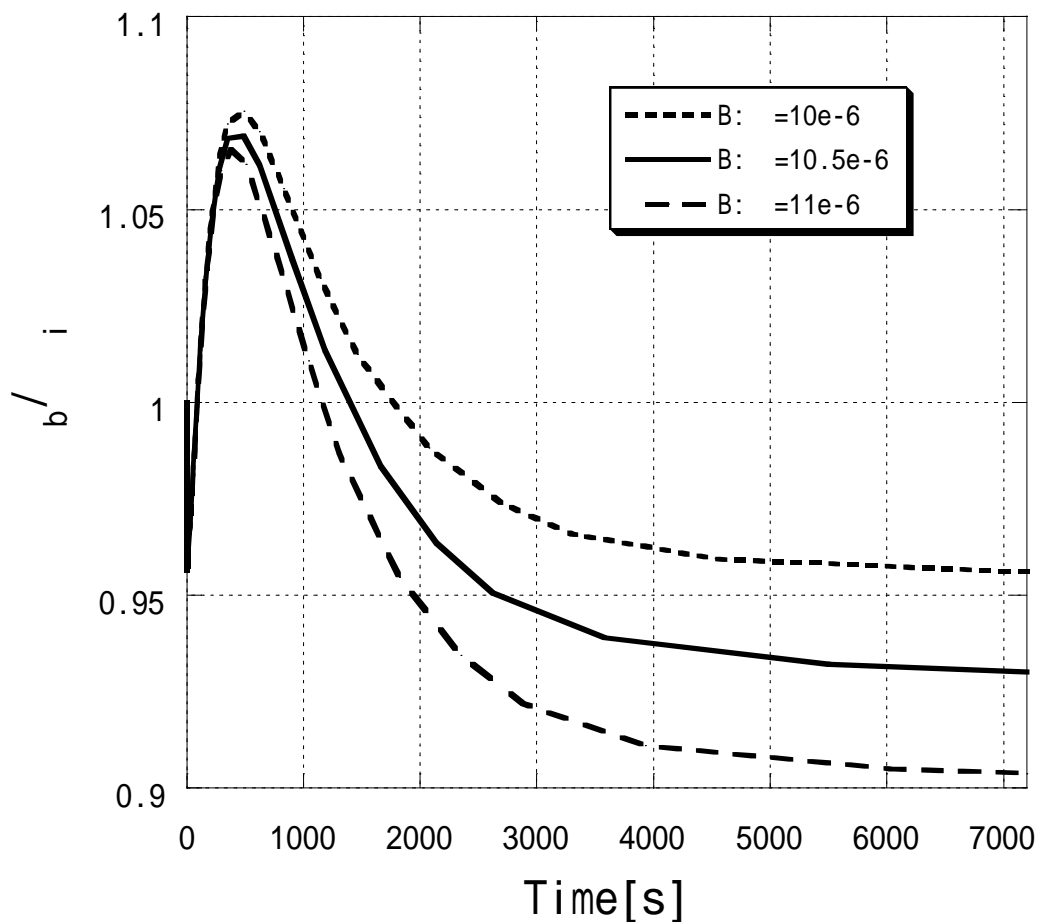


Fig1.4.29 Variations of bolt stress with time

いずれのタイプについても，ボルトの線膨張係数のみをわずかに 0.5×10^{-6} 変化させただけで，熱負荷後のボルト軸応力低下に大きく影響することが分かる．たとえ同じ材質であっても製造過程により，同じロット内では品質のばらつきは少ないが，他のロットとの間には品質にばらつきがある．線膨張係数の 0.5×10^{-6} の差は想定される妥当な値であり，同種材料であっても数%の軸応力変化のばらつきは考えられると言える．

・面圧分布の変化

）Type 1 の場合

Fig.1.4.30 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸は引張り応力 σ_z で, 横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

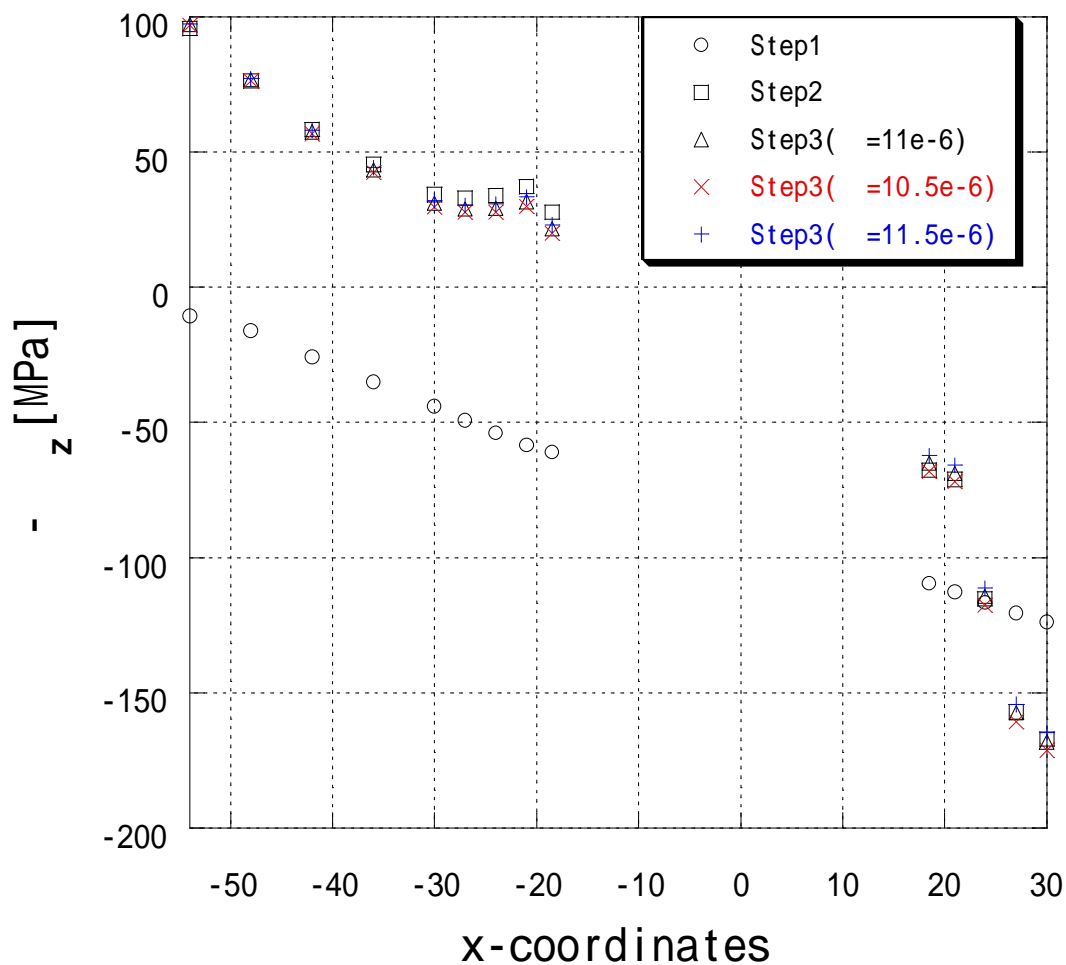


Fig1.4.30 Distributions of contact pressure at casing interface

) Type2 の場合

Fig.1.4.31 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸は引張り応力 σ_z で, 横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

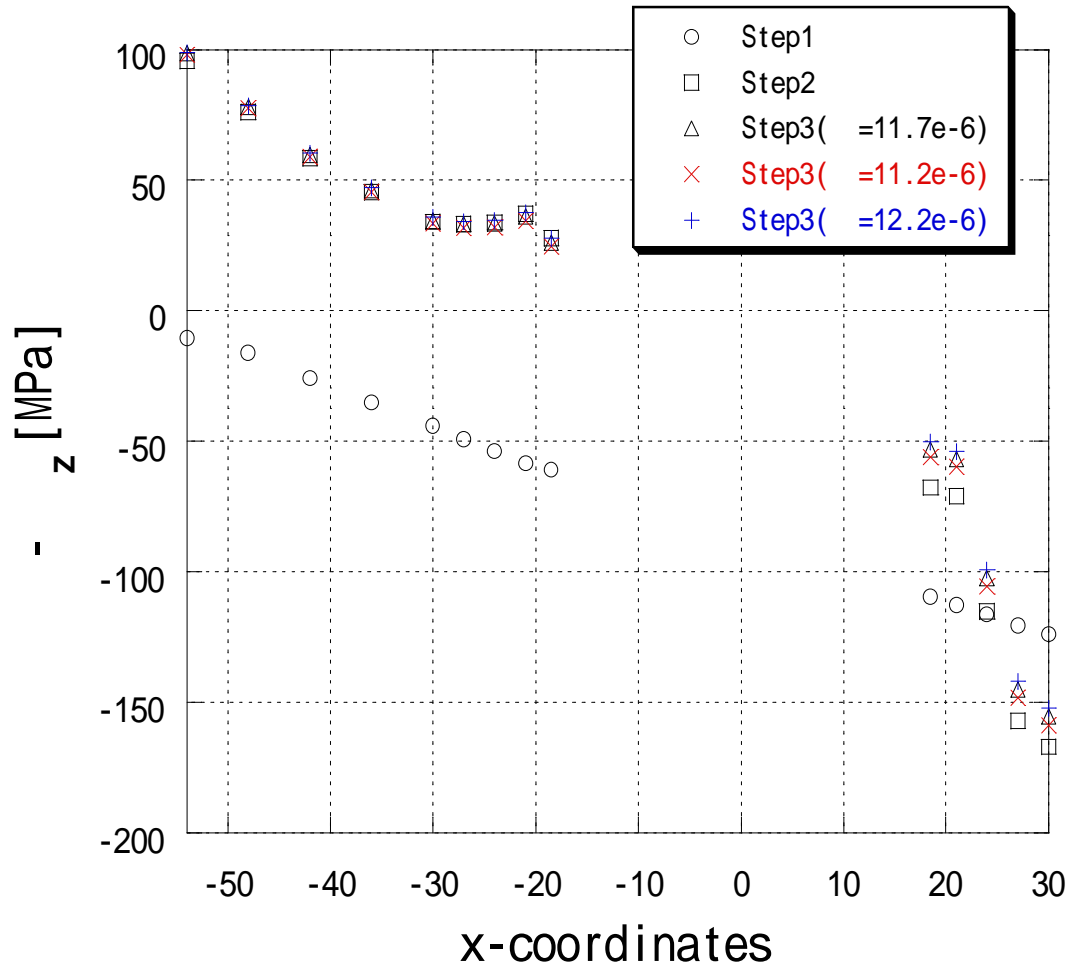


Fig1.4.31 Distributions of contact pressure at casing interface

） Type3 の場合

Fig.1.4.32 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時，Step2：内圧付加時，Step3：熱負荷時) ごとの変化を示す．縦軸は引張り応力 σ_z で，横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である．

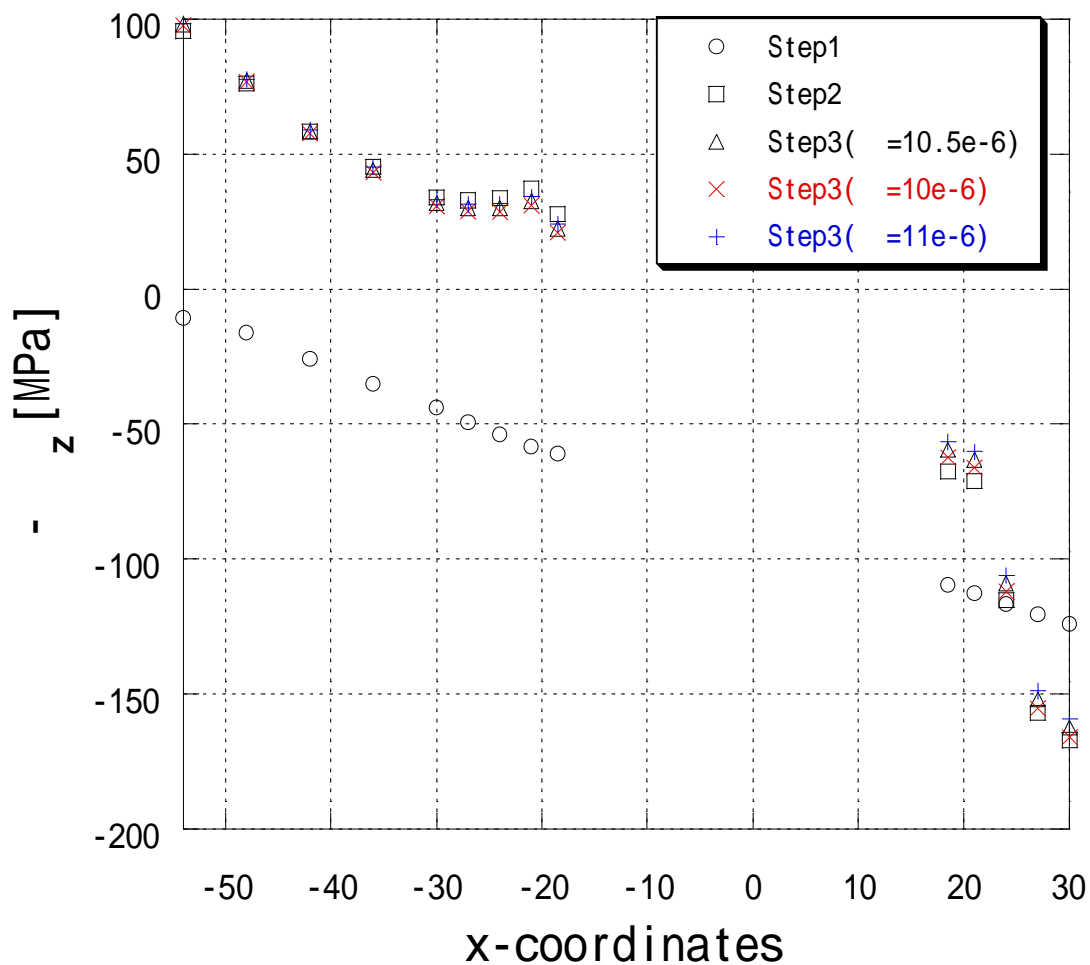


Fig1.4.32 Distributions of contact pressure at casing interface

いずれの Type についても，ボルトの線膨張係数のみをわずかに 0.5×10^{-6} 変化させただけで，ケーシング面圧に変化影響していることが分かる．また，ボルトの線膨張係数がケーシングに比べ大きい場合，わずかであるが面圧低下発生している．このことは，ボルトがケーシングに比べ比較的伸びやすいためだと考えられる．

3.5 結言

- (1) 次世代超高压ポンプを内圧と熱負荷を受けるボルト締結体としてケーシングのシール性能を評価した。
- (2) ボルトとケーシングの異なる材質の組み合わせが熱負荷後のボルト軸応力に与える影響を示した。
- (3) 内圧がボルト軸応力，ケーシング面圧に与える影響を示した。
- (4) 内部流体温度が熱負荷後のボルト軸応力に与える影響を示した。
- (5) 品質のばらつきによる線膨張係数の違いが熱負荷後のボルト軸応力に与える影響を示した。

追加：軸方向引張り応力の与える面積について

前述の解析条件では，軸方向引張り応力はサンブナンの原理を考慮して，ケーシング断面全体に与えた．それらの影響をみるために，軸方向引張り応力の与える面積を変更して解析を行った．

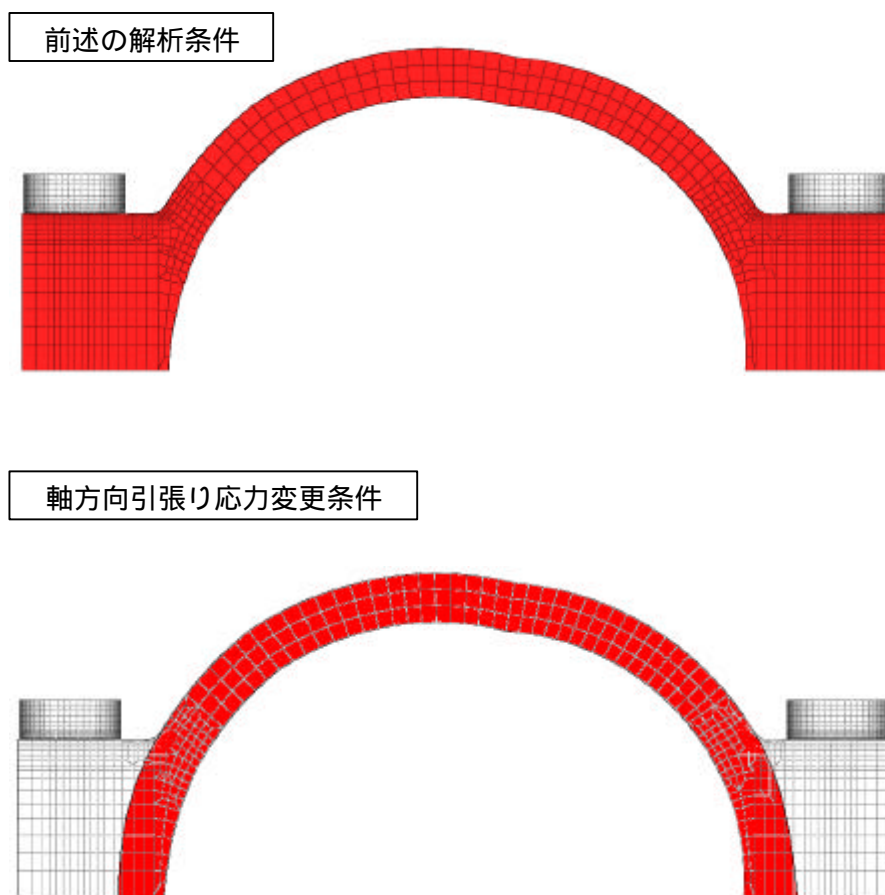


Fig1 Boundary conditions

Fig.1 に，前述の解析条件と変更後の解析条件における引張り応力を与える面積を示す．図の赤い領域が引っ張りを与える部分である．具体的には，給水ポンプを，内圧を受ける薄肉円筒(肉厚 28mm)と仮定し軸方向引張り応力 46MPa を算出したため，引張り応力を与える面積を肉厚 28mm の円筒部分のみに変更する．本解析は，Type 2 モデルと Type3 モデルの場合の標準条件のみについて行った．

解析結果

．ボルト軸応力変化

Fig.2 にボルト軸応力の時間変化を示す．縦軸はある時間における軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値，横軸は時間である．比較のため標準条件における軸応力の時間変化も図中に示す．

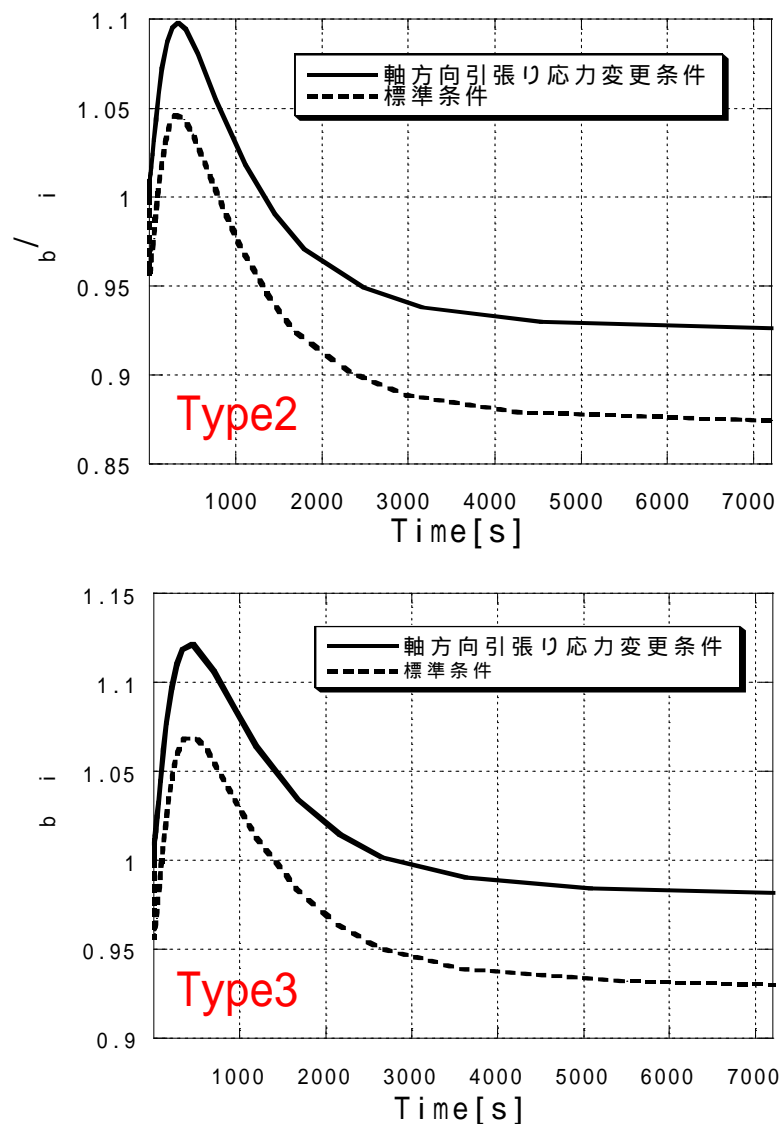


Fig2 Variations of bolt stress with time

いずれの Type についても軸方向引張り応力を与える面積を変更した条件では，ボルト軸応力低下量が小さくなっていることが分かる．つまり，標準条件では安全側に評価していると言える．

・面圧分布の変化

Fig.3 にケーシング面圧の step (Step1:締め付け時, Step2:内圧付加時, Step3:熱負荷時) ごとの変化を示す。縦軸は引張り応力- σ_z で、横軸はボルト穴中央を基準としたケーシング部の座標である。

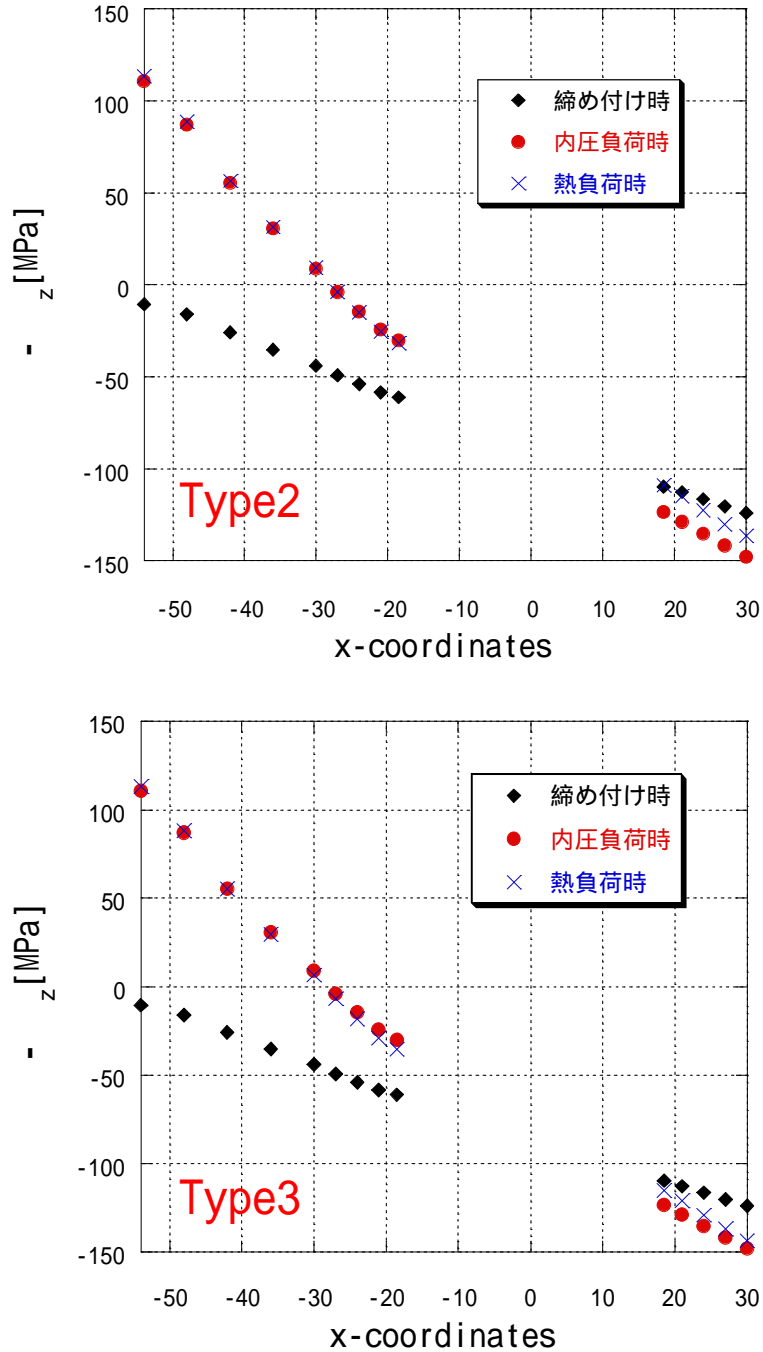



Fig3 Distributions of contact pressure at casing interface

いずれの Type についても前述の解析と比較して、内圧負荷後の面圧分布が大きく変化している。また、内圧負荷時においてもボルト内側のケーシングには圧縮応力が残っていることが分かる。熱負荷後に、ケーシング端部の面圧が低下している。この現象は Type2 の方が顕著に現われており、ボルト軸応力の大幅な低下による面圧低下であると考えられる。

以上の結果より、標準条件における解析は、ボルト軸応力の時間変化、面圧分布の変化とともに非常に厳しい条件での解析結果であり、安全側に評価していると言える。

以上

次世代 LNG 船用超高压給水ポンプ設備の技術開発
超高压給水ポンプ駆動用 SG2800H 形増速機
成果報告書

 株式会社 日立ニコトランスミッション

大宮事業所 設計部

1. 増速機の設計・製作

開発の超高圧給水ポンプは全体効率の観点から従来の蒸気タービン駆動から電動機駆動となった。そのため電動機と給水ポンプ間に増速機を設置する必要が生じた。

ボイラの部分負荷運転に対応し電動機の回転速度を変えポンプ吐出圧力を制御して省エネを図る必要があり、増速機はその可変速度範囲及び負荷制御範囲での安定性、追従性が要求された。

増速機は上記要求性能、設置環境、運用条件を踏まえて設計・製作を行った。

1.1 増速機仕様

<基本仕様>

回転速度(定格) : 入力軸 1788min⁻¹ / 出力軸 7400min⁻¹

伝達動力 : 1050kW (設計動力)

増速比 : 4.139 (歯数 149 / 36)

伝達効率 : 98%以上

<歯車>

| | ピニオン | ホイール |
|------------------------|-------------------------|--------|
| 種類 | シングルヘリカル | |
| モジュール | 3 | |
| 圧力角 | 20° | |
| ねじれ角 | 8° | |
| 中心間距離 mm | 280 | |
| 歯幅 mm | 130 | |
| 歯数 | 36 | 149 |
| 材質 | SNCM420 | SCM420 |
| 熱処理 | 浸炭焼入 | |
| 硬度(歯面) H _{RC} | 58~62 | |
| 仕上げ方法 | 研削 | |
| 精度 | JIS 0 級(JIS B1702-1976) | |

強度 : ANSI/AGMA 6011-H98 (サービスマーク 2.0 以上)

<軸受> 入力軸,出力軸共すべり軸受

| 入力軸 | ラジアル | | スラスト |
|-----|------|--------|--------|
| | 原動機側 | 給水ポンプ側 | - |
| 種類 | 真円軸受 | | テーパランド |

| 出力軸 | ラジアル | | スラスト |
|-----|-------|--------|------------|
| | 原動機側 | 給水ポンプ側 | - |
| 種類 | 非真円軸受 | | テイルテイングパッド |

1.2 主要部品材質

| 部番 | 品名 | 材質 | 備考 |
|----|-----------|---------------|-----------|
| 1 | 歯車箱 | FC250 | 上下共 |
| 2 | 入力軸 | S45C | |
| 3 | 出力軸（ピニオン） | SNCM420 | |
| 4 | ホイール | SCM420 | |
| 5 | 入力軸ラジアル軸受 | WJ2 / S25C | |
| 6 | 入力軸ラジアル軸受 | WJ2 / S25C | スラスト軸受一体型 |
| 7 | 出力軸ラジアル軸受 | WJ2 / S25C | |
| 8 | 出力軸ラジアル軸受 | WJ2 / S25C | |
| 9 | 出力軸スラスト軸受 | 強化樹脂材料 / S45C | |

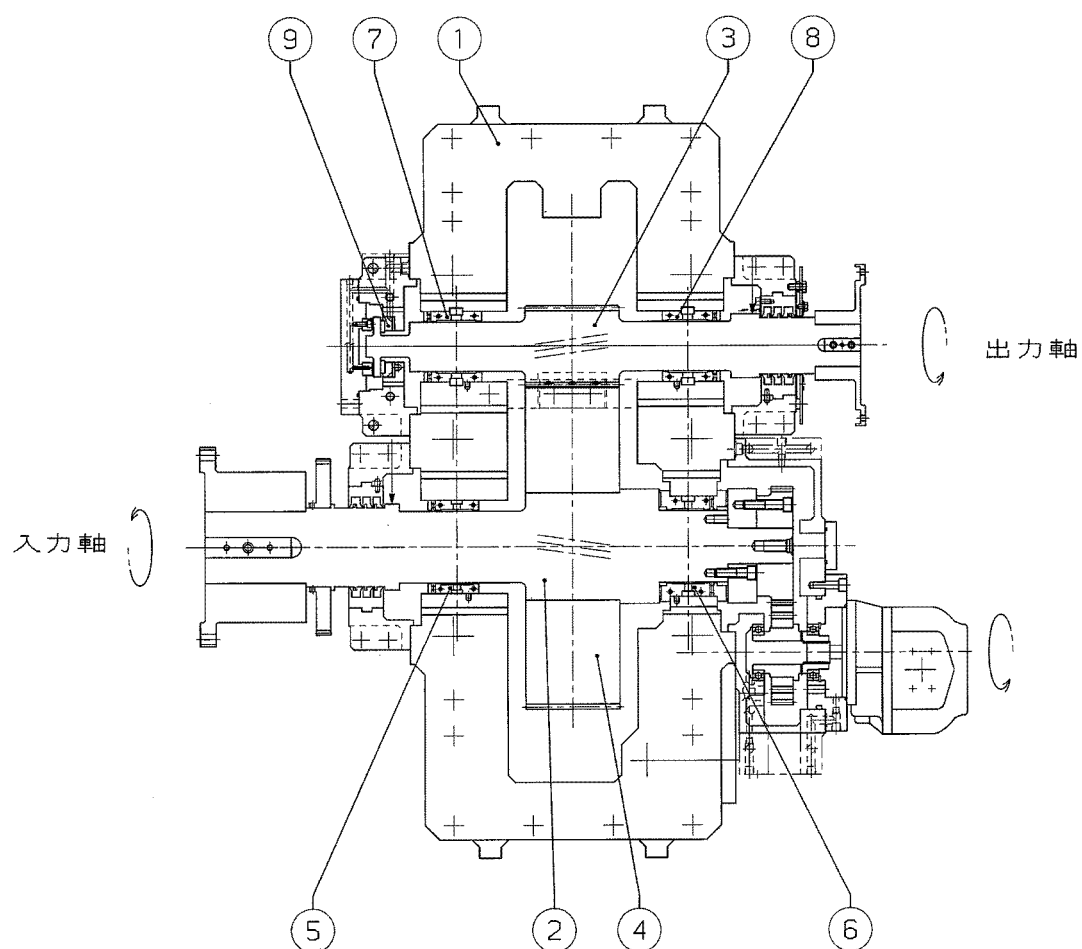


図1 . 増速機構造

1.3 製作台数 1台

1.4 設計指針

開発する増速機は高速・高負荷容量の歯車装置であり、且つ回転速度変化、負荷変化を伴う運転での安定性や追従性が要求されている。また、省エネシステムに組込まれる事、船内に設置される事から騒音、振動及び伝達効率を十分配慮した設計とする。

歯車については歯面の浸炭処理、研削仕上げによる高精度加工、軸の撓みや歯の撓みを織り込んだ歯スジ・歯形の修整を施す。高速側軸受については回転速度変化、負荷変化に対応する非真円滑り軸受を適応する。

増速機構造はメンテナンス性を配慮しケーシングは軸心での上下水平割とした。連続運転での使用となるため長寿命にも配慮したものとする。

2. 増速機の性能試験要領

性能検証は開発の超高圧給水ポンプとカップルした運転試験で実施し、振動、騒音、各部温度等の計測を行った。

試験装置の概略図を図2に示す。

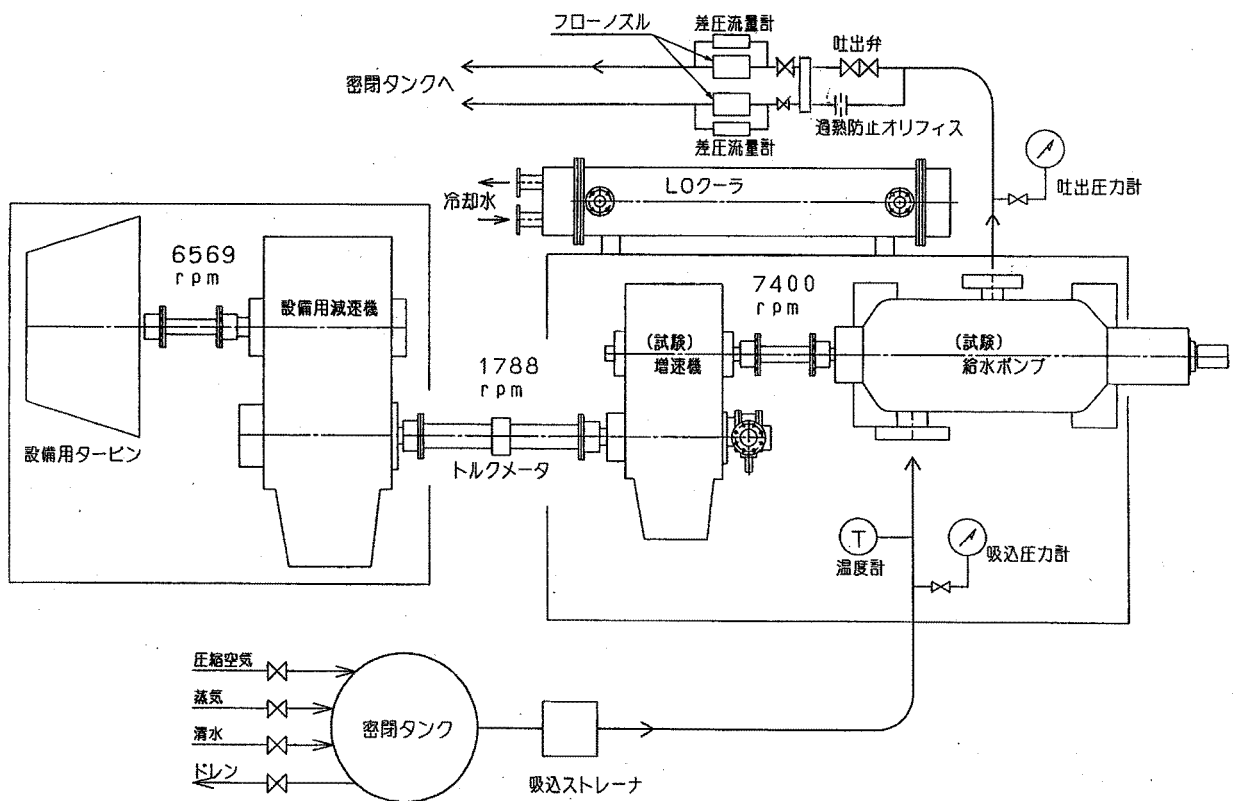


図2 試験装置概略図

2-1 試験条件

(1) 回転速度制御試験

供試ポンプの吸込条件を定格条件に合わせた後、回転速度を定格から 95%、90%、85%、80%、75%、及び 70%まで徐々に下げて実施した。

(2) 継続運転試験

供試ポンプの吸込条件を定格条件に合わせた後、定格回転速度にて 1 時間の継続運転を実施した。

2-2 計測要領

- (1) 高精度変位計を入力軸・出力軸の 90° 位相を変えた 2 方向に各 1 箇所設置し、軸振動の振幅を計測した。
 - (2) 測温抵抗体を各軸受部に設置し、排油温度を計測した。
 - (3) 測温抵抗体を増速機の潤滑油給・排油部に設置し、潤滑油の給・排油温度を計測した。
 - (4) 高精度容積流量計を増速機の潤滑油給油部に設置し、潤滑油供給量を計測した。
 - (5) 歪みゲージを増速機入力側中間軸に設置し、増速機入力軸トルクを計測した。
- 各計測機器の設置位置を図 3 に示す。

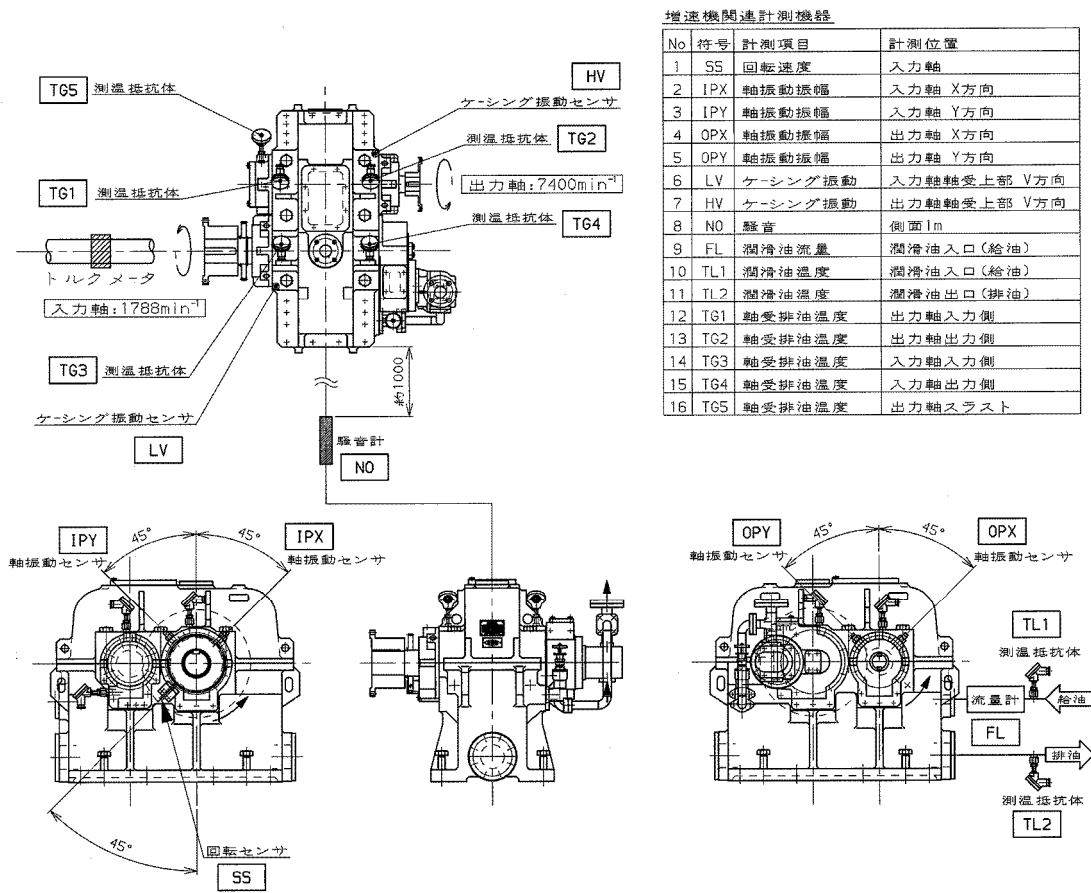


図 3 計測機器設置位置

3. 試験結果

3-1 安定性, 追従性

実使用回転域（定格回転～70%回転）において，内部回転体の軸振動は良好な値で安定しており，本増速機は十分なる安定性を有していた。

加速・減速に対する追従性についても振動・温度等の計測項目において異常な事象は認められず、良好な結果であった。

追従性の確認結果は（付-1）に示す。

3-2 騒音, 振動

軸振動振幅のオーバーオール値（以下，O/A 値）は実使用回転域（定格回転～70%回転）において，入力軸は $25\mu\text{m}$ (O-P) 以下，出力軸は $15\mu\text{m}$ (O-P) 以下となり良好な結果であった。

騒音は本試験時は原動機としてスチームタービンを使用していたため，O/A 値は 93～97dB(A) となったが，増速機の歯車噛合成分は部分共振が発生していた約 80%回転付近を除外すると定格運転時においても 92dB(A) 以下であり，良好な結果であった。

軸振動振幅，騒音の FFT を用いた周波数分析結果は（付 - 2）～（付-6）に示す。

軸振動振幅 O/A 値 { μm (O-P) }

| 回転速度 (min^{-1}) | | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
|----------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 定格回転に対する割合 | | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 入力軸 X | IPX | 17.7 | 16.4 | 15.1 | 13.9 | 14.2 | 14.4 | 14.2 |
| 入力軸 Y | IPY | 20.4 | 19.1 | 19.4 | 18.6 | 16.5 | 14.8 | 15.3 |
| 出力軸 X | OPX | 7.5 | 8.0 | 8.9 | 9.6 | 10.3 | 11.2 | 12.2 |
| 出力軸 Y | OPY | 5.7 | 6.2 | 6.8 | 7.2 | 7.9 | 8.2 | 9.1 |

騒音 O/A 値 { dB(A) }

| 回転速度 (min^{-1}) | | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
|----------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|
| 定格回転に対する割合 | | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 側面 1m | NO | 97.2 | 92.6 | 94.5 | 94.3 | 94.2 | 95.5 | 95.1 |

3-3 各部温度

供試ポンプの吸込条件を定格条件に合わせ、定格回転速度にて 1 時間の継続運転後の各部温度は下表値に安定した。

< 潤滑油温度 >

| 給油温度 | 排油温度 |
|------|------|
| TL1 | TL2 |
| 45.4 | 50.7 |

< 軸受排油温度 >

| 出力軸入力側 | 出力軸出力側 | 入力軸入力側 | 入力軸出力側 | 出力軸スラスト |
|--------|--------|--------|--------|---------|
| TG1 | TG2 | TG3 | TG4 | TG5 |
| 52.1 | 52.3 | 47.1 | 47.3 | 47.4 |

3-4 増速機の効率

供試ポンプの吸込条件を定格条件に合わせ、定格回転速度にて 1 時間の継続運転後の増速機潤滑油流量 (FL) は 4.62 m³/h であった。

下式より損失動力を計算すると、増速機の損失動力は約 12kW となる。

継続運転時の伝達動力は約 900kW であったので増速機の効率は約 98.5%となり、仕様を上回る結果となった。

$$\text{損失動力(算出式)} = (TL2 - TL1) \cdot FL \cdot \text{比重量} \cdot Cp / 860$$

TL1, TL2 給・排油温度

FL 増速機給油量 m³/hr

比重量 : 856 kg/m³

Cp 比熱 : 0.484 kcal/(kgf · °C)

換算値 : 1 kW = 860 kcal/hr

3-5 負荷運転後の歯当りの確認

試験運転終了後に増速機点検窓を開放し実施した歯当たり確認写真を図4，スケッチを図5に示す。

当たり幅は目視では90%以上となっており，良好な歯当たりであった。

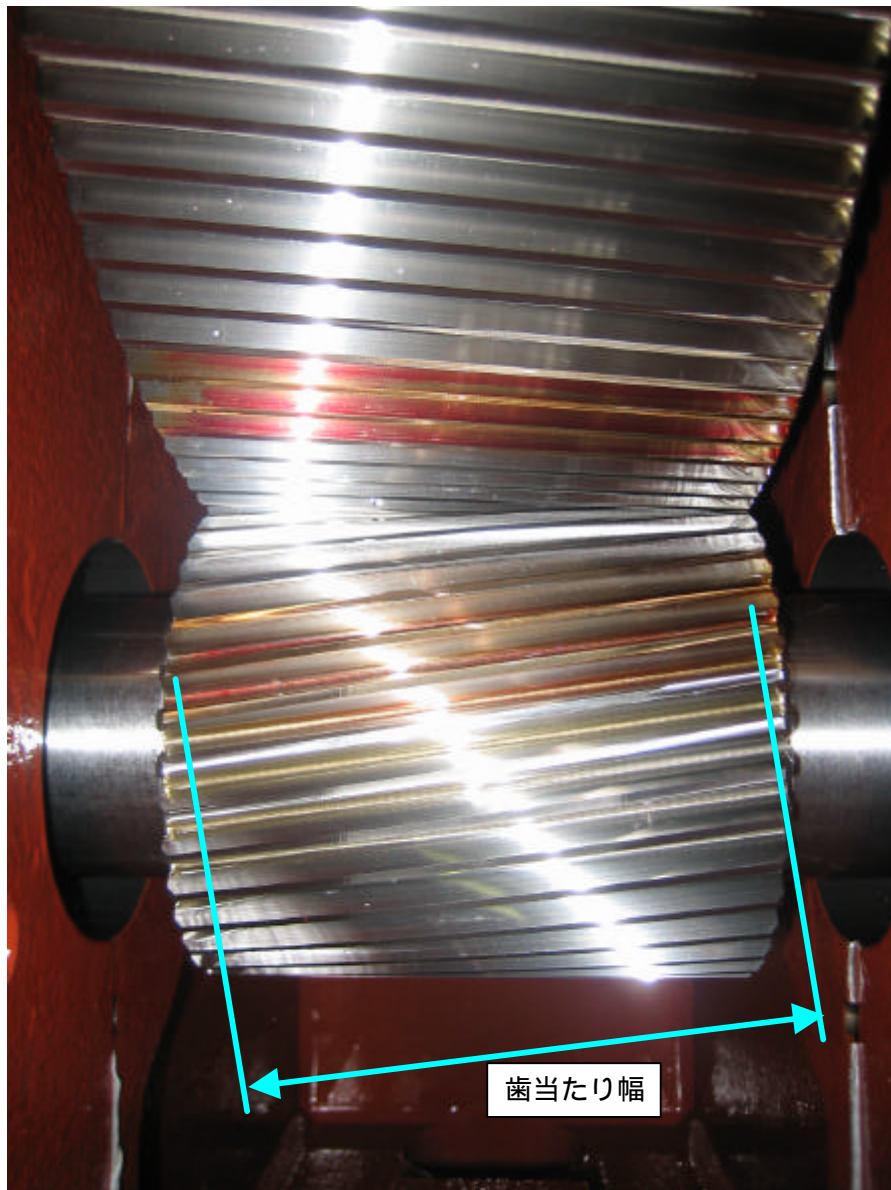


図4 歯当たり写真

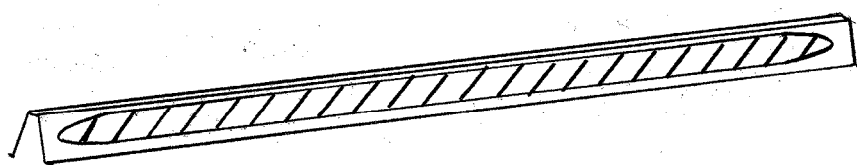


図5 歯当たりスケッチ

4. 評価及び考察

本試験の原動機は現船とは異なるが、負荷給水ポンプ及び試験条件は実運転と同等の状態で行われた。前述の結果の通り継続運転状態、過渡状態の試験全域において増速機は良好な結果であったと評価する。

現船での運転管理の一つとしてケース振動監視がある。入力側軸振動に軸継手の影響が大きく出ていることから軸継手の種類、質量等の選定も注意が要ると考察する。

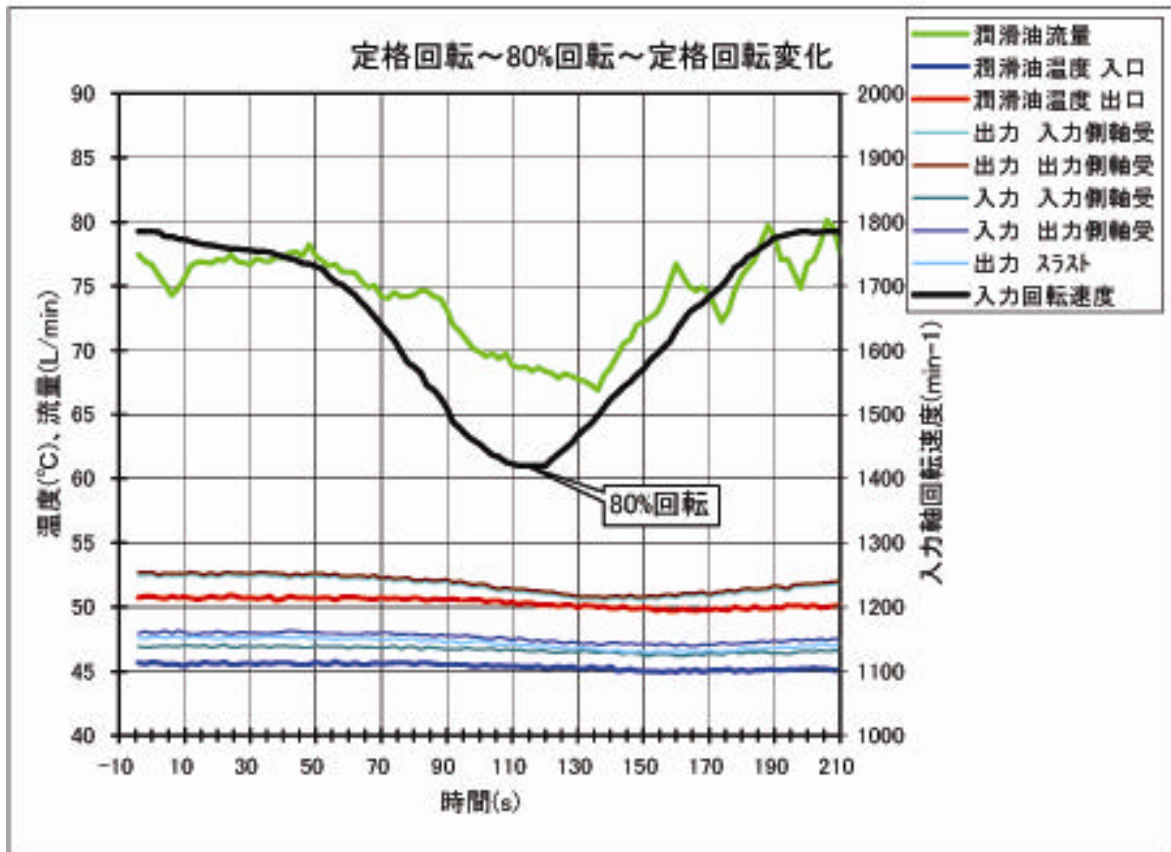
最後に本増速機の開発試験をリードしていただきました、また種々のご協力をいただきましたすべてのの方々、すべての団体に深く感謝申し上げます。

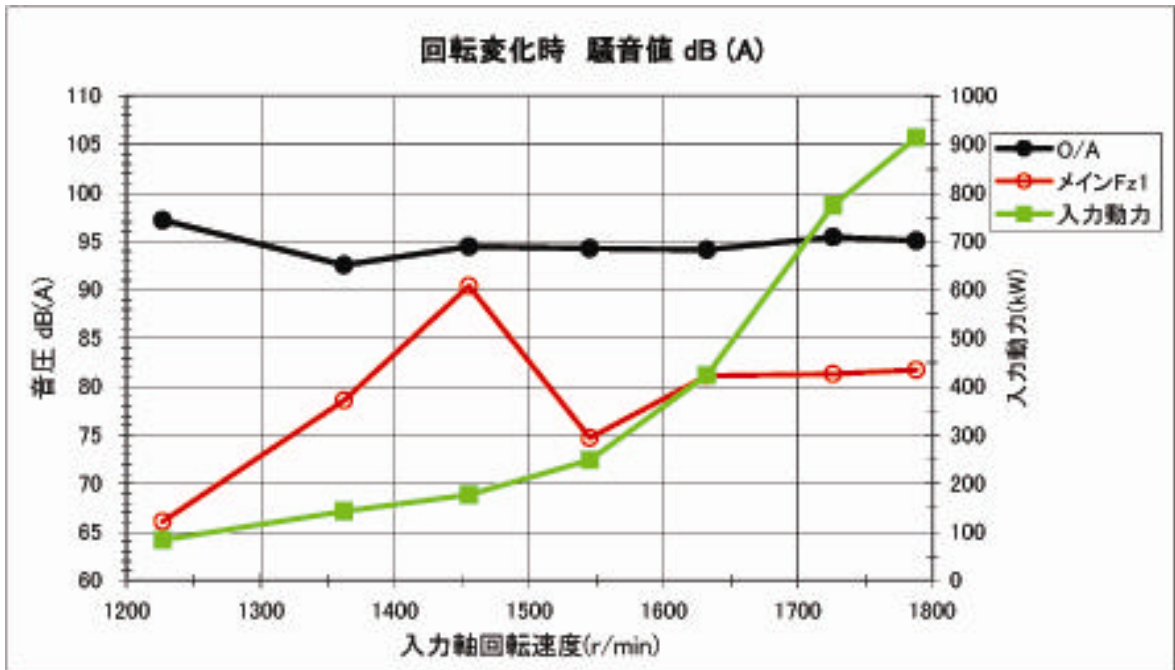
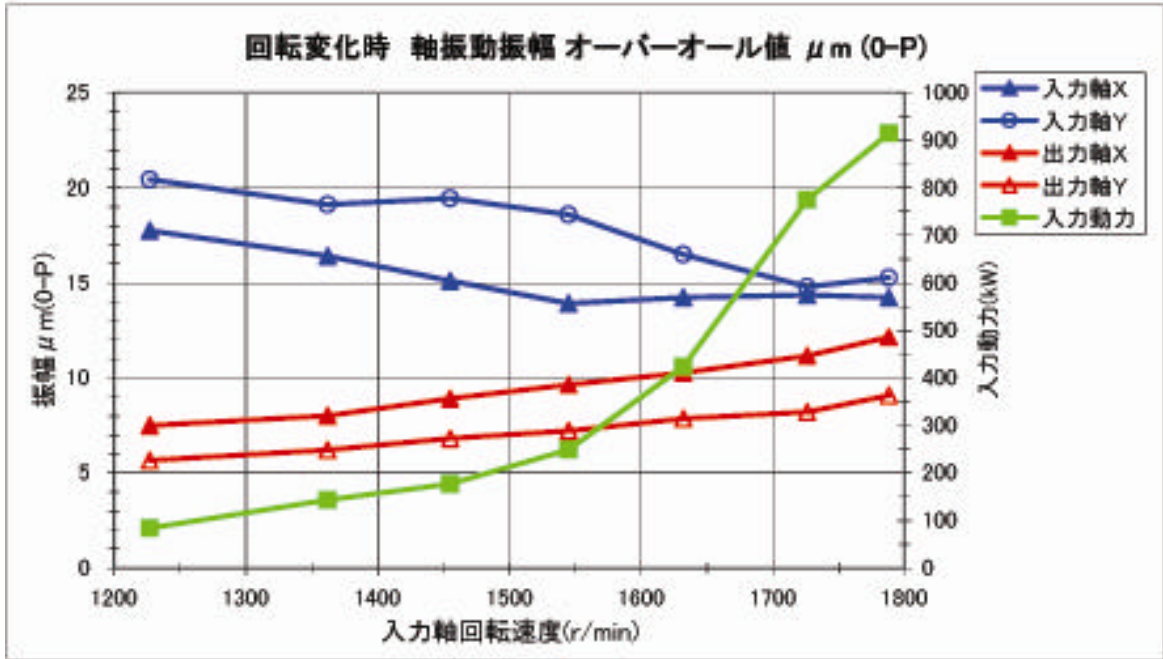
添付資料

- (付 - 1) 追従性確認試験結果
- (付 - 2) F F T分析結果まとめ
- (付 - 3) 定格回転 (入力軸：1788min⁻¹)時 F F Tデータ
- (付 - 4) 約 90%回転 (入力軸：1620min⁻¹)時 F F Tデータ
- (付 - 5) 約 80%回転 (入力軸：1455min⁻¹)時 F F Tデータ
- (付 - 6) 約 70%回転 (入力軸：1227min⁻¹)時 F F Tデータ

- 以上 -

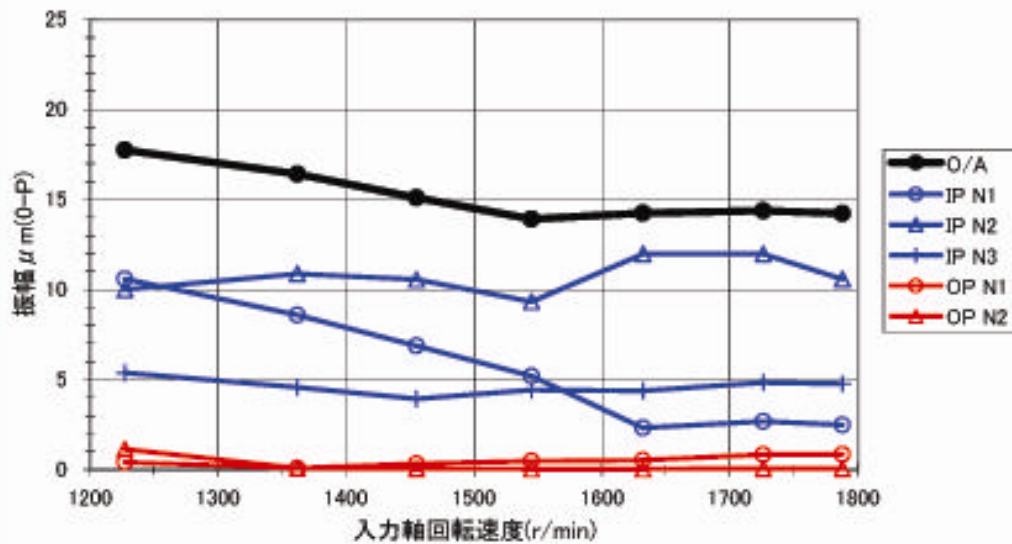
追従性確認試験結果





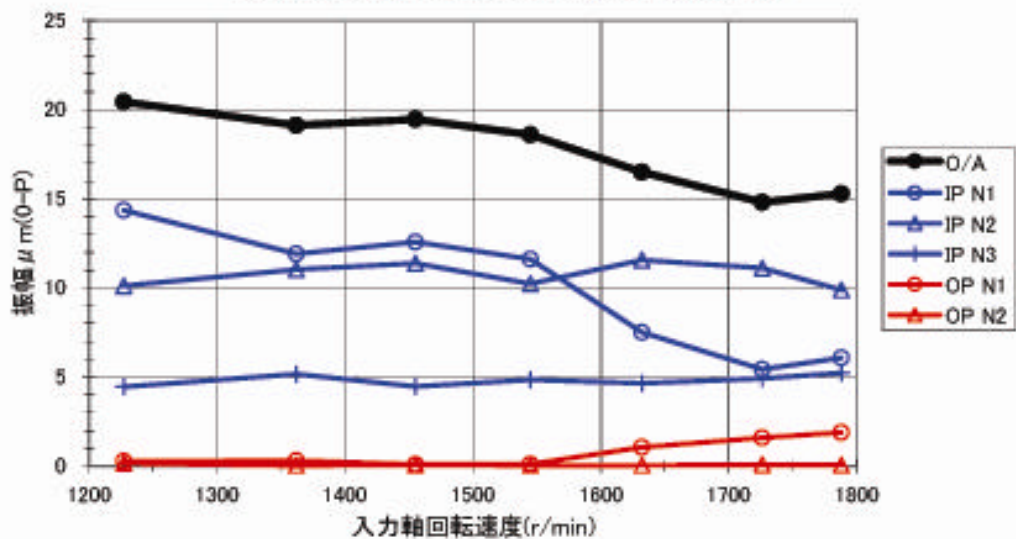
入力軸X

| | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 実回転率 | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 実回転 | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
| 入力動力 | 84 | 143 | 177 | 249 | 424 | 775 | 915 |
| O/A | 17.7 | 16.4 | 15.1 | 13.9 | 14.2 | 14.4 | 14.2 |
| IP N1 | 10.6 | 8.6 | 6.9 | 5.2 | 2.3 | 2.7 | 2.5 |
| IP N2 | 10.0 | 10.9 | 10.6 | 9.3 | 12.0 | 12.0 | 10.6 |
| IP N3 | 5.4 | 4.6 | 3.9 | 4.4 | 4.4 | 4.8 | 4.8 |
| OP N1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.8 |
| OP N2 | 1.13 | 0.09 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.07 |

回転変化時 入力軸X 軸振動振幅 μm (0-P)

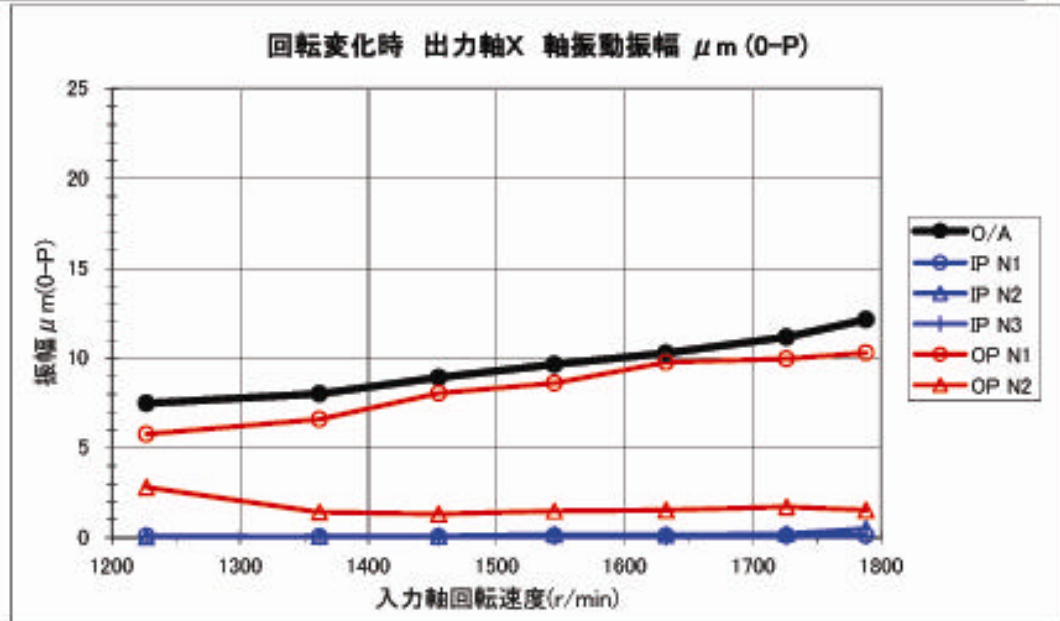
入力軸Y

| | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 実回転率 | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 実回転 | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
| 入力動力 | 84 | 143 | 177 | 249 | 424 | 775 | 915 |
| O/A | 20.4 | 19.1 | 19.4 | 18.6 | 16.5 | 14.8 | 15.3 |
| IP N1 | 14.4 | 11.9 | 12.6 | 11.6 | 7.5 | 5.4 | 6.1 |
| IP N2 | 10.1 | 11.0 | 11.4 | 10.2 | 11.6 | 11.1 | 9.9 |
| IP N3 | 4.5 | 5.2 | 4.5 | 4.9 | 4.7 | 4.9 | 5.2 |
| OP N1 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 1.1 | 1.6 | 1.9 |
| OP N2 | 0.16 | 0.03 | 0.08 | 0.04 | 0.04 | 0.08 | 0.07 |

回転変化時 入力軸Y 軸振動振幅 μm (0-P)

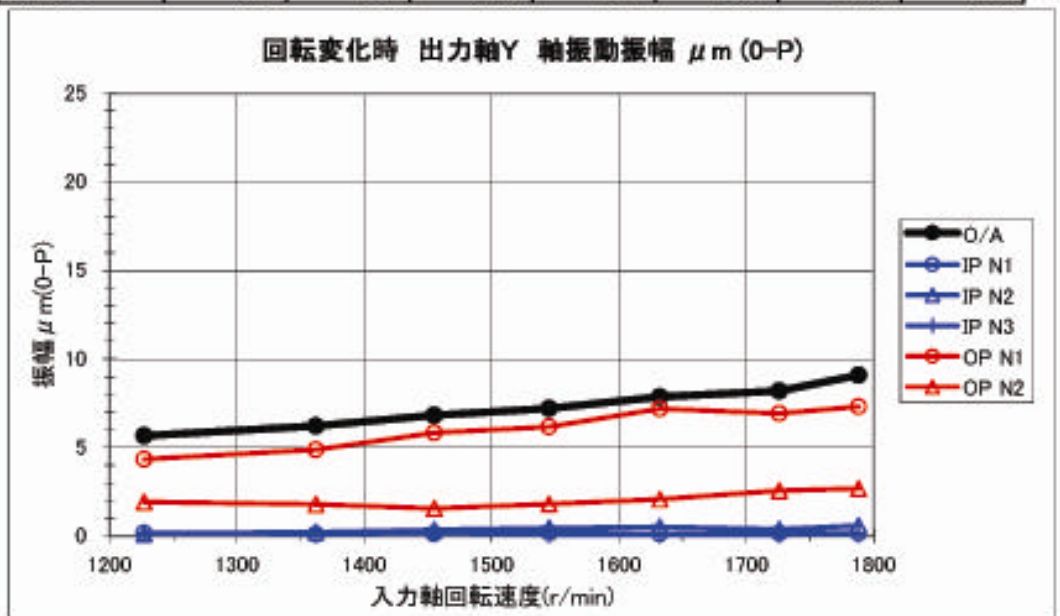
出力軸X

| | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 実回転率 | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 実回転 | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
| 入力動力 | 84 | 143 | 177 | 249 | 424 | 775 | 915 |
| O/A | 7.5 | 8.0 | 8.9 | 9.6 | 10.3 | 11.2 | 12.2 |
| IP N1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| IP N2 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.5 |
| IP N3 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 |
| OP N1 | 5.8 | 6.6 | 8.0 | 8.6 | 9.8 | 10.0 | 10.3 |
| OP N2 | 2.81 | 1.42 | 1.32 | 1.49 | 1.53 | 1.72 | 1.53 |

回転変化時 出力軸X 軸振動振幅 μm (0-P)

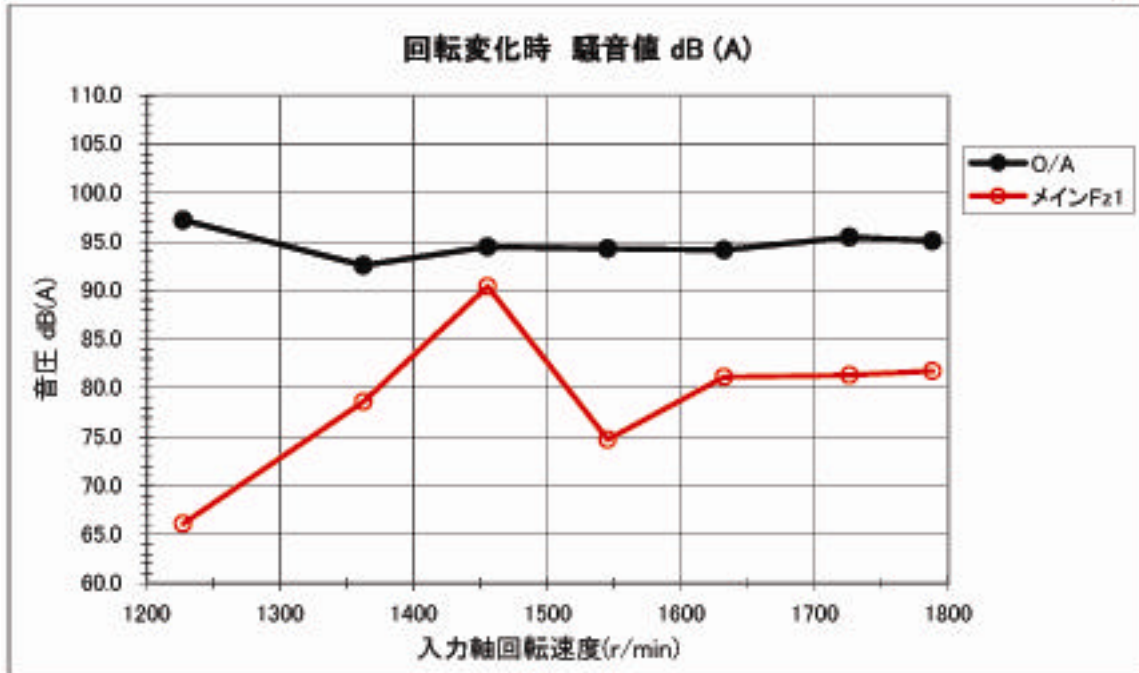
出力軸Y

| | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 実回転率 | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 実回転 | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
| 入力動力 | 84 | 143 | 177 | 249 | 424 | 775 | 915 |
| O/A | 5.7 | 6.2 | 6.8 | 7.2 | 7.9 | 8.2 | 9.1 |
| IP N1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| IP N2 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.6 |
| IP N3 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| OP N1 | 4.3 | 4.9 | 5.8 | 6.2 | 7.2 | 6.9 | 7.3 |
| OP N2 | 1.92 | 1.79 | 1.56 | 1.81 | 2.08 | 2.56 | 2.69 |

回転変化時 出力軸Y 軸振動振幅 μm (0-P)

騒音

| | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 実回転率 | 69% | 76% | 81% | 86% | 91% | 97% | 100% |
| 実回転 | 1227 | 1362 | 1455 | 1545 | 1632 | 1726 | 1788 |
| 入力動力 | 84 | 143 | 177 | 249 | 424 | 775 | 915 |
| O/A | 97.2 | 92.6 | 94.5 | 94.3 | 94.2 | 95.5 | 95.1 |
| メインFz1 | 66.1 | 78.6 | 90.4 | 74.7 | 81.1 | 81.3 | 81.8 |



入力軸(X)

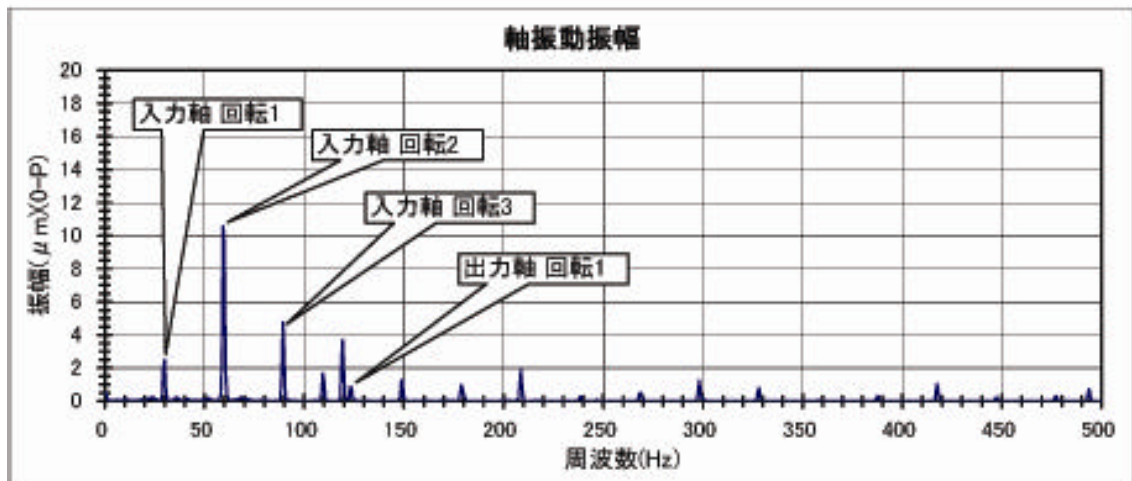
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|--------|
| 1 | 59.375 | 10.570 |
| 2 | 60.000 | 9.537 |
| 3 | 89.375 | 4.767 |
| 4 | 119.375 | 3.712 |
| 5 | 90.000 | 2.891 |
| 6 | 58.750 | 2.506 |
| 7 | 30.000 | 2.486 |
| 8 | 118.750 | 2.337 |
| 9 | 88.750 | 1.938 |
| 10 | 29.375 | 1.915 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 208.750 | 1.900 |
| 12 | 109.375 | 1.660 |
| 13 | 60.625 | 1.585 |
| 14 | 120.000 | 1.449 |
| 15 | 149.375 | 1.294 |
| 16 | 110.000 | 1.285 |
| 17 | 298.125 | 1.235 |
| 18 | 148.750 | 1.205 |
| 19 | 417.500 | 1.035 |
| 20 | 208.125 | 0.999 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 178.750 | 0.975 |
| 22 | 209.375 | 0.903 |
| 23 | 123.125 | 0.849 |
| 24 | 123.750 | 0.822 |
| 25 | 328.125 | 0.788 |
| 26 | 30.625 | 0.750 |
| 27 | 179.375 | 0.732 |
| 28 | 493.750 | 0.718 |
| 29 | 298.750 | 0.715 |
| 30 | 416.875 | 0.562 |

Over all 14.230



入力軸(Y)

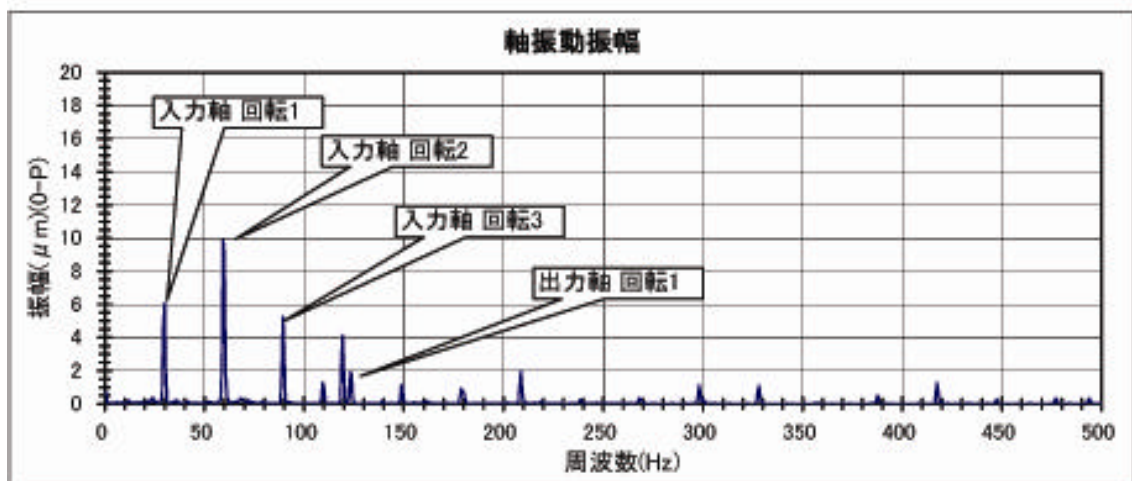
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 59.375 | 9.890 |
| 2 | 60.000 | 9.042 |
| 3 | 30.000 | 6.084 |
| 4 | 89.375 | 5.229 |
| 5 | 29.375 | 4.602 |
| 6 | 119.375 | 4.148 |
| 7 | 90.000 | 3.185 |
| 8 | 118.750 | 2.614 |
| 9 | 58.750 | 2.326 |
| 10 | 88.750 | 2.135 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 208.750 | 1.993 |
| 12 | 123.125 | 1.886 |
| 13 | 30.625 | 1.868 |
| 14 | 123.750 | 1.807 |
| 15 | 60.625 | 1.618 |
| 16 | 120.000 | 1.616 |
| 17 | 109.375 | 1.287 |
| 18 | 417.500 | 1.246 |
| 19 | 149.375 | 1.165 |
| 20 | 298.125 | 1.108 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 148.750 | 1.088 |
| 22 | 328.125 | 1.087 |
| 23 | 208.125 | 1.056 |
| 24 | 110.000 | 0.989 |
| 25 | 209.375 | 0.933 |
| 26 | 178.750 | 0.909 |
| 27 | 327.500 | 0.714 |
| 28 | 179.375 | 0.709 |
| 29 | 0.625 | 0.705 |
| 30 | 180.000 | 0.699 |

Over all 15.278



出力軸(X)

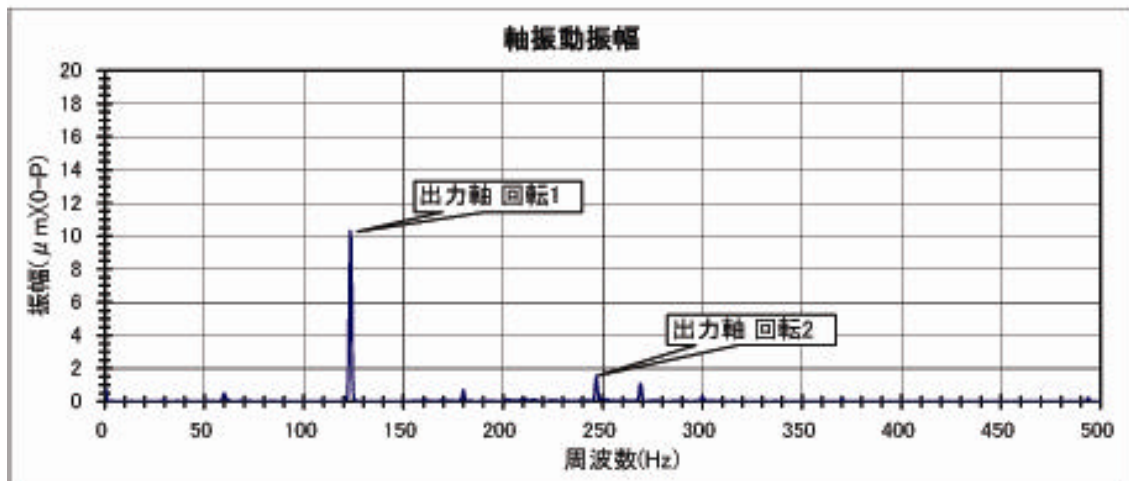
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|--------|
| 1 | 123.125 | 10.295 |
| 2 | 123.750 | 9.846 |
| 3 | 122.500 | 2.226 |
| 4 | 124.375 | 1.819 |
| 5 | 246.875 | 1.533 |
| 6 | 268.750 | 1.076 |
| 7 | 269.375 | 0.923 |
| 8 | 246.250 | 0.908 |
| 9 | 0.625 | 0.789 |
| 10 | 0.000 | 0.782 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 247.500 | 0.709 |
| 12 | 180.000 | 0.694 |
| 13 | 60.000 | 0.501 |
| 14 | 180.625 | 0.397 |
| 15 | 300.000 | 0.333 |
| 16 | 268.125 | 0.314 |
| 17 | 179.375 | 0.304 |
| 18 | 59.375 | 0.302 |
| 19 | 121.875 | 0.301 |
| 20 | 60.625 | 0.286 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 125.000 | 0.270 |
| 22 | 493.750 | 0.239 |
| 23 | 300.625 | 0.203 |
| 24 | 250.625 | 0.186 |
| 25 | 248.750 | 0.177 |
| 26 | 249.375 | 0.155 |
| 27 | 211.250 | 0.154 |
| 28 | 270.000 | 0.152 |
| 29 | 370.000 | 0.143 |
| 30 | 250.000 | 0.143 |

Over all 12.152



出力軸(Y)

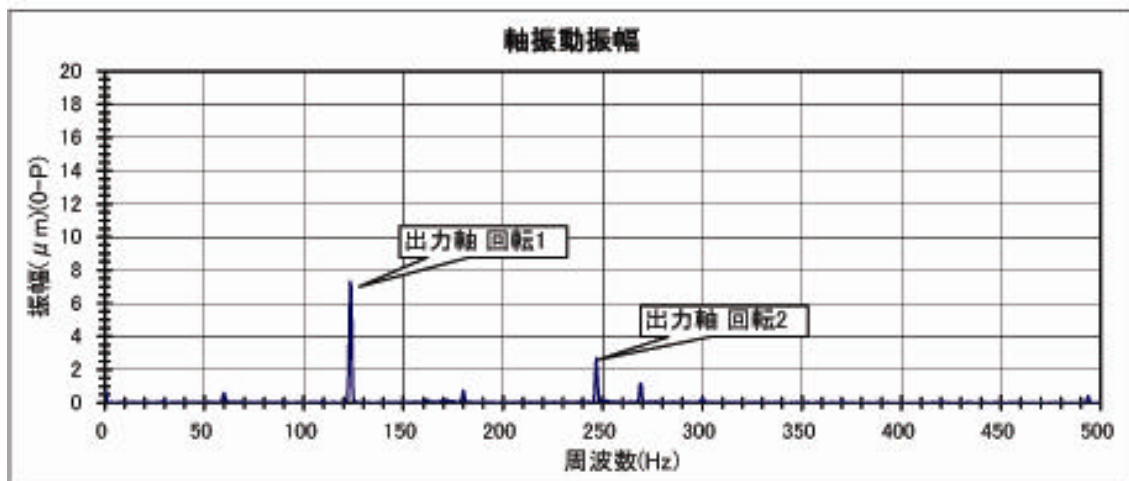
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 123.125 | 7.303 |
| 2 | 123.750 | 6.985 |
| 3 | 246.875 | 2.687 |
| 4 | 122.500 | 1.577 |
| 5 | 246.250 | 1.472 |
| 6 | 124.375 | 1.291 |
| 7 | 247.500 | 1.201 |
| 8 | 268.750 | 1.140 |
| 9 | 269.375 | 1.075 |
| 10 | 180.000 | 0.736 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 0.625 | 0.692 |
| 12 | 0.000 | 0.681 |
| 13 | 60.000 | 0.587 |
| 14 | 59.375 | 0.423 |
| 15 | 180.625 | 0.407 |
| 16 | 493.750 | 0.385 |
| 17 | 179.375 | 0.328 |
| 18 | 300.000 | 0.299 |
| 19 | 60.625 | 0.252 |
| 20 | 493.125 | 0.230 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 268.125 | 0.227 |
| 22 | 121.875 | 0.216 |
| 23 | 125.000 | 0.192 |
| 24 | 300.625 | 0.192 |
| 25 | 171.875 | 0.182 |
| 26 | 270.000 | 0.181 |
| 27 | 250.625 | 0.181 |
| 28 | 30.000 | 0.173 |
| 29 | 161.875 | 0.171 |
| 30 | 494.375 | 0.161 |

Over all 9.087



入力軸回転速度 1788 min⁻¹

側面(入力軸側)1m

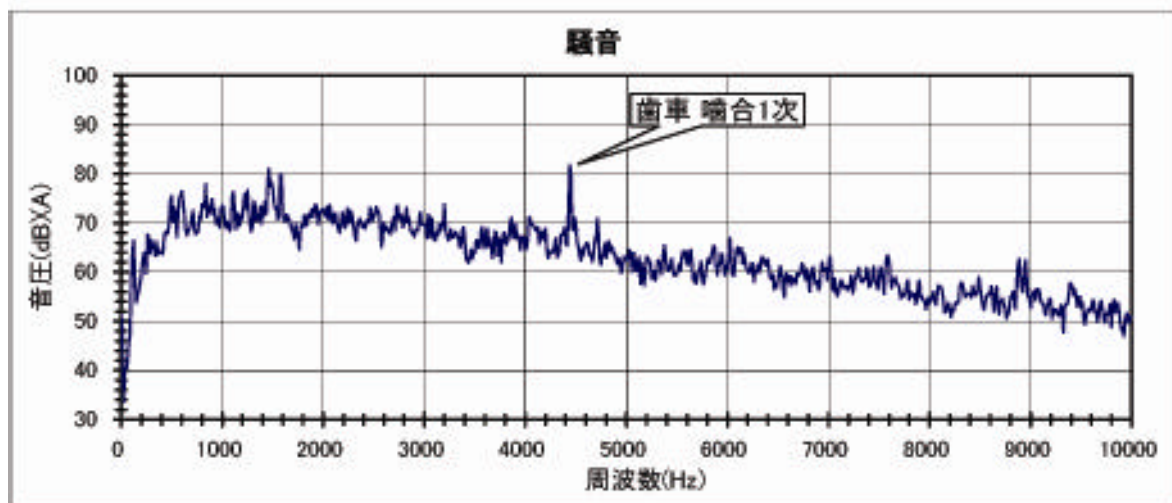
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 1 | 4437.500 | 81.767 |
| 2 | 1462.500 | 81.042 |
| 3 | 4450.000 | 80.538 |
| 4 | 1575.000 | 79.853 |
| 5 | 1587.500 | 79.831 |
| 6 | 1487.500 | 78.271 |
| 7 | 837.500 | 77.866 |
| 8 | 1475.000 | 77.420 |
| 9 | 1450.000 | 77.266 |
| 10 | 1500.000 | 77.002 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 11 | 1250.000 | 76.835 |
| 12 | 600.000 | 76.419 |
| 13 | 1112.500 | 76.292 |
| 14 | 1225.000 | 75.806 |
| 15 | 500.000 | 75.413 |
| 16 | 587.500 | 75.305 |
| 17 | 1100.000 | 75.293 |
| 18 | 575.000 | 75.109 |
| 19 | 900.000 | 74.860 |
| 20 | 612.500 | 74.560 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 21 | 1312.500 | 74.417 |
| 22 | 1425.000 | 74.342 |
| 23 | 487.500 | 74.330 |
| 24 | 1512.500 | 74.230 |
| 25 | 1212.500 | 74.083 |
| 26 | 887.500 | 73.935 |
| 27 | 800.000 | 73.798 |
| 28 | 3200.000 | 73.798 |
| 29 | 1925.000 | 73.743 |
| 30 | 825.000 | 73.670 |

Over all 95.082



入力軸(X)

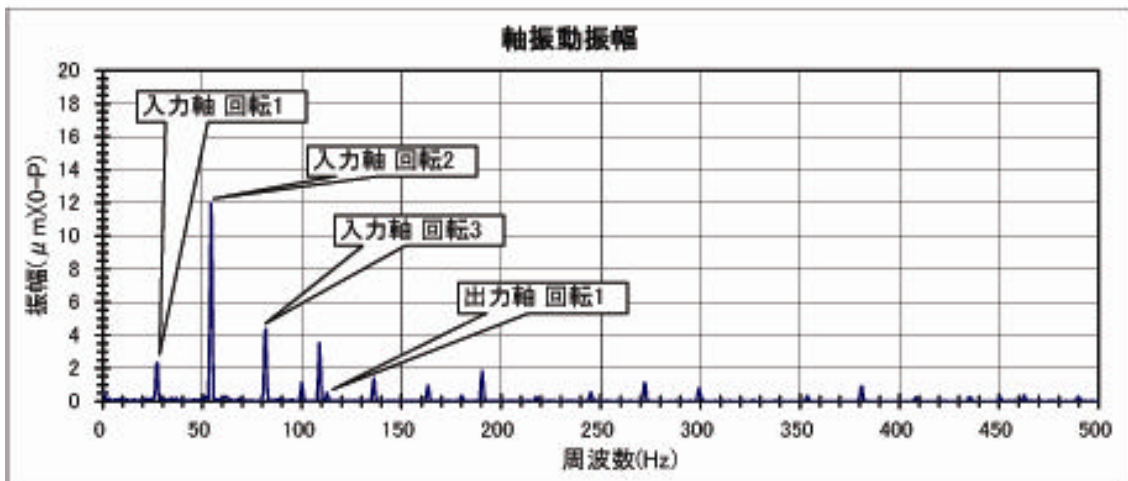
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|--------|
| 1 | 54.375 | 11.979 |
| 2 | 55.000 | 6.713 |
| 3 | 53.750 | 5.349 |
| 4 | 81.875 | 4.378 |
| 5 | 81.250 | 3.790 |
| 6 | 108.750 | 3.544 |
| 7 | 27.500 | 2.324 |
| 8 | 26.875 | 2.222 |
| 9 | 109.375 | 2.181 |
| 10 | 190.625 | 1.830 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 108.125 | 1.421 |
| 12 | 136.250 | 1.373 |
| 13 | 190.000 | 1.299 |
| 14 | 100.000 | 1.162 |
| 15 | 271.875 | 1.136 |
| 16 | 82.500 | 1.112 |
| 17 | 135.625 | 1.082 |
| 18 | 272.500 | 0.951 |
| 19 | 163.125 | 0.942 |
| 20 | 381.250 | 0.877 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 380.625 | 0.871 |
| 22 | 299.375 | 0.797 |
| 23 | 163.750 | 0.640 |
| 24 | 191.250 | 0.609 |
| 25 | 99.375 | 0.604 |
| 26 | 80.625 | 0.570 |
| 27 | 100.625 | 0.553 |
| 28 | 0.625 | 0.549 |
| 29 | 245.000 | 0.540 |
| 30 | 0.000 | 0.534 |

Over all 14.236



入力軸(Y)

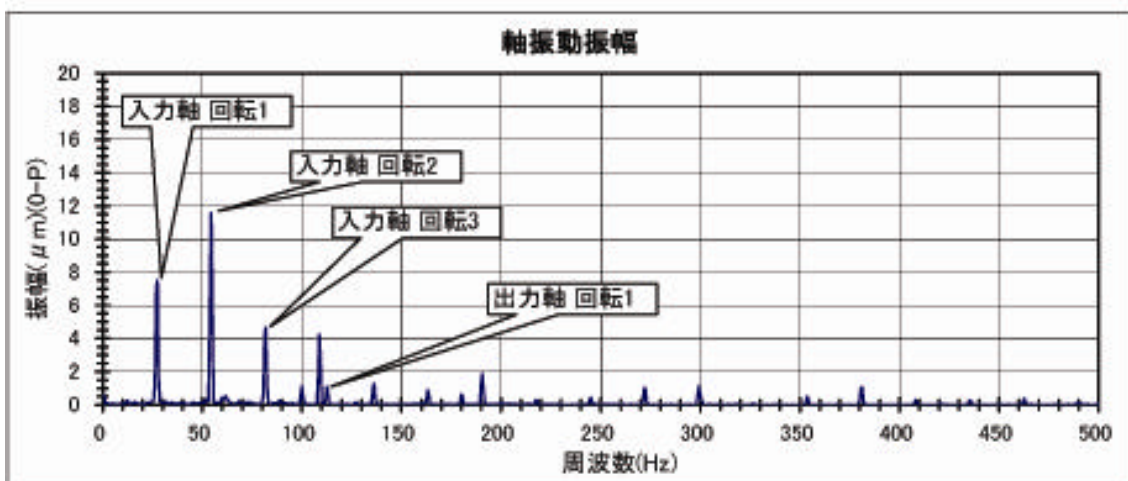
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|--------|
| 1 | 54.375 | 11.566 |
| 2 | 27.500 | 7.501 |
| 3 | 26.875 | 7.150 |
| 4 | 55.000 | 6.473 |
| 5 | 53.750 | 5.184 |
| 6 | 81.875 | 4.657 |
| 7 | 108.750 | 4.248 |
| 8 | 81.250 | 4.034 |
| 9 | 109.375 | 2.608 |
| 10 | 190.625 | 1.868 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 108.125 | 1.705 |
| 12 | 28.125 | 1.623 |
| 13 | 190.000 | 1.320 |
| 14 | 26.250 | 1.296 |
| 15 | 136.250 | 1.277 |
| 16 | 82.500 | 1.187 |
| 17 | 100.000 | 1.134 |
| 18 | 299.375 | 1.125 |
| 19 | 112.500 | 1.088 |
| 20 | 381.250 | 1.083 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 380.625 | 1.054 |
| 22 | 271.875 | 1.033 |
| 23 | 135.625 | 0.999 |
| 24 | 163.125 | 0.873 |
| 25 | 272.500 | 0.864 |
| 26 | 113.125 | 0.706 |
| 27 | 298.750 | 0.651 |
| 28 | 191.250 | 0.625 |
| 29 | 80.625 | 0.620 |
| 30 | 180.000 | 0.619 |

Over all 16.489



出力軸(X)

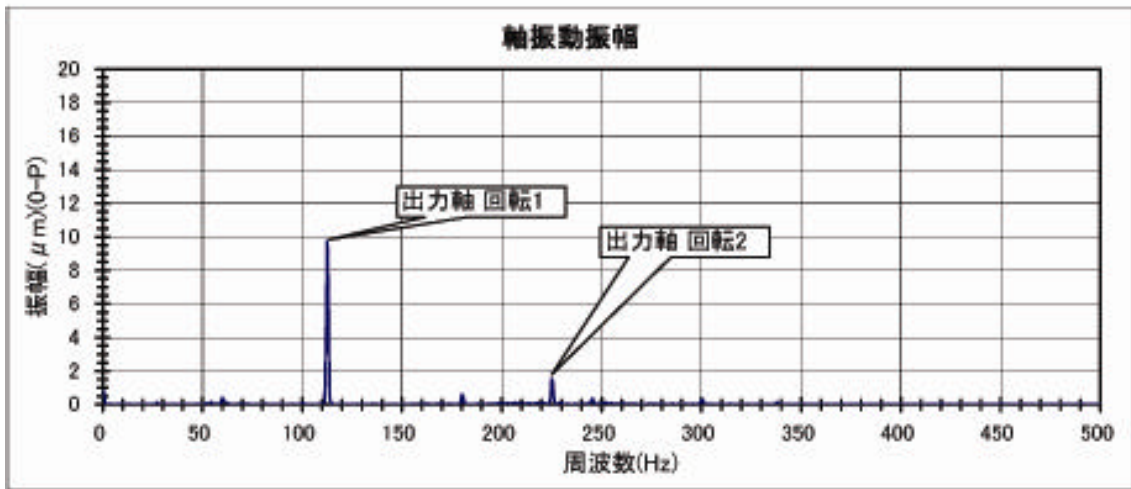
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 112.500 | 9.772 |
| 2 | 113.125 | 6.433 |
| 3 | 111.875 | 3.611 |
| 4 | 225.000 | 1.530 |
| 5 | 225.625 | 1.310 |
| 6 | 0.625 | 0.793 |
| 7 | 0.000 | 0.790 |
| 8 | 180.000 | 0.606 |
| 9 | 180.625 | 0.509 |
| 10 | 113.750 | 0.437 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 60.000 | 0.405 |
| 12 | 224.375 | 0.387 |
| 13 | 245.625 | 0.353 |
| 14 | 300.625 | 0.305 |
| 15 | 245.000 | 0.305 |
| 16 | 300.000 | 0.259 |
| 17 | 60.625 | 0.230 |
| 18 | 111.250 | 0.214 |
| 19 | 59.375 | 0.197 |
| 20 | 226.250 | 0.192 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 179.375 | 0.185 |
| 22 | 54.375 | 0.155 |
| 23 | 338.125 | 0.150 |
| 24 | 61.875 | 0.148 |
| 25 | 61.250 | 0.139 |
| 26 | 337.500 | 0.139 |
| 27 | 251.875 | 0.125 |
| 28 | 27.500 | 0.116 |
| 29 | 26.875 | 0.111 |
| 30 | 246.250 | 0.110 |

Over all 10.275



出力軸(Y)

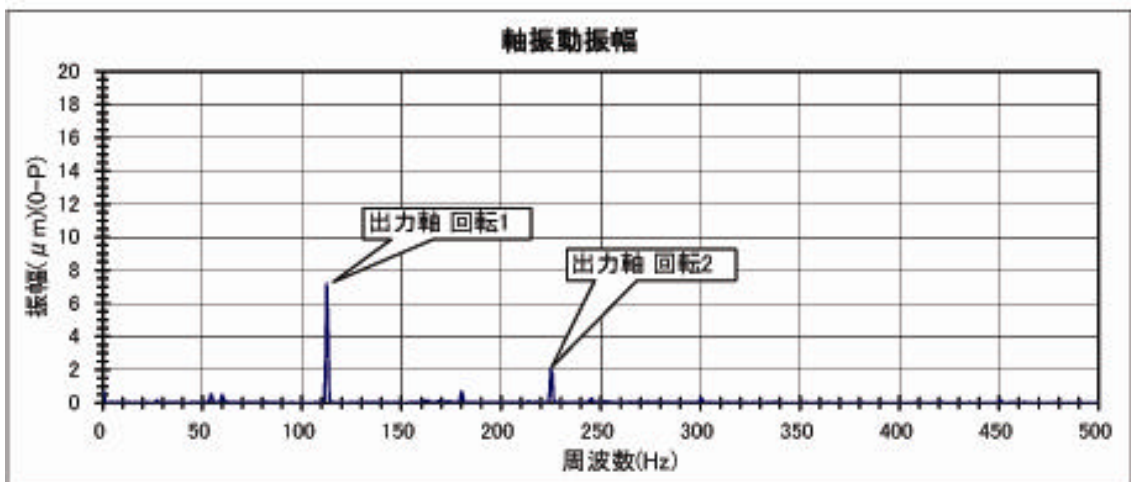
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 112.500 | 7.180 |
| 2 | 113.125 | 4.726 |
| 3 | 111.875 | 2.652 |
| 4 | 225.000 | 2.076 |
| 5 | 225.625 | 1.766 |
| 6 | 180.000 | 0.673 |
| 7 | 0.000 | 0.658 |
| 8 | 0.625 | 0.656 |
| 9 | 180.625 | 0.568 |
| 10 | 224.375 | 0.538 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 54.375 | 0.523 |
| 12 | 60.000 | 0.478 |
| 13 | 113.750 | 0.321 |
| 14 | 55.000 | 0.299 |
| 15 | 60.625 | 0.293 |
| 16 | 300.625 | 0.289 |
| 17 | 245.625 | 0.274 |
| 18 | 226.250 | 0.254 |
| 19 | 300.000 | 0.249 |
| 20 | 53.750 | 0.240 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 450.625 | 0.200 |
| 22 | 59.375 | 0.199 |
| 23 | 245.000 | 0.190 |
| 24 | 179.375 | 0.181 |
| 25 | 163.125 | 0.160 |
| 26 | 111.250 | 0.159 |
| 27 | 27.500 | 0.141 |
| 28 | 450.000 | 0.141 |
| 29 | 26.875 | 0.134 |
| 30 | 244.375 | 0.120 |

Over all 7.860



入力軸回転速度 1620 min⁻¹

側面(入力軸側)1m

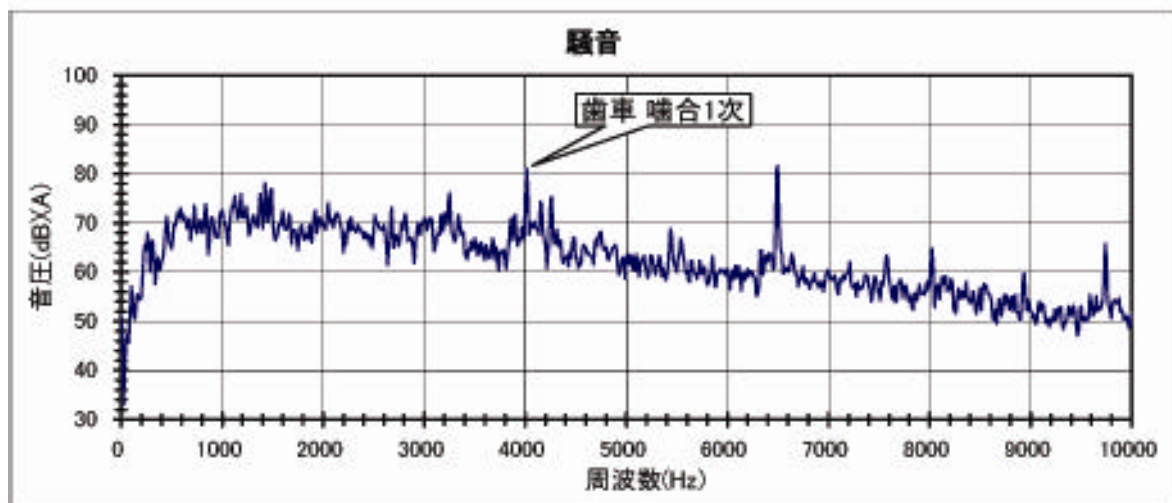
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 1 | 6500.000 | 81.607 |
| 2 | 4012.500 | 81.133 |
| 3 | 6487.500 | 81.072 |
| 4 | 1425.000 | 78.091 |
| 5 | 4025.000 | 77.009 |
| 6 | 1487.500 | 76.914 |
| 7 | 1475.000 | 76.171 |
| 8 | 3250.000 | 76.089 |
| 9 | 4000.000 | 75.972 |
| 10 | 1375.000 | 75.887 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 11 | 1187.500 | 75.871 |
| 12 | 1125.000 | 75.441 |
| 13 | 1437.500 | 75.427 |
| 14 | 4262.500 | 75.239 |
| 15 | 4250.000 | 74.896 |
| 16 | 3237.500 | 74.512 |
| 17 | 4150.000 | 74.332 |
| 18 | 2050.000 | 73.990 |
| 19 | 1387.500 | 73.960 |
| 20 | 837.500 | 73.785 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 21 | 4162.500 | 73.781 |
| 22 | 1100.000 | 73.539 |
| 23 | 725.000 | 73.487 |
| 24 | 1137.500 | 73.435 |
| 25 | 1237.500 | 73.391 |
| 26 | 1112.500 | 73.211 |
| 27 | 2675.000 | 73.067 |
| 28 | 587.500 | 72.970 |
| 29 | 1175.000 | 72.809 |
| 30 | 1000.000 | 72.520 |

Over all 94.154



入力軸(X)

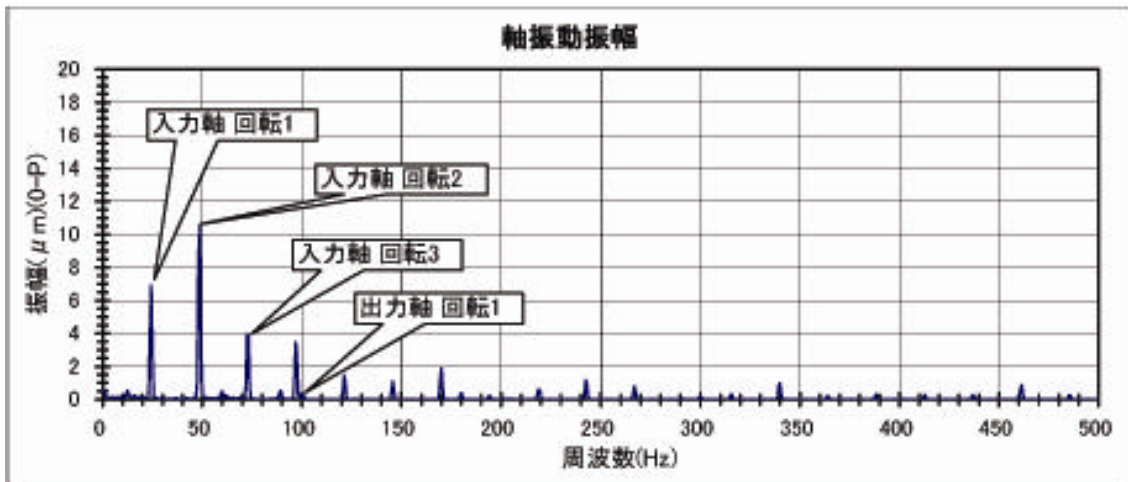
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|--------|--------|
| 1 | 48.750 | 10.552 |
| 2 | 48.125 | 8.477 |
| 3 | 24.375 | 6.883 |
| 4 | 23.750 | 4.441 |
| 5 | 72.500 | 3.931 |
| 6 | 73.125 | 3.918 |
| 7 | 96.875 | 3.465 |
| 8 | 49.375 | 2.984 |
| 9 | 97.500 | 2.758 |
| 10 | 25.000 | 2.613 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 170.000 | 1.858 |
| 12 | 121.250 | 1.455 |
| 13 | 169.375 | 1.181 |
| 14 | 242.500 | 1.162 |
| 15 | 145.625 | 1.099 |
| 16 | 47.500 | 1.072 |
| 17 | 96.250 | 1.001 |
| 18 | 340.000 | 0.967 |
| 19 | 243.125 | 0.921 |
| 20 | 121.875 | 0.917 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 461.250 | 0.854 |
| 22 | 71.875 | 0.813 |
| 23 | 266.875 | 0.790 |
| 24 | 73.750 | 0.788 |
| 25 | 339.375 | 0.784 |
| 26 | 170.625 | 0.731 |
| 27 | 0.625 | 0.606 |
| 28 | 218.750 | 0.586 |
| 29 | 219.375 | 0.575 |
| 30 | 120.625 | 0.563 |

Over all 15.105



入力軸(Y)

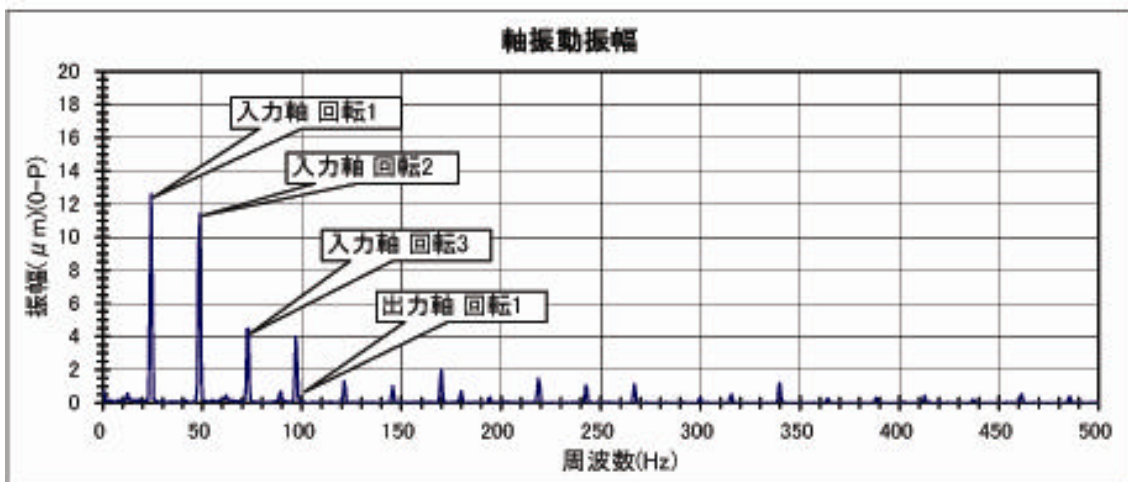
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|--------|--------|
| 1 | 24.375 | 12.583 |
| 2 | 48.750 | 11.387 |
| 3 | 48.125 | 9.081 |
| 4 | 23.750 | 8.022 |
| 5 | 25.000 | 4.847 |
| 6 | 73.125 | 4.464 |
| 7 | 72.500 | 4.457 |
| 8 | 96.875 | 3.989 |
| 9 | 49.375 | 3.259 |
| 10 | 97.500 | 3.166 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 170.000 | 2.004 |
| 12 | 218.750 | 1.459 |
| 13 | 121.250 | 1.309 |
| 14 | 169.375 | 1.285 |
| 15 | 340.000 | 1.174 |
| 16 | 96.250 | 1.152 |
| 17 | 47.500 | 1.114 |
| 18 | 266.875 | 1.114 |
| 19 | 219.375 | 1.069 |
| 20 | 242.500 | 1.058 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 145.625 | 0.993 |
| 22 | 339.375 | 0.952 |
| 23 | 71.875 | 0.878 |
| 24 | 73.750 | 0.874 |
| 25 | 243.125 | 0.845 |
| 26 | 121.875 | 0.825 |
| 27 | 170.625 | 0.796 |
| 28 | 0.625 | 0.708 |
| 29 | 0.000 | 0.704 |
| 30 | 180.000 | 0.704 |

Over all 19.447



出力軸(X)

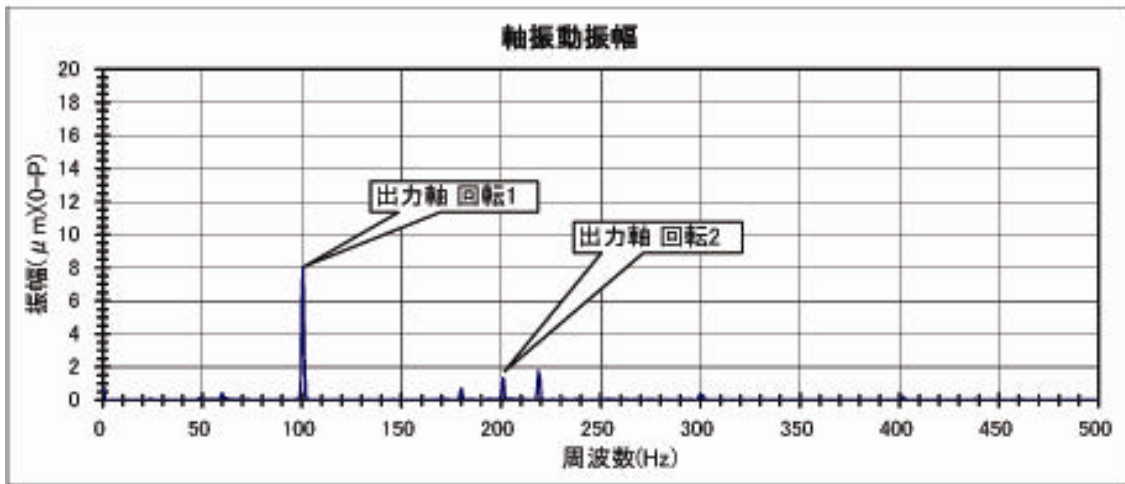
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 100.625 | 8.045 |
| 2 | 100.000 | 5.959 |
| 3 | 101.250 | 2.553 |
| 4 | 218.750 | 1.737 |
| 5 | 219.375 | 1.385 |
| 6 | 200.625 | 1.320 |
| 7 | 201.250 | 1.243 |
| 8 | 0.000 | 0.788 |
| 9 | 0.625 | 0.785 |
| 10 | 180.000 | 0.700 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 99.375 | 0.609 |
| 12 | 218.125 | 0.481 |
| 13 | 60.000 | 0.412 |
| 14 | 179.375 | 0.385 |
| 15 | 300.000 | 0.357 |
| 16 | 180.625 | 0.318 |
| 17 | 200.000 | 0.293 |
| 18 | 301.250 | 0.274 |
| 19 | 59.375 | 0.228 |
| 20 | 201.875 | 0.227 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 401.875 | 0.222 |
| 22 | 101.875 | 0.221 |
| 23 | 299.375 | 0.220 |
| 24 | 300.625 | 0.196 |
| 25 | 60.625 | 0.187 |
| 26 | 301.875 | 0.171 |
| 27 | 220.000 | 0.161 |
| 28 | 61.875 | 0.146 |
| 29 | 401.250 | 0.129 |
| 30 | 98.750 | 0.115 |

Over all 8.924



出力軸(Y)

上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 100.625 | 5.824 |
| 2 | 100.000 | 4.312 |
| 3 | 101.250 | 1.850 |
| 4 | 218.750 | 1.846 |
| 5 | 200.625 | 1.559 |
| 6 | 201.250 | 1.454 |
| 7 | 219.375 | 1.391 |
| 8 | 180.000 | 0.744 |
| 9 | 218.125 | 0.615 |
| 10 | 0.000 | 0.586 |

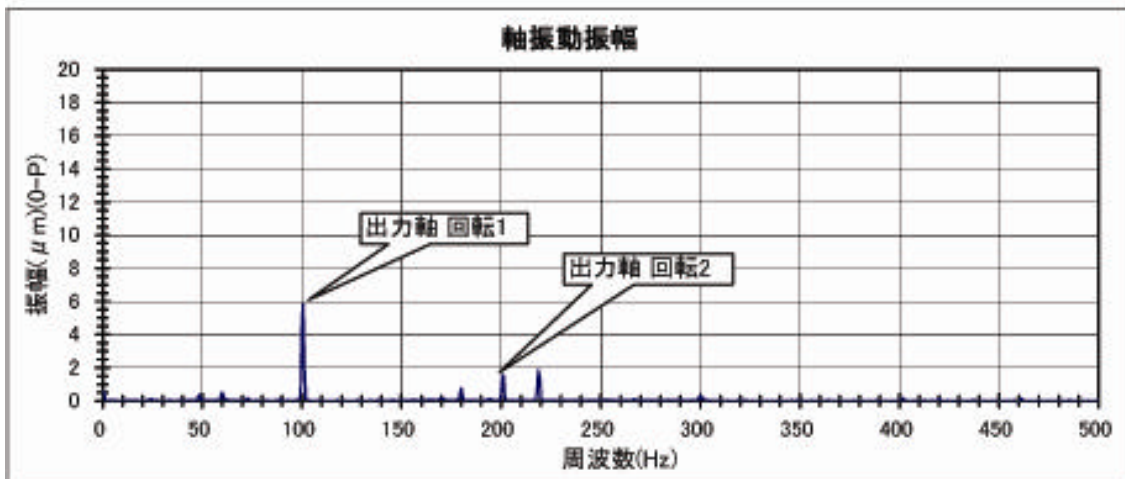
| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 0.625 | 0.565 |
| 12 | 60.000 | 0.503 |
| 13 | 99.375 | 0.441 |
| 14 | 179.375 | 0.409 |
| 15 | 48.750 | 0.355 |
| 16 | 200.000 | 0.353 |
| 17 | 180.625 | 0.338 |
| 18 | 300.000 | 0.329 |
| 19 | 48.125 | 0.273 |
| 20 | 59.375 | 0.262 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 201.875 | 0.254 |
| 22 | 60.625 | 0.248 |
| 23 | 170.000 | 0.188 |
| 24 | 299.375 | 0.186 |
| 25 | 301.250 | 0.170 |
| 26 | 300.625 | 0.162 |
| 27 | 101.875 | 0.159 |
| 28 | 220.000 | 0.157 |
| 29 | 401.875 | 0.154 |
| 30 | 169.375 | 0.142 |

Over all 6.824

入力軸 実回転 1455

実回転率 0.813758389



入力軸回転速度 1455 min⁻¹

側面(入力軸側)1m

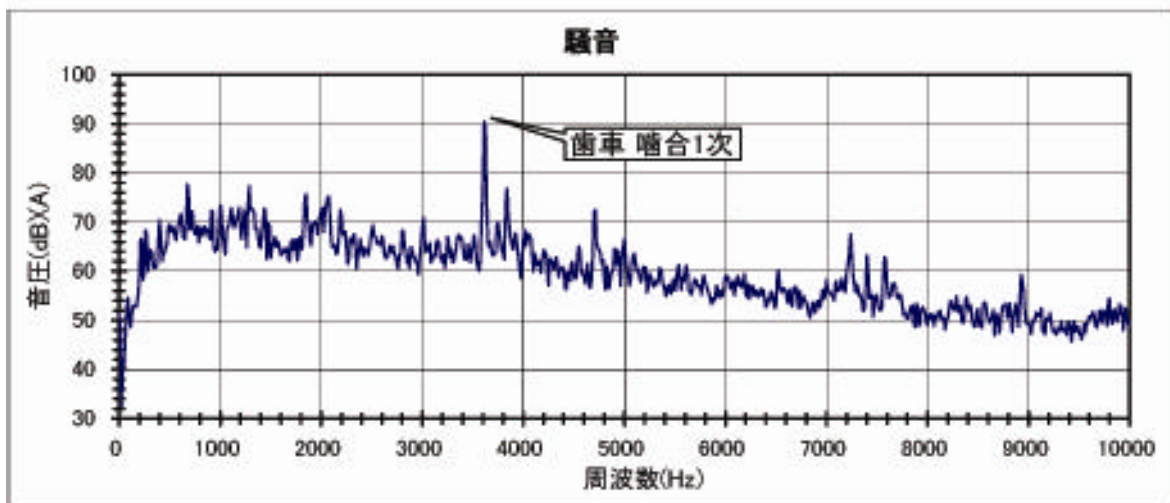
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 1 | 3612.500 | 90.422 |
| 2 | 3625.000 | 89.000 |
| 3 | 3600.000 | 78.243 |
| 4 | 675.000 | 77.640 |
| 5 | 1287.500 | 77.258 |
| 6 | 3837.500 | 76.782 |
| 7 | 687.500 | 75.828 |
| 8 | 1850.000 | 75.602 |
| 9 | 2075.000 | 75.170 |
| 10 | 2062.500 | 74.854 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 11 | 1837.500 | 74.826 |
| 12 | 3825.000 | 73.826 |
| 13 | 2050.000 | 73.610 |
| 14 | 3637.500 | 73.589 |
| 15 | 1000.000 | 73.369 |
| 16 | 1275.000 | 73.255 |
| 17 | 1187.500 | 72.948 |
| 18 | 1112.500 | 72.858 |
| 19 | 2012.500 | 72.834 |
| 20 | 1312.500 | 72.828 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 21 | 1437.500 | 72.731 |
| 22 | 1300.000 | 72.576 |
| 23 | 2000.000 | 72.551 |
| 24 | 2187.500 | 72.450 |
| 25 | 1237.500 | 72.448 |
| 26 | 4712.500 | 72.407 |
| 27 | 912.500 | 72.328 |
| 28 | 1325.000 | 72.211 |
| 29 | 725.000 | 72.193 |
| 30 | 4700.000 | 72.053 |

Over all 94.494



入力軸(X)

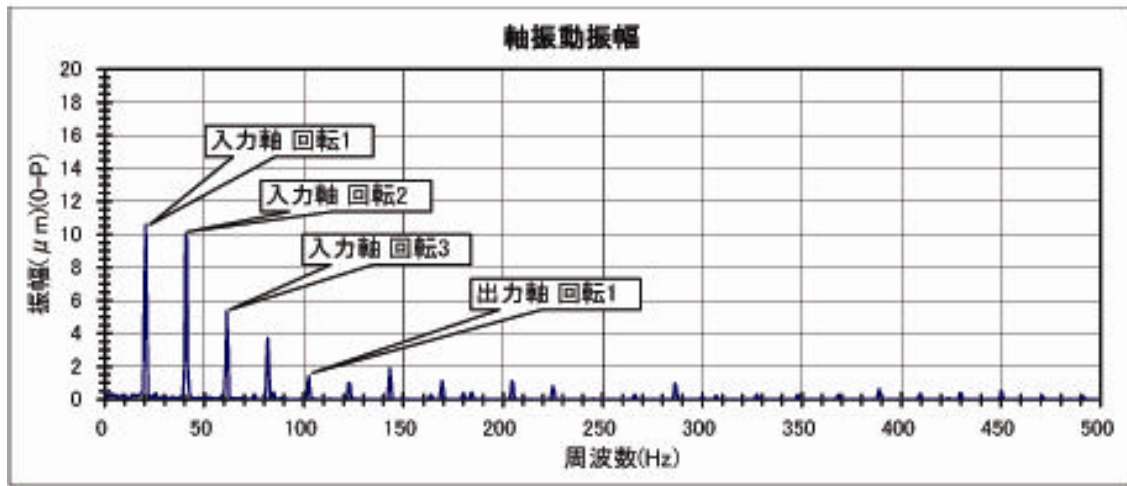
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|--------|--------|
| 1 | 20.625 | 10.591 |
| 2 | 40.625 | 10.007 |
| 3 | 41.250 | 9.682 |
| 4 | 20.000 | 7.236 |
| 5 | 61.250 | 5.372 |
| 6 | 21.250 | 3.776 |
| 7 | 81.875 | 3.690 |
| 8 | 61.875 | 3.662 |
| 9 | 40.000 | 2.117 |
| 10 | 81.250 | 1.967 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 60.625 | 1.933 |
| 12 | 143.125 | 1.885 |
| 13 | 41.875 | 1.811 |
| 14 | 82.500 | 1.732 |
| 15 | 102.500 | 1.410 |
| 16 | 143.750 | 1.217 |
| 17 | 169.375 | 1.133 |
| 18 | 204.375 | 1.109 |
| 19 | 101.875 | 1.090 |
| 20 | 122.500 | 0.997 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 286.250 | 0.968 |
| 22 | 205.000 | 0.961 |
| 23 | 123.125 | 0.914 |
| 24 | 225.000 | 0.812 |
| 25 | 286.875 | 0.794 |
| 26 | 142.500 | 0.714 |
| 27 | 19.375 | 0.639 |
| 28 | 388.750 | 0.637 |
| 29 | 170.000 | 0.572 |
| 30 | 168.750 | 0.557 |

Over all 17.748



入力軸(Y)

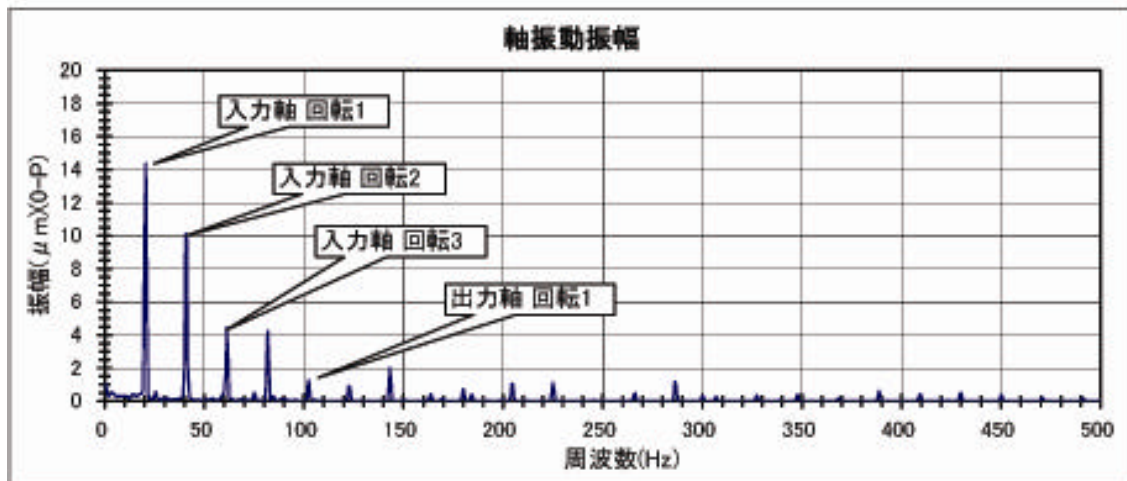
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|--------|--------|
| 1 | 20.625 | 14.356 |
| 2 | 40.625 | 10.116 |
| 3 | 20.000 | 9.931 |
| 4 | 41.250 | 9.823 |
| 5 | 21.250 | 5.014 |
| 6 | 61.250 | 4.458 |
| 7 | 81.875 | 4.246 |
| 8 | 61.875 | 3.007 |
| 9 | 81.250 | 2.261 |
| 10 | 40.000 | 2.174 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 143.125 | 2.001 |
| 12 | 82.500 | 1.984 |
| 13 | 41.875 | 1.893 |
| 14 | 60.625 | 1.556 |
| 15 | 143.750 | 1.294 |
| 16 | 102.500 | 1.248 |
| 17 | 286.250 | 1.184 |
| 18 | 225.000 | 1.106 |
| 19 | 204.375 | 1.065 |
| 20 | 0.625 | 1.038 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 286.875 | 0.973 |
| 22 | 101.875 | 0.951 |
| 23 | 205.000 | 0.929 |
| 24 | 122.500 | 0.920 |
| 25 | 19.375 | 0.875 |
| 26 | 123.125 | 0.847 |
| 27 | 0.000 | 0.826 |
| 28 | 142.500 | 0.755 |
| 29 | 180.000 | 0.731 |
| 30 | 225.625 | 0.668 |

Over all 20.439



出力軸(X)

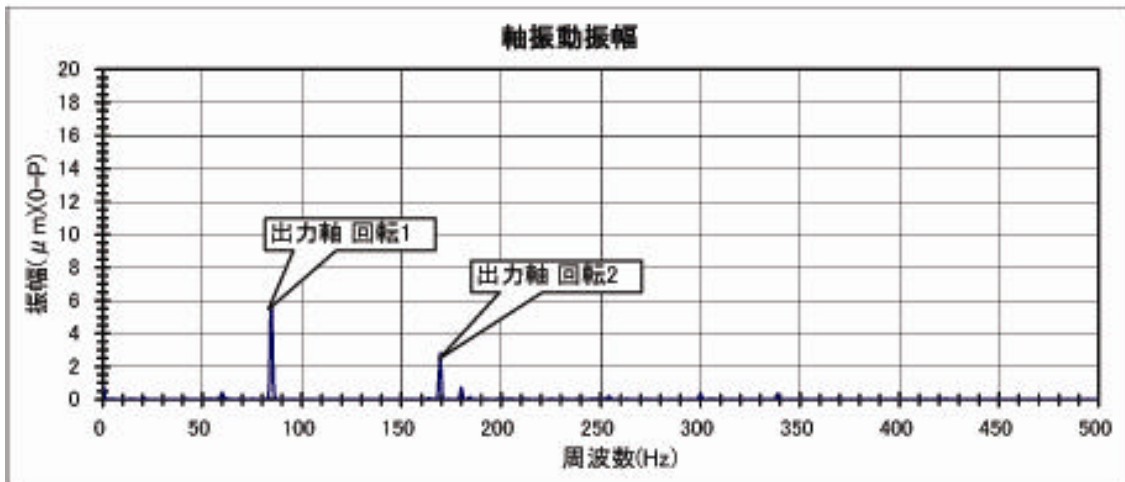
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 85.000 | 5.773 |
| 2 | 84.375 | 5.732 |
| 3 | 169.375 | 2.809 |
| 4 | 170.000 | 1.425 |
| 5 | 168.750 | 1.378 |
| 6 | 85.625 | 1.166 |
| 7 | 83.750 | 1.134 |
| 8 | 0.000 | 0.753 |
| 9 | 0.625 | 0.736 |
| 10 | 180.000 | 0.715 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 60.000 | 0.432 |
| 12 | 180.625 | 0.407 |
| 13 | 338.750 | 0.361 |
| 14 | 300.000 | 0.339 |
| 15 | 179.375 | 0.315 |
| 16 | 59.375 | 0.259 |
| 17 | 300.625 | 0.206 |
| 18 | 60.625 | 0.189 |
| 19 | 339.375 | 0.185 |
| 20 | 253.750 | 0.183 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 338.125 | 0.177 |
| 22 | 254.375 | 0.171 |
| 23 | 86.250 | 0.169 |
| 24 | 83.125 | 0.161 |
| 25 | 184.375 | 0.139 |
| 26 | 299.375 | 0.136 |
| 27 | 20.625 | 0.106 |
| 28 | 183.750 | 0.102 |
| 29 | 58.750 | 0.090 |
| 30 | 163.750 | 0.086 |

Over all 7.493



出力軸(Y)

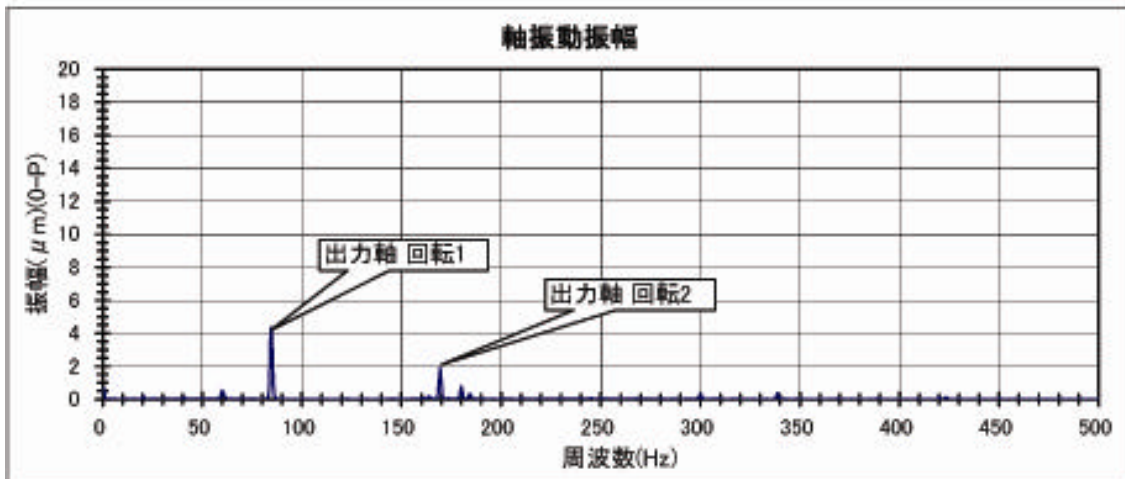
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 1 | 85.000 | 4.347 |
| 2 | 84.375 | 4.318 |
| 3 | 169.375 | 1.923 |
| 4 | 170.000 | 0.966 |
| 5 | 168.750 | 0.947 |
| 6 | 85.625 | 0.877 |
| 7 | 83.750 | 0.853 |
| 8 | 180.000 | 0.770 |
| 9 | 0.625 | 0.668 |
| 10 | 0.000 | 0.662 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 11 | 60.000 | 0.531 |
| 12 | 180.625 | 0.439 |
| 13 | 338.750 | 0.373 |
| 14 | 179.375 | 0.344 |
| 15 | 184.375 | 0.319 |
| 16 | 300.000 | 0.315 |
| 17 | 60.625 | 0.296 |
| 18 | 59.375 | 0.255 |
| 19 | 339.375 | 0.193 |
| 20 | 300.625 | 0.192 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|---------|-------|
| 21 | 183.750 | 0.191 |
| 22 | 163.750 | 0.184 |
| 23 | 338.125 | 0.178 |
| 24 | 185.000 | 0.164 |
| 25 | 61.250 | 0.162 |
| 26 | 20.625 | 0.161 |
| 27 | 86.250 | 0.127 |
| 28 | 299.375 | 0.124 |
| 29 | 83.125 | 0.123 |
| 30 | 20.000 | 0.120 |

Over all 5.669



入力軸回転速度 1227 min⁻¹

側面(入力軸側)1m

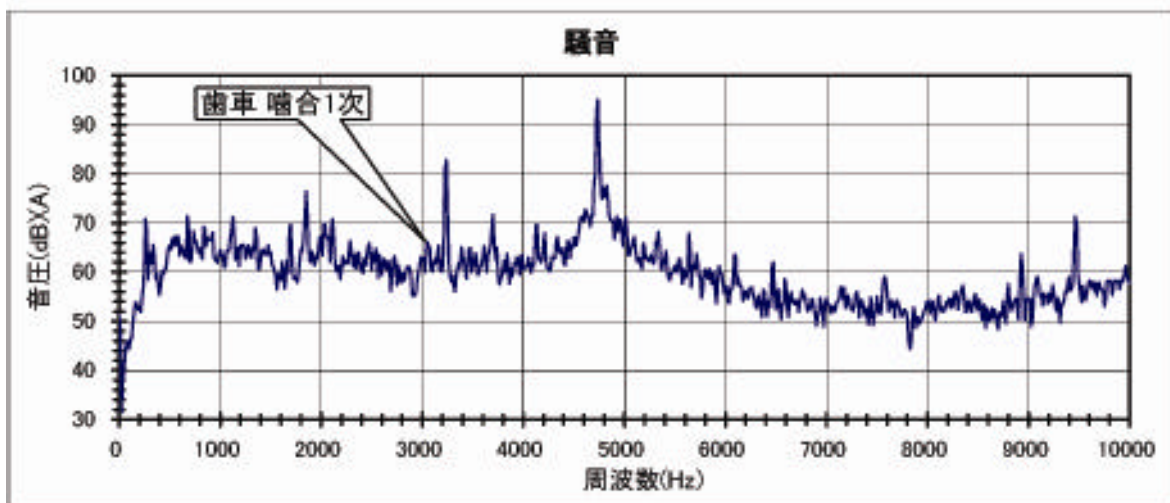
上位30データ

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 1 | 4737.500 | 95.051 |
| 2 | 4725.000 | 92.667 |
| 3 | 4750.000 | 86.967 |
| 4 | 3237.500 | 82.820 |
| 5 | 3225.000 | 80.718 |
| 6 | 4762.500 | 80.049 |
| 7 | 4712.500 | 79.841 |
| 8 | 4700.000 | 78.217 |
| 9 | 4825.000 | 77.578 |
| 10 | 4787.500 | 77.107 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 11 | 1850.000 | 76.465 |
| 12 | 4812.500 | 76.283 |
| 13 | 4800.000 | 75.262 |
| 14 | 4837.500 | 74.892 |
| 15 | 4775.000 | 74.868 |
| 16 | 4612.500 | 72.699 |
| 17 | 4625.000 | 72.359 |
| 18 | 3250.000 | 72.335 |
| 19 | 1862.500 | 71.915 |
| 20 | 3700.000 | 71.886 |

| No. | 周波数 | 値 |
|-----|----------|--------|
| 21 | 4850.000 | 71.651 |
| 22 | 4675.000 | 71.593 |
| 23 | 4687.500 | 71.513 |
| 24 | 675.000 | 71.390 |
| 25 | 4925.000 | 71.362 |
| 26 | 4637.500 | 71.350 |
| 27 | 9462.500 | 71.325 |
| 28 | 4575.000 | 71.323 |
| 29 | 1837.500 | 71.224 |
| 30 | 1125.000 | 71.162 |

Over all 97.194





「この報告書は競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

社団法人 日本船用工業会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-15-16 海洋船舶ビル
電話 03-3502-2041
FAX 03-3591-2206
<http://www.jsmea.or.jp>