



平成28年度

複合材料製ポンプ(インペラ及びケーシング)についての技術開発
成果報告書

平成29年3月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 27 年度、28 年度の 2 年計画で、一般社団法人日本船用工業会が株式会社浪速ポンプ製作所に委託して実施した「複合材料製ポンプ(インペラー及びケーシング)の技術開発」の成果をとりまとめたものである。

船用ポンプのインペラーやケーシングの材料は、一般的に青銅鋳物製であるが、ポンプ効率の向上及び軽量化を図るため複合材料(FRP)製ポンプの開発を行った。このため、平成 26 年度 F S 事業で調査した結果、渦巻きポンプ材料に求められる最適な繊維と樹脂の組合せや成形方法等で複合材料(FRP)製ポンプの開発が実現可能であることが分かった。そこで、口径 40 の横型渦巻きポンプと口径 200 の立型渦巻きポンプの試作機を製作し、青銅鋳物製のポンプと比較してポンプ効率を 2%以上向上させつつ、ポンプ重量を 40%以上軽減でき、メンテナンスも容易な複合材料(FRP)製ポンプ(インペラー及びケーシング)の開発を行った。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成 29 年 3 月
(一社)日本船用工業会

目 次

第 I 部 平成 27 年度	1
1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	1
2.1 本事業の最終目標	1
2.2 事業の計画	2
2.3 平成 27 年度の目標	2
3. 平成 27 年度の実施内容	3
3.1 開発フローと実施手順概要	3
3.2 ポンプ形状（インペラとケーシング）に適した繊維の編み方等の検討と検証	5
3.2.1 繊維および編み方の調査検討および選定	5
3.2.2 樹脂の調査検討および選定	7
3.2.3 成形方法の調査および選定	9
3.2.4 機械的性質の調査・予備試験	10
3.2.5 まとめ	13
3.3 横型渦巻ポンプケーシングの製造法の検討	15
3.4 インペラの製造法の検討（横型及び立型）	16
3.5 立型渦巻ポンプケーシングの製造法の検討	18
3.6 横型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証	19
3.6.1 横型渦巻ポンプケーシング的设计	19
3.6.2 横型渦巻ポンプインペラ的设计	21
3.6.3 横型渦巻ポンプケーシングの試作	27
3.6.4 横型渦巻ポンプインペラの試作	31
3.6.5 横型渦巻ポンプのモデル機の検証（1）	32

第Ⅱ部 平成28年度	33
4. 平成28年度の実施内容	33
4.1 開発フローと実施手順概要	33
4.2 横型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証（続き）	35
4.2.1 横型渦巻ポンプの初期モデル機の検証（2）	37
4.2.2 横型渦巻ポンプの改良モデル機的设计	47
4.2.3 横型渦巻ポンプの改良モデル機の試作	51
4.2.4 横型渦巻ポンプの改良モデル機の検証	54
4.3 立型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証	61
4.3.1 立型渦巻ポンプインペラの设计	61
4.3.2 立型渦巻ポンプケーシング的设计	62
4.3.3 立型渦巻ポンプインペラの試作	66
4.3.4 立型渦巻ポンプケーシングの試作	68
4.3.5 立型渦巻ポンプのモデル機の検証	71
4.4 性能試験	80
4.4.1 横型渦巻ポンプのモデル機の性能試験	80
4.4.2 立型渦巻ポンプのモデル機の性能試験	83
4.4.3 横型渦巻ポンプのモデル機の耐久試験	86
4.4.4 立型渦巻ポンプのモデル機の耐久試験	92
4.4.5 横型渦巻ポンプのモデル機のケーシングの振動試験	98
4.4.6 横型渦巻ポンプのモデル機の耐火試験	109
5. 評価まとめ	120
参考文献	122

第 I 部 平成 27 年度

1. 事業の目的

昨今の燃料費高騰や環境対策のためバラスト水処理装置及び排ガス処理装置等の追加搭載が必要となる状況下において、ポンプの動力エネルギーを低減し、発電機の燃料消費量を抑える事や、船舶に搭載する機器を軽量化する事は重要である。

一方、ポンプケーシングやインペラ材料に使用される青銅鋳物の主成分である銅資源は、可採年数約 40 年の枯渇性鉱物とされている。

そこで、本開発では近年発展著しい繊維強化プラスチック（FRP）を青銅鋳物の代替材料として利用することで、船用の渦巻ポンプの高効率化および、軽量化を図ることを目的とする。

高効率化については、表面が滑らかな FRP に置き換えることで摩擦損失が低減され、性能の向上や動力の低減が期待できるため、ランニングコストの軽減が期待できる。

軽量化については、一般商船搭載品の軽量化に有効であり、将来的には高速艇への搭載が期待できる。

平成 26 年度 FS 事業において調査を進めた結果、FRP は優れている面が多い。一方、インペラやケーシングの様な複雑形状の物については、製造技術やコストに解決すべき課題があるが、製造することが可能であると確証を得たため、商品化を目指すこととした。

船用ポンプは多品種小ロット製品という特長があり、主要構成部品のインペラ及びケーシングは鋳物成形で固化後に鋳型（砂型）を毎回壊して成形品を取り出す。一方、FRP の場合は、主に金型で成形するため、成型品を取り出せる形状にする必要がある。特にインペラはクローズドインペラが主流で、5～7 枚の 2 次元または 3 次元形状の羽根が主板と側板で挟まれており、生産性に優れた製造方法の確立が必要である。

本技術開発では、生産性に優れた製造方法を確立し、モデル機を製作し高効率化と軽量化を実現する。なお、その後は実船試験を実施して一般商船に FRP 製渦巻ポンプの搭載を目指す。

2. 事業の目標

2.1 本事業の最終目標

1) 高効率化

青銅鋳物製のポンプと比較して、ポンプ効率を 2%以上向上させる。

2) 軽量化

青銅鋳物製のポンプと比較して、ポンプの重量を 40%以上軽減する。

2.2 事業の計画

表 2.2.1 事業計画表

実施項目	平成 27 年度				平成 28 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
ポンプ形状（インペラとケーシング）に適した繊維の編み方等の検討と検証		←→						
横型渦巻ポンプケーシングの製造法の検討		←→						
インペラの製造法の検討（横型及び立型）		←→						
横型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証			←→			→		
立型渦巻ポンプケーシングの製造法の検討		←→						
立型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証				←→			→	
性能試験						←→		
成果報告書作成				↔				↔

2.3 平成 27 年度の目標

- 1) ポンプ形状（インペラとケーシング）に適した繊維の編み方等を確立する。
- 2) 横型渦巻ポンプケーシングの製造法を確立する。
- 3) インペラの製造法を確立する。
- 4) 横型渦巻ポンプのモデル機を設計し金型を製作する。
- 5) 立型渦巻ポンプケーシングの製造法を確立する。
- 6) 立型渦巻ポンプのモデル機の概念設計図を作成する。

3. 平成27年度の実施内容

3.1 開発フローと実施手順概要

平成27年度は、ポンプ主要機器のFRP試作開発に向けて、以下に示す開発フローにより製造法の検討および試作を実施した。

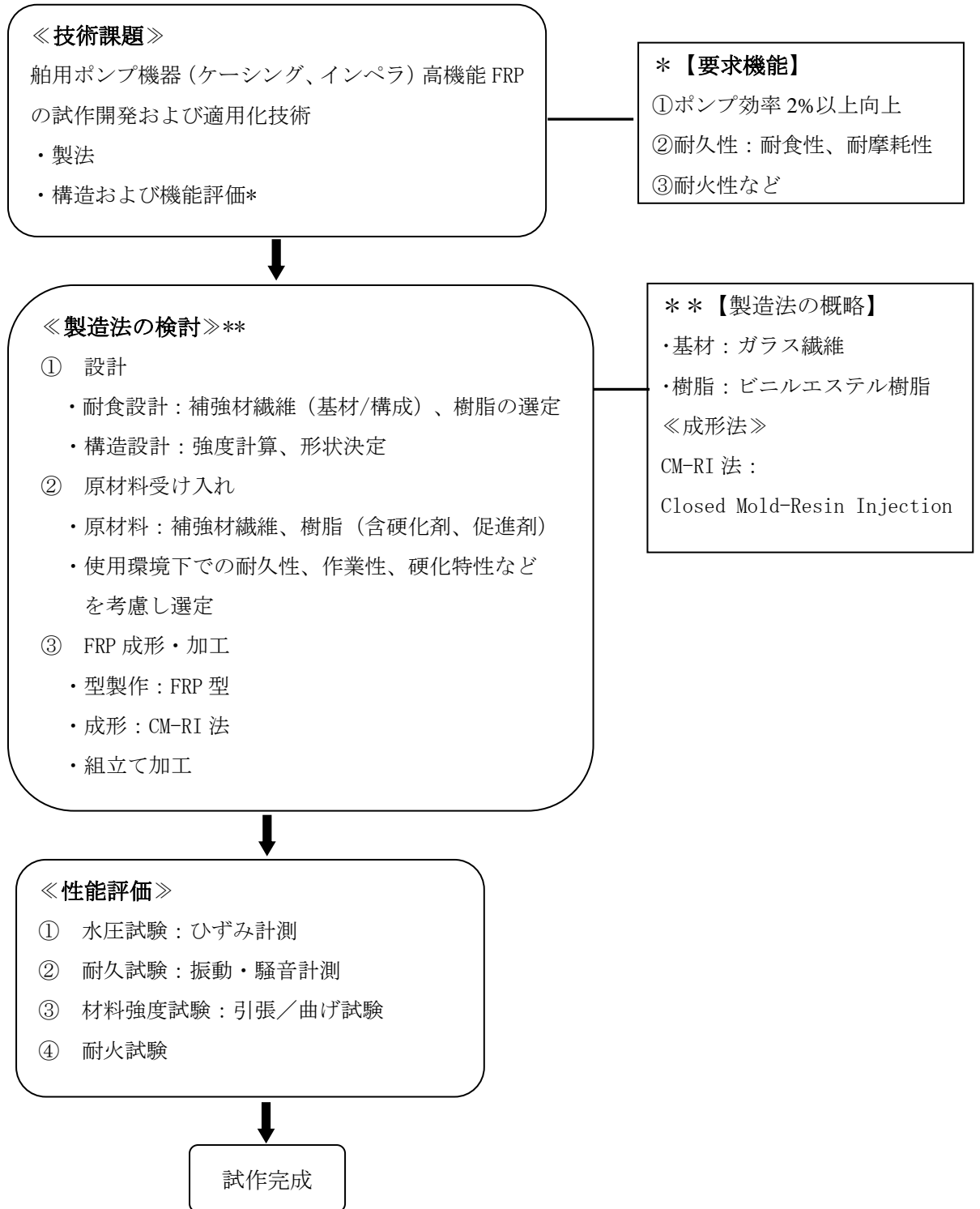


図3.1.1 試作開発のフローシート

これらの図3.1.1の開発フローにもとづき具体的な実施概要を図3.1.2に示す。

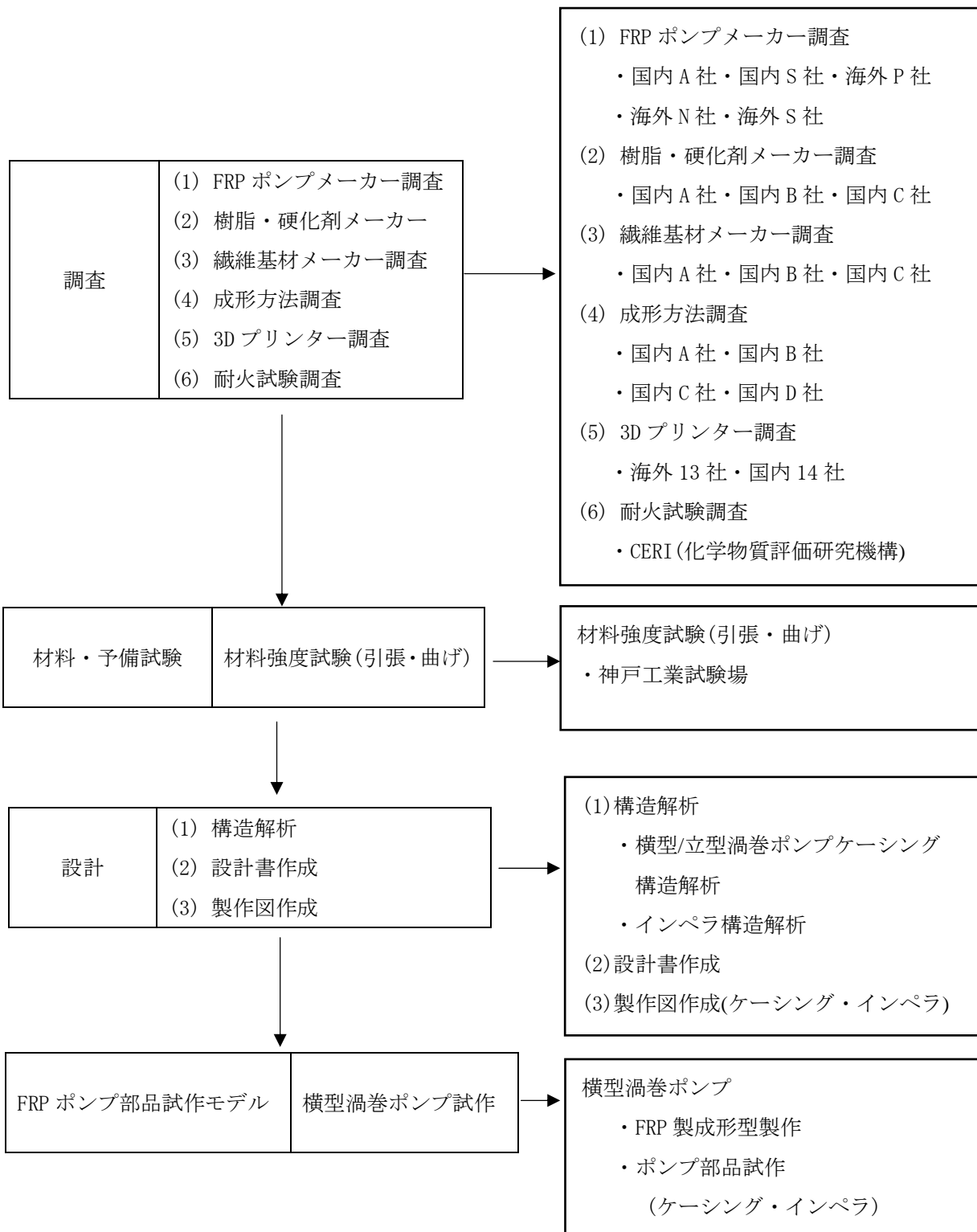


図 3.1.2 開発手順概要

得られた実施内容の詳細については次章に記述する。

3.2 ポンプ形状（インペラとケーシング）に適した繊維の編み方等の検討と検証

3.2.1 繊維および編み方の調査検討および選定

1) 繊維の調査検討および選定

機関室の海水、清水ポンプの接液部材料に求められる要件として、ケーシングは、高強度（耐圧）であるとともに優れた耐久性（耐食性・耐摩耗性）および耐火性などが挙げられる。また、インペラには、特に高強度、耐久性などが挙げられる。船用ポンプの強化繊維として、炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維が挙げられる。これら各種高機能繊維の物性比較を表3.2.1.1に示す。

表3.2.1.1はガラス繊維、炭素繊維などで代表される無機繊維とアラミド繊維を加えた強化繊維とポンプに使用される金属材料（ステンレス鋼、銅合金）の物性を比較したものである。ここで、強度とは「壊れ難さ」であり、弾性率は「変形し難さ」である。この種FRP用強化繊維は、代表的な金属材料（ステンレス鋼、銅合金など）と比べ、いずれも引張強度、すなわち繊維方向に優れることが判る。

また、繊維は密度がいずれも金属に比べて小さいため、比強度や比弾性率において優位が目立つ。即ち、「軽くて強い」「変形し難い」高機能な複合材料といえる。なお、複合材料に使用される繊維の量・価格（表3.2.1.2 繊維材料の価格比較参照）とともに、ガラス繊維が80%以上の圧倒的なシェアを占めている。

これらのことより、高強度、耐食性に優れ、低コストなどを考慮しガラス繊維を選択する。

表 3.2.1.1 各種高機能繊維の物性比較¹⁾

項目 繊維名	密度 (g/cm ³)	強度 (MPa)	弾性率 (GPa)	比強度 (10 ⁶ cm)	比弾性率 (10 ⁸ cm)	種類
ガラス繊維	2.55	3430	74	13.7	2.9	E ガラス
炭素繊維	1.82	4900	240	27.5	13.5	高強度
アラミド繊維	1.45	3000	112	21.1	7.8	ケブラー49
ステンレス鋼	8.03	520	197	0.7	2.5	SUS304
銅合金	8.7	255	110	0.3	1.3	青銅

表 3.2.1.2 繊維材料の価格比(参考：2015年調査時点)

繊維名	ガラス繊維	炭素繊維	アラミド繊維
価格比	1	8	9

* 補足説明 表中価格比は、ガラス繊維を1とした場合の価格比を示す。

2) 繊維の編み方の調査検討および選定

強化繊維の特徴として異方性が挙げられる。繊維には方向性があり、繊維方向を応力方向に沿わせることにより繊維本来の強度が得られ、逆に方向が異なると強度が下がる。

なお、竹細工のような編み方は賦形時に繊維が損傷する問題がある。

そこで、現在活用されている繊維の編み方について調査を行い、複合材料製ポンプに適した方法を選定する。

① 刺繍技術を応用した強化繊維プリフォーム

チドリ縫いと呼ばれる刺繍の技術を応用した刺繍機を用いたプリフォーム成形技術である。本技術は TFP(Tailored Fiber Placement)と呼ばれるヨーロッパで実用化されているプリフォーム製作技術である。TFP とは、中抜き形状や応力方向に繊維配置を行うことのできる技術である。また、プリフォーム製作時に不要なカット部分が生まれなため、経済的である。

問題点として、刺繍機の賦形スピードが遅く、大型品の成形および大量生産に向いていないことが判明した。

② 複合糸製 3 次元織物の利用

炭素繊維のような剛性の高い基材を使用する場合、複雑な立体構造を賦形すると繊維の損傷が激しくなり繊維本来の機械的強度が得られない。そこで、繊維に熱可塑性樹脂糸をカバリングした複合糸を用いることで繊維への損傷を抑えることができる。

問題点としては、現段階での複合糸の利用は中空のロープ状に織ったものやウェーブワッシャーなどの単純形状のもののみであり、ポンプのインペラやケーシングなどのような複雑形状での利用は困難である。

③ 開織技術を用いた薄層プリプレグシート²⁾

開織技術とは、繊維が束になっている原糸の炭素繊維などの強化繊維束を 1 本 1 本、幅方向に広げ、薄いテープ状にしたものである。

利点として市販の厚さの積層板より引張強度が高く、市販の積層板より比較的安い太繊維度繊維束から製造するため、低コストで作製することができるが複雑形状のポンプ機器製造には向いていない。

④ 3 次元中空織物³⁾

3 次元中空織物とは、内部が中空になっている立体構造で中空部はストレートやトラス構造になっている繊維基材である。構造により重量や樹脂の含浸性などが異なっているが、複雑形状のポンプ機器製造には向いていない。

まとめ

繊維の異方性の面から編み方を検討したところ、応力の作用する方向に合わせ繊維を配置することができる刺繍技術を応用したプリフォームの作製が好ましい。問題として刺繍技術のため、賦形スピードが遅いことが課題として挙げられる。

複合糸製3次元織物については、現状はロープなどの簡素な形状のみに使用可能であり、ポンプなどの複雑形状の賦形には向いていない。

しかし、現状のプリフォーム技術では3次元織物の繊維の連続性を維持した形態で賦形することが難しく、かつ繊維含有率が小さく機械的強度が低くなるためガラスチョップ方式*を選定した。

繊維含有率は、図 3.2.1.1 に示す通り、高いほど機械的強度が増すことから、機械的強度が青銅铸件と同等以上が必要なことから、試作モデルは繊維含有率を 40~50% を目標とした高強度の FRP 製ポンプとする。

*補足説明 ガラスチョップ方式とは数千本の繊維を撚りをかけずに引き揃えた形態のガラス繊維を数十 mm の長さに切断し、マット状に堆積したものをういプリフォームしたもの。

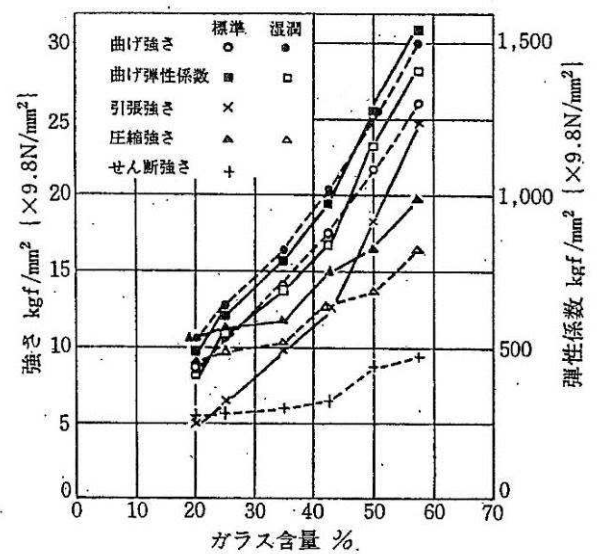


図 3.2.1.1 ガラス含量と強度⁴⁾

3.2.2 樹脂の調査検討および選定

一般に FRP 成形に用いられる各樹脂の耐食性比較および特性を表 3.2.2.1 に示した。

ビニルエステル樹脂は、エポキシ樹脂と同様に機械的強度の良さ、高接着性に加えて、不飽和ポリエステル樹脂と同じ硬化方法が用いられる。但し、不飽和ポリエステル樹脂に比べ、次のような特長がある。

- ① 耐食性、機械的強度に優れ、引張伸び率が大きいので耐クラッキング性が良好である。
- ② 金属、コンクリートなどへの接着性に優れている。
- ③ 耐クリープ性、耐衝撃性に優れている。

また、エポキシ樹脂は硬化時の収縮が少なく、残留応力が小さい特長に加え、接着性、機械的特性と併せ安定した耐食性を有しているが、酸化性物質に対する耐久性に乏しく、ビニルエステル樹脂に比べ、高価格(表 3.2.2.2 参照)となる。

フェノール樹脂は、他の樹脂に比べ、耐熱性、耐火性(燃えにくく燃焼時の煙発生が少ない)に優れているが、硬化温度が高く、硬化に長時間を要し、またガラス繊維との濡れ性が悪いため、樹脂の含浸性に課題が残る。

表 3.2.2.1 各種樹脂の耐食性比較および特徴⁵⁾

薬品名 樹脂名	無機酸	有機酸	酸化性物質	アルカリ	有機溶剤	特徴
イソフタル酸系 不飽和ポリエステル樹脂 (常温硬化)	○	○	○	×～△	△	・易成形性、速硬化、 低温硬化性に優れる ・耐アルカリ性は劣る
ビスフェノール系 不飽和ポリエステル樹脂 (常温硬化)	◎	◎	◎	◎	×	・易成形性、速硬化、 低温硬化性に優れる ・耐有機溶剤性は劣る
ビニルエステル 樹脂 (常温硬化)	◎	◎	◎	◎	◎	・低粘度、ガラス繊維との 馴染、作業性などが良好 ・機械強度、引張伸率、 接着力に優れる
エポキシ樹脂 (常温硬化) (加熱硬化)	○ ◎	○ ◎	× ×	◎ ◎	△ ○	・力学特性、硬化収縮小 ・加熱硬化タイプが機械的 強度に優れる
フェノール樹脂 (加熱硬化)	◎	—	×	×	○	・耐熱性、難燃性に優れる

備考：(表中記号) ◎：優、○：良、△：可、×：不可

表 3.2.2.2 樹脂の価格比較(参考)

原材料	含浸用樹脂			
	ビニルエステル系	不飽和ポリエステル系	エポキシ系	フェノール系
価格比*	1	0.7	3	1

*補足説明 表中価格比は、ビニルエステル系樹脂を1とした場合の価格比を示す。

ビニルエステル樹脂は機械的強度ならびに耐食性に優れ、かつガラス繊維との濡れ性および施工性が良好である。

さらに価格比較においても低価格である。

これらの検討結果により、樹脂材はビニルエステル樹脂を選定した。

3.2.3 成形方法の調査および選定

表 3.2.3.1 に FRP の各種成形法と特徴を示し、それぞれの成形プロセス、自由度ならびに使用素材・成形加工などに分類比較を行った。この成形法の比較から、CM-RI 法（レジンインジェクション）は、上型および下型ともに FRP 製の密閉型で、予め型内に高充填したプリフォーム（例：ガラス繊維）に上型外部ポートより max. 0.3～0.4MPa 相当の圧力条件にて樹脂含浸する成形法である。

この CM-RI 法の特徴は、HLU 法（ハンドレイアップ）や単に真空圧程度の差圧含浸による Va-RTM 法*などと比べ、ボイド発生やうねりなどの影響による成形不良による問題が少なくなり、高精度成形品の製造が可能となる。この考察結果から CM-RI 法を選定する。

また、含浸用樹脂にはビニルエステル樹脂を適用し、常温硬化タイプで安定した物性確保のため、50～60℃加温条件のもと、約 12 時間の後加熱硬化処理が好ましい。

*補足説明 Va-RTM(真空樹脂含浸)法とは型内部を減圧し、低圧注入をする成形法。

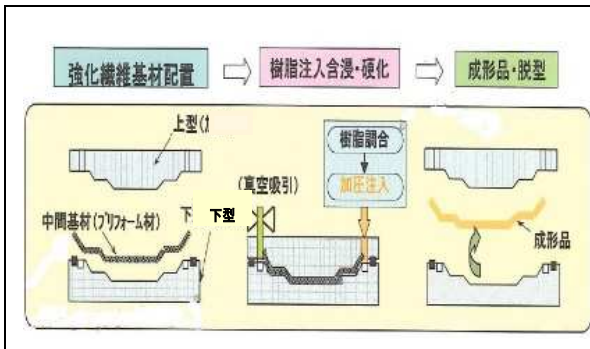
表 3.2.3.1 FRP の代表的な成形法の比較⁶⁾

成形プロセス				自由度		コスト		特徴	付図
名称	繊維配置	含浸方法	型形態	複雑形状	形状精度	素材	加工		
CM-RI 法	積層、織物等	成形中含浸	密閉型	◎	◎	◎ 非プリプレグ**	○ プリフォーム化***	・機械的特性：高 ・表面品質：高 ・複雑形状：可、 量産性	1
オートクレーブ法	積層	プリプレグ成形	開放型	◎	△	△ プリプレグ	△	・機械的特性：高 ・複雑 3 次元形状可能	2
プレス法			プレス型	○	○				
HLU 法	積層	成形中含浸	開放型	△	△	◎ 非プリプレグ	△ 自動化難	・配合の自由度：大 ・硬化時ガス環境面に課題	3
FW 法 (フィラメントワインディング)	巻く	成形中含浸	開放型 マンドレル	○	△				

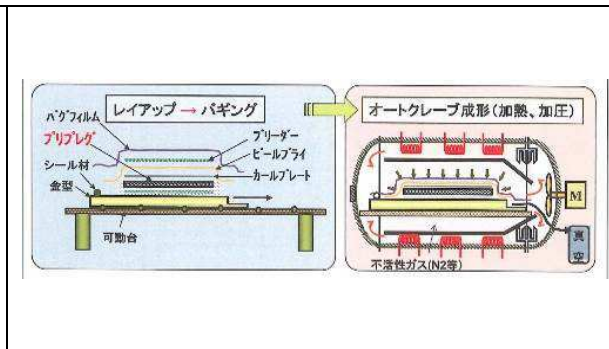
備考：（表中記号） ◎：優、○：良、△：可、×：不可

**補足説明 プリプレグとは織物などの繊維基材に樹脂を含浸させ半硬化したものを。

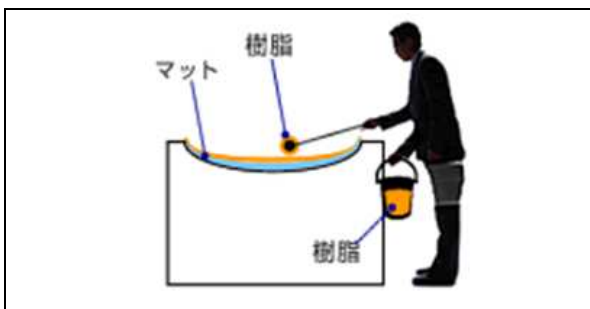
***補足説明 プリフォームとはガラス繊維などの繊維基材を立体的な形状にしたものを。



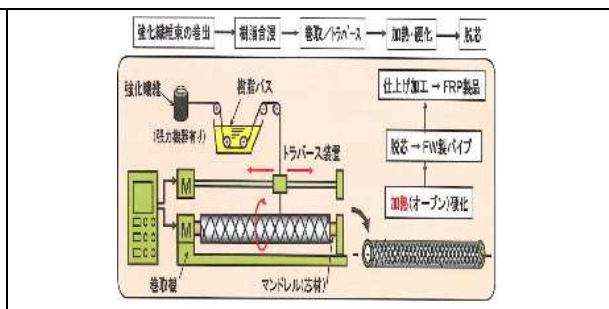
付図.1 CM-RI 法



付図.2 オートクレーブ法



付図.3 HLU 法⁷⁾



付図.4 FW 法

3.2.4 機械的性質の調査・予備試験

複合材料の特徴には、繊維の異方性や積層組合せの違いによる機械的強度の変化が挙げられる。そこで、代表的な強化繊維および樹脂(エポキシ樹脂)を使用した試験片を作製し、機械的強度の確認を行った。

1) 試験片の種類および対象試験

異方性について調査するため、市販のガラス繊維クロスシートに熱硬化性樹脂をHLU法で成形した板材より試験片を作製し、繊維方向と45度方向の引張・曲げ試験を行い、データを取得した。試験片の種類は、試料①、②、③と異なる種類のガラス基材を用いた。表3.2.4.1に試験片の仕様を表3.2.4.2に対象試験を記す。

表 3.2.4.1 試験片の仕様

名称	試料①	試料②	試料③
繊維	ガラス繊維	ガラス繊維+炭素繊維	ガラス繊維
積層構造	ガラスクロス*	ガラスクロス+炭素繊維 +ロービング**	ガラスクロス +ロービング
樹脂	エポキシ	エポキシ	エポキシ

*補足説明 ガラスクロスとは撚り合わせた繊維束の織物

**補足説明 ロービングとは数千本の繊維を撚りをかけずに引き揃えた形態のガラス繊維

表 3.2.4.2 対象試験

試験名	試料①	試料②	試料③
引張試験	繊維方向および 45 度方向		
曲げ試験	同上		



(引張)



(曲げ)

図 3.2.4.1 引張・曲げ試験片外観

***補足説明 C×40 とはガラスクロスを 40 枚積層処理したもの

0° とはガラスクロスを繊維方向に積層処理したもの

2) 引張試験⁸⁾

図 3.2.4.2 の引張試験機を用いて、JIS K 7164 に基づく引張試験方法により表 3.2.4.3 の試験条件で引張弾性率、引張強さ、ひずみを求めた。

表 3.2.4.3 引張試験条件

引張速度	2mm/min(JIS 規定 1~2mm/min)
引張強さ時ひずみ測定	試験機のスโตรーク
弾性率のひずみ測定	ひずみゲージ
雰囲気温度	40℃



(a) 試験機内部



(b) 試験機外観

図 3.2.4.2 引張試験機

3) 曲げ試験

図 3.2.4.4 の曲げ試験機を用いて、JIS K 7074 に基づく曲げ試験方法により表 3.2.4.4 の条件で曲げ弾性率、曲げ強さ、ひずみを求めた。図 3.2.4.3 に曲げ試験概要図を示す。

表 3.2.4.4 曲げ試験条件

曲げ速度	5mm/min
ひずみ測定	試験機のストローク
圧子の半径	R5 (mm)
支持台の半径	R2 (mm)
雰囲気温度	40℃

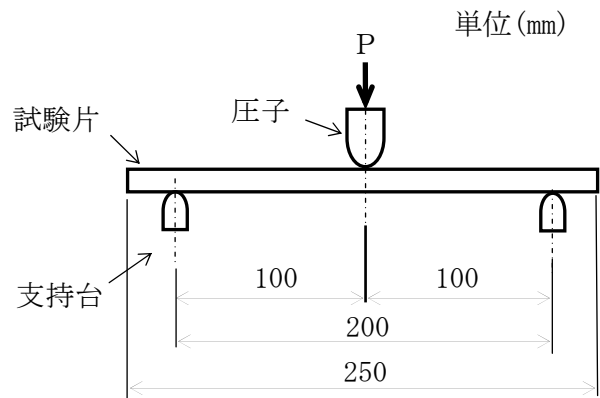


図 3.2.4.3 曲げ試験概要図



(a) 試験機内部



(b) 試験機外観

図 3.2.4.4 曲げ試験機

4) 試験結果

それぞれの試験結果を表 3. 2. 4. 5 に示す。

表 3. 2. 4. 5 機械的特性

	試料①		試料②		試料③	
	繊維方向	45度方向	繊維方向	45度方向	繊維方向	45度方向
引張弾性率(GPa)	13.41	5.81	10.81	4.76	8.68	4.32
引張強さ(MPa)	180.9	80.6	129.3	70.2	130.4	67.1
引張強さ時ひずみ(%)	5.3	8.1	4.2	7.6	4.9	6.0
曲げ弾性率(GPa)	13.52	5.96	8.15	4.37	7.77	4.22
曲げ強さ(MPa)	230.9	97.7	53.2	87.9	151.1	87.3
曲げ強さ時ひずみ(%)	2.2	4.1	1.1	4.3	3.1	4.3

※参考：青銅鋳物(CAC406) 引張強さ=195MPa

代表的な強化繊維と樹脂の組合せによる予備試験を行ったが、本試験では今回選定したガラス繊維、ビニルエステル樹脂および成形法で製作したサンプルで同様の試験を実施し評価するものとする。

3. 2. 5 まとめ

1) 強化繊維

船用ポンプに適用できる強化繊維として特に限定されないが、強度および剛性が大きい炭素繊維が好ましいが、今回の複合材料製ポンプの開発においては、炭素繊維に比べ、安価で耐食性、耐熱性に優れ、機械的特性が確保されたガラス繊維での開発を進めることとした。

2) 樹脂

船用ポンプには、高強度、耐食・耐摩耗性などの耐久性および耐火性などの信頼性が要求される。このため、ガラス繊維に適用のマトリックス樹脂（含浸成形用）としては、ビニルエステル樹脂を使うこととした。なお、厳しい耐火性の要求仕様にあってはフェノール樹脂の適用も考慮することとする。

3) 成形方法

船用ポンプは、複雑形状の製品を多品種少量生産するため、HLU法に向いているが、無圧成形であるため繊維含有率が低くなり、また、人手によるため作業環境が悪く、品質が作業者の熟練度に左右される。

一方、CM-RI 法は、少量生産には設備コスト面で一部課題が残るが、高品質（ボイド発生、うねりなどが極少）、高精度成形が可能であり作業環境に優れることなどを勘案し、複合材料製ポンプの開発には CM-RI 法を採用する。

4) 繊維の編み方の検討

ポンプは複雑な形状をしており、応力の作用する方向と芯材となる繊維軸方向が異なる強度の異方性により破損リスクが増す。

このため、応力の作用する方向に無関係なガラスチョップ方式をプリフォームに採用した。

5) 機械的性質

予備試験による機械的特性試験では、基本的な強度データが取得できた。今後行う本試験ではガラス繊維とビニルエステル樹脂ならびに CM-RI 法を組合せて作製した試験片を用い、強度データを確認する。

以上の検討および検証により、ポンプ形状（インペラとケーシング）に適した繊維の編み方などを確立した。

3.3 横型渦巻ポンプケーシングの製造法の検討

鋳物の場合、固化後に鋳型（砂型）を崩して鋳物品を取出すが、FRP 製の場合は、主に金型または FRP 型で成形するため、固化（硬化）後に型を壊すことができず、成形品が取出せない状況にある。

このため、成形型から取出し可能な製造方法を検討する。

目指す形状として、現用品（青銅鋳物製）と同形状とする。

表 3.3.1 に横型渦巻ポンプケーシング寸法および仕様、図 3.3.1 に外観図を示す。

表 3.3.1 横型渦巻ポンプの概要

要目	寸法(mm)・仕様
口径(吸込 / 吐出)	40 / 40
ケーシング	全高 280
サクシオンカバー	外径 abt. ϕ 250、幅 75
流量	2~7 m ³ /h
全揚程	5~55 m
ポンプ回転数	3600 min ⁻¹
耐圧	Max. 1.5 MPa
液温	Min. 海水温度~Max. 90°C

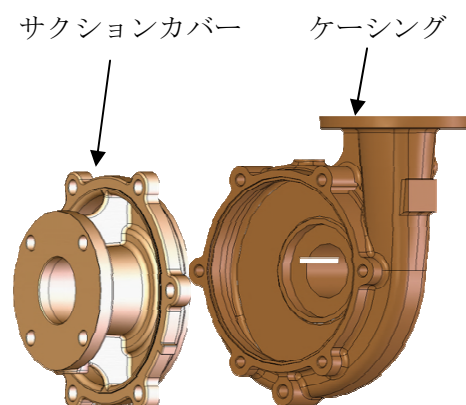


図 3.3.1 横型渦巻ポンプ外観図

横型渦巻ポンプは図 3.3.1 のように渦室が離型できない形状になっている。渦室の離型の方法として中子*(図 3.3.2 の斜線部)の材質をウレタン樹脂系発泡体にて製作し、成形後に除去する方法が考えられる。この方法を用いて、横型渦巻ポンプケーシングの試作モデルの製作を進めることとした。

しかし、ウレタン樹脂系発泡体は使い捨てになり量産性の面では課題があるため、代替品として量産時には柔軟性のあるシリコンを使用して使い回しの可能な材料にすることが経済性に優れると考える。

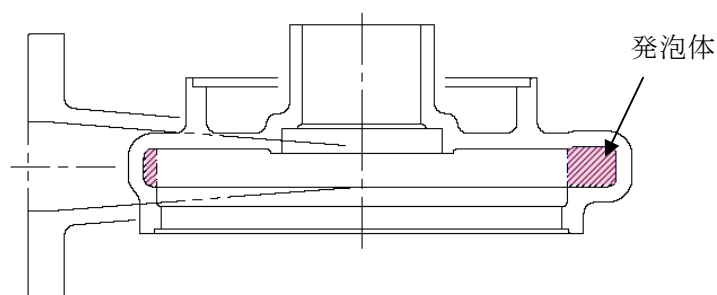


図 3.3.2 横型渦巻ポンプケーシング断面図

*補足説明 中子とは空洞のある鋳物を作るときに空洞にあたる部分としてはめ込む型材をいう。

3.4 インペラの製造法の検討(横型及び立型)

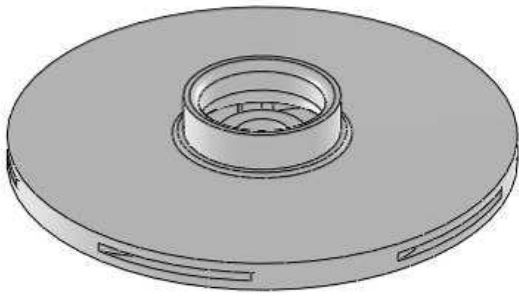


図 3.4.1 2次元羽根クローズドインペラ

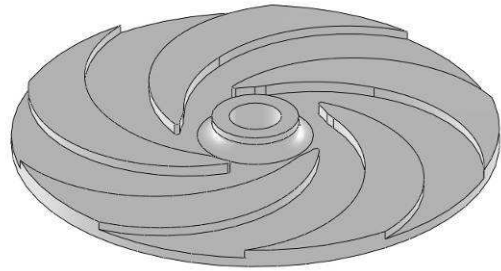


図 3.4.2 2次元羽根クローズドインペラ断面図

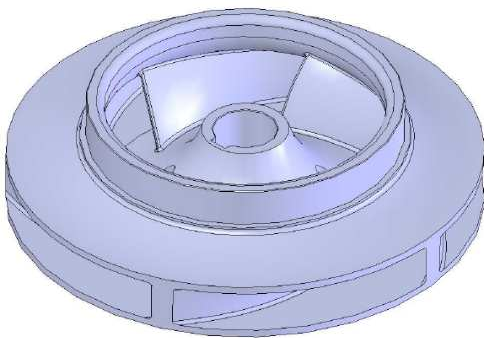


図 3.4.3 3次元羽根クローズドインペラ

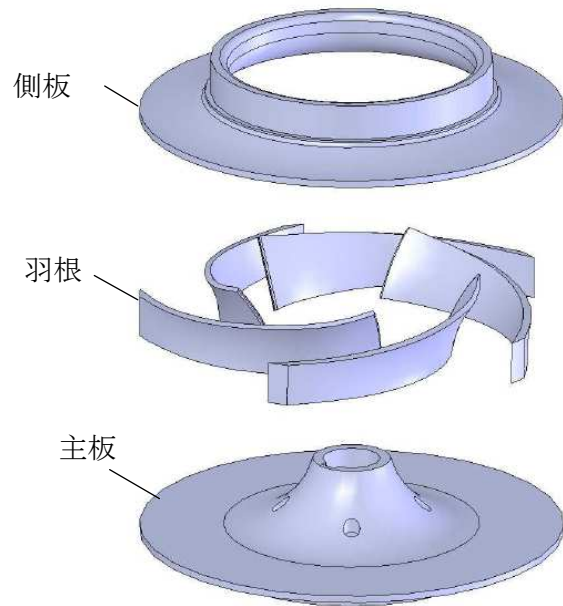


図 3.4.4 インペラ展開図

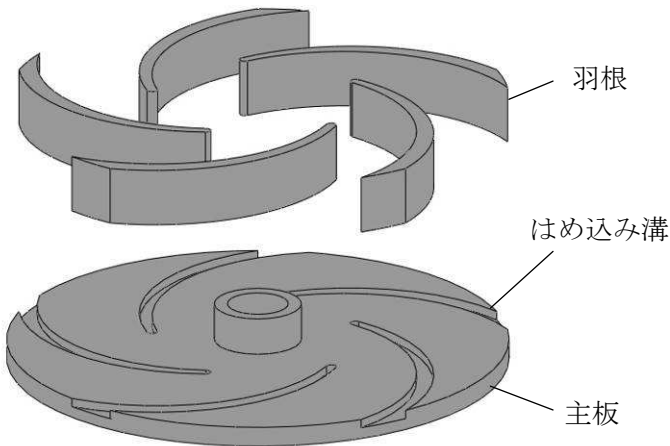


図 3.4.5 インペラ接着法

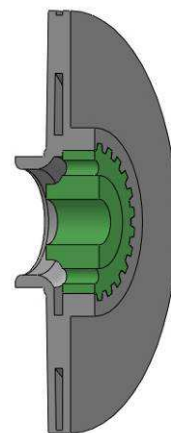


図 3.4.6 金属インサート概略図

横型渦巻ポンプのインペラは図 3.4.1 の 2 次元羽根のクローズドインペラであり、試作モデルにおいて抜き型を使用した CM-RI 法による一体成形を用いた。

この方法の利点としては、側板、羽根、主板の各部分が一体になっているため、強度的に後述の接着剤による接合方法より有利であることが挙げられる。課題として、インペラの流路は出口になるに従い細くなるため、どのようにして型を抜くかを検討する必要がある。対策として、一つの型で抜き型とするのではなく、型自体を細かく分割し、成形品から抜き出す方法を用いた。

立型渦巻ポンプのインペラは、図 3.4.3 の 3 次元羽根のクローズドインペラであり、2 次元羽根よりも抜き型による一体成形が困難と考えられる。

そのため、他のインペラの成形方法として、側板、羽根、主板をそれぞれ単独で成形し、後で接着する方法(分割組立方式)が考えられる。しかし、接合部は接着剤のみの強度となり、強度面での課題が残る。この補強対策として、図 3.4.5 に示すように接合箇所に溝を設けて羽根を嵌め込み、当該部の機械的強度付与と併せた分割組立方式が考えられる。このことから、立型渦巻ポンプのインペラについては横型渦巻ポンプと同様に一体成形での試作を検討していくが、2 次元羽根インペラより複雑形状のため、機械的強度付与と併せた分割組立方式も考慮し試作を進めることとする。

また、インペラはポンプ部品の中で、回転軸と嵌め合うトルク伝達部やインペラ流入部周辺においては、応力負荷の高い領域が予想される。

そこで、インペラの軸勘合部に図 3.4.6 のように金属インサートを埋め込み強度を確保する方法が考えられる。金属インサートを埋め込む課題として、FRP と金属インサート境界部に使用する接着剤の接着強度不足が懸念される。そこで先ず金属インサートを埋め込まない構造による FRP 試作部品開発を目指し性能検証を行う。ここで、強度面での課題が確認できれば金属インサート装着の追加検討を実施する。

3.5 立型渦巻ポンプケーシングの製造法の検討

横型渦巻ポンプケーシングと同様に、成形型から取出し可能な製造方法を検討する。目指す形状として、鋳物の形状を基にFRPに適したものへと変更する。

表 3.5.1 に立型渦巻ポンプケーシング寸法および仕様、図 3.5.2 に外観図を示す。

表 3.5.1 立型渦巻ポンプの概要

要目	寸法(mm)・仕様
口径(吸込 / 吐出)	200 / 200
ケーシング	フランジ面間 660
ケーシングカバー	外径 abt. ϕ 400、幅 100
流量	150~350 m ³ /h
全揚程	15~45 m
ポンプ回転数	1800 min ⁻¹
耐圧	Max. 0.9 MPa
液温	Min. 海水温度~Max. 90°C

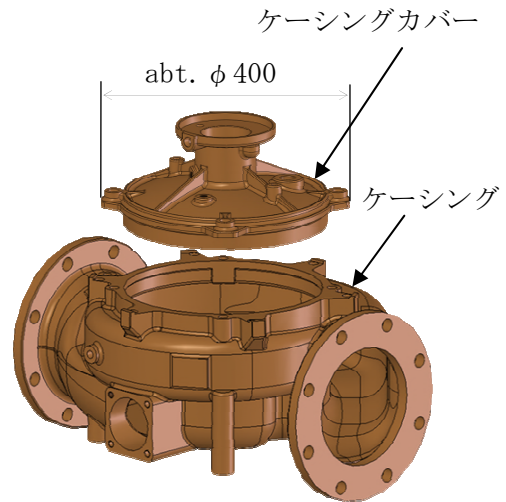


図 3.5.1 立型渦巻ポンプ外観図

立型渦巻ポンプは図 3.5.2 ように渦室が離型できない形状になっている。

そこで横型渦巻ポンプと同様に渦室の離型の方法として、中子の材質をウレタン樹脂系発泡体にて製作し、成形後に除去する方法が考えられる。この方法を用いて、立型渦巻ポンプケーシングの試作モデルの製作を進めることとする。

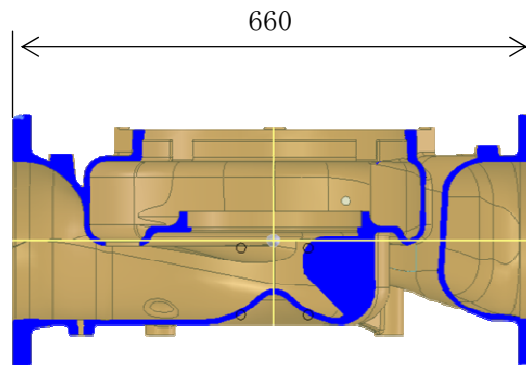


図 3.5.2 立型渦巻ポンプケーシング断面図

3.6 横型渦巻ポンプのモデル機の設計、試作、検証

3.6.1 横型渦巻ポンプケーシングの設計⁹⁾

横型渦巻ポンプケーシングをFRP化するに当たり、内圧に対する強度確保が必要であり、その応力および構造解析による応力分布の確認を行った。

1) ケーシングにかかる応力

半径方向応力

$$\sigma_a = \frac{pD_v}{4S}$$

切線方向応力

$$\sigma_b = \frac{pD_v d_v}{2(d_v \pi - b_3)S}$$

各種数値

p : 渦室の圧力

D_v : 最大基礎円

d_v : 渦室の幅

b_3 : インペラ挿入部の幅

S : 肉厚

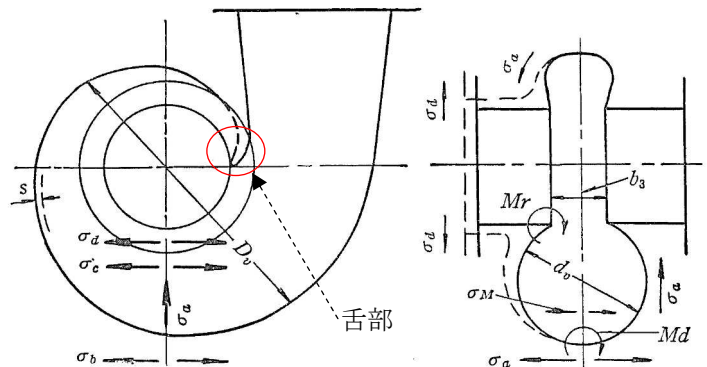


図 3.6.1 ケーシング応力分布図

上記の式を用いてケーシングにかかる内圧を 1.5MPa とした場合、半径方向応力は以下の数値になる。

半径方向応力

$$\sigma_a = 11.8MPa$$

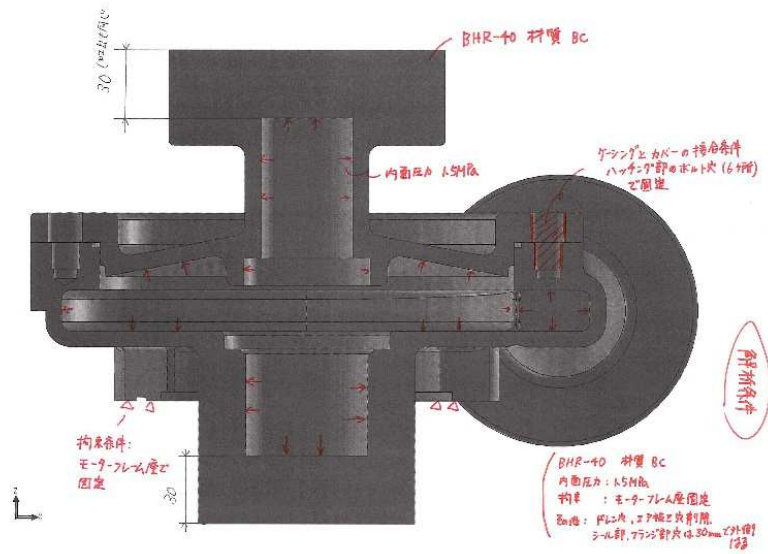
切線方向応力

$$\sigma_b = 10.2MPa$$

これらの応力は前記の表 3.2.4.5 に示す引張強さに比べ、十分小さいため現状の青銅鋳物製と同等の肉厚で問題ないと判断される。

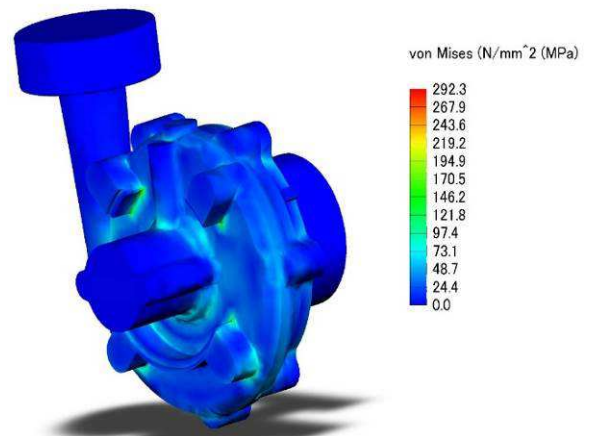
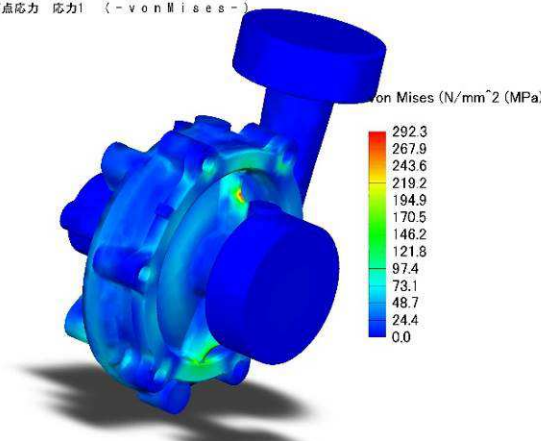
2) ケーシングにかかる応力分布の詳細解析

ケーシングにかかる応力分布を確認するため、ケーシングの解析モデルを作成し
1.5MPaの内圧をかけた構造解析を行った。



モデル名: Assem1
ステータイ名: ステータイ 1
表示タイプ: 静解析 節点応力 応力1 (-vonMises-)
変形スケール: 1

モデル名: Assem1
ステータイ名: ステータイ 1
表示タイプ: 静解析 節点応力 応力1 (-vonMises-)
変形スケール: 1



モデル名: Assem1
ステータイ名: ステータイ 1
表示タイプ: 静解析 節点応力 応力1 (-vonMises-)
変形スケール: 1

モデル名: Assem1
ステータイ名: ステータイ 1
表示タイプ: 静解析 節点応力 応力1 (-vonMises-)
変形スケール: 1

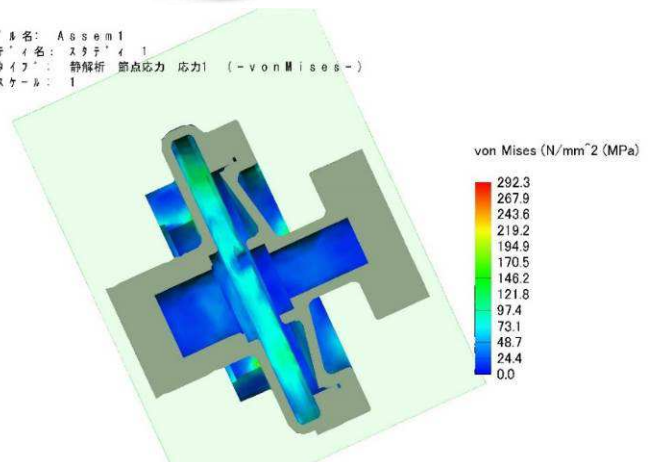
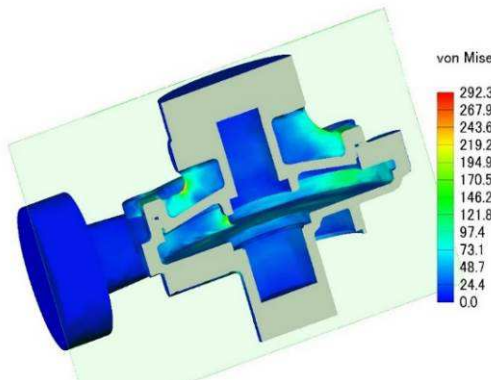


図 3.6.2 ケーシング詳細解析結果

構造解析の結果、ケーシングのリブの部分に応力集中が見受けられるため、ひずみゲージを貼り付けた実証試験を行い、その数値を確認するものとする。
一方、リブの強度補強についても検討する。

3.6.2 横型渦巻ポンプインペラの設計

ポンプ部品の中で、回転軸と嵌め合うトルク伝達部やインペラ流入部周辺においては、応力負荷の高い領域が予想される。
そこで、インペラの強度確認を実施した。

(1) 軸勘合部キー溝強度確認

伝達トルク

$$T = 9550 \times \frac{P}{N}$$

引張応力

$$\sigma_t = \frac{\alpha \times T}{I \times c \times L}$$

ねじり応力

$$\tau = \frac{16 d_2}{\pi (d_2^4 - d_1^4)} T$$

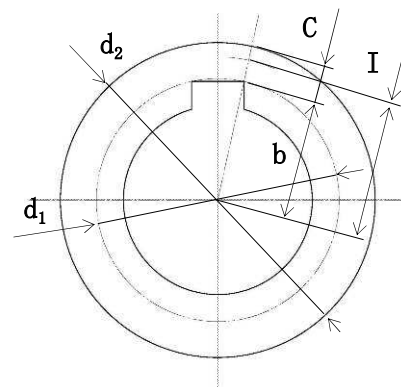


図 3.6.2.1 軸勘合部各部寸法

各種数値

α : 段付き部応力集中係数 T : 伝達トルク L : キー長さ

N : 馬力 P : 回転数

上記の式を用いて、インペラの軸勘合部にかかる応力を確認したところ、下記の値になった。

$$T = 10.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_t = 27.9 \text{ MPa}$$

$$\tau = 3.0 \text{ MPa}$$

これらの応力は前記の表 3.2.4.5 に示す引張強さに比べ、十分小さいため、現状の青銅鋳物製と同等の寸法で問題ないと判断される。

(2) インペラにかかる応力分布の解析

応力分布を確認するため、インペラの試作モデル(FRP 製)の解析 3D モデル(PC-3D)を作成し、回転数 3600min^{-1} における最大応力ならびに合成変位を解析した。

また、水圧による応力分布を確認するため、インペラの内側から 0.5MPa の圧力の負荷を与えて最大応力ならびに合成変位を解析した。

解析結果の概要を次に示す。

1) 横型渦巻ポンプインペラの種類

① 現用鋳物品 (青銅鋳物製)

② 試作モデル (FRP 製)

但し、試作モデルの形状ならびに構造は、現用鋳物品と同一条件とした。

2) 材料特性

前述 2 種の解析 3D モデル(PC-3D)に用いた材料特性を表 3.6.2.1 に示す。

表 3.6.2.1 材料特性の一覧

	試作モデル	現用鋳物品 (青銅鋳物製)
モデルタイプ	線形等方性弾性	線形等方性弾性
降伏強さ (MPa)	60	82.7
弾性率 (GPa)	7	110
ポアソン比	0.3	0.37
密度 (kg/m^3)	1970	8700

3) 解析 3D モデル(PC-3D)

メッシュ情報

メッシュタイプ	固体メッシュ
総節点数	2851714
総要素数	1982944

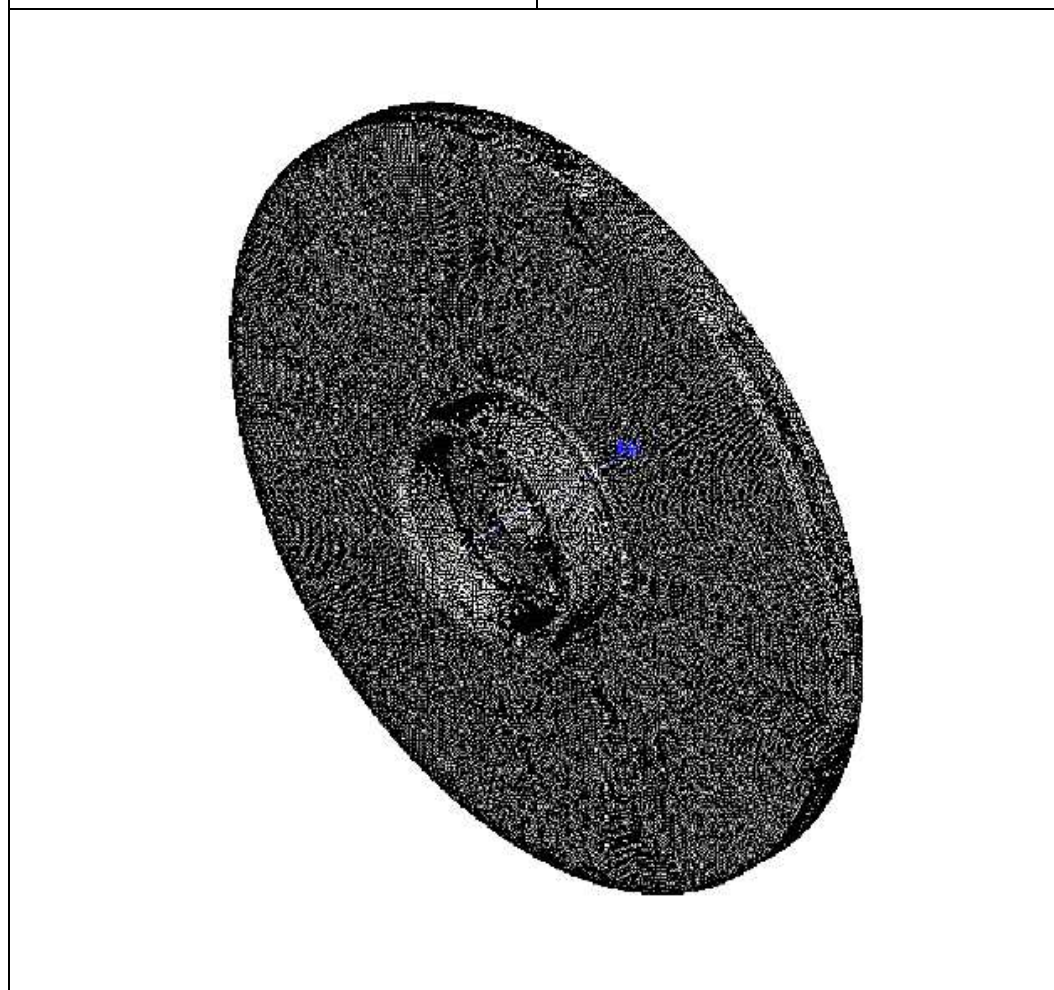


図 3.6.2.2 現用鋳物品のメッシュ分割図

4) 3600min⁻¹による最大応力および合成変位

試作モデル解析結果

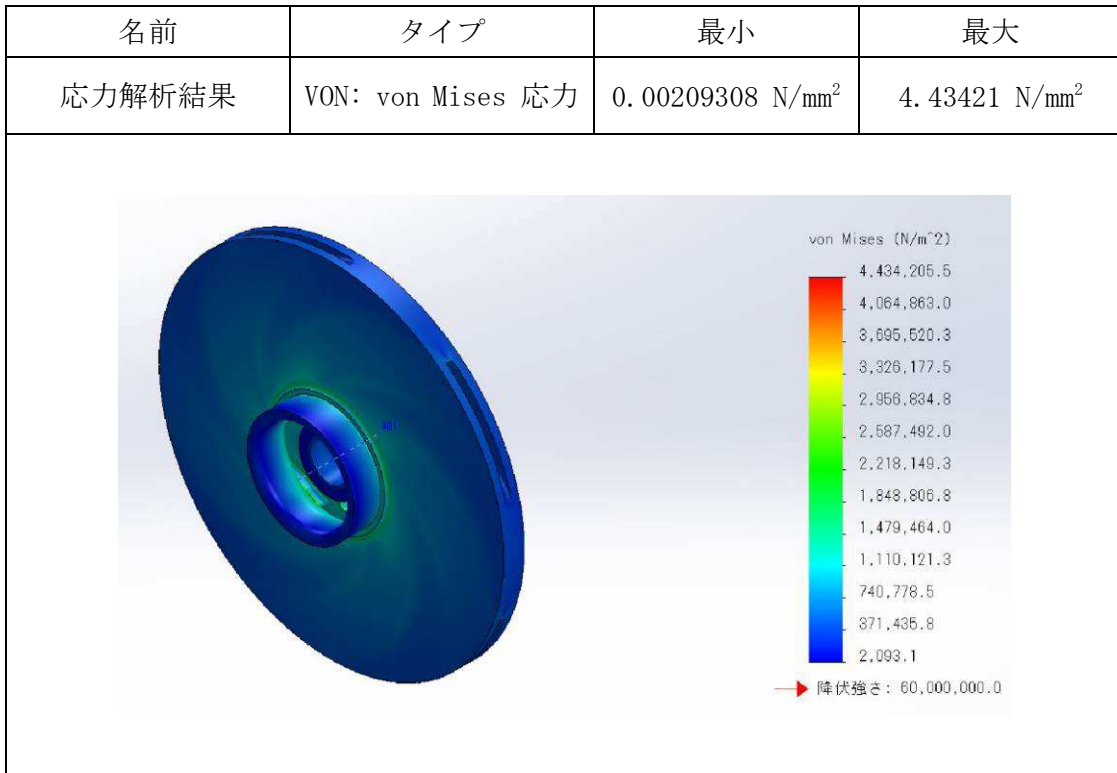


図 3.6.2.3 3600min⁻¹による最大応力

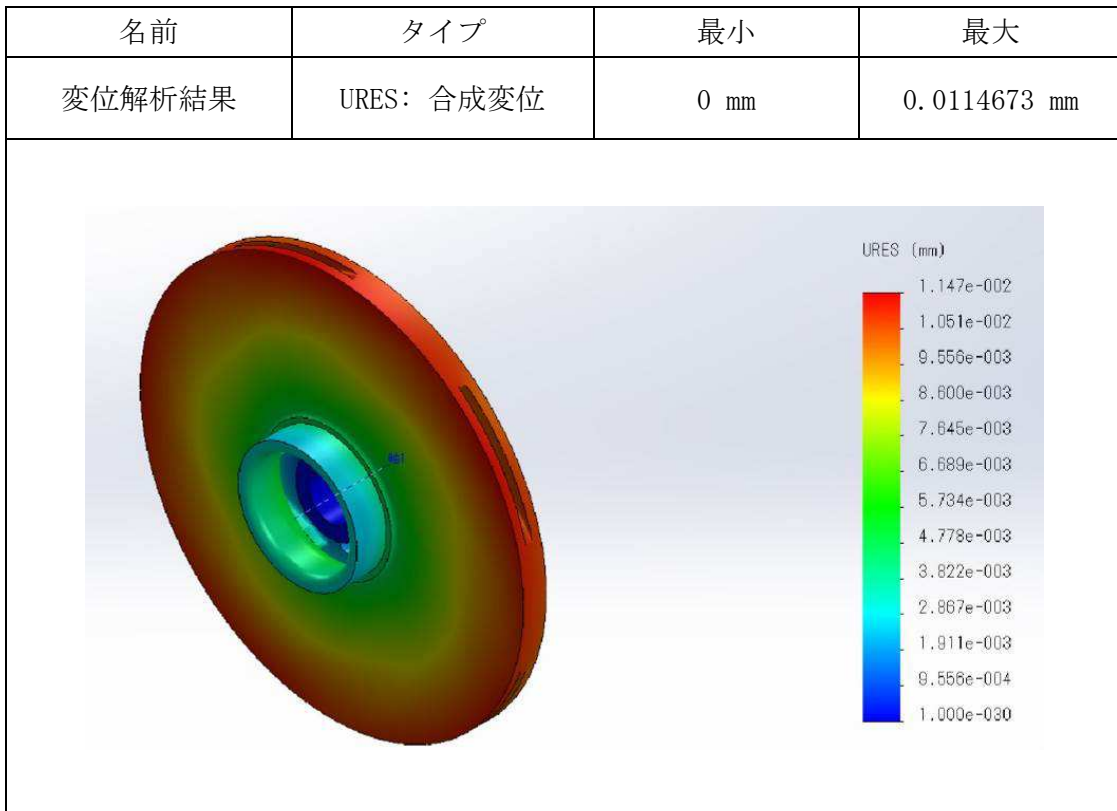


図 3.6.2.4 3600min⁻¹による合成変位

5) 0.5MPa の内圧による最大応力および合成変位

試作モデル解析結果

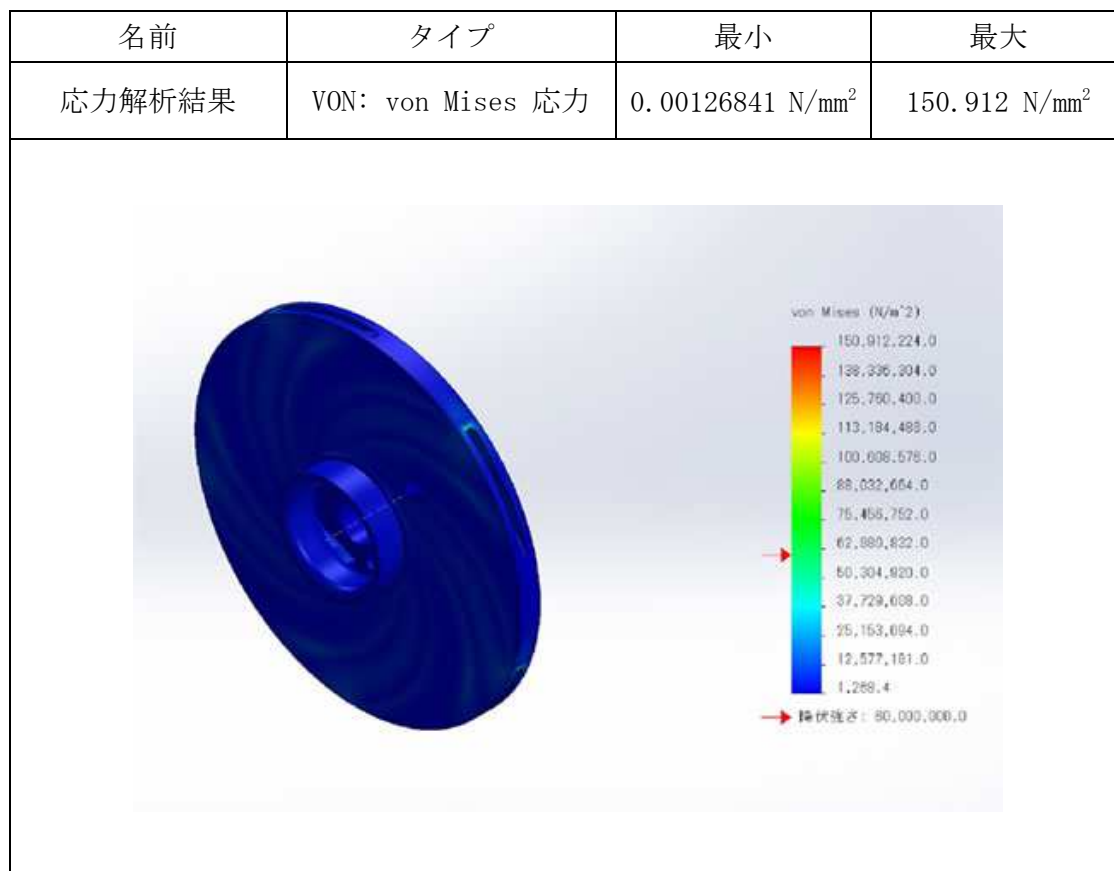


図 3.6.2.5 0.5MPa の内圧による最大応力

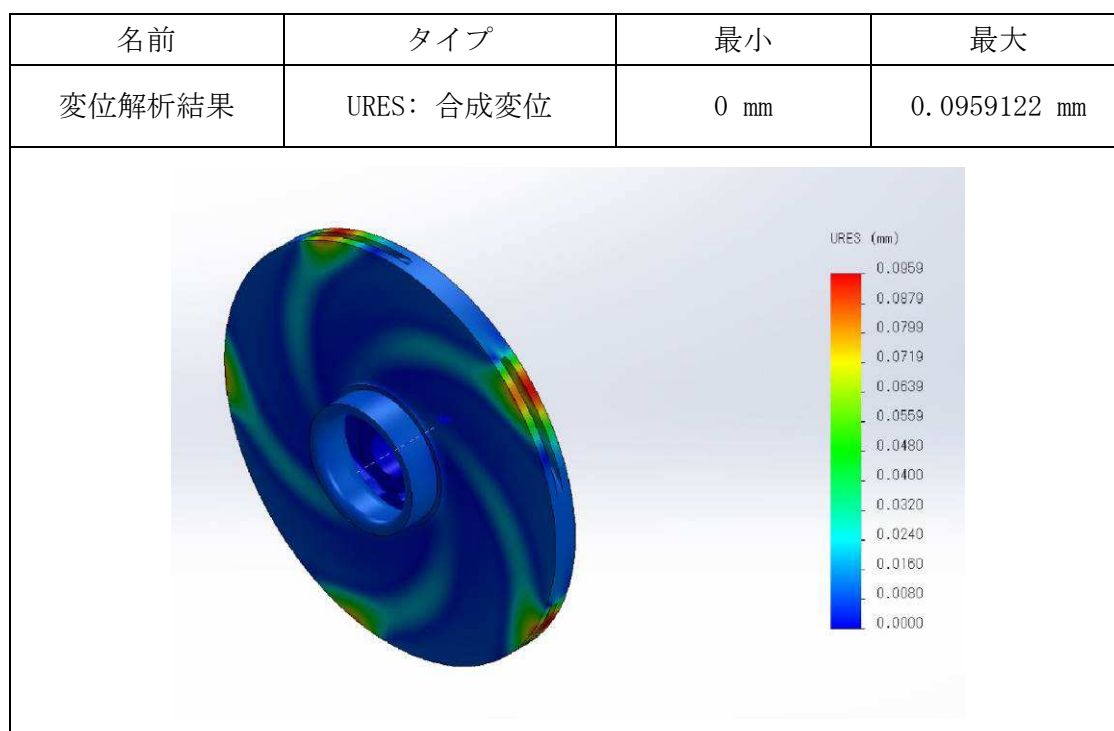


図 3.6.2.6 0.5MPa の内圧による合成変位

解析結果から得られた最大応力ならびに最大合成変位を表 3.6.2.2 に示す。
 3600min⁻¹ の遠心力による解析では最大応力がかかっている箇所は入口側の羽根の付根であり、現用鋳物品が 19.1MPa、試作モデルが 4.4MPa になる。現用鋳物品と試作モデルを比較すると試作モデルが約 1/4 の応力になる。これは現用鋳物品と試作モデルでは比重が異なり、遠心力によりかかる荷重に違いがあるため試作モデルでは応力は小さくなる。

また、0.5MPa の内圧による解析では最大応力は現用鋳物品が 151MPa、試作モデルが 150MPa になる。

これらの応力を確認するため、性能試験にて検証を行っていくこととする。

表 3.6.2.2 解析結果

解析内容		最大応力 (MPa)	最大合成変位 (mm)
3600min ⁻¹ の遠心力による解析	現用鋳物品	19.1	0.003
	試作モデル	4.4	0.01
0.5MPa の内圧による解析	現用鋳物品	151	0.006
	試作モデル	150	0.09

3.6.3 横型渦巻ポンプケーシングの試作

横型渦巻ポンプケーシングの型の作製および試作を行った。

型の材質は金型より低価格な FRP 製で作製した。試作モデルの形状は、現用鋳物品と同形状とした。

横型渦巻ポンプのケーシングおよびケーシングカバーはハンドレイアップ法で製作した FRP 型を用い、CM-RI 法による一体成形で試作した。

FRP 型の製作には不飽和ポリエステル(2液タイプ)、チョップドストランドマット、ウレタン樹脂系発泡体を用いた。

FRP 成形品にはビニルエステル樹脂、ガラス繊維は CFM (コンフィニアスフィラメントマット)、ステッチマット、UD クロスを用いた。

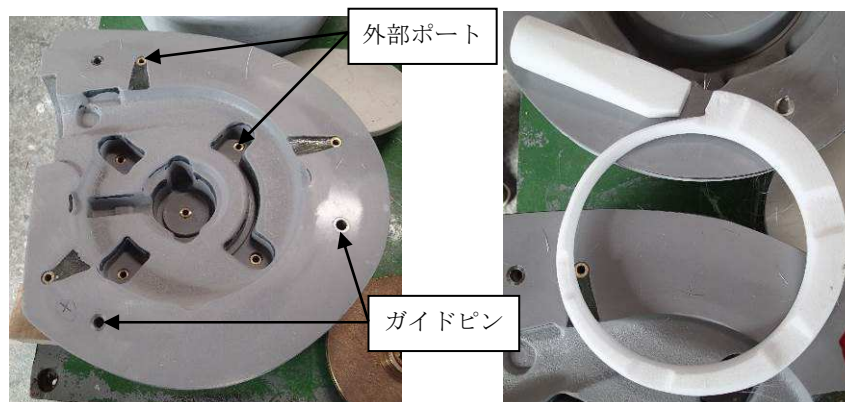
1) 試作手順

横型渦巻ポンプケーシングの試作手順を下記に記す。

① 型製作

現用鋳物品のケーシング(現型)を基に FRP 用の上型、下型をハンドレイアップ法にて製作した。中子はウレタン樹脂系発泡体を用いた。

上型、下型は樹脂の注入による圧力や脱型の際の衝撃による破損を防ぐため、ウレタン樹脂系発泡体を芯としたリブによる補強を行い、最後に外部ポートを設置した。(図 3.6.3.1)



(a) ケーシング上型

(b) ケーシング中子

図 3.6.3.1 ケーシング成形型

② 上型、下型の表面処理

上型、下型に離型処理後、ゲルコート*処理を行った。ゲルコートは約 300 μm の膜厚で表面処理する部分にカップガンで塗布した。

③ ガラス繊維基材セット

乾燥したゲルコートの上から成形型とガラス繊維を馴染ませるために下塗りとしてビニルエステル樹脂を塗り、ガラス繊維をセットした。

ガラス繊維をセットするには、ガラス繊維が成形型の中で隙間が生じないように重ね合わせた。



図 3.6.3.2 ケーシングの型にガラス繊維をセット

④ 型締め

ガラス繊維を金型にセット後、含浸の際に樹脂の漏洩が無いように固定した。

⑤ 含浸

樹脂注入器を用いて 0.3~0.4MPa 相当の圧力で型に樹脂を注入し、ガラス繊維に含浸した。

⑥ 脱型

樹脂の硬化後、型全体に均等な力をかけて上型、下型を引き抜いた。なお、ウレタン樹脂系発泡体の中子は成形品を傷つけないように切削除去した。

⑦ 仕上げ

仕上げは、型の合わせ面に発生したバリ取り作業を実施した。

(図 3.6.3.3~図 3.6.3.6)

*補足説明 ゲルコートとはメス型内にあらかじめゲル(ジェル、ジェリー)状の樹脂をコーティングしておくことで未然に繊維の露出を防ぐ塗装の下地である。

2) 試作モデル



(a) サクションカバー側



(b) 電動機側

図 3.6.3.3 ケーシング試作モデル 1



(a) サクション配管側(外側)



(b) ケーシング本体側(内側)

図 3.6.3.4 サクションカバー試作モデル 1



(a) サクションカバー側

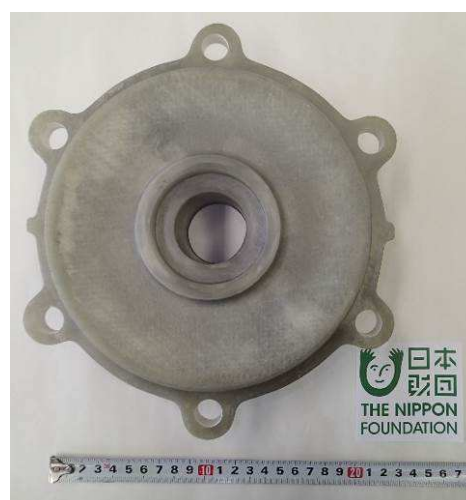


(b) 電動機側

図 3. 6. 3. 5 ケーシング試作モデル 2



(a) サクション配管側(外側)



(b) ケーシング側(内側)

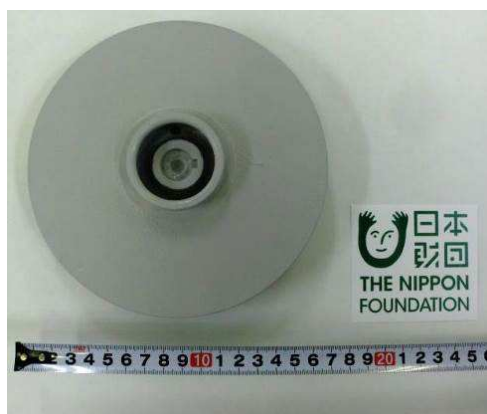
図 3. 6. 3. 6 サクションカバー試作モデル 2

3.6.4 横型渦巻ポンプインペラの試作

横型渦巻ポンプのインペラは、CM-RI 法による一体成形で試作を行った。
試作手順は、ケーシングと同じである。



図 3.6.4.1 インペラ成形型

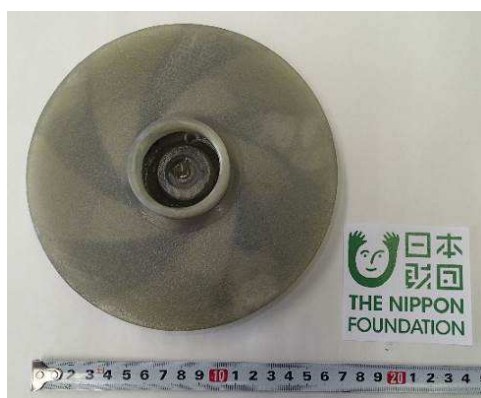


(a) サクションカバー側



(b) 電動機側

図 3.6.4.2 インペラ試作モデル 1



(a) サクションカバー側



(b) 電動機側

図 3.6.4.3 インペラ試作モデル 2

3.6.5 横型渦巻ポンプのモデル機の検証 (1)

今回、船用ポンプ機器のFRP開発においてガラス繊維、ビニルエステル樹脂ならびに成形法としてCM-RI法を選定し、その試作モデルと現用品(青銅鋳物品)のポンプ総重量の検証を行った。

現用鋳物品と今回の試作モデルの重量比較を表3.6.5.1に示す。

表 3.6.5.1 横型渦巻ポンプ部品の重量比較 (単位: kg)

項目 部品名	製品の種類		
	現用鋳物品 (青銅鋳物製)	FRP	
		試作モデル 1*	試作モデル 2**
インペラ	2.2	0.38	0.36
ケーシング	10.5	1.85	2.2
サクシオンカバー	5.2	1.02	0.95
合計	17.9	3.25	3.51
繊維含有率(%)		42	47

* 塗装色付ゲルコート

** 透明ゲルコート

この結果より、現用鋳物品が17.9kgに対して、試作モデル1は合計3.25kg、試作モデル2が合計3.51kgである。

インペラ、ケーシング、サクシオンカバーの部品単体で見るとそれぞれ約80%の重量軽減を行うことができた。

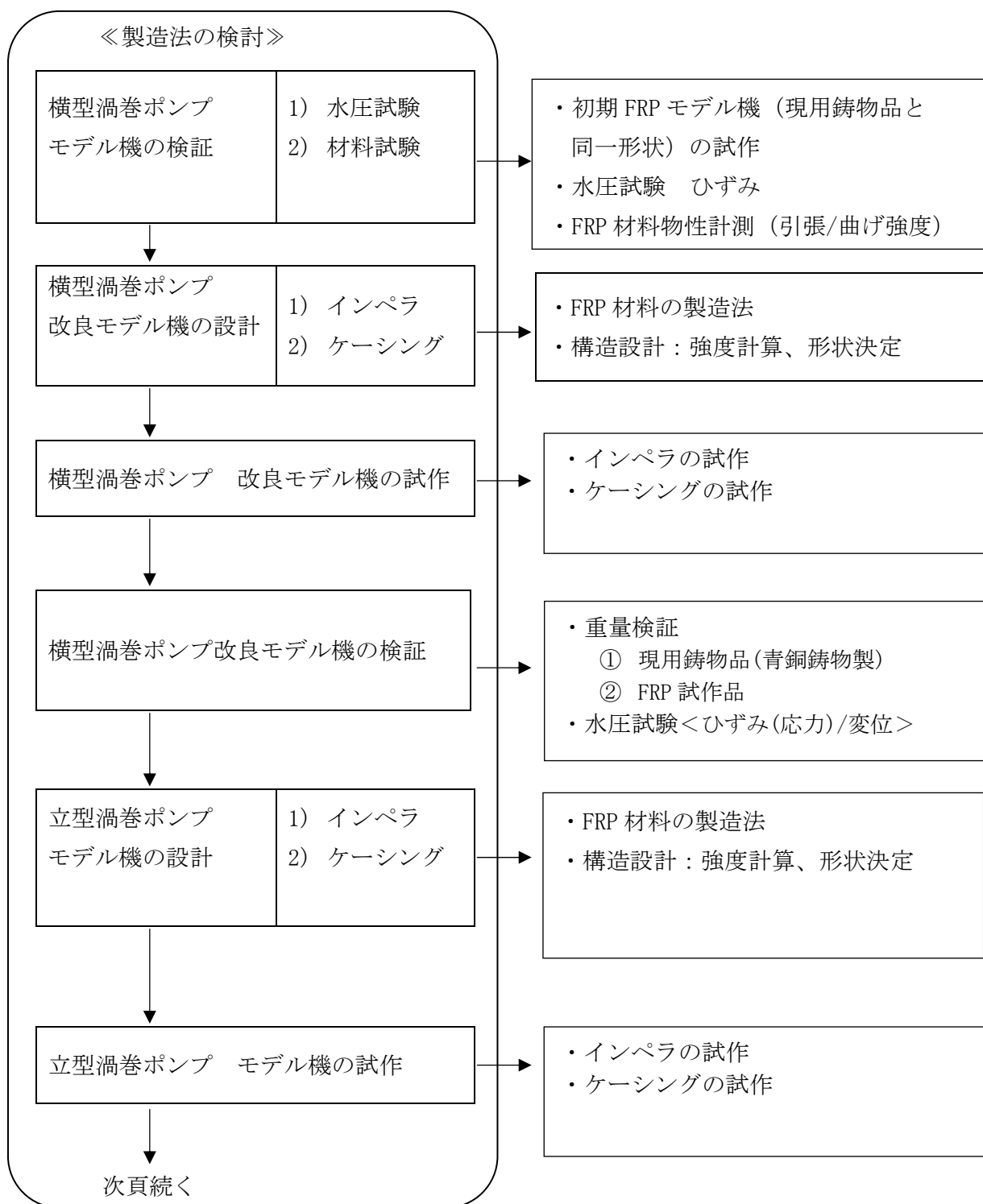
なお、平成28年度に試作モデルの機械的・物理的性能の検証および性能試験を行うこととする。

第Ⅱ部 平成28年度

4. 平成28年度の実施内容

4.1 開発フローと実施手順概要

平成28年度は、ポンプ主要機器のFRP試作開発に向けて、以下に示す開発フローにより設計、試作、検証および性能試験を実施した。



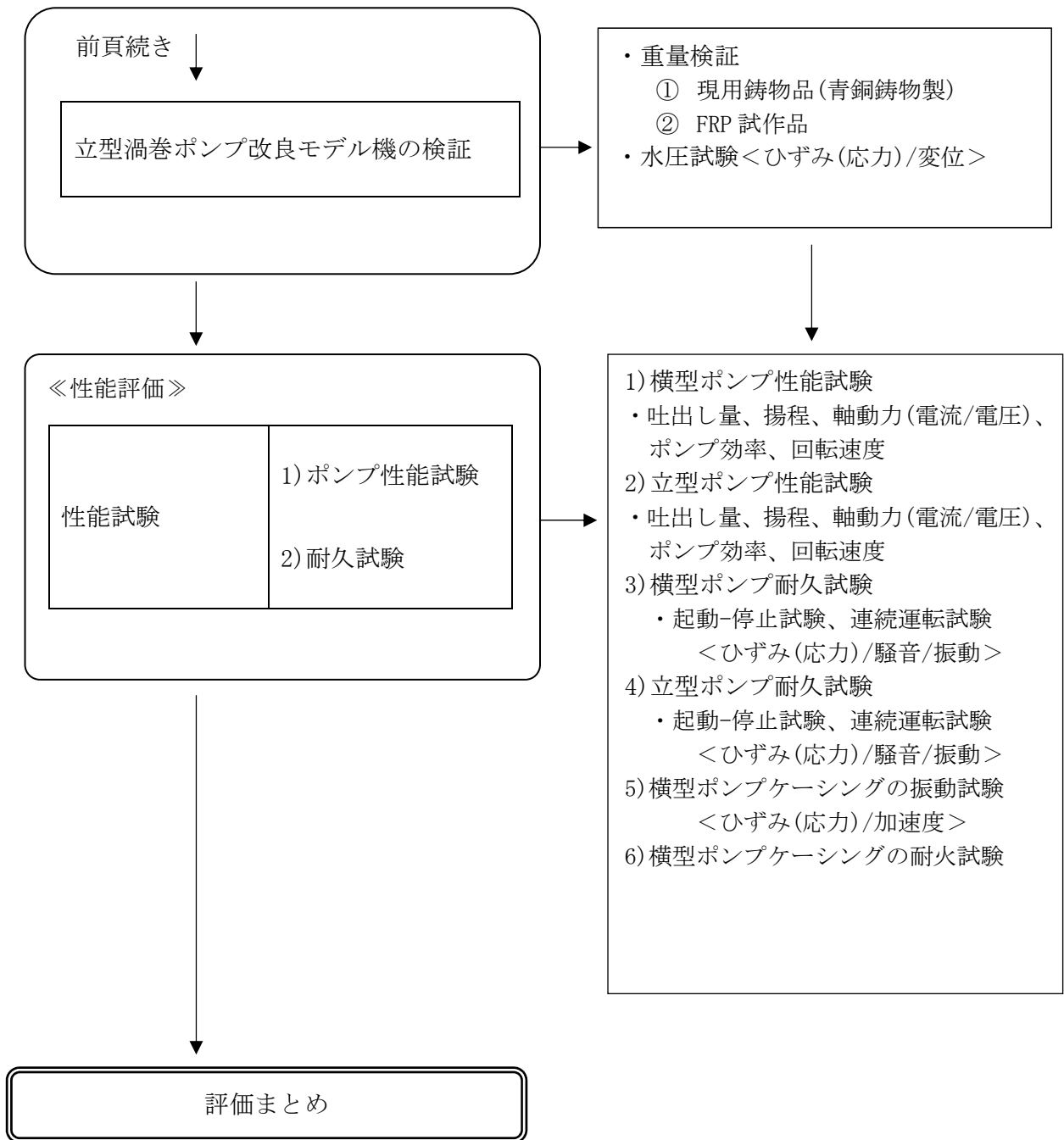


図 4.1.1 開発手順概要

得られた実施内容の詳細については次章に記述する。

4.2 横型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証（続き）

ポンプ主要機器のFRP試作開発に向けて、目論見概要を図4.2.1、図4.2.2に示す。

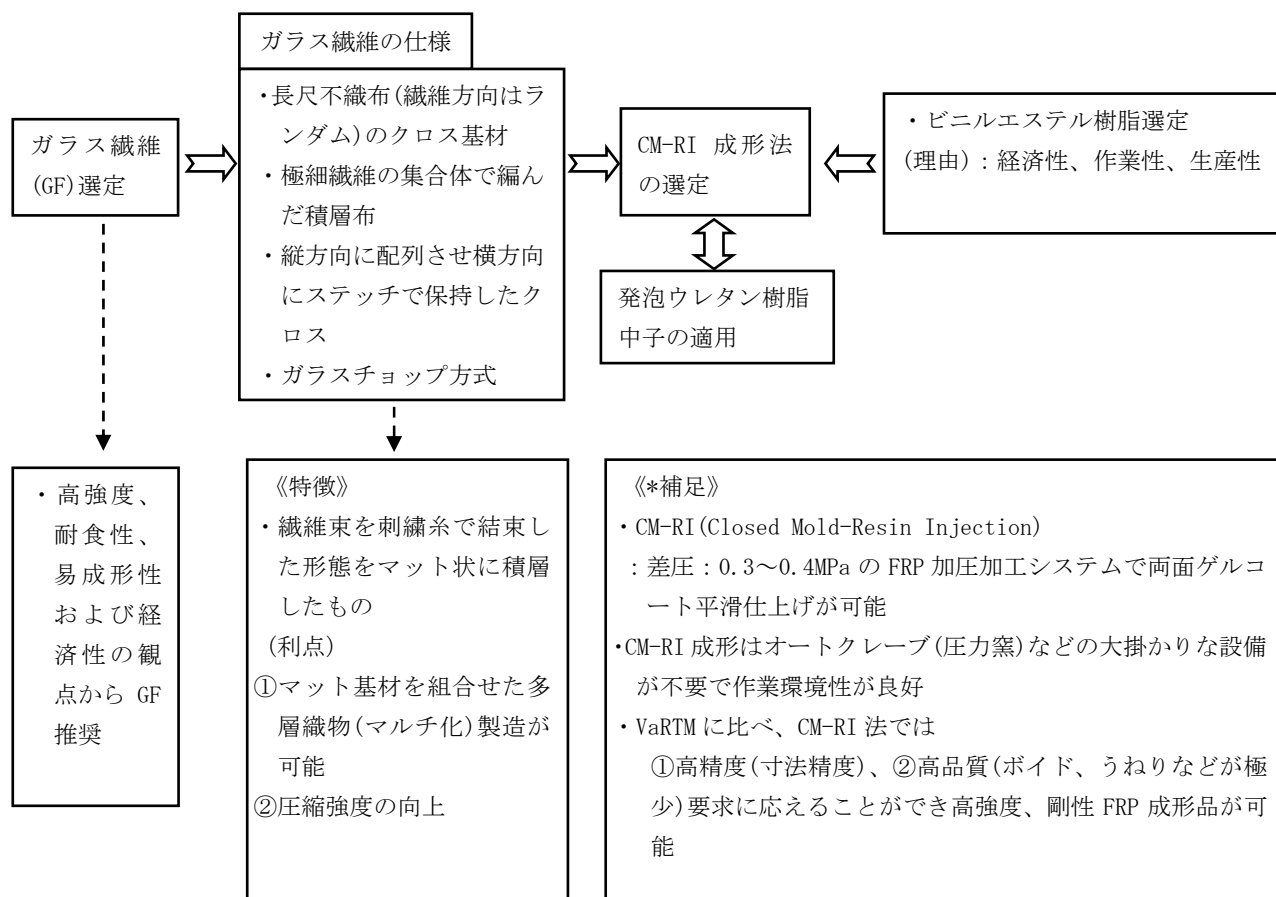


図 4.2.1 FRP ポンプ製造法の概要

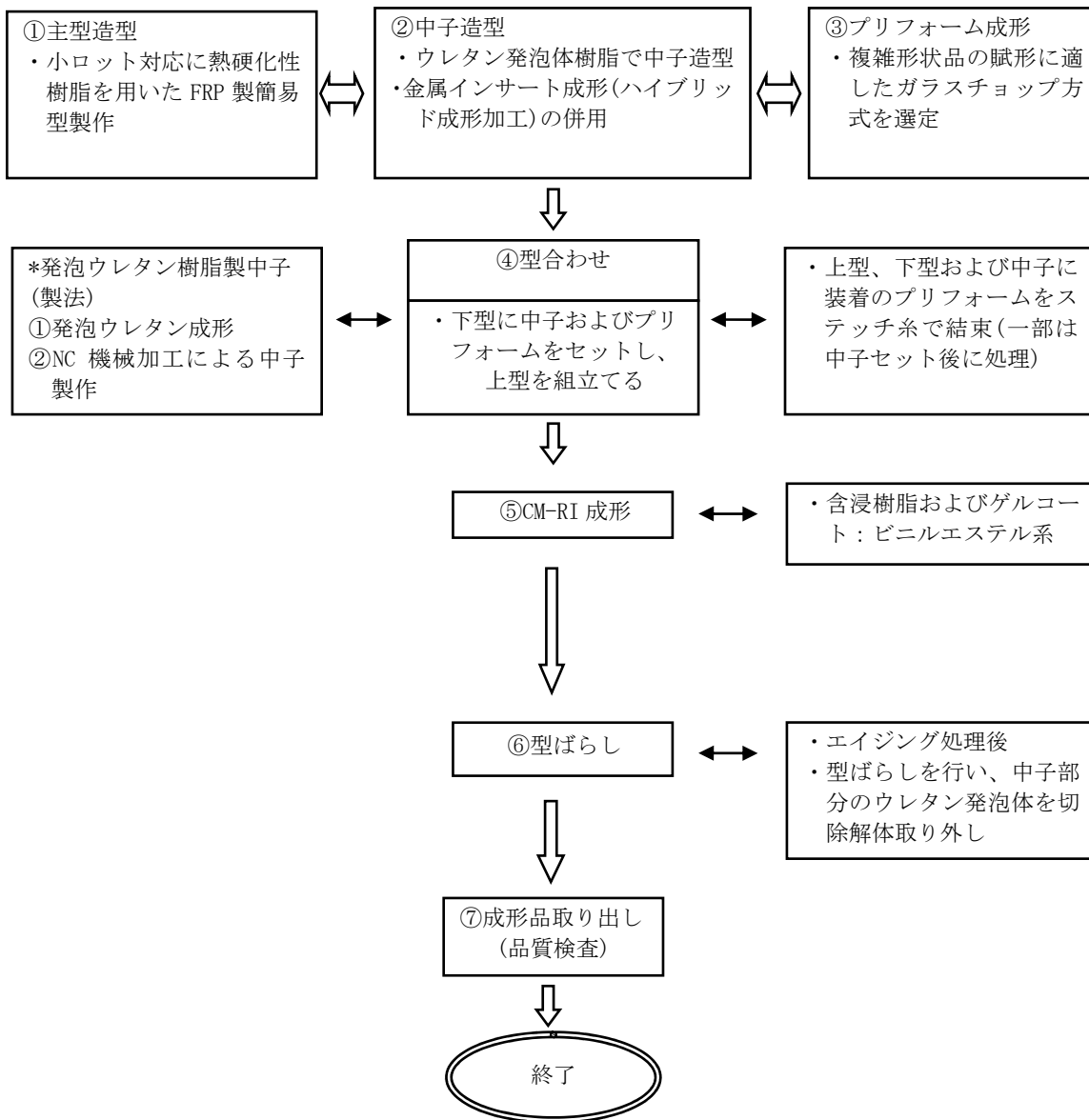


図 4.2.2 CM-RI 法による FRP ポンプ製造の流れ図

4.2.1 横型渦巻ポンプの初期モデル機の検証 (2)

1) 初期モデル機の水圧試験

現用鋳物品と同じ形状の初期モデル機 (P. 30 図 3.6.3.5、図 3.6.3.6 FRP 試作モデル 2) を用いて、水圧試験を実施した。(図 4.2.1.1)

表 4.2.1.1 に記載のひずみゲージを図 4.2.1.2 に示す位置に貼り、さらに変位を計測するため図 4.2.1.3 に示す位置にダイヤルゲージを取り付けた。図 4.2.1.4 の計測系統図と図 4.2.1.5 に示す昇圧パターンにて試験を実施した。ケーシング外面には構造解析の応力分布を基に各部にひずみゲージを貼り付けて応力を計測した。水圧試験の結果は次の通りである。

昇圧時、0.4MPa 近傍でサクシオンカバー応力集中部のリブコバ面 C1 (図 4.2.1.2) から割れが発生した。(図 4.2.1.6 ⑰⑱の矢印部)

C2 側リブコバ面(図 4.2.1.2)は 0.6MPa 以上でひずみが上がらず、それ以前に割れが発生したと推定される。(図 4.2.1.6 ⑲の矢印部)

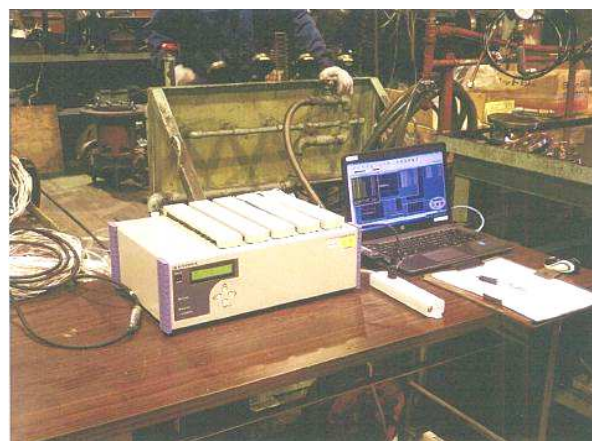
ケーシング R 部(D) (図 4.2.1.2)では、外面(計測面)が圧縮ひずみ、内面が引張ひずみになる。0.6MPa 以上で外面ひずみが急増(図 4.2.1.6 ⑳㉑)、0.8MPa ではひずみが拡散しており(図 4.2.1.6 ⑳㉑の矢印部)、内面が限界を超えている。また一般部(A)についても、0.8MPa が限界の様相である。(図 4.2.1.6 ①~⑧)

以上の結果、現用鋳物品と同一形状の FRP 試作モデル機では 0.4MPa 以上では採用できないと判断される。このためケーシングは改良設計を実施することとした。

なお、各部の応力値は表 4.2.1.2、3、4 を参照のこと。



(a) 供試体取付状況



(b) 計測器設置状況

図 4.2.1.1 初期モデル機の水圧試験

表 4.2.1.1 ひずみゲージ一覧

番号	部位	ゲージ種類	備考
A1	サクシオンカバー	2軸	一般部
A2	サクシオンカバー	2軸	一般部
C1	サクシオンカバーリブ コバ面	1軸	リブ外縁部
	サクシオンカバーリブ 側面	2軸	リブ応力集中部
C2	サクシオンカバーリブ コバ面	1軸	リブ外縁部
A3	ケーシング	2軸	一般部
A4	ケーシング	2軸	一般部
B1	ケーシング	3軸	局部応力集中
B2	ケーシング	3軸	局部応力集中
B3	ケーシング	2軸	R部
D1	ケーシング	1軸	R部
D2	ケーシング	1軸	R部
D3	サクシオンカバー	1軸	局部応力集中

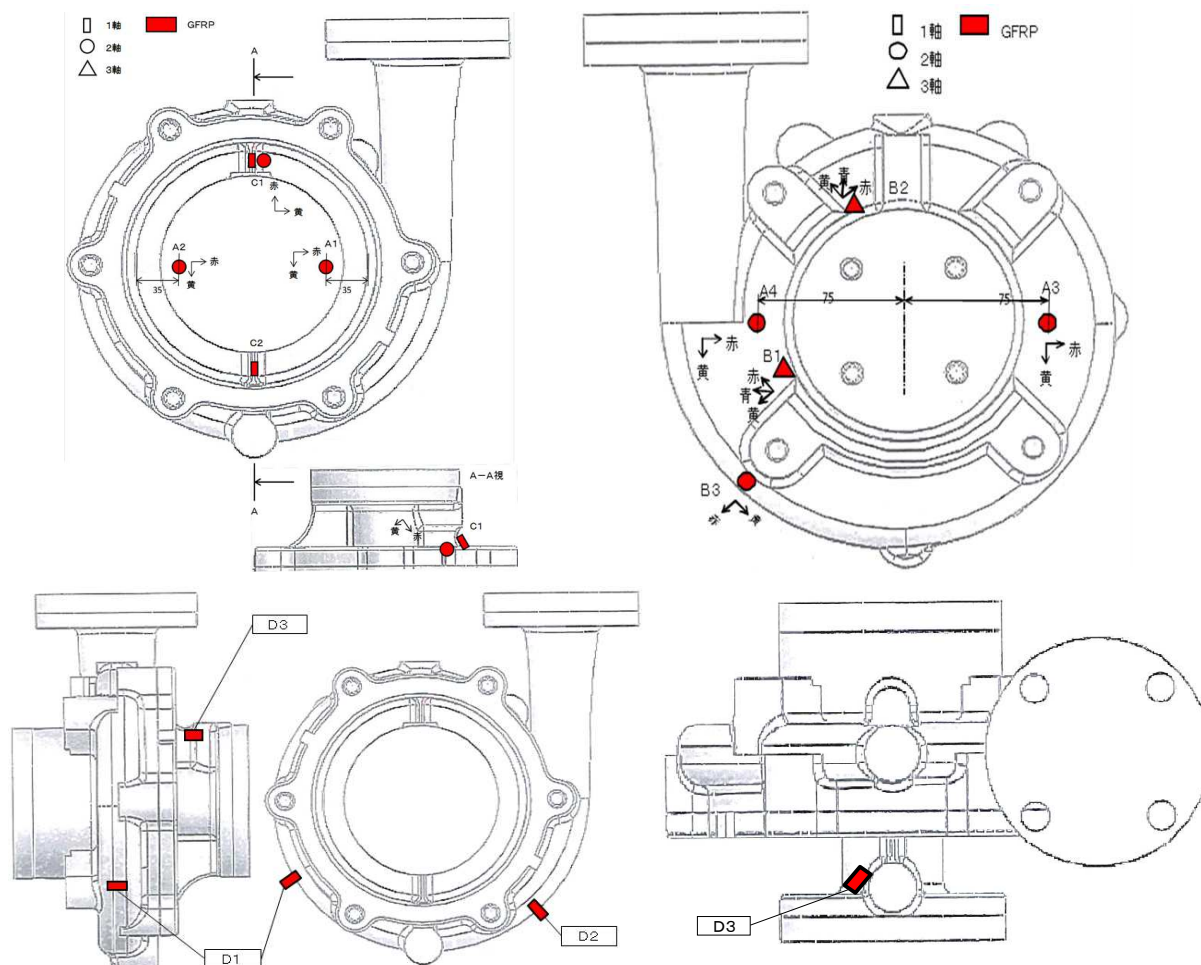


図 4.2.1.2 ひずみゲージの貼り付け位置

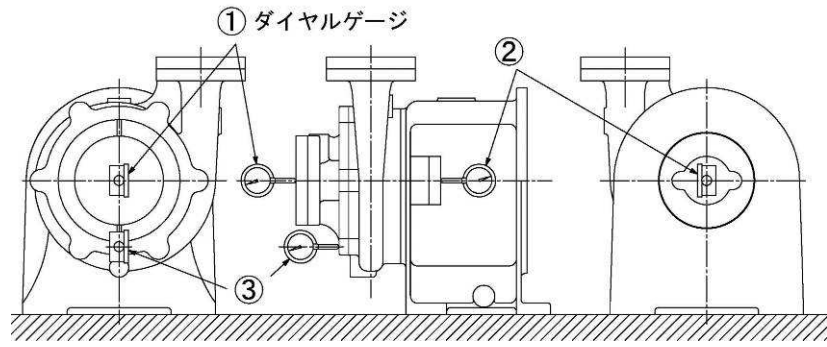


図 4. 2. 1. 3 変位量測定位置

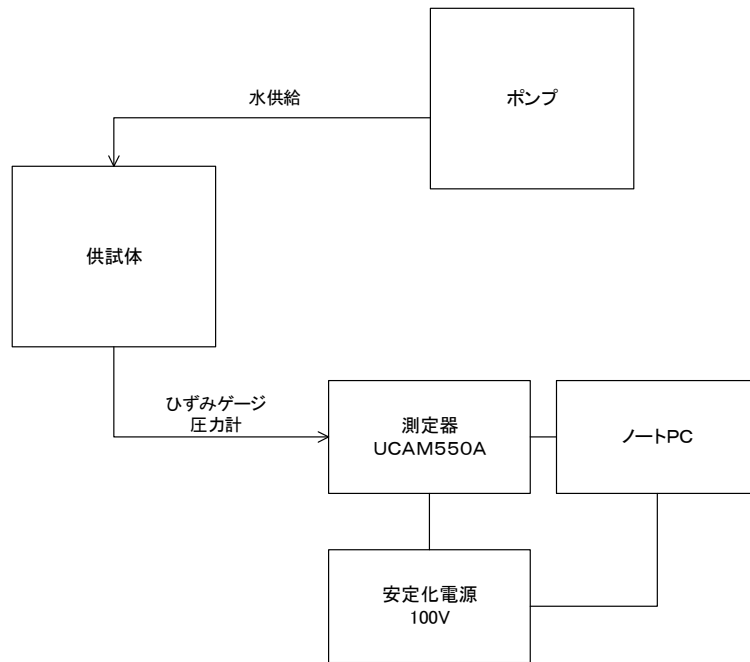


図 4. 2. 1. 4 計測系統図

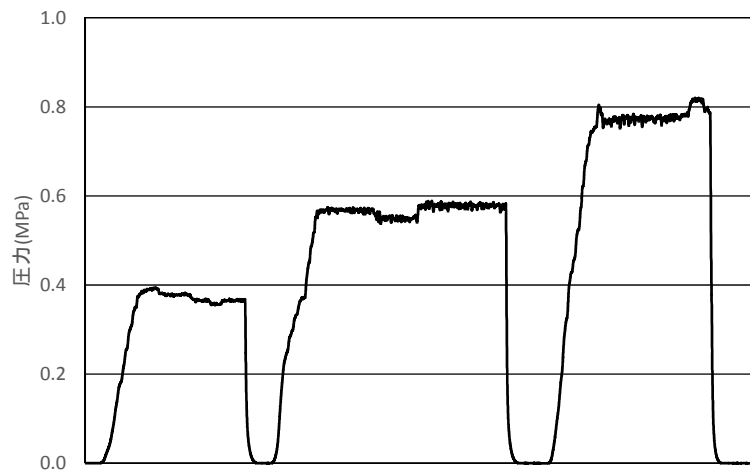


図 4. 2. 1. 5 昇圧パターン

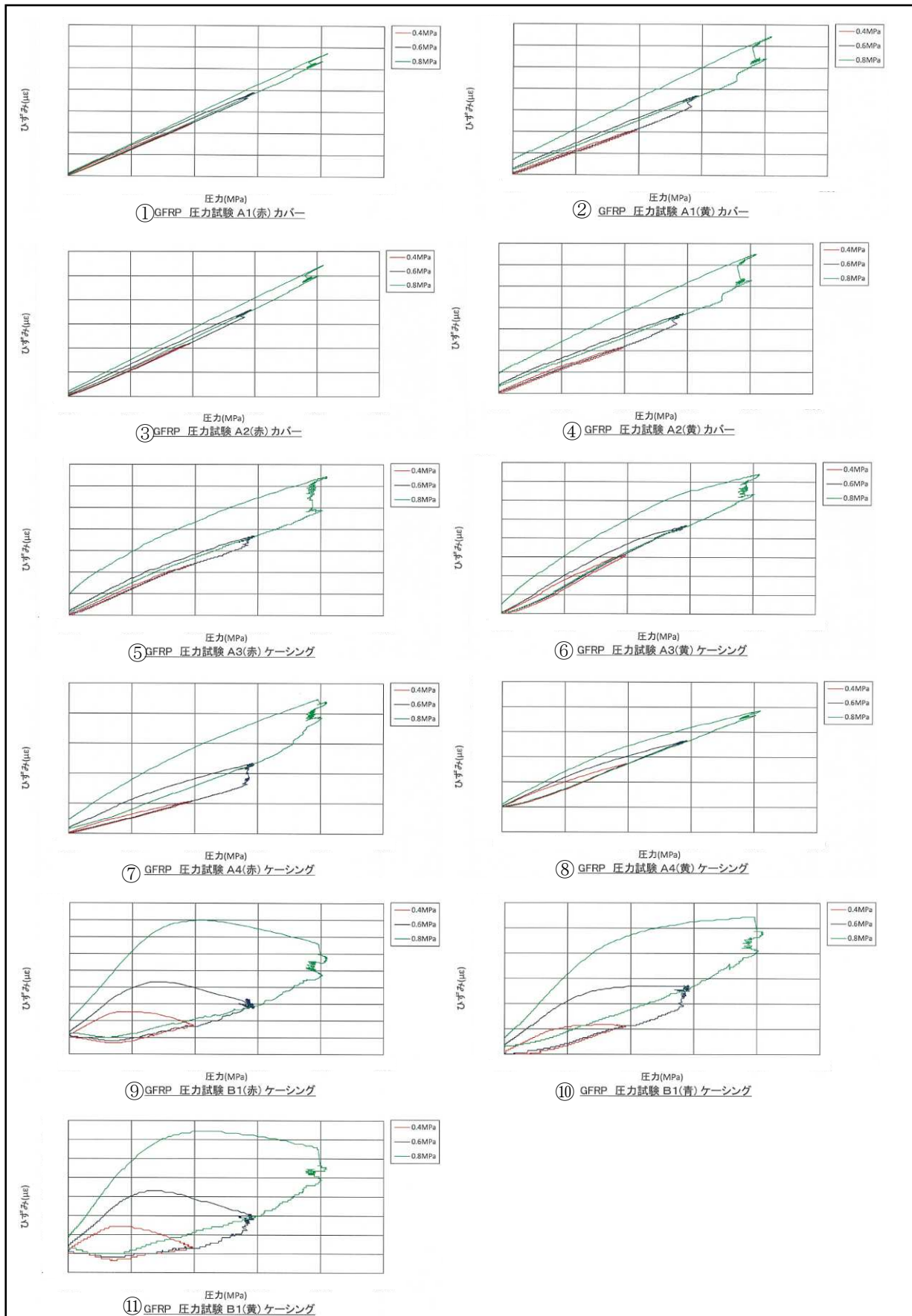


図 4.2.1.6 初期モデル機の水圧試験 圧力-ひずみグラフ

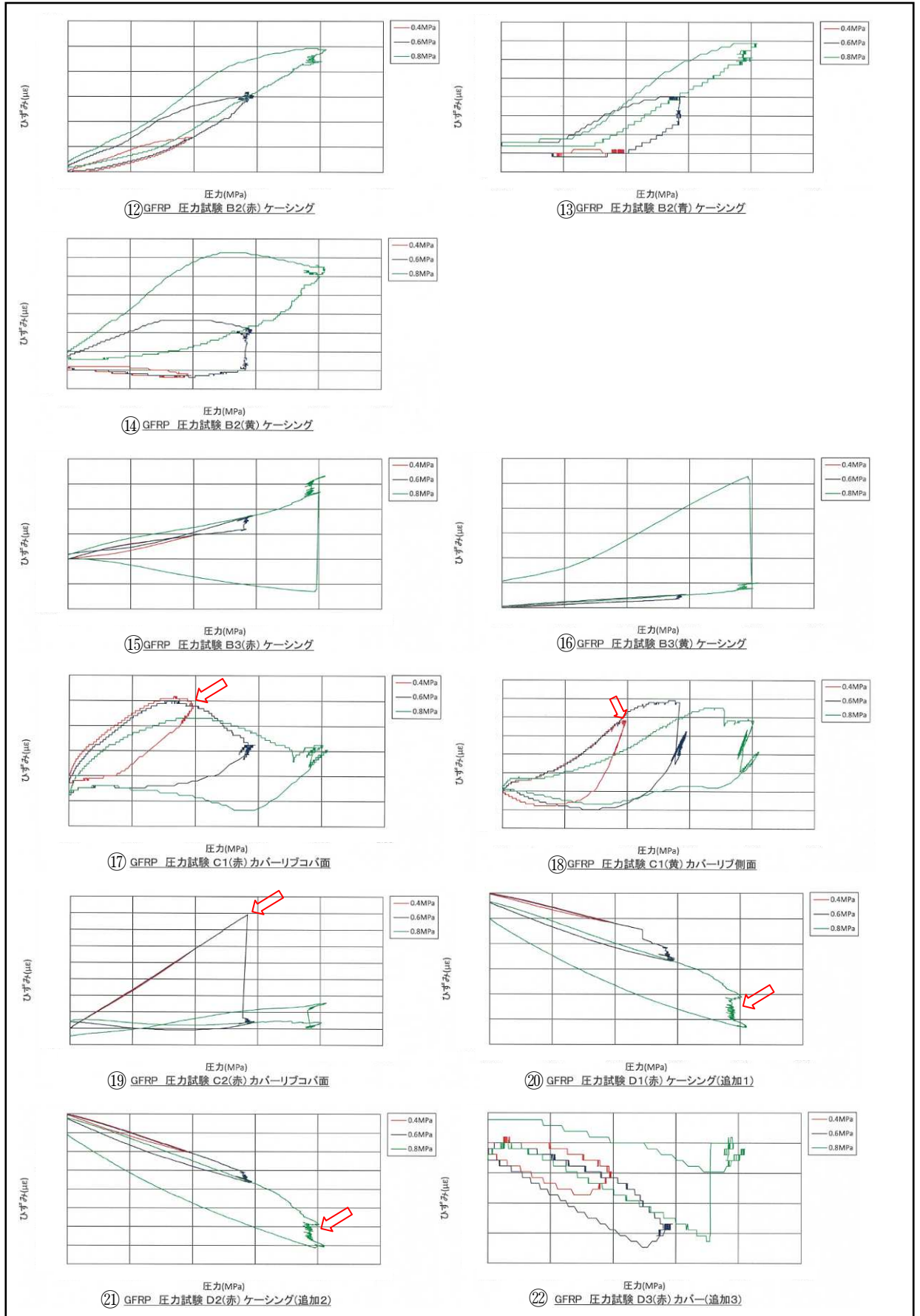


図 4.2.1.6 初期モデル機の水圧試験 圧力-ひずみグラフ

表 4.2.1.2 0.39MPa 時の応力一覧

E = 7 GPa
ν = 0.3 -

圧力 0.39 MPa

測定点名称	測定ひずみ			最大 主ひずみ	最小 主ひずみ	最大 せん断 ひずみ	最大 主応力	最小 主応力	最大 せん断 ひずみ	応力 方向
	ϵ_x (黄)	ϵ_{45} (青)	ϵ_y (赤)	ϵ_{max}	ϵ_{min}	γ_{max}	σ_{max}	σ_{min}	τ_{max}	θ
	$\mu \epsilon$			$\mu \epsilon$			MPa			deg
A1 カバー	424	-	1241	-	-	-	10.5	6.1	-	-
A2 カバー	433	-	1113	-	-	-	9.6	5.9	-	-
A3 ケーシング	621	-	473	-	-	-	5.1	5.9	-	-
A4 ケーシング	867	-	542	-	-	-	6.2	7.9	-	-
B1 ケーシング	38	227	142	237	-57	294	1.7	0.1	0.8	34.6
B2 ケーシング	-28	0	275	319	-72	391	3.2	-0.7	1.5	-19.5
B3 ケーシング	255	-	1863	-	-	-	14.9	6.3	-	-
C1 カバーリップコバ面	-	-	279	-	-	-	2.0	-	-	-
C1 カバーリップ側面	382	-	-	-	-	-	2.7	-	-	-
C2 カバーリップコバ面	-	-	2394	-	-	-	16.8	-	-	-
D1(赤) ケーシング(追加1)	-	-	-1163	-	-	-	-8.1	-	-	-
D2(赤) ケーシング(追加2)	-	-	-1029	-	-	-	-7.2	-	-	-
D3(赤) カバー(追加3)	-	-	-48	-	-	-	-0.3	-	-	-

注₁ C1・C2・D1・D2・D3 の最大主応力欄は応力値を示す。
 注₂ 応力方向は、赤を 0° とし赤→青→黄方向周りを+とする。
 注₃ 応力値の計測箇所は図 4.2.1.2 を参照。

表 4.2.1.3 0.59MPa 時の応力一覧

E = 7 GPa
ν = 0.3 -

圧力 0.59 MPa

測定点名称	測定ひずみ			最大 主ひずみ	最小 主ひずみ	最大 せん断 ひずみ	最大 主応力	最小 主応力	最大 せん断 ひずみ	応力 方向
	ϵ_x (黄)	ϵ_{45} (青)	ϵ_y (赤)	ϵ_{max}	ϵ_{min}	γ_{max}	σ_{max}	σ_{min}	τ_{max}	θ
	$\mu \epsilon$			$\mu \epsilon$			MPa			deg
A1 カバー	739	-	1951	-	-	-	16.7	10.2	-	-
A2 カバー	739	-	1793	-	-	-	15.5	9.8	-	-
A3 ケーシング	936	-	729	-	-	-	7.8	8.9	-	-
A4 ケーシング	1320	-	1153	-	-	-	11.9	12.8	-	-
B1 ケーシング	190	521	370	538	22	516	4.2	1.4	1.4	34.8
B2 ケーシング	199	152	607	726	79	647	7.3	0.8	2.5	-25.5
B3 ケーシング	539	-	3461	-	-	-	27.9	12.1	-	-
C1 カバーリップコバ面	-	-	125	-	-	-	0.9	-	-	-
C1 カバーリップ側面	324	-	-	-	-	-	2.3	-	-	-
C2 カバーリップコバ面	-	-	212	-	-	-	1.5	-	-	-
D1(赤) ケーシング(追加1)	-	-	-2577	-	-	-	-18.0	-	-	-
D2(赤) ケーシング(追加2)	-	-	-1798	-	-	-	-12.6	-	-	-
D3(赤) カバー(追加3)	-	-	-135	-	-	-	-0.9	-	-	-

注₁ C1・C2・D1・D2・D3 の最大主応力欄は応力値を示す。
 注₂ 応力方向は、赤を 0° とし赤→青→黄方向周りを+とする。
 注₃ 応力値の計測箇所は図 4.2.1.2 を参照。

表 4. 2. 1. 4 0. 82MPa 時の応力一覧

E= 7 GPa
ν = 0.3 -

圧力 0.82 MPa

測定点名称	測定ひずみ			最大 主ひずみ	最小 主ひずみ	最大 せん断 ひずみ	最大 主応力	最小 主応力	最大 せん断 ひずみ	応力 方向
	ϵ_x (黄)	ϵ_y (青)	ϵ_z (赤)	ϵ_{max}	ϵ_{min}	γ_{max}	σ_{max}	σ_{min}	τ_{max}	θ
	$\mu\epsilon$			$\mu\epsilon$			MPa			deg
A1 カバー	1291	-	2867	-	-	-	25.0	16.5	-	-
A2 カバー	1300	-	2719	-	-	-	23.9	16.3	-	-
A3 ケーシング	1478	-	1281	-	-	-	13.3	14.3	-	-
A4 ケーシング	1931	-	2177	-	-	-	21.2	19.9	-	-
B1 ケーシング	445	957	938	1054	330	724	8.9	5.0	2.0	23.6
B2 ケーシング	540	294	976	1271	245	1026	12.7	2.5	3.9	-32.4
B3 ケーシング	1000	-	6647	-	-	-	53.4	23.0	-	-
C1 カバーリブ凸面	-	-	106	-	-	-	0.7	-	-	-
C1 カバーリブ側面	216	-	-	-	-	-	1.5	-	-	-
C2 カバーリブ凸面	-	-	788	-	-	-	5.5	-	-	-
D1(赤) ケーシング(追加1)	-	-	-5279	-	-	-	-37.0	-	-	-
D2(赤) ケーシング(追加2)	-	-	-3510	-	-	-	-24.6	-	-	-
D3(赤) カバー(追加3)	-	-	-10	-	-	-	-0.1	-	-	-

注₁ C1・C2・D1・D2・D3 の最大主応力欄は応力値を示す。

注₂ 応力方向は、赤を 0° とし赤→青→黄方向周りを+とする。

注₃ 応力値の計測箇所は図 4. 2. 1. 2 を参照。

2) 材料試験

平成 27 年度の 3.2.4 機械的性質の調査を目的とした予備試験では、市販のガラス繊維クロスシートを用い、ハンドレイアップ法により作製した試験片による材料試験で基本的な強度データを取得した。

本試験では複合材料製ポンプの製造で用いる製造法(CM-RI 法)および基材(ガラスチョップ方式)で引張試験、曲げ試験を実施した。

表 4.2.1.5 に作製した試験片の仕様および図 4.2.1.7 に外観を示す。



図 4.2.1.7 引張・曲げ試験片外観

表 4.2.1.5 試験片の仕様

繊維	ガラス繊維
積層構造	CFM*(2層) + ステッチマット**(1層) + UD クロス*** (2層)
樹脂	ビニルエステル
成形法	CM-RI 法

* 補足説明 CFM とはコンティニューアス フィラメント マットの略で長尺不織布(繊維方向はランダム)のクロス基材

** 補足説明 ステッチマットとは極細繊維の集合体で編んだ積層布

***補足説明 UD クロスとはガラス繊維を縦方向に配列させ横方向にステッチで保持したクロス

① 引張試験

図 4.2.1.8 の引張試験機を用いて、JIS K 7164 に基づく引張試験方法により表 4.2.1.6 の試験条件で引張弾性率、引張強さ、ひずみを求めた。

表 4.2.1.6 引張試験条件

引張速度	2mm/min(JIS 規定 1~2mm/min)
引張強さ時ひずみ測定	試験機のスローク
弾性率のひずみ測定	ひずみゲージ
雰囲気温度	40℃



(a) 試験機内部



(b) 試験機外観

図 4.2.1.8 引張試験機

② 曲げ試験

図 4.2.1.10 の曲げ試験機を用いて、JIS K 7074 に基づく曲げ試験方法により表 4.2.1.7 の条件で曲げ弾性率、曲げ強さ、ひずみを求めた。図 4.2.1.9 に曲げ試験概要図を示す。

表 4.2.1.7 曲げ試験条件

曲げ速度	5mm/min
ひずみ測定	試験機のストローク
圧子の半径	R5 (mm)
支持台の半径	R2 (mm)
雰囲気温度	40°C

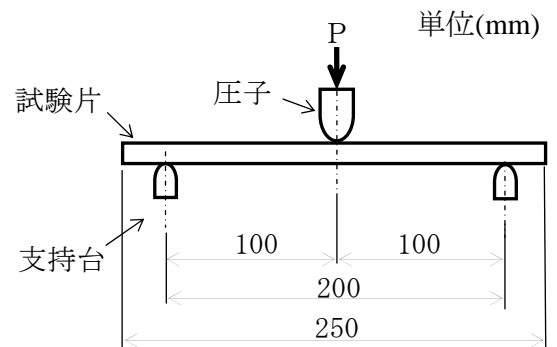


図 4.2.1.9 曲げ試験概要図



(a) 試験機内部



(b) 試験機外観

図 4.2.1.10 曲げ試験機

③ 材料試験結果

試験結果を表 4.2.1.8 に示す。試験片のサンプル数(n)は JIS に基づき n=5 で実施した。表中の数値はその平均値である。

参考に船用ポンプ材料である青銅鋳物(CAC406)の機械的性質を記載した。

これより、ガラスチョップ方式の引張強さは青銅鋳物と比較してほぼ同じであることがわかった。

表 4.2.1.8 機械的特性

	FRP 試験片	鋳物	
		青銅(CAC406)**	鋳鉄(FC200)***
繊維含有率(%)*	45	-	-
引張弾性率(GPa)	13.2	-	-
引張強さ(MPa)	209.9	>195	>200
引張強さ時ひずみ(%)	2.2	-	-
曲げ弾性率(GPa)****	9.2	-	-
曲げ強さ(MPa)****	112.8	-	-
曲げ強さ時ひずみ(%)	2.2	-	-

*補足 繊維含有率は1枚の試験板(300mm×300mm×3.5mm)製造時の重量より導出

**補足 JIS H 5120 の値

***補足 JIS G 5501 の値

****補足 曲げ強さは JIS K 7017 により設計パラメータを決定する方法としては適切でないため参考値とする。

「参考」

《JIS K 7017 繊維強化プラスチックの曲げ特性の求め方 引用》

1. 適用範囲

1.1 この規格は、繊維強化プラスチックの曲げ特性を3点曲げ法(A法)及び4点曲げ法(B法)によって求める方法を定める。この規格では標準試験片を規定し、さらに目的に応じて使用する試験片については必要なパラメータを定めた。試験速度の範囲を定める。

1.2 この方法は、材料の選択又は品質管理のための材料試験であり、設計パラメータを決定する方法としては適切でない。

備考 例えば、せん断応力に起因するたわみによって曲げ弾性率は正確には少し低い値となる。この影響を最少とするように支点間距離と試験片厚さとの比を調整したときを除き、その曲げ弾性率は引張弾性率(ヤング率)に近い値となる。さらに材料構成、特に積層構成によっても引張特性及び曲げ特性に差が生じる。

4.2.2 横型渦巻ポンプの改良モデル機的设计

1) インペラの設計

現用鋳物品のポンプ性能と比較するため、インペラの羽根および流路形状は現用鋳物品と同一寸法とした。また、トルク伝達を行う軸勘合部はキー溝部の強度計算の結果、溝のコーナー部への応力集中がFRPの疲労強度（文献¹⁰⁾）より小さいことから金属インサートを埋め込まない構造とした。

① 製造法

小型の横型渦巻ポンプのインペラは2次元羽根であり、金属製には一体成形法と分割組立方式がある。FRP製初期モデル機は一体成形で試作したが、インペラの通路幅が狭いため、中子自体を細かく分割しても成形品から抜き出すことは困難であることから分割組立方式を採用した。分割面は接着剤を用いて接合し、羽根部にFRPピンを挿入し接合部の機械的強度を保持する構造とした。（図4.2.2.2）

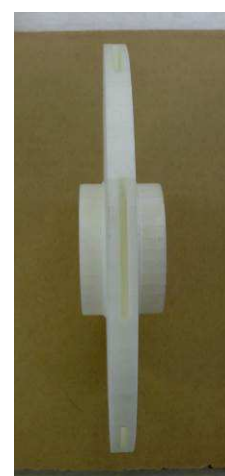
次に図4.2.2.1には樹脂製（繊維無）インペラを3Dプリンターで試作したものを示す。表4.2.2.1に代表的な3Dプリンター造形法ごとに分類した比較表を示す。現状では3Dプリンターの樹脂材は実用に耐える強度を有していないため、今後は各種ナノ微粒子を配合した樹脂を用いた3Dプリンターの開発が待たれる。

表 4.2.2.1 代表的 3D プリンター造形法比較表 (抜粋)

会社	成形可能サイズ (幅×奥行×高さ)	造形方法	使用可能材質
A社	236 x 185 x 127mm	粉末積層造形法	ABS 等
B社	225 x 145 x 150mm	熱熔融積層方式	PLA 等
C社	150×100×75mm	光造形法	アクリル、ゴムライク等
D社	550×550×500mm	SLS(粉末焼結積層造形)	ナイロン等



(a) 平面



(b) 側面

図 4.2.2.1 3D プリンターの試作インペラ

② 軸嵌合部

インペラの軸嵌合構造は電動機のトルクを伝達する重要な部分である。現用鋳物品にはキー溝が1箇所加工されており、キー溝面に圧縮応力がかかり、溝のコーナ一部には応力が集中する。キー溝部の強度計算結果 3.6.2(P.21)で示す通り、引張応力は27.9 MPaであった。これに対し、FRPの 10^7 回疲労強度は文献¹⁰⁾より29 MPaであることから、軸嵌合部は現用鋳物品と同一にすることとした。

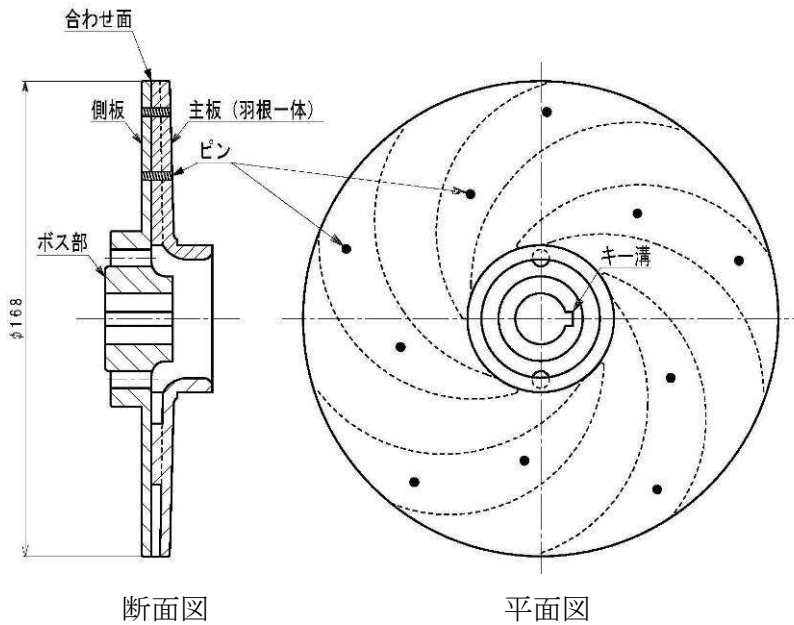


図 4.2.2.2 インペラの断面図、平面図

2) ケーシングの設計

3.6.1. で現用鋳物ケーシングと同じ形状の解析 3D モデル(PC-3D)を作成し、1.5MPaの内圧条件で構造解析を行った。その結果、吸込フランジ部のリップ部で最大約 300MPaの応力集中が見られた。この解析結果を検証するため、初期モデル機 (P.30 図 3.6.3.5、図 3.6.3.6 FRP 試作モデル 2) のケーシング外面各部にひずみゲージを貼り付けて水圧試験 (4.2.1 参照) を実施し、次の改良モデルに必要な設計データを取得した。(図 4.2.1.6、表 4.2.1.2、表 4.2.1.3、表 4.2.1.4)

さらにケーシングと同じ材料、製法で作製した試験片を用いて材料試験 (4.2.1 2) 参照) を行い、機械的性質のデータを取得した。(表 4.2.1.8)

改良モデルは FRP 材の特徴である強化繊維の連続性の保持による強度面の向上を図るため、ケーシングのリップなどの複雑形状を取り除き単純形状とした。

ケーシングにかかる応力分布を確認するため、解析 3D モデル(PC-3D)を作成し解析構造解析を実施した。(図 4.2.2.3)

結果は図 4.2.2.1、図 4.2.2.2 に示す通りである。FRP の材料試験の引張強度以下であることから改良設計の構造を採用した。

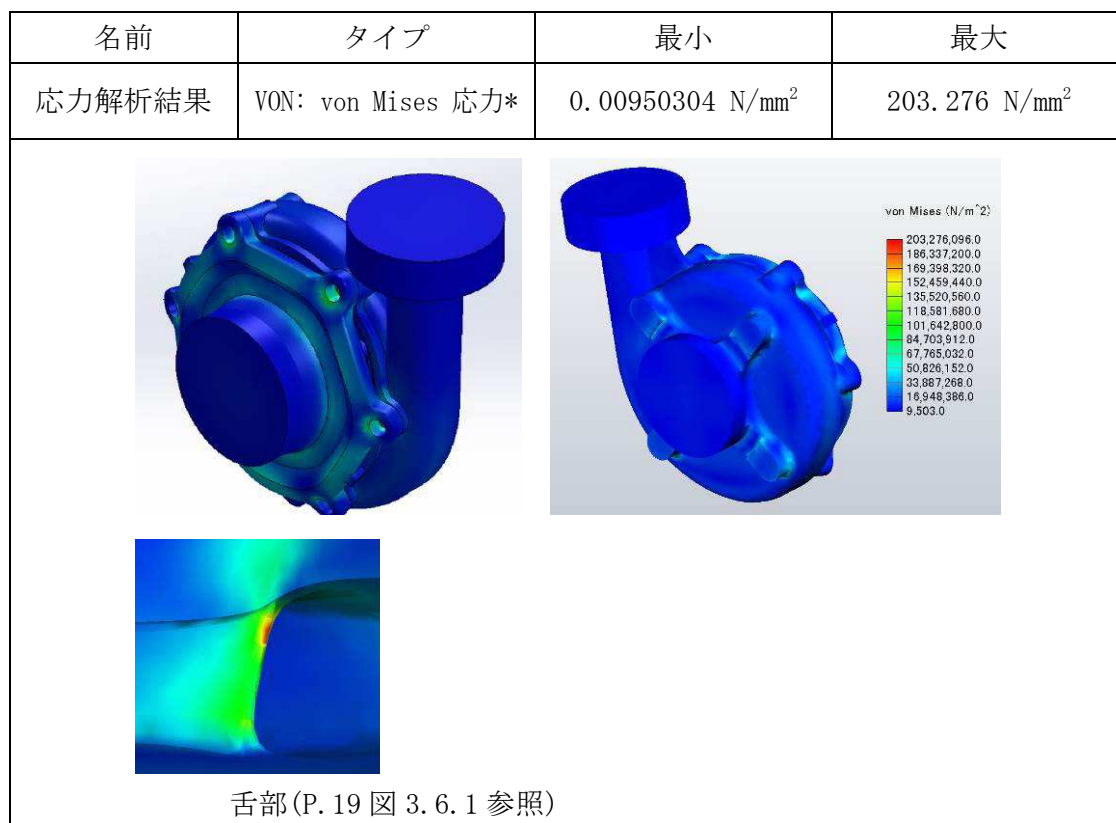


図 4.2.2.1 ケーシングの 1.5MPa の内圧による最大応力

* 補足説明 von Mises 応力とは概念を簡単に言うと多方向から複合的に荷重が加わるような応力場において、1 軸の引張または圧縮応力へ投影した値 (von Mises-Hencky 氏が提唱) が一般的に用いられる。

名前	タイプ	最小	最大
変位解析結果	URES: 合成変位	0 mm	1.45336 mm

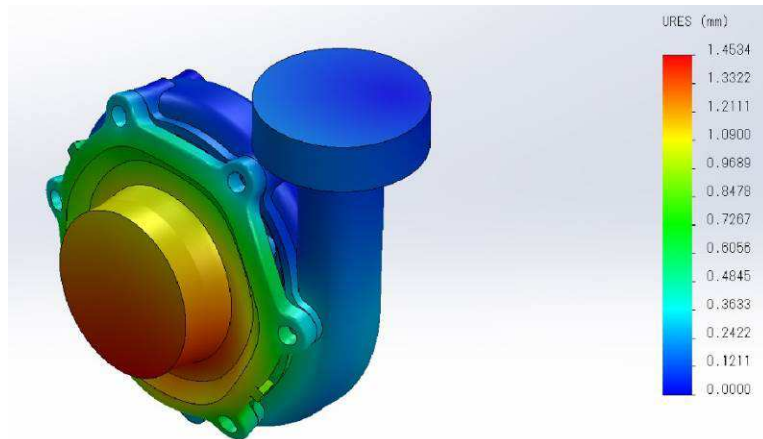
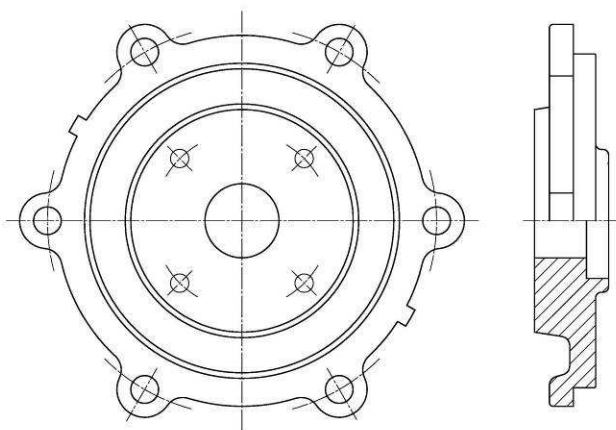


図 4.2.2.2 ケーシングの 1.5MPa の内圧による合成変位



平面図

側面図

図 4.2.2.3 サクションカバー図

4.2.3 横型渦巻ポンプの改良モデル機の試作

1) インペラの試作

インペラはCM-RI法で成形した。主板と側板の成形型は、FRP型より寸法精度に優れた金型で製作した。成形した主板と側板を接着剤と羽根部と同じFRP製のピンで接合した。

製作手順を下記に記す。

① 金型製作

主板側および側板側それぞれの金型をNC機械により加工した。最後に外部ポートやゴムパッキン、ガイドピンを設置した。

② 離型処理

主板側および側板側それぞれの金型に離型処理後、ゲルコート処理を行った。ゲルコートは約 $300\mu\text{m}$ の膜厚で表面処理する部分にカップガンを用いて塗布した。

③ ガラス繊維基材セット

乾燥したゲルコートの上から金型とガラス繊維を馴染ませるために下塗りとしてビニルエステル樹脂を塗り、ガラス繊維をセットした。

④ 型締め

ガラス繊維を金型にセット後、含浸の際に樹脂の漏洩が無いように固定した。

⑤ 含浸

樹脂注入器を用いて $0.3\sim 0.4\text{MPa}$ 相当の圧力で金型に樹脂を注入し、ガラス繊維に含浸した。

⑥ 脱型

樹脂の硬化後、金型全体に均等な力をかけて主板および側板それぞれの成形品を金型から引き抜いた。

⑦ 接合

主板と側板の接合面をサンドペーパーで荒らし、ビニルエステル樹脂で接着し、ピンを取り付け完成させた。(図4.2.3.1)



(a) 側板側（サクシオンカバー側）

(b) 主板側（電動機側）

図 4.2.3.1 インペラ試作モデル（接合後）

2) ケーシングの試作

上型、下型はFRP型で製作し、中子は発泡ウレタン材で製作した。

FRP型の製作には不飽和ポリエステル(2液タイプ)、チョップドストランドマット、ウレタン樹脂系発泡体を用いた。

FRP成形品にはビニルエステル樹脂、ガラス繊維はCFM（コンフィニアスフィラメントマット）、ステッチマット、UDクロスを用いた。

製作手順を下記に記す。

① FRP型修正

3.6.3にて製作した現用鋳物品と同形状のFRP型を4.2.2で設計した改良モデル機の形状の型に改造した。

② 上型、下型の表面処理

上型、下型に離型処理後、ゲルコート処理を行った。ゲルコートは約 $300\mu\text{m}$ の膜厚で表面処理する部分にカップガンを用いて塗布した。

③ ガラス繊維基材セット

乾燥したゲルコートの上から成型型とガラス繊維を馴染ませるために下塗りとしてビニルエステル樹脂を塗り、ガラス繊維をセットした。

ガラス繊維をセットする際には、ガラス繊維が成型型の中で隙間が生じないように重ね合わせた。(図4.2.3.2)



図 4.2.3.2 サクシオンカバーの型にガラス繊維をセット

④ 型締め

ガラス繊維を FRP 型にセット後、含浸の際に樹脂の漏洩が無いように固定した。

⑤ 含浸

樹脂注入器を用いて、0.3~0.4MPa 相当の圧力で型に樹脂を注入し、ガラス繊維に含浸した。

⑥ 脱型

樹脂の硬化後、型全体に均等な力をかけて上型、下型を引き抜いた。なお、ウレタン樹脂系発泡体の中子は成形品を傷つけないように切削除去した。

⑦ 仕上げ

仕上げは、型の合わせ面に発生したバリ取り作業を実施した。

(図 4.2.3.3、4.2.3.4)



(a) サクション配管側(外側)



(b) ケーシング本体側(内側)

図 4.2.3.3 サクションカバー改良モデル



(a) サクションカバー側



(b) 電動機側

図 4.2.3.4 ケーシング改良モデル

4.2.4 横型渦巻ポンプの改良モデル機の検証

現用鋳物品と改良モデル部品の重量検証を行った。

また、社内試験場においてケーシング改良モデルの水圧試験を実施した。

1) 重量検証

現用鋳物品と改良モデルの重量比較を表 4.2.4.1 に示す。

インペラ、ケーシング、サクシヨンカバーの合計重量は現用鋳物品が 17.9kg に対して、FRP 製改良モデル（繊維含有率約 40wt%）が 3.97kg となり、FRP 製改良モデルが試作モデル 2 に対して若干増えたものの約 78%の重量軽減が達成されている。

表 4.2.4.1 横型渦巻ポンプ部品の重量比較 （単位：kg）

項目 部品名	製品の種類	
	現用鋳物品	FRP 製 改良モデル
インペラ	2.2	0.34
ケーシング	10.5	2.39
サクシヨンカバー	5.2	1.24
合計	17.9 (100%)	3.97 (22.2%)

2) 水圧試験

改良モデルの水圧試験を実施した。(図 4.2.4.1)

表 4.2.4.2 に記載のひずみゲージを図 4.2.4.2 に示す位置に貼り、さらに変位を計測するため図 4.2.4.3 に示す位置にダイヤルゲージを取り付けた。図 4.2.4.4 の計測系統図と図 4.2.4.5 に示す昇圧パターンにて試験を実施した。最大耐圧を 1.5MPa に仮定して昇圧を行った。

この過程で約 1.3MPa でケーシングとカバーの合わせ面より、水漏れが発生した。調査の結果、0 リングのはみ出し事象が発生したため、これは FRP の弾性率が青銅鑄物製に比べ低いため、0 リングのつぶし代に対して、FRP 製供試体の変形量が大きいことが原因と考えられる。本試験により改良モデル機のケーシングでは 1.3MPa まで使用可能であることを確認した。よって通常の仕様範囲では問題なく使用可能である。なお、さらに高圧用途ではケーシングとカバーのボルト本数を増やす対策を実施すれば、最大耐圧である 1.5MPa で使用可能である。

0.4~1.3MPa 範囲の圧力 - ひずみグラフは図 4.2.4.6 に示す。応力値は表 4.2.4.3 と図 4.2.4.7 に示す通りである。

なお、1.5MPa に対する推定のひずみと応力値は表 4.2.4.4 に示す。



図 4.2.4.1 ケーシング改良モデルの水圧試験

表 4.2.4.2 ひずみゲージ一覧

番号	部位	ゲージ種類	備考
E1	サクシオンカバー	2 軸	R 部
E2	サクシオンカバー	2 軸	R 部
E3	サクシオンカバー	2 軸	R 部
E4	サクシオンカバー	2 軸	R 部
A3	ケーシング	2 軸	一般部
B3	ケーシング	2 軸	R 部
D1	ケーシング	2 軸	R 部
D2	ケーシング	2 軸	R 部

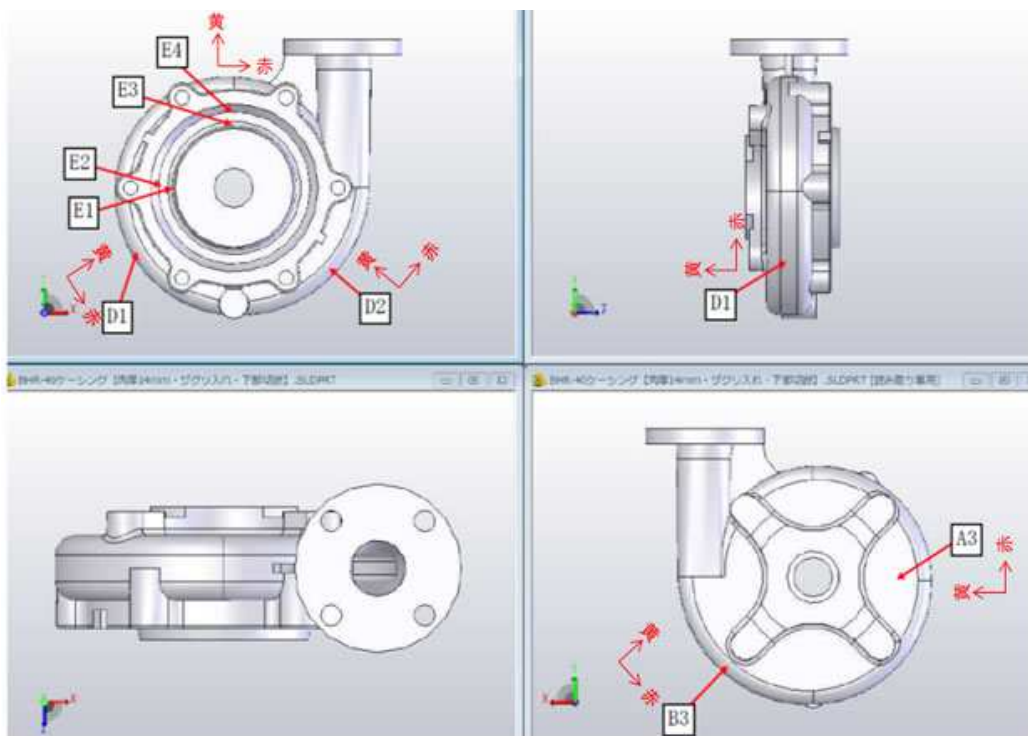


図 4.2.4.2 ひずみゲージ貼付位置

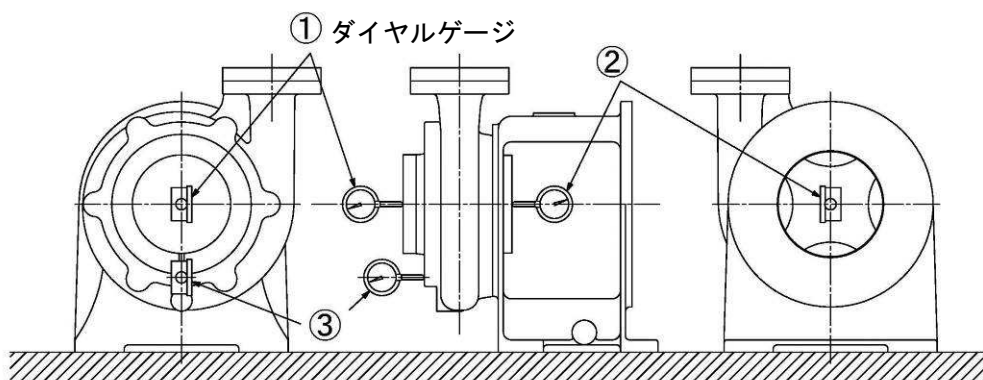


図 4.2.4.3 変位量測定位置

図 4.2.4.6 改良モデルの水圧試験 圧カーひずみグラフ

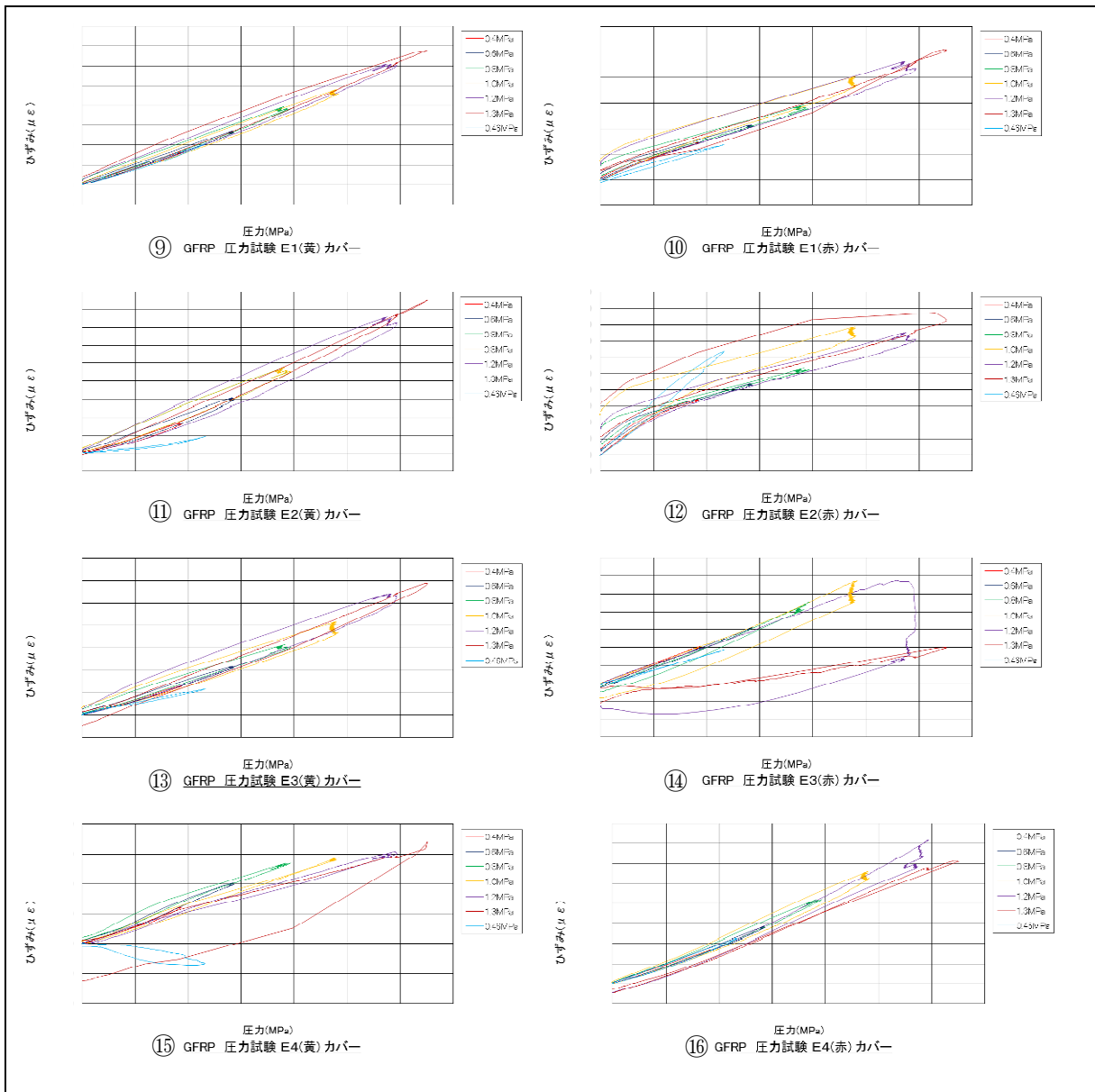


図 4.2.4.6 改良モデルの水圧試験 圧カーひずみグラフ

表 4.2.4.3 横型渦巻ポンプ 水圧試験の昇圧時における応力値

測定点名称	0.36MPa			
	測定ひずみ		応力	
	ϵ_x (赤)	ϵ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \epsilon$		MPa	
A3 ケーシング	170	325	2.1	2.9
B3 ケーシング	73	153	0.9	1.3
D1 ケーシング	-136	-812	-2.9	-6.6
D2 ケーシング	-196	-1033	-3.9	-8.4
E1 カバー	146	1619	4.9	12.8
E2 カバー	170	826	3.2	6.7
E3 カバー	95	1282	3.7	10.1
E4 カバー	330	239	3.1	2.6

測定点名称	0.56MPa			
	測定ひずみ		応力	
	ϵ_x (赤)	ϵ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \epsilon$		MPa	
A3 ケーシング	273	521	3.3	4.6
B3 ケーシング	120	208	1.4	1.9
D1 ケーシング	-243	-1402	-5.1	-11.3
D2 ケーシング	-305	-1617	-6.1	-13.1
E1 カバー	213	2688	7.8	21.2
E2 カバー	217	1524	5.2	12.2
E3 カバー	149	2152	6.1	16.9
E4 カバー	559	402	5.2	4.4

測定点名称	0.75MPa			
	測定ひずみ		応力	
	ϵ_x (赤)	ϵ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \epsilon$		MPa	
A3 ケーシング	388	719	4.6	6.4
B3 ケーシング	175	274	2.0	2.5
D1 ケーシング	-325	-1942	-7.0	-15.7
D2 ケーシング	-451	-2281	-8.7	-18.6
E1 カバー	289	3905	11.2	30.7
E2 カバー	264	2349	7.4	18.7
E3 カバー	202	3102	8.7	24.3
E4 カバー	823	530	7.6	6.0

測定点名称	0.95MPa			
	測定ひずみ		応力	
	ϵ_x (赤)	ϵ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \epsilon$		MPa	
A3 ケーシング	433	922	5.5	8.1
B3 ケーシング	204	626	3.0	5.3
D1 ケーシング	-379	-2341	-8.3	-18.9
D2 ケーシング	-607	-2893	-11.3	-23.7
E1 カバー	402	4775	14.1	37.7
E2 カバー	393	2821	9.5	22.6
E3 カバー	225	4145	11.3	32.4
E4 カバー	1112	554	9.8	6.8

測定点名称	1.14MPa			
	測定ひずみ		応力	
	ϵ_x (赤)	ϵ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \epsilon$		MPa	
A3 ケーシング	549	1122	6.8	9.9
B3 ケーシング	275	746	3.8	6.4
D1 ケーシング	-472	-2755	-10.0	-22.3
D2 ケーシング	-746	-3616	-14.1	-29.5
E1 カバー	460	6033	17.5	47.5
E2 カバー	374	3756	11.5	29.8
E3 カバー	65	5363	12.9	41.4
E4 カバー	1146	570	10.1	7.0

測定点名称	1.30MPa			
	測定ひずみ		応力	
	ϵ_x (赤)	ϵ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \epsilon$		MPa	
A3 ケーシング	630	1275	7.8	11.3
B3 ケーシング	336	751	4.3	6.6
D1 ケーシング	-542	-3139	-11.4	-25.4
D2 ケーシング	-815	-4084	-15.7	-33.3
E1 カバー	509	6789	19.6	53.4
E2 カバー	413	4262	13.0	33.7
E3 カバー	100	5878	14.3	45.4
E4 カバー	1217	683	10.9	8.1

表 4.2.4.4 1.5MPa の推定ひずみと応力

測定点名称	1.50MPa (推定)		組込み時の応力加算	
	応力		応力	
	σ_x (赤)	σ_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	MPa		MPa	
A3 ケーシング	8.9	12.9	9.4	13.3
B3 ケーシング	4.9	8.1	4.7	6.5
D1 ケーシング	-13.1	-29.5	-13.9	-31.1
D2 ケーシング	-18.2	-38.2	-18.6	-39.1
E1 カバー	22.6	61.2	23.3	64.1
E2 カバー	15.1	37.9	14.6	38.8
E3 カバー	17.1	52.7	17.3	53.6
E4 カバー	13.8	9.8	14.0	9.9

※1.5MPa の推定は、0.95MPa(増し締め後)以降を直線近似にて算出

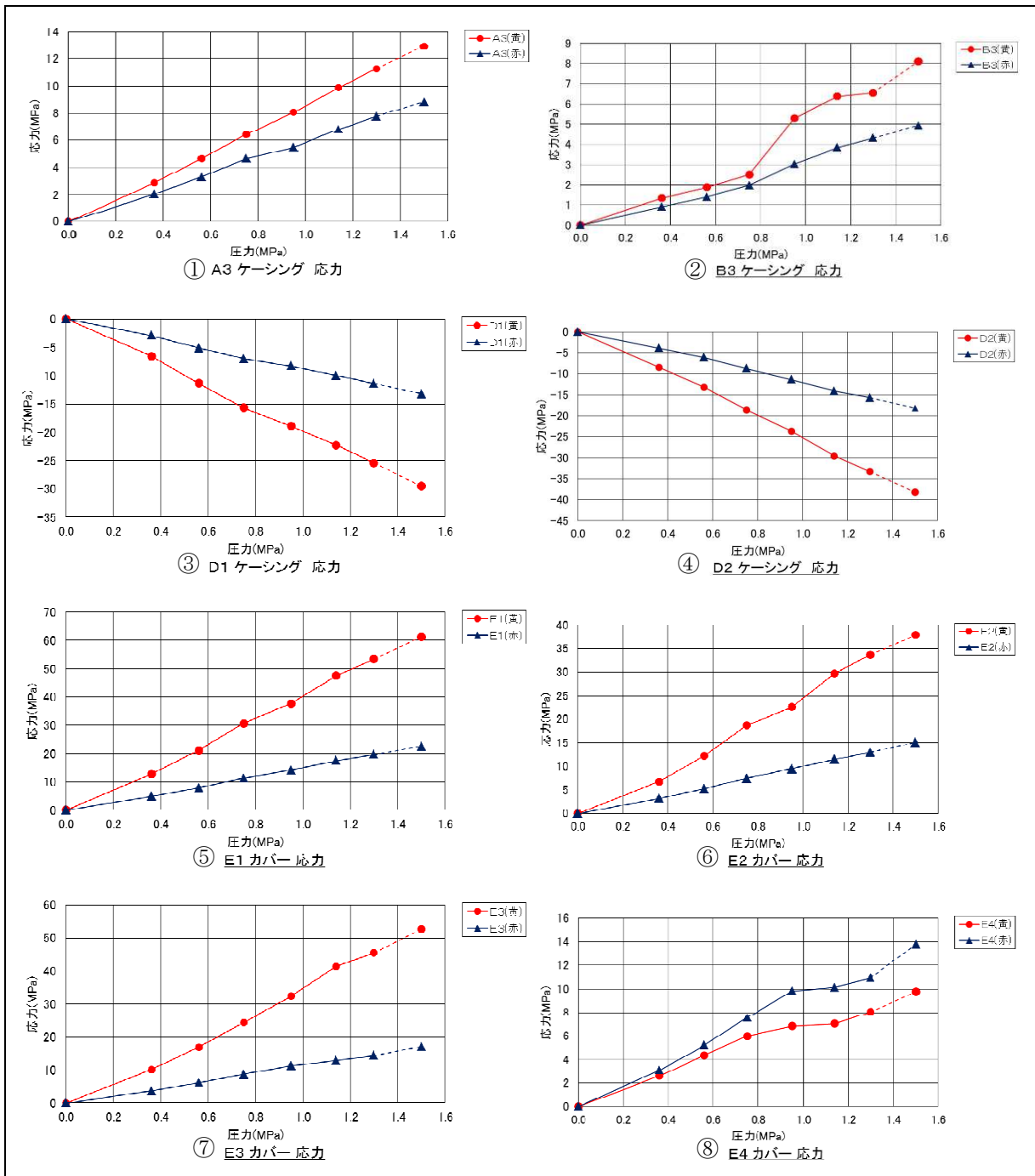


図 4.2.4.7 改良モデル機の水圧試験 圧力-応力グラフ

4.3 立型渦巻ポンプのモデル機的设计、試作、検証

立型ポンプの仕様概要はP. 18の表 3.5.1 に示す通りである。

表 4.3.1 の寸法比較表に示す通り、立型現用鋳物機は横型に比べ、大きくなる。また、横型現用鋳物機では中央のフレームがそれぞれ電動機とポンプの重量を支える。

一方、立型現用鋳物機はフレームを介して支える構造になっており、ケーシングの支持構造設計は厳しくなる。このため立型現用鋳物機では電動機の重量支持は独立させて、ポンプケーシングに重量がかからない構造で設計した。

表 4.3.1 横型現用鋳物機と立型現用鋳物機の寸法比較

横型現用鋳物機	立型現用鋳物機

4.3.1 立型渦巻ポンプインペラの設計

1) 製造法

横型と立型渦巻ポンプでは羽根形状が異なる。(P. 16の図 3.4.2、図 3.4.3 参照)
 横型渦巻ポンプのインペラは、2次元羽根で立型渦巻ポンプは3次元羽根である。
 立型渦巻ポンプのインペラは、横型に比べ流路幅が広いこと、ウレタン樹脂系発泡体の中子を除去することが容易であることから一体成形で問題はない。

2) 軸嵌合部

インペラの軸嵌合構造は電動機のトルクを伝達する重要な部分である。現用鋳物品にはキー溝が1箇所加工されており、キー溝面に圧縮応力がかかり、溝のコーナー部には応力が集中する。キー溝部の強度計算結果は3.6.2(P. 21)に示す通り、引張応力は61 MPaであった。これに対し、FRPの 10^7 回疲労強度は文献¹⁰⁾より29 MPaであることから、図 4.3.1 に示す通り、軸嵌合部に金属インサートを埋め込み、応力負

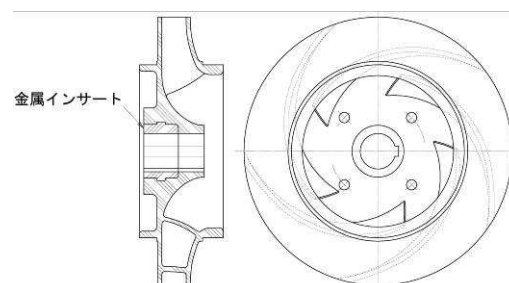


図 4.3.1 インペラ断面図
 平面図

荷に対する強度を確保した。FRP と金属インサートの境界部の接着強度については、金属インサートにスプライン加工を施し、FRP との接着面積を増加させることにした。(P.67 図 4.3.3.2)

4.3.2 立型渦巻ポンプケーシングの設計

現用鋳物品および試作のケーシングとケーシングカバーの 3D モデルを図 4.3.2.1 に示す。

現用鋳物品は据付座の大きさや一般部の肉厚をできる限り削減し、リブで補強した構造となっている。

FRP 材料を用いた最適形状を設計するに当たり、FRP 材の特徴である強化繊維の連続性の保持による強度面の向上を図るため、ケーシングのリブなどの複雑形状を取り除いた単純形状へ改良した。

横型渦巻ポンプケーシングの知見を踏まえて、形状、肉厚、カバー取り付け穴数を決定した。また、一般立型渦巻ポンプの吐出圧力を考慮し、ケーシング耐圧を 0.9MPa とし、構造解析を実施、試作機の肉厚、形状を決定した。

現用鋳物品で採用されている電動機および回転体重量の共通支持構造は図 4.3.2.2 に示す構造であるが、これは独立支持構造(図 4.3.2.3)に変更した。

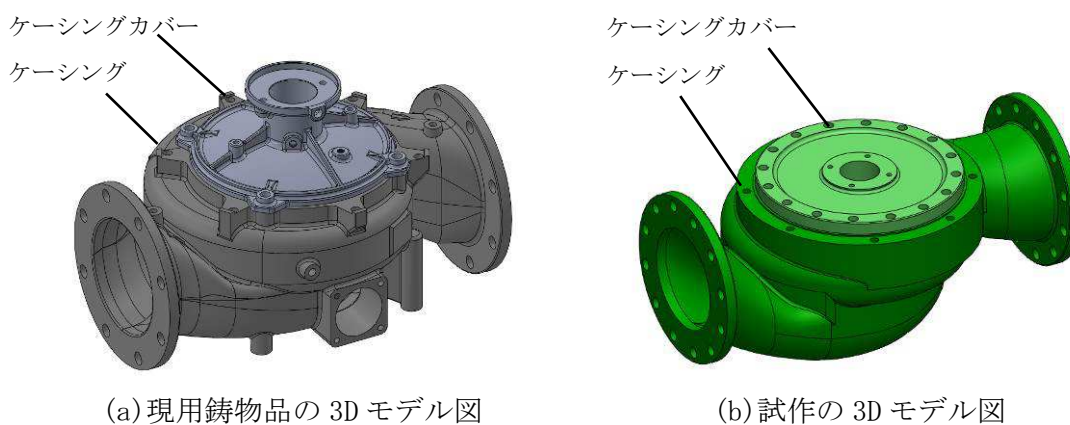


図 4.3.2.1 立型渦巻ポンプモデル(PC-3D)

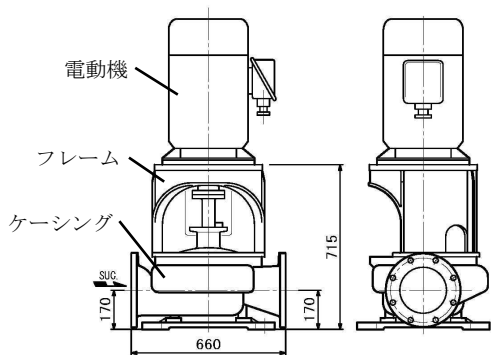


図 4.3.2.2 現用鋳物機外形図

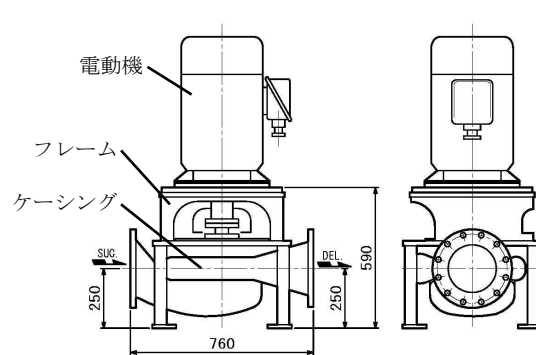


図 4.3.2.3 試作モデル機外形図

1) 現用鋳物品の構造解析

ケーシングにかかる応力分布を確認するため、現用鋳物品形状の解析モデルにて吸込、吐出フランジ面および足部の底面を固定条件として、0.9 MPa の内圧および上部の重量物（電動機やフレームなど）580 kg の負荷条件下での最大応力ならびに合成変位を解析した。

解析モデルおよび結果を図 4.3.2.4、図 4.3.2.5、図 4.3.2.6 に示す。

メッシュタイプ	固体メッシュ
総節点数	727219
総要素数	432327



図 4.3.2.4 現用鋳物品のメッシュ分割図

名前	タイプ	最小	最大
応力解析結果	VON: von Mises 応力	0.0372201 N/mm ²	300 N/mm ²

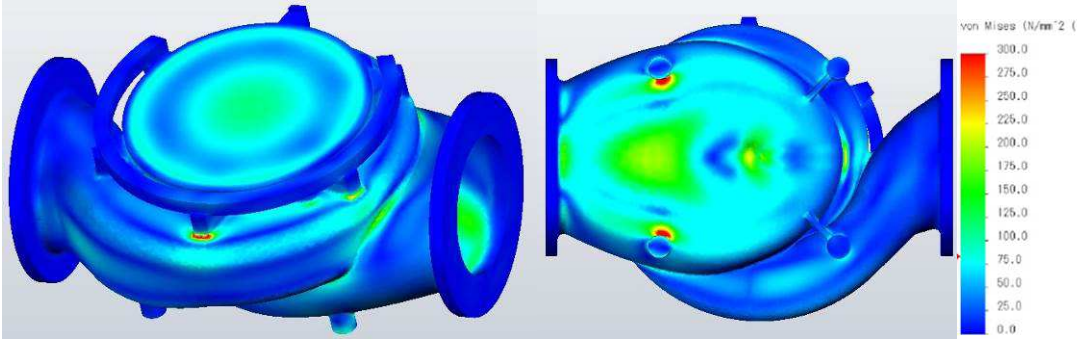


図 4.3.2.5 現用鋳物品の 0.9MPa の内圧による最大応力

名前	タイプ	最小	最大
変位解析結果	URES: 合成変位	0 mm(固定点)	1.52802 mm

図 4.3.2.6 現用鋳物品の 0.9MPa の内圧による合成変位

図 4.3.2.5 に示す通り、全体的に高い応力が発生しており、図 4.3.2.6 に示す底部では変位が大きいことがわかった。そこで全体の肉厚を増やし、変位が大きい底部は球面形状とする。この形状の解析モデル(PC-3D)を作成し、構造解析を実施することにした。

2) FRP ケーシングモデルの構造解析

リップなどを無くし単純形状にしたケーシングの解析 3D モデル(PC-3D)を作成(図 4.3.2.7)し、0.9MPa の内圧条件下での最大応力、ならびに合成変位の解析結果を図 4.3.2.8、図 4.3.2.9 に示す。

解析結果よりケーシング内部の舌部に最大応力が見られるため、コーナーを丸めることで応力を分散させた。その他では局所的な応力集中は見られないことから、図 4.3.2.1(b)、図 4.3.2.3 に示す改良設計の構造を採用して、試作することにした。

メッシュタイプ	固体メッシュ
総節点数	147279
総要素数	91567

図 4.3.2.7 FRP ケーシングモデルのメッシュ分割図

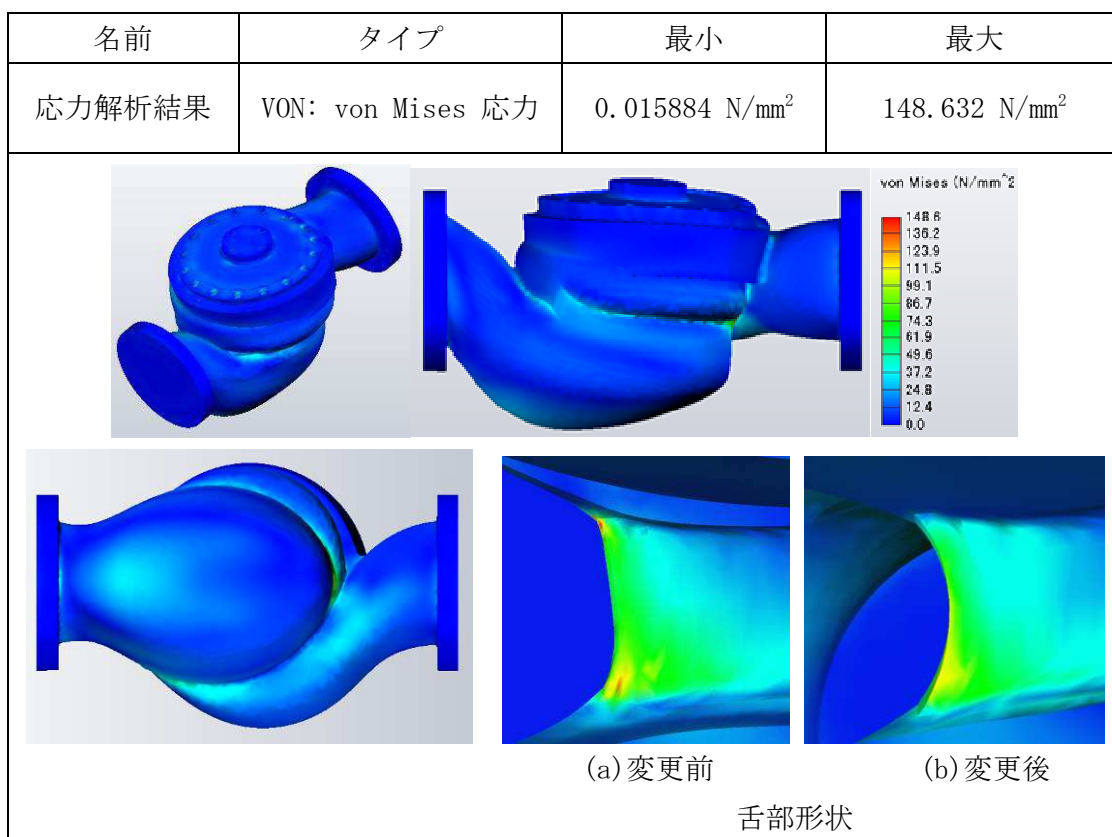


図 4.3.2.8 FRP ケーシングモデルの 0.9MPa の内圧による最大応力

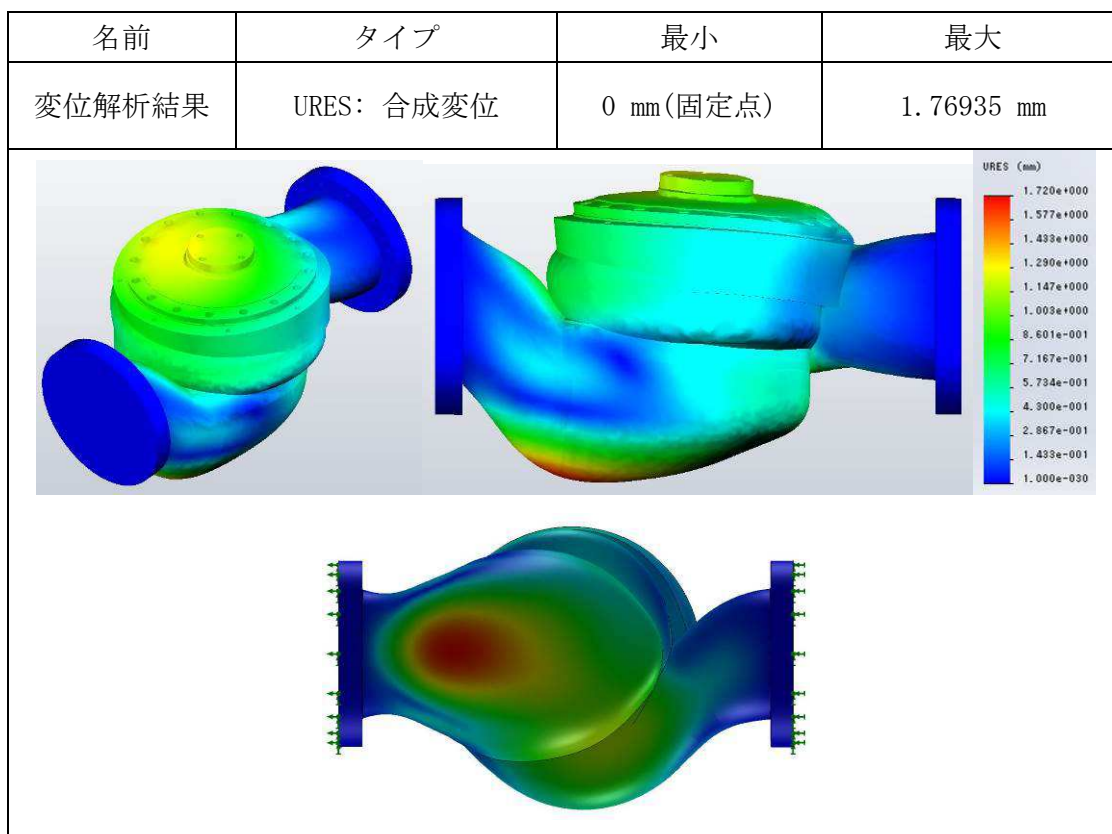


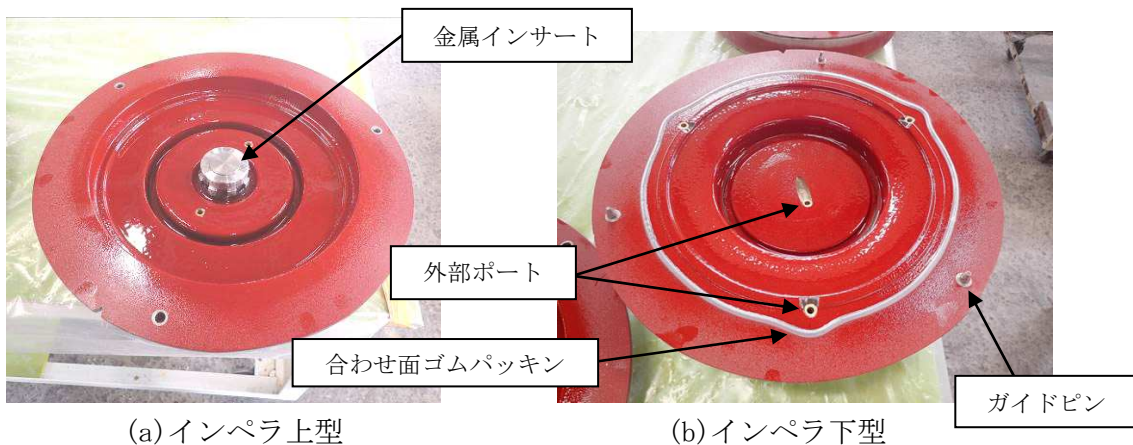
図 4.3.2.9 FRP ケーシングモデルの 0.9MPa の内圧による合成変位

4.3.3 立型渦巻ポンプインペラの試作

立型渦巻ポンプのインペラはハンドレイアップ法で製作したFRP型を用い、軸嵌合部には金属インサート(図4.3.3.1(a)、4.3.3.2)を装着して、CM-RI法による一体成形で試作を行った。

FRP型の製作には不飽和ポリエステル(2液タイプ)、チョップドストランドマット、ウレタン樹脂系発泡体(図4.3.3.1(c)に示す)を用いた。

FRP成形品にはビニルエステル樹脂、ガラス繊維はCFM(コンフィニアスフィラメントマット)、ステッチマット、UDクロスを用いた。製作手順を下記に記す。



(c) インペラ中子

(一体成形用サーフェイサー処理前)



(d) インペラ中子

(一体成形用サーフェイサー処理後)

図 4.3.3.1 FRP 製立型渦巻ポンプインペラ成形型



図 4.3.3.2 金属インサート

① 上型、下型、中子製作

現用鋳物品のインペラ（現型）にサーフェイサー（青色塗料）を施し、表面を平滑にした。これを基にFRP用の上型、下型をハンドレイアップ法にて製作した。

中子はウレタン樹脂系発泡体を用いてNC機械で加工し、表面にサーフェイサー（灰色塗料）（図4.3.3.1(d)）を施し、表面を平滑にした。

上型、下型は樹脂の注入による圧力や脱型の際の衝撃による破損を防ぐため、ウレタン樹脂系発泡体を芯としたリブによる補強を行い、最後に外部ポートを設置した。

② 上型、下型の表面処理

上型、下型に離型処理後、ゲルコート処理を行った。ゲルコートは約 $300\mu\text{m}$ の膜厚で表面処理する部分にカップガンで塗布した。

③ ガラス繊維基材セット

乾燥したゲルコートの上から成型型とガラス繊維を馴染ませるために下塗りとしてビニルエステル樹脂を塗り、ガラス繊維をセットした。

ガラス繊維を型にセットする際にガラス繊維が成型型の中で隙間が生じないように重ね合わせた。（図4.3.3.3）



(a) インペラ下型



(b) インペラ中子

図 4.3.3.3 インペラの型にガラス繊維をセット

④ 型締め

ガラス繊維を成型型にセットし終わると上型、下型を含浸の際に合わせ面から樹脂の漏洩が無いように固定した。

⑤ 含浸

樹脂注入器を用いて、 $0.3\sim 0.4\text{MPa}$ 相当の圧力で型に樹脂を注入し、ガラス繊維に含浸した。

⑥ 脱型

樹脂の硬化後、型全体に均等な力をかけて上型、下型を引き抜いた。なお、ウレタン樹脂系発泡体の中子は成形品を傷つけないように切削除去した。

⑦ 仕上げ

仕上げは、型の合わせ面に発生したバリ取り作業を実施した。(図 4.3.3.4)



図 4.3.3.4 FRP 製立型渦巻ポンプインペラ
試作モデル (完成)

4.3.4 立型渦巻ポンプケーシングの試作

立型渦巻ポンプのケーシングおよびケーシングカバーはハンドレイアップ法で製作した FRP 型を用い、CM-RI 法による一体成形で試作した。

FRP 型の製作には不飽和ポリエステル(2液タイプ)、チョップドストランドマット、ウレタン樹脂系発泡体を用いた。

FRP 成形品にはビニルエステル樹脂、ガラス繊維は CFM (コンフィニアスフィラメントマット)、ステッチマット、UD クロスを用いた。

製作手順を下記に記す。

① 現型製作

3D モデルから人工木材を用いて、現型を製作した。(図 4.3.4.1)



(a) ケーシング現型

(b) ケーシングカバー現型

図 4.3.4.1 FRP 製立型渦巻ポンプ現型

② 上型、下型、中子製作

現型にサーフェイサー(青色塗料)(図 4.3.4.2)を施し、表面を平滑にした。現型を用いて、上型、下型をハンドレイアップ法にて成形した。成形後に合わせ面へのパッキン、外部ポートを設置した。(図 4.3.4.4)

中子はウレタン樹脂系発泡体を用いて、NC 機械で加工し、表面にサーフェイサー(灰色塗料)を施し、表面を平滑にした。(図 4.3.4.3)



図 4.3.4.2 ケーシングカバー
現型および下型



図 4.3.4.3 ケーシング中子

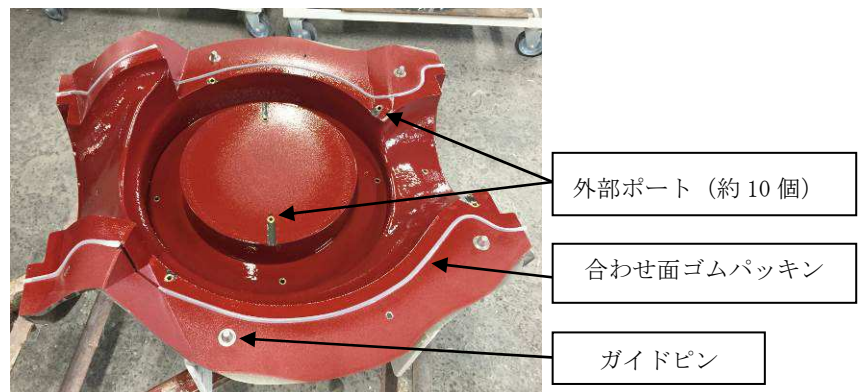


図 4.3.4.4 FRP 製立型渦巻ポンプケーシング成形型

③ 上型、下型の表面処理

上型、下型に離型処理後、ゲルコート処理を行った。ゲルコートは約 $300\mu\text{m}$ の膜厚で、表面処理する部分にカップガンで塗布した。

④ ガラス繊維基材セット

乾燥したゲルコートの上から成形型とガラス繊維を馴染ませるために下塗りとしてビニルエステル樹脂を塗り、ガラス繊維をセットした。

(図 4.3.4.5)

ガラス繊維を型にセットする際にガラス繊維が成形型の中で隙間が生じないように重ね合わせた。



図 4.3.4.5 ケーシングカバーの型に
ガラス繊維をセット

⑤ 型締め

ガラス繊維を成形型にセットし終わると上型、下型を含浸の際に合わせ面から樹脂の漏洩が無いように固定した。

⑥ 含浸

樹脂注入器を用いて 0.3~0.4MPa 相当の圧力で型に樹脂を注入し、ガラス繊維に含浸した。

⑦ 脱型

現用鋳物品の場合、主型および中子は砂型製作で鋳造し固化後、砂型を壊すが、FRP 成形の場合、上型、下型は FRP 型を用いるため、脱型では成形品および上型、下型にダメージを与えないように型全体に均等な力をかけて引き抜いた。

⑧ 仕上げ

仕上げは、型の合わせ面に発生したバリ取り作業を実施した。

(図 4.3.4.6、4.3.4.7)



(a) 正面側

(b) ケーシングカバー取付側

図 4.3.4.6 ケーシング試作モデル (バリ取り後)



(a) 上面側

(b) 内面側

図 4.3.4.7 ケーシングカバー試作モデル (バリ取り後)

4.3.5 立型渦巻ポンプのモデル機の検証

1) 重量検証

現用鋳物品と FRP 製試作モデルの重量比較を表 4.3.5.1 に示す。

ケーシング、ケーシングカバー、インペラの合計重量が青銅鋳物製の 120.7kg に対し、FRP 製試作モデル（繊維含有率約 40wt%）では 40.9kg になり、約 66%の重量軽減が達成された。

表 4.3.5.1 立型渦巻ポンプ部品の重量比較 (単位: kg)

部品名	製品の種類	
	現用鋳物品	FRP 製 試作モデル
インペラ	9.1	2.2
ケーシング	90.1	29.0
ケーシングカバー	21.5	9.7
合計	120.7(100%)	40.9(33.9%)

2) 立型渦巻ポンプ水圧試験

試作モデル機の水圧試験を実施した。(図 4.3.5.1 参照)

図 4.3.5.2 に示す位置にひずみゲージを貼り、さらに図 4.3.5.3 に示す位置にダイヤルゲージを取り付け変位を計測した。図 4.3.5.4 の計測系統図と図 4.3.5.5 に示す昇圧パターンにて試験を実施した。ケーシング外面には構造解析の応力分布を基に各部にひずみゲージを貼り付けて応力を計測した。

試験要領としてはひずみの挙動を確認しながら 3 回の昇圧を繰り返し、最大耐圧 0.9MPa を仮定し水圧を行ったが、昇圧中約 0.7MPa で異音と 1ヶ所微小の水漏れ事象が発生したため、0.7MPa、15分保持に変更した。試験結果は図 4.3.5.6 に圧力-ひずみ計測結果を示し、表 4.3.5.2 に最大応力を示し、図 4.3.5.7 に圧力-応力グラフを示し、図 4.3.5.8 に変位量計測結果を示す。

0.7MPa 内圧条件下での最大応力、ならびに合成変位を解析した結果を図 4.3.5.9、図 4.3.5.10 に示す。ケーシングの底部③の位置における変位量は、構造解析では 1.05mm (P.80 図 4.3.5.10) であるのに対し、測定値は 1.01mm (表 4.3.5.3) とほぼ同じ結果になることが確認できた。

本試験により試作モデル機のケーシングでは 0.7MPa まで使用可能である。



図 4.3.5.1 立型渦巻ポンプケーシング水圧試験

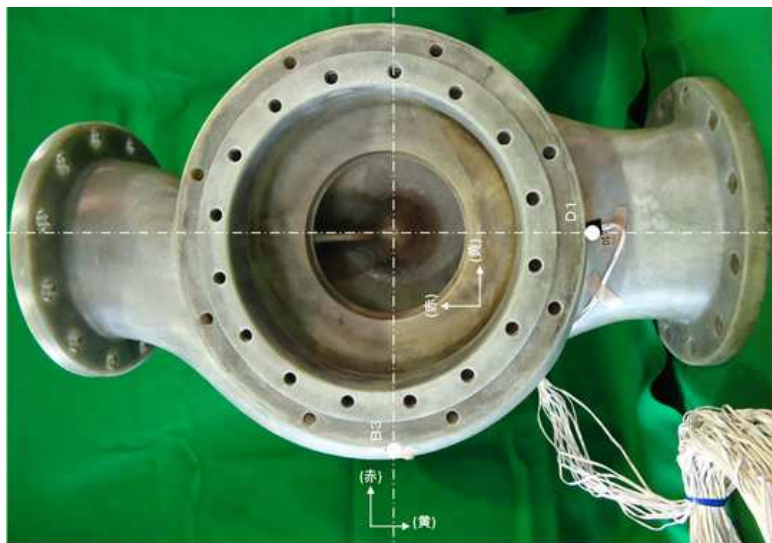
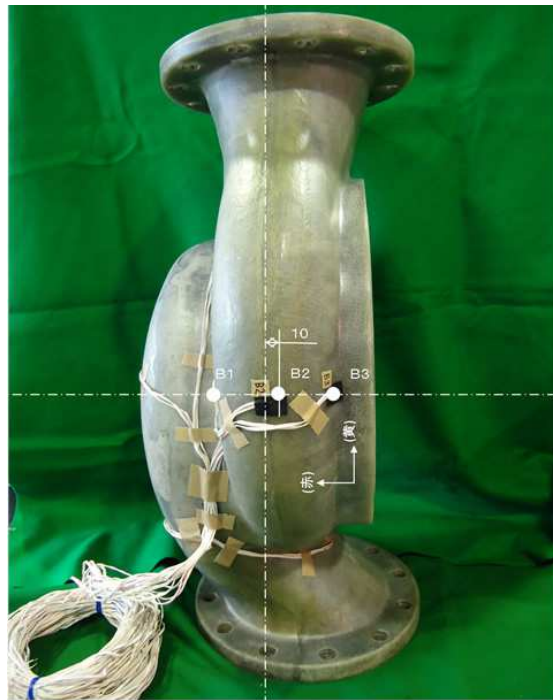
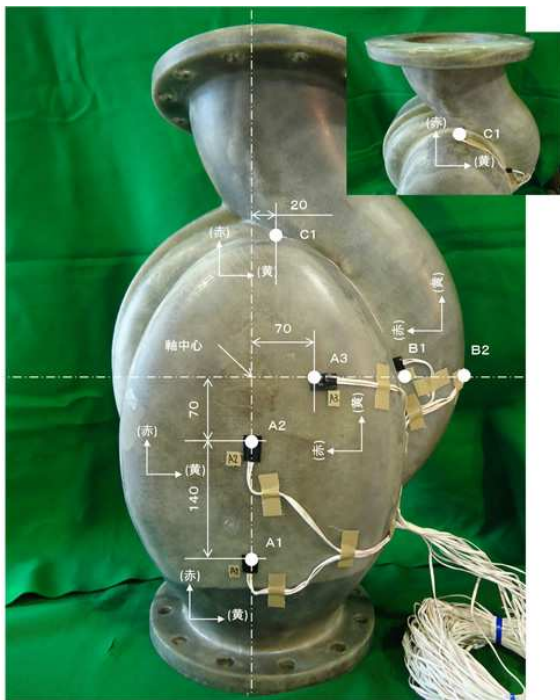


図 4.3.5.2 ひずみゲージ貼付位置

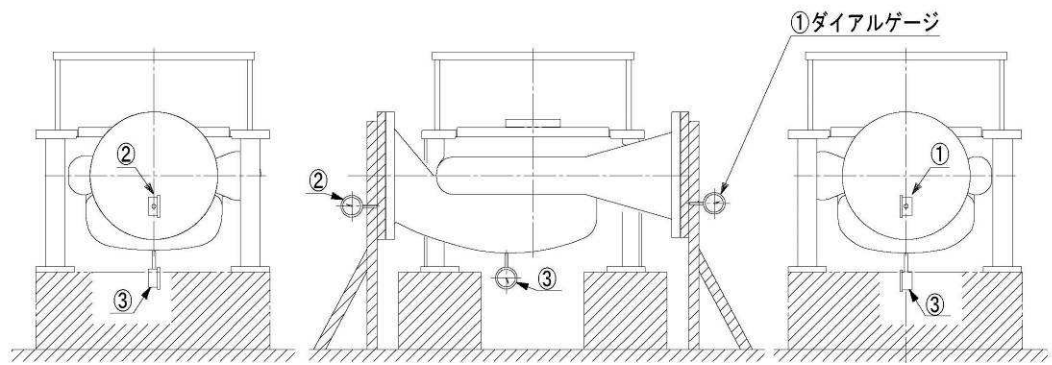


図 4.3.5.3 変位置測定位置

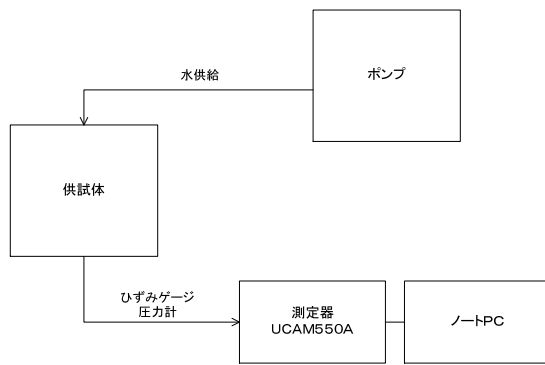


図 4.3.5.4 計測系統図

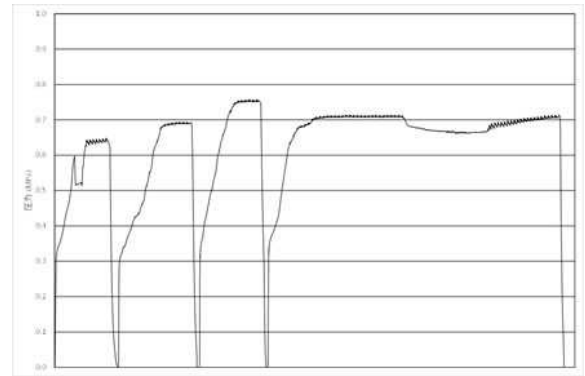


図 4.3.5.5 水圧試験昇圧パターン

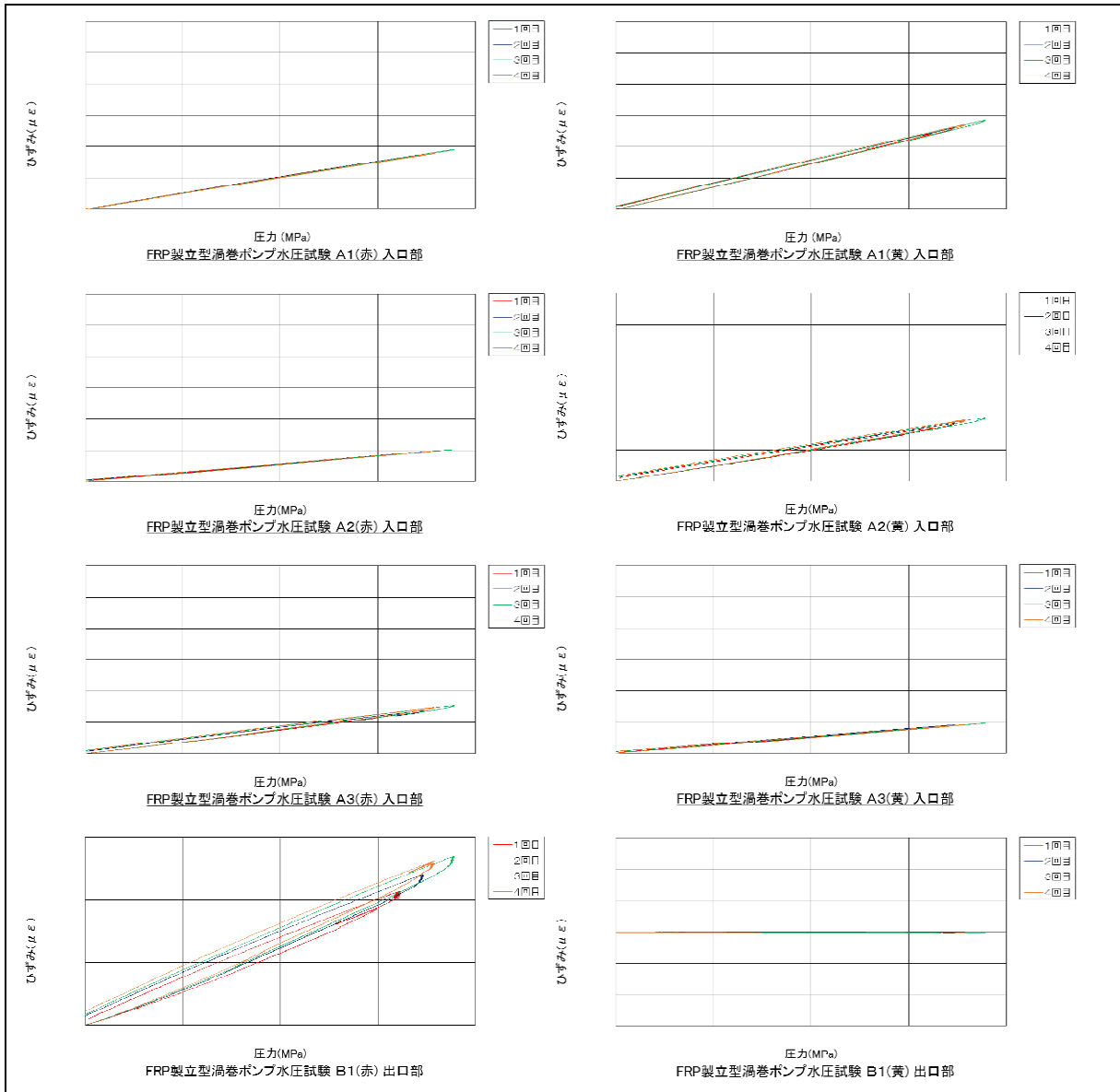


図 4.3.5.6 試作モデルの水圧試験 圧力-ひずみグラフ

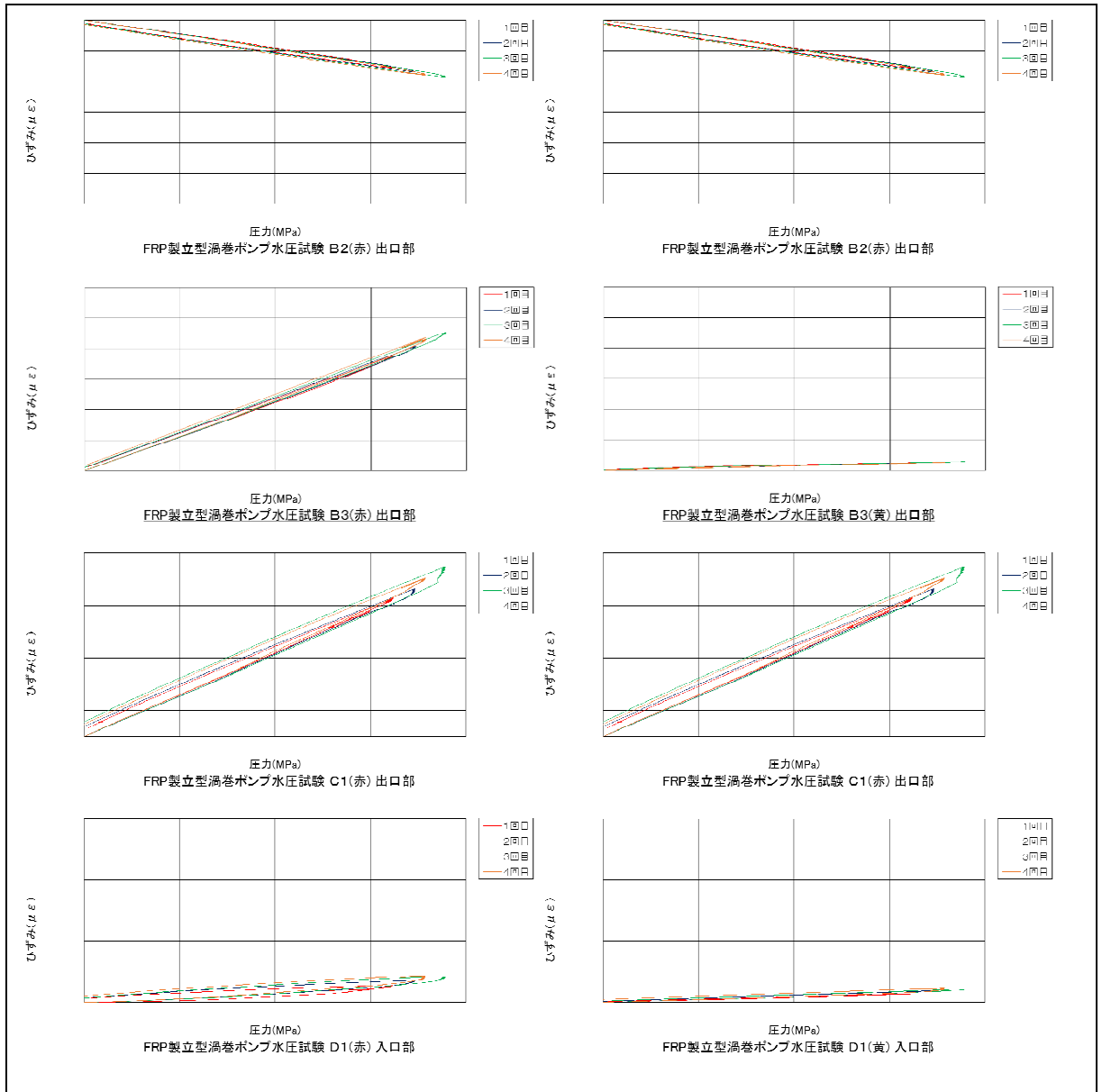


図 4.3.5.6 試作モデルの水圧試験 圧力-ひずみグラフ

表 4.3.5.2 試作モデルの水圧試験の昇圧時における応力値

測定点名称	0.65MPa 1回目試験最大圧力			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	818	1223	9.1	11.3
A 2 入口部	438	846	5.3	7.5
A 3 入口部	645	408	5.9	4.6
B 1 出口部	2145	-9	16.5	4.9
B 2 出口部	-781	-430	-7.0	-5.1
B 3 出口部	1882	134	14.8	5.4
C 1 入口部	5294	679	42.3	17.4
D 1 入口部	282	145	2.5	1.8

測定点名称	0.69MPa 2回目試験最大圧力			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	873	1300	9.7	12.0
A 2 入口部	476	915	5.8	8.1
A 3 入口部	682	449	6.3	5.0
B 1 出口部	2382	-16	18.3	5.4
B 2 出口部	-835	-466	-7.5	-5.5
B 3 出口部	2030	137	15.9	5.7
C 1 入口部	5580	791	44.8	19.0
D 1 入口部	351	187	3.1	2.2

測定点名称	0.76MPa 3回目試験最大圧力			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	946	1418	10.5	13.1
A 2 入口部	515	1004	6.3	8.9
A 3 入口部	764	477	7.0	5.4
B 1 出口部	2676	-13	20.6	6.1
B 2 出口部	-922	-526	-8.3	-6.2
B 3 出口部	2259	149	17.7	6.4
C 1 入口部	6437	995	51.8	22.5
D 1 入口部	409	209	3.6	2.6

測定点名称	0.72MPa 4回目試験最大圧力			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	884	1361	9.9	12.5
A 2 入口部	488	976	6.0	8.6
A 3 入口部	737	455	6.7	5.2
B 1 出口部	2626	-7	20.2	6.0
B 2 出口部	-899	-502	-8.1	-5.9
B 3 出口部	2180	134	17.1	6.1
C 1 入口部	6054	1026	48.9	21.9
D 1 入口部	435	231	3.9	2.8

測定点名称	0.40MPa※			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	506	737	5.6	6.8
A 2 入口部	264	509	3.2	4.5
A 3 入口部	387	245	3.5	2.8
B 1 出口部	1311	-6	10.1	3.0
B 2 出口部	-472	-266	-4.2	-3.1
B 3 出口部	1155	78	9.1	3.3
C 1 入口部	3259	460	26.1	11.1
D 1 入口部	159	96	1.4	1.1

測定点名称	0.60MPa※			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	755	1111	8.4	10.3
A 2 入口部	400	772	4.9	6.9
A 3 入口部	589	370	5.4	4.2
B 1 出口部	2027	-7	15.6	4.6
B 2 出口部	-712	-408	-6.4	-4.8
B 3 出口部	1755	115	13.8	4.9
C 1 入口部	4898	721	39.3	16.9
D 1 入口部	273	153	2.5	1.8

測定点名称	0.70MPa※			
	測定ひずみ		応力	
	ε_x (赤)	ε_y (黄)	σ_x (赤)	σ_y (黄)
	$\mu \varepsilon$		MPa	
A 1 入口部	875	1308	9.7	12.1
A 2 入口部	475	923	5.8	8.2
A 3 入口部	702	440	6.4	5.0
B 1 出口部	2462	-15	18.9	5.6
B 2 出口部	-846	-480	-7.6	-5.6
B 3 出口部	2073	134	16.3	5.8
C 1 入口部	5834	911	47.0	20.5
D 1 入口部	361	191	3.2	2.3

※ 4 回目試験(15 分保持)昇圧中データを表示

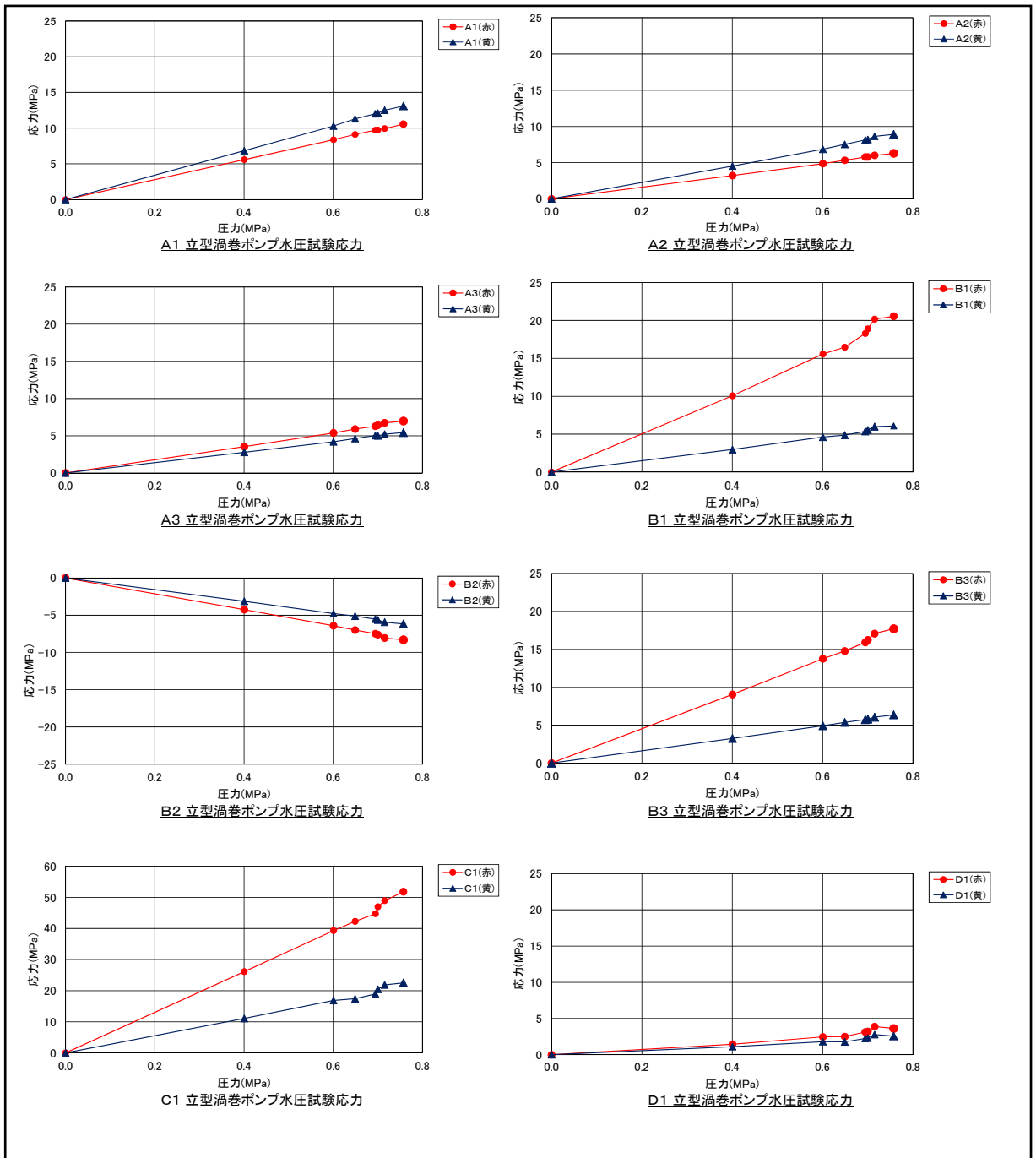


図 4.3.5.7 試作モデルの水圧試験 圧力-応力グラフ

表 4.3.5.3 立型渦巻ポンプケーシングの変位量計測結果

(単位：mm)

計測位置	昇圧回数	1 回目		2 回目		3 回目		15 分間保持	
	満水時 圧力	0MPa	0.6MPa	0MPa	0.64MPa	0MPa	0.75MPa	0MPa	0.7MPa
①	0.01	0.24	0	0.20	0	0.23	0	0.22	0
②	0	0.05	0.01	0.09	0.01	0.06	0.02	0.03	0.01
③	0.07	0.7	0.07	0.88	0.07	1.01	0.03	1.01	0.05

水圧試験における変位量

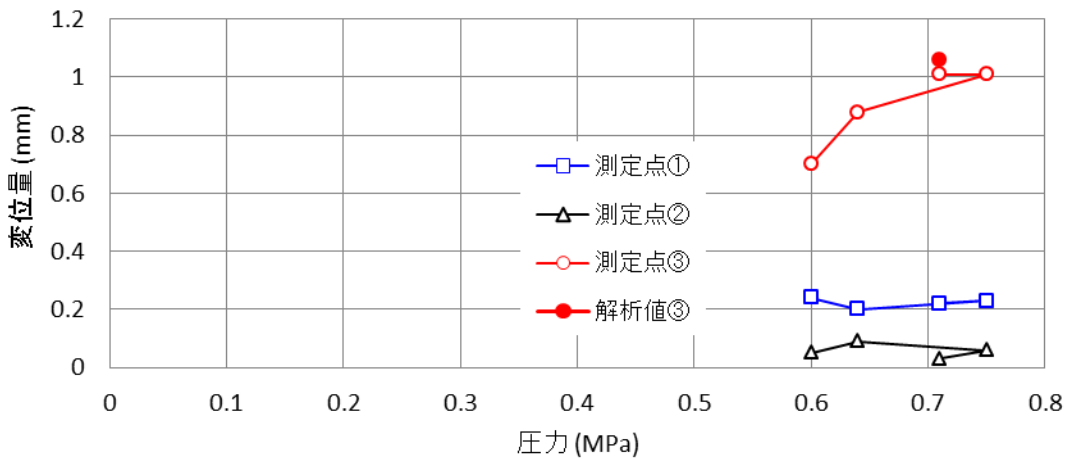


図 4.3.5.8 立型渦巻ポンプケーシングの変位量測定結果

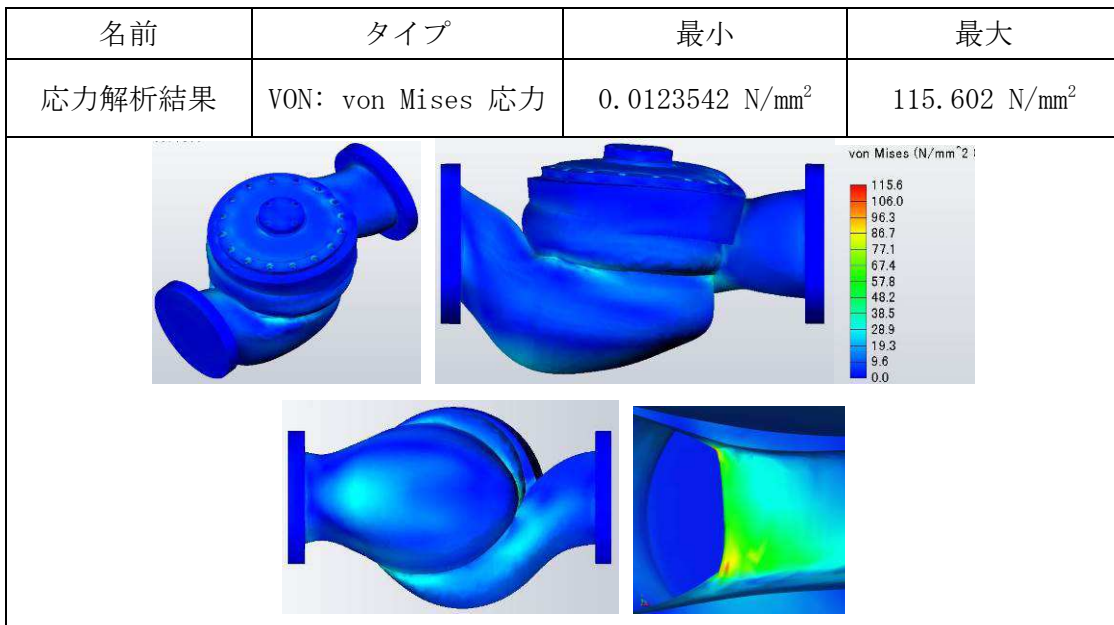


図 4.3.5.9 FRP ケーシングモデルの 0.7MPa の内圧による最大応力

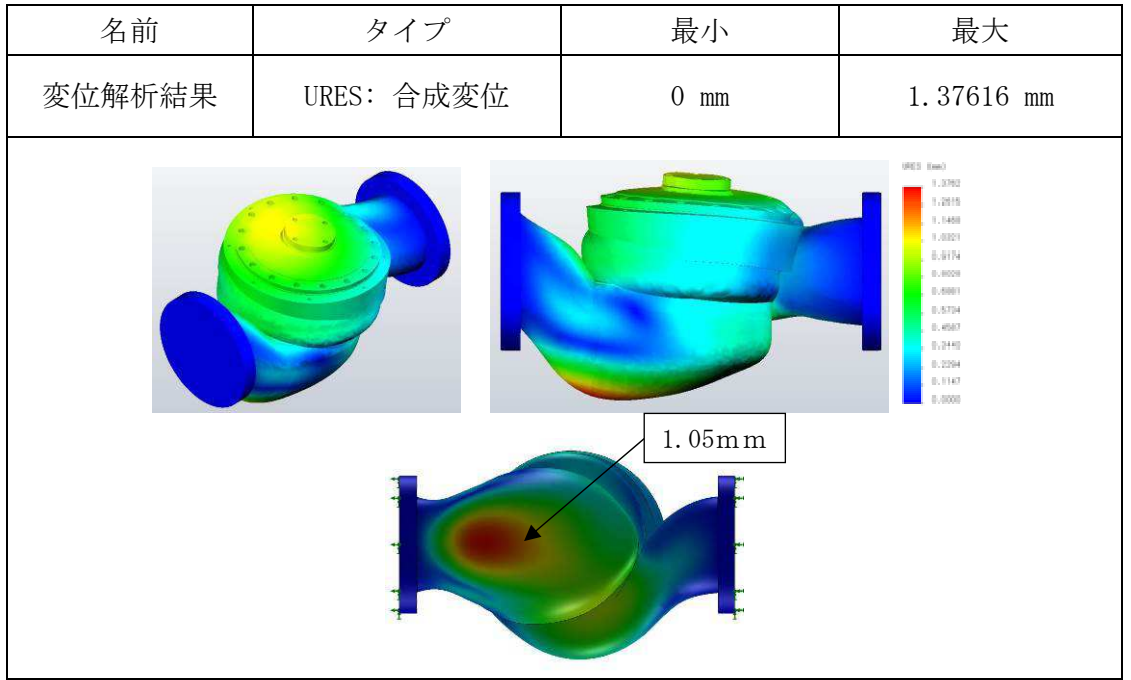


図 4.3.5.10 FRP ケーシングモデルの 0.7MPa の内圧による合成変位

4.4 性能試験

4.4.1 横型渦巻ポンプのモデル機の性能試験

1) 性能試験

社内試験場にて現用鋳物品と FRP 製試作モデル機の性能試験を実施した。
性能試験装置図を図 4.4.1.1、装置図記号説明を表 4.4.1.1 に示す。

2) 表面粗さ測定

試験前に現用鋳物品および FRP 製試作モデル機のインペラ、ケーシングの表面粗さを測定した。測定の結果、インペラ、ケーシングとも現用鋳物品が $50 \mu\text{m}$ 、FRP 製試作モデル機が $6 \mu\text{m}$ であった。

3) インペラ寸法の測定

インペラの製作精度は性能に影響を与えるため現用鋳物品および FRP 製試作モデル機それぞれの寸法を測定した。測定の結果、現用鋳物品と FRP 製試作モデル機の流路幅に僅かな寸法差異が確認されたため、現用鋳物品の流路幅を FRP 製試作モデル機に合わせる形で修正した。

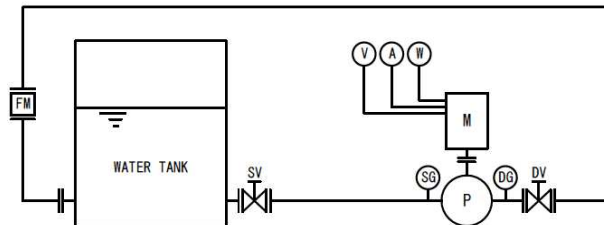


図 4.4.1.1 横型渦巻ポンプモデル機の性能試験装置図

表 4.4.1.1 装置図記号説明

記号	名称	備考
P	横型渦巻ポンプ	ポンプ口径 40
M	電動機	ABB 製, 440V, 60Hz, 3.7kW, 4 極
FM	流量計	横河電機製 AXF040G
W/A/V	電力計(電力/電流/電圧)	エムシステム製 54U
SG	吸込側圧力伝送器	横河電機製 X530J
DG	吐出側圧力伝送器	横河電機製 X530J
SV	吸込側バルブ	仕切弁
DV	吐出側バルブ	玉形弁
-	回転計	小野測器製 HT-4100

4) 試験結果

実測データの性能曲線の重ね書き（吐出し量 Q、全揚程 H、ポンプ効率 η 、軸動力 P）を図 4.4.1.2 に示す。また、吐出し量 10 m³/h における実測性能比較表を表 4.4.1.2 に示す。これより FRP 化による改善効果は次の様になった。

- ポンプ効率：約 5% 改善（目標：>2%）
- 全揚程：約 6% 上昇
- 軸動力：約 6% 低減

表 4.4.1.2 横型渦巻ポンプ 吐出し量 10 m³/h における実測性能比較

試験No.	製作モデル	吐出し量 (m ³ /h)	全揚程** (m)	軸動力** (kW)	ポンプ効率** (%)
①	FRP 製試作モデル機	10	39.7	2.33	46.3
②	現用鋳物品		37.4	2.48	41.0

**全揚程、軸馬力、ポンプ効率はグラフからの読取値

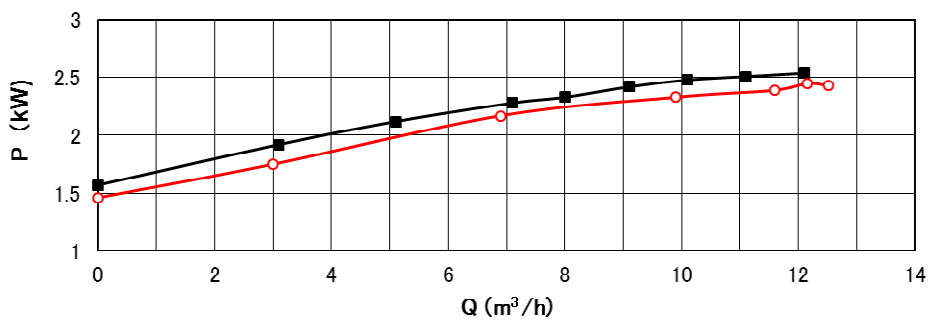
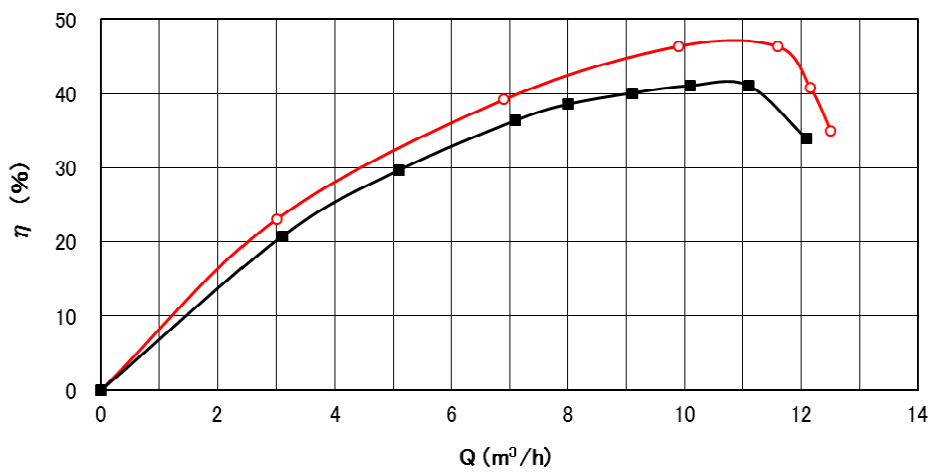
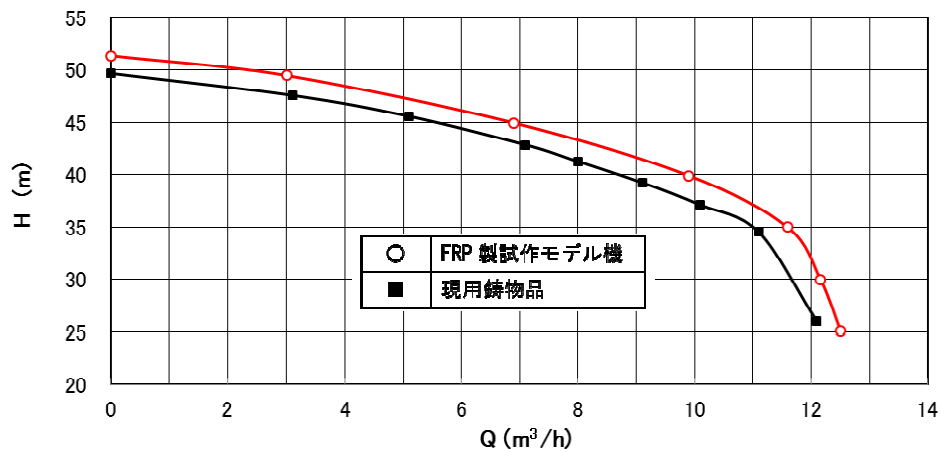


図 4. 4. 1. 2 横型渦巻ポンプのモデル機の性能試験データ

4.4.2 立型渦巻ポンプのモデル機の性能試験

1) 性能試験

社内試験場にて現用鋳物品と FRP 製試作モデル機の性能試験を実施した。
性能試験装置図を図 4.4.2.1、装置記号説明を表 4.4.2.1 に示す。

2) 表面粗さ測定

試験前に現用鋳物品および FRP 製試作モデル機のインペラ、ケーシングの表面粗さを測定した。測定の結果、インペラ、ケーシングとも現用鋳物品が $50\mu\text{m}$ 、FRP 製試作モデル機が $6\mu\text{m}$ であった。

3) インペラ寸法の測定

インペラの製作精度は性能に影響を与えるため現用鋳物品および FRP 製試作モデル機それぞれの寸法を測定した。測定の結果、現用鋳物品と FRP 製試作モデル機の流路幅に寸法差異が確認されたため、現用鋳物品の流路幅を FRP 製試作モデル機に合わせる形で修正した。

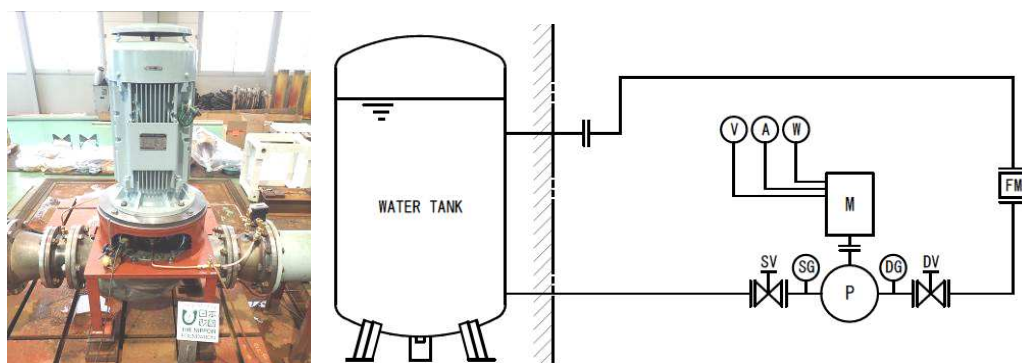


図 4.4.2.1 立型渦巻ポンプのモデル機の性能試験装置図

表 4.4.2.1 装置記号説明

記号	名称	備考
P	立型渦巻ポンプ	ポンプ口径 200
M	電動機	日立製, 440V, 60Hz, 30kW, 4 極
FM	流量計	横河電機製 AXF0250G
W/A/V	電力計(電力/電流/電圧)	エムシステム製 54U
SG	吸込側圧力伝送器	横河電機製 EJX530J
DG	吐出側圧力伝送器	横河電機製 EJX530J
SV	吸込側バルブ	バタフライバルブ
DV	吐出側バルブ	バタフライバルブ
-	回転計	小野測器製 TM-2130

4) 試験結果

実測データの性能曲線の重ね書き（吐出し量 Q、全揚程 H、ポンプ効率 η 、軸動力 P）を図 4.4.2.2 に示す。また、吐出し量 300m³/h における実測性能比較表を表 4.4.2.2 に示す。

立型渦巻ポンプの FRP 化による改善効果は次の様になった。

- ポンプ効率：約 7% 改善 （目標：>2%）
- 全揚程：約 1% 上昇
- 軸動力：約 8% 低減

表 4.4.2.2 立型渦巻ポンプ 吐出し量 300m³/h における性能比較

試験No.	製作モデル	吐出し量 (m ³ /h)	全揚程** (m)	軸動力** (kW)	ポンプ効率** (%)
①	FRP 製試作モデル機	300	26.0	27.4	77.4
②	現用鋳物品		25.7	29.8	70.4

**全揚程、軸馬力、ポンプ効率はグラフからの読取値

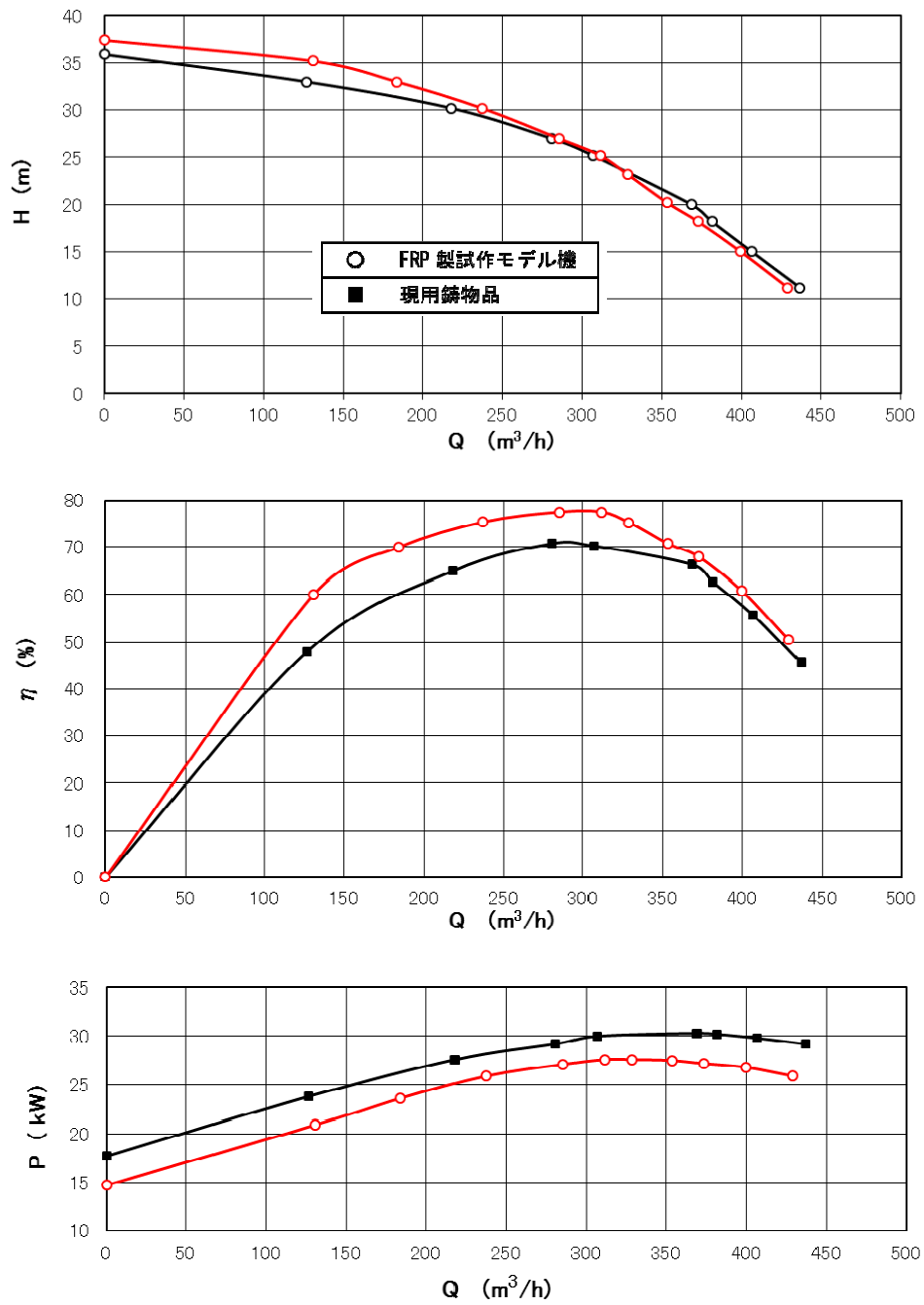


図 4.4.2.2 立型ポンプのモデル機の性能試験データ

4.4.3 横型渦巻ポンプのモデル機の耐久試験

表 4.4.3.2、図 4.4.3.4 に示す位置にひずみゲージを貼り付け、ポンプ起動-停止を 5 回繰り返した時の最大発生応力と定常時における変動応力を計測した。(図 4.4.3.1) 図 4.4.3.2 の計測系統図と図 4.4.3.3 に示す昇圧パターンにて試験を実施した。ケーシング外面には構造解析の応力分布を基に各部にひずみゲージを貼り付けて応力を計測した。

次に表 4.4.3.1 に示すポンプ仕様点における連続運転を行い、変動応力の経時変化を計測した。運転時間はひずみゲージの挙動を確認しながら決定した。

同時に精密騒音計(RION 製 NL-52)、携帯型振動計(RION 製 VM-62)を用いて、騒音、振動を測定した。

表 4.4.3.1 ポンプ仕様

要目	仕様
流量 (m ³ /h)	5
全揚程 (m)	47
電動機容量 (kW)	3.7
回転速度 (min ⁻¹)	3500



図 4.4.3.1 横型渦巻ポンプのモデル機の耐久試験

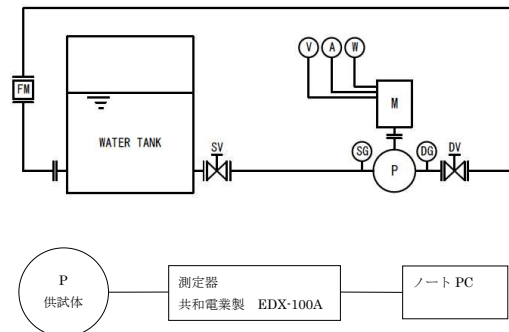


図 4.4.3.2 計測系統図

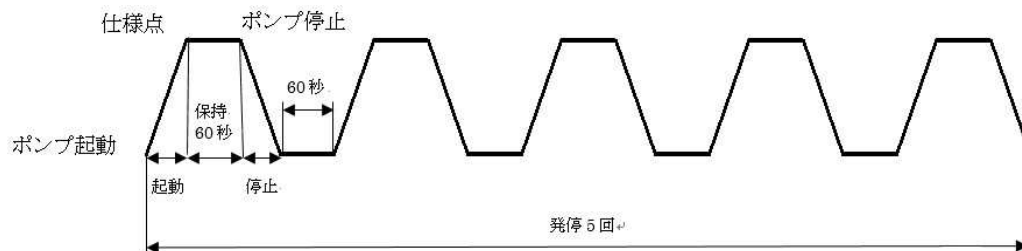


図 4.4.3.3 昇圧パターン

表 4.4.3.2 ひずみゲージ一覧

番号	部位	ゲージ種類	備考
E1	サクシヨンカバー	2 軸	R 部
E2	サクシヨンカバー	2 軸	R 部
E3	サクシヨンカバー	2 軸	R 部
E4	サクシヨンカバー	2 軸	R 部
A3	ケーシング	2 軸	一般部
B3	ケーシング	2 軸	R 部
D1	ケーシング	2 軸	R 部
D2	ケーシング	2 軸	R 部

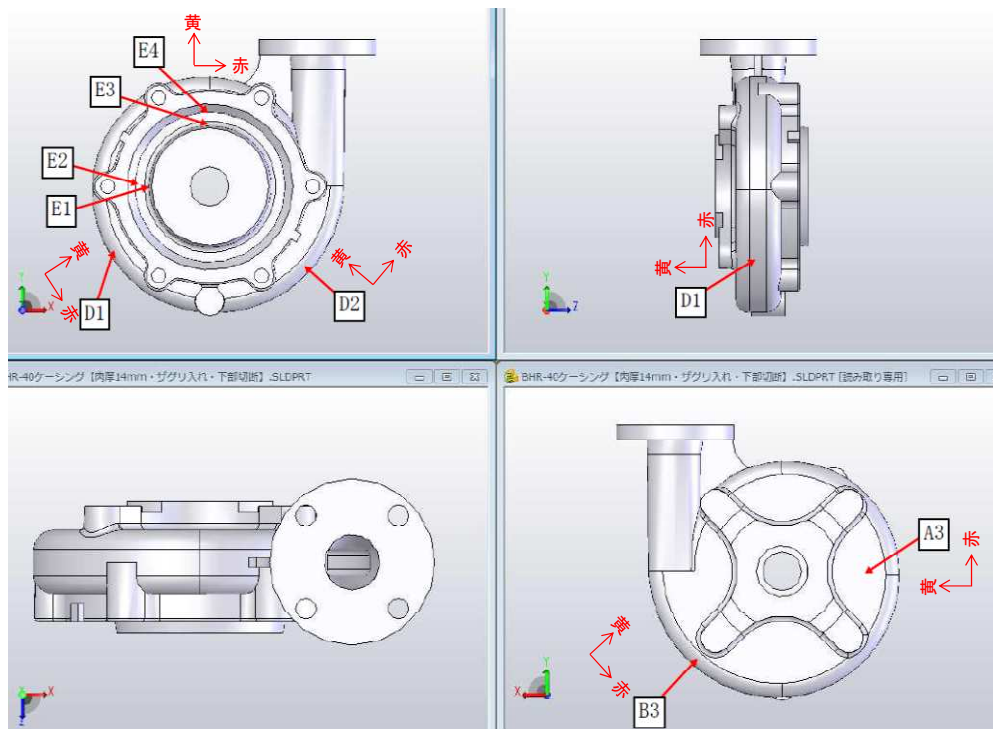


図 4.4.3.4 ひずみゲージ貼付位置

1) 起動-停止試験結果

ポンプ起動停止を 5 回実施した際の応力波形を図 4.4.3.5 に示す。

また、起動停止サイクルにおいて発生した最大応力と定常時の変動応力の結果一覧を表 4.4.3.3 に示す。

ポンプ起動停止を 5 回繰り返し、再現性は良好だった。(表 4.4.3.3) 発生した最大応力は 13.8MPa (E1: カバー応力集中部) であり、水圧に相当するレベルであった。また、ケーシング B3 (黄) の最大発生応力が 6.4MPa と耐压試験時に比べ、約 3.5 倍(0.5MPa 相当で比較)であった。

定常時の脈動における発生した変動応力は、0.1~0.6MPa 程度であり、 10^7 回疲労強度 29MPa (文献¹⁰⁾) に対し、約 1/50 レベルであるため、問題なく使用可能である。

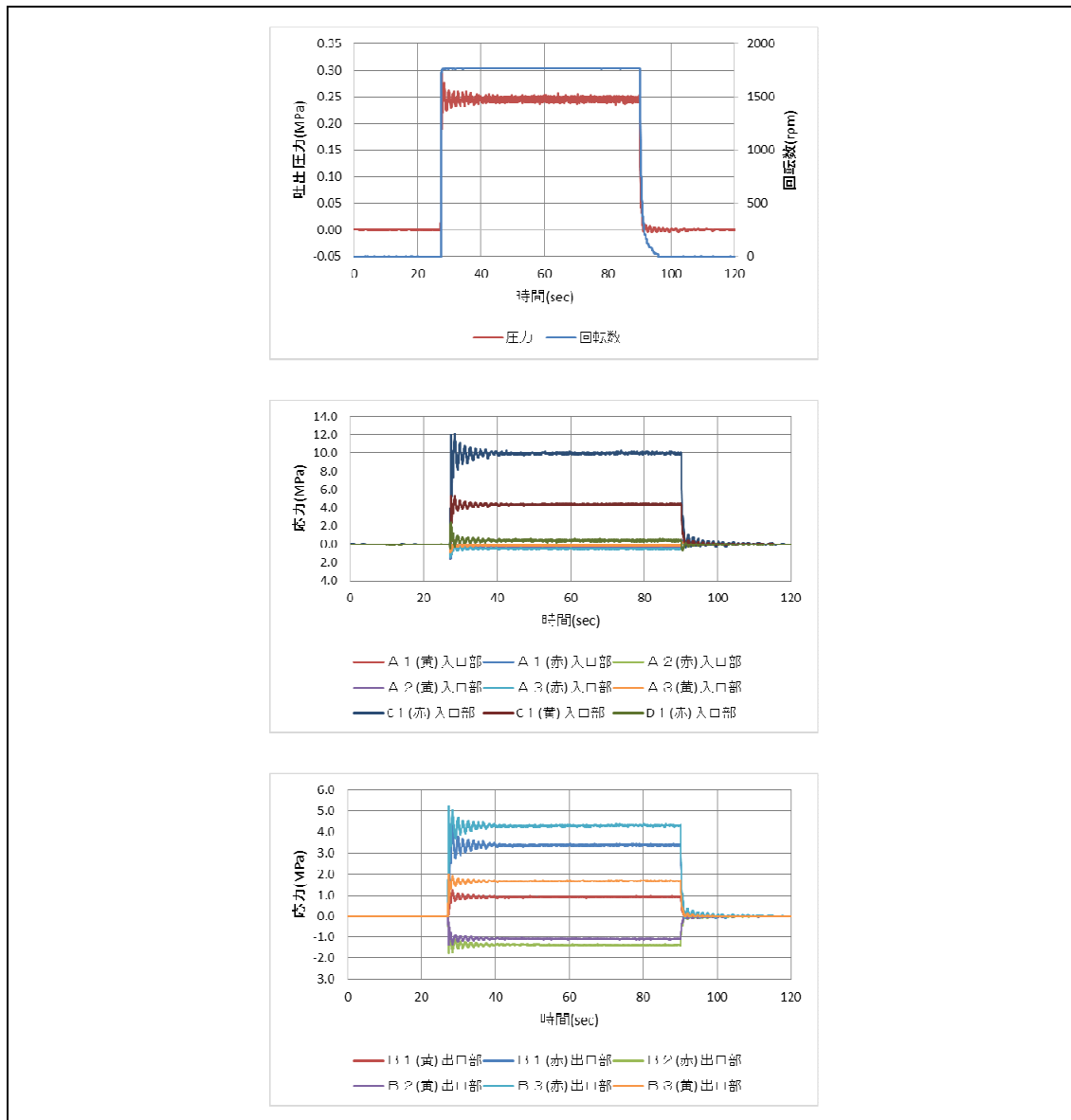


図 4.4.3.5 横型渦巻ポンプ 起動-停止試験 1回目 時系列データ

表 4.4.3.3 横型渦巻ポンプ 起動停止試験時における最大発生応力と定常時における変動応力 (単位: MPa)

		ケーシング								サクシオンカバー							
		A3		B3	D1		D2		E1		E2		E3		E4		
		(黄)	(赤)	(黄)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	
1回目	最大応力	2.47	1.36	6.42	-5.43	-2.24	-7.45	-3.94	13.69	4.68	8.24	2.95	8.60	3.21	2.73	3.25	
	変動応力	0.10	0.07	0.33	0.12	0.09	0.17	0.10	0.39	0.15	0.20	0.09	0.49	0.18	0.12	0.13	
2回目	最大応力	2.50	1.37	6.45	-5.44	-2.24	-7.49	-3.95	13.75	4.69	8.28	2.96	8.70	3.23	2.76	3.27	
	変動応力	0.09	0.07	0.31	0.12	0.08	0.15	0.08	0.33	0.13	0.17	0.09	0.50	0.19	0.13	0.14	
3回目	最大応力	2.50	1.38	6.44	-5.44	-2.24	-7.48	-3.99	13.74	4.69	8.29	2.96	8.65	3.21	2.75	3.26	
	変動応力	0.10	0.07	0.33	0.11	0.08	0.15	0.09	0.34	0.13	0.16	0.08	0.48	0.18	0.12	0.13	
4回目	最大応力	2.52	1.38	6.51	-5.61	-2.32	-7.69	-4.09	14.12	4.82	8.50	3.04	8.67	3.22	2.81	3.34	
	変動応力	0.12	0.11	0.36	0.19	0.12	0.20	0.18	0.54	0.20	0.29	0.12	0.57	0.21	0.14	0.18	
5回目	最大応力	2.51	1.38	6.41	-5.47	-2.25	-7.54	-4.02	13.75	4.69	8.29	2.96	8.68	3.22	2.73	3.26	
	変動応力	0.09	0.07	0.31	0.12	0.08	0.14	0.10	0.36	0.14	0.17	0.08	0.50	0.19	0.12	0.14	

B3 (黄) の応力は、 $\sigma = \varepsilon \cdot E$ として算出した。E=7 GPa、 $\nu = 0.3$

2) 仕様点での連続運転試験結果

① ひずみ (応力) 計測結果

表 4.4.3.1 に示す仕様点における連続運転時において、脈動による変動応力の時間的推移の一覧を表 4.4.3.4 に示す。

仕様点における連続運転を約 5.5 時間実施したが、変動応力に変化はなかった。変動応力は、最大で 0.6MPa 程度であり、 10^7 回疲労強度 29MPa (文献¹⁰⁾) に対し、約 1/50 レベルであるため、問題なく使用可能である。

表 4.4.3.4 横型渦巻ポンプ 連続運転時における変動応力推移 (単位: MPa)

	ケーシング								サクシオンカバー							
	A3		B3	D1		D2		E1		E2		E3		E4		
	(黄)	(赤)	(黄)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	
起動直後	0.09	0.07	0.33	0.11	0.08	0.13	0.07	0.33	0.13	0.16	0.08	0.47	0.18	0.12	0.13	
1hr 後	0.09	0.07	0.35	0.10	0.07	0.12	0.08	0.30	0.12	0.14	0.08	0.47	0.18	0.12	0.12	
2hr 後	0.08	0.06	0.33	0.10	0.09	0.12	0.09	0.35	0.14	0.16	0.08	0.50	0.19	0.12	0.12	
3hr 後	0.10	0.08	0.33	0.11	0.09	0.13	0.11	0.35	0.14	0.16	0.08	0.52	0.19	0.13	0.13	
4hr 後	0.08	0.07	0.36	0.11	0.09	0.11	0.08	0.32	0.13	0.15	0.08	0.49	0.19	0.12	0.13	
5hr 後	0.09	0.07	0.34	0.13	0.09	0.15	0.09	0.35	0.14	0.17	0.09	0.55	0.21	0.13	0.14	
5.5hr 後	0.09	0.06	0.32	0.12	0.08	0.12	0.08	0.34	0.13	0.15	0.08	0.50	0.19	0.13	0.13	

B3 (黄) の応力は、 $\sigma = \varepsilon \cdot E$ として算出した。E=7 GPa、 $\nu = 0.3$

② 振動測定結果

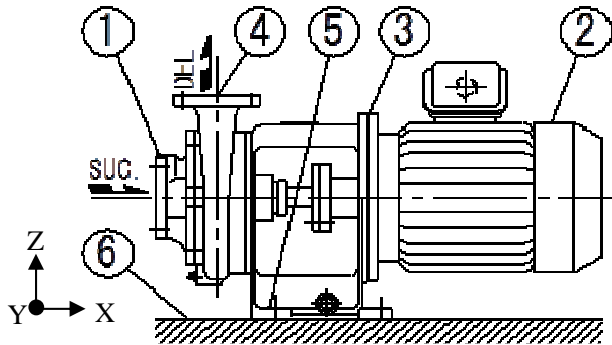
図 4.4.3.6 に示す位置の振動速度を測定した。

振動許容値は SM 標準 A246 から 4.0 mm/s とした。

図 4.4.3.7 に試作モデル機の振動測定結果を示す。

測定値は全て許容値以下であった。なお、現用鋳物品との比較ではほぼ同じ振動値を示した。

仕様点において約 5.5 時間の連続運転を行ったが大きな変化は見られなかった。



- ①～⑤ 3 方向
- ⑥ Z 方向のみ

図 4.4.3.6 振動測定位置

FRP製渦巻横型ポンプ 振動測定記録 [連続運転時]

測定日 2017/11/27

測定器 RION VM-62
振動シビアリティ 4.0 mm/s

時間	1			2			3			4			5			6
	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z
11:38	0.4	0.3	0.9	3.2	0.6	2.4	0.4	0.3	1.2	0.6	0.45	1.4	0.35	0	0	0.35
13:08	0.6	0.45	0.8	3	0.65	2.6	0.45	0	1.1	0.6	0.5	1.3	0.35	0	0	0.3
15:58	0.4	0.35	0.7	3.2	0.6	1.9	0.5	0.35	1.1	0.65	0.45	1.5	0.4	0	0	0.35
平均値	0.47	0.37	0.80	3.13	0.62	2.30	0.45	0.22	1.13	0.62	0.47	1.40	0.37	0	0	0.33
レンジ	0.2	0.15	0.2	0.2	0.05	0.7	0.1	0.35	0.1	0.05	0.05	0.2	0.05	0	0	0.05

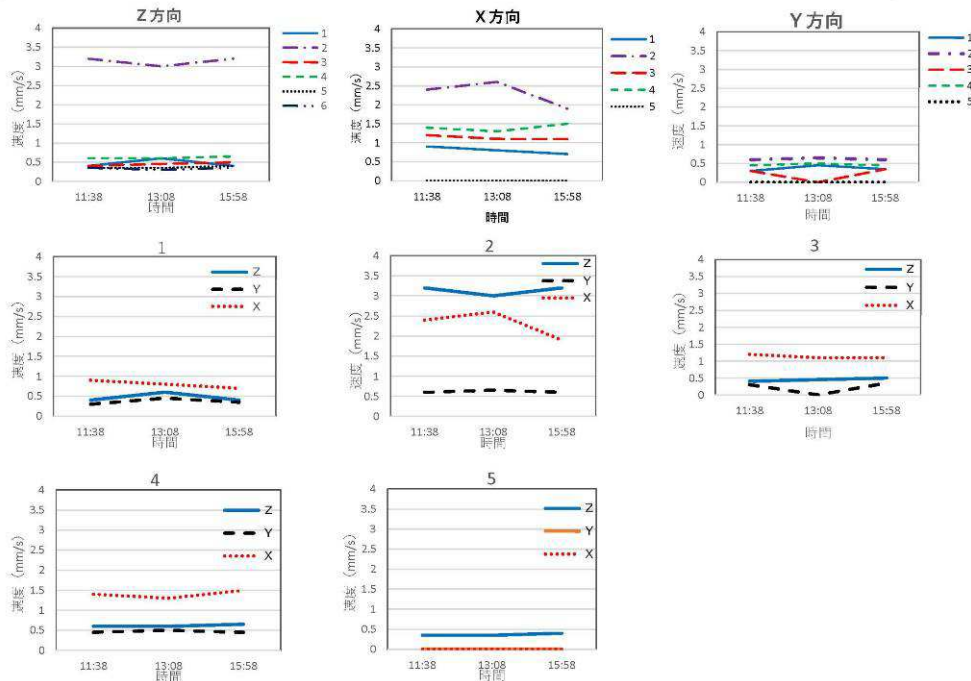
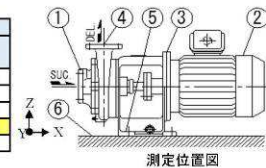


図 4.4.3.7 横型渦巻ポンプ振動測定結果

③ 騒音測定結果

騒音の測定は JIS B 8310 「ポンプの騒音レベル測定方法」を準拠した方法で行った。測定位置は測定箇所から 1 m の距離、軸心の高さでポンプ規定位置の 1 箇所と電動機側は規定位置の中で騒音レベルが最高の位置の 1 箇所を測定した。

図 4. 4. 3. 5 に試作モデル機のポンプ側の騒音測定結果を示す。

運転前の暗騒音は 67 dB(A) で運転時の最大騒音レベルはポンプ側が 72dB(A)、電動機側が 77dB(A) であった。

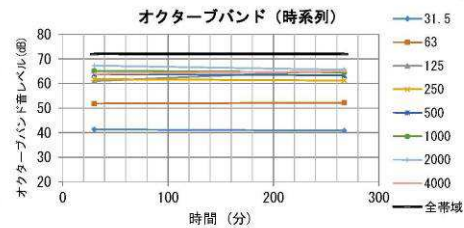
これに対し現用鋳物品も同じ測定位置で測定した結果、運転前の暗騒音は 70 dB(A) で運転時の最大騒音レベルはポンプ側が 72dB(A)、電動機側が 74dB(A) であったことから試作モデル機の騒音レベルは現用鋳物品とほぼ同じといえる。

FRP横型渦巻ポンプ 騒音測定記録 [連続運転時]

測定位置: P-2 暗騒音: 70 dBA
計測機: RION NL-52

測定日 2016/11/29

オクターブバンド		単位: dBA								
時刻/時間(分)	周波数	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	全帯域
11:02	0									
11:32	30	41	52	61	62	64	65	67	64	72
15:29	267	41	52	65	61	63	65	66	65	72
平均値		41	52	63	62	64	65	66	65	72
レンジ		1	0	4	1	1	1	2	1	0



1/3オクターブバンド

1/3オクターブバンド		単位: dBA																								
時刻/時間(分)	周波数	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
11:02	0																									
11:32	30	33	41	34	40	47	48	50	55	58	55	56	58	57	59	60	61	59	59	61	61	59	57	56	55	
15:29	267	32	40	35	43	47	50	51	59	63	55	55	57	57	58	59	59	60	59	59	59	59	60	58	55	
平均値		32	41	35	41	47	49	50	57	61	55	55	57	57	58	60	60	59	59	60	60	59	59	57	55	
レンジ		1	1	1	3	0	2	2	5	5	0	1	0	0	0	2	2	0	0	1	2	0	3	2	0	

測定位置図

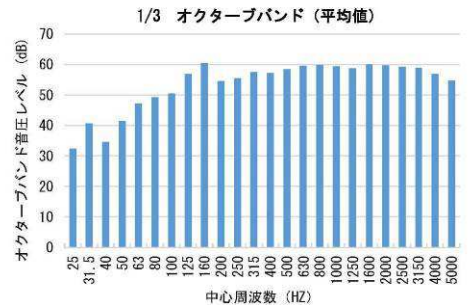
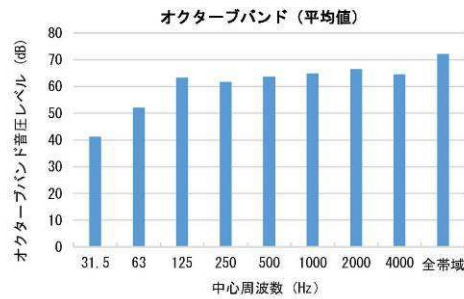
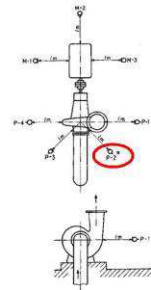


図 4. 4. 3. 5 横型渦巻ポンプ 騒音測定結果 (ポンプ側)

4.4.4 立型渦巻ポンプのモデル機の耐久試験

ケーシング外面にひずみゲージを貼り付け、ポンプ起動-停止を5回繰り返した時の最大発生応力と定常時における変動応力を計測した。(図4.4.4.2)

図4.4.4.3の計測系統図と図4.4.4.1に示す昇圧パターンにて試験を実施した。

ケーシング外面には構造解析の応力分布を基に各部にひずみゲージを貼り付けて応力を計測した。

次に表4.4.4.1の仕様点における連続運転を行い、変動応力の経時変化を計測した。運転時間はひずみゲージの挙動を確認しながら決定した。

同時に精密騒音計(RION製 NL-52)、携帯型振動計(RION製 VM-62)を用いて、騒音、振動を測定した。

表 4.4.4.1 ポンプ仕様

要目	仕様
流量 (m ³ /h)	300
全揚程 (m)	25
電動機容量 (kW)	30
回転速度 (min ⁻¹)	1750

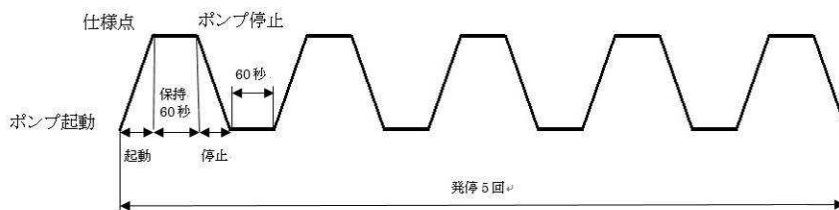


図 4.4.4.1 昇圧パターン



図 4.4.4.2 立型渦巻ポンプのモデル機の耐久試験

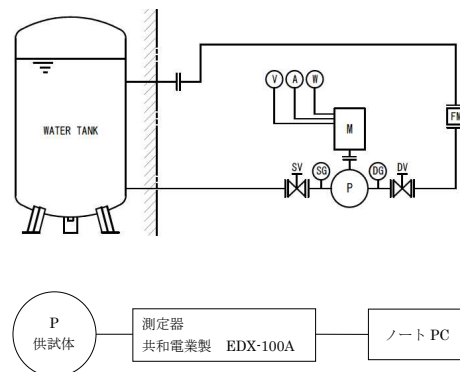


図 4.4.4.3 計測系統図

1) 起動-停止試験結果

ポンプ起動停止を5回実施した際の応力波形を図4.4.4.4に示す。

また、起動停止サイクルにおいて発生した最大応力と定常時の変動応力の結果一覧を表4.4.4.2に示す。

ポンプ起動停止を5回繰り返した結果、再現性は良好だった。

また、起動停止サイクルにおいて発生した最大応力は12.3MPa（C1：入口部応力集中部）であり、水圧に相当するレベルであった。

起動直後に吐出圧力のオーバーシュートが見られたが、約15秒後には定常圧力に静定した。

定常時における脈動における変動応力は最大で0.1~0.8MPaで、 10^7 回疲労強度29MPa（文献¹⁰⁾）に対し、約1/35レベルであるため、問題なく使用可能である。

表4.4.4.2 立型渦巻ポンプ 起動停止試験時における最大発生応力と定常時における変動応力（単位：MPa）

		吸込ボリユート側									吐出ボリユート側					
		A1		A2		A3		C1		D1	B1		B2		B3	
		(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)
1回目	最大応力	-1.71	-1.76	-1.14	-1.30	-1.43	-0.92	12.3	5.33	2.87	4.42	1.27	-1.76	-1.39	5.31	2.02
	変動応力	0.22	0.23	0.15	0.15	0.16	0.11	0.68	0.30	0.42	0.25	0.11	0.10	0.09	0.25	0.11
2回目	最大応力	-1.71	-1.73	-1.13	-1.28	-1.42	-0.91	12.2	5.31	2.89	4.40	1.27	-1.73	-1.37	5.24	2.00
	変動応力	0.23	0.23	0.15	0.16	0.15	0.11	0.77	0.34	0.40	0.24	0.10	0.11	0.10	0.25	0.10
3回目	最大応力	-1.69	-1.75	-1.10	-1.29	-1.41	-0.91	12.2	5.39	2.81	4.45	1.26	-1.75	-1.39	5.27	2.00
	変動応力	0.21	0.21	0.14	0.15	0.16	0.12	0.69	0.30	0.38	0.25	0.10	0.11	0.09	0.25	0.11
4回目	最大応力	-1.72	-1.77	-1.13	-1.30	-1.41	-0.91	12.2	5.35	2.75	4.43	1.26	-1.73	-1.37	5.22	1.98
	変動応力	0.22	0.23	0.14	0.16	0.17	0.12	0.69	0.30	0.42	0.25	0.10	0.10	0.09	0.23	0.10
5回目	最大応力	-1.68	-1.72	-1.09	-1.27	-1.40	-0.88	12.2	5.38	2.83	4.43	1.26	-1.73	-1.38	5.26	2.00
	変動応力	0.21	0.21	0.14	0.16	0.16	0.11	0.68	0.29	0.42	0.24	0.10	0.11	0.10	0.24	0.10

B3（黄）の応力は、 $\sigma = \varepsilon \cdot E$ として算出した。E=7 GPa、 $\nu = 0.3$

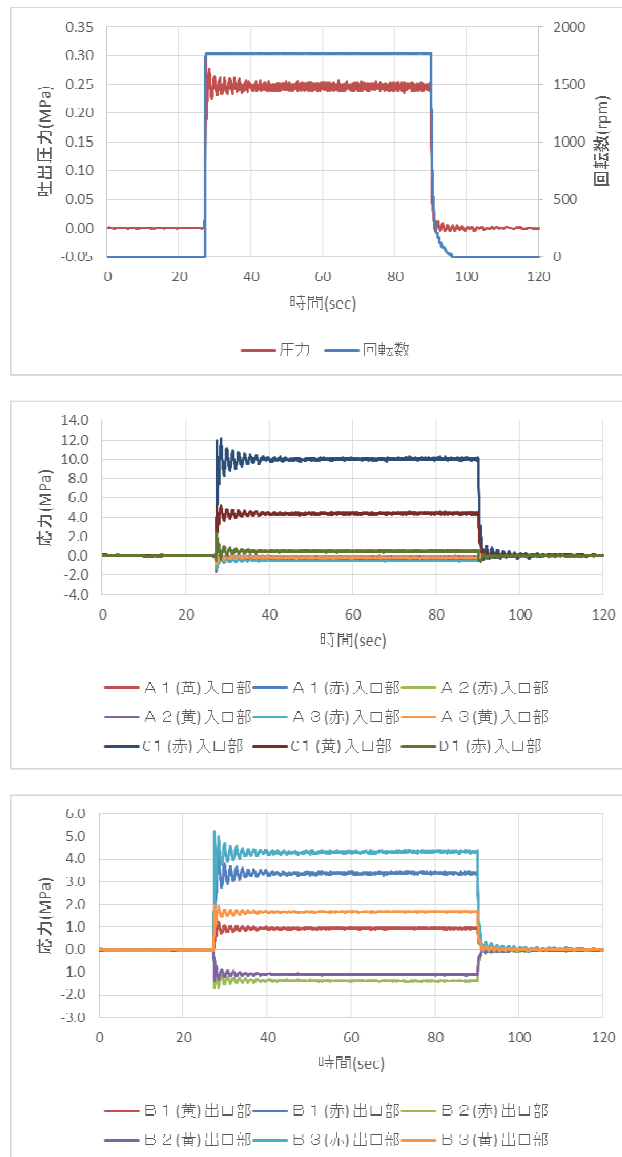


図 4.4.4.4 立型渦巻ポンプ 起動-停止試験 1回目 時系列データ

2) 仕様点での連続運転試験結果

①ひずみ（応力）計測結果

表 4.4.4.1 の仕様点における連続運転時において、脈動による変動応力の時間的推移の一覧を表 4.4.4.3 に示す。

仕様点における連続運転を約 5.5 時間実施したが変動応力の推移に変化は確認されなかった。変動応力は、最大で 0.8MPa 程度であり、 10^7 回疲労強度 29MPa（文献¹⁰⁾）に対し、約 1/35 レベルであるため、問題なく使用可能である。

表 4. 4. 4. 3 立型渦巻ポンプ 連続運転時における変動応力推移

	吸込ポリューム側									吐出ポリューム側					
	A1		A2		A3		C1		D1	B1		B2		B3	
	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)	(赤)	(黄)
起動直後	0.22	0.22	0.13	0.16	0.16	0.11	0.72	0.30	0.43	0.24	0.09	0.10	0.09	0.26	0.11
1hr 後	0.21	0.21	0.14	0.15	0.15	0.11	0.67	0.29	0.40	0.23	0.10	0.10	0.09	0.23	0.09
2hr 後	0.23	0.23	0.15	0.16	0.16	0.12	0.68	0.29	0.42	0.25	0.10	0.11	0.09	0.24	0.10
3hr 後	0.22	0.23	0.14	0.16	0.15	0.11	0.64	0.28	0.42	0.27	0.10	0.10	0.09	0.23	0.09
4hr 後	0.22	0.22	0.14	0.15	0.16	0.12	0.73	0.32	0.43	0.26	0.10	0.13	0.11	0.36	0.13
5hr 後	0.22	0.23	0.14	0.15	0.15	0.11	0.71	0.30	0.41	0.26	0.10	0.11	0.09	0.24	0.10
5.5hr 後	0.23	0.24	0.15	0.15	0.15	0.11	0.69	0.30	0.43	0.24	0.10	0.10	0.09	0.28	0.11

B3 (黄) の応力は、 $\sigma = \varepsilon \cdot E$ として算出した。E=7 GPa、 $\nu = 0.3$

② 振動測定結果

図 4. 4. 4. 5 に示す位置の振動速度を測定した。振動許容値は SM 標準 A246 から 3.3mm/s とした。図 4. 4. 4. 6 に試作モデル機の振動測定結果を示す。

測定値は全て許容値以下であった。現用鋳物品と比べ、③の Z および Y 方向の測定位置において高い値を示したが、許容値以下であり問題なく使用可能である。

仕様点において約 5.5 時間の連続運転を行ったが大きな変化は見られなかった。

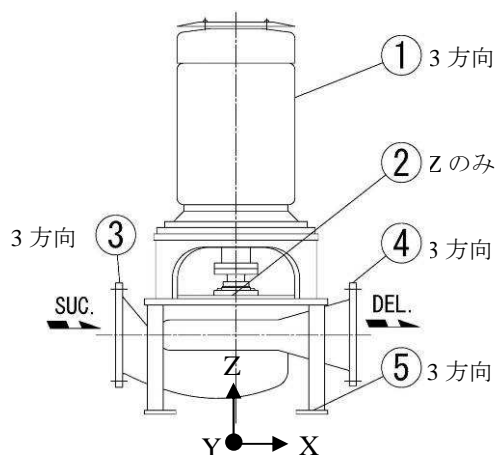


図 4. 4. 4. 5 振動測定位置

測定器 : RION VM-62

振動シビアリティ: 3.3 mm/s

単位 (mm/s)

時間	1			2			3			4			5			
	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	
11:21		1.1			1.2	2.5	1.2	1.4	0.8	1.6	0.5	0.5	1.3			
13:00	0.8	1.1	1.5	3.2	2.2	2.0	1.2	1.3	1.1	1.8	0.7	0.7	1.6			
14:50	1.4	1.5	0.8	3.2	1.4	2.4	1.1	1.4	1.0	1.7	0.6	0.7	1.6			
15:19	1.7	1.2	0.8	2.8	1.8	2.6	1.2	1.4	1.2	1.8	0.9	0.8	1.5			
15:58	1.4	1.6	1.0	2.8	1.7	2.2	2.0	1.4	0.9	1.9	1.1	1.1	1.5			
平均値	1.3	1.3	1.0	3.0	1.7	2.3	1.3	1.4	1.0	1.8	0.7	0.6	1.5			
レンジ	0.9	0.5	0.7	0.4	1.0	0.6	0.9	0.1	0.4	0.3	0.7	0.3	0.4			

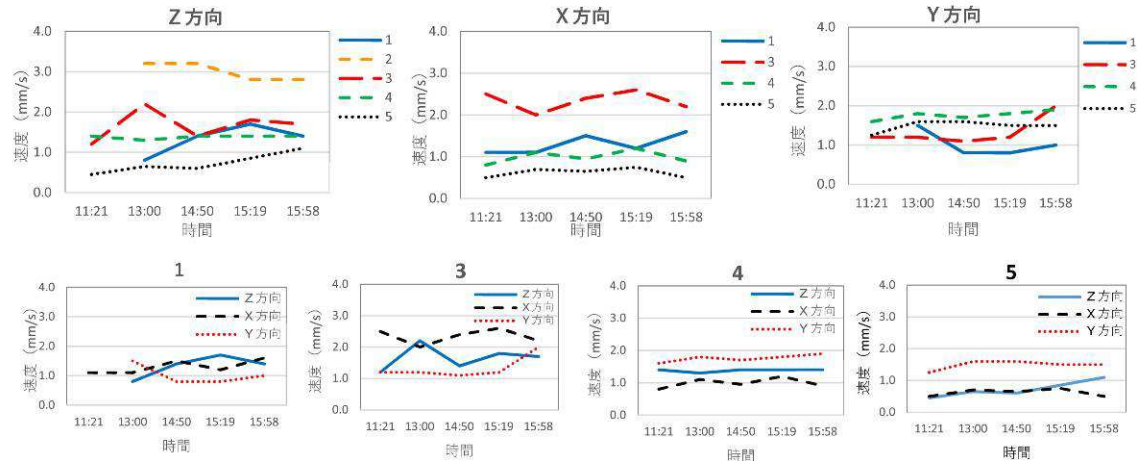
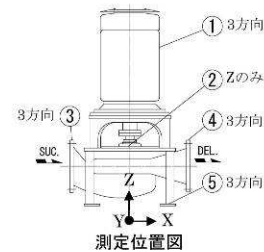


図 4.4.4.6 立型渦巻ポンプ振動測定結果

③騒音測定結果

騒音の測定は JIS B 8310「ポンプの騒音レベル測定方法」を準拠した方法で行った。

測定位置は測定箇所から 1 m の距離で、ポンプ側は吸込管と吐出し管の中心高さで規定位置の 1 箇所と電動機側は規定位置の中で騒音レベルが最高の位置の 1 箇所を測定した。図 4.4.4.7 に試作モデル機のポンプ側の騒音測定結果を示す。

運転前の暗騒音は 70 dB(A) で運転時の最大騒音レベルはポンプ側が 81dB(A)、電動機側が 81dB(A) であった。

これに対し現用鋳物品も同じ測定位置で測定した結果、運転前の暗騒音は 79 dB(A) で運転時の最大騒音レベルはポンプ側が 79dB(A)、電動機側が 80dB(A) であったことから試作モデル機の騒音レベルは現用鋳物品とほぼ同じといえる。

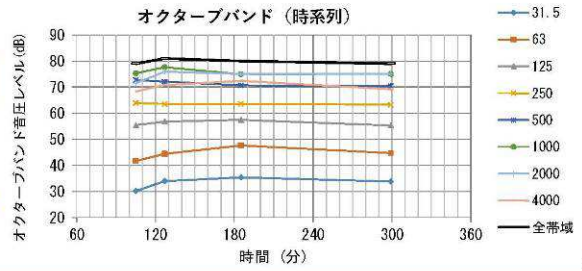
FRP立型渦巻ポンプ 騒音測定記録 [連続運転時]

測定日 2016/11/28

測定位置: P-1 暗騒音: 69.5 dBA

計測機: RION NL-52

オクターブバンド		単位: dBA								
時刻/時間(分)	周波数	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	全帯域
11:10	0									
12:55	105	30	42	55	64	73	75	72	68	79
13:17	127	34	44	57	64	72	78	76	71	81
14:15	185	35	48	57	64	71	75	75	72	80
16:09	299	34	45	55	63	70	75	75	69	79
平均値		33	45	56	64	71	76	74	70	80
レンジ		5	6	2	1	2	3	4	4	2



1/3オクターブバンド

1/3オクターブバンド		単位: dBA																								
時刻/時間(分)	周波数	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
11:10	0																									
12:55	105	15	25	29	31	36	41	44	49	54	55	57	62	63	66	71	69	71	70	68	67	69	67	67	65	65
13:17	127	20	24	32	33	38	43	43	48	54	56	55	61	64	65	68	67	72	71	72	70	68	66	65	63	63
14:15	185	24	32	33	37	42	46	46	50	56	58	58	63	65	66	71	69	71	71	71	70	67	65	65	63	63
16:09	299	19	29	30	34	38	43	45	49	54	57	56	61	64	64	68	67	70	70	71	70	68	66	66	63	63
平均値		20	27	31	34	38	43	44	49	54	56	56	62	64	65	69	68	71	71	71	69	68	66	66	63	63
レンジ		8	8	4	6	6	5	3	2	2	3	3	2	3	2	3	2	2	1	4	3	2	2	2	2	

測定位置図

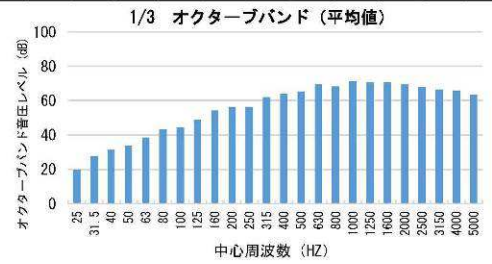
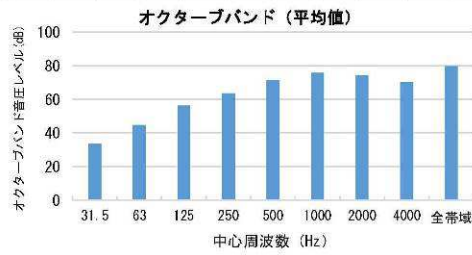
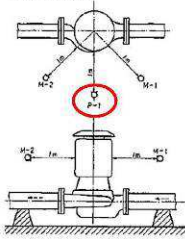


図 4.4.4.7 立型渦巻ポンプ騒音測定結果 (ポンプ側)

4.4.5 横型渦巻ポンプのモデル機のケーシングの振動試験

船内振動環境での FRP 構造設計条件を確認し、強度評価を行う際の資料とすることを目的とした。

Class NK (2016 船用材料・機器等の承認および認定要領) を参考にした掃引試験を行った。加振方向は鉛直方向のみとし、ポンプ作動中ではない。

(P.109 補足資料参照)

1) 目的

ポンプ本体 (特に吸込側と吐出フランジ部近傍) の振動応力と振動加速度に対するデータを取得し、強度評価を行う際の資料とすることを目的とした。

2) 試験供試体

試験供試体は図 4.4.5.1 に示すような FRP 製横型渦巻ポンプケーシングである。試験は吸込側と吐出側のフランジ部に 250 mm 長さのアームを付加した場合としない場合の 2 種類を対象とした。

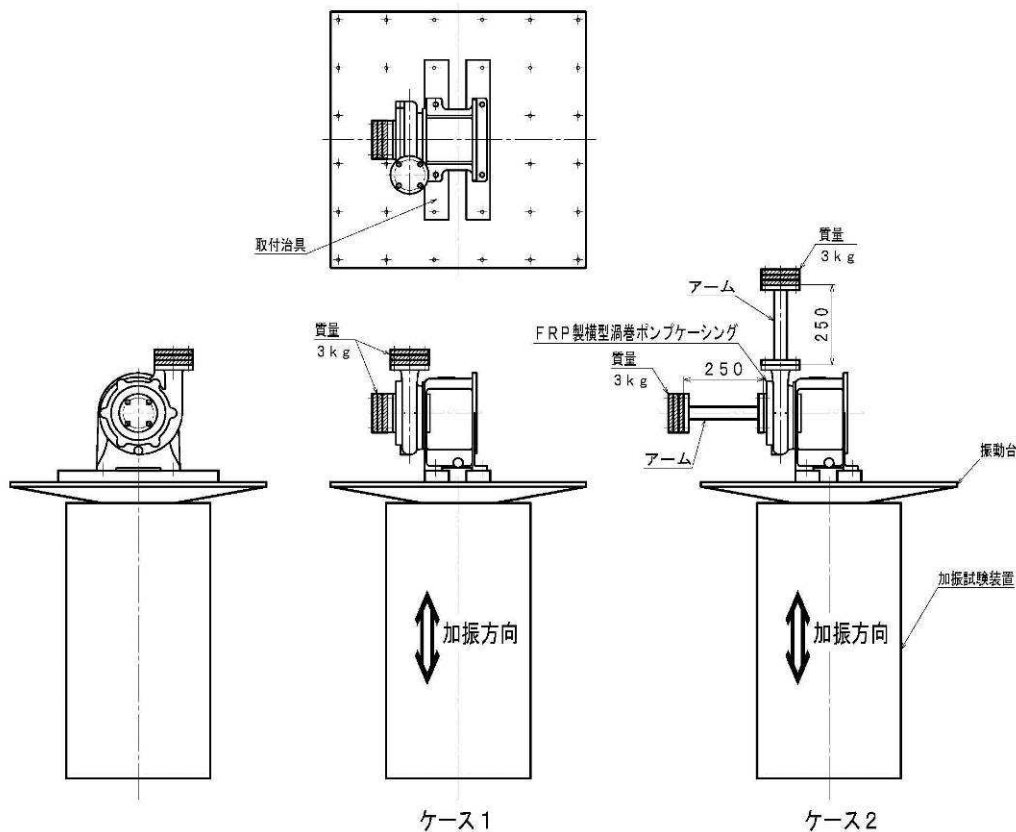


図 4.4.5.1 振動試験装置図および試験供試体図

3) 試験装置

振動試験に用いる加振試験装置は導電型振動試験装置を使用した。

加振試験装置の外観図を図 4.4.5.2 に示し、主な仕様を以下に示す。

主な仕様

- ① 加振振動数範囲 5～2500 Hz
- ② 加振レベル：最大変位 51mm (peak-to-peak)
最大速度 1m/秒
最大加速度 67G
- ③ 加振波形：正弦波、鋸波、台形波、半正弦波
- ④ 最大載荷荷重：200kg (垂直テーブル治具 42kg を含めて)

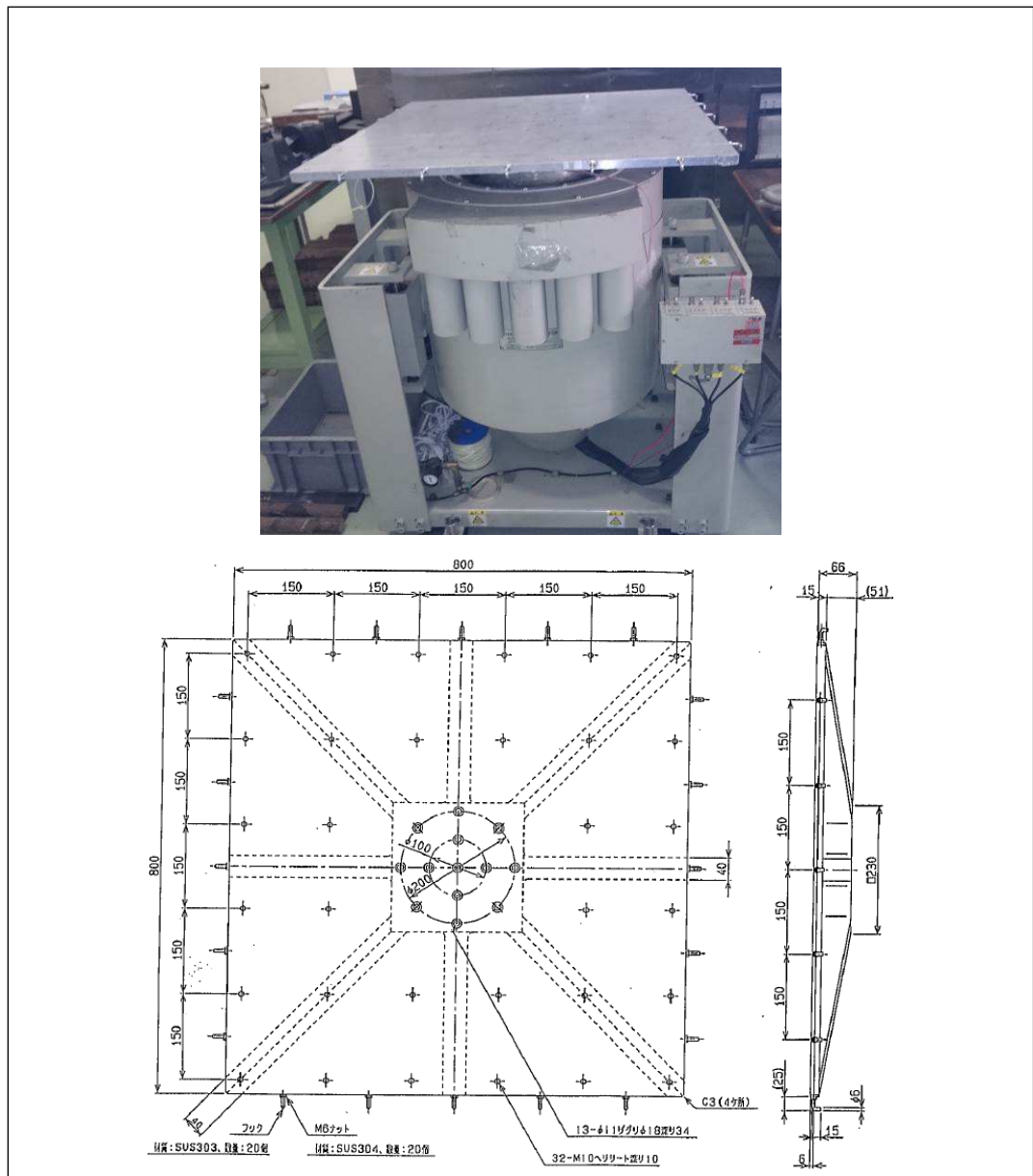


図 4.4.5.2 試験に用いた加振試験装置

4) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法と試験ケースを表 4.4.5.1 に示す。

加振方向は鉛直一方向のみとし、耐久試験は実施しない。(振動に対するポンプケーシングの概略強度評価を行うためのデータを得ることを目的としているため)

また、試験ケースは吸込側および吐出側フランジ部に質量を付加したアーム有無(アーム長さは 250 mm)の供試体を対象とし、アーム無をケース 1、アーム有をケース 2 とした。

入力加速度は 0.05G~0.7G の範囲で表 4.4.5.1 に示す 4 段階について実施した。

試験中の振動による損傷を避けるため、応力レベルに対するアラームおよびトリップの閾値をそれぞれ 14MPa、20MPa として監視しながら試験を実施した。

表 4.4.5.1 試験項目および試験方法

試験項目	試験ケース		入力加速度 または変位	掃引振動数 範囲 (Hz)	掃引速度
	ケース 1 アーム無	ケース 2 アーム有			
正弦波掃引試験 1	○	○	0.05G	5~100	オクターブ/分
正弦波掃引試験 2	○	○	0.1G	5~100	
正弦波掃引試験 3	○	○	0.3G	5~100	
正弦波掃引試験 4	○	○	0.7G	13.2~100	
	○	○	±1.0 mm	5~13.2	

5) 計測項目および計測点数

計測項目は以下のとおりとする。(図 4.4.5.3 に計測点位置概略を示す)。

- ① ポンプ本体の歪 8 点
 ポンプカバー 1 軸×4 点 (E3、E4、E7、E8)
 ポンプケーシング 1 軸×2 点 2 軸×1 点 (F1、F2、F3-x、F3-y)
- ② ポンプ本体の加速度 2 点
- ③ 質量の加速度 3 点、2 点
- ④ 振動台加速度 1 点

なお、試験状況を図 4.4.5.4 (a)、(b)、(c)に示す。

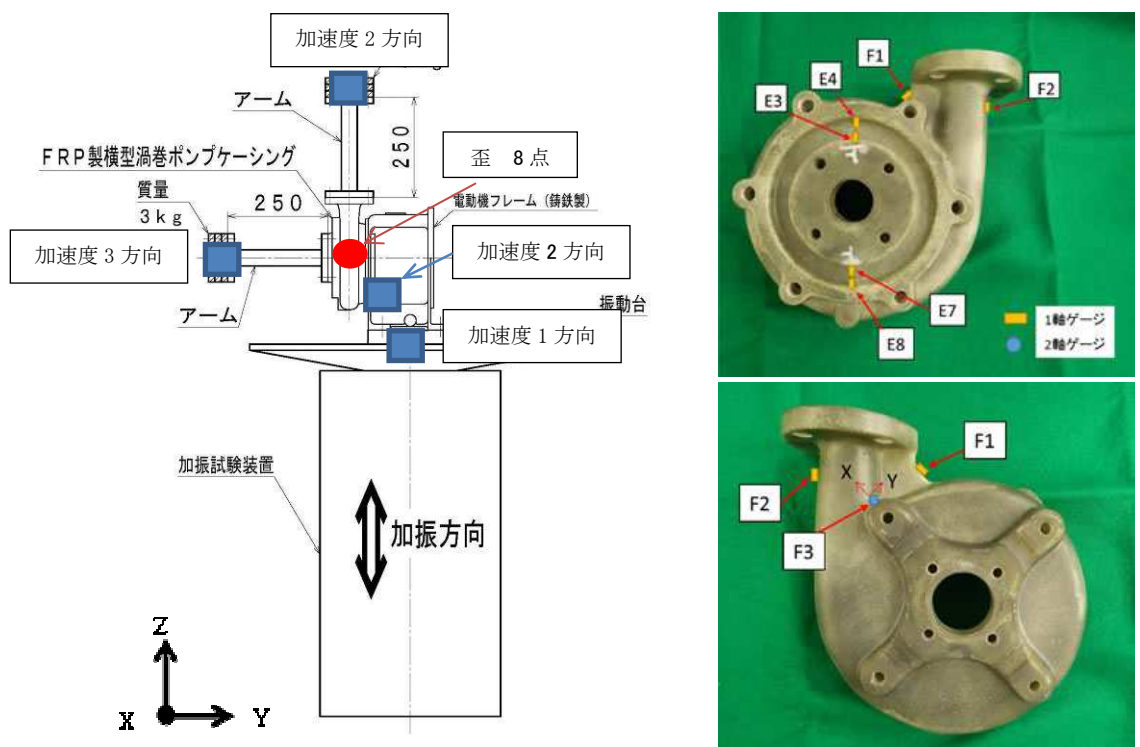


図 4.4.5.3 計測点位置図

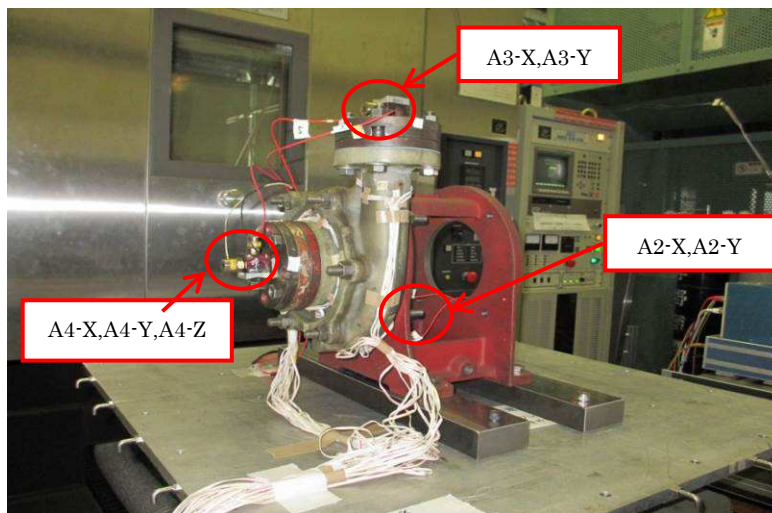


図 4. 4. 5. 4 (a) ケース 1 (アーム無 試験状況)

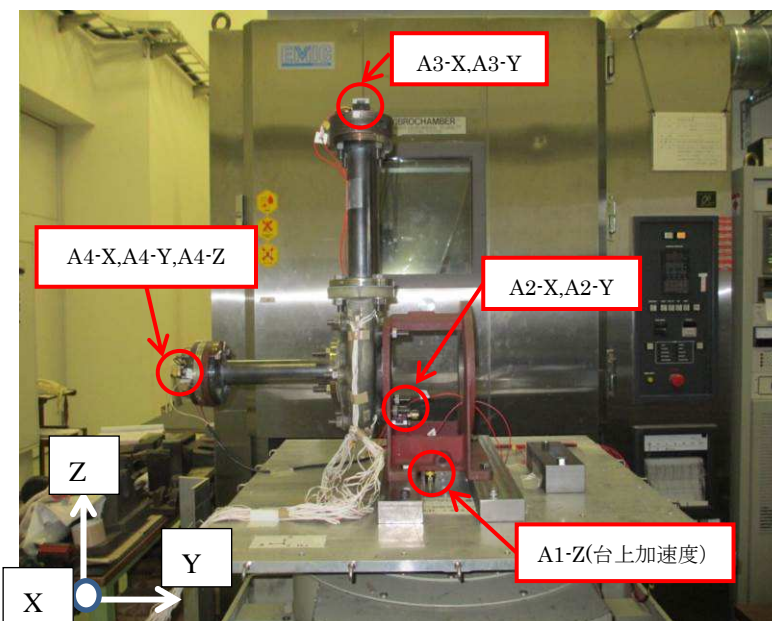


図 4. 4. 5. 4 (b) ケース 2 (アーム有 試験状況)

歪計測位置
詳細 8 点



図 4. 4. 5. 4 (c) 計測状況

6) 試験結果

(a) 応答曲線

図 4.4.5.5、図 4.4.5.6 はそれぞれケース 1（アーム無）およびケース 2（アーム有）に対する正弦波掃引試験 4（振動数 5~13.2 Hz : ± 1 mm 振幅一定で振動数 13.2 ~ 100 Hz : 0.7G 加速度一定条件）における代表的（レベルの大きい計測位置）に対する応答試験結果を示す。

図より明らかなようにケース 2（アーム有条件）では

- ① アームの質量が付加されたことにより、卓越振動数が低下した。
- ② アームを付加したことにより、本体との取り合い部（固定部）周りのモーメントが増加し、当該部に発生する最大応力レベルは大きくなった。

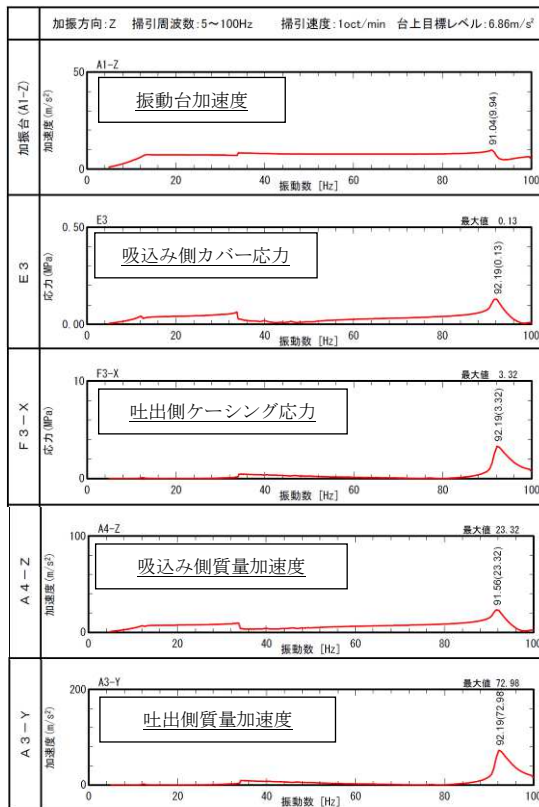


図 4.4.5.5 ケース 1（アーム無）における
代表計測点に対する周波数応答曲線

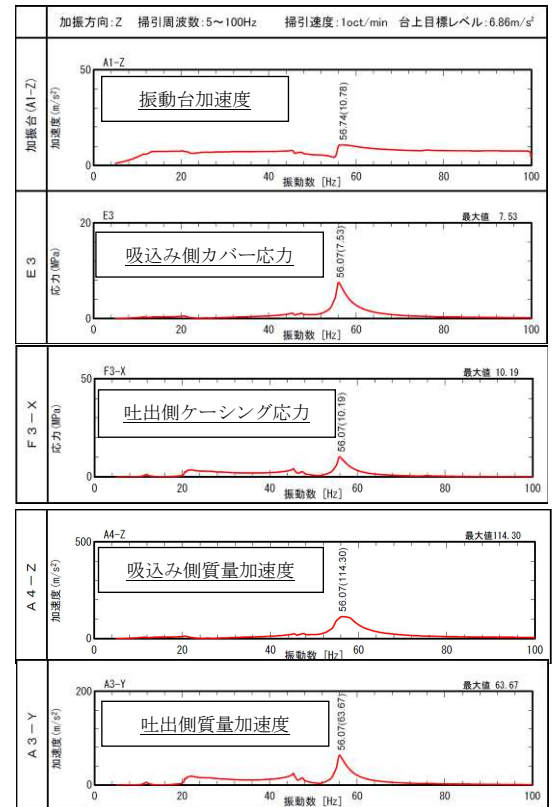


図 4.4.5.6 ケース 2（アーム有）における
代表計測点に対する周波数応答曲線

(b) 応力レベルと加速度レベルの関係

ほぼ静的に取り扱うことができるものと考えられる振動数 7 Hz における各計測点の応力および加速度の一覧表を表 4.4.5.2 に示す。

図 4.4.5.7 はケース 1、2 に対する正弦波掃引試験 2~4 において吸込側と吐出側の計測点(歪と加速度)と入力加速度(≡フランジ加速度)の関係を示したものである。

その結果、

- ① 重力加速度と吸込側質量加速度はほぼ等しい値を示し、応答倍率がほぼ 1 であり、振動数 7 Hz では力学的に静的と考えて差し支えない。
- ② ケース 2 (アーム有) を付けたことにより吸込側のカバー部の応力で大きくなる傾向が認められる。
- ③ 入力加速度と応力は比例関係にある (レベルが大きい計測点)

表 4.4.5.2 正弦掃引試験における振動数 7 Hz に対する絶対値 (片振幅) (mm)

計測点		0.49m/s ²		0.98m/s ²		2.94m/s ²		6.86m/s ² (7Hz では 1.96m/s ² 相当)	
		ケース 1	ケース 2	ケース 1	ケース 2	ケース 1	ケース 2	ケース 1	ケース 2
加速度 [m/s ²]	A1-Z	0.54	0.56	1.09	1.11	3.24	3.34	2.10	2.18
	A2-X	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01
	A2-Y	0.00	0.02	0.03	0.03	0.10	0.11	0.06	0.07
	A3-X	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.05
	A3-Y	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.11	0.01	0.08
	A4-X	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.09	0.03	0.07
	A4-Y	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01
	A4-Z	0.56	0.59	1.11	1.19	3.33	3.57	2.16	2.33
応力 [MPa]	E3	0.00	0.03	0.01	0.05	0.02	0.16	0.01	0.10
	E4	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02
	E7	0.00	0.02	0.01	0.05	0.02	0.14	0.01	0.09
	E8	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02
	F1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
	F2	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
	F3-X	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
	F3-Y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01

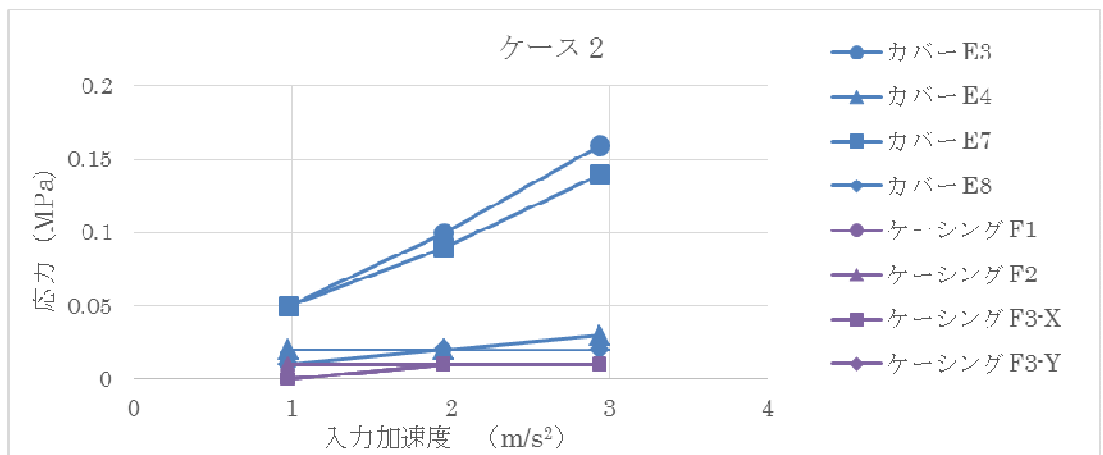
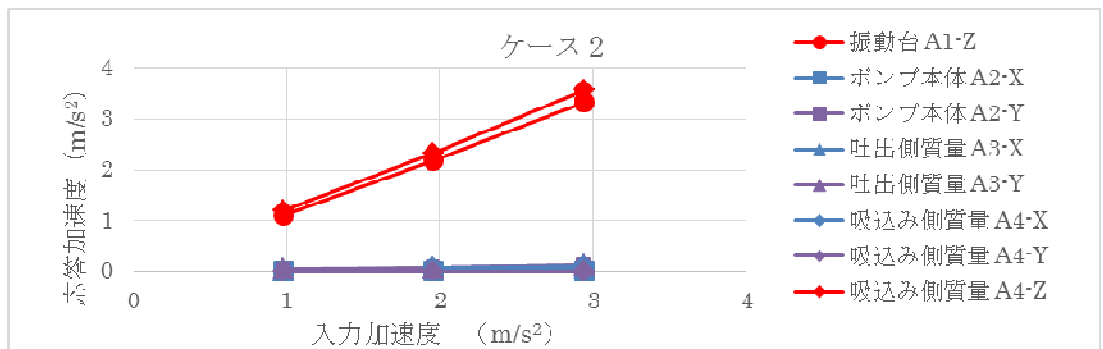
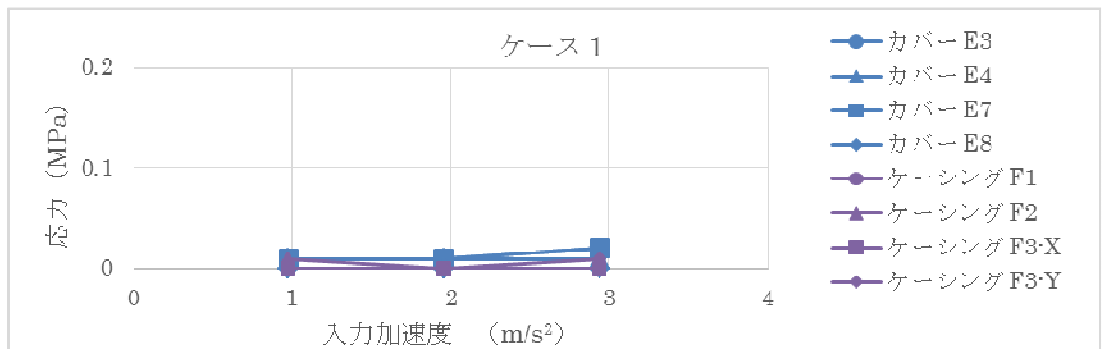
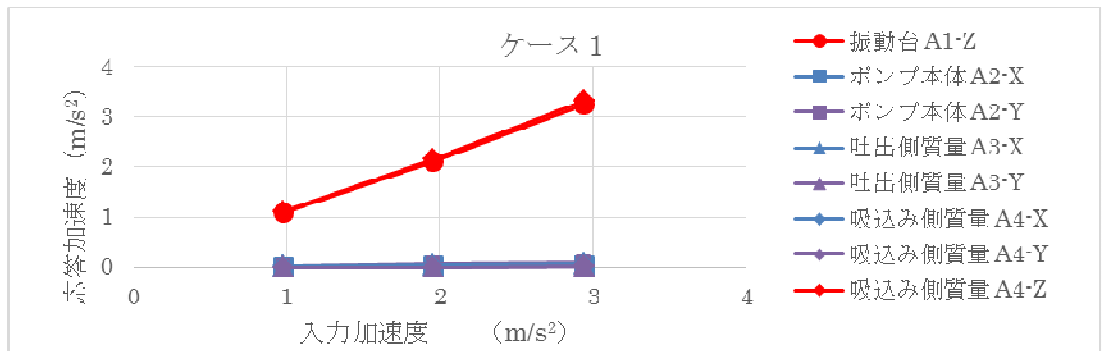


図 4.4.5.7 入力加速度と各計測点の応力、加速度の関係

(c) 各試験条件における最大発生応力レベル

試験ケース 1、2 に対し正弦波掃引試験 1～4 における加速度および応力計測点について、振動数 5 Hz～100 Hz 間で計測された最大応力値を比較し表 4.4.5.3 に示す。

- ① ケース 1(アーム無)では吸込側カバー計測点 E3 において 0.13/92.19 Hz、吐出側カバー計測点 F3-X において最大応力は 3.32/92.19 Hz、一方、ケース 2 (アーム有) では吸込側カバー計測点 E3 において、7.53/56.07 Hz、吐出側ケーシング計測点 F3-X において、最大応力は 10.19/56.07 Hz であった。
- ② 上述した通り、最も大きな応力は吐出側ケーシング固定部に発生している。

表 4.4.5.3 最大値表 (グラフから読み取った最大値/周波数)

計測点	0.49m/s ²				0.98m/s ²				2.94m/s ²				6.86m/s ²				
	ケース 1		ケース 2		ケース 1		ケース 2		ケース 1		ケース 2		ケース 1		ケース 2		
加速度 [m/s ² /Hz]	A1-Z	0.79/	92.99	1.02/	60.40	1.16/	92.82	2.06/	59.95	4.67/	92.52	5.35/	57.87	9.94/	91.04	10.78/	56.74
	A2-X	0.17/	37.81	0.20/	32.36	0.22/	94.02	0.39/	32.12	0.71/	34.47	0.98/	29.04	1.29/	92.19	1.71/	56.07
	A2-Y	0.88/	93.52	1.70/	60.03	1.89/	93.39	3.30/	59.59	5.27/	93.09	7.35/	57.52	9.32/	92.19	12.92/	56.07
	A3-X	0.42/	37.81	1.10/	32.36	0.60/	94.39	2.06/	32.12	1.75/	93.09	4.78/	29.04	3.17/	92.19	9.83/	75.29
	A3-Y	6.09/	94.14	6.58/	25.76	12.68/	95.39	10.02/	48.81	36.45/	93.09	27.63/	57.52	72.98/	92.19	63.67/	56.07
	A4-X	0.24/	37.55	1.59/	60.03	0.29/	36.45	3.60/	59.59	0.98/	34.47	13.27/	57.52	1.20/	77.32	35.20/	55.79
	A4-Y	0.88/	40.32	1.42/	49.2	2.04/	39.59	2.57/	59.59	3.55/	37.21	4.58/	57.52	5.09/	34.32	6.66/	56.07
	A4-Z	2.26/	93.52	13.39/	60.03	4.77/	93.39	27.92/	59.59	13.11/	93.09	87.53/	57.52	23.32/	91.56	114.30/	56.07
応力 [MPa/Hz]	E3	0.01/	93.52	0.50/	60.03	0.03/	93.39	1.04/	59.59	0.07/	93.09	3.41/	57.52	0.13/	92.19	7.53/	56.07
	E4	0.01/	12.06	0.11/	60.03	0.01/	42.43	0.23/	59.59	0.01/	36.39	0.72/	57.52	0.02/	91.19	1.46/	56.07
	E7	0.01/	93.52	0.47/	60.03	0.02/	93.39	0.97/	59.59	0.05/	92.52	3.05/	57.52	0.09/	91.56	6.53/	56.07
	E8	0.01/	42.46	0.08/	60.03	0.01/	91.74	0.17/	59.59	0.01/	93.09	0.53/	57.52	0.01/	91.56	1.19/	56.07
	F1	0.01/	39.91	0.09/	25.76	0.03/	93.39	0.13/	25.66	0.08/	93.09	0.37/	57.52	0.17/	92.19	1.09/	56.07
	F2	0.01/	50.99	0.03/	31.99	0.01/	11.83	0.04/	31.94	0.01/	93.79	0.10/	24.50	0.03/	92.76	0.18/	75.29
	F3-X	0.28/	91.14	1.16/	25.76	0.57/	93.39	1.66/	25.66	1.64/	93.09	4.44/	57.52	3.32/	92.19	10.19/	56.07
	F3-Y	0.01/	94.14	0.05/	25.76	0.01/	94.02	0.07/	48.50	0.04/	93.79	0.23/	57.52	0.08/	92.19	0.55/	56.07

7) 結果のまとめ

本試験はFRP製のポンプケーシングを対象に加振試験を実施したものであり、吸込側、吐出側配管などの条件は完全に模擬せず、仮想長さのアーム（250 mm）の有無により、振動環境におけるケーシング応力への影響を調べたものである。その結果を以下にまとめる。

(a) 吸込側フランジ部近傍の応力について

アーム無し（ケース1）はアーム長さ $L=0$ 、アーム有り（ケース2）はアーム長さ $L=0.25\text{m}$ でアーム長さに対応するモーメントが、フランジ部に作用する。

図4.4.5.8にアーム有りの試験（掃引試験2～4）から得られたフランジ部に作用するモーメントとカバー（E3）に発生した応力の関係を示す。

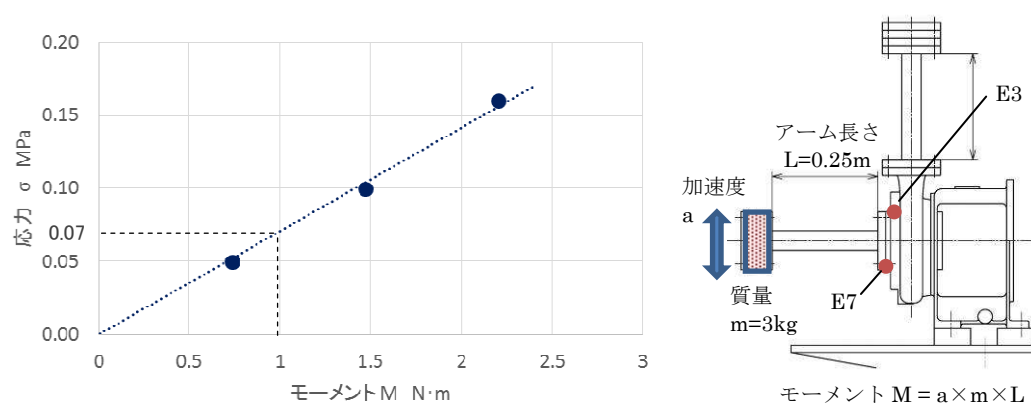


図 4.4.5.8 モーメントとカバー（E3）発生応力の関係

図4.4.5.8で示されたように、フランジ付根部カバー（E3）の発生応力は、モーメントに対して線形に増加しており、モーメント（アーム自重分は考慮せず） $1\text{N}\cdot\text{m}$ 当たり約 0.07MPa であった。また対称位置における計測点（E7）も同レベルであった。

しかし、共振を伴うと本部位には更に過大な応力が発生するため、設計する上では共振点を避ける必要がある。

(b) 吐出配管側ケーシング固定部近傍の応力について

本試験では、鉛直方向のみの加振を行ったが、試験結果6)(c)で述べたように吐出側ケーシング固定部の応力が大きいことから、水平方向（X、Y方向）の加振についても試験を実施し、強度に対する裕度を確認することが必要である。

- ・機器の作動状態において2 (+3, -0) Hz~100Hzの振動周波数に対して、次に示す振幅又は加速度で掃引し共振点(増幅定数: $Q \geq 2$ となる振動周波数)を探す掃引試験を行う。

振動周波数	振幅又は加速度
2 (+3, -0) Hz~13.2Hz	振幅±1.0mm
13.2Hz~100Hz	加速度±0.7g

- ・共振が認められないときは、加速度±0.7gの振動を30Hzで90分間加える耐久試験を行う。

- ・共振が認められたときは、対策を施して再び掃引試験又は共振周波数での振動(振幅又は加速度は掃引試験と同じ)を90分間加える耐久試験を行う。

- ・掃引試験において、共振点が互いに近接して複数認められた場合は、耐久試験に換えて120分間の掃引耐久試験を実施することができる。この場合の掃引の範囲は、 $Q \geq 2$ となる有害な共振点(機器の動作不良が起こったり、チャタリング等の機械的振動を増長させたりする周波数をいう。)のうち最大のものにおける振動周波数を中心に0.8倍から1.2倍の範囲とする。

- ・試験中に機器の作動を確認する。
- ・試験は3軸方向について行う。
- ・ディーゼル機関、空気圧縮機等の振動条件が厳しい機関に装備する機器にあっては、試験条件を次により行う。

振動周波数	振幅又は加速度
2 (+3, -0) Hz~25.0Hz	振幅±1.6mm
25.0Hz~100Hz	加速度±4.0g

- ・上記の試験条件よりも厳しい振動レベルが明記されている機器(ディーゼル機関の排気マニホールド、燃料噴射装置等に搭載される機器)については、同意された振動レベル、周波数範囲及び試験時間で試験を行う。この場合、同意された試験条件として、次に掲げる試験条件で試験を行うことがある。

振動周波数	加速度	温度	試験時間
40Hz~2000Hz	±10.0g	600°C	90分

- ・試験方法の詳細については、IEC60068-2-6, Test Fcによること。

4.4.6 横型渦巻ポンプのモデル機の耐火試験

プラスチック製のポンプ部品は、ClassNK「船用材料・機器等の承認及び認定要領」に従い、温水循環ポンプのインペラや飲料水装置用のインペラなどの一部のみ実用されている。今回試作したポンプは商船の搭載する推進補機への適用を目指しているため、プラスチック管で求められる耐火性試験（IMO Res. A.753(18) Appendix 2）に準拠した試験を実施した。なお、ケーシング外表面に市販の水性耐火塗料を塗布した供試体で実施した。

1) 試験装置

図 4.4.6.1 に耐火試験装置概略図を図 4.4.6.2、図 4.4.6.3 に耐火試験装置およびポンプケーシング写真をそれぞれ示す。

装置は、給水ライン側より加圧ポンプ、サブタンク（容量 100ℓ）、ポンプケーシング、ガストーチで構成し、サブタンクにはポンプケーシング内の水圧を調整するための圧力調整弁と減圧弁を設置した。また、急激な圧力変動への安全対策としてポンプ吐出側フランジにレリーフ弁（作動圧力 1.0MPa）を設けた。

また、図 4.4.6.10 にポンプケーシング写真を示す。軸シール部治具(SUS304 製)からの入熱による影響を抑えるため、耐熱ブランケットを充填している。

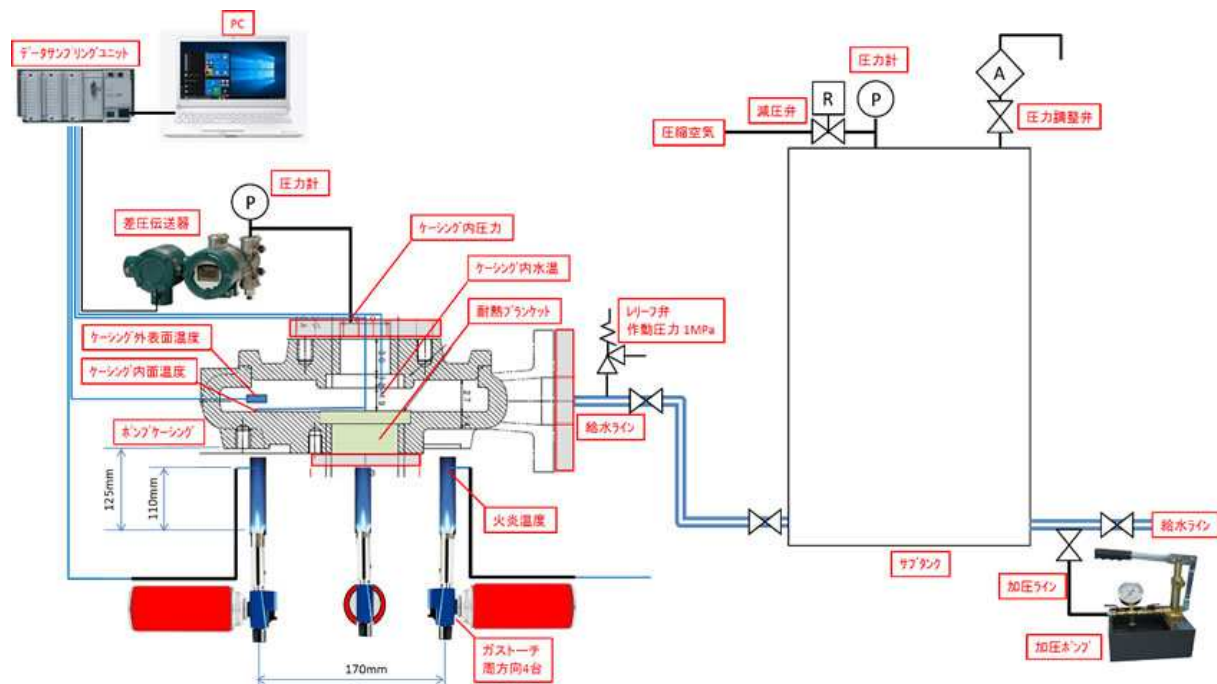


図 4.4.6.1 耐火試験装置概略図

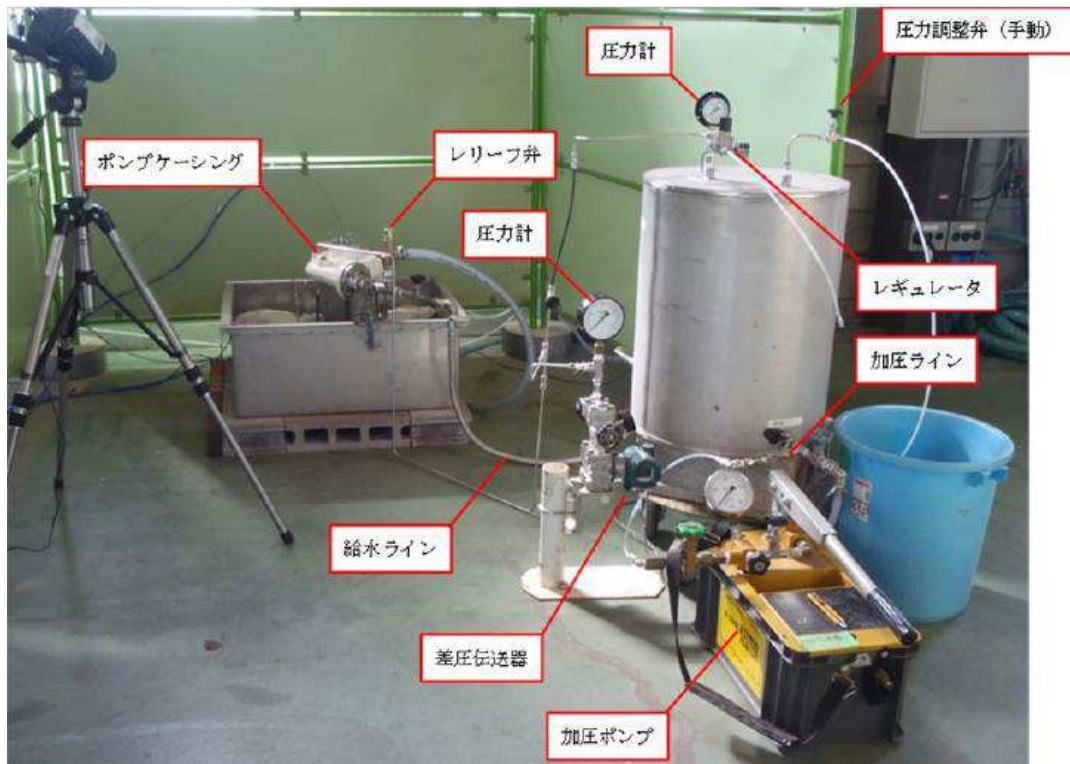


図 4. 4. 6. 2 耐火試験装置



図 4. 4. 6. 3 ポンプケーシング（試験前）

図 4.4.6.4 に耐火試験に使用したガストーチを、表 4.4.6.1 にガストーチの主な仕様を示す。図 4.4.6.5 に耐火試験ガストーチ加熱位置を、図 4.4.6.6 にガストーチ設置状況を示す。

耐火試験は本体軸シール部を底面とし、ガストーチから加熱面までの高さ $H=125\text{mm}$ 、 170mm ピッチで 4 台設置することで行った。



図 4.4.6.4 耐火試験用ガストーチ

表 4.4.6.1 ガストーチ仕様

製造元	榮製機株式会社
品番	BT-20SP
仕様	
火炎長さ	150~170mm
火口径	$\phi 20\text{mm}$
火炎温度	約 1500°C
熱量	2.4kW (2100kcal/h)

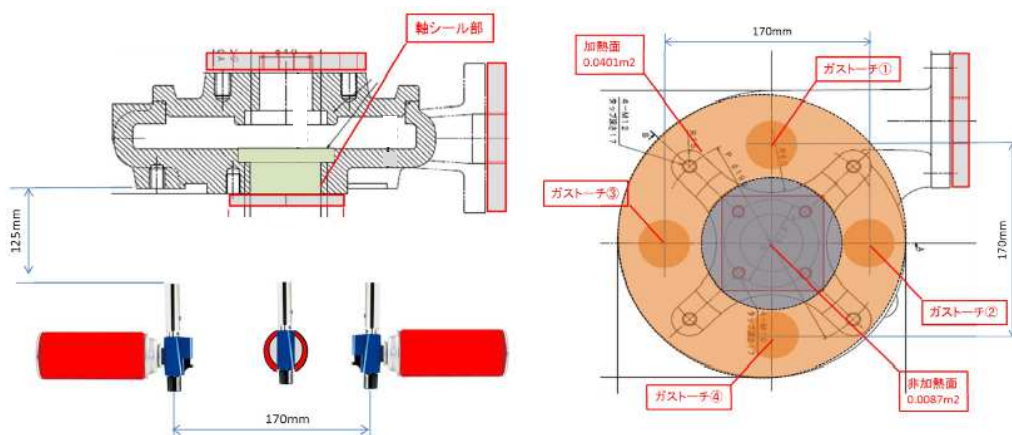


図 4.4.6.5 耐火試験ガストーチ加熱位置



図 4.4.6.6 耐火試験時ガストーチ設置状況

2) 試験手順

耐火試験は以下の手順で実施した。

- ① 水ラインからサブタンクを經由してポンプケーシングに水を供給し、満水にした。
- ② ポンプケーシング圧力測定ラインおよびサブタンク上部圧力逃し弁を開放し、試験装置内の空気を脱気した。
- ③ サブタンク給水ラインから加圧ポンプによりポンプケーシング内の水圧を $0.3 \pm 0.05 \text{MPa} \cdot \text{G}$ に加圧した。
- ④ 4台のガストーチに着火し、バーナー先端から 110mm 位置の火炎温度を $885^\circ\text{C} \pm 85^\circ\text{C}$ に LP ガス流量を調整した。(熱流密度 $113.6 \text{kW}/\text{m}^2 \pm 10\%$ に相当)
- ⑤ 4台のガストーチの火炎温度の安定確認後、4)項に記載位置にガストーチを設置し、30分間の耐火試験を行った。
- ⑥ 耐火試験中、加圧ポンプ、圧力調整弁、減圧弁によりケーシング内圧を $0.3 \pm 0.05 \text{MPa} \cdot \text{G}$ に維持した。

3) 耐火試験時のガストーチ熱流密度

表 4.4.6.2 に耐火試験時における各ガストーチの平均熱流密度一覧を、図 4.4.6.7 に耐火試験時のガストーチ熱量換算結果をそれぞれ示す。

その結果、いずれのガストーチとも IMO 規格 A.753 (18) に規定されている熱流密度 $113.6 \text{kW}/\text{m}^2 \pm 10\%$ を満足していることを確認した。

表 4.4.6.2 各ガストーチの平均熱流密度一覧

ガストーチ No.	平均火炎温度 ($^\circ\text{C}$)	平均熱量 (kW)	平均熱流密度 ※1 (kW/m^2)
①	902.4	1.164	115.8
②	930.0	1.200	119.4
③	844.5	1.089	108.4
④	844.4	1.089	108.4
①～④平均	880.4	1.135	112.9

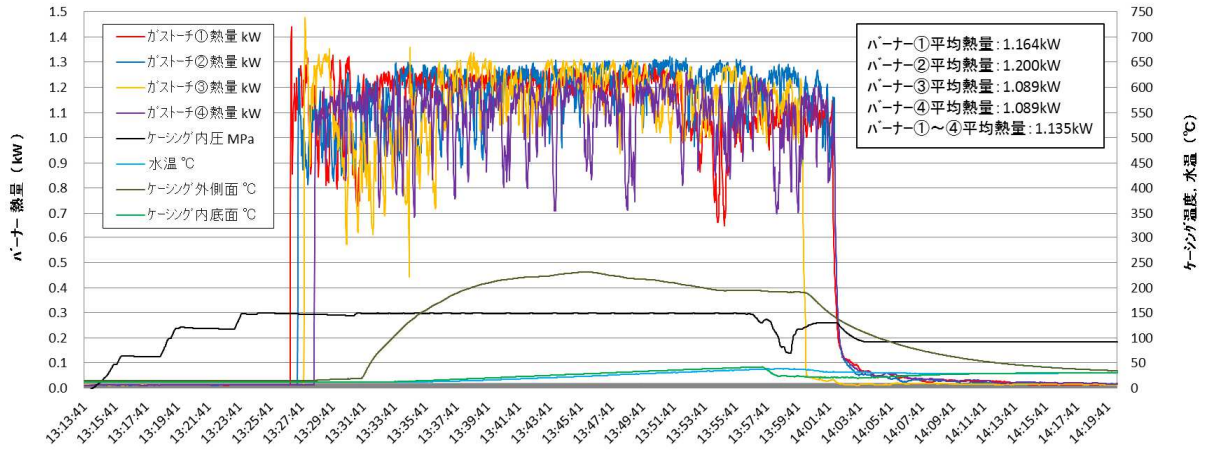


図4.4.6.7 耐火試験時のガストーチ熱量換算結果

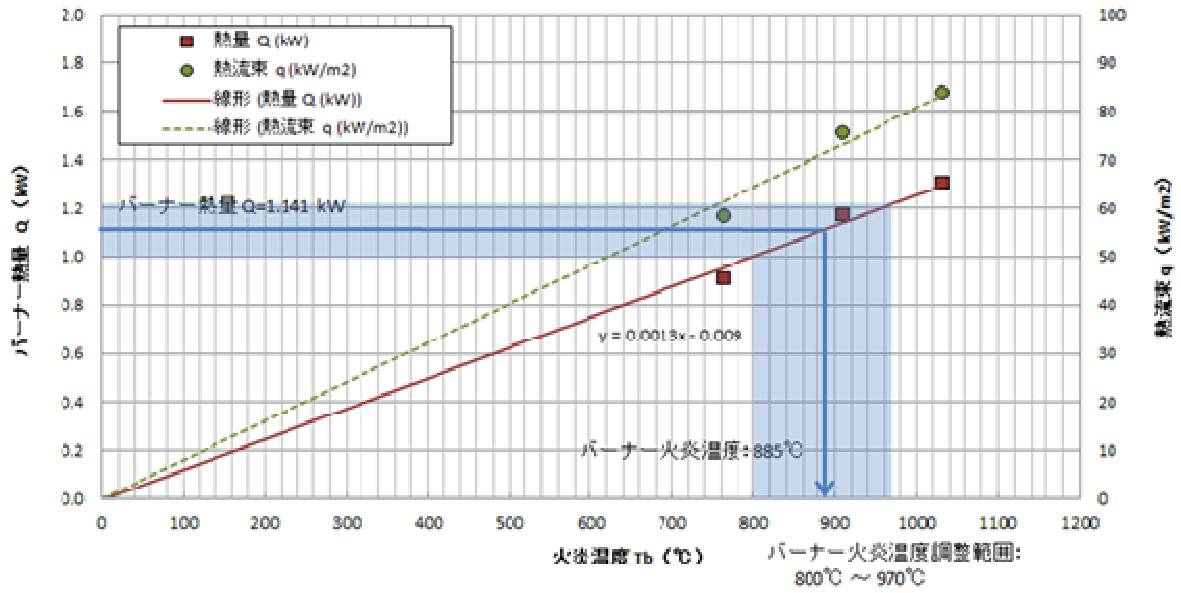


図 4.4.6.8 ガストーチ熱量測定結果

4) 耐火試験結果

図 4.4.6.9 に耐火試験時の時系列グラフを、図 4.4.6.10 に耐火試験状況を示す。また図 4.4.6.11 に耐火試験完了後のケーシング点検結果を、図 4.4.6.12 にサーモビューアーによる熱画像測定結果を示す。

耐火試験では、加熱部近傍温度は 500°C 以上の高温となっていたが、水性耐火塗料の効果により、加熱面から少し離れた外面表層温度は 230°C 以下、内面表層部においては 35°C 程度であり、焼損することなく健全な状態であった。

また、FRP と金属材料では熱伸び量が異なるため、フランジ接続面での漏れが生じたが、圧力 0.3MPa では全く異常がないことを確認した。

① 耐火試験

13:31 耐火試験開始、加圧ポンプによる圧力調整を実施

- ・試験開始直後ケーシング表面温度 18.6°C (K 熱電対)

ケーシング内面温度 11.8°C (K 熱電対)

ケーシング内水温 12.3°C (K 熱電対)

- ・試験開始 3 分後ケーシング表面温度 128.2°C (K 熱電対)

ケーシング内面温度 13.0°C (K 熱電対)

ケーシング内水温 12.3°C (K 熱電対)

ケーシング底部温度 250°C (放射温度計)

- ・試験開始 20 分後ケーシング表面温度 210.4°C (K 熱電対)

ケーシング内面温度 35.2°C (K 熱電対)

ケーシング内水温 30.5°C (K 熱電対)

ケーシング底部温度 500°C 以上 (放射温度計)

13:56 ポンプケーシングフランジ面から漏水発生、圧力 0.27MPa に低下、ボルト増し締め実施

13:57 軸シールフランジ面から漏水発生、圧力 0.14MPa まで低下

減圧弁ラインから 0.3MPa にて圧縮空気を供給開始、圧力 0.26MPa まで回復

14:01 耐火試験終了

② 耐圧試験

14:03 軸シールフランジ面のボルト増し締めにより漏水停止、圧力 0.184MPa に保持

14:39 圧力 0.3MPa まで昇圧開始

14:42 圧力 0.3MPa に到達、サブタンク圧力計(0~0.5MPa レンジ)を取り外し

14:45 圧力 0.3MPa での保持を確認

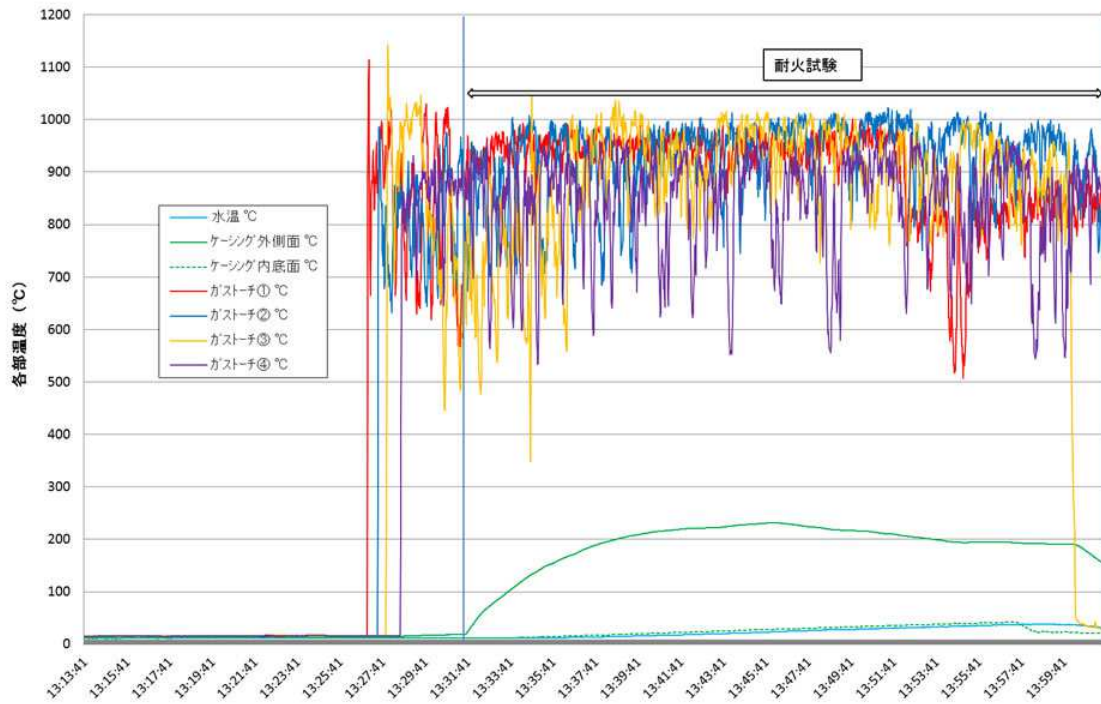
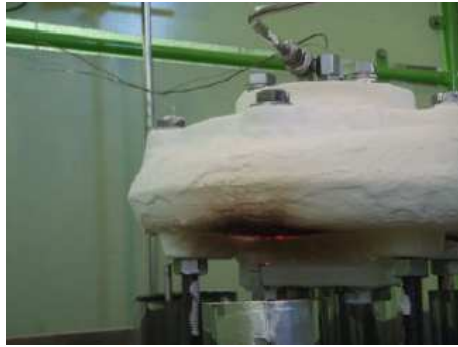


図 4.4.6.9 耐火試験時 時系列グラフ



(a) 耐火試験開始直後



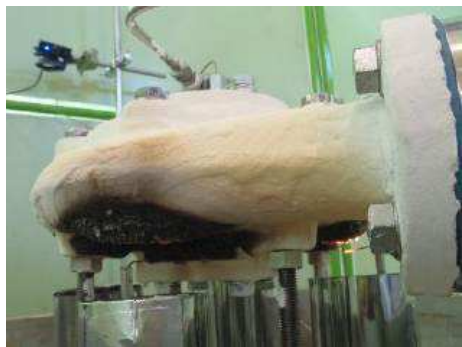
(b) 3分経過後



(c) 10分経過後



(d) 15分経過後



(e) 20分経過後



(f) 試験終了後

図 4. 4. 6. 10 耐火試験状況 (ガストーチ①付近)



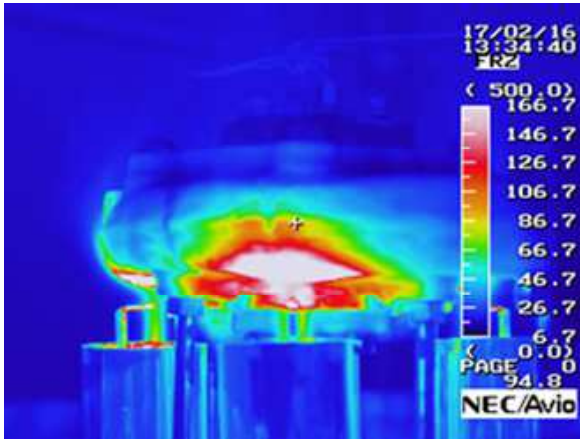
(a) 耐火試験完了後底面



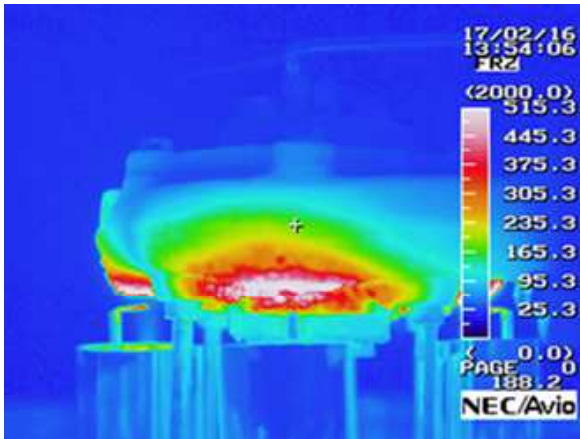
(b) 耐火試験完了後内面

図 4. 4. 6. 11 耐火試験完了後のケーシング点検結果

試験開始1分後



試験開始20分後



試験開始30分後終了

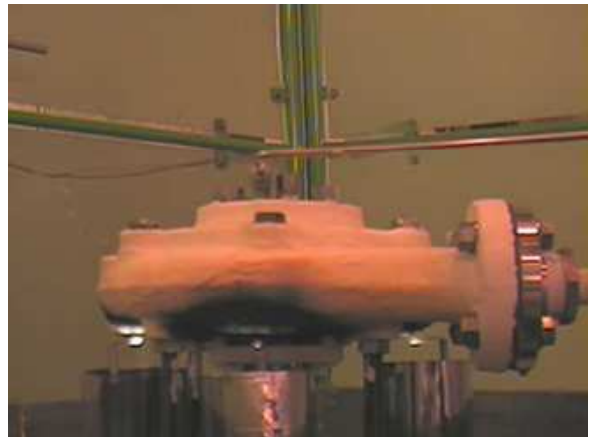
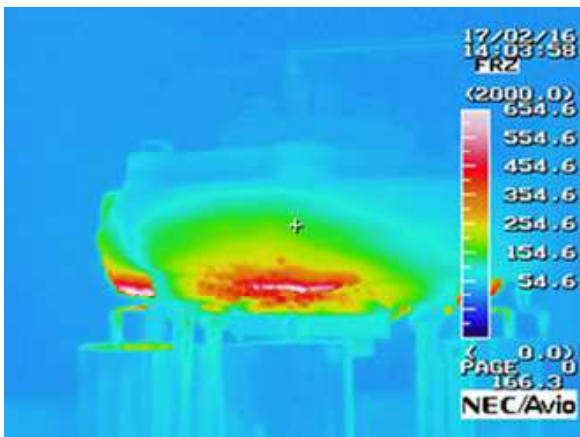


図4.4.6.12 サーモビューアーによる熱画像測定結果

Appendix 4
Fire endurance requirements matrix

	Location											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
Piping systems	Machinery spaces of category A	Other machinery spaces and pump-rooms	Cargo pump-rooms	Ro-ro cargo holds	Other dry cargo holds	Cargo tanks	Fuel oil tanks	Ballast water tanks	Cofferdams, void spaces, pipe tunnels and ducts	Accommodation, service and control spaces	Open decks	
1	CARGO (FLAMMABLE CARGOES f.p. ≤ 60°C)											
1	NA	NA	L1	NA	NA	0	NA	0 ¹⁰	0	NA	L1 ²	
2	NA	NA	L1	NA	NA	0	NA	0 ¹⁰	0	NA	L1 ²	
3	NA	NA	NA	NA	NA	0	NA	0 ¹⁰	0	NA	X	
4	INERT GAS											
4	NA	NA	0 ¹	NA	NA	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	NA	0	
5	0 ¹	0 ¹	NA	NA	NA	NA	NA	0 ¹	0 ¹	NA	0	
6	0	0	L1	NA	NA	NA	NA	NA	0	NA	L1 ⁶	
7	NA	NA	L1	NA	NA	0	NA	NA	0	NA	L1 ²	
8	FLAMMABLE LIQUIDS (f.p. > 60°C)											
8	X	X	L1	X	X	NA ³	0	0 ¹⁰	0	NA	L1	
9	X	X	L1	X	X	NA ³	0	0	0	L1	L1	
10	X	X	L1	X	X	NA	NA	NA	0	L1	L1	
11	X	X	L1	X	X	0	0	0	0	L1	L1	
12	SEAWATER ¹											
12	L1 ⁷	L1 ⁷	L1	X	X	NA	0	0	0	NA	L1	
13	L1	L1	L1	X	NA	NA	NA	0	0	X	L1	
14	L1	L1	L1	X	NA	NA	NA	NA	0	L1	L1	
15	L1	L1	L3	X	NA	NA	NA	0	0	L3	L3	
16	L3	L3	L3	L3	X	0 ¹⁰	0	0	0	L2	L2	
17	L3	L3	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	NA	L2	

图 4.4.6.13 IMO Res. A.753 Appendix 4 抜粋

	Location											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
Piping systems	Machinery spaces of category A	Other machinery spaces and pump-rooms	Cargo pump-rooms	Ro-ro cargo holds	Other dry cargo holds	Cargo tanks	Fuel oil tanks	Ballast water tanks	Cofferdams, void spaces, pipe tunnels and ducts	Accommodation, service and control spaces	Open decks	
18 Tank cleaning services fixed machines	NA	NA	L3	NA	NA	0	NA	0	0	NA	L3 ²	
19 Non-essential systems	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0	
20 FRESH WATER Cooling water essential services	L3	L3	NA	NA	NA	NA	0	0	0	L3	L3	
21 Condensate return	L3	L3	L3	0	0	NA	NA	NA	0	0	0	
22 Non-essential systems	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0	
23 SANITARY/DRAINS/SCUPPERS Deck drains (internal)	L1 ⁴	L1 ⁴	NA	L1 ⁴	0	NA	0	0	0	0	0	
24 Sanitary drains (internal)	0	0	NA	0	0	NA	0	0	0	0	0	
25 Scuppers and discharges (overboard)	0 ^{1,8}	0 ^{1,8}	0 ^{1,8}	0 ^{1,8}	0 ^{1,8}	0	0	0	0	0 ^{1,8}	0	
26 SOUNDING/AIR Water tanks/dry spaces	0	0	0	0	0	0 ¹⁰	0	0	0	0	0	
27 Oil tanks (f.p. > 60°C)	X	X	X	X	X	X ³	0	0 ¹⁰	0	X	X	
28 MISCELLANEOUS Control air	L1 ⁵	L1 ⁵	L1 ⁵	L1 ⁵	L1 ⁵	NA	0	0	0	L1 ⁵	L1 ⁵	
29 Service air (non-essential)	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0	
30 Brine	0	0	NA	0	0	NA	NA	NA	0	0	0	
31 Auxiliary low-pressure steam (≤ 7 bar)	L2	L2	0 ⁹	0 ⁹	0 ⁹	0	0	0	0	0 ⁹	0 ⁹	

ABBREVIATIONS:

- L1 Fire endurance test (appendix 1) in dry conditions, 60 min
- L2 Fire endurance test (appendix 1) in dry conditions, 30 min
- L3 Fire endurance test (appendix 2) in wet conditions, 30 min
- 0 No fire endurance test required
- NA Not applicable
- X Metallic materials having a melting point greater than 925°C

图 4.4.6.14 IMO Res. A.753 Appendix 4 抜粋

5. 評価まとめ

平成 28 年度の目標であった複合材料製ポンプ（インペラ、ケーシング）における製造法の検討成果と併せ、本年度の目標であるポンプの高効率化および軽量化に対し、以下に示す成果を得た。

- 1) ポンプ機器など複雑形状でガラス繊維含量および機械的強度が高く、量産性に適し高精度成形仕上りが要求される成形法として CM-RI*法（CM-RI:Closed Mold-Resin Injection）を選定した。

また、CM-RI 法における合せ型内へのガラス繊維のプリフォーム調製（配置）にはポンプ機器のような複雑形状品の賦形に適し、経済性にも優れたガラスチョップ方式を採用した。

この CM-RI 法に用いたマトリックス樹脂は、ガラス繊維との濡れ性、作業性が良好で経済性にも優れたビニルエステル樹脂を用いた。

この CM-RI 法の特徴は、従来のオートクレーブ法（圧力窯）などの大掛かりな設備が不要となり作業環境性が良好で、また Va-RTM 法に比べ CM-RI 法は合せ型内への樹脂含浸注入圧が 0.3~0.4MPa と高く高精度（寸法精度）、高品質（ボイド、うねりなどが僅少）成形品が期待できる。

- 2) 事業目標の達成状況

- ① 高効率化 《目標：2%以上》

- ・現用鋳物品と比べ、FRP 製品化することで横型ポンプで約 5%、立形ポンプでは約 7%の改善効果を確認した。

- ② 軽量化 《目標：40%以上》

- ・ポンプインペラ、ケーシングおよびサクシオンカバーなどの現用鋳物品と比べ、FRP 製品化することで横型ポンプで約 78%（14kg 減）、立形ポンプでは約 66%（80kg 減）の改善効果を達成した。

- 3) FRP 試作モデル機の耐久性について

- ・ポンプ起動-停止 5 回繰返し試験および仕様点での 5Hr 連続運転試験（最大応力と定常時の変動応力）の実体把握を行い、FRP 成形品が保有の強度物性（ 10^7 回疲労強度）に比べ、僅少で問題無いことを確認した。
- ・FRP 製ポンプケーシングを対象に Class NK 2016 船用材料・機器等の認証および認定要領を参考にした振動試験を実施、吸込フランジ側、吐出配管側固定部の応力レベルが 7~10MPa 範囲であり、FRP 保有の 10^7 回疲労強度（29MPa）に比べ、僅少であることが判明した。
- ・プラスチック管の耐火試験と判定基準（IMO Res. A. 753 Appendix2）に準拠し、FRP 試作モデルの耐火試験を実施した。横型ポンプ・改良モデルの FRP ケーシング外面に耐火塗料を施工し、ケーシング内部水圧 0.3MPa、30 分保持状態にて健全性を維持し十分な耐火性能を確認した。

4) 今後の予定について

今回の研究開発ではたくさんの知見を得ることができた。今後は実施できなかった試験などを行い、試作機をベースにした量産機的设计製作をする。その後、実船搭載試験を経て、平成 30 年度中に商品化を目指し、販売開始に向け引き続き検討を進めることとしている。

最後に本開発に関して公益財団法人日本財団からモーターボート競走共益資金による補助金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) JCMA (2004)
- 2) 川邊和正、笹山秀樹、小林真、近藤慶一、帰山千尋 福井県工業技術センター研究報告書、NO. 684(2012)
- 3) 高品幸次；「耐波浪型 FRP 製灯塔の開発に関する調査研究」海上保安試験研究センター
- 4) 強化プラスチック技術協会「強化プラスチックハンドブック」(1975)日刊工業新聞社
- 5) 北條英光、青木茂、有光希昭；「耐食 FRP ハンドブック」高圧ガス保安協会〈7〉
- 6) 平松徹；「炭素繊維の本」日刊工業新聞社 (2014)
- 7) 高分子化学株式会社、各種 FRP 成形法
[<http://www.osaka-kobunshi.com/method/index.html>](最終検索日：2016年3月9日)
- 8) 安田武夫 著 プラスチック材料の各動特性の試験法と評価結果〈7〉
- 9) 寺田進 著 渦巻ポンプの設計と製図
- 10) 安田武夫 著 プラスチック材料の各動特性の試験法と評価結果〈10〉, P. 95
- 11) 日本財団助成事業 平成23年度複合材料による高効率低コスト型プロペラの技術開発成果報告書
- 12) 株式会社三菱化学テクノロジーサーチ 平成24年度中小企業支援調査－炭素繊維複合材料の加工技術に関する実態調査－調査報告書
- 13) 廣恵章利、本吉正信；「プラスチック物性入門（第2版）」日刊工業新聞社

「この報告書は BOAT RACE 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」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話 : 03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>