

平成 1 9 年度

低速 4 サイクル機関用電子制御システムに関する技術開発

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「低速4サイクル機関用電子制御システムに関する技術開発」事業の成果をとりまとめたものである。

NO_x低減とCO₂低減との相反する環境対策に対し、船舶用機関では電子制御システムは有効かつ不可欠な手段である。ライセンス製品である低速2サイクル機関はすでに実用化されている。一方、高速4サイクル機関については、コモンレール方式を採用し、燃料噴射のみを電子制御化しているが、コストアップに見合う性能改善等の効果が明瞭ではなく、普及していない。

こうした中で、本事業は、内航船用主機として広く採用されている低速4サイクル機関について、燃料噴射だけでなく、排気弁、吸気弁、さらには、シリンダ注油の全てを制御対象とした電子制御化を国産技術により世界に先駆けて実用化し、部分負荷時の効率改善、注油量の削減、及びNO_xの低減を実現するために、阪神内燃機工業(株)が行ったものである。

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. 事業の背景および目的	1
2. 事業の概要	1
3. 事業の目標	3
3.1 燃料噴射時期、吸排気弁の開閉時期の電子制御	3
3.2 シリンダ注油の電子制御	3
3.3 経済性	3
4. 事業の内容	3
4.1 実施体制	3
4.2 実施期間	4
4.3 実施場所	4
4.4 実施項目およびスケジュール	4
5. 実施計画書の作成	6
5.1 事業の進め方	6
5.2 実施計画書の作成	6
6. 電子制御システムの設計	6
6.1 試験機関	6
6.2 燃焼解析、性能シミュレーション	6
6.3 制御系の解析	7
6.4 燃料噴射制御	8
6.5 吸排気弁制御	8
6.6 シリンダ注油制御	9
6.7 油圧系統	10
6.8 始動空気制御	10
6.9 制御系	10
6.10 その他	11
6.11 全体のシステム	11
7. 電子制御システムの製作	11
7.1 作動部および油圧部	11
7.2 制御部	13

8.	試験計画の作成	13
8.1	要素試験	13
8.2	実機試験	14
9.	電子制御システムの要素試験	14
9.1	燃料噴射装置の要素試験	14
9.2	吸排気弁駆動装置の要素試験	17
10.	試験準備	18
11.	実機試験	18
11.1	制御部の作動確認	18
11.2	作動部および油圧部の作動確認	19
11.3	機関性能改善、性能確認試験	22
11.4	シリンダ注油量低減試験	27
12.	コストの検討	29
13.	まとめ	30
13.1	制御部	30
13.2	作動部および油圧部	30
13.3	機関性能	30
13.4	シリンダ注油	31
13.5	特許申請	31
13.6	目標の達成度	31
14.	今後の予定及び課題	32
14.1	機関性能の更なる改善	32
14.2	シリンダ注油システムの検証	32
14.3	システムの最適化	33
14.4	バックアップ方式、予備品の検討	33
14.5	コストの検証	33
14.6	実用化に向けての検証	33
15.	添付資料	34
15.1	実施計画書	35
15.2	試験機関、3 S L T 3 2	36

15.3	燃焼解析、性能シミュレーション	37
15.4	制御系の解析	39
15.4-1	カム式燃料噴射系	39
15.4-2	電子制御式燃料噴射系	41
15.4-3	サーボ弁の単体試験結果	44
15.4-4	吸排気弁駆動装置の解析	45
15.5	燃料噴射制御	46
15.6	吸排気弁制御	48
15.7	シリンダ注油制御	50
15.8	油圧系統	51
15.9	制御系	53
15.10	試験装置の製作	68
15.11	試験計画	73
15.11-1	要素試験の試験計画	73
15.11-2	実機試験の試験計画	75
15.12	電子制御システムの要素試験	77
15.12-1	燃料噴射の要素試験	77
15.12-2	吸排気弁駆動装置の要素試験	84
15.13	電子制御システムの組み付け	85
15.14	作動部および油圧部の作動確認	89
15.14-1	吸排気弁の作動	89
15.14-2	燃料噴射特性	90
15.15	機関性能確認、性能改善試験	92
15.15-1	燃料噴射圧力変更試験	92
15.15-2	燃料噴射時期遅延試験	92
15.15-3	吸気弁閉時期変更試験	93
15.15-4	内部 E G R 試験	93
15.15-5	ブーツ噴射試験	94
15.15-6	総合機関性能	95
15.16	シリンダ注油量低減試験	97
15.17	電子制御システムのコスト	98

低速 4 サイクル機関用電子制御システムに関する技術開発

1. 事業の背景および目的

船舶用機関の環境対策として NO_x 低減と CO_2 低減の社会ニーズがある。この相反するニーズを両立させるためには、電子制御システムは有効かつ不可欠な手段である。

低速 4 サイクル機関は、構造が簡単で取り扱いおよび保守点検が容易である。また、動圧過給方式により、広い出力範囲での運転が可能であり、負荷変動への追従性が良い、という利点があり、出入港時の機関発停や狭水路での低・微速運転の多い内航船の主機関に適しており多く採用されている。

近海・外航船に使用されている低速 2 サイクル機関は、近年、燃料噴射装置と排気弁駆動装置に電子制御方式を採用した機関が開発され、既に市場に投入されており、 NO_x の低減や部分負荷効率の向上に寄与している。

中・高速 4 サイクル機関については、コモンレール方式を採用して燃料噴射のみを電子制御化しているが、コストアップに見合う性能改善等の効果が明瞭でなく、その採用は普及していない。

一方、低速 4 サイクル機関用の電子制御システムは開発されていない。本事業は、内航船用主機関として広く採用されている低速 4 サイクル機関について、燃料噴射だけでなく、排気弁、吸気弁、さらには、シリンダ注油の全てを制御対象とした電子制御化を国産技術により世界に先駆けて実用化し、部分負荷時の効率改善、注油量の低減、そして NO_x の低減を実現して環境面および経済面で貢献することを目的とする。

2. 事業の概要

現状の低速 4 サイクル機関は燃料噴射ポンプ、吸気弁、排気弁はカムで機械的に駆動されており、作動タイミングは 85～100%負荷の高負荷域で燃焼が最良になるよう調整され、そのタイミングは固定である。部分負荷使用時の燃焼状態を最良にするためにはタイミングを任意に制御することが必要であり、それには、電子制御システムを採用することが不可

欠である。

船舶用ディーゼル機関の電子制御システムの比較を表 - 1 に示す。

電子制御の方式には、燃料油を蓄圧して直接、噴射を制御するコモンレール方式 (CRS) と、燃料噴射ポンプや排気弁の作動ピストンを油圧制御するユニットポンプ方式 (UPS) の 2 種類がある。

2 サイクル機関はコモンレール方式とユニットポンプ方式の両者が採用されており、燃料噴射および排気弁駆動に電子制御を行なっている。

現状の 4 サイクル機関は中・高速機関用で燃料噴射制御にはコモンレール方式が採用されているが、吸排気弁の電子制御は行なわれていない。

今回の事業の電子制御システムは、燃料噴射と吸排気弁の作動が同一作動油で行なえること。作動油圧が低く信頼性が高いこと。また、従来の機関と燃料噴射ポンプや吸排気弁作動ピストンなどの同一部品が使用でき、レトロフィットが比較的容易なことから、ユニットポンプ方式を 4 サイクル機関で初めて採用する。

また、大形 2 サイクル機関に採用されているユニットポンプ方式は 100min^{-1} 前後の低回転用であり、今回の事業では、ユニットポンプ方式では初めて 420min^{-1} まで制御できるシステムを開発する。

2 サイクル機関のシリンダ注油制御システムは燃焼関係の制御とは別に開発されたものであり、それぞれが独立したものである。

今回の電子制御システムは、燃焼関係の制御とシリンダ注油制御を同一の制御装置を使用することにより、システムの簡素化とコスト低減を図る。

表 1 船舶用ディーゼル機関の電子制御システムの比較

機 関	電子制御項目				方 式
	燃 料	排 気	吸 気	シリンダ注油	
2 サイクル機関			×		UPS/CRS
4 サイクル機関		×	×	×	CRS
今回の事業					UPS

注)・ は制御を行なっている項目を、×は制御していない項目を示す。

・ UPS はユニットポンプ方式を、CRS はコモンレール方式を示す。

3. 事業の目標

3.1 燃料噴射時期、吸排気弁の開閉時期の電子制御

燃料噴射装置、吸排気弁の駆動装置に電子制御方式を採用することにより、下記の目標値を設定する。

- ・ NO_x 排出量の目標

現在販売されている低速 4 サイクル機関（NO_x 1 次規制対応）を基準にして 30% 減を目標とする。

- ・ 燃料消費量、CO₂ 排出量

現在販売されている低速 4 サイクル機関で、機関内部で NO_x 排出率を 1 次規制から 30% 低減した場合を基準にして、部分負荷での燃費改善を含め、トータルで 5% から 10% の低減を目標とする。

3.2 シリンダ注油の電子制御

シリンダ注油装置に電子制御を採用して注油タイミングと注油期間を制御することにより注油量の適正化を図る。

- ・ シリンダ注油量の低減目標

現在販売されている低速 4 サイクル機関のシリンダ注油量を基準にして、部分負荷での改善を含めトータルで 50% 低減することを目標とする。

3.3 経済性

電子制御システムを採用することにより、カム、カム軸、同駆動装置が不要になり、機関本体のコストを低減することができる。

また、低速 4 サイクル機関の特徴である低負荷域使用による経済運行を行なうことにより、電子制御の効果と合わせて燃料消費量の低減を行なう。

以上により、初期の設備投資を 5 年程度で回収できるシステムを構築することを目標とする。

4. 事業の内容

4.1 実施体制

本事業は船用主機関メーカーの阪神内燃機工業株式会社と、制御機器メーカーのナブテスコ株式会社が共同で実施する。

また、本事業を進めるにあたっては、九州大学大学院、総合理工学研究院の高崎教授、田島准教授のご指導を仰いだ。

4.2 実施期間

本事業は平成18年度から19年度の2年間で実施する。

開始 : 平成18年4月1日

終了 : 平成20年2月28日

4.3 実施場所

阪神内燃機工業株式会社 明石工場

〒673-0037 兵庫県明石市貴崎5丁目8番70号

ナブテスコ株式会社 西神工場

〒651-2413 兵庫県神戸市西区福吉台1丁目1617番地 - 1

九州大学大学院、総合理工学研究院

〒816-8580 福岡県春日市春日公園6 - 1

4.4 実施項目およびスケジュール

本事業は阪神内燃機工業株式会社とナブテスコ株式会社が共同で、平成18年度から19年度の2年間で、下記の事業内容を実施する。

2年間での事業の実施予定を表2に示す。

1) 平成18年度

・実施計画の作成

船用ディーゼル機関の電子制御技術に関する調査、研究を行なうとともに、本事業内容に基づいて実施計画を立案し、平成18年度、19年度の2年間のスケジュールを作成する。

・電子制御システムの設計

燃料噴射、吸排気弁駆動、シリンダ注油、始動空気制御について、制御項目、制御方法および作動方法を検討し、仕様を決定する。

決定した仕様に基づき、電子制御システムの設計を行なう。

また、九州大学に依頼して燃焼解析、性能シミュレーションを実施するとともに、数値解析ソフトを導入し、制御系の解析を行なう。

- ・電子制御システムの試作

設計に基づいて、電子制御システムの試作に着手する。

- ・試験計画作成

要素試験の試験装置、試験機関への油圧機器の組込み方法の検討、設計を行なう。また、要素試験および実機試験の試運転方案を作成する。

2) 平成19年度

- ・電子制御システムの試作

平成18年度に引き続き、電子制御システムの試作を行なう。

- ・電子制御システムの要素試験

電子制御システム単体での要素試験を行い、作動の確認を行なう。

- ・試験準備

試作した電子制御システムを試験機関に組み込み、工場試験に備える。

- ・試験運転

工場において試験機関を運転し、制御装置の作動を確認するとともに、燃費低減およびNOx低減効果を確認する。

- ・報告書作成

実施結果をとりまとめ、性能評価を行い、報告書を作成する。

表 2 事業の実施予定表

実施項目	平成18年度				平成19年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
< 1年目 >								
実施計画書の作成	←→							
電子制御装置の設計	←→							
試作				←→				
試験計画作成		←→						
とりまとめ				←→				
< 2年目 >								
電子制御装置の要素試験					←→			
試験準備						←→		
試験運転							←→	
報告書作成								←→

5. 実施計画書の作成

5.1 事業の進め方

低速 4 サイクル機関用電子制御システムを阪神内燃機工業株式会社とナブテスコ株式会社が共同で開発するに当たり、開発の進め方について両社で協議を行い、共同開発契約を締結した。

両社のメンバでプロジェクトチームを編成し、開発の進捗状況の確認、および課題、問題点について協議する。

阪神内燃機工業株式会社は、燃料噴射用および吸排気弁駆動用アクチュエータ、作動油系統の仕様決定と製作および試験機関による試験運転、評価を担当する。

ナブテスコ株式会社は燃料噴射用および吸排気弁駆動用のサーボ弁の仕様決定と製作、制御用コントロールユニットの仕様決定、設計と製作を担当する。

5.2 実施計画書の作成

低速 4 サイクル機関用電子制御システムの概要を決定し、実施項目、課題、問題点を挙げ、平成 18、19 年度の 2 年間のスケジュールを作成した。

2 年間での実施項目とスケジュールを添付資料 15.1 に示す

6. 電子制御システムの設計

6.1 試験機関

本事業の実機試験は 3SLT32 形試験機関に電子制御システムを組み込んで実施する。3SLT32 形機関の主要目、機関組立断面図および機関の全景写真を添付資料 15.2 に示す。

6.2 燃焼解析、性能シミュレーション

NO_x 低減、燃費低減の目標を達成するため、九州大学大学院、総合理工学研究院の高崎教授、田島准教授に燃焼解析、性能シミュレーションなどのご指導をお願いした。

常用出力の 75% 負荷で、矩形噴射やブーツ噴射での燃焼解析、圧縮

比上昇、給気圧上昇および吸気弁早閉（ミラーサイクル）での性能計算を実施した。その結果、燃料噴射時期の遅延とブーツ噴射を行うことによりNOx排出量の低減を図り、圧縮比上昇、ミラーサイクルを採用し悪化した燃費を挽回することにより、NOx低減と燃費低減の両立を図ることができる目処がついた。

低負荷時を含めた広い運転域での性能を確認するために50%および100%負荷での燃焼解析、性能計算を実施した。

各分力での解析結果を基に、3SLT32形機関の性能シミュレーションを行なった。その結果、上記の手法を採用することにより、所期の目標を達成できる見込みがついた。

矩形噴射とブーツ噴射の燃焼解析および3SLT32形機関の性能シミュレーション結果を添付資料15.3に示す。

6.3 制御系の解析

本システムを開発するため解析ソフトMATLAB/Simulinkを導入し、ナブテスコ株式会社と阪神内燃機工業株式会社が共同で制御系の解析（シミュレーション）を行なった。

現状のカム式の燃料噴射系をモデル化し解析を行なった。解析結果は計測結果とほぼ一致しており、解析に使用した各係数、解析結果が妥当であることの検証を行なった。

カム式燃料噴射系のモデル図と解析結果および計測結果との比較を添付資料15.4-1に示す。

電子制御システムでブーツ噴射を採用した場合を想定して、模擬波形での解析を行ない、サーボ弁の開度を制御することによりブーツ噴射が行なえることを確認した。

電子制御式燃料噴射系のモデル図とブーツ噴射の模擬波形による解析結果を添付資料15.4-2に示す。

ブーツ噴射実現の可否を決定する要因としてはサーボ弁の追従性が大きい。サーボ弁の追従性を確認するためにサーボ弁単体試験を実施し、想定通りの性能であることを確認した。

上記、
、
の結果より、燃料噴射装置の要素試験を行い、サーボ

弁の追従性、ブーツ噴射実現の可否を確認することにした。

添付資料 15.4-3 にサーボ弁単体試験結果を示す。

吸排気弁駆動装置についても、油圧システムをモデル化して解析を行ない、想定通りの作動であることを確認した。

吸排気弁駆動用アクチュエータのピストンストロークの解析結果を添付資料 15.4-4 に示す。

6.4 燃料噴射制御

燃料噴射制御は、機関回転速度、機関出力により求めた最適噴射時期にサーボ弁を作動させ、作動油を供給することにより、アクチュエータを作動させる。アクチュエータで燃料噴射ポンプのプランジャを押し上げ燃料を噴射させる機構とする。

燃料噴射期間の決定はガバナによりラックを制御することにより行うことにした。

燃料噴射圧力は燃料噴射ポンプの設計圧力である 120MPa に対応可能とすることで、アクチュエータのピストン径、ピストンストローク等の寸法を決定し、その流量に見合うサーボ弁を決定した。

決定した仕様でアクチュエータや機関への取り付け方法の詳細を検討し、製作図面を作成した。また、チェック弁や絞り弁等の配管用部品の選定を行なった。

添付資料 15.5 に燃料噴射用アクチュエータおよび制御のブロック図を示す。

6.5 吸排気弁制御

吸排気弁制御は、機関回転速度、機関出力より求めた最適な開閉時期にサーボ弁を作動させ、作動油をアクチュエータに供給し、吸排気弁を開く。その後、サーボ弁により作動油を逃がすことにより弁ばねの荷重により弁を閉じる機構とする。

排気弁は開時には筒内圧力に見合った荷重が必要であるが、一旦開くと荷重は小さくなるため、開弁時のみ作動ピストンの受圧面積を大きくし、その後は受圧面積を小さくすることにより、作動油量を

減らしサーボ弁を小形化する機構を考案した。

サーボ弁を選定すると共に、アクチュエータの寸法や機関への取り付け方法の詳細を検討し、製作図面を作成した。また、チェック弁や絞り弁等の配管用部品を選定を行なった。

吸排気弁駆動用アクチュエータの組立図および制御のブロック図を添付資料 15.6 に示す。

6.6 シリンダ注油制御

従来の機械式注油装置は 100% 負荷時の注油量を所定の値に設定し、部分負荷での注油量は機関の回転速度に依存していたが、電子制御を採用してタイミング注油、高圧注油を行うことにより、100% 負荷時の注油量の削減を図る。また、部分負荷時は機関の出力に見合った注油量に制御することにより、シリンダ油消費量の削減を図る。

シリンダ注油システムは機関回転速度とラック目盛より求めた機関出力に見合った最適な量を注油し、注油時期はクランク角度を検出し、注油口の位置をピストンリングが通過する時に注油する機構とする。

試験機関の出力、回転速度、注油口の位置より注油時期、注油期間等の仕様を決定した。

1 回の吐出量（注油量）は微少であるため、注油量の調整は注油間隔（何回転に 1 回注油するか）を制御することにより行なうことにした。

決定した仕様に見合う小容量の電磁弁を選定し、電磁弁単体での作動試験を実施したが、応答速度が遅く要求仕様を満たさないため、使用不可と判断した。

その後、プランジャ式の注油器 2 種類を選定し作動試験を行い、要求仕様を満たしていることを確認し、本事業のシリンダ注油用に使用できる目処が付いた。

シリンダ油供給用のタンクユニットの仕様を決定し、専門メーカーに依頼して装置図を作成した。

プランジャ式注油器の作動試験の状況を添付資料 15.7 に示す。

6.7 油圧系統

作動油圧の設定圧力を 32MPa、作動時の圧力低下を 1MPa 以下として蓄圧器の容量を決定した。

蓄圧器本体や取付ボルトの強度、加工上の問題等を考慮の上、形状を決定し、図面を作成した。

また、機関への取付方法を決定し、必要部品の図面を作成した。

作動油の流量、圧力等から油圧ポンプの容量、タンク容量、温度調整装置等の仕様を決定しタンクユニットの図面を作成した。

タンクユニットから蓄圧器への配管径を決定し、配管部品の図面作成、選定を行なった。

システムの作動油の系統図、タンクユニットおよび機関への組込図を添付資料 15.8 に示す。

6.8 始動空気制御

燃料噴射制御、吸排気弁駆動に電子制御方式を採用した場合、カム軸は不要になるため、機械式で使用している始動空気管制弁は使用できない。したがって、始動空気制御についても電子化を行なう必要がある。

始動空気制御は、電磁弁を制御することにより始動弁にパイロット空気を供給し始動弁を開き、パイロット空気を遮断することにより始動弁のばねで閉じる機構とする。

始動弁の開閉タイミングおよび開期間は現状の機械式と同一とする。

パイロット空気の流量、流速等の検討を行い、電磁弁を選定した。

4 サイクル機関は 2 回転が 1 サイクルであり、通常は機関の 1/2 回転の検出板を装備して 720° の角度検出が必要であるが、本システムでは機関 1 回転、360° で制御する方法を考案し、採用することにした。

6.9 制御系

燃料噴射、吸排気弁駆動、シリンダ注油等の目標とする仕様を満足する制御方法、制御項目および実機試験時の調整範囲を検討し仕様を決

定した。決定した仕様を基にして、制御装置の詳細設計を行なった。
添付資料 15.9 に電子制御システムの仕様の概要を示す。

6.10 その他

電子制御システムに関する他社の特許を調査し、計画のシステムが
抵触すると思われる特許は見当たらないことを確認した。

制御に必要なセンサ、監視（モニタ）、作動確認用センサ、試験用セ
ンサを選定し、個数、取り付け位置を決定した。

試験機関への電子制御システムの実装方法の検討、計画を行な
い、機関の改造に必要な部品の製作図面を作成した。

6.11 全体のシステム

上記の 6.4 から 6.10 を全体として示したシステム構成図を図 1 に、
油圧系統図を図 2 に示す。

7. 電子制御システムの製作

7.1 作動部および油圧部

平成 18 年度に燃料噴射用のサーボ弁は予備を含めて 4 個、吸排気弁
駆動用は予備を含めて 7 個を発注し納入された。

また、要素試験を早期に実施するために、平成 18 年度に燃料噴射用
アクチュエータ、同連結管、サーボ弁取付板など燃料噴射装置、各 1
組の発注、製作を行なった。

平成 19 年度に燃料噴射装置を 3 組、吸排気弁用アクチュエータを予
備を含めて、7 組の発注および製作に着手し、6～7月に完成した。
タンクユニット、油圧ポンプ、蓄圧器、配管部品等の油圧機器の発注
を行い、5～6月に納入された。

また、要素試験用部品および試験機関の改造部品の手配、製作を行な
った。

添付資料 15.10 に燃料噴射用および吸排気弁駆動用アクチュエータ、
関連部品およびサーボ弁を示す。

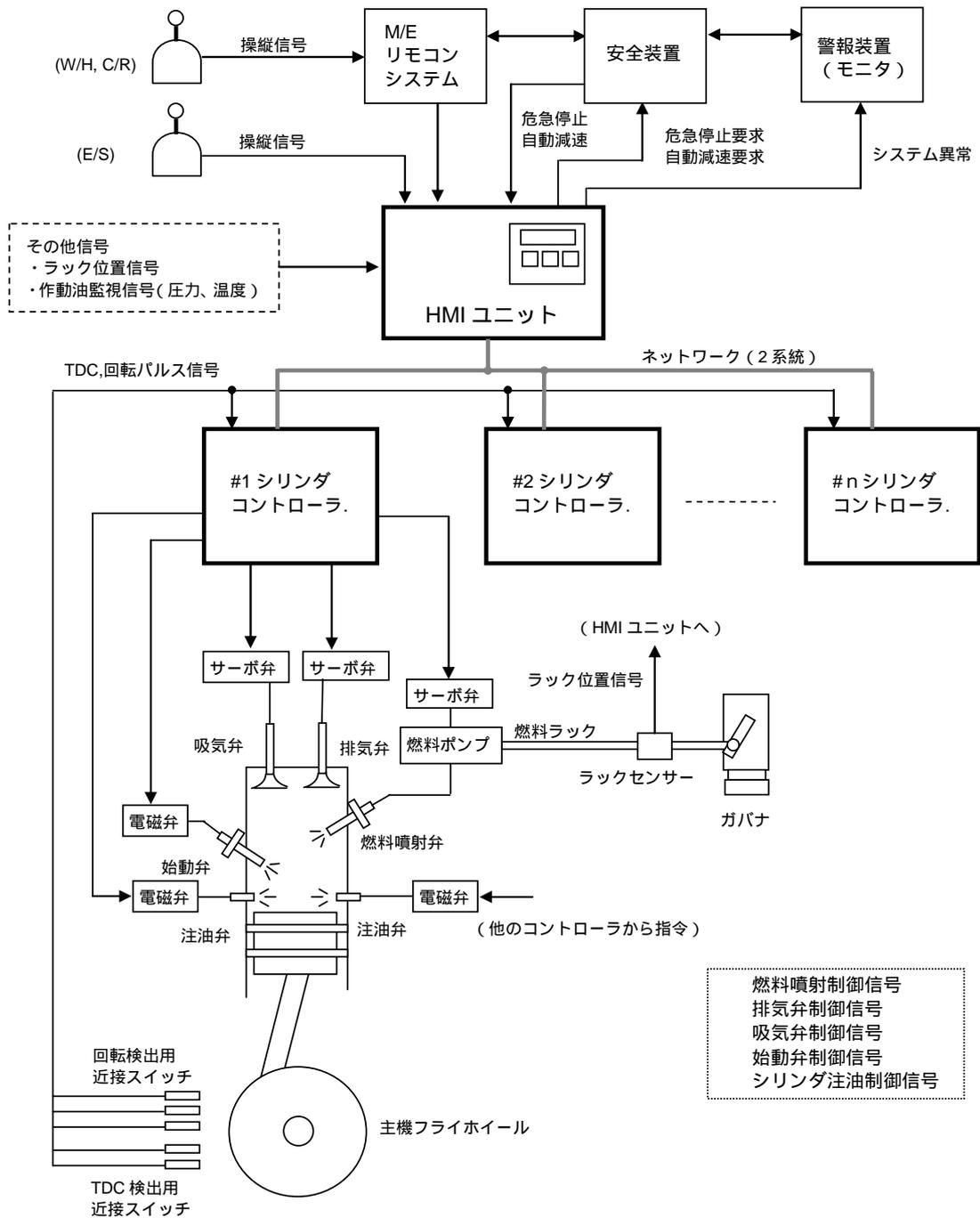


図 1 システム構成図

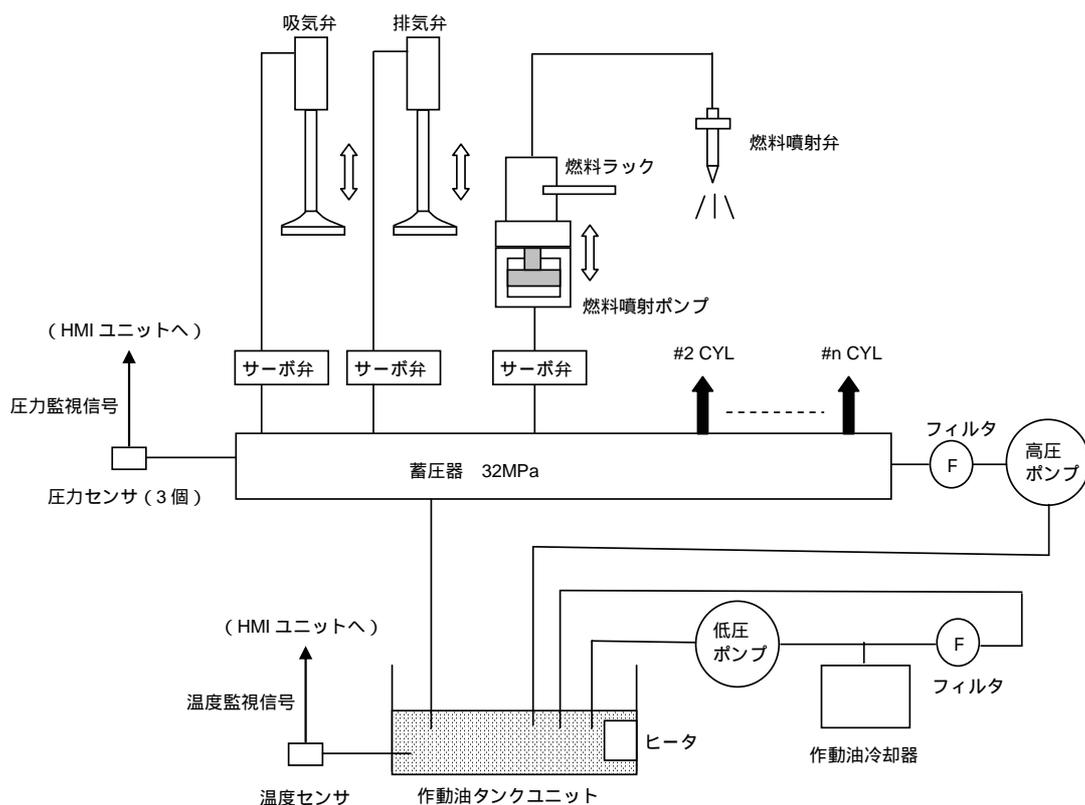


図 2 油圧系統図

7.2 制御部

平成18年度は各種機能の制御仕様に基づいてシステムの構成を検討し、各気筒の制御を行うシリンダコントロールユニット、表示および入出力信号の制御を行うHMIユニットを基本構成とすることに決定した。これに伴い、各々のユニットで使用する部品の選定、専用制御基板の設計、ユニット筐体の設計等を行った。

平成19年度にこれら制御装置の製作に着手すると共に、各ユニットのソフトウェアの設計・製作を行い、8月に完成した。

8. 試験計画の作成

8.1 要素試験

電子制御システムを試験機関に組み付け、試験運転を実施する前に、サーボ弁単体、燃料噴射装置および吸排気弁駆動装置の作動を確認す

るために要素試験を行う。

要素試験の試験装置の検討、試験内容の検討を行い、試験計画を作成した。

添付資料 15.11-1 に燃料噴射および吸排気弁駆動装置の要素試験の系統図および計測項目を示す。

8.2 実機運転

3SLT32 形試験機関で実施する実機試験の試験内容、計測項目等の検討を行い、試験運転方案を作成した。

添付資料 15.11-2 に燃料噴射、吸排気弁駆動装置およびシリンダ注油装置の系統図および計測項目を示す。

9. 電子制御システムの要素試験

9.1 燃料噴射装置の要素試験

燃料噴射装置の要素試験として、カム式の再現試験、ブーツ噴射試験、燃料噴射圧力上昇試験を実施した。

燃料噴射の要素試験装置および、各項目、各分力での計測波形を添付資料 15.12-1 に示す。

1) カム式の再現試験

カム式の再現試験は 100%、75%、50%、25%の各分力でカム式とラック目盛（燃料噴射量）を同一として、サーボ弁の指令（開度、時間）を変更して、作動油圧、ダンパ油圧、アクチュエータリフト、針弁リフト、燃料噴射圧力等の計測を行なった。

サーボ弁の開度、燃料噴射圧力、作動油圧の最大値を表 - 3 に示す。

試験初期には、作動油圧力の高周波変動が発生したが、サーボ弁の開度を段階的に制御することにより、防止することができた。

各負荷でサーボ弁の最大開度は 20～30%で、噴射圧力、噴射期間はカム式とほぼ同等の値になっている。

また、カム式で発生していた噴射終了時の 2 次噴射は認められず、良好な噴射波形になっている。

燃料噴射圧力と作動油圧力の比率は 3.70 ~ 4.04 でほぼ計画値通りの 4 になっている。

表 3 カム式の再現試験結果

負荷		25%	50%	75%	100%
ラック目盛	mm	28.0	38.0	46.0	55.0
カム式	燃料噴射圧力 MPa	54.1	74.7	94.1	108.2
電子制御	サーボ弁最大開度 %	20	22	26	30
	燃料噴射圧力 MPa	60.1	82.9	98.8	107.4
	作動油圧力 MPa	14.9	20.5	25.4	29.0
	燃料圧/作動油圧	4.03	4.04	3.89	3.70

2) ブーツ噴射試験

ブーツ噴射試験は、各分力でカム式とラック目盛（燃料噴射量）を同一としブーツ噴射と主噴射の割合を 2:8 と 4:6 の 2 種類で実施した。

・噴射割合 2 : 8

ブーツ噴射と主噴射の割合 2:8 でのサーボ弁の開度、ブーツ噴射と主噴射の燃料噴射圧力、作動油圧の最大値を表 - 4 に示す。

100%、75% 負荷はブーツ噴射形状になっているが、50%、25% 負荷では噴射量が少なく、噴射期間が短いためカム式とあまり変わらない波形になっている。

サーボ弁の最大開度は 20 ~ 35% で、噴射圧力はカム式より 8 ~ 19% 高いが、噴射期間は各負荷共、カム式と同等である。

カム式の再現試験と同様に、噴射終了時の 2 次噴射は認められない。

・噴射割合 4 : 6

ブーツ噴射と主噴射の割合 4:6 でのサーボ弁の開度、ブーツ噴射と主噴射の燃料噴射圧力、作動油圧の最大値を表 - 5 に示す。

100%、75% 負荷でサーボ弁を調整してブーツ噴射の確認を行なった。サーボ弁の最大開度は 28% と 35% で、噴射圧力および噴射期間はカム式とほぼ同等の値である。

表 4 ブーツ噴射試験結果 噴射割合 2 : 8

負 荷		25%	50%	75%	100%	
ラック目盛	mm	28.0	38.0	46.0	55.0	
カム式	燃料噴射圧力	MPa	54.1	74.7	94.1	108.2
電子制御	サーボ弁最大開度	%	20	20	28	35
	ブーツ噴射圧力	MPa	56.1	56.9	65.4	69.4
	主噴射圧力	MPa	64.3	82.8	102.3	116.6
	作動油圧力	MPa	16.1	20.8	26.7	30.3
	燃料圧/作動油圧		3.99	3.98	3.83	3.85

表 5 ブーツ噴射試験結果 噴射割合 4 : 6

負 荷		25%	50%	75%	100%	
ラック目盛	mm	28.0	38.0	46.0	55.0	
カム式	燃料噴射圧力	MPa	54.1	74.7	94.1	108.2
電子制御	サーボ弁最大開度	%	---	---	28.0	35.0
	ブーツ噴射圧力	MPa	---	---	57.1	64.9
	主噴射圧力	MPa	---	---	97.2	109.4
	作動油圧力	MPa	---	---	24.6	30.4
	燃料圧/作動油圧		---	---	3.95	3.60

3) 燃料噴射圧力上昇試験

部分負荷での燃料噴射圧力上昇試験をブーツ噴射 2 : 8 および 4 : 6 で行った。計測結果を図 3 に示す。

50%負荷以上では 100%負荷と同等の圧力を保持できている。25%負荷では噴射圧力は低下するが、カム式の 75%負荷と同等の圧力である。

4) まとめ

燃料噴射装置の要素試験として、燃料噴射装置単体でカム式の再現試験、ブーツ噴射試験、噴射圧力上昇試験を実施し、サーボ弁の開度、作動時間を調整することにより、燃料噴射波形を制御できることが確

認できた。

上記試験結果を基に、実機試験で燃料噴射波形の制御による機関性能の改善効果を確認する。

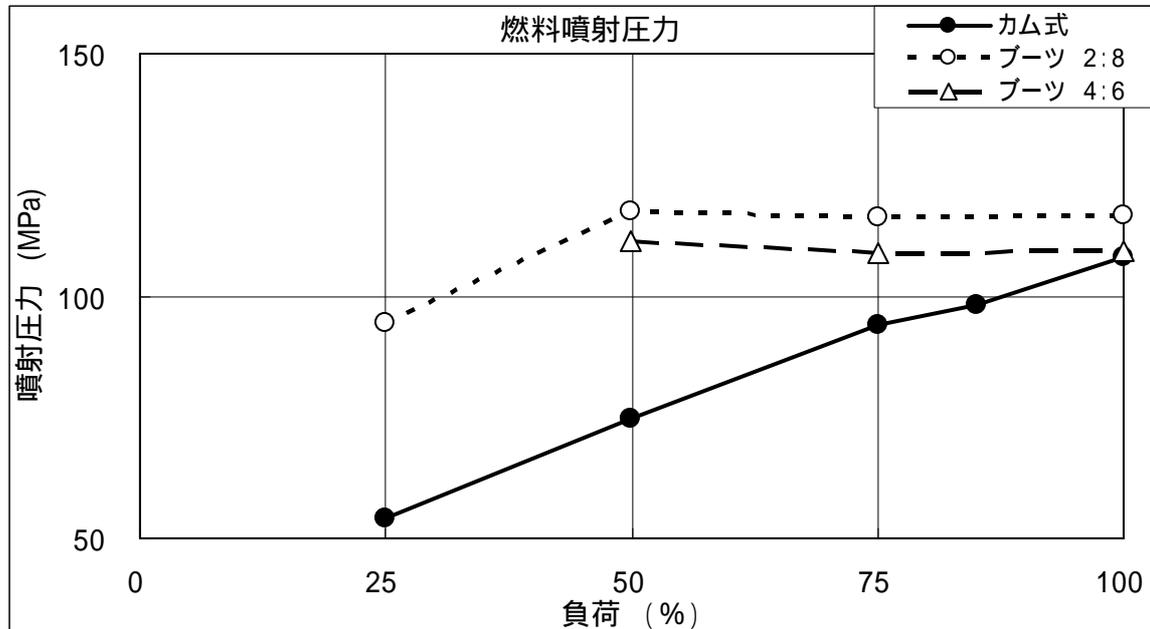


図 3 燃料噴射圧力上昇試験

9.2 吸排気弁駆動装置の要素試験

1) 試験内容と試験結果

予備を含めて7組の吸排気弁駆動用アクチュエータでサーボ弁の指令、開度を調整し、作動油圧、アクチュエータリフトを計測し、サーボ弁の開度、油圧配管の絞りの径等の仕様を決定した。

開弁時と閉弁時の作動油圧とアクチュエータリフトの計測波形と100%負荷時のカム式とのリフトの比較を添付資料 15.12-2 に示す。

開弁時のアクチュエータの速度(リフト)は、初期は遅いが、その後は速くなっている。この時の速度はカム式の100%負荷時の速度より速い。

開弁初期の速度が遅いため、弁の開き始めから全開までに要する作動時間はカム式より長くなっている。

閉弁開始時のアクチュエータの速度はカム式より速くなっている。

閉弁終了時の速度はダンパの効果で遅くなっており、弁着座時の弁速

度の目標を満足している。

2) まとめ

吸排気弁駆動装置の要素試験では、サーボ弁の開度を調整することにより、カム式と同等の作動が得られることを確認できた。

要素試験では、筒内圧力の影響の確認ができないため、実機試験で筒内圧力の影響を確認する必要がある。

10. 試験準備

試験機関 3SLT32 形機関の総分解、整備を行い、再組立を行なった。過給機についてもメーカーに搬入して分解、整備を行った。

要素試験終了後に、蓄圧器、燃料および吸排気弁用アクチュエータ等の油圧機器、シリンダ注油器、始動空気用電磁弁および各センサの機関への組み付けを行なった。

制御機器、タンクユニットを設置し、油圧配管、配線工事を行い、油タンクへ作動油の投入、フラッシングを行なった。

機関全景、制御装置、各機器の組み付け状況を添付資料 15.13 に示す。

11. 実機試験

11.1 制御部の作動確認

1) クランク角度検出機能

主機フライホイールに取り付けられた近接スイッチからの回転パルス信号を用いて機関のクランク角度を検出し、燃料噴射タイミングや吸排気弁開閉タイミングなど、機関の主要な動作タイミング制御に問題無いことを確認した。

2) 始動制御機能

機関始動の指令信号により機関のクランク角度位置に応じて始動用電磁弁を駆動させ始動空気を投入すること、また始動空気投入による起動時の回転速度が設定された回転速度を超えた場合、自動的に始動空気の投入を停止する機能も合わせて確認を行った。

3) 燃料噴射制御機能

規定の回転速度を超えると燃料噴射を開始し、設定されたクランク角度で燃料噴射を行うことを確認した。また運転中に燃料噴射角度や燃料噴射用サーボ弁指令値を変更し、設定値に応じて燃料噴射タイミングやサーボ弁指令値が変化することも確認した。

4) 吸排気弁制御機能

機関回転速度が 3min^{-1} 以上になると吸排気弁動作を開始し、設定したクランク角度で吸排気弁が動作することを確認した。また開閉タイミングを任意に変更できることも合わせて確認を行った。

5) シリンダ注油制御機能

機関の出力や注油量の設定に応じて注油間隔を制御し、設定されたクランク角度で注油を行うことを確認した。

6) 異常検出機能

燃料噴射制御や吸排気弁制御、シリンダ注油制御はそれぞれ異常検出機能を有しており、異常が発生すると警報を出力し、機関停止など異常状態に応じた処置が行われる。実機試験ではこれらの異常検出機能の確認を行い、問題なく動作することを確認した。

11.2 作動部および油圧部の作動確認

1) 吸排気弁駆動装置

各分力の吸排気弁リフトの計測波形を添付資料 15.14-1 に示す。

・吸排気弁のリフト

各分力での吸排気弁の最大リフトの計測値を下記の表-6 に示す。

各分力での排気弁のリフトは 35.4 ~ 36.4mm、吸気弁のリフトは 36.5 ~ 37.5mm で計画値の 36.0mm とほぼ同じである。

表-6 吸排気弁の最大リフト

負 荷			25%	50%	75%	100%
排気弁リフト	mm	計画値 36.0	36.4	35.4	35.9	36.1
吸気弁リフト	mm		36.8	37.5	36.5	36.9

・ 吸排気弁開閉時の弁速度

各分力での吸排気弁のリフトカーブから求めた開閉時の弁速度を下記の表-7に示す。

排気弁開時の弁速度は、25%負荷以外は約1.4m/sec、吸気弁開時の弁速度は約1.0m/secでほぼ一定とみることができる。

排気弁閉時の弁速度は約0.7m/sec、吸気弁閉時の速度は約0.6m/secでほぼ一定となっている。

表-7 吸排気弁の速度

負 荷			25%	50%	75%	100%
排気弁の 速度	m/sec	開	1.18	1.39	1.39	1.41
		閉	0.68	0.69	0.71	0.66
吸気弁の 速度	m/sec	開	1.04	0.95	0.98	0.94
		閉	0.58	0.63	0.62	0.61

・ 吸排気弁の開閉時期

各分力での吸排気弁のリフトカーブから読み取った開閉時期と設定値との差を表-8に示す。

排気弁開時期は設定値に対し、クランク角度で15~37deg、時間では16~24msec遅れており、高負荷ほど遅れが大きくなっている。これは排気弁開時に抵抗となる筒内圧力が高負荷ほど高いためと思われる。

排気弁閉時期の遅れはクランク角度では32~35degで各分力での差はないが、時間では24~35msecで高負荷ほど遅れは短くなっている。

吸気弁開時期は設定値に対し、クランク角度で9~14deg、時間では約10msecの遅れであり、各分力でほぼ一定である。

吸気弁閉時期の遅れはクランク角度では 28～32deg で各分力での差はないが、時間では 19～29msec で高負荷ほど遅れは短くなっており、排気弁の閉時期と同様の傾向になっている。

性能改善試験では上記の遅れを考慮して吸排気弁の開閉時期の設定を行なうことにする。

表 - 8 吸排気弁の開閉時期の遅れ

負 荷		25%	50%	75%	100%
排気弁開時期	deg/msec	15 / 16	26 / 21	32 / 23	37 / 24
閉時期	deg/msec	33 / 35	32 / 27	32 / 24	35 / 24
吸気弁開時期	deg/msec	9 / 9	12 / 10	14 / 10	13 / 9
閉時期	deg/msec	28 / 29	32 / 27	28 / 21	29 / 19

2) 燃料噴射装置

各分力での計測波形から読み取った燃料噴射特性を表 - 9 に、計測波形を 15.14-2 に示す。

燃料噴射期間のプランジャ速度は 0.70～0.97m/sec で、高負荷ほど速くなっている。これは負荷によってサーボ弁の開度を調整しているためである。100%負荷ではプランジャ速度の目標値 1.3m/sec と比べ遅くなっている。

燃料噴射時期は全負荷で設定値より 1.0～2.6deg、0.7～2.7msec 早くなっている。これは燃料噴射開始時期までのプレストローク期間の速度がカム式よりも速いためと思われる。

燃料噴射圧力は各分力で 42.0～79.3MPa であり、100%負荷では目標値 120MPa の 66%である。

燃料用アクチュエータに作用する作動油圧は 11.9～23.8MPa で、100%負荷時は蓄圧器の圧力 30.3MPa の 79%になっている。

上記のとおり、プランジャ速度、燃料噴射圧力、アクチュエータの作動油圧は目標値の 75%程度である。これは、この時点では装置に振動がありサーボ弁の開度は最大で 23%の抑えたためである。防振対策を行いサーボ弁の開度を大きくすることにより、アクチュエータの作動

油圧が上昇し、プランジャ速度、燃料噴射圧力は目標値付近まで上昇させることが可能である。

表 - 9 燃料噴射特性

負 荷		25%	50%	75%	100%
プランジャ速度	m/s	0.74	0.70	0.88	0.97
噴射時期の差	deg/msec	2.0/2.7	1.8/1.5	1.0/0.7	2.6/1.7
燃料噴射圧力	MPa	42.0	58.8	78.5	79.3
作動油圧力	MPa	11.9	15.4	24.1	23.8

3) 作動油圧

作動油の圧力と温度の機関始動時および各分力での計測値を表 - 10 に示す。

機関始動時の蓄圧器の作動油圧は 30.7MPa、運転中は 30.6 ~ 30.3MPa で最大の圧力低下は 0.4MPa である。圧力低下の計画は 1.0MPa 以下であり、設計条件を満足しており、蓄圧器の容量は妥当であることが確認できた。

作動油の設定温度は 45 ~ 55 であるが 100% 負荷では設定温度を超えており、作動油冷却器の容量が不足している。

表 - 10 作動油の圧力と温度

負 荷		始動時	25%	50%	75%	100%
蓄圧器の作動油圧	MPa	30.7	30.6	30.3	30.5	30.3
蓄圧器の作動油温度		44	45	51	54	59

11.3 機関性能改善、性能確認試験

燃料消費量とNOx排出量の低減を行なうため、燃費とNOx値の関係等の基本性能を把握するため下記の試験を実施した。

1) 燃料噴射圧力変更試験

燃料噴射時期を一定のまま、燃料噴射用サーボ弁の開度を変更する

ことにより燃料噴射圧力、爆発圧力を上昇させ各分力で機関性能およびNOx排出率の計測を行なった。

燃料噴射圧力変更試験の結果を添付資料 15.15-1 に示す。なお、添付資料は 50%と 75%負荷でのそれぞれの結果を示している。

燃料噴射圧力を上昇させると燃料消費率は減少しており、その割合は燃料噴射圧力 10%上昇で燃料消費率は 0.6～0.7%減少している。

NOx排出率は燃料噴射圧力の上昇とともに増加しており、その割合は燃料噴射圧力 10%上昇でNOx排出率は 5～8%増加している。

燃料消費率、NOx排出率ともに高負荷ほど燃料噴射圧力の影響が大きい。

2) 燃料噴射時期遅延試験

燃料噴射用サーボ弁の開度を一定（燃料噴射圧力一定）として、燃料噴射時期を変更して、各分力で機関性能およびNOx排出率の計測を行なった。

50%負荷と 75%負荷の燃料噴射時期遅延試験の結果を添付資料 15.15-2 に示す。

燃料噴射時期を遅延させると燃料消費率は増加しており、その割合は噴射時期を 10deg.遅延させると燃料消費率は約 6.5%増加している。

NOx排出率は燃料噴射時期を遅延させると減少しており、その割合は噴射時期を 10deg.遅延させるとNOx排出率は 27～38%減少している。

3) 吸気弁閉時期変更試験

吸気弁の閉時期を変更して、各分力での機関性能およびNOx排出率の計測を行なった。

50%負荷と 75%負荷の吸気弁閉時期変更試験の結果を添付資料 15.15-3 に示す。

吸気弁の閉時期を遅延させると、閉時期の設定値が 0 度付近で燃料消費率は最少となり、NOx排出率は最大になっている。

低負荷域ほど吸気弁閉時期が燃料消費率およびNOx排出率に与える

影響度が大きい。

4) 内部 E G R 試験

吸気行程中に排気弁を制御し、内部 E G R による N O x 低減効果を確認するために機関性能および N O x 排出率の計測を行なった。

50% 負荷と 75% 負荷での内部 E G R 試験の結果を添付資料 15.15-4 に示す。

排気弁の開期間を長くすると燃料消費率は増加するが、N O x 排出率を低減できることが確認された。

75% 負荷では N O x 排出率、燃料消費率はともに直線的に変化しており、排気弁の開期間 10 度で N O x 排出率は 10% 低下し、燃料消費率は 2.1% 増加している。

50% 負荷では、排気弁の開期間、20 度までは N O x 排出率、燃料消費率ともに変化はないが、20 度以上では N O x 低減効果が確認された。

5) ブーツ噴射試験

燃料噴射用サーボ弁の開度、期間を制御して燃料噴射波形をブーツ形とし、ブーツ噴射と主噴射の割合を 2 : 8 および 4 : 6 と変更して機関性能および N O x 排出率の計測を行なった。

75% 負荷でのブーツ噴射試験の結果およびブーツ噴射と主噴射の割合 4 : 6 の燃料噴射波形を添付資料 15.15-5 に示す。

75% 負荷では、ブーツ噴射の割合を増加させると燃料消費率は増加しており、その割合はブーツ噴射割合 10% で約 0.4% である。

N O x 排出率はブーツ噴射の割合を増加させると共に減少し、ブーツ噴射割合 30% で N O x 排出率は最少になり、19% 減少している。

50% 負荷でもブーツ噴射の試験を行ったが、燃料噴射量が少なく噴射期間が短いため、要素試験と同様にブーツ波形が形成できなかった。

6) 総合機関性能の確認

上記、1) から 5) の性能改善試験結果を基に、目標性能を達成するための 25、50、75、100% 負荷の各分力で、燃料噴射タイミング、燃料噴

射用サーボ弁の開度、吸排気弁の開閉タイミングの設定を決定し、機関性能の確認を行なった。なお、100%、75%負荷ではブーツ噴射を、また一部の負荷では内部EGRを採用した。

上記の仕様の船用負荷での燃料消費率とNOx排出率および機関性能曲線を添付資料15.15-6に示す。

・燃料消費率

燃料消費率の比較を表11に示す。なお、比較の各項目は下記の仕様での値を示す。

電子制御 今回の仕様での値を示す。

カム式 カム式の3SLT32形機関でNOx非対応の最適仕様での値を示す。

カム式 カム式の3SLT32形機関で、機関内部でNOx排出率を現状の1次規制値から30%低減した仕様での値を示す。

なお、燃料消費率の比率は、カム式の100%負荷の値を基準とする。実際の船舶の運航状況を考慮した値で評価するために、各分力での計測値にNOx排出率、E3モードと同じ重み付け係数を使用して求めた消費率で比較する。

電子制御の値はカム式と比べると100%負荷、75%負荷はほぼ同等で、50%負荷では2.2%、25%負荷では6.0%低下しており、消費率は0.6%低下している。

カム式と比較すると、改善率は100%負荷では4.2%、25%負荷では8.8%と低負荷域ほど低下しており、消費率は94.9%となり、機関単体では目標の5%低減を満足した。

ただし、後述の作動油ポンプの消費電力を考慮すると更なる改善が必要である。

表 - 1 1 燃料消費率の比較

負 荷	25%	50%	75%	100%	消費率
電子制御	1.0087	0.9644	0.9580	0.9583	0.9615
カム式	1.0731	0.9861	0.9583	0.9571	0.9673
カム式	1.1064	1.0287	1.0071	1.0000	1.0128

・ NOx 排出率

船用負荷特性、E3モードでのNOx排出率の計測結果の比較を下記の表 12 に示す。

電子制御の値はカム式 の値と比べると全域で 41～49%低下しており、E3値は 48%低下している。

カム式 と比較すると、全域で 1～15%多くなっており、E3値は 3%多くなっている。

NOx、E3値は 10.38g/kWh であり、現状の 1次規制値、14.92g/kWh の 69.6%となり、目標の 30%低減を達成することができた。

表 - 12 NOx 排出率の比較

負 荷		25%	50%	75%	100%	E3値
電子制御	g/kWh	10.06	10.27	9.76	11.66	10.38
カム式	g/kWh	16.92	19.45	19.31	22.23	20.04
カム式	g/kWh	9.55	8.95	9.70	11.18	10.04

NOx 排出率は、当初に予想されていた 2次規制値を目標として、現状の規制値から 30%低減と設定した。

2008年2月に開催された BLG-12 で 2次規制値がほぼ決定し、3SLT32 (定格回転速度 250min⁻¹)では規制値は 14.92g/kWh から 12.36g/kWh、17.2%の低減になった。

NOx 低減率を上記の 2次規制値を目標とすると、燃料消費量は更に約 1.4%改善することが出来る見込みである。

7) 作動油ポンプの消費電力の計測

電子制御装置を駆動するために必要な出力を確認するために、各分力で作動油ポンプの消費電力の計測を行なった。

作動油ポンプの各分力での消費電力の計画値と計測値を表 13 および図 4 に示す。

100%負荷での消費電力の計測値は 80kW であり、計画値 53kW の 1.5倍、機関出力 1295kW の 6.2%と大きな値になっており、作動油ポンプ

の選定、作動油の漏れの減少など、消費電力低減を行なう必要がある。

表 - 1 3 作動油ポンプの消費電力

負 荷		25%	50%	75%	100%
消費電力	kW	36.1	43.4	46.6	52.7
		50	59	71	80

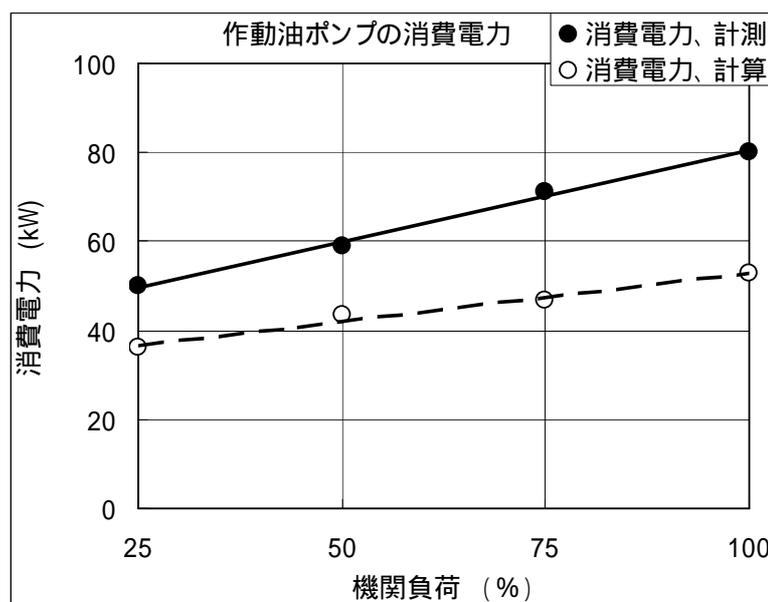


図 4 作動油ポンプの消費電力

11.4 シリンダ注油量低減試験

プランジャ式の注油器を各シリンダに装備し、機関回転速度とラック目盛より算出した機関出力により注油間隔を制御することにより、機関の出力に見合った注油を行なう。

初期の摺合運転中は現状の機械式と同じ注油量とし、摺合運転終了後に注油量を計画値に低減し、適時、シリンダライナおよびピストンの状況を確認しながら試験を実施した。

各分力で注油器出口圧力とタイミング、シリンダ油の消費量の計測、確認を行なった。

各分力での注油圧力、注油量の計測結果を表 1 4 に、注油量の計画値と計測値および現状の機械式との比較グラフを図 5 に示す。また、注油圧力の計測波形を添付資料 15.16 に示す。

注油圧力は各負荷で 1.3 ~ 1.4MPa でほぼ一定であった。

注油器の作動試験で得られた注油信号発令から注油までの時間遅れを考慮して、注油信号を発令したため、ほぼ計画通りのタイミングで注油していることを確認した。

注油間隔（何回転に1回注油するか）で注油量の設定を行うシステムであり、その結果、注油回数が計画より多くなるため、注油量は計画値より8～27%多くなった。

実際の船舶の運航状況を考慮した注油量で評価するために、各分力でNOx排出率、E3モードと同じ重み付け係数を使用して求めた消費量と比較すると、シリンダ注油の消費量は現状の機械式の58%となり、ほぼ目標値を満足している。

実機試験終了後にシリンダライナの摺動面を目視にて点検を行い、摺動面に異常のないことを確認した。なお、実機試験での総運転時間は約150時間である。

表 - 1 4 シリンダ注油の注油圧力および注油量

負 荷			25%	50%	75%	100%	消費量
注油圧力	MPa	計測値	1.28	1.34	1.42	1.43	---
注油量	cc/min	機械式	10.5	13.3	15.2	16.8	14.5
		計画値	2.6	5.3	7.9	10.6	7.3
		計測値	3.3	6.7	8.5	13.0	8.4

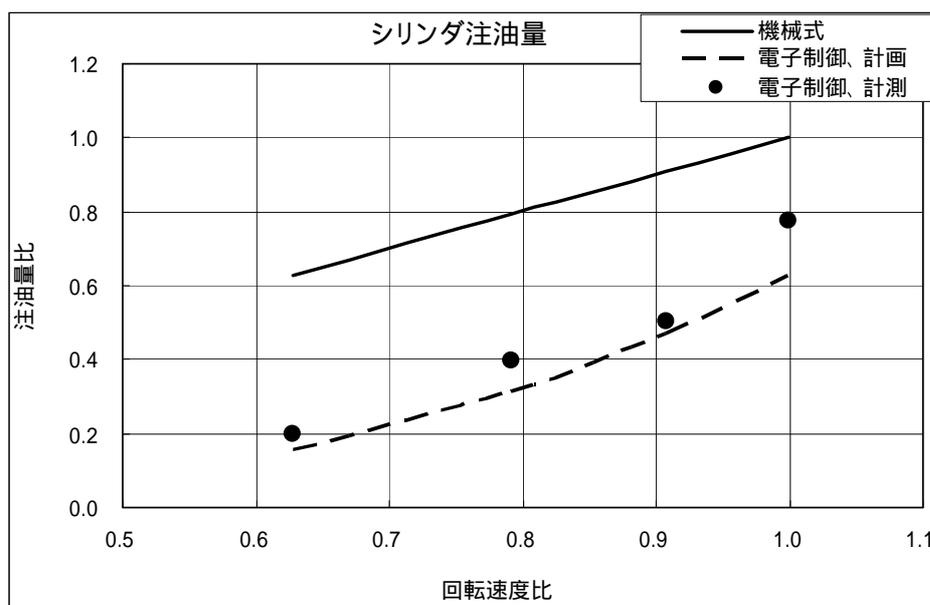


図 - 5 シリンダ注油量

12. コストの検討

電子制御システムを採用した場合、初期投資は増加するが、本システムの効果により燃料消費量とシリンダ注油量を削減することができ、ランニングコストの低減が可能となる。

今回のシステムは、2200kW（3000PS）クラスの機関で、初期投資の増加額を5年程度で回収できるシステムを構築することを目標として、商品化した場合の目標コストを設定した。

今回、試験用に製作したシステムの制御機器、作動機器、油圧機器、機関部品、予備品費の集計額は目標コストの143%となった。

一方、電子制御システムを搭載することにより、従来の機関では必要であったカム、カム軸、同駆動装置等が不要になり、機関本体のコストを低減することができる。この低減額は目標コストの32%となった。

両者を考慮すると、本システムのコストは目標コストの111%となり、目標コストを実現するためには、現状から10%のコストダウンを図る必要がある。

今回のシステムは試験用の単品生産であり、商品化による各部品の標準化、製造台数の増加およびシステムの見直しによるコストダウンを行えば、上記の値は達成可能と判断している。

また、目標コスト設定時に比べ、燃料油の価格は高騰しており、電子制御システムを装備した場合の燃料消費量低減による船主経済への貢献は更に大きくなる。

コスト集計結果を下記の図 6 に、電子制御システムおよび作動機器のコスト分析結果を添付資料 15.17 に示す。

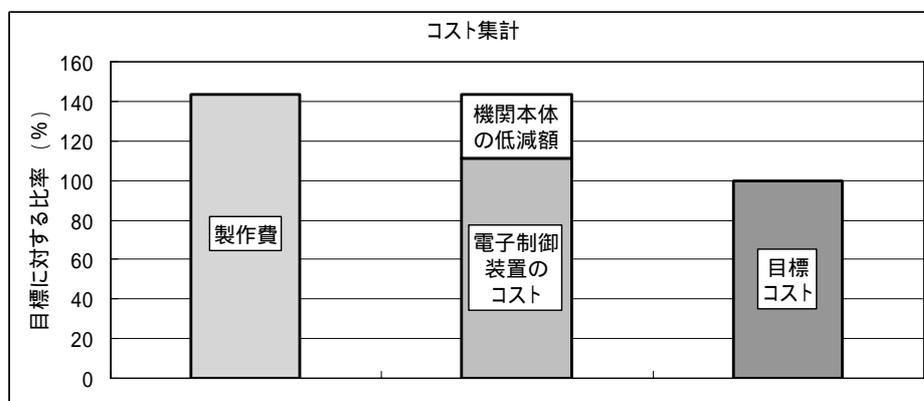


図 6 コスト集計結果

13. まとめ

本事業は、内航船用主機関として広く採用されている低速4サイクル機関の電子制御システムを実用化し、環境面及び経済面で貢献することを目的として平成18年度と19年度の2年間で実施した。

平成18年度は初年度として燃焼系および制御系の解析と電子制御システムの基本計画と設計を行なった。

平成19年度は電子制御システムの製作、要素試験および試験機関による試験運転を行なった。

13.1 制御部

初年度に決定した燃料噴射、吸排気弁制御、シリンダ注油制御、始動空気制御の要求仕様を満たす制御部の検討・設計および製作を行い、試験機関による試験運転でその性能の確認を行なった。

実機試験の結果、各種の機関制御動作に問題は無く、また燃料噴射タイミングや吸排気弁開閉タイミングが任意に変更可能であることも確認できた。

13.2 作動部および油圧部

初年度に決定した作動部、油圧部の仕様を満足させるため、制御系の解析を行ない、その結果を基に機器の設計・製作および要素試験、試験機関による試験運転により作動の確認を行なった。

実機試験の結果、燃料噴射装置、吸排気弁駆動装置ともにサーボ弁の作動を調整することにより目的とする制御を行なえることが確認できた。

作動油の圧力変化は設計範囲内であり、蓄圧器の容量、作動油ポンプの容量に問題がないことが確認できた。また、油圧回路に使用した各機器についても問題がないことが確認できた。

13.3 機関性能

燃料消費量の低減とNOx排出量の低減を両立させるため、九州大学に依頼した燃焼解析、性能シミュレーションの結果および要素試験結果を基に試験機関による試験運転で機関性能の確認、改善を行った。

各分力で、燃料噴射タイミング、燃料噴射用サーボ弁の開度、吸排気弁の開閉タイミングを制御すること、負荷によりブーツ噴射や内部 EGR を採用することにより、機関単体では所期の性能を達成することができた。

13.4 シリンダ注油

実際の機関の使用状況を考慮し部分負荷での改善を含めた評価で、従来の機関に比べシリンダ注油量 50% 低減することを目標として、シリンダ注油装置に電子制御を採用して注油量の適正化を図る試験を行なった。

その結果、A 重油使用で運転時間の短い工場運転ではあるが、プランジャ式注油器を使用して、注油タイミングと注油期間を制御することにより、注油量の半減が可能であることが確認できた。

13.5 特許申請

今回の事業で考案した「吸排気弁用アクチュエータ」、「クランク角度の検出方法」、「排気弁制御による NO_x 低減」の 3 項目について特許申請を行なった。

13.6 目標の達成度

1) 燃料消費率

総合機関性能確認の結果、燃料消費率は低負荷域ほど改善されており、各分力を考慮した消費率ではカム式の機関の 94.9% となり、機関単体では目標の 5% 低減を達成することができた。

2) NO_x 排出率

船用負荷特性、E 3 モードでの NO_x 排出率は 10.38g/kWh であり、現状の 1 次規制値、14.92g/kWh の 69.6% となり、目標の 30% 低減を達成することができた。

3) シリンダ注油量

プランジャ式注油器を使用して、注油タイミングと注油期間を制御することにより、注油量の半減は可能であり、シリンダライナの摺動面に異常のないことが確認できた。

4) 経済性

今回、試験用に製作したシステムのコストは目標コストの 111% となったが、今後、商品化による各部品の標準化、製造台数の増加およびシステムの見直しによるコストダウンを行なえば、目標のコストは達成可能と判断している。

14. 今後の予定及び課題

低速 4 サイクル機関用電子制御システムは本研究開発の成果を基にし、実用化に向けて詳細な検討を行い、商品化を進める予定で、最終的には年間 20 台程度の販売を事業目標としている。

今後の実用化に向けての課題を下記に記す。

14.1 機関性能の更なる改善

今回の事業で、機関単体では燃料消費量の低減と NOx 排出量の低減を両立させるという目的を達成することができたが、限られた期間での試験であり、更なる機関性能の改善が行える余地がある。

今回の試験結果の見直し、検討を行い、来年度以降に圧縮比変更や給気圧力上昇等の追加試験による機関性能改善の確認を実施する予定である。

14.2 シリンダ注油システムの検証

今回の試験で、シリンダ注油量を半減できる目処がついたが、工場運転は A 重油を使用していることや運転時間が短いことを考慮すると十分な検証が行なえたとは言い難い面がある。

今後、実船に搭載して C 重油使用での状況、長時間運転での状況の検証を行なう必要がある

14.3 システムの最適化

今回の試験結果を基に、制御システムの制御部の最適化や各種の制御用および監視用センサの要否の検討を行なう。

また、油圧機器についても容量や回路、構造の見直しを行なう。

14.4 バックアップ方式、予備品の検討

電子制御システムの制御部および油圧部に関し、不具合発生時の検知方法や対応策などのリスク評価（FMEA）を行い、船級協会と協議し、安全性の確保と制御部のバックアップ方式、予備品の最適化を検討する。

14.5 コストの検証

今回の試験用システムでは、目標コストを超過したが、今後のコストダウンにより目標コストの達成は可能と判断している。

上記の予備品、バックアップの検討、システムの最適化および商品化による各部品の標準化、製造台数の増加によるコスト低減効果の検証を行なう。

14.6 実用化に向けての検証

電子制御システムの実用化を目指し、電子制御システムの商用機関の設計、製作および工場試験での確認試験を実施して信頼性の検証を行なう。

その後、商用機を実船に搭載することを検討する。

初号機搭載船舶では、就航後一定期間の追跡調査を行い、システムの耐久性、性能等の検証を実施する予定である。

以上

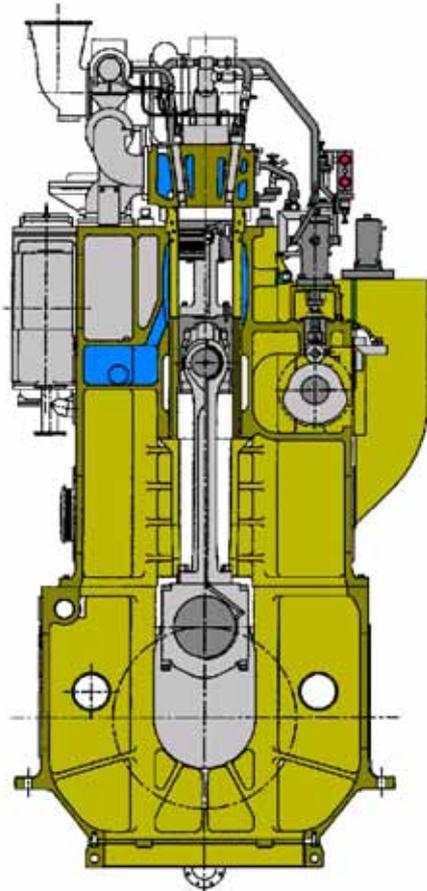
添 付 資 料

15.2 試験機関、3 S L T 3 2

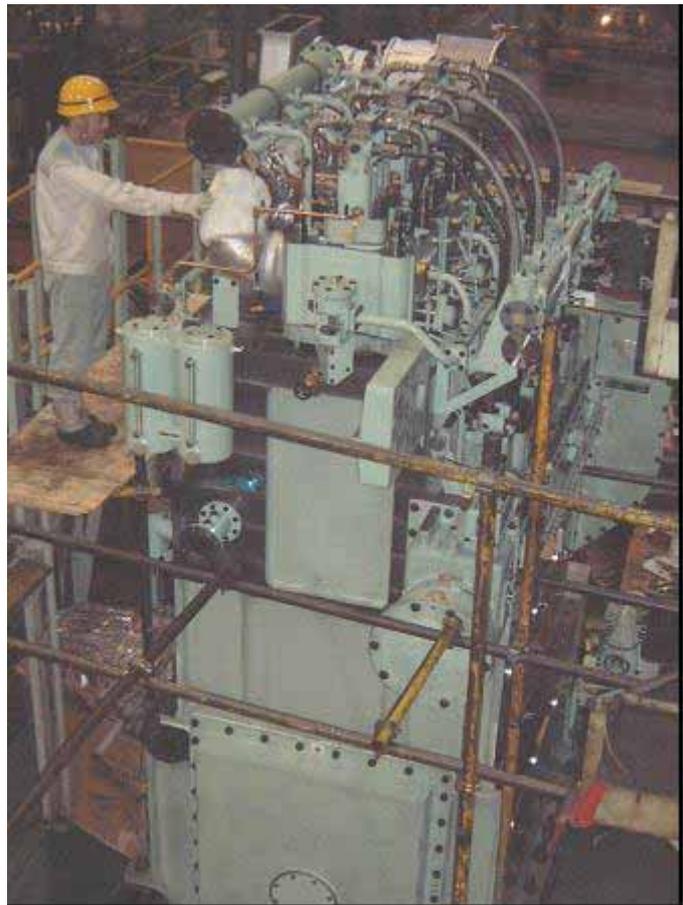
・ 3 S L T 3 2 形機関の主要目

項 目	単 位	3 S L T 3 2
シ リ ン ダ 径	mm	3 2 0
ス ト ロ ー ク	mm	1 0 5 0
シ リ ン ダ 数		3
ス ト ロ ー ク ・ ボ ア 比		3 . 2 8
定 格 出 力	k W	1 2 9 5
定 格 回 転 速 度	min^{-1}	2 5 0
平 均 ピ ス ト ン 速 度	m / s	8 . 7 5
正 味 平 均 有 効 圧	M P a	2 4 . 5 2
シ リ ン ダ 内 最 高 圧 力	M P a	1 7 . 7

・ 3 S L T 3 2 の組立断面図

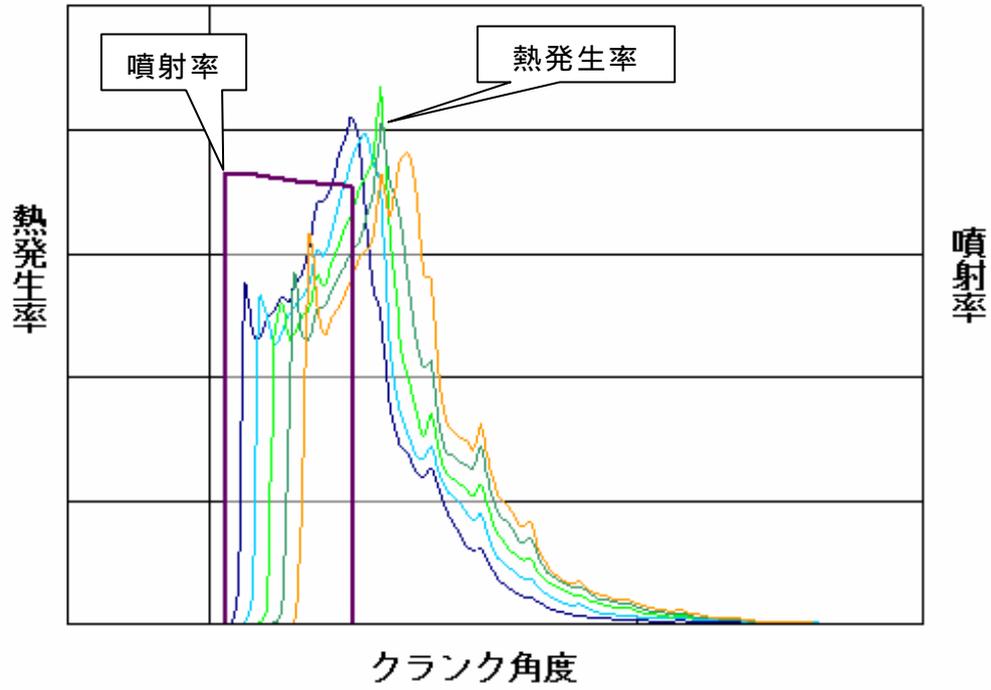


・ 3 S L T 3 2 の全景写真

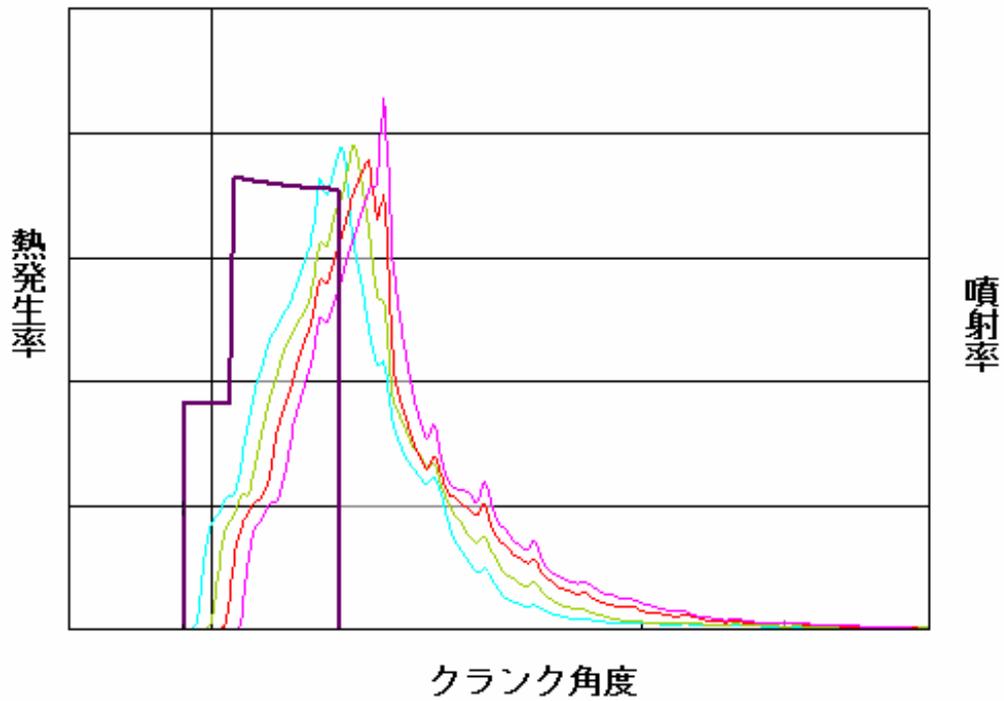


15.3 燃焼解析、性能シミュレーション

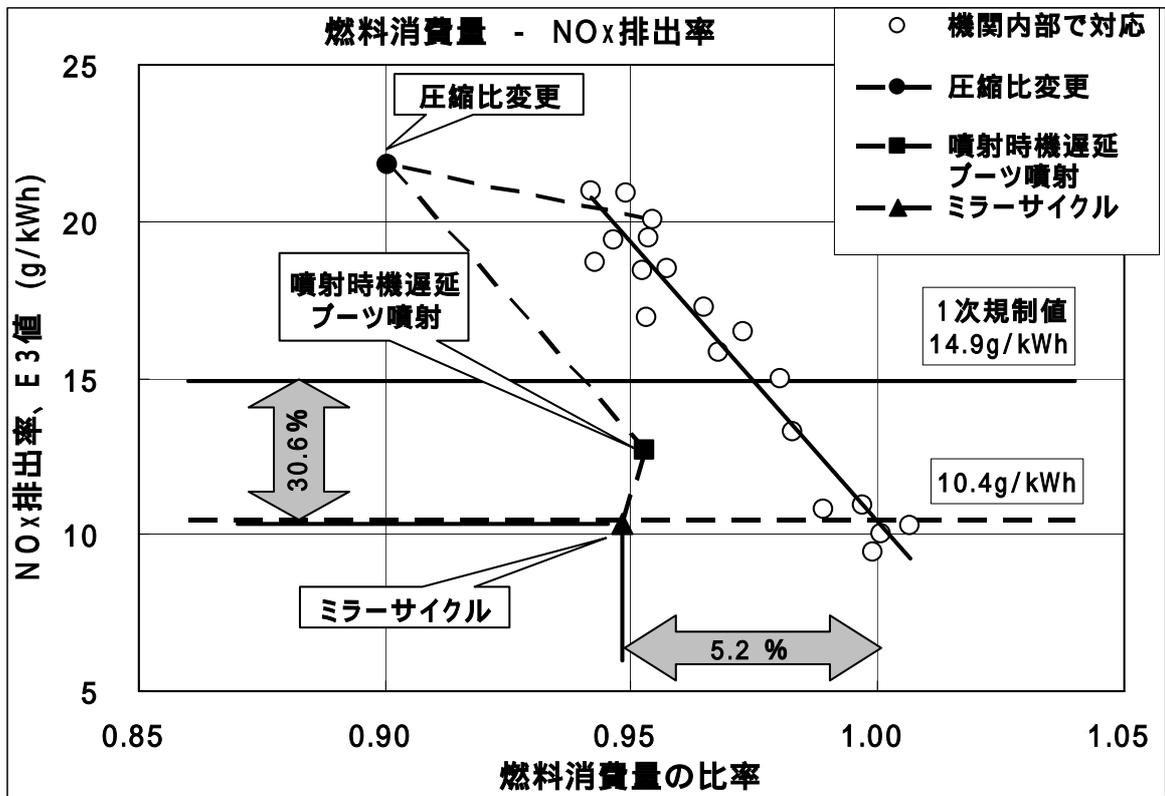
・ 矩形噴射の熱発生率



・ ブーツ噴射の熱発生率



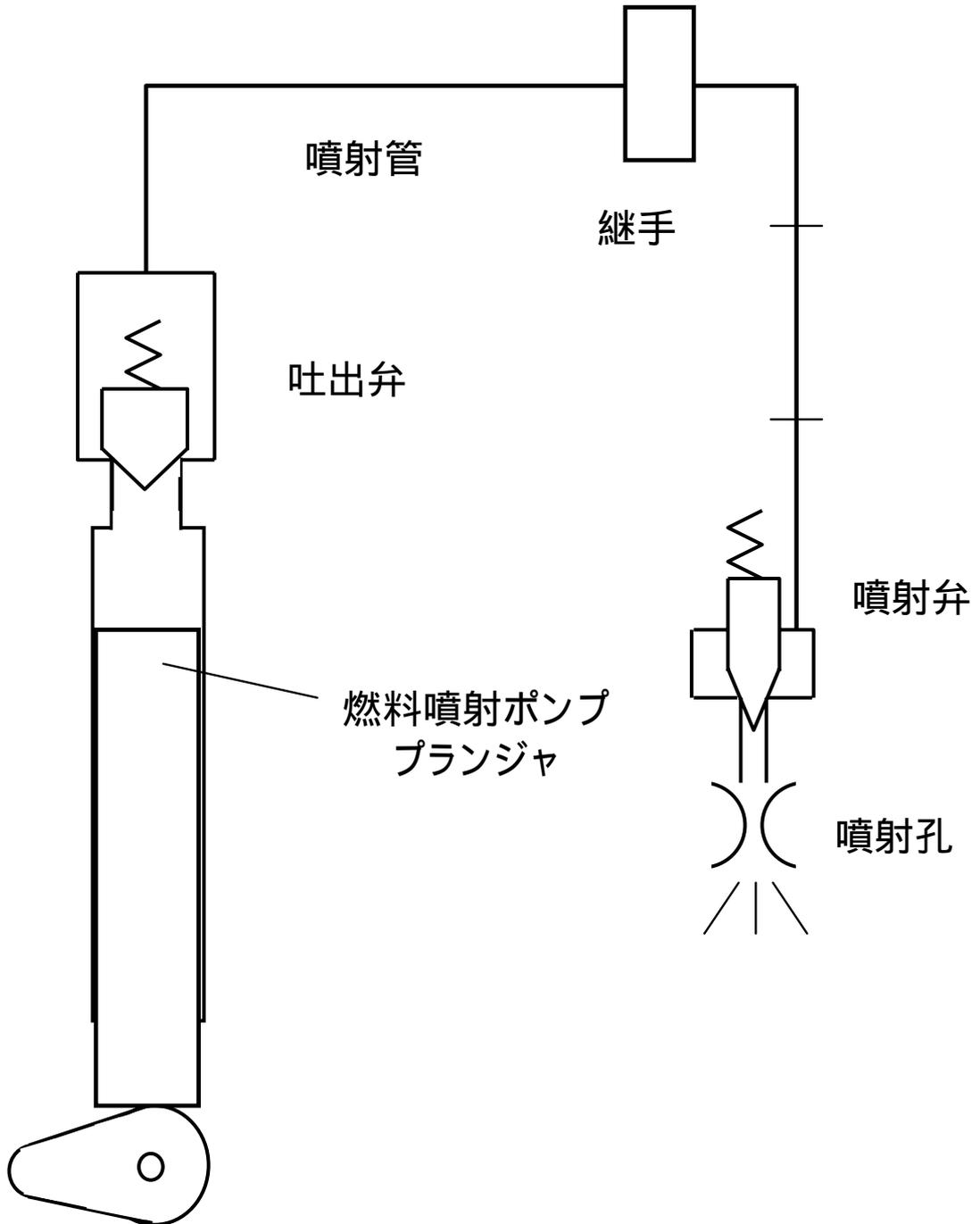
・ 解析結果による機関性能のシミュレーション結果



15.4 制御系の解析

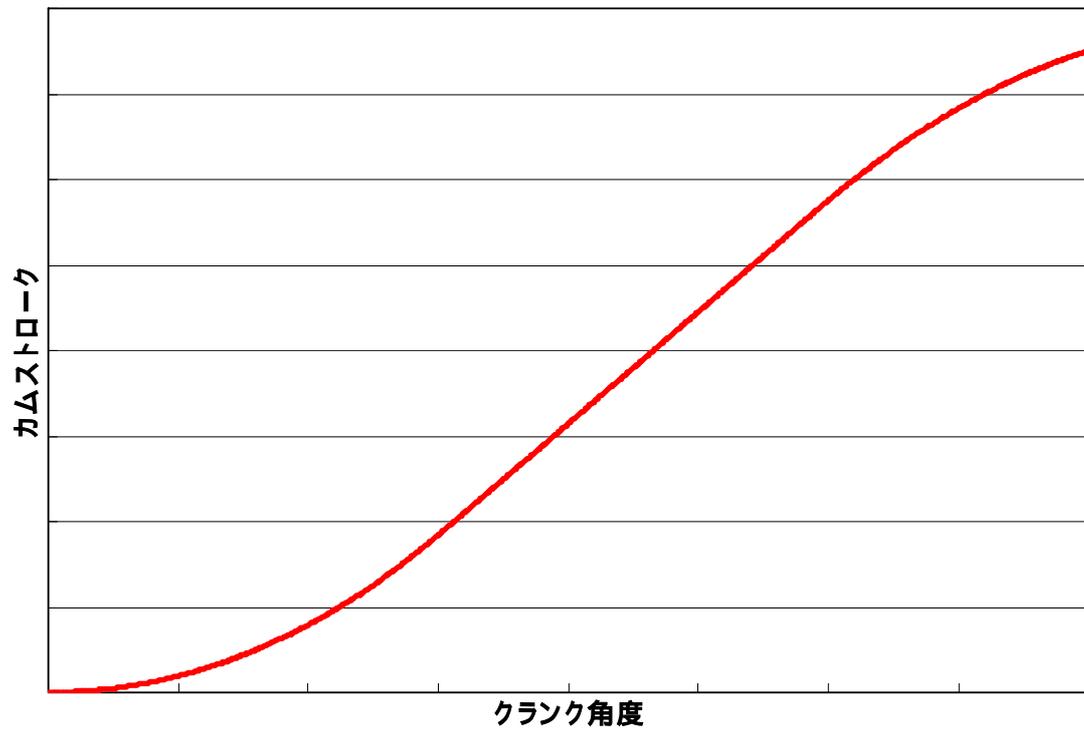
15.4-1 カム式燃料噴射系

・カム式燃料噴射系のモデル図

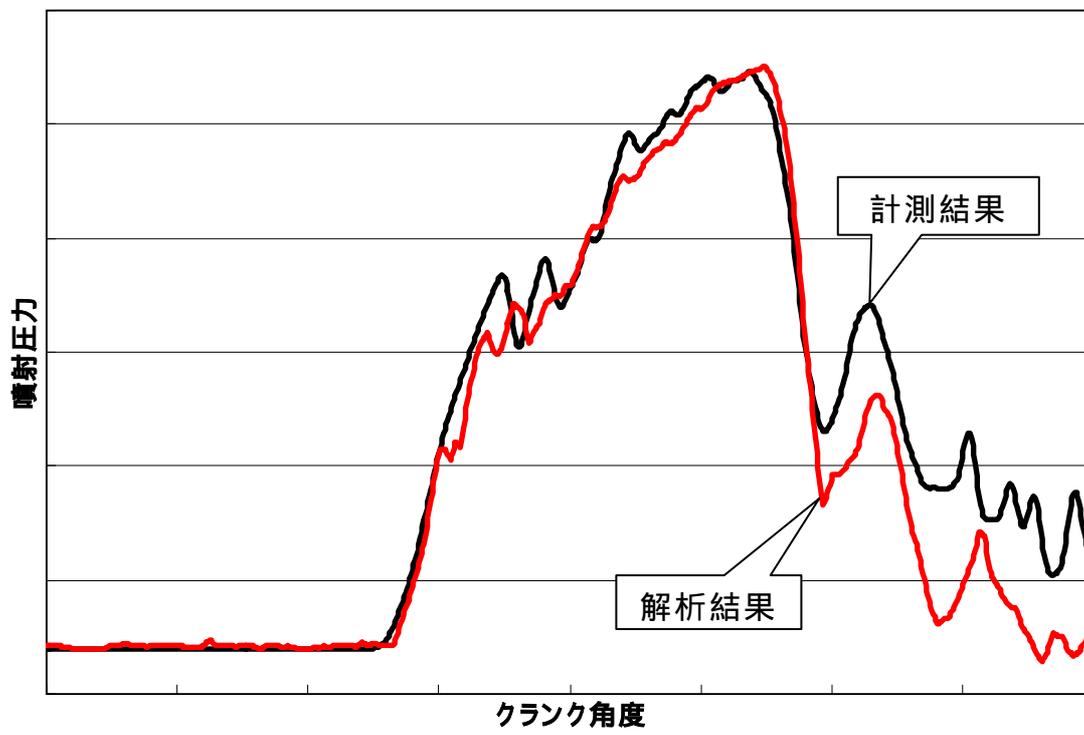


・カム式の解析結果

カムストローク

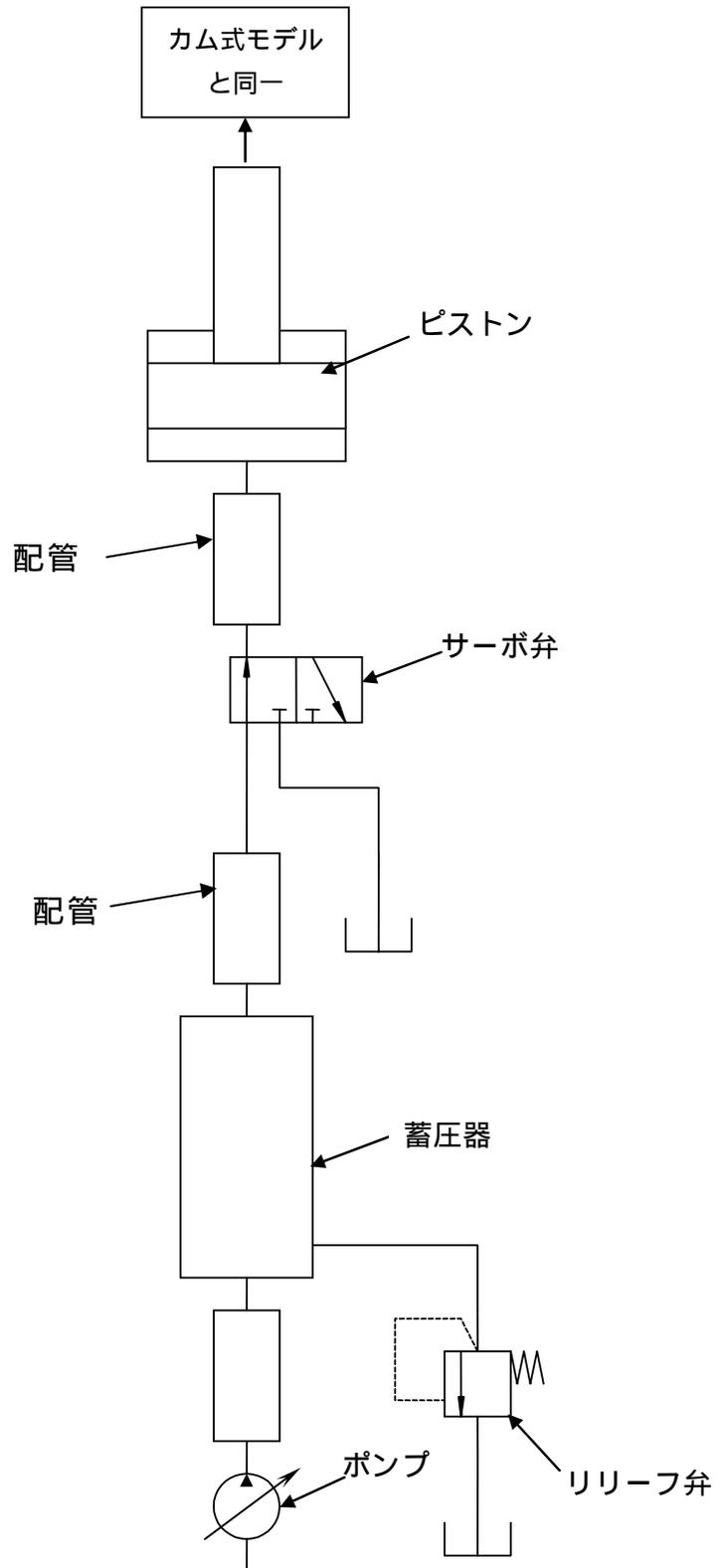


燃料噴射圧力

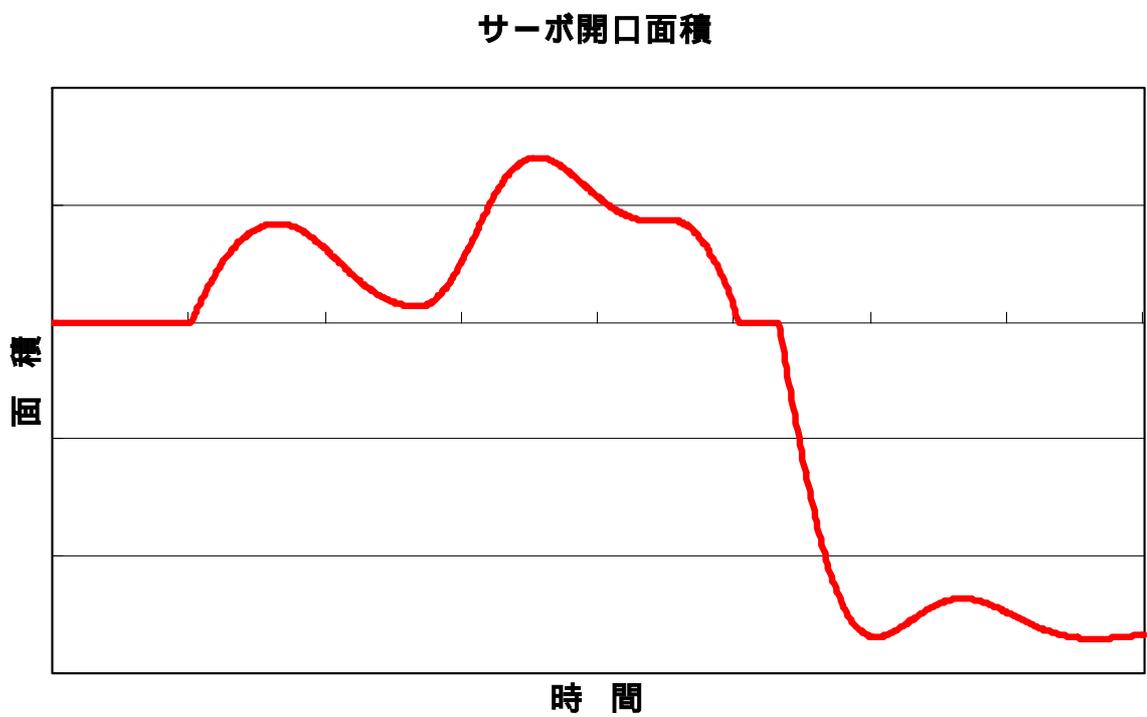
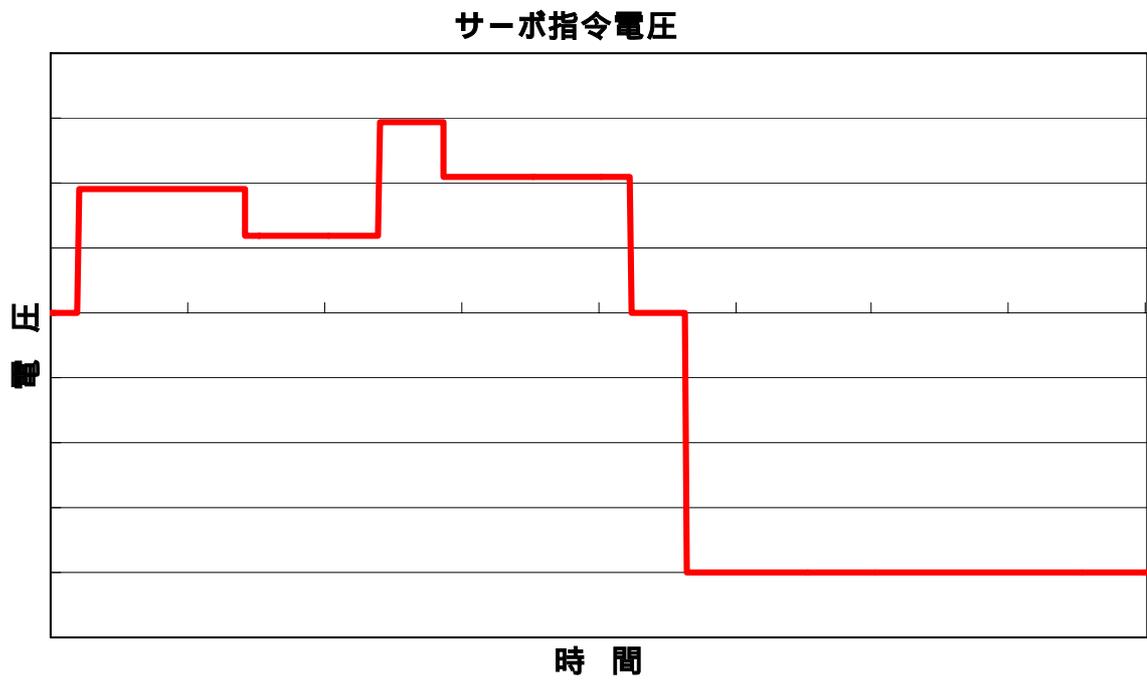


15.4-2 電子制御式燃料噴射系

・電子制御式燃料噴射系のモデル図

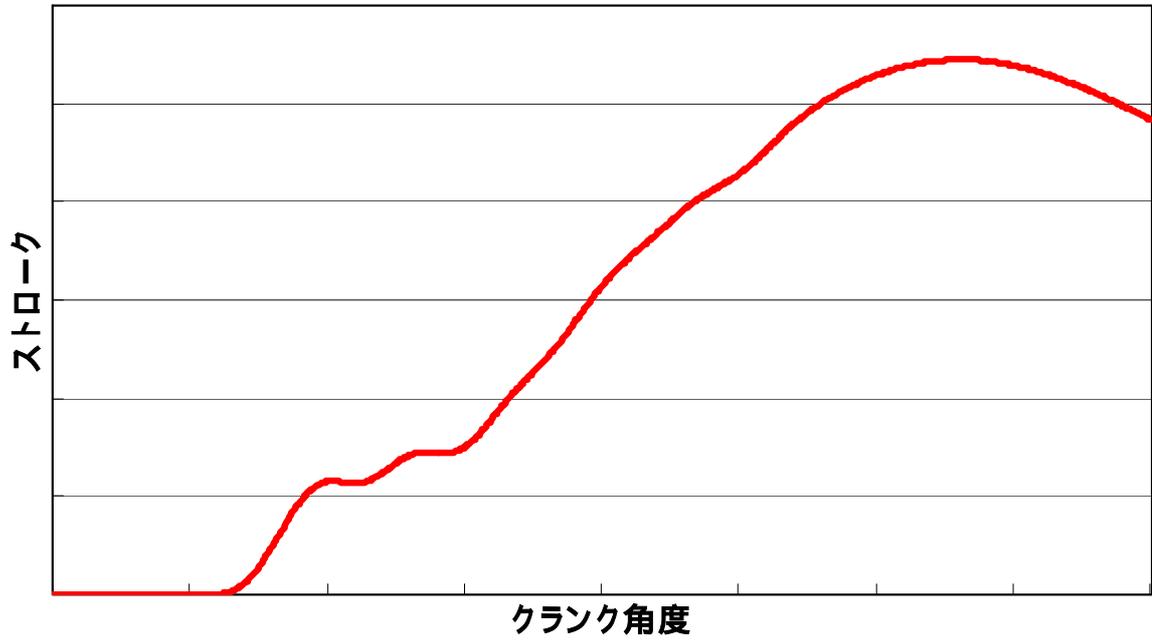


・ブーツ噴射の解析結果（１）

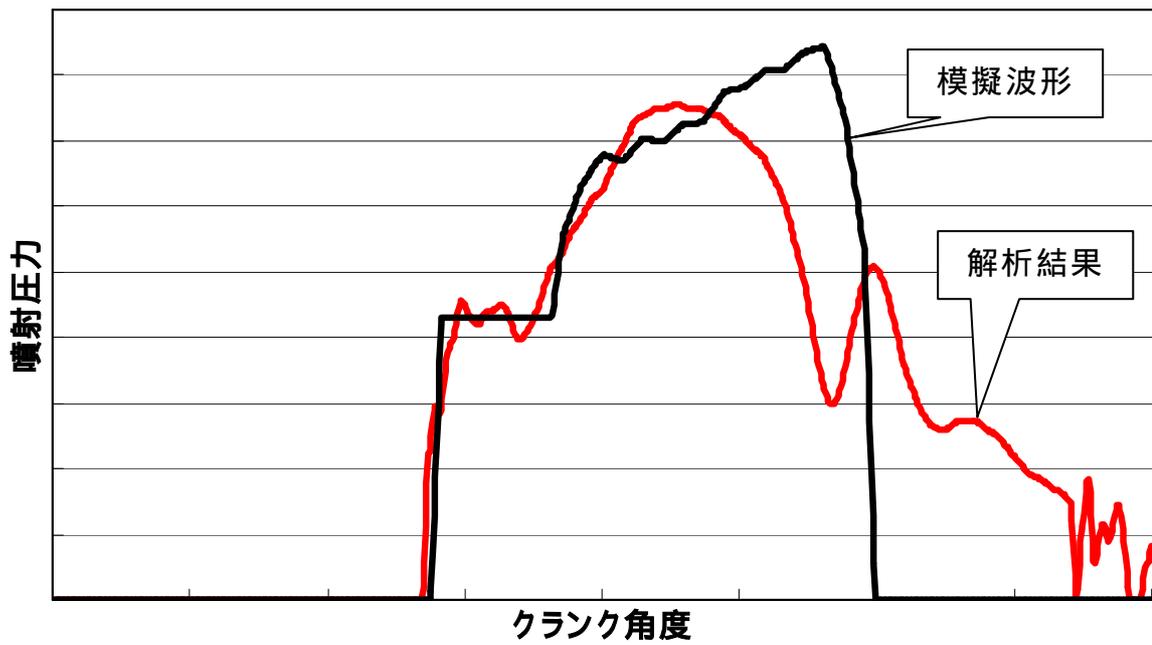


・ブーツ噴射の解析結果（２）

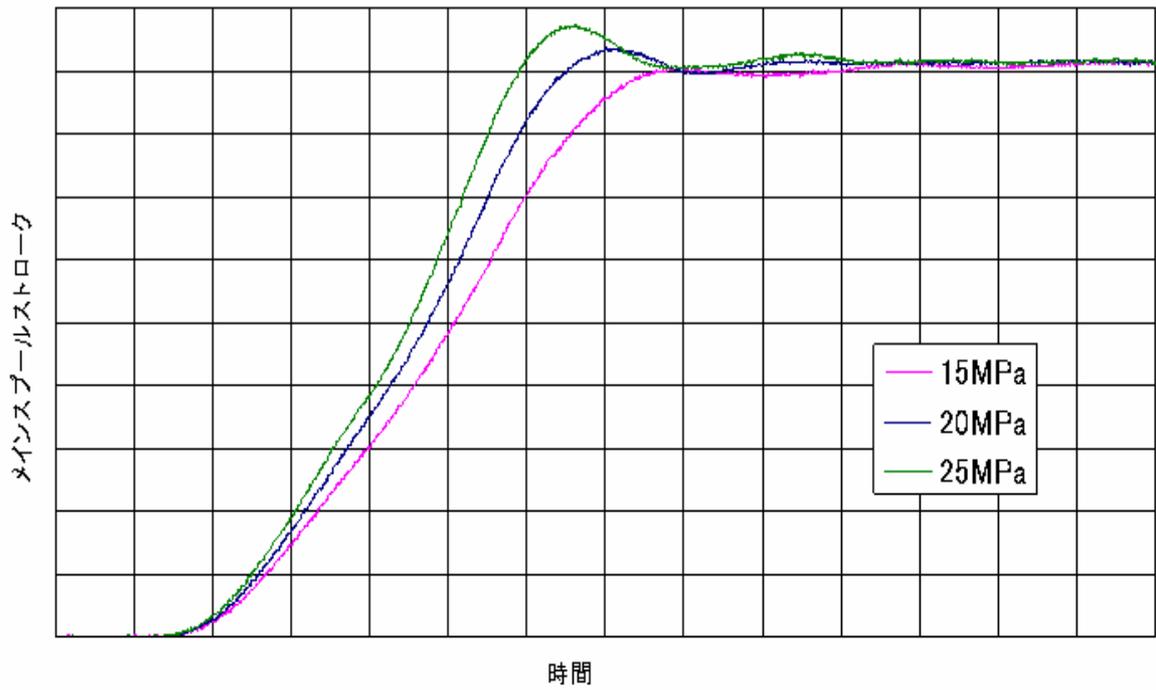
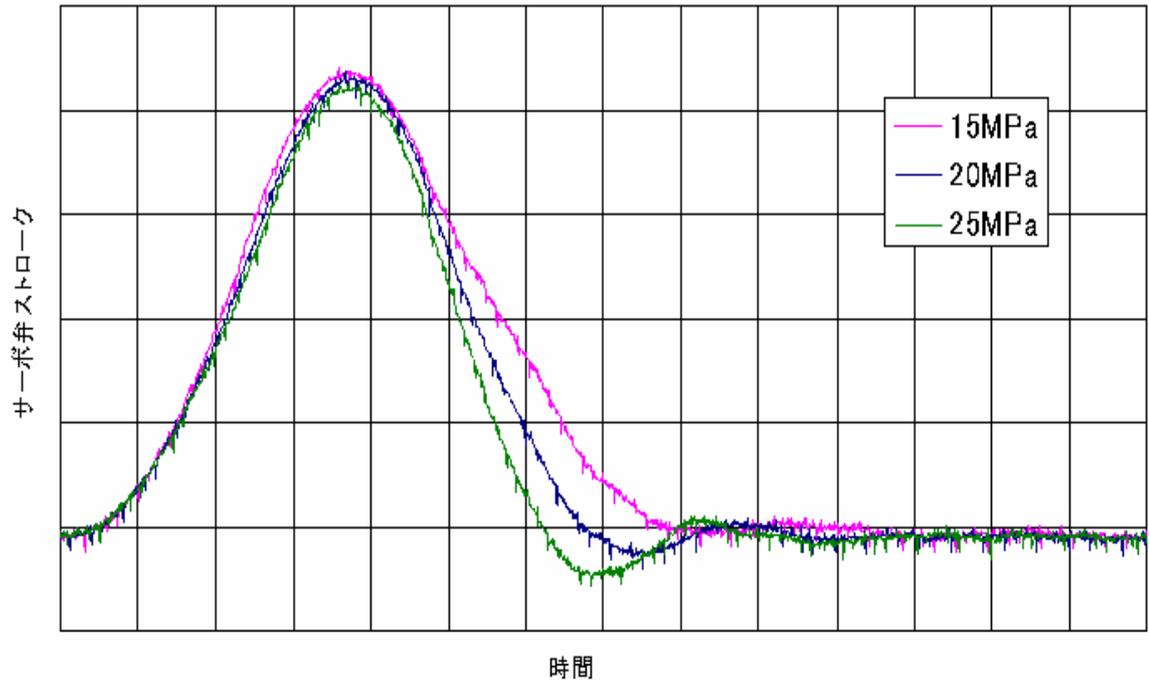
アクチュエータストローク



噴射圧力



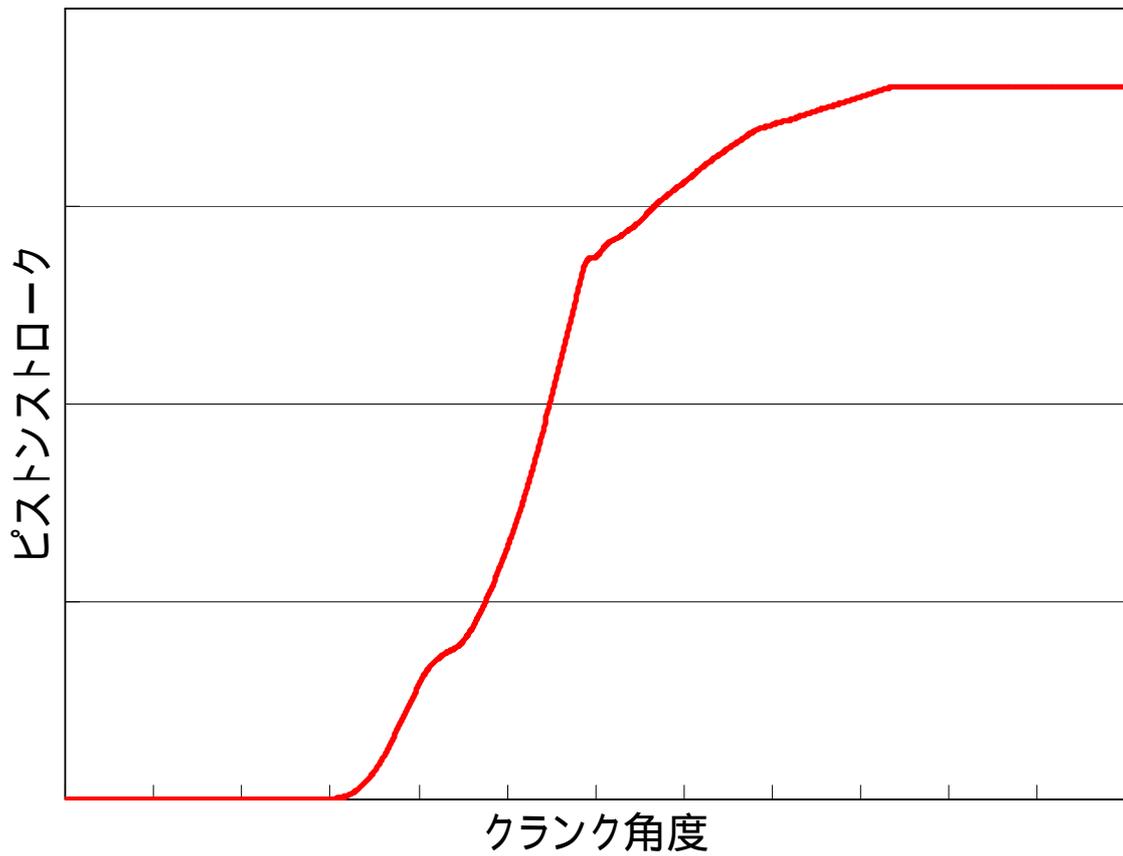
15.4-3 サーボ弁の単体試験結果



15.4-4 吸排気弁駆動装置の解析

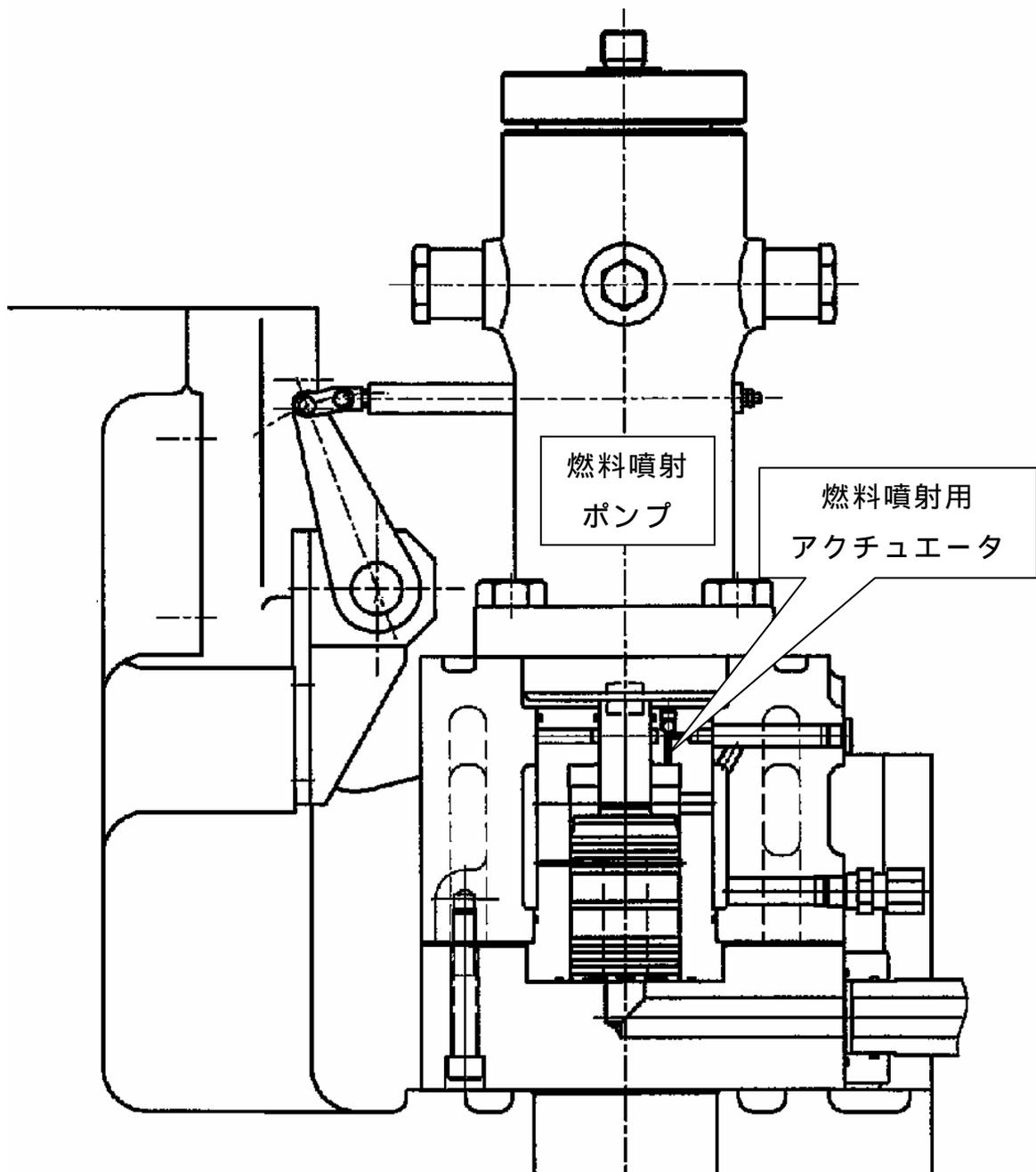
- ・ アクチュエータ、ピストンストロークの解析結果

吸排気弁ピストンストローク

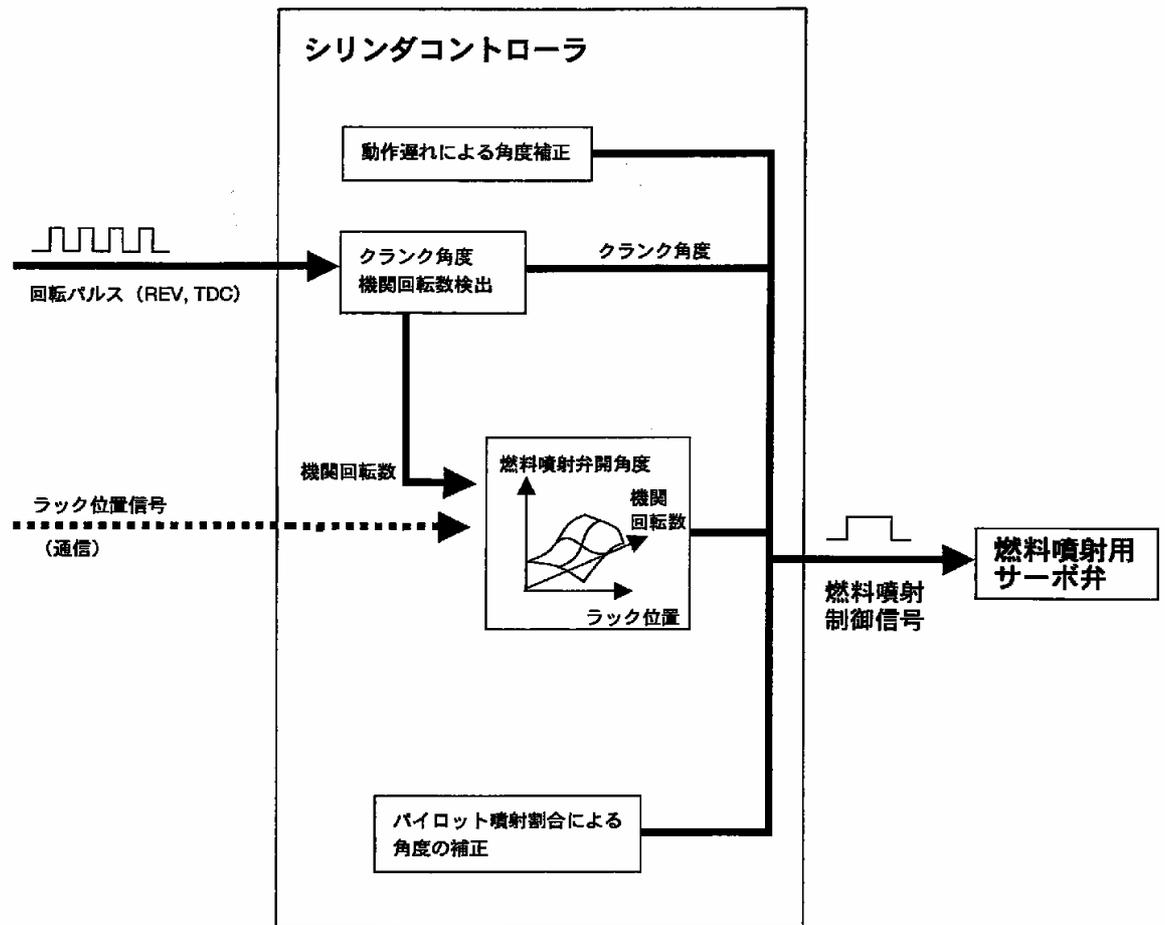


15.5 燃料噴射制御

- ・ 燃料噴射用アクチュエータ

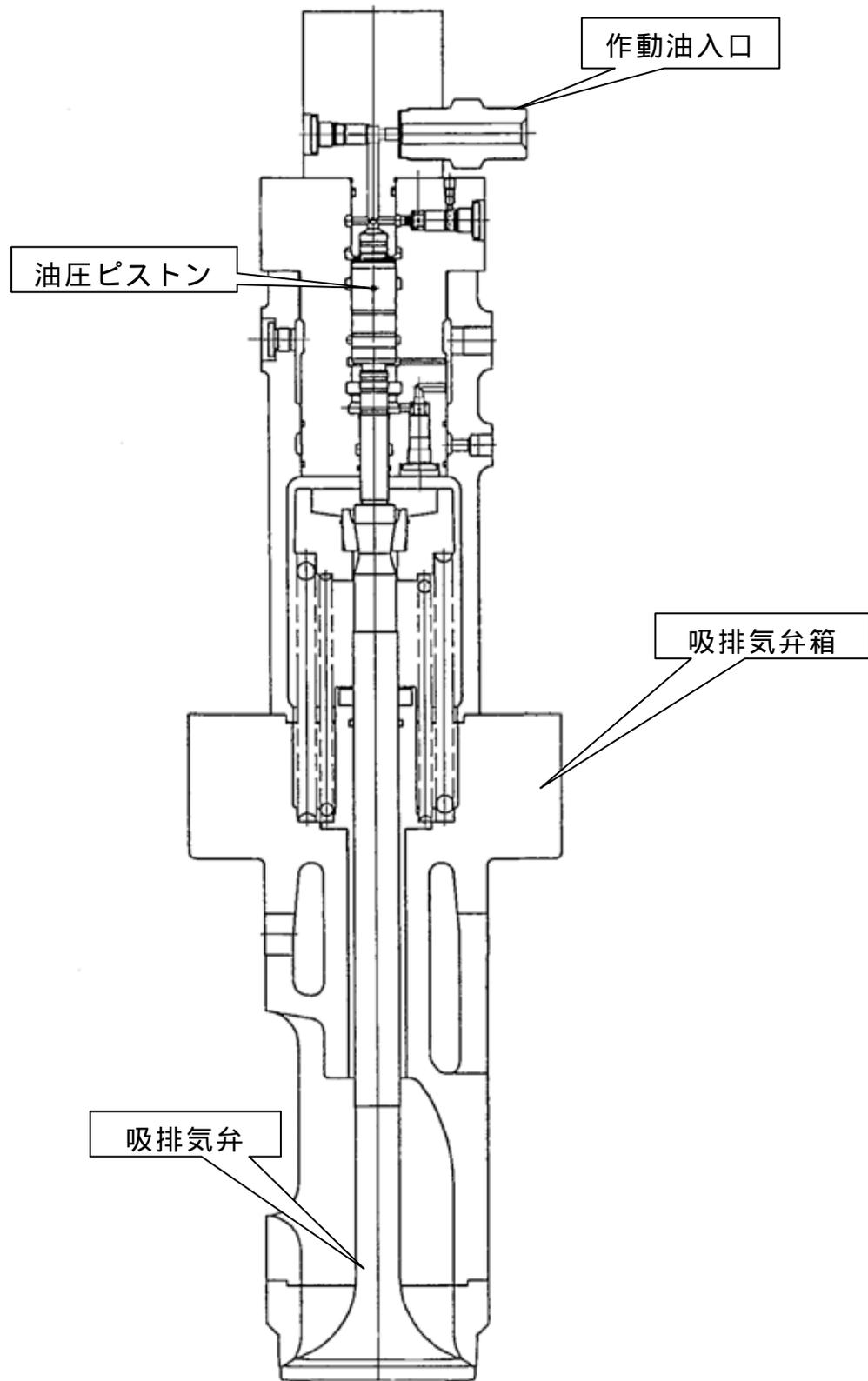


・ 燃料噴射制御ブロック図

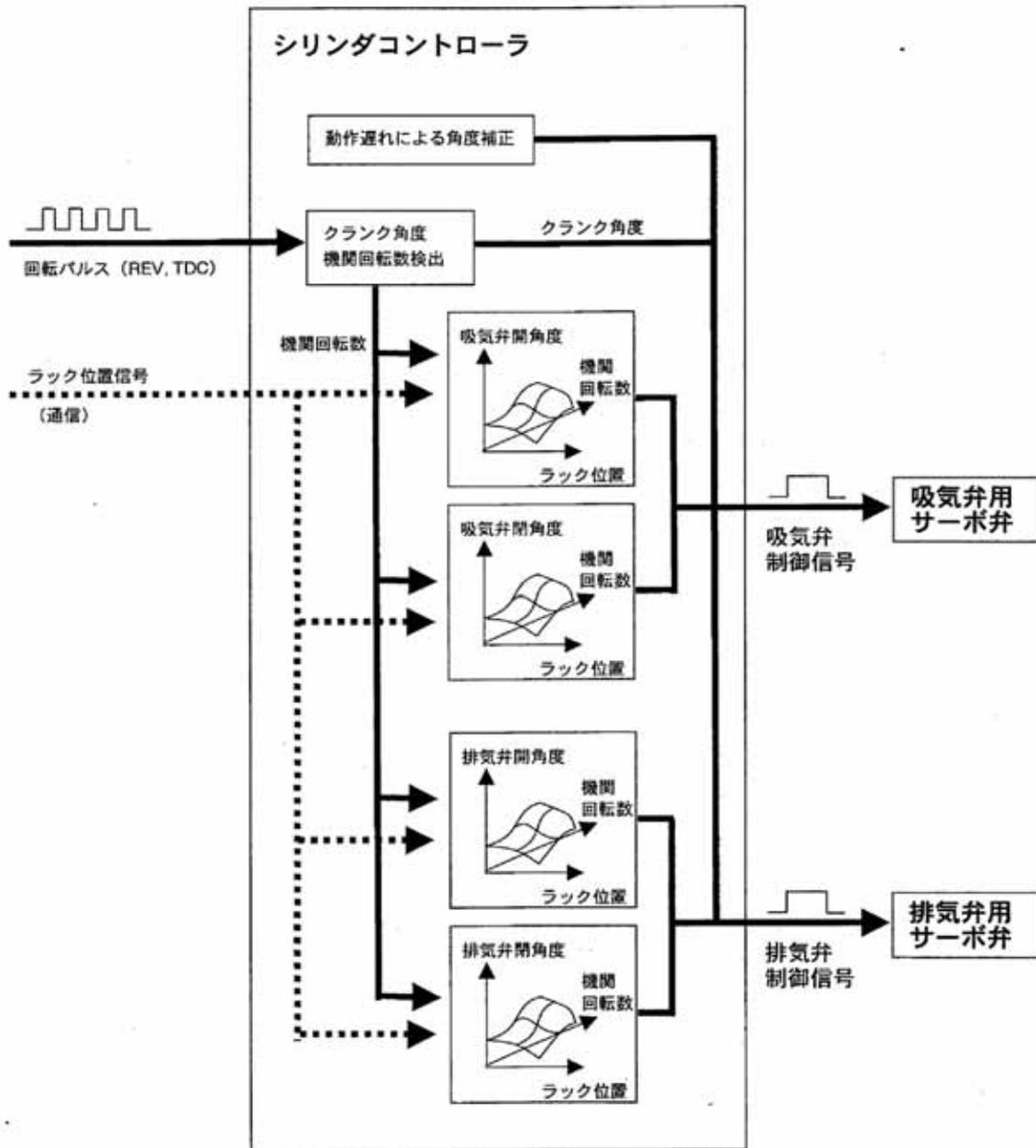


15.6 吸排気弁制御

・吸排気弁用アクチュエータ

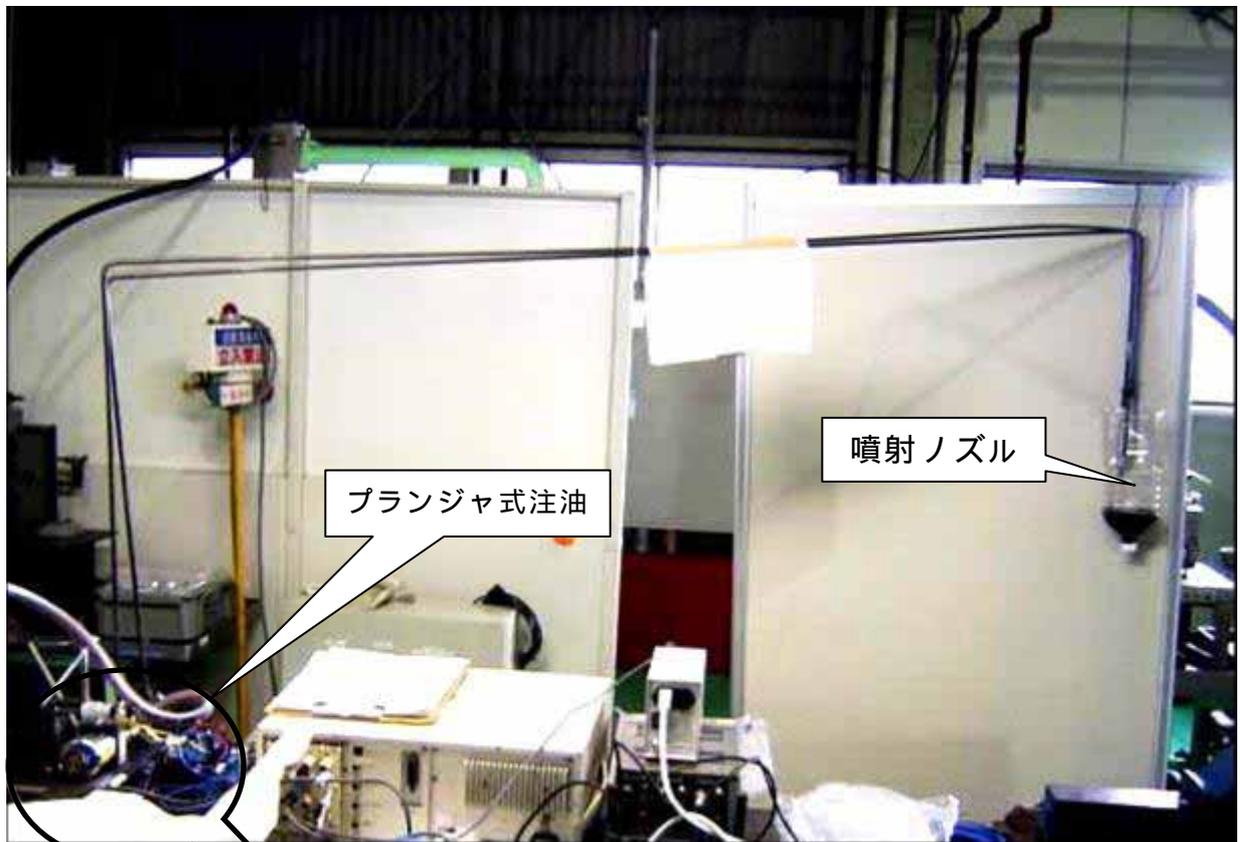


・吸排気弁制御ブロック図



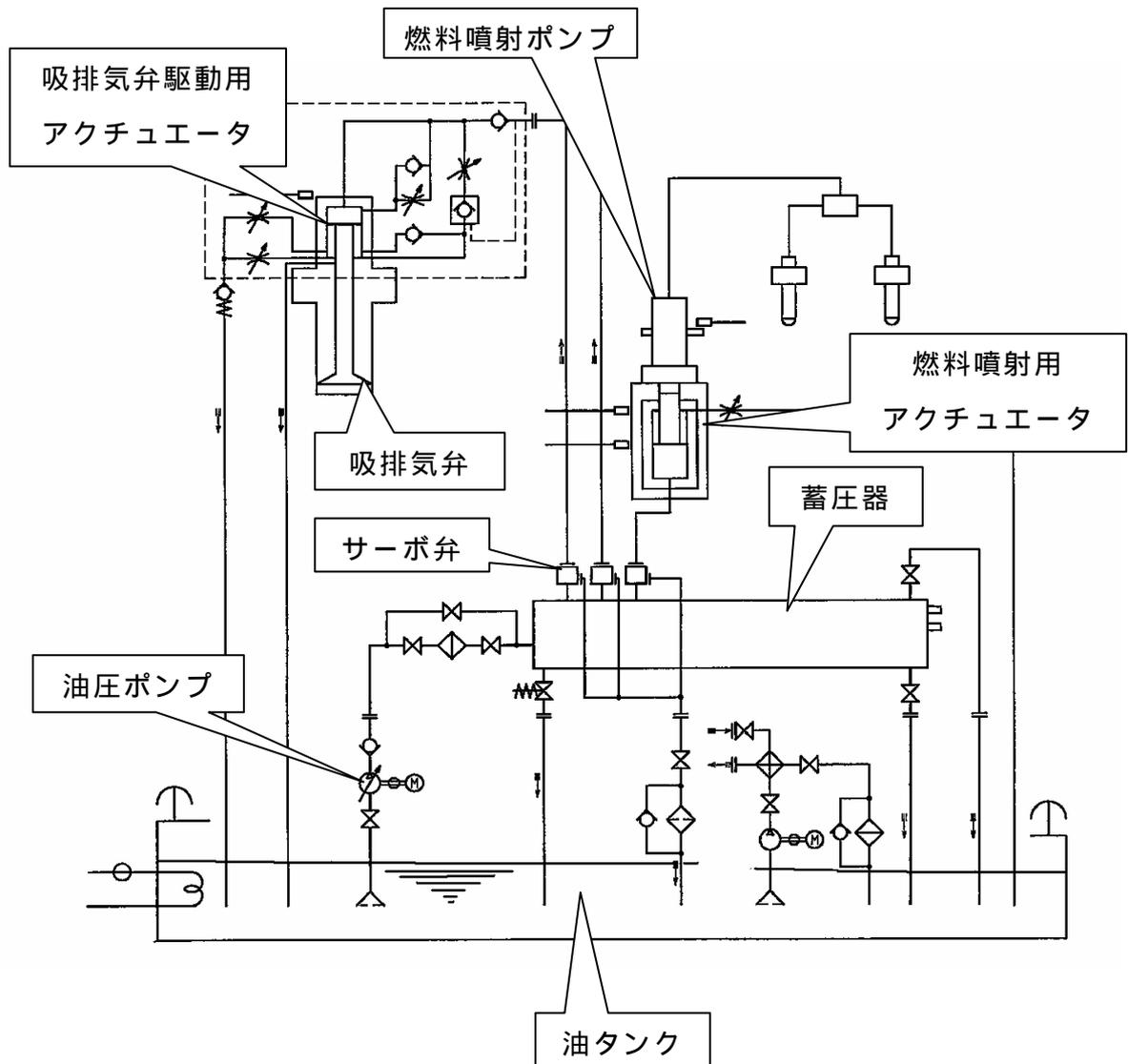
15.7 シリンダ注油制御

- ・プランジャ式注油器の作動試験

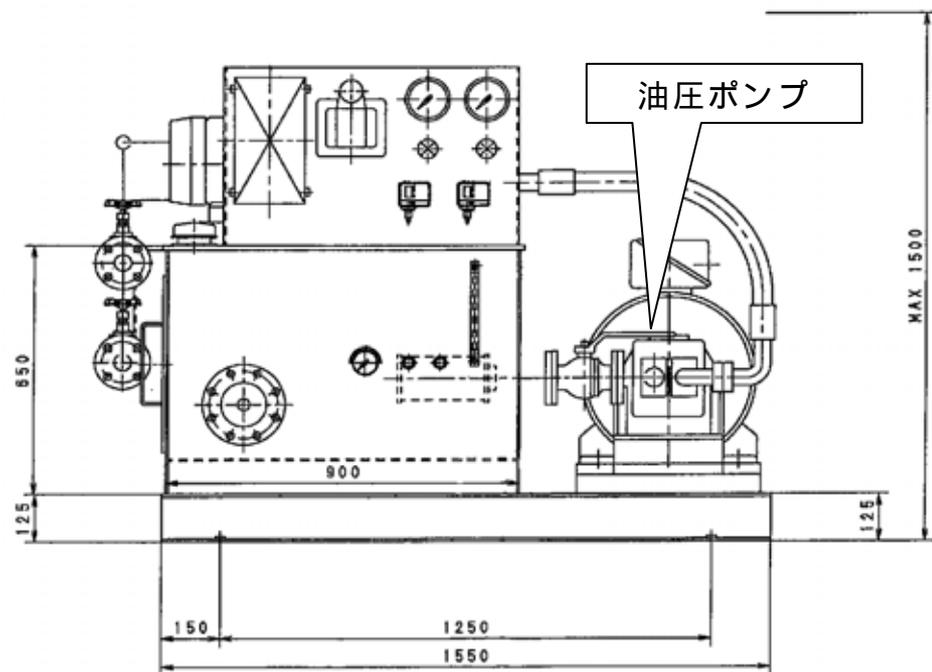


15.8 油圧系統

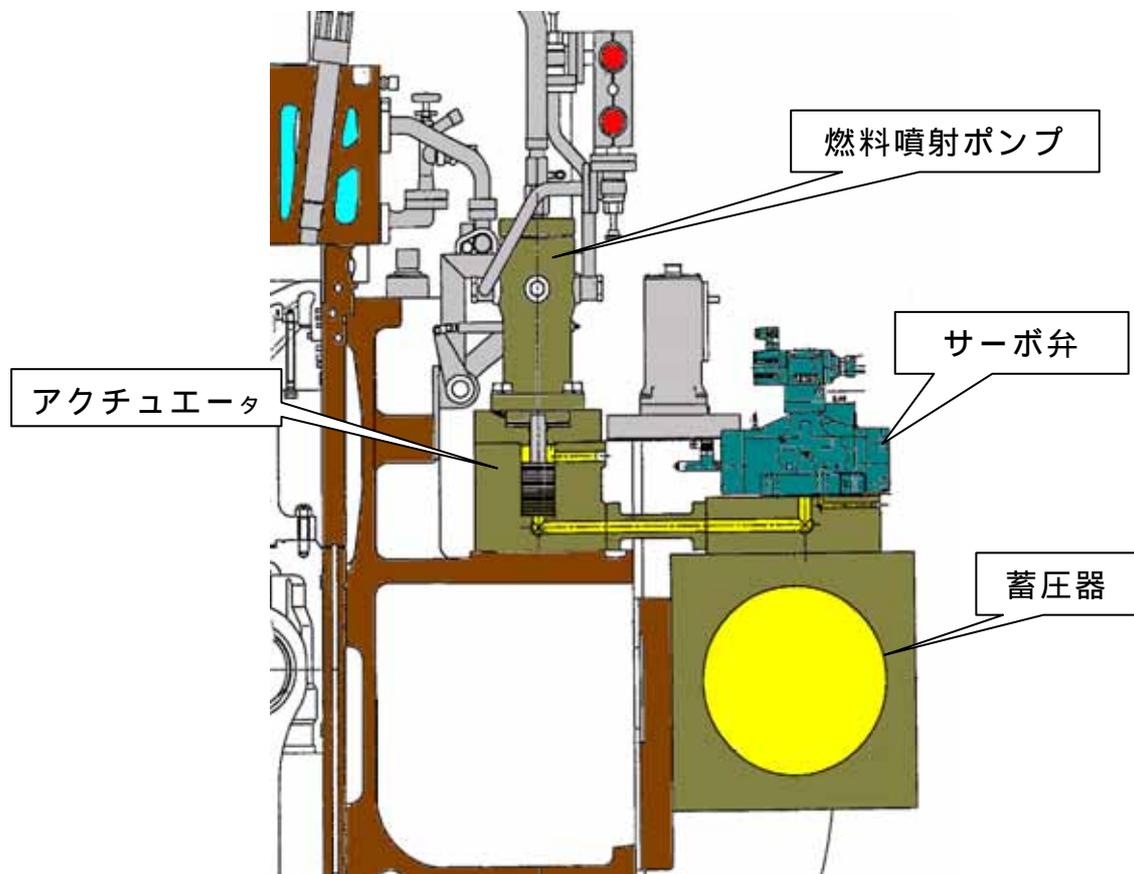
・作動油の系統図



・ 作動油用タンクユニット



・ 試験機関への組込図



15.9 制御系

- ・ 制御装置の仕様概要

低速4サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

目次

1. 装置概要	3
2. 制御機能	3
3. 電源系統概要	4
4. システム構成	5
5. 油圧系統図	6
6. 製作範囲	7
7. 制御装置の基本仕様	8
8. 適用船級	8
9. 機能	9
9.1 クランク角度検出機能	9
9.2 始動制御機能	10
9.3 燃料噴射制御機能	11
9.4 吸排気弁制御機能	12
9.5 作動油監視機能	13
9.6 シリンダ注油機能	14
10. 入出力信号	15

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

1. 装置概要

本装置は低速 4 サイクル機関で従来機械的に制御されていた燃料噴射タイミングや吸排気弁の開閉タイミング、シリンダ注油の噴射タイミングや注油量を電子的に制御することを目的とした装置である。

本装置は M/E リモートコントロールシステムから機関の操縦信号を受け、始動 / 運転 / 停止動作に応じた各種機能の動作指令信号を出力する。

動作指令信号のタイミングについては、回転パルス信号により機関のクランク角度、機関回転速度の検出を行い、シリンダ毎に設定されたタイミングで出力する。

また各機能には異常監視を有しており異常検出時には警報の出力や異常状態に応じた運転を行う。

なお本装置により燃料噴射タイミングや吸排気弁の開閉タイミング、シリンダ注油の噴射タイミングを電子制御化することで、機関から排出される NOx や CO₂ の低減、シリンダ注油量の低減が期待される。

2. 制御機能

本装置が有する制御機能およびその概要を下記に記す。

・ クランク角度検出機能

主機フライホイールに取り付けられた近接スイッチからのパルス信号により、機関クランク軸の角度、機関回転数、機関回転方向を検出する。

・ 始動制御機能

M/E リモートコントロールシステムからの始動空気エア投入信号が有効になると、機関クランク角度に応じて該当するシリンダの始動用電磁弁を駆動させ、始動空気を投入する。

また自己逆転機関においては、逆転動作時に規定回転数以下で回転方向切替を迅速に行う。

・ 燃料噴射制御機能

機関が始動を開始し、規定回転数以上になると燃料噴射を開始する。

機関運転時には、設定されたクランク角度で燃料噴射を行うよう各気筒の燃料噴射用サーボ弁を動作させ、燃料噴射のタイミング、噴射パターンを制御する。

・ 吸排気弁制御機能

機関が始動を開始し、規定回転数以上になると吸排気弁の動作を開始する。

吸排気弁は設定されたクランク角度で開閉するよう各気筒の吸気、排気それぞれのサーボ弁へ駆動指令を与え、開閉タイミングの制御を行う。

・ 作動油圧監視機能

燃料噴射ポンプや吸排気弁を動作させる為の作動油の監視を行う。

蓄圧器の圧力および作動油温度を監視し、異常発生時には警報を発生し、燃料噴射を停止するなど、異常状態に応じた制御を行う。

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

4. システム構成

Fig.2 に本装置のシステム概略図を示す。

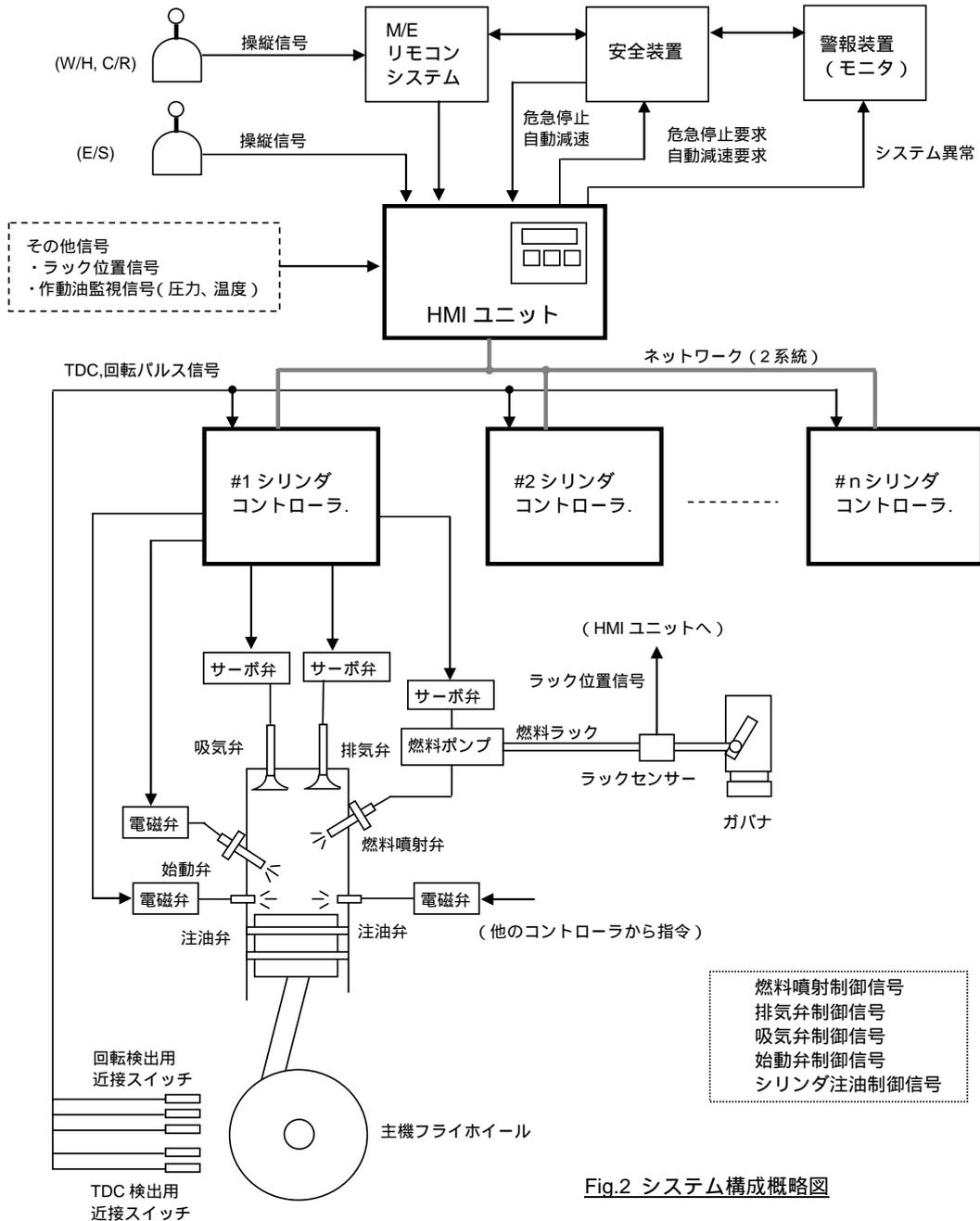


Fig.2 システム構成概略図

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

5. 油圧系統図

Fig.3 に本システムの油圧系統概略図を示す。

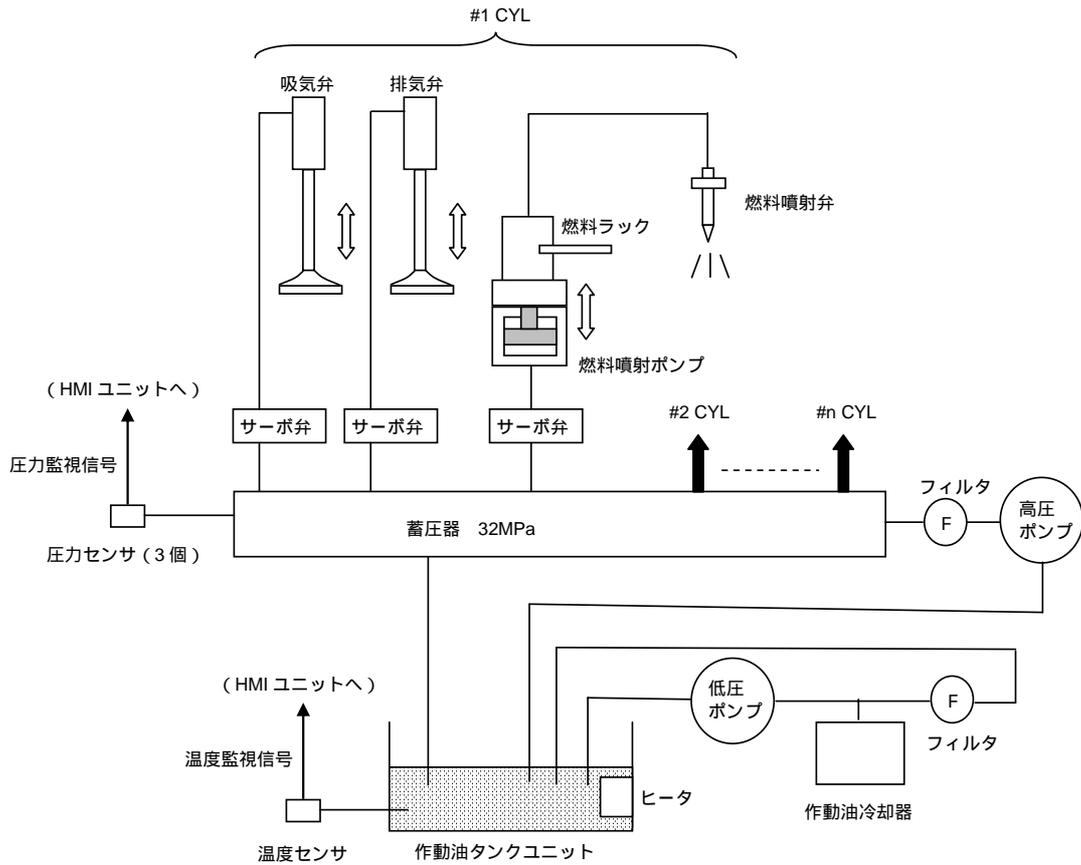


Fig.3 油圧系統概略図

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

6. 製作範囲

6.1 HMI ユニット

M/E リモートコントロールシステムからの機関操縦信号や電子制御で必要となる主要な入力信号、安全装置やモニタ装置へのアラーム出力信号、CAN 通信ポート等のインターフェイスを有する。また各種パラメータの設定や制御状態の確認を行う為の表示機能を持った装置を装備する。

6.2 シリンダコントロールユニット

本ユニットはシリンダ毎に 1 ユニット装備され、各シリンダの始動、燃料噴射、吸排気弁、シリンダ注油等の制御を行う。回転パルス信号よりクランク角度の検出を行い、各種制御機能で設定されたタイミングで動作駆動指令信号をサーボ弁へ出力する。また HMI ユニットとは CAN 通信にて情報のやり取りを行う。

6.3 周辺機器

・サーボ弁（サーボアンプ含む）

燃料噴射、吸排気弁動作を行う為の油圧制御用。1 気筒に計 3 個装備する。

- ・始動用電磁弁 始動弁にパイロット空気を供給するための電磁弁。
シリンダ毎に 1 個の始動用電磁弁を装備する。

・回転ピックアップ

回転検出用近接スイッチは主機のフライホイールの歯を検出する。
TDC 検出用近接スイッチは主機のフライホイールに設置されたドグを検出する。
回転検出用近接スイッチは 3 個、TDC 検出用近接スイッチは 2 個装備する。

- ・ラックセンサ 機関運転中に燃料ラック位置を検出する。
ラックセンサは 1 個装備する。

- ・リフトセンサ 燃料噴射や吸気弁、排気弁の動作確認用近接スイッチ。
1 気筒に計 3 個装備する。

本制御装置では上記のユニットおよび周辺機器を製作範囲とする。

低速4サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

7. 制御装置の基本仕様

- 7.1 設置 : HMIユニット、シリンダコントローラは制御室、もしくは機関室
その他の機器は機側
- 7.2 電源
メイン電源 : AC100V、1、1系統
(AC電源電圧はAC110V、AC220Vにも対応可能とする)
バックアップ電源 : DC24V、1系統
- 7.3 使用周囲温度範囲 : 0 ~ 50
- 7.4 使用周囲湿度範囲 : 10 ~ 90%RH 結露なきこと
- 7.5 使用周囲雰囲気 : 可燃性、腐食性ガスが無く、塵埃がひどくないこと
- 7.6 耐振性 : 制御室設置機器および、機関室設置機器 0.7G以下
機側室設置機器 4.0G以下
- 7.7 耐ノイズ性 : 各船級で規定された基準の範囲内
- 7.8 保護構造 : IP44以上
- 7.9 対象機関 : LH、LH-L、LA型機関
- 7.10 シリンダ数 : 6もしくは8シリンダ

8. 適用船級

本装置に適用される船級規格を下記に示す。

- ・NK規格(日本海事協会規格)
- ・JG規格(国交省船舶設備規定)

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

9. 機能

9.1 クランク角度検出機能

(1) 機能

主機フライホイールに取り付けられた近接スイッチからの回転パルス信号、TDC パルス信号を用いて機関のクランク角度、回転速度を検出する。
また回転パルス信号の位相差により、機関の回転方向を判断する。
近接スイッチは予備を含め回転パルス信号用 3 系統、TDC パルス信号用 2 系統を装備し、近接スイッチの故障や配線の断線が発生した場合、自動的にバックアップへ切り替わり運転を継続する。

(2) 検出精度

- ・ 検出角度精度 : 0.1deg 以上
- ・ 検出回転数範囲 : 0 ~ 450min⁻¹

(3) 入出力信号

デジタル入力 : 5 点 (回転パルス信号 3 点、TDC パルス信号 2 点)

(4) 近接スイッチの配置とパルス波形

近接スイッチは下図 Fig.4 のパルス波形となるように設置する。

- ・ 断線検出を行う為に REV1,2,3 の回転パルス波形は位相がずれるように設置する。
- ・ 断線検出を行う為に TDC1,2 のパルス波形は位相がずれるように設置する。
- ・ TDC1 のパルス波形は REV1 の回転パルス間に来るように設置する。
同様に、TDC2 の波形は REV2 の回転パルス間に来るようにする。

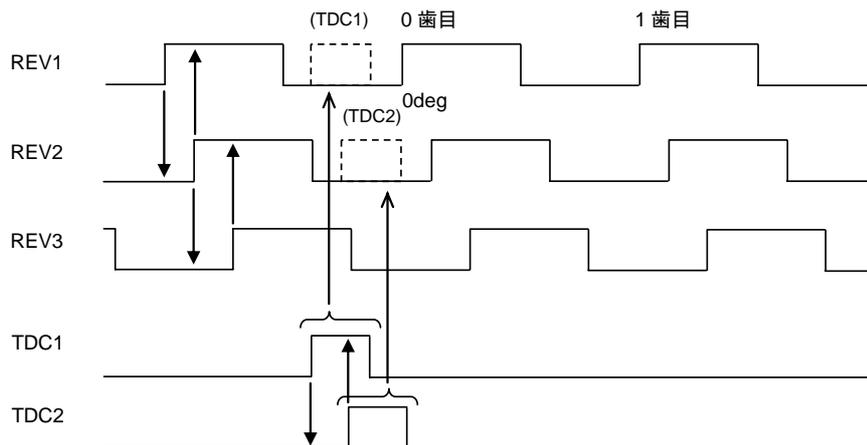


Fig.4 パルス波形

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

- (5) 角度検出のバックアップ
- ・ REV1 もしくは TDC1 が断線した場合、REV2 & TDC2 へ切替える。
 - ・ REV1 および REV2 が断線した場合、回転方向が検知できないので逆転は不可能となる。

9.2 始動制御機能

(1) 機能

M/E リモートコントロールシステムからの始動空気エア投入信号が有効になると、機関クランク角度、回転方向に応じて該当するシリンダの始動用電磁弁を駆動させ、始動空気を投入する。

また自己逆転機関においては、逆転動作時に規定回転数以下でブレーキエアを投入し、回転方向切替を迅速に行う。

(2) 入出力信号

電磁弁ドライブ出力 : DC24V 用トランジスタ出力

(3) 各種仕様

始動空気圧力 : Max 3.0MPa

始動空気流量 : 14.6 ~ 86.3 L/min

始動弁動作期間 : 140deg (-8 ~ 132deg)

電磁弁駆動電圧 : DC24V

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

9.4 吸排気弁制御機能

(1) 機能

- ・機関が始動し 3min-1 以上になると吸排気弁制御を開始する。
- ・吸排気弁の開閉タイミングは、機関回転数およびラック位置による設定値に応じて自動的に変化する。
- ・機関回転数およびラック位置による吸排気弁の開閉タイミングの設定値は変更が可能である。
- ・シリンダ毎にサーボ弁や吸排気弁の駆動ユニットの動作遅れ時間の補正が可能である。
- ・吸排気弁の駆動ユニットに装備されたリフトセンサーからの信号により吸排気弁の動作を監視し、異常発生時には燃料噴射を停止する。
- ・吸排気弁制御機能の動作確認や作動油中のエア抜き用途として、任意に動作可能な機能を有する。
- ・シリンダコントローラは吸排気弁用サーボ弁の動作タイミングを制御するものであり、実際にバルブが開閉するタイミングについては監視しない。

(2) 入出力信号

- アナログ入力 : ラック位置信号
 アナログ出力 : 動作指令信号 (吸気弁、排気弁)
 デジタル入力 : リフトセンサー信号 (吸気弁、排気弁)

(3) 吸排気弁制御システム概略図

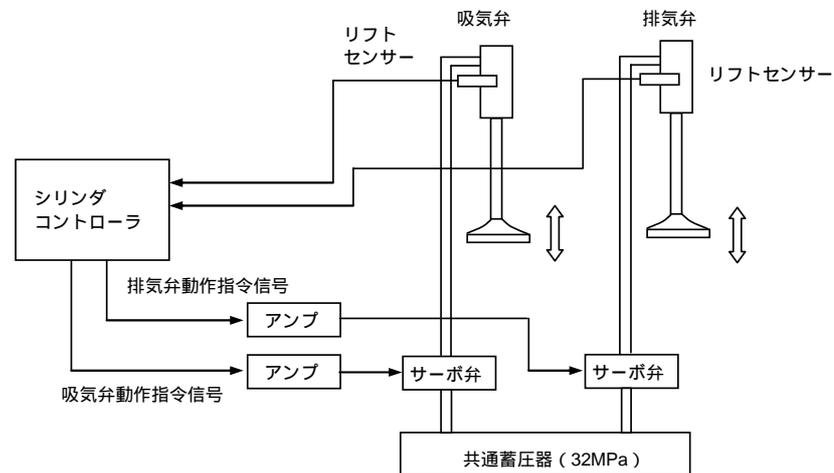


Fig.7 吸排気弁制御システム概略図

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

9.5 作動油監視機能

(1) 機能

- ・ 燃料噴射制御や吸排気弁制御の動作に使用する作動油を監視する。
- ・ 共通蓄圧管に取り付けられた圧力センサーにより作動油圧を監視し、異常発生時には警報を出力する。
- ・ 作動油タンクに取り付けられた温度センサーにより作動油温度の監視を行う。異常発生時には警報を出力する。

(2) 入出力信号

デジタル入力 : 作動油圧力信号 (3 点)、作動油温度信号 (1 点)

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

9.6 シリンダ注油機能

(1) 機能

- ・機関が始動し規定回転数以上になるとシリンダ注油制御を開始する。
- ・シリンダ注油量は、機関回転数およびラック位置による設定値に応じて自動的に変化する。
- ・1回の噴射による吐出量は電磁弁が制御可能な最低吐出量とし、噴射間隔を調整して目標の注油量になるよう制御を行う。
- ・シリンダ注油タイミングは、シリンダのピストンリング間とする。
- ・機関回転数およびラック位置によるシリンダ注油量の設定値は変更が可能である。
- ・シリンダ注油開始タイミングは調整可能とする。
- ・シリンダ毎に電磁弁の動作遅れ時間の補正が可能である。
- ・シリンダ注油制御機能の動作確認や作動油中のエア抜き用途として、任意に動作可能な機能を有する。
- ・シリンダコントローラはシリンダ注油用電磁弁の動作タイミングを制御するものであり、実際にシリンダ内に注油するタイミングについては監視しない。

(2) 入出力信号

電磁弁ドライブ出力 : DC24V 用トランジスタ出力 (1 気筒 2 出力)

(3) シリンダ注油制御システム概略図

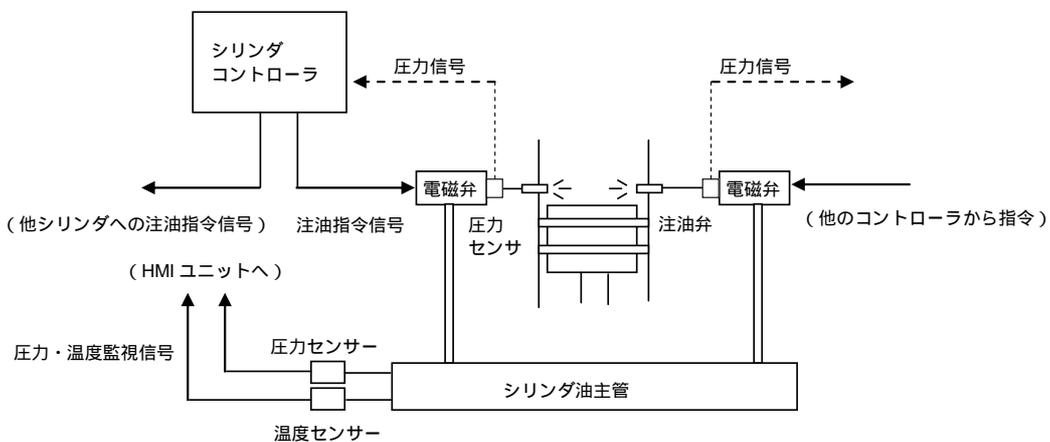


Fig.7 シリンダ注油制御システム概略図

低速 4 サイクル機関用電子制御システム 制御系の仕様概要

10. 入出力信号

信号名称	点数	信号仕様	出力元	入力先	備考
AH/AS 信号	1	デジタル	リモコン	HMI ユニット	
始動空気投入信号	1	デジタル	リモコン	HMI ユニット	
STOP 信号	1	デジタル	リモコン	HMI ユニット	
操縦位置信号	1	デジタル	リモコン	HMI ユニット	
回転速度指令	1	アナログ	リモコン	HMI ユニット	
ラック位置信号	1	アナログ	ラックセンサー	HMI ユニット	1
AH/AS 信号	1	デジタル	E/S	HMI ユニット	
RUN/STOP 信号	1	デジタル	E/S	HMI ユニット	
START 信号	1	デジタル	E/S	HMI ユニット	
作動油圧力信号	3	デジタル	圧力センサー	HMI ユニット	
作動油温度信号	1	デジタル	温度センサー	HMI ユニット	
シリンダ油主管圧力	1	デジタル	圧力センサー	HMI ユニット	
シリンダ油主管温度	1	デジタル	温度センサー	HMI ユニット	
危急停止信号	1	デジタル	HMI ユニット	安全装置	
SLOW DOWN	1	デジタル	HMI ユニット	安全装置	
SLOW DOWN 要求	1	デジタル	HMI ユニット	安全装置	
システム異常	1	デジタル	HMI ユニット	警報装置	
インジケータ出力	1	アナログ	HMI ユニット	表示器	
通信ポート	2	CAN	HMI ユニット	CYL. CONT.	
回転パルス	3	デジタル	近接スイッチ	CYL. CONT.	2
TDC パルス	2	デジタル	近接スイッチ	CYL. CONT.	2
燃料噴射駆動指令	1	アナログ	CYL. CONT.	サーボアンプ	3
吸気弁駆動指令	1	デジタル	CYL. CONT.	サーボアンプ	3
排気弁駆動指令	1	デジタル	CYL. CONT.	サーボアンプ	3
シリンダ注油駆動指令	2	(未定)	CYL. CONT.	注油用電磁弁	
通信ポート	2	CAN	CYL. CONT.	通信ポート	
燃料噴射用リフトセンサー	1	デジタル	燃料噴射ポンプ	CYL. CONT.	
吸気弁用リフトセンサー	1	デジタル	吸気弁	CYL. CONT.	
排気弁用リフトセンサー	1	デジタル	排気弁	CYL. CONT.	
燃料噴射用サーボアンプ アラーム	1	デジタル	燃料噴射用サーボアンプ	CYL. CONT.	
シリンダ注油 F B	2	(未定)	圧力センサー	CYL. CONT.	

- 1 ラックセンサーユニットのポテンショメータ用電源電圧の供給が必要である
- 2 近接スイッチ用電源電圧 DC24V の供給が必要である
- 3 サーボアンプ用電源電圧 DC24V の供給が必要である

15.10 試験装置の製作

- ・ 燃料噴射用アクチュエータ



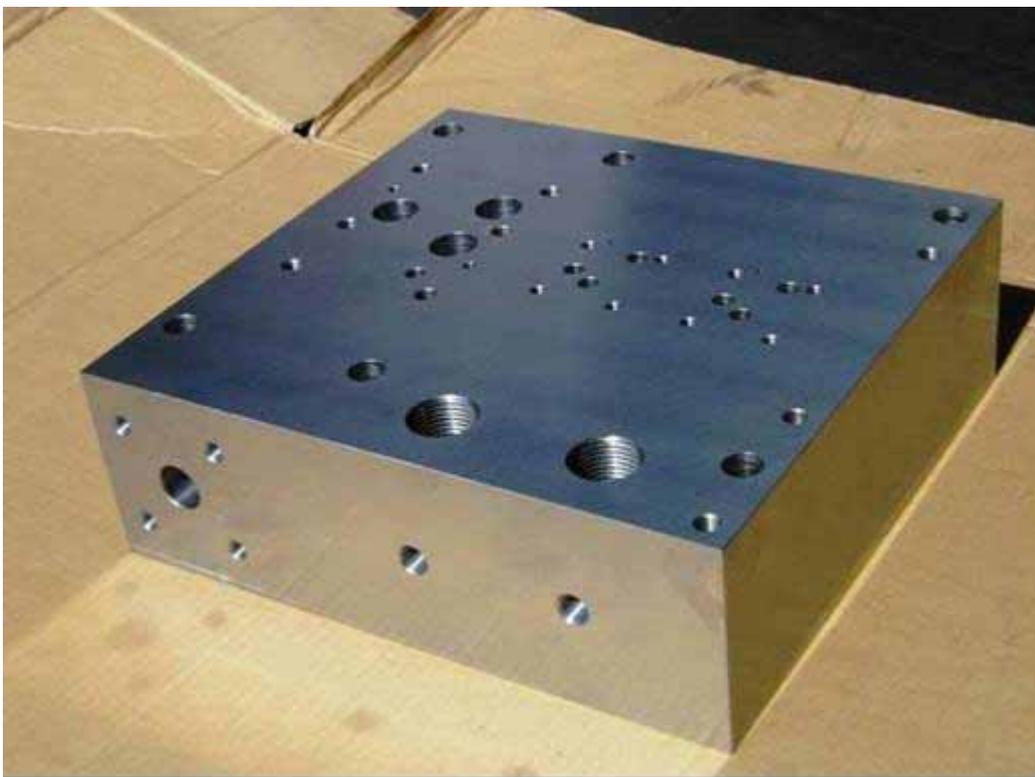
- ・ 燃料噴射用アクチュエータ下部板



- ・ 燃料噴射用アクチュエータ上部



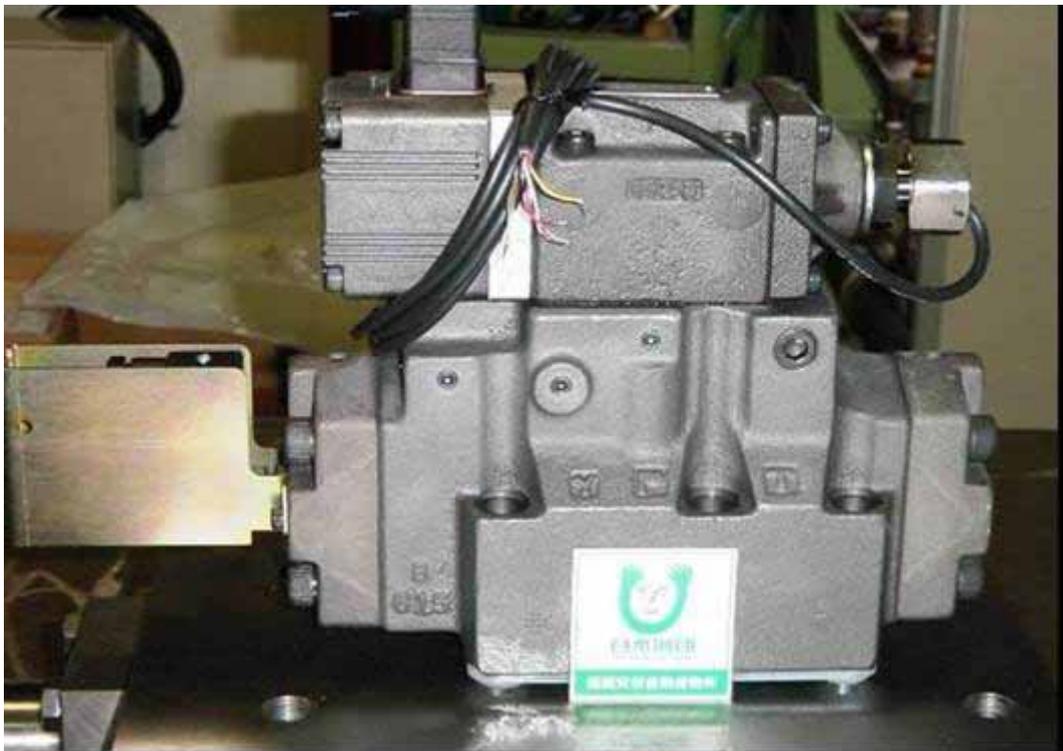
- ・ サーボ弁取付板



- ・ アクチュエータ連結管



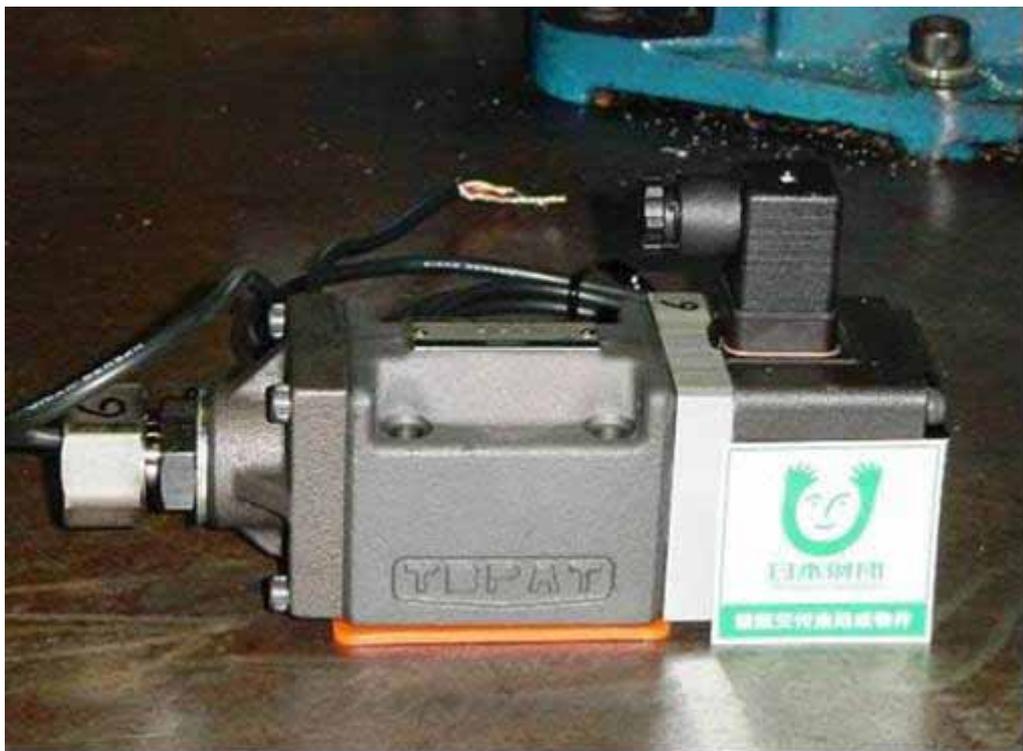
- ・ 燃料噴射用サーボ弁



・ 燃料噴射装置



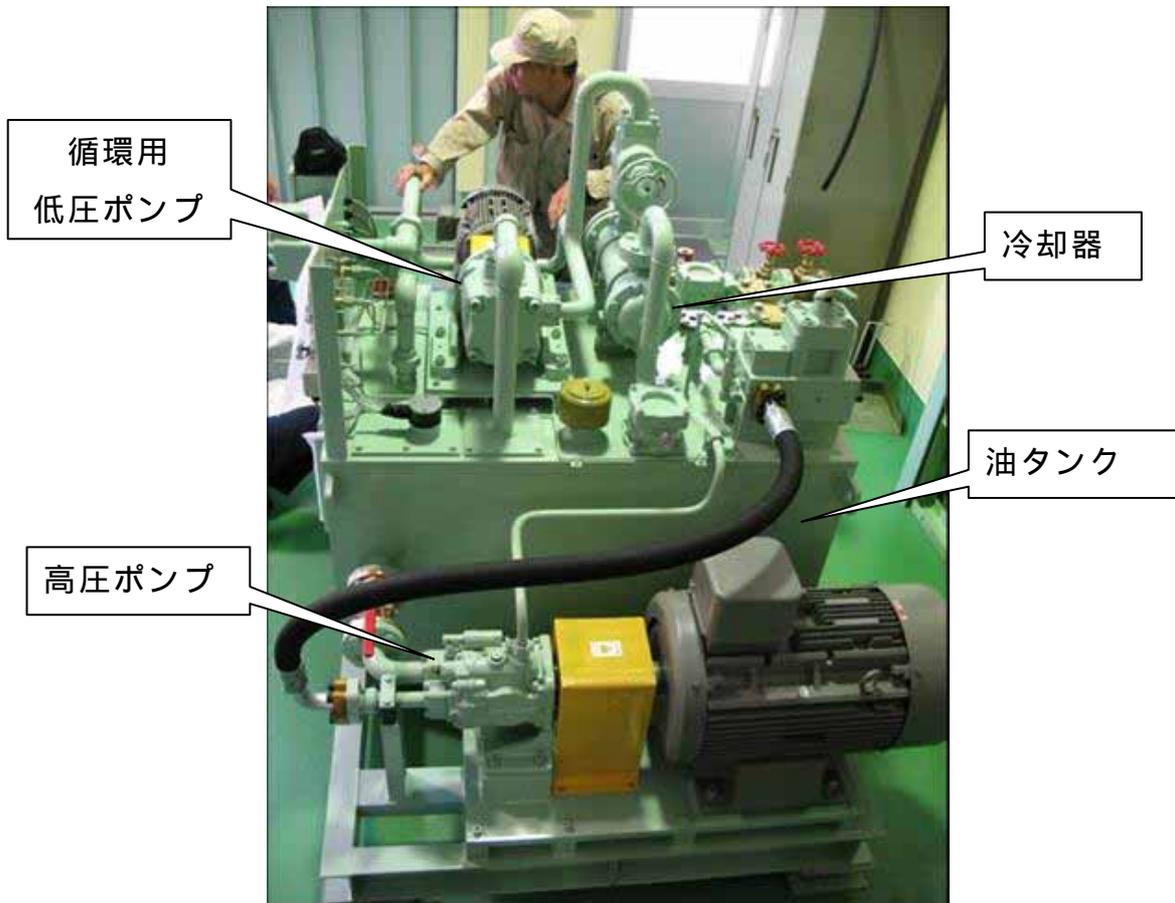
・ 吸排気弁駆動用サーボ弁



・吸排気弁駆動用アクチュエータ



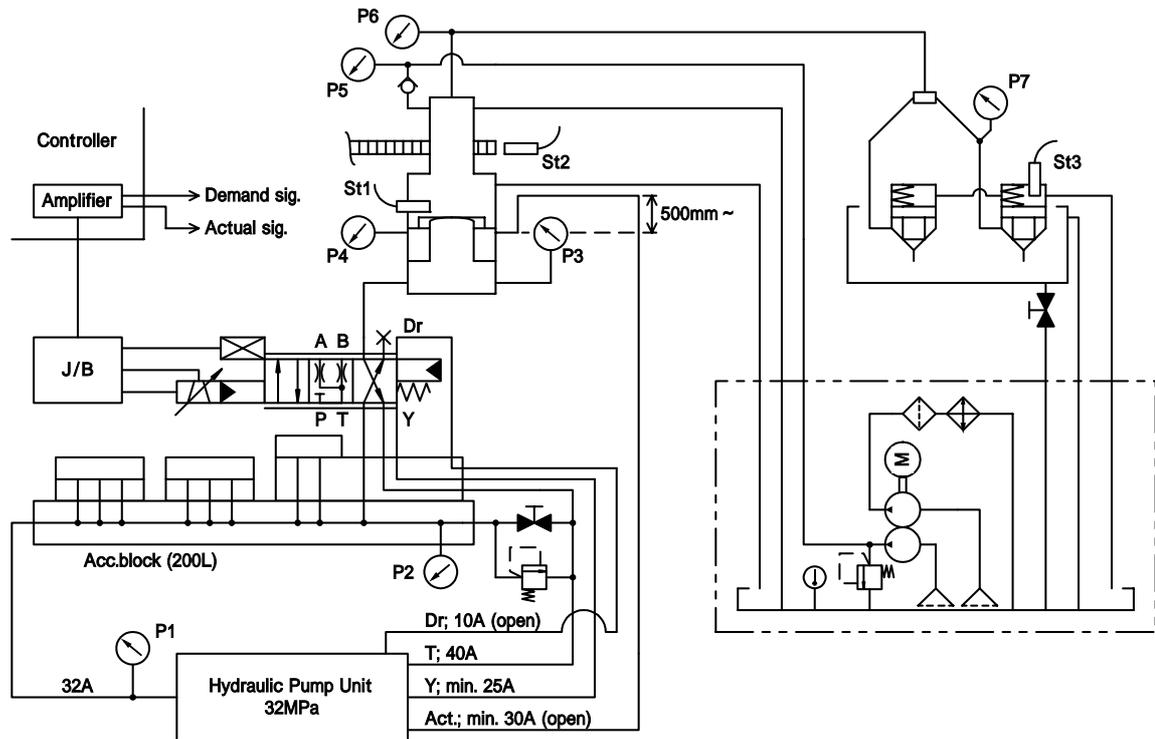
・タンクユニット



15.11 試験計画

15.11-1 要素試験の試験計画

- ・ 燃料噴射装置の要素試験装置



計測項目

圧力

P1	供給圧力
P2	蓄圧器圧力
P3	F0 アクチュエータ下部室圧力
P4	F0 アクチュエータ上部室圧力
P5	F0 供給圧力
P6	F0 ポンプ出口圧力
P7	噴射圧力

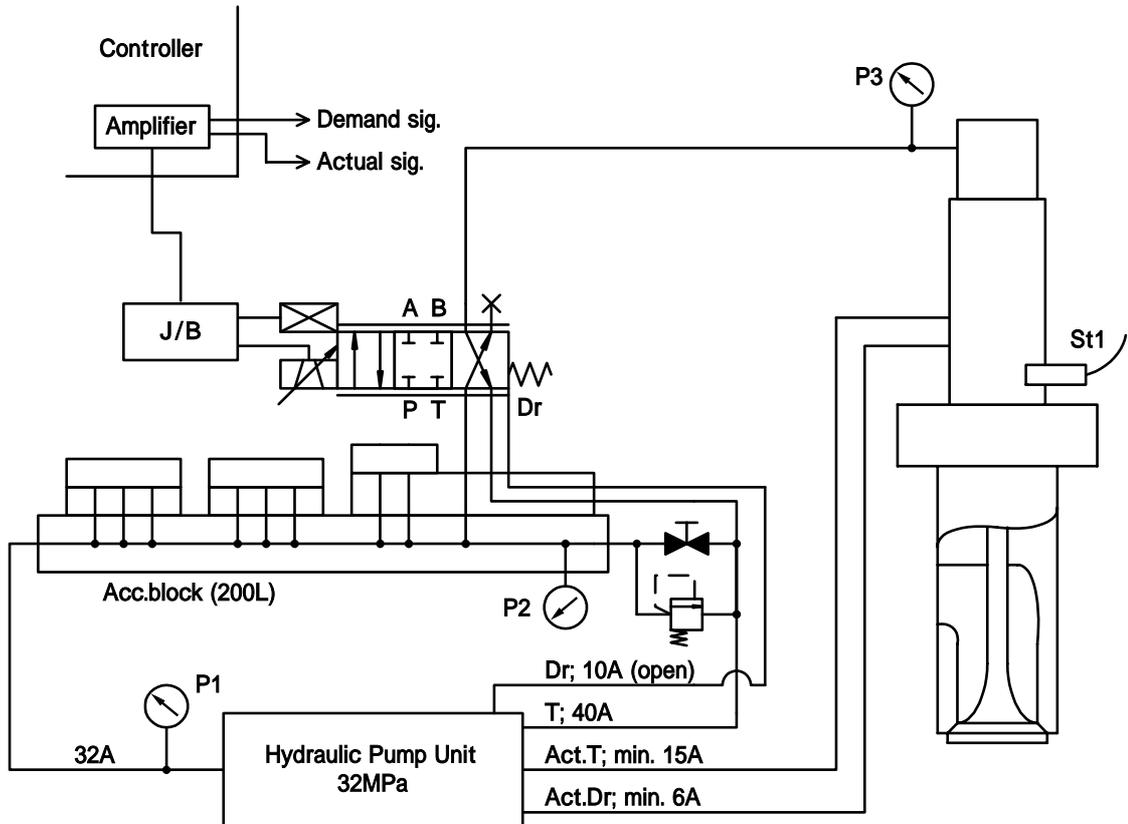
変位

St1	F0 ポンプリフト
(")	" スイッチ
St2	ラック位置
St3	噴射弁針弁リフト

信号

Demand	サーボバルブメインスプールへの指令信号
Actual	サーボバルブメインスプールからのフィードバック信号

・ 吸排気弁駆動装置の要素試験



計測項目

圧力

P1	供給圧力
P2	蓄圧器圧力
P3	I/E アクチュエータ圧力
Px	(I/E アクチュエータ内部圧力)

変位

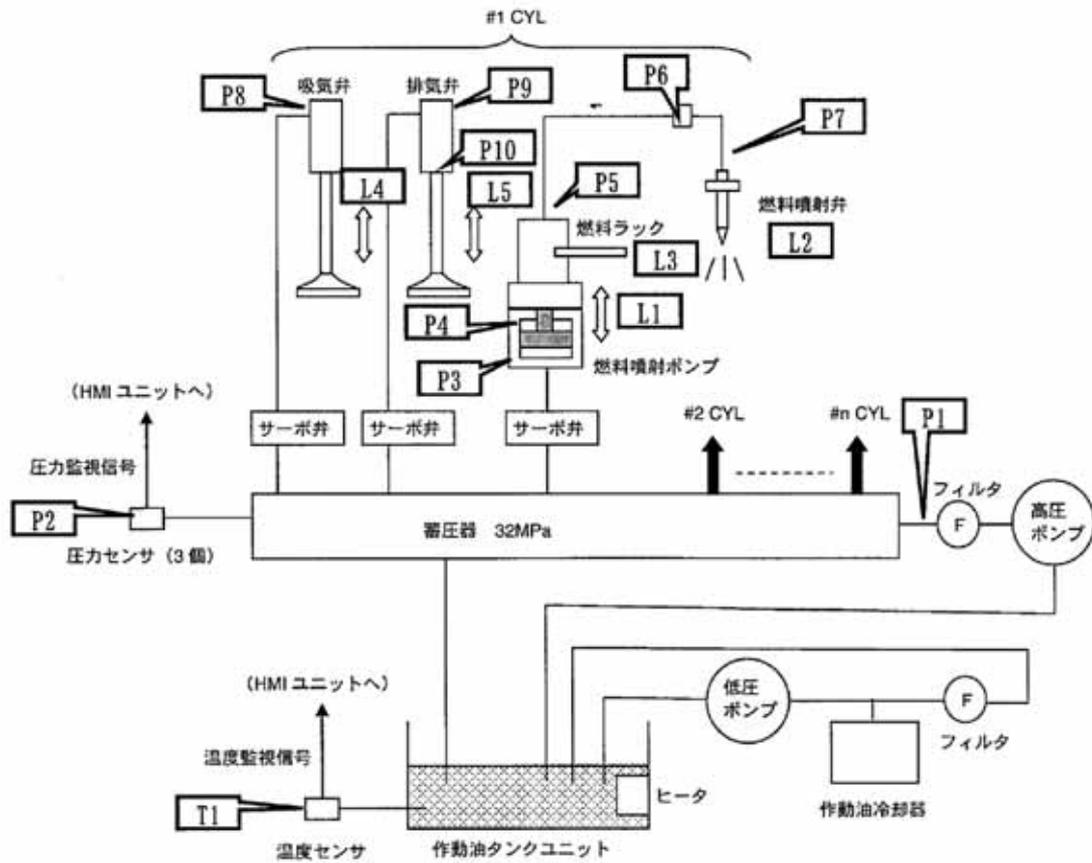
St1	I/E バルブリフト
(")	" スイッチ

信号

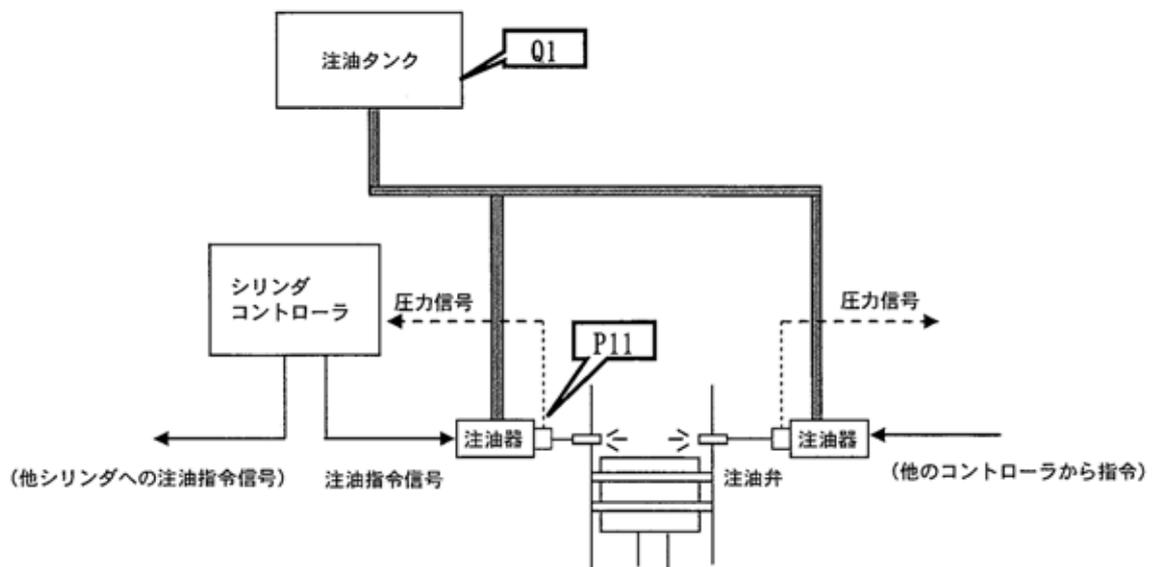
Demand	サーボバルブへの指令信号
Actual	サーボバルブからのフィードバック信号

15.11-2 実機試験の試験計画

- ・油圧系統、燃料噴射系統、吸排気弁系統の計測位置



- ・シリンダ注油系統の計測位置



・計測項目

油圧系統（タンクユニット、蓄圧器）

計測位置		計測機器	計測位置		計測機器
P1	作動油の供給圧力	圧力計	P2	蓄圧器の圧力	圧力センサ
T1	作動油の温度	温度計			

燃料噴射系統

P3	アクチエータ下部圧力	圧力センサ	P4	アクチエータ上部圧力	圧力センサ
P5	燃料ポンプ出口圧力	歪ゲージ	P6	燃料噴射圧力（分配片）	圧力センサ
P7	燃料噴射圧力（弁入口）	歪ゲージ			
L1	燃料ポンプのリフト	リフトセンサ	L2	燃料弁針弁リフト	リフトセンサ
L3	燃料ポンプラック目盛	目盛発信器			
I1	サーボ弁への指令信号				

吸排気弁系統

P8	吸気アクチエータ上部圧力	圧力センサ	P9	排気アクチエータ上部圧力	圧力センサ
P10	排気アクチエータ内部圧力	圧力センサ			
L4	吸気弁のリフト	リフトセンサ	L5	排気弁のリフト	
I2	吸気の指令信号		I3	排気の指令信号	

シリンダ注油系統

P11	注油器出口圧力	圧力センサ			
I4	注油の指令信号				
Q1	シリンダ油の消費量				

機関性能

通常の試験運転と同等の機関記録、および筒内圧力を採取する。

排気ガス濃度

排気ガス濃度（NO_x濃度等）の計測を行う。

15.12 電子制御システムの要素試験

15.12-1 燃料噴射の要素試験

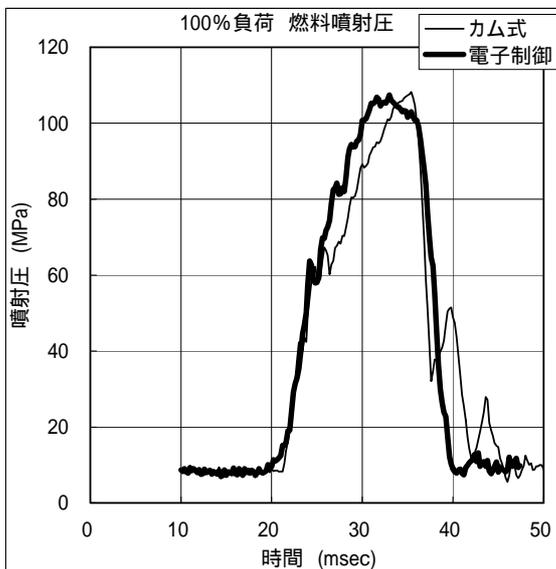
・燃料噴射の要素試験装置



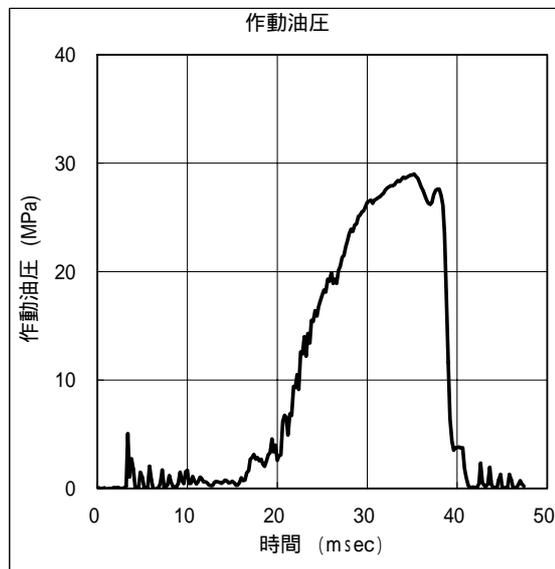
・カム式の再現試験結果

100% 負荷

燃料噴射圧力

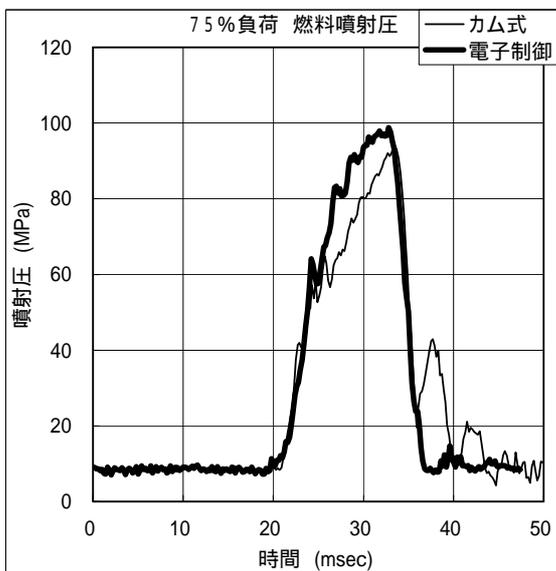


作動油圧力

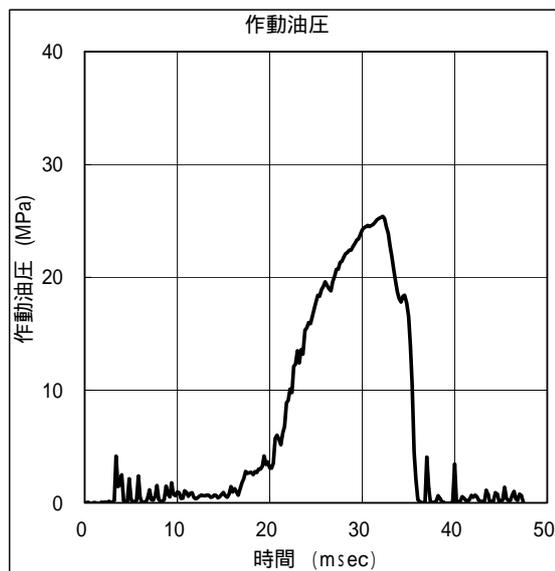


75% 負荷

燃料噴射圧力

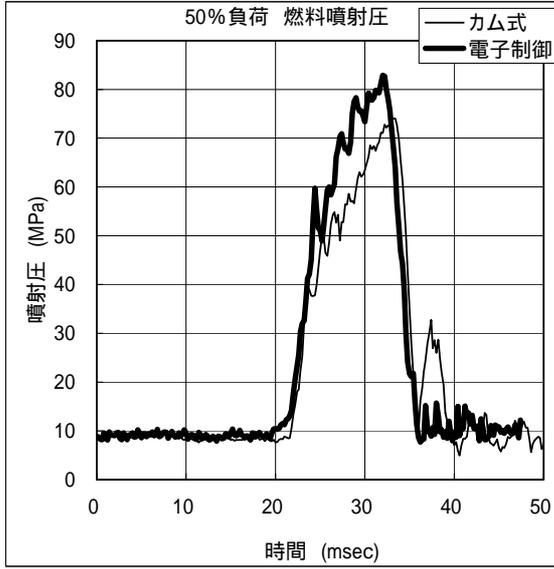


作動油圧力

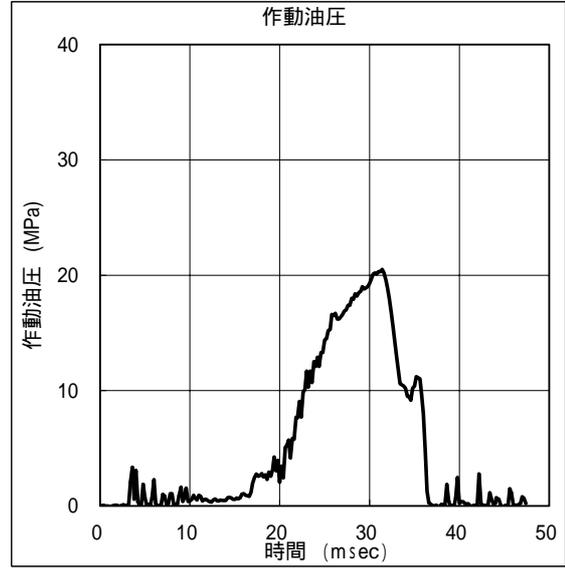


50% 負荷

燃料噴射圧力

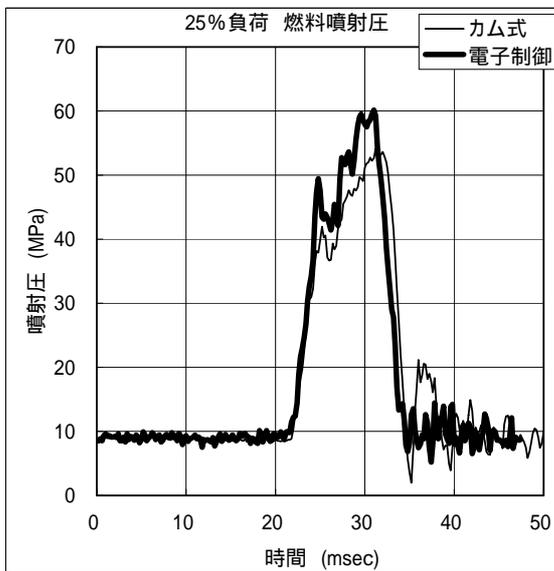


作動油圧力

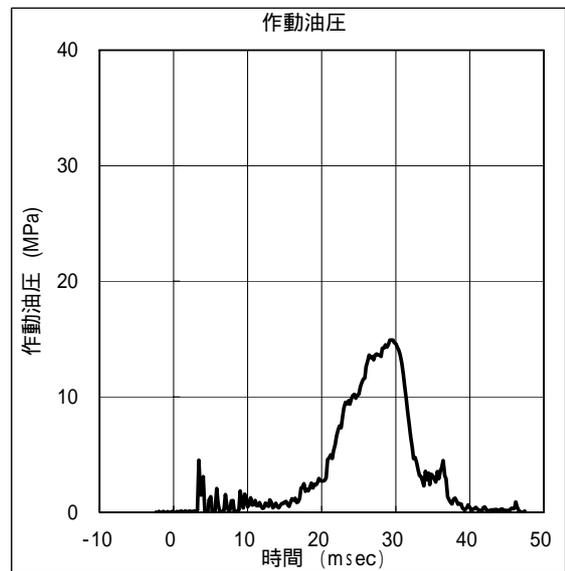


25% 負荷

燃料噴射圧力

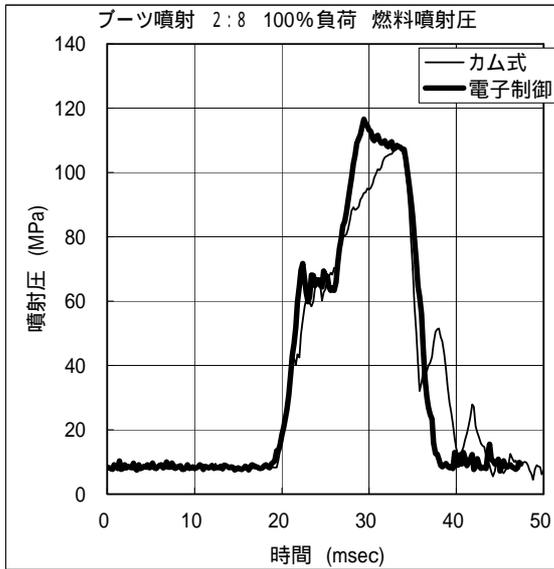


作動油圧力

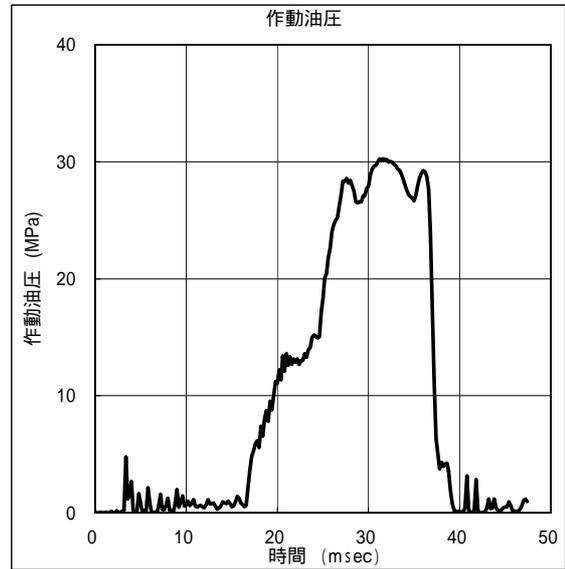


- ・ ブーツ噴射試験結果 噴射割合 2 : 8
100% 負荷

燃料噴射圧力

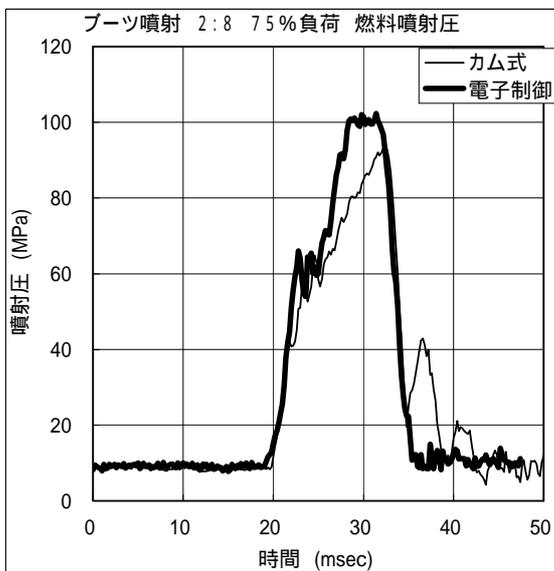


作動油圧力

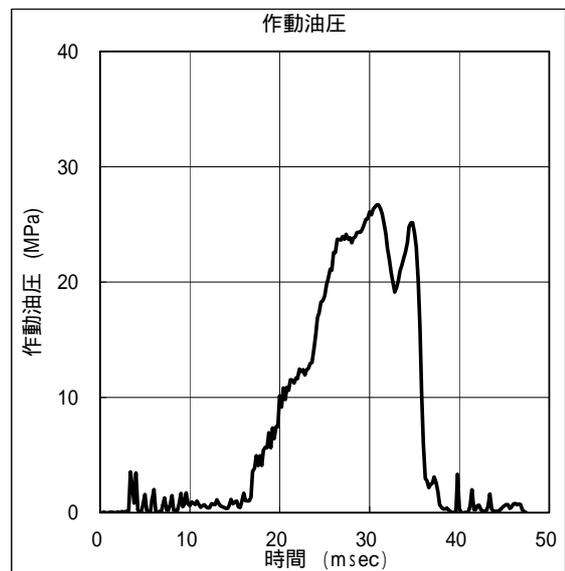


75% 負荷

燃料噴射圧力

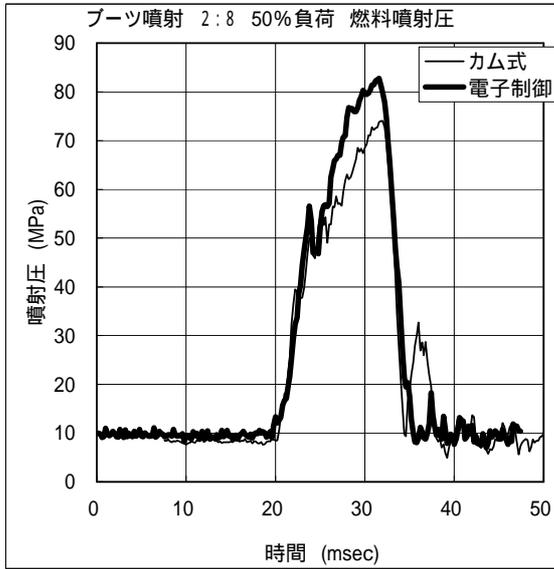


作動油圧力

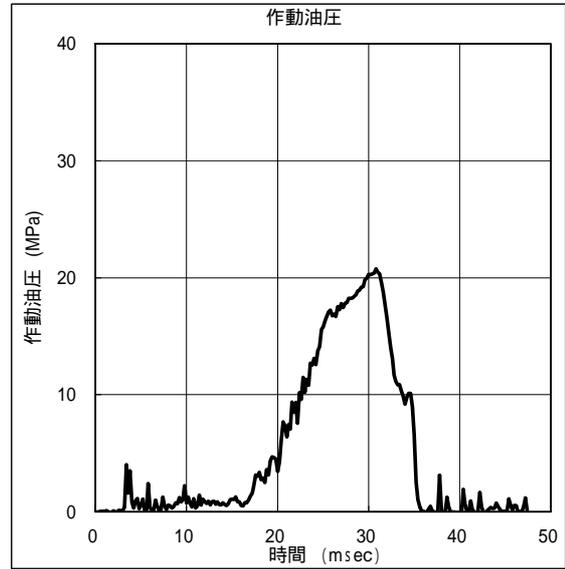


50% 負荷

燃料噴射圧力

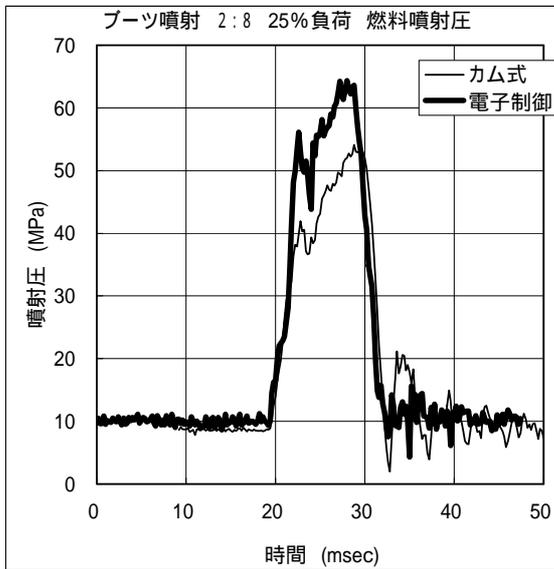


作動油圧力

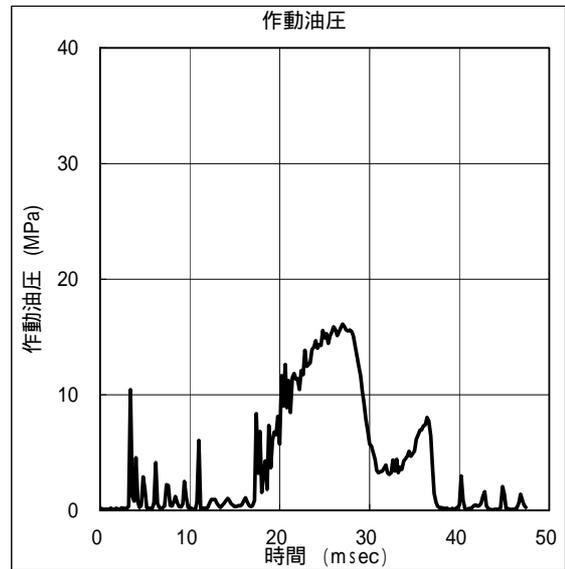


25% 負荷

燃料噴射圧力

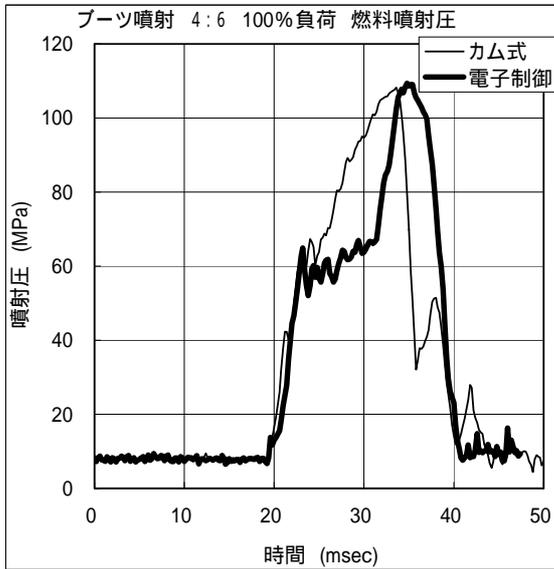


作動油圧力

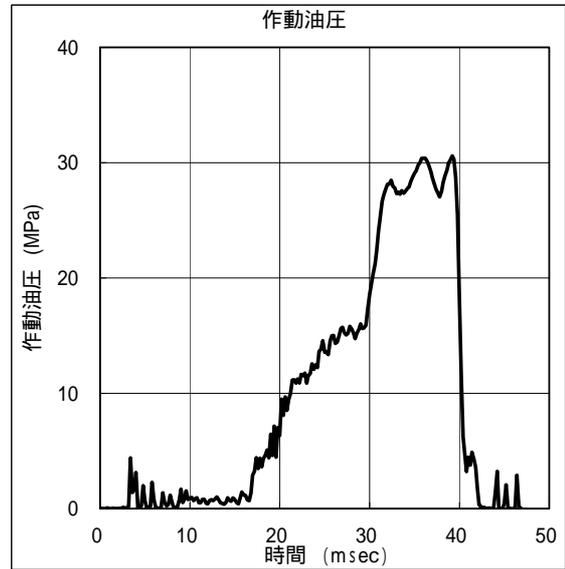


- ・ブーツ噴射試験結果 噴射割合 4 : 6
100% 負荷

燃料噴射圧力

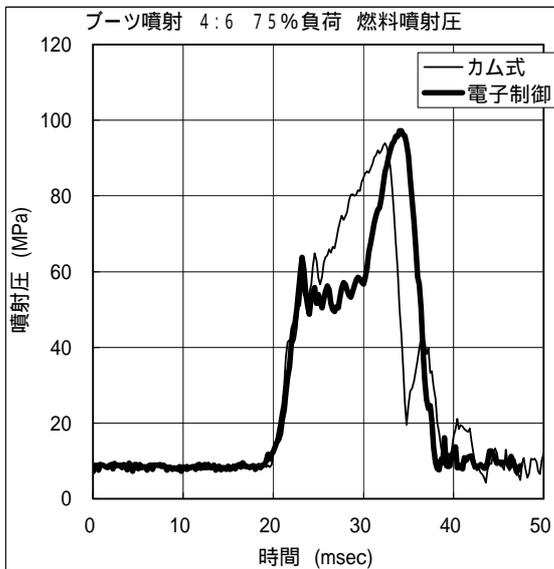


作動油圧力

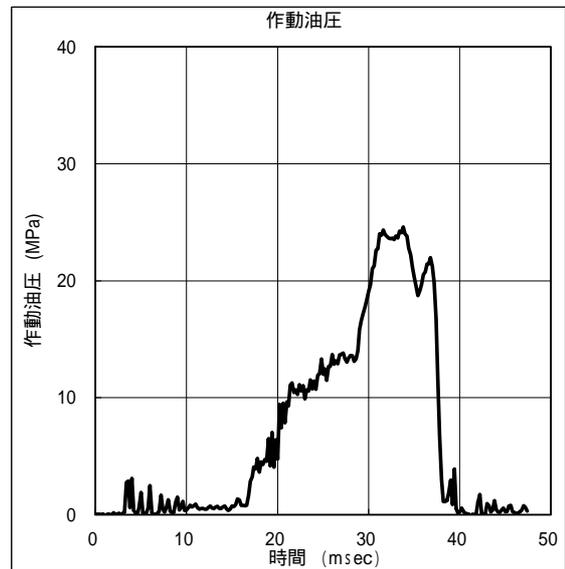


75% 負荷

燃料噴射圧力

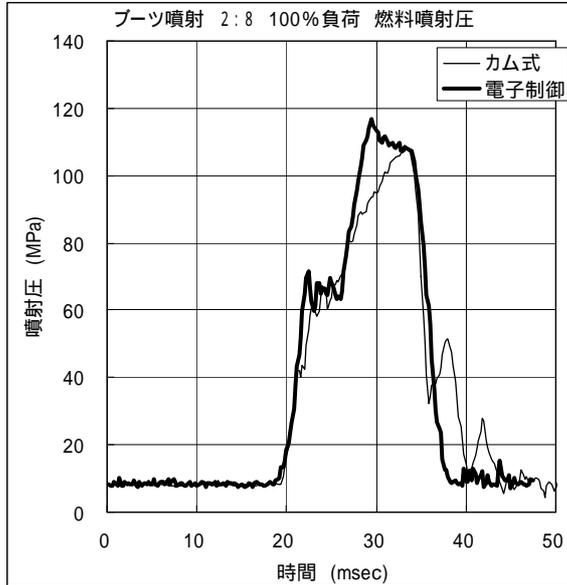


作動油圧力

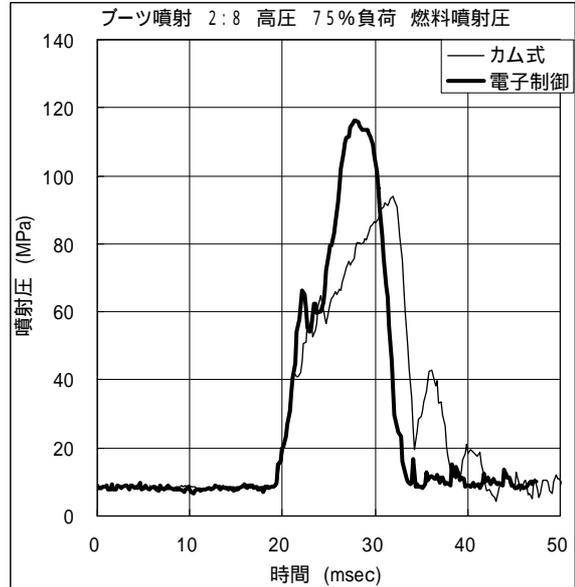


・燃料噴射圧力上昇試験

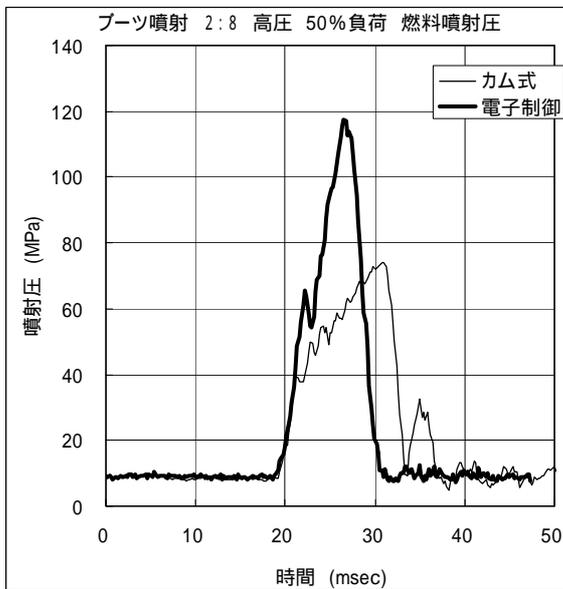
100% 負荷



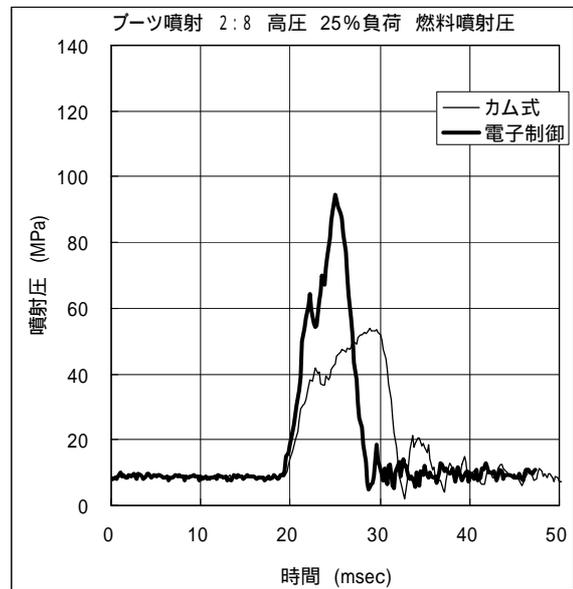
75% 負荷



50% 負荷



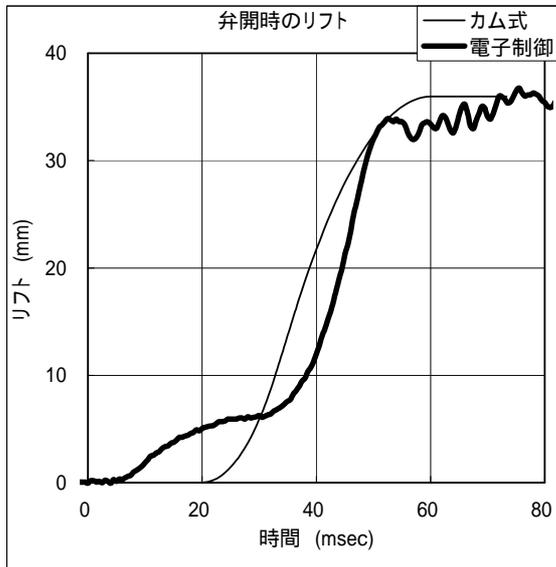
25% 負荷



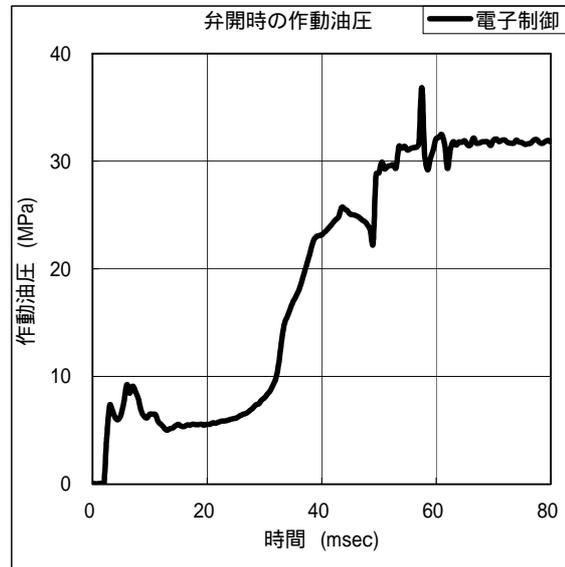
15.12-2 吸排気弁駆動装置の要素試験

・開弁時

吸排気弁のリフト

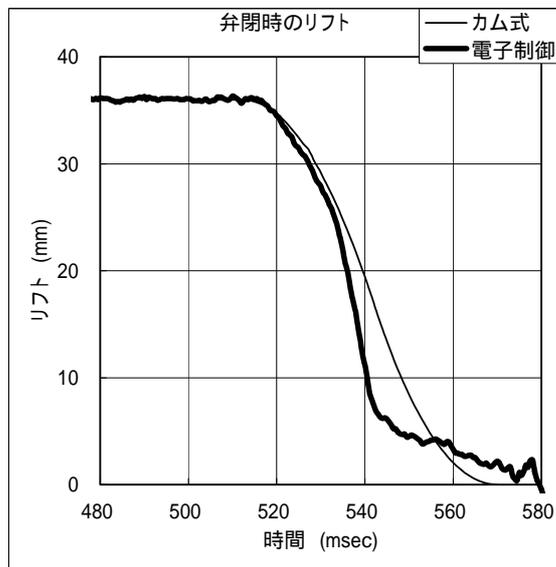


作動油圧

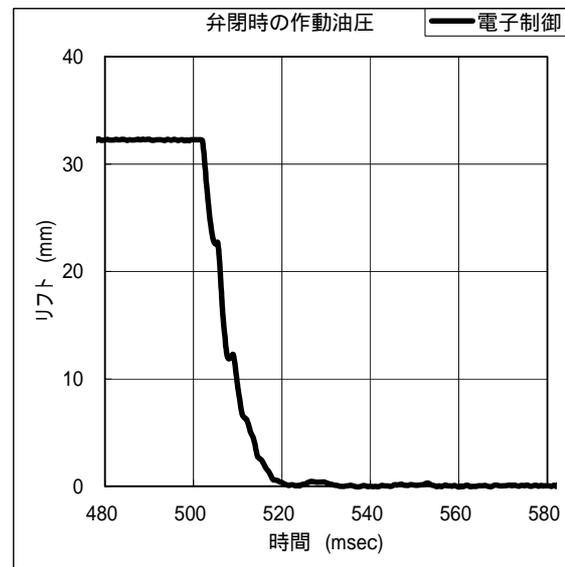


・閉弁時

吸排気弁のリフト



作動油圧

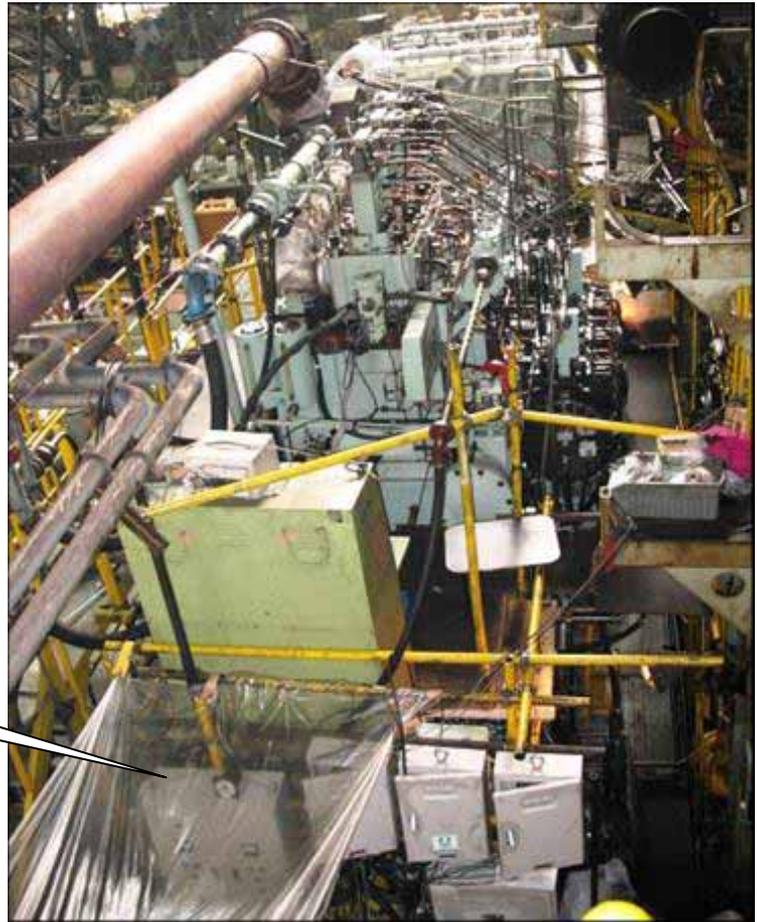


15.13 電子制御システムの組み付け

・ 電子制御機関全景

船首側

制御装置



船尾側



・ 制御装置

シリンダコントロールユニット



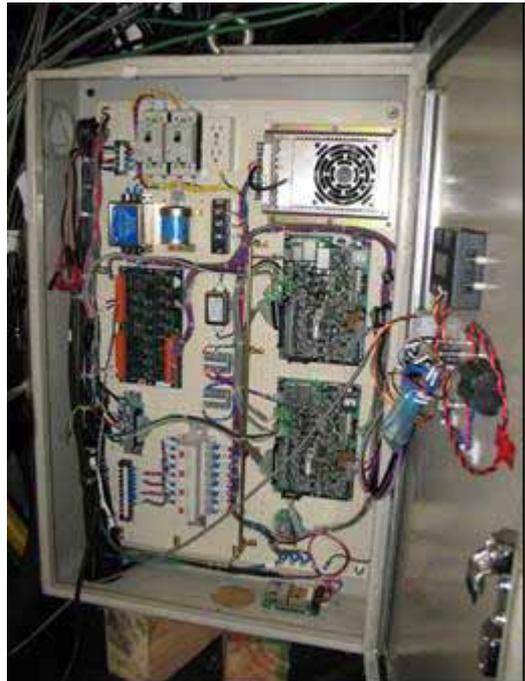
タンクユニットの
起動器、制御盤

HMIユニット

・ シリンダコントロールユニット

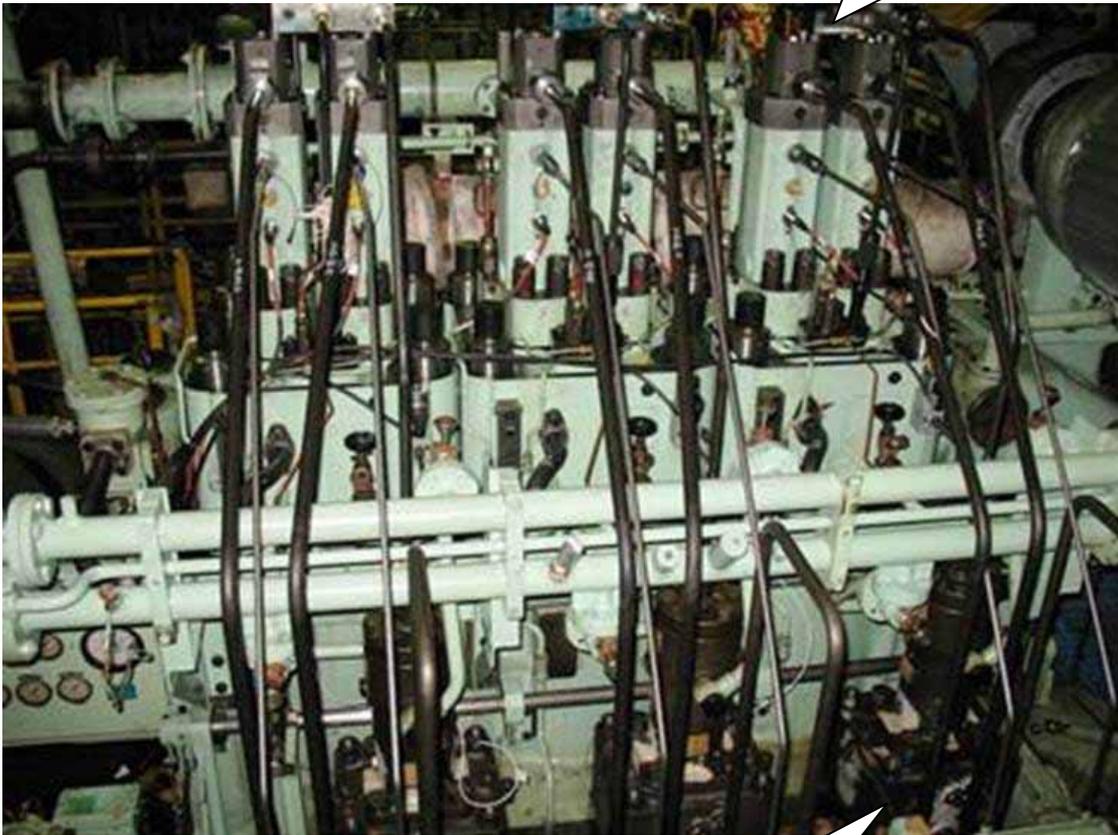


・ HMIユニット



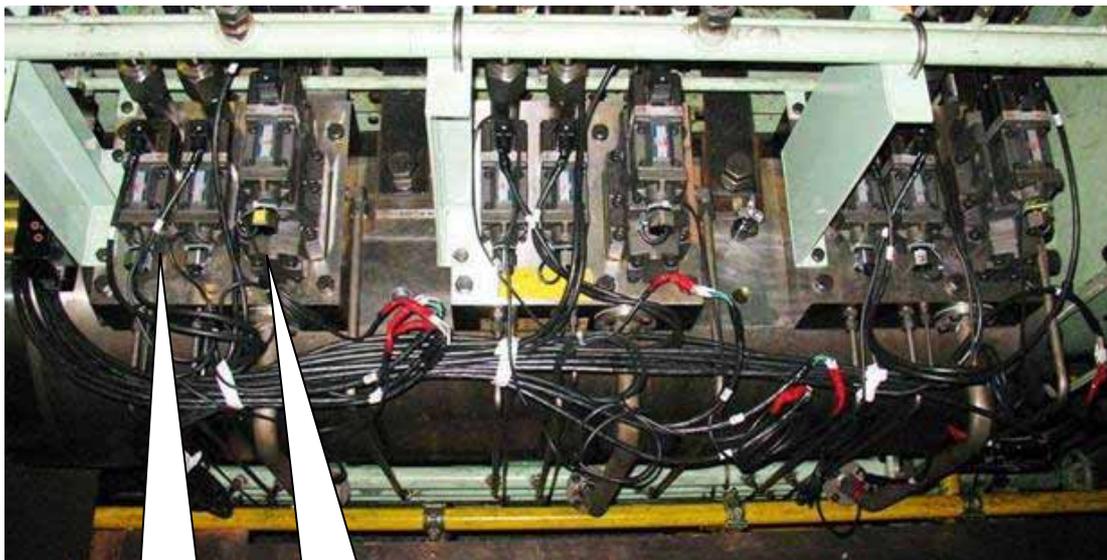
・ 燃料および吸排気弁用アクチュエータ

吸排気弁用



・ サーボ弁

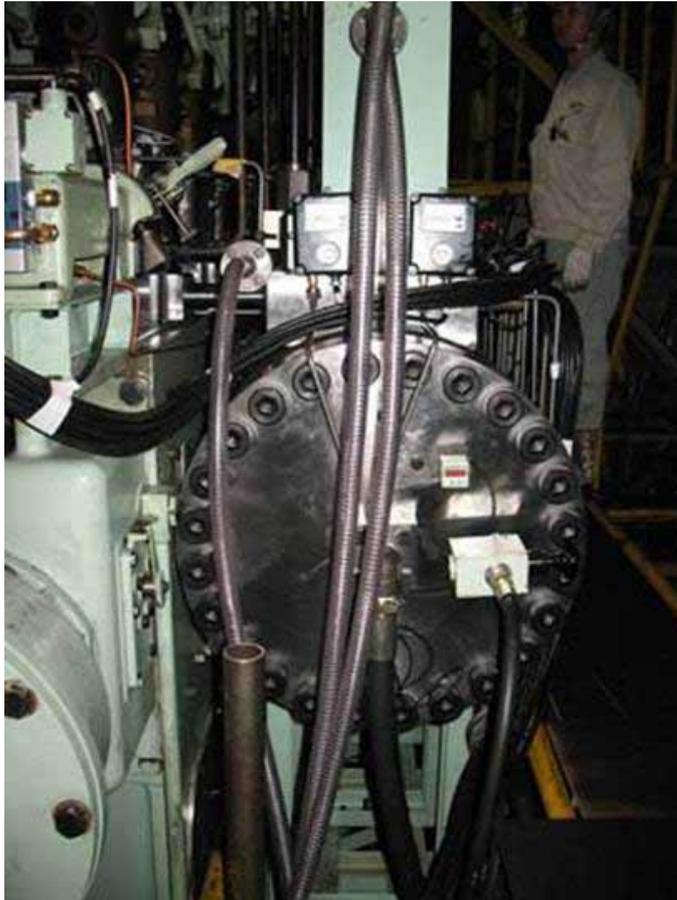
燃料噴射用



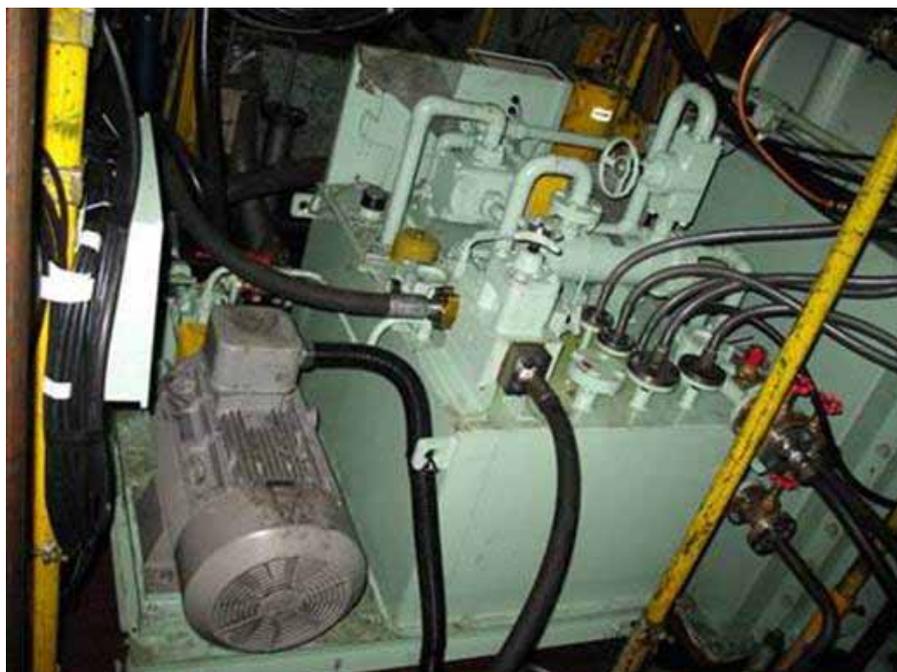
吸排気弁用

燃料噴射用

・蓄圧器



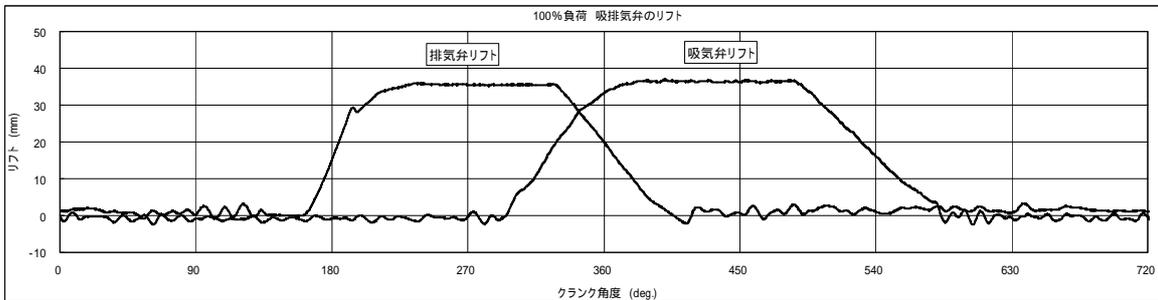
・タンクユニット



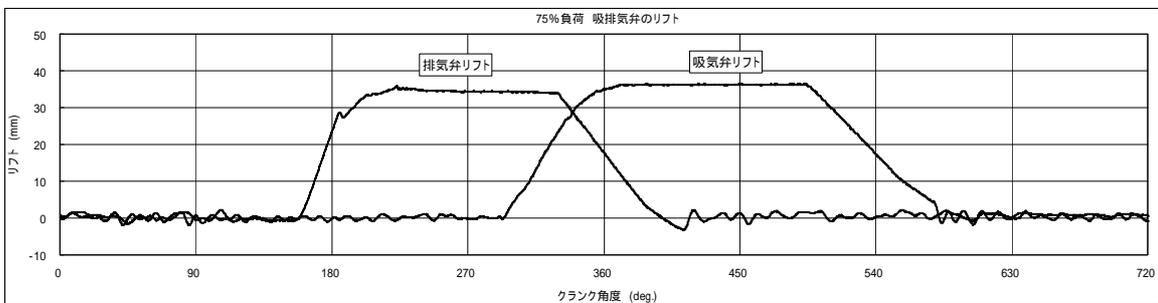
15.14 作動部および油圧部の作動確認

15.14-1 吸排気弁の作動

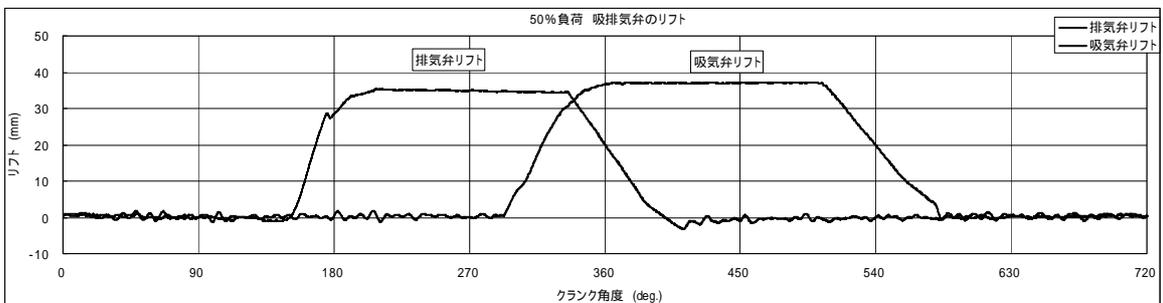
・ 100% 負荷



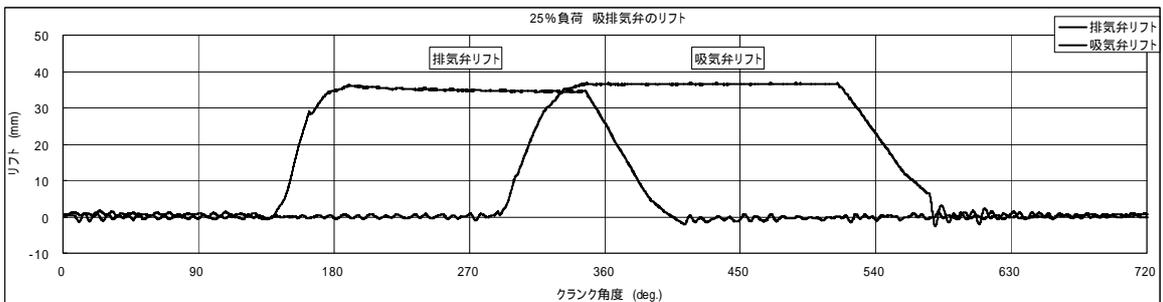
・ 75% 負荷



・ 50% 負荷

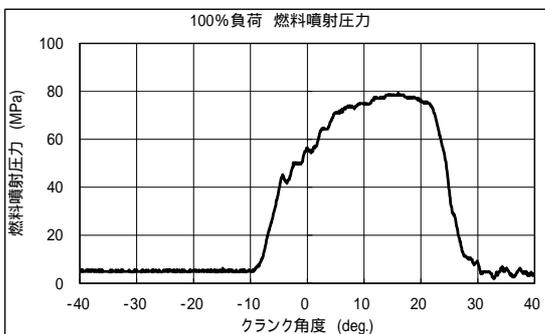
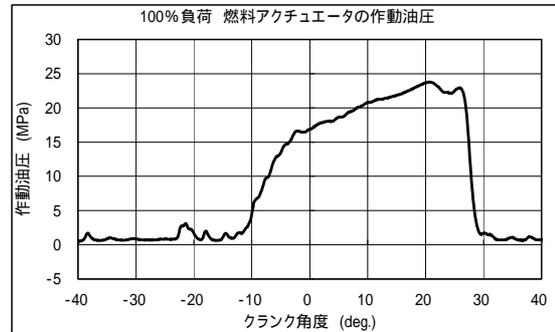
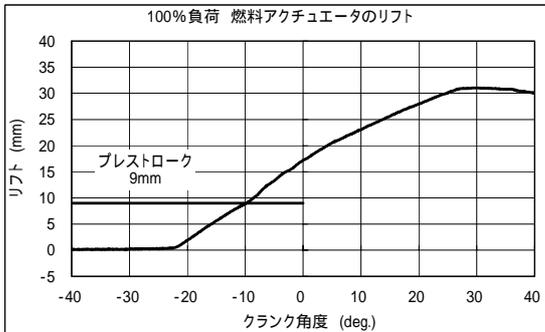


・ 25% 負荷

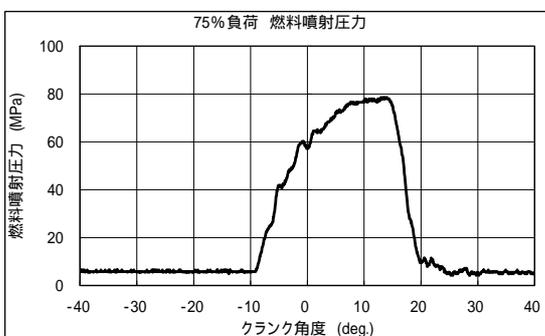
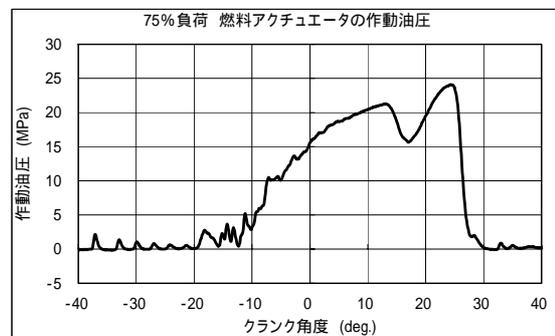
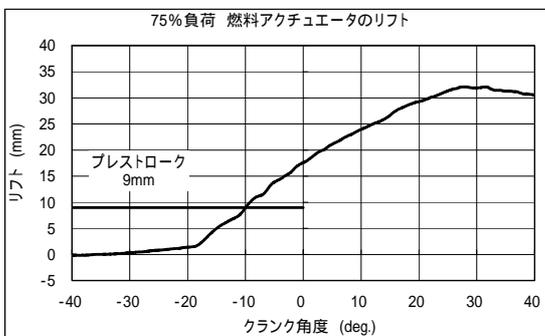


15.14-2 燃料噴射特性

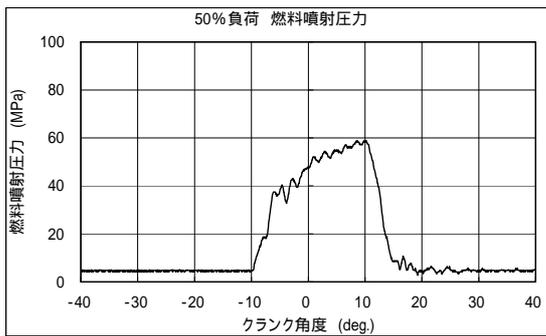
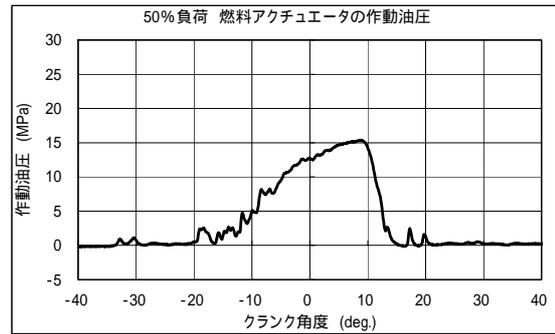
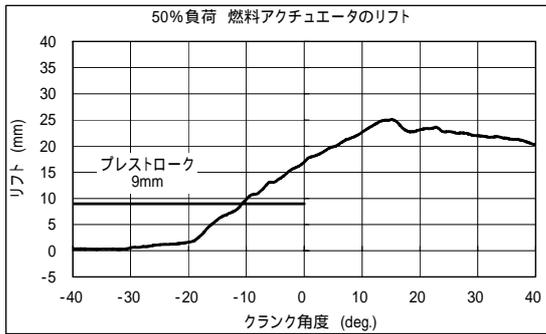
・ 100% 負荷



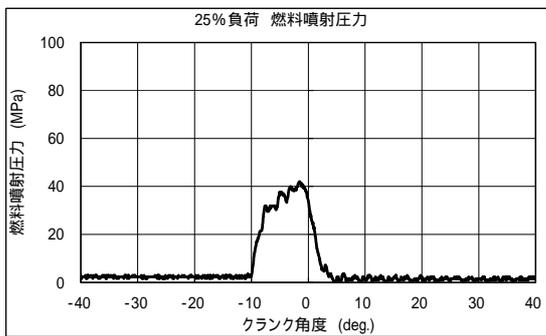
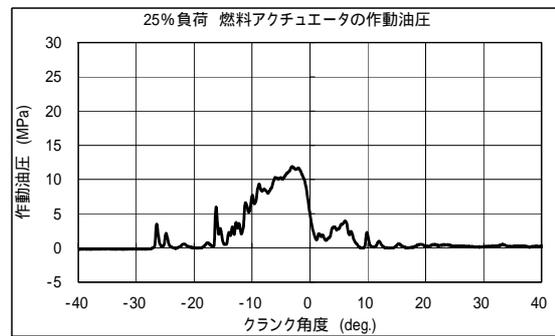
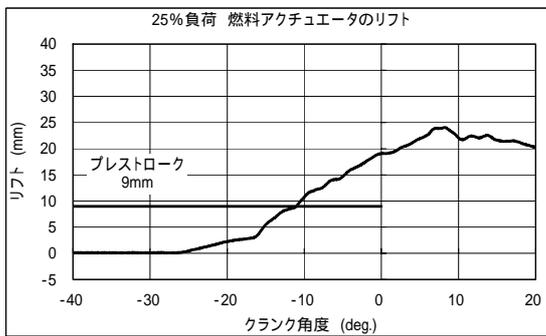
・ 75% 負荷



・ 50% 負荷

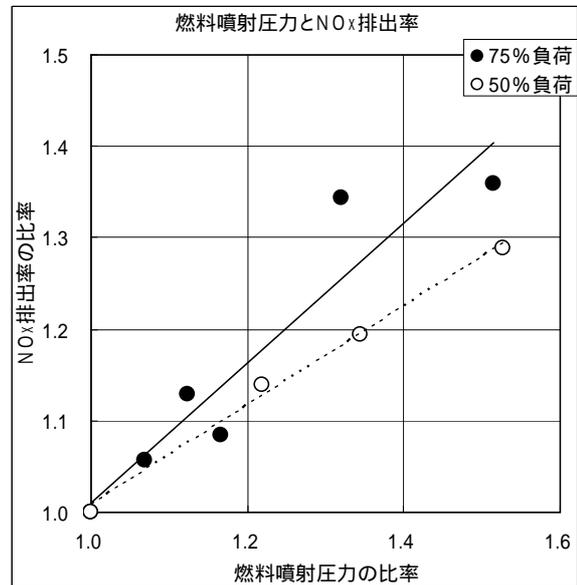
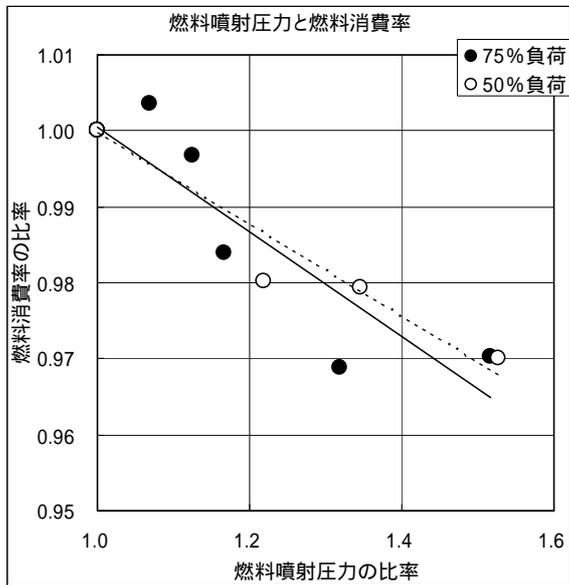


・ 25% 負荷

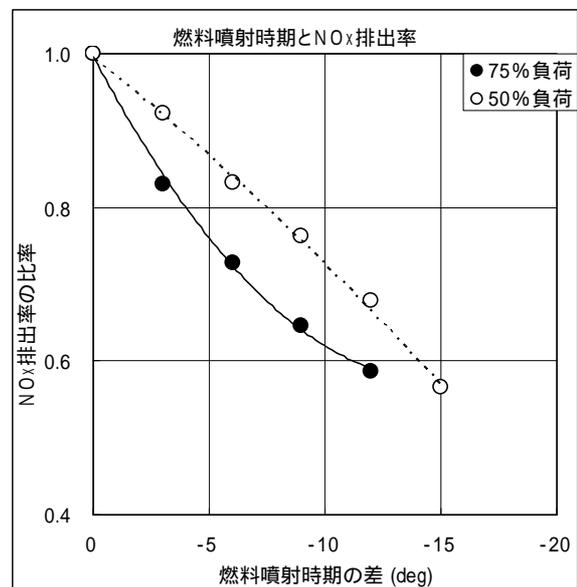
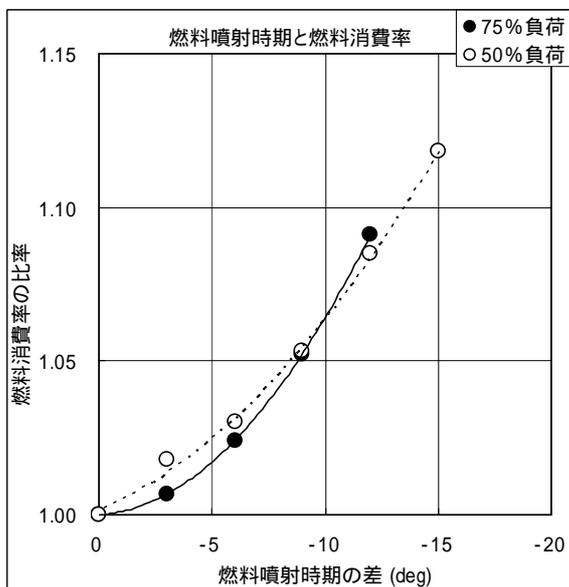


15.15 機関性能確認、性能改善試験

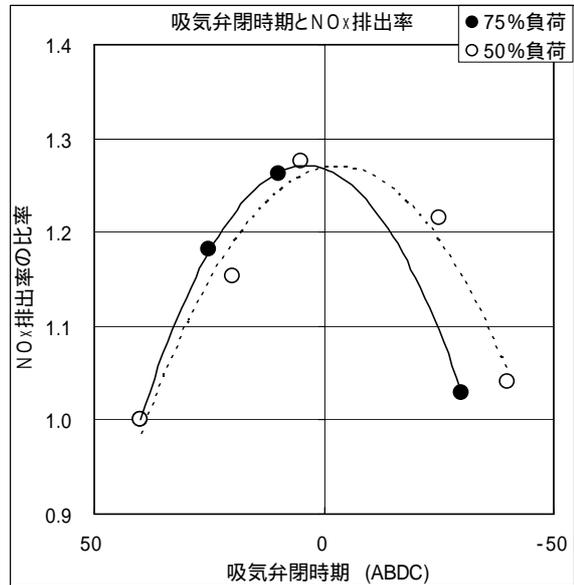
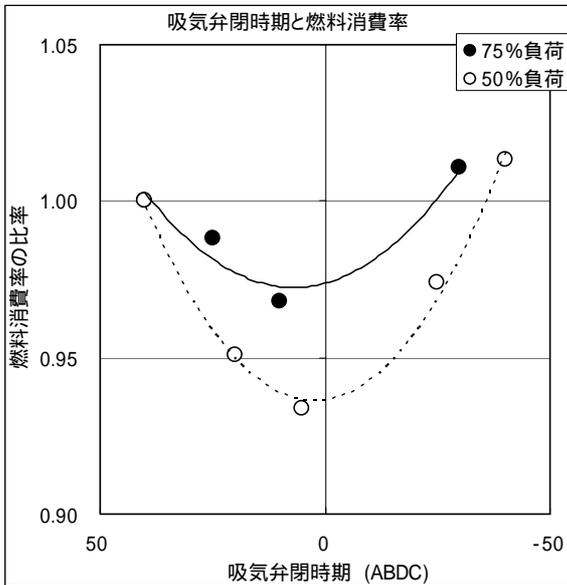
15.15-1 燃料噴射圧力変更試験



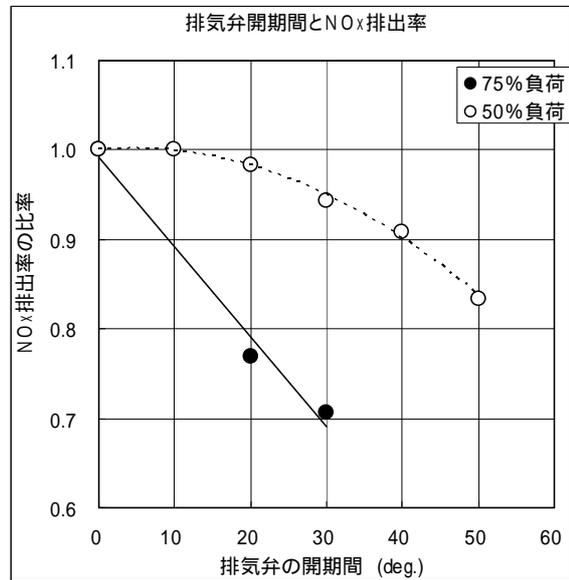
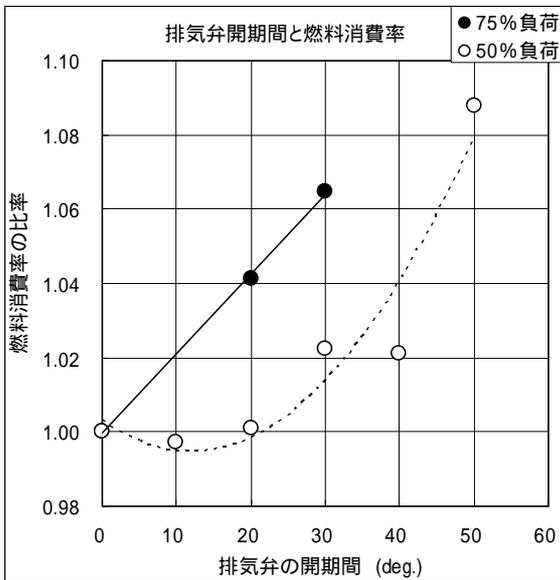
15.15-2 燃料噴射時期遅延試験



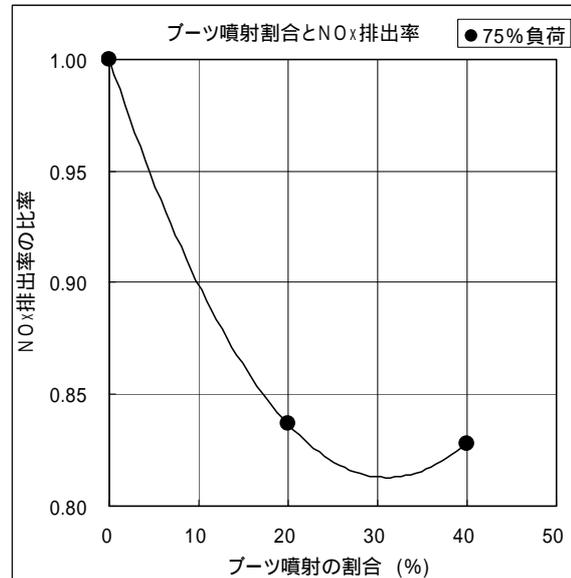
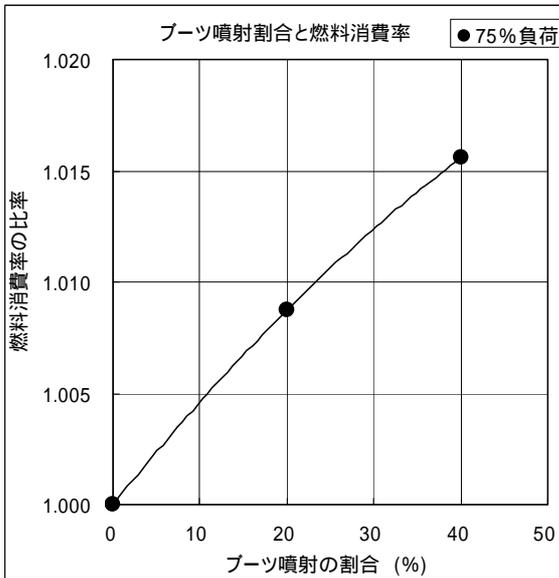
15.15-3 吸気弁閉時期変更試験



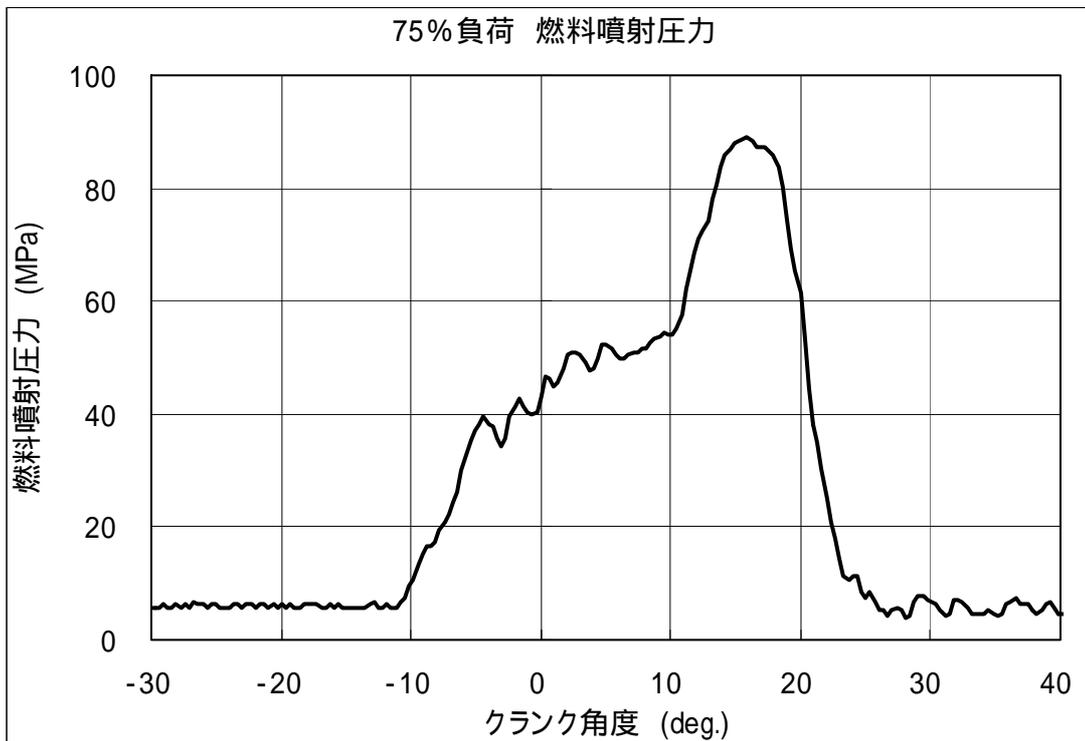
15.15-4 内部EGR試験



15.15-5 ブーツ噴射試験

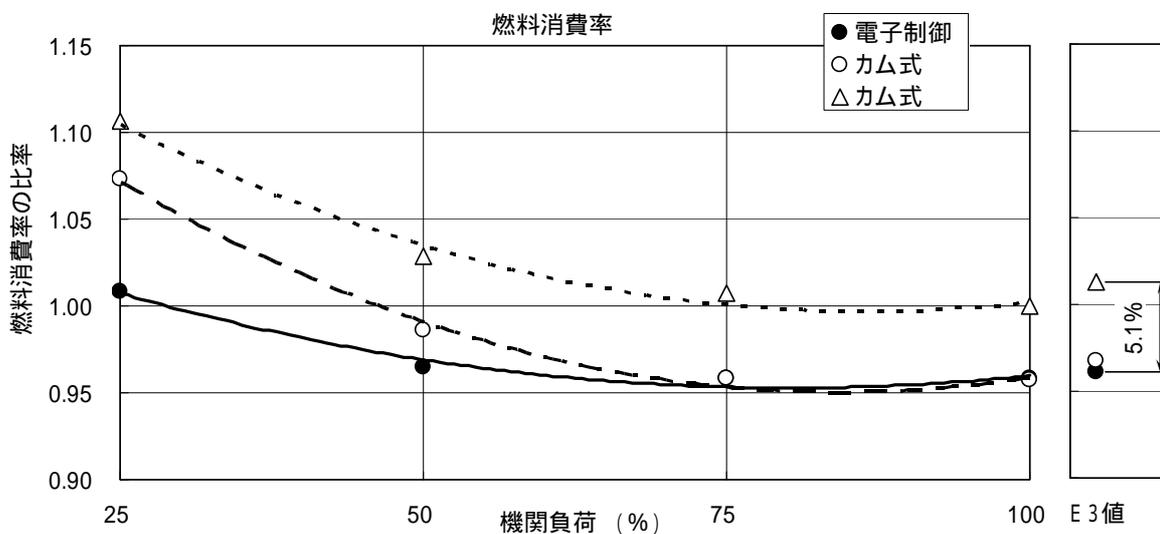


- ・ ブーツ噴射波形 75%負荷、噴射割合 4 : 6



15.15-6 総合機関性能

・燃料消費率



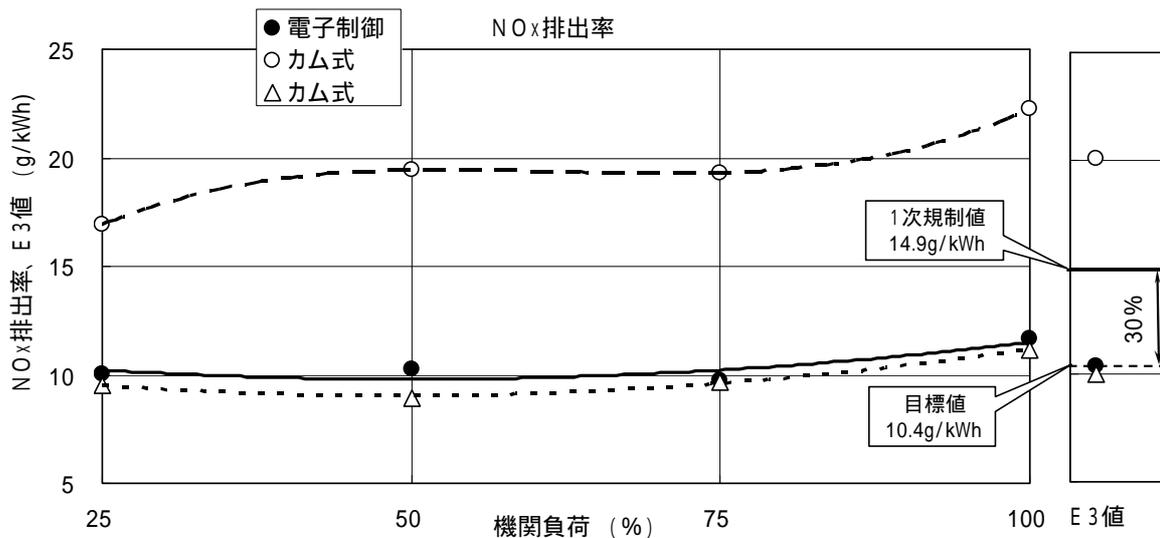
注) 1. 電子制御は総合機関性能の値を示す。

2. カム式 はカム式の 3SLT32 形機関で NO_x 非対応の最適仕様での値を示す。

3. カム式 はカム式の 3SLT32 形機関で、機関内部で NO_x 排出率を 1 次規制値から 30% 低減した仕様での値を示す。

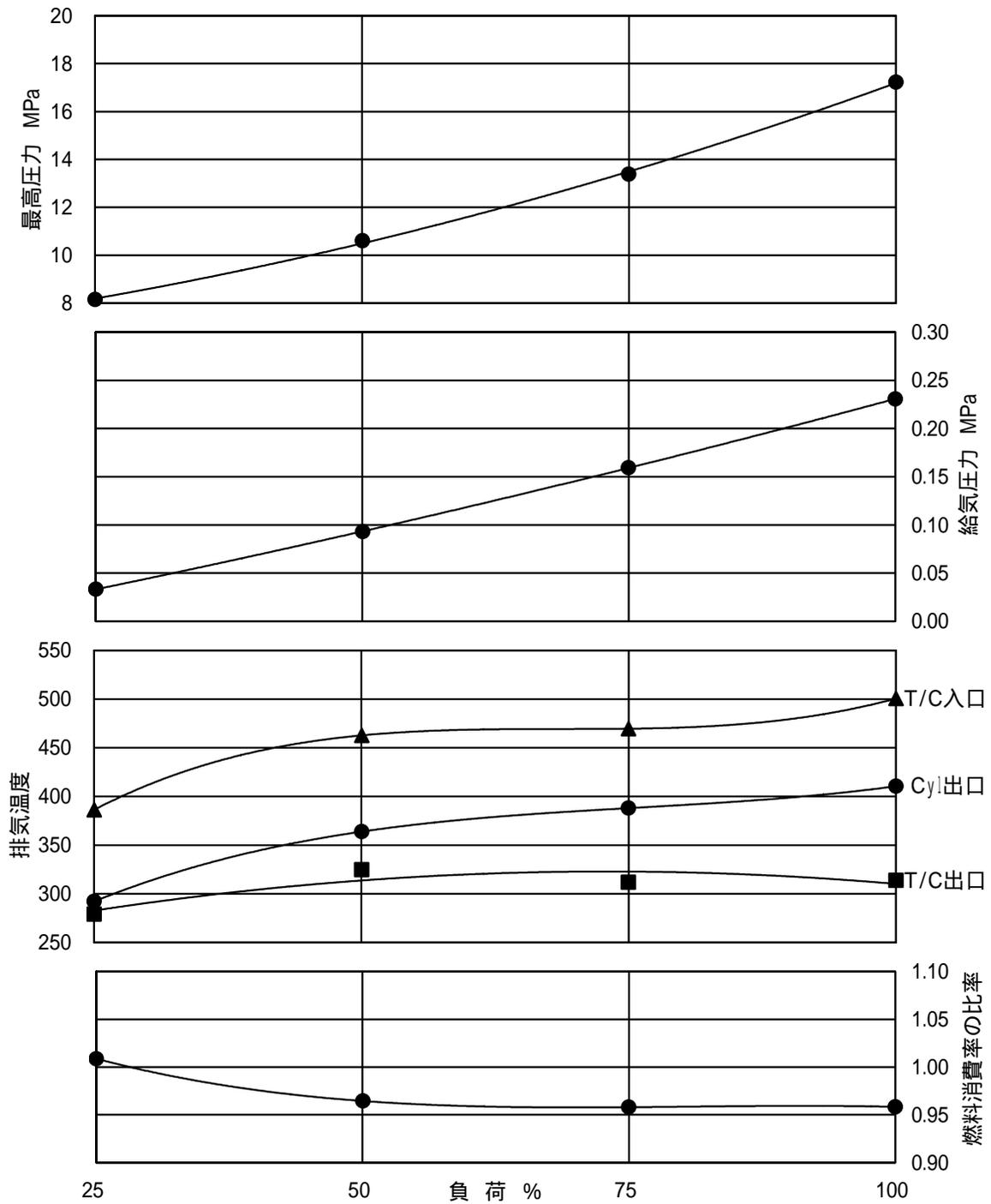
4. 燃料消費率の比率は、カム式 の 100% 負荷を基準とする。

・NO_x 排出率



・ 機関性能曲線

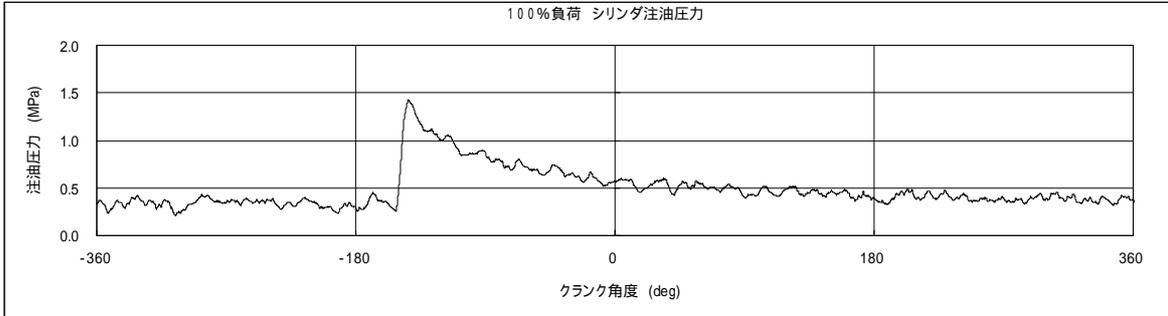
3SLT32 電子制御機関 性能曲線



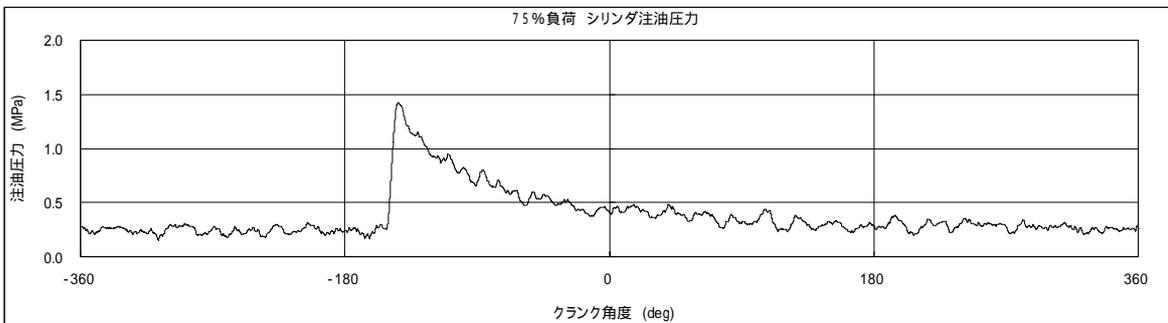
注) 燃料消費率の比率は、機関内部でNO_x、E3値を1次規制値から30%低減した場合の100%負荷の値を基準とする。

15.16 シリンダ注油量低減試験

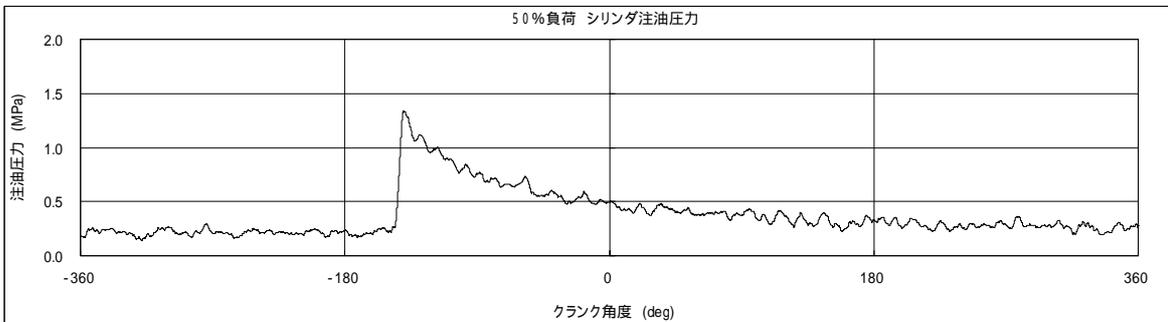
・ 100% 負荷



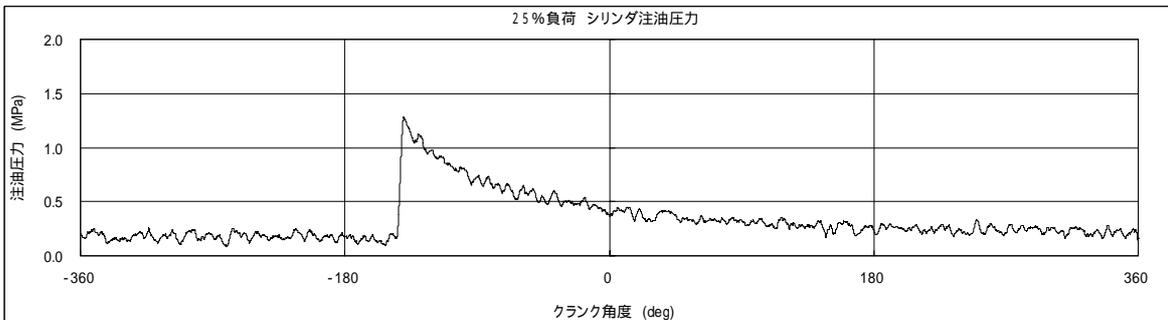
・ 75% 負荷



・ 50% 負荷



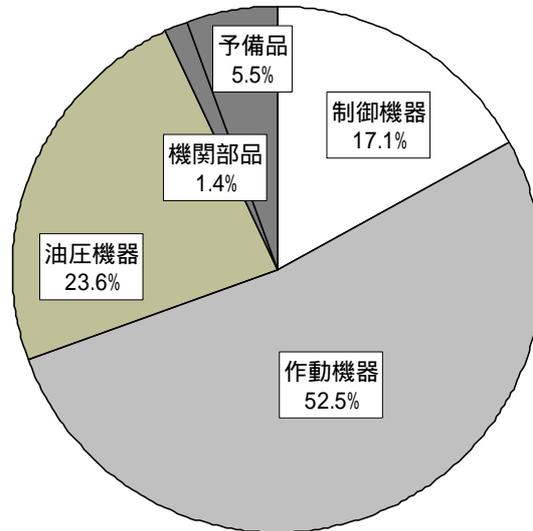
・ 25% 負荷



15.17 電子制御システムのコスト

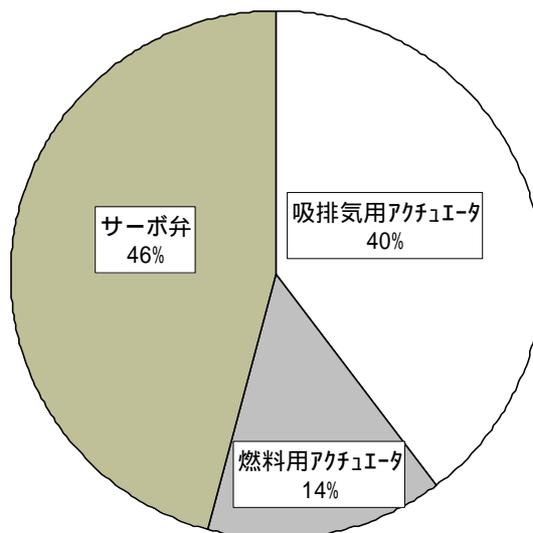
・電子制御システムのコスト分析

電子制御装置のコスト分析



・作動機器のコスト分析

作動機器のコスト分析





「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>