

Supported by  日本 THE NIPPON
財団 FOUNDATION

平成 27 年度
舶用ディーゼル/ガス機関対応の
燃料消費量表示装置の技術開発
成果報告書

平成 28 年 3 月

一般社団法人 日本舶用工業会

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 26 年度、27 年度の 2 年間に一般社団法人日本船用工業会が新潟原動機株式会社に委託して実施した「船用ディーゼル/ガス機関対応の燃料消費量表示装置の技術開発」の成果をとりまとめたものである。

船用ディーゼル機関では、燃料油配管に流量計を取り付けて燃料消費量の算出に使用しているが、流量計を通過した燃料がすべて消費されるわけではなく、一部燃料タンクに戻されるため、燃料消費量の精度が不十分である。また、近年増加してきているガス機関においては、燃料消費量を正確に計測することは極めて困難になっている。そこで、軸馬力計で計測した機関出力や燃焼条件等からディーゼル/ガス機関の高精度な燃料消費量(率)の計測技術を確立することにより、運航中の船舶の燃料消費量(率)や CO2 排出量・エネルギー効率運航指標 (EEOI) などを、リアルタイムにモニタすることが可能になる、燃料消費量表示装置を開発するものである。

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 28 年 3 月
(一社)日本船用工業会

目 次

1. 概要	1
1-1 事業の目的	1
1-2 事業の目標	2
1-2-1 本事業の最終目標	2
1-2-2 平成26年度の目標	2
2. 平成26年度実施事項	3
2-1 高精度計測技術の確立	3
2-1-1 計測機能の設計	3
2-1-2 計測装置の試作	7
2-1-3 計測装置による機能単体試験	11
2-1-3-1 軸馬力計と水動力計の比較評価	11
2-1-3-2 ガス運転時の燃料消費率	12
2-1-3-3 ディーゼル運転時の燃料消費率	13
2-1-4 単体試験の検証	15
2-2 モニタリング機能の開発	16
2-2-1 表示装置の設計	16
2-2-1-1 計測項目と表示項目	16
2-2-1-2 各種演算式	19
2-2-1-3 システム設計	21
2-2-1-4 船陸間通信方式	25
2-2-1-5 機器選定および制作仕様策定	26
2-2-2 表示装置の試作	28
2-2-3 表示装置の単体試験	32
2-3 計測装置・表示装置結合試験	35
3. 平成26年度実施事項まとめ	36
3-1 高精度計測技術の確立	36
3-2 モニタリング機能の開発	36
3-2 計測装置・表示装置結合試験	36

4. 平成27年度実施事項	37
4-1 陸上総合試験	37
4-1-1 システム構成	37
4-1-2 試験内容・方法	37
4-1-3 定常時と過渡時での誤差	38
4-2 総合試験評価	40
4-2-1 計測装置の評価とまとめ	40
4-2-1-1 計測装置の評価	40
4-2-1-2 まとめ	53
4-2-2 表示装置の評価	54
4-2-2-1 各種演算値の評価	54
4-2-2-2 表示装置の連続安定稼働性（可用性）評価	63
4-3 改良設計変更	65
4-3-1 運転方法の可視化	65
4-3-2 運転方法可視化のための追加機能評価	67
5. 平成27年度実施事項まとめ	71
5-1 陸上総合試験	71
5-2 総合試験評価	71
5-3 改良・設計変更	71
5-4 設計変更の反映および評価	71
6. 事業成果	72
6-1 事業目標	72
6-2 事業成果	72
7. 今後の予定	72
7-1 商品化へ向けての検討事項	72
7-2 商品化予定	73
8. 参考文献	73

1. 概要

1-1 事業の目的

船用分野において環境面、経済面の観点から、デュアルフューエル機関*（以下、「ディーゼル/ガス機関」と表記する）の市場規模が今後拡大していくと考える。

船用推進機関として一般的に適用されているディーゼル機関では、燃料油配管に流量計を取付け、燃料油配管の単位時間あたりの流量から燃料消費量(率)を計測する方法が主流である。

しかしこの計測方法では、ディーゼル機関の出力状態とは無関係に単位時間あたりの流量だけで燃料消費量(率)を求めているため、機関出力を加味した燃料消費量(率)事を求めることができない。また、燃料配管の構造上、流量計で計測した燃料消費量には燃焼に使用されずに燃料タンクに戻される燃料も含まれるため、計測精度が不十分という課題がある。

一方、ディーゼル/ガス機関においては、船用推進機関としての実績が少ないため、ガス燃料の燃料消費量(率)の計測技術は十分確立されていない。船用の用途では、貯蔵タンクの液化ガスを加熱気化させる際にガス性状が変動しやすい事、操船方法や海象の状況によって機関負荷が逐次変動する事など、性状の安定した都市ガスを燃料とし、一定負荷で機関運転する陸用の用途に比べて、高精度の燃料消費量(率)を計測する上での課題・問題点も多くある。

そこで、これらの課題・問題点を解決するために、本事業では軸馬力計で計測した機関出力と、燃焼条件などの機関諸元データを用いて、機関出力を加味した高精度の燃料消費量(率)の計測技術を確立する。またディーゼル/ガス機関については、ガス性状分析データを用いてガス成分も加味した高精度のガス燃料消費量(率)の計測技術を確立する。

さらに、船舶の省エネ運航指標となるエネルギー効率運航指標（EEOI）に必要な CO2 排出量を高精度の燃料消費量(率)から算出し、これらのデータを船舶と陸上の両方からリアルタイムにモニタできる燃料消費量表示装置を開発する。

このような高精度のディーゼル/ガス機関の燃料消費量(率)計測技術を確立し、船陸両方から燃料消費量(率)をリアルタイムにモニタできる装置を開発することにより、排出ガスに対する環境配慮と、陸上支援を活用した、よりの確な省エネ運航の両立が可能となる。

*ディーゼル運転及びガス運転の両方可能な機関

1-2 事業の目標

1-2-1 本事業の最終目標

- 1) 燃料消費量(率)の高精度計測技術を確立し、省エネ・EEOIに対応可能な出力機能を有する、ディーゼル/ガス機関対応の燃料消費量表示装置を開発する。
- 2) 燃料消費量(率)のモニタリングは陸上でも可能とし、陸上支援により陸上からの迅速で柔軟な省エネ運航支援ができる。

1-2-2 平成 26 年度の目標

- 1) 燃料油の流量計、ガス流量計、軸馬力計、ガス発熱量計の調査を行い機器の選定を実施する。
- 2) 陸上運転できるガス燃料を使用した機関への上記 1) 機器の設置方法を検討し、設置を行う。
- 3) 陸上でガス燃料を使用した機関を運転し、計測動作の確認と精度の検証を行う。
- 4) モニタリング機能の仕様策定と試作を行う。
- 5) 試作機の単体評価、及び燃料計測との結合評価。

2. 平成26年度実施事項

2-1 高精度計測技術の確立

2-1-1 計測機能の設計

ディーゼル／ガス機関の燃料消費率を計測し、評価するため、次のような計測機器の設計及び採用を行い、手配した。

- 1) 燃料油流量計
- 2) 燃料ガス流量計
- 3) 燃料ガス熱量計
- 4) 大気圧気温湿度変換器
- 5) 軸馬力計

1) 燃料油流量計

ディーゼル／ガス機関においてディーゼル運転時の燃料消費率[g/kWh]を得るには、燃料油流量と機関出力を計測する必要がある。燃料油(液体)流量計には表 2-1-1 に示すように計測対象が容積と質量の2種類の流量計が存在する。

ここで容積流量を測定し、燃料消費率を算出する場合、容積流量[m³/h]に燃料油密度[kg/m³]を乗ずる。燃料油の密度は温度によって変化する。JIS B8003¹⁾によれば、燃料油温度の測定の許容誤差は±5Kであり、図 2-1-1-1 に示すA重油における燃料油温度と密度の関係から、密度に与える影響度としては読み値に対して±0.4%に相当する。このことを考慮すると、仮に渦式流量計を使用した場合、フルスケールに近い流量での精度は±1.4%となり、計測精度が悪化する。さらに燃料油の密度を直接計測するセンサーや計測機器はなく、表 2-1-1 に示すように容積流量よりも質量流量の方が計測精度は良いため、コリオリ式の質量流量計を採用した。

表 2-1-1 流量計の種類と精度(液体)

対象流量	計測原理	計測精度
容積	渦式	フルスケールの±1%
	容積式	読み値の±0.5%
	超音波式	フルスケールの±2%
質量	コリオリ式	読み値の±0.1%

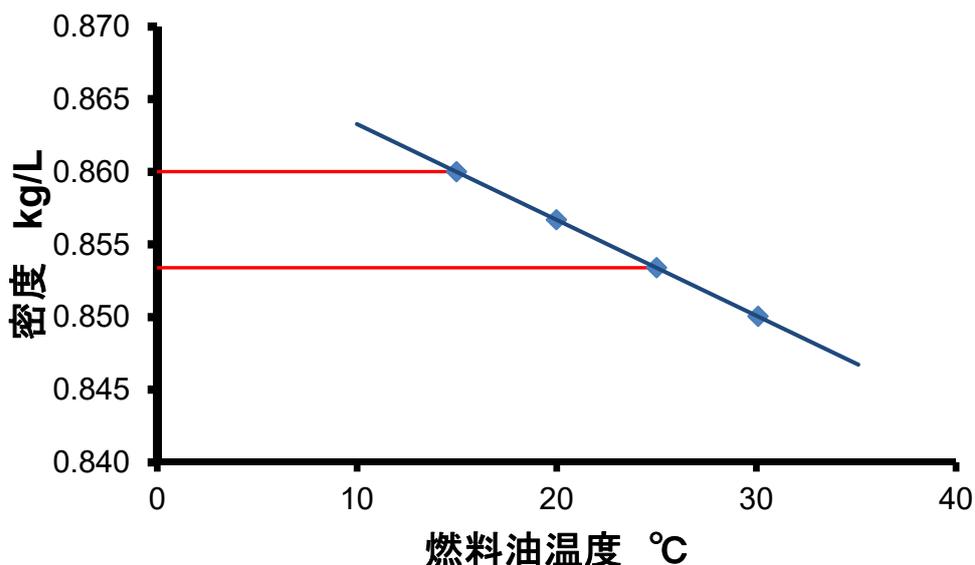


図 2-1-1-1 燃料油温度と密度の関係(A 重油)

2) 燃料ガス流量計

ディーゼル／ガス機関においてガス運転時の燃料消費率[g/kWh]を得るには、ディーゼル運転時と同様に燃料ガス流量と機関出力を計測する必要がある。燃料ガス(気体)流量計は表 2-1-2 に示すように液体流量計と計測原理は同じであるが、計測精度が液体よりも悪くなるのがわかる。

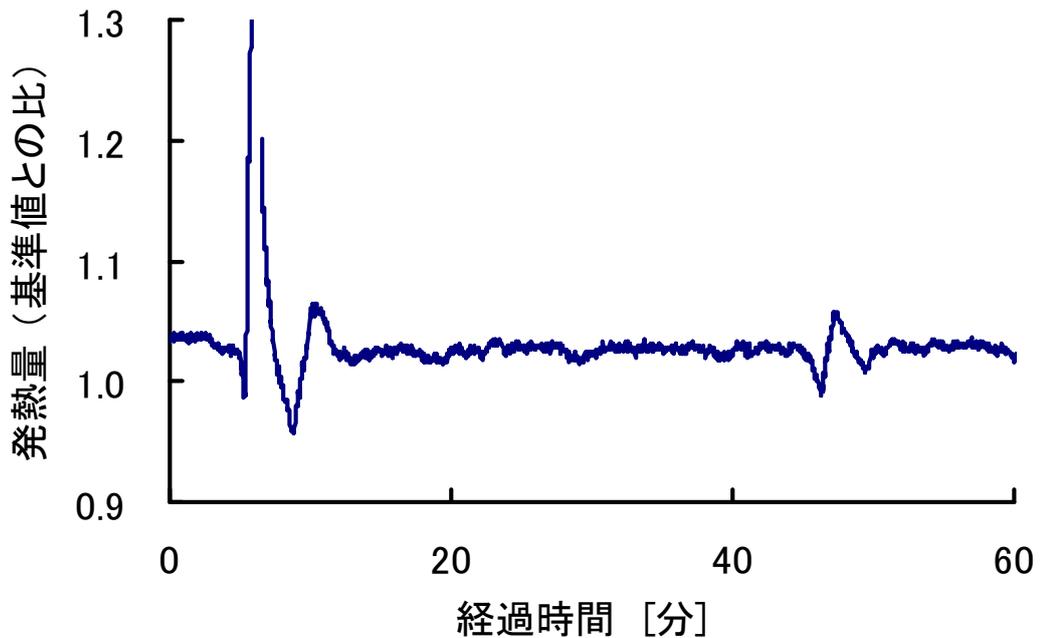
しかし、燃料油流量計と同様に容積流量計よりも質量流量計は計測精度が良いため、燃料ガス流量計においてもコリオリ式の質量流量計を採用した。

表 2-1-2 流量計の種類と精度(気体)

対象流量	計測原理	計測精度
容積	渦式	読み値の±1%
	容積式	読み値の±1%
	超音波式	読み値の±1%+フルスケールの±0.03%
質量	コリオリ式	読み値の±0.5%

3) 燃料ガス熱量計

船舶用ディーゼル／ガス機関における燃料ガスは液化天然ガス(LNG)を使用する。船内に積載したLNGタンクから気化させた燃料ガスを機関に供給する。LNGは都市ガスと異なり、燃料ガスの発熱量は変動する。工場においてLNGを燃料としたガス機関を運転したときのガス発熱量の変化を図 2-1-1-2 に示す。この結果からも明らかのように、ガス運転での燃料消費率を精度良く計測する場合には燃料ガス熱量計が必要であることがわかる。



* 熱量は一般的な都市ガス13Aとの比

図 2-1-1-2 燃料ガスの発熱量変化例

4) 大気圧気温湿度変換器

JIS B8002-1²⁾によれば、燃料油、燃料ガスにかかわらず、試験時の大気条件における機関出力を標準大気条件に換算した ISO 標準出力における燃料消費率で規定されており、ISO 標準出力 (P_r) を次の式にて求める必要があり、試験時の大気条件 (大気圧、相対湿度、気温) を計測する必要がある。

従って、大気条件として、大気圧力、相対湿度、気温を計測するため、大気圧力、気温及び相対湿度が計測可能なセンサーとして、大気圧気温湿度変換器を手配した。

なお、ここで標準大気条件とは、

大気圧力: 100kPa

気温: 298K (25°C)

相対湿度: 30%

給気冷却器冷却水温度: 298K (25°C) である。

$$P_r = \alpha_C \times P_Y \quad (1 \text{ 式})$$

$$\alpha_C = (f_a)^{fm} \quad (2 \text{ 式})$$

$$f_a = \left(\frac{p_r - \phi_r p_{sr}}{p_y - \phi_y p_{sy}} \right)^{0.7} \left(\frac{T_y}{T_r} \right)^{0.7} \quad (3 \text{ 式})$$

$$f_m = 0.036q_c - 1.14 \quad (4 \text{ 式})$$

$$q_c = \frac{q}{r_r} \quad (5 \text{ 式})$$

ここで、

P_r	: 標準大気条件における軸出力 (ISO 標準出力)	[kW]
α_c	: 修正係数	
P_y	: 試験時の大気条件における軸出力	[kW]
f_a	: 大気係数	
f_m	: 機関係数	
p_r	: 標準大気圧力	[kPa]
p_y	: 試験時の大気圧力	[kPa]
ϕ_r	: 標準大気条件における相対湿度	[%]
ϕ_y	: 試験時の大気条件における相対湿度	[%]
p_{sr}	: 標準大気条件における飽和水蒸気分圧	[kPa]
p_{sy}	: 試験時の大気条件における飽和水蒸気分圧	[kPa]
T_r	: 標準大気条件における大気の熱力学的温度	[K]
T_y	: 試験時の大気条件における大気の熱力学的温度	[K]
q_c	: 総行程容積 1L 及び 1 サイクル当たりの燃料消費量 [mg/(cycle·L)]	
q	: 燃焼に使用できる空気 1L 及び 1 サイクル当たりの燃料消費量 [mg/(cycle·L)]	
r_r	: 標準大気条件における給気圧比	[-]

を示す。

5) 軸馬力計

工場における機関運転では水動力計によりトルクを計測可能であるが、実用化(船舶への搭載)を考慮して、機関と水動力計との間の中間軸に軸馬力計を取付け可能な装置を採用した。金属膜の張力変化による振動周波数の変化から微小変位を検出し、軸のせん断ひずみを検出して軸出力を算出する装置を手配した。

それに伴い、中間軸の長さを変更する必要があるため、新たに中間軸を手配した。

JIS B8003¹⁾に示す機関トルク(出力)の精度は±2%であり、本装置の計測精度は±0.5%であるため、品質の良い計測値が得られる。

今回採用した 1) から 5) の計測器は表 2-1-1-3 に示すように JIS B8003¹⁾に示す許容誤差以内に入ることを確認した。

表 2-1-1-3 採用した計測器の精度評価(対 JIS B8003)

計測器	計測対象	JIS B8003 における 許容誤差	採用した計測器 の精度	判定
燃料油流量計	燃料消費量	±3%	読み値の±0.1%	OK
燃料ガス流量計	燃料消費量	±3%	読み値の±0.2%	OK
燃料ガス熱量計	燃料発熱量	—※	読み値の±1.5%	—※
大気圧気温湿度 変換器	大気圧力	±0.5%	読み値の±0.2hPa	OK
	気温	±2K	読み値の±0.2K	OK
	相対湿度	—※	読み値の±1%	—※
軸馬力計	機関トルク	±2%	読み値の±0.5%	OK

※ 燃料発熱量及び相対湿度については JIS B8003 に許容誤差の記述ないため、許容誤差欄及び判定欄は” — ”とした。

2-1-2 計測装置の試作

2-1-1 で設計及び採用した計測器を図 2-1-2-1 に示すように配置した。

計測装置による機能単体試験を行う上で時間変化の影響をなくすため、各計測器からの信号を同時に計測できるようにした。

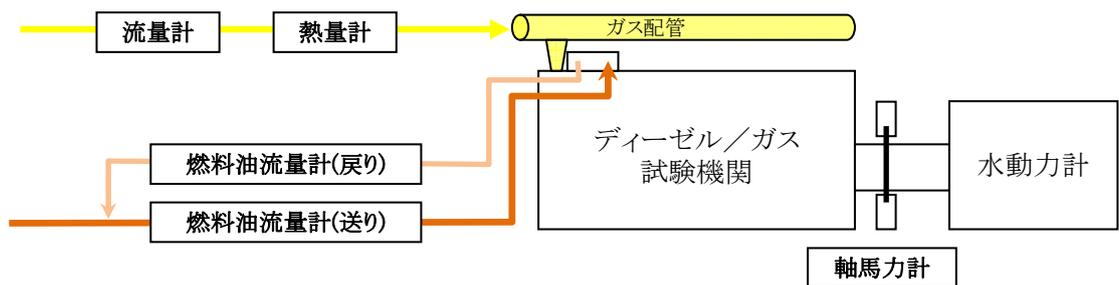


図 2-1-2-1 計測器の配置

1) 燃料油流量計

燃料油フィルタ近くでかつ機関から離れた位置に、図 2-1-2-2 に示す燃料油流量計及び図 2-1-2-3 に示す燃料油流量表示装置を配置した。



図 2-1-2-2 燃料油流量計(センサー部)



図 2-1-2-3 燃料油流量計(表示部)

2) 燃料ガス流量計

ディーゼル／ガス機関のガス供給システムの一部として、図 2-1-2-4 に示すコリオリ式質量流量計を配置した。



図 2-1-2-4 燃料ガス流量計

3) 燃料ガス熱量計

燃料ガス流量計を配置した場所の近くに燃料ガスの発熱量を計測するため、図 2-1-2-5 に示す燃料ガス熱量計を配置した。



図 2-1-2-5 燃料ガス熱量計

4) 大気圧気温湿度変換器

標準大気条件における機関出力に換算するため、大気状態を計測する必要がある。そのために大気状態として、大気圧力、気温、相対湿度の3項目が計測可能な大気圧気温湿度変換器を使用した。(図 2-1-2-6)



図 2-1-2-6 大気圧気温湿度変換器

5) 軸馬力計

ディーゼル／ガス試験機関と水動力計との間に軸馬力計を取付けるため、中間軸は図 2-1-2-7 に示すように約 300mm 伸ばした中間軸を設置し、軸馬力計（図 2-1-2-8）のセンサー発信部を図 2-1-2-9 のように取付けた。

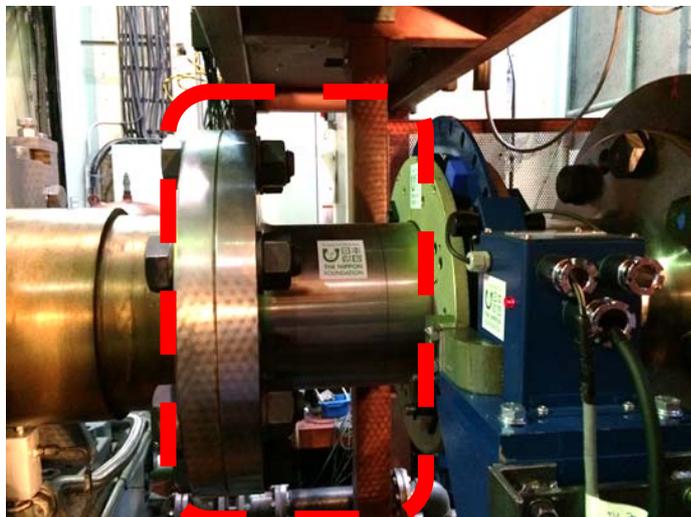


図 2-1-2-7 中間軸(赤色破線部)



図 2-1-2-8 軸馬力計



図 2-1-2-9 軸馬力計取付け

2-1-3 計測装置による機能単体試験

2-1-3-1 軸馬力計と水動力計の比較評価

ディーゼル／ガス試験機関において、試験機関と水動力計の間の中間軸に取付けた軸馬力計と水動力計で計測された機関トルクを図 2-1-3-1 に示す。

図中の赤線は水動力計と軸馬力計の機関トルクが等しいことを示す。計測された点(◆)は赤線よりも小さくなっていることがわかる。このことから、軸馬力計で計測された機関トルクは、水動力計で計測されたものよりも 4%程度低くなる。

なお、水動力計の機関トルクを校正器にて確認した結果を図 2-1-3-2 に示す。この図より、水動力計の機関トルクは精度に問題ないことがわかる。

これらの結果より、実際の船舶に軸馬力計を搭載する場合、機関製造工場において、校正された水動力計を用いて、機関と共に調整運転を行い、軸馬力計を調整する必要があることがわかった。

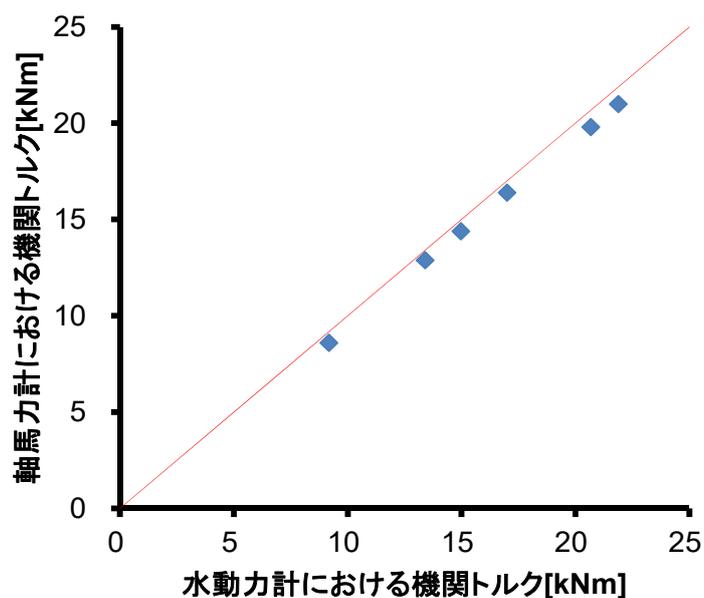


図 2-1-3-1 軸馬力計と水動力計における機関トルク比較

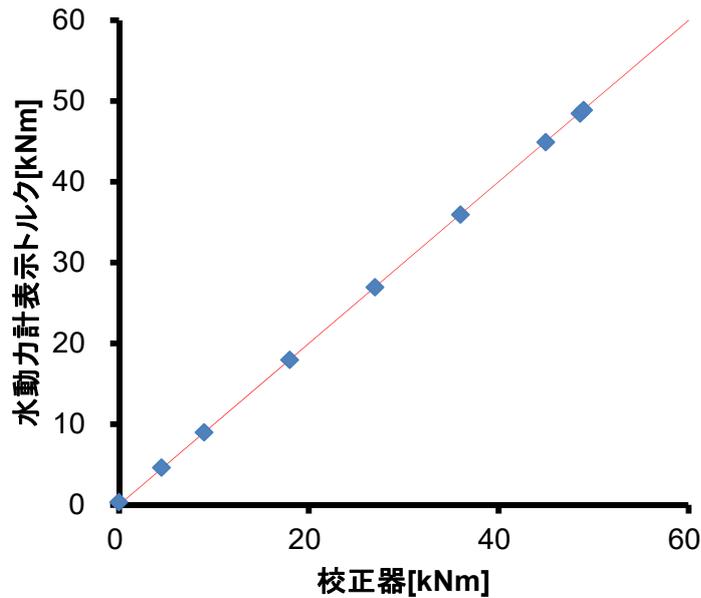


図 2-1-3-2 水動力計における校正結果

2-1-3-2 ガス運転時の燃料消費率

ディーゼル／ガス試験機関においてガス運転を行い、定常運転において燃料ガス熱量計の有無が燃料消費率に与える影響について試験を行った。そのため、機関運転条件及び設定を変えずに計測日を変え、試験を実施し比較を行った。

図 2-1-3-3 に燃料ガス熱量計の有無による燃料消費率の誤差を示す。各負荷率に相当する機関出力を X 軸に取り、燃料ガス熱量計の有無による燃料消費率の誤差を Y 軸に示す。

なお、燃料ガス熱量計の有無による燃料消費率の誤差は次のように算出した。

$$\text{燃料消費率の誤差} = \frac{\text{ガス熱量固定における燃料消費率} - \text{ガス熱量計による燃料消費率}}{\text{ガス熱量計による燃料消費率}}$$

図 2-1-3-3 より、計測日の違い、すなわち、大気条件の違いによって燃料消費率の誤差に変化が現れ、大気条件 A においてはガス熱量を固定した場合とガス熱量計により計測した発熱量を用いた場合においてほとんど誤差が生じていないが、大気条件 B においては定格出力及び負荷率 50%において誤差が大きくなることわかる。

原因究明のため、大気条件 A 及び B において計測されたガス発熱量の変化について調査した。その結果を図 2-1-3-4 に示す。

図 2-1-3-4 より、大気条件 B においてガス発熱量が時間経過と共に大きく変化していることわかる。この結果から、ガス発熱量の固定値と、計測されたガス発熱量に大きな差が生じたものである。

従って、ガス運転時における燃料消費率を精度良く計測するためには、燃料ガス熱量計が必須であることがわかった。

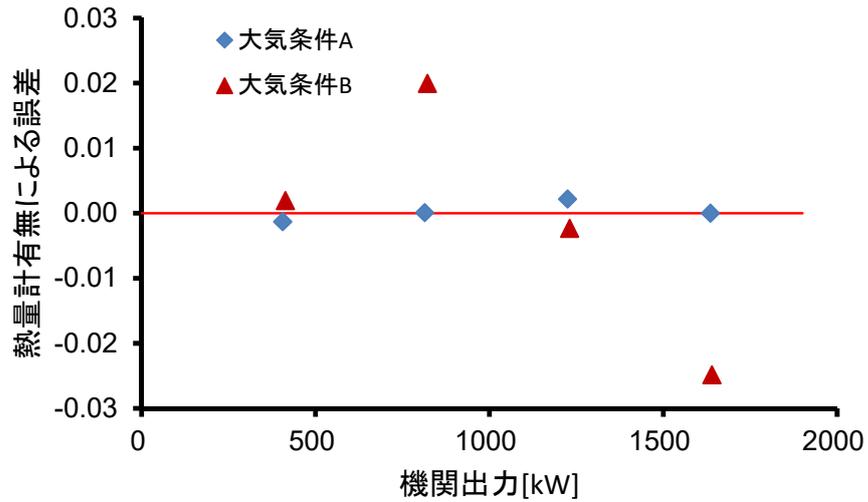


図 2-1-3-3 ガス運転における燃料消費率の熱量計有無による誤差比較

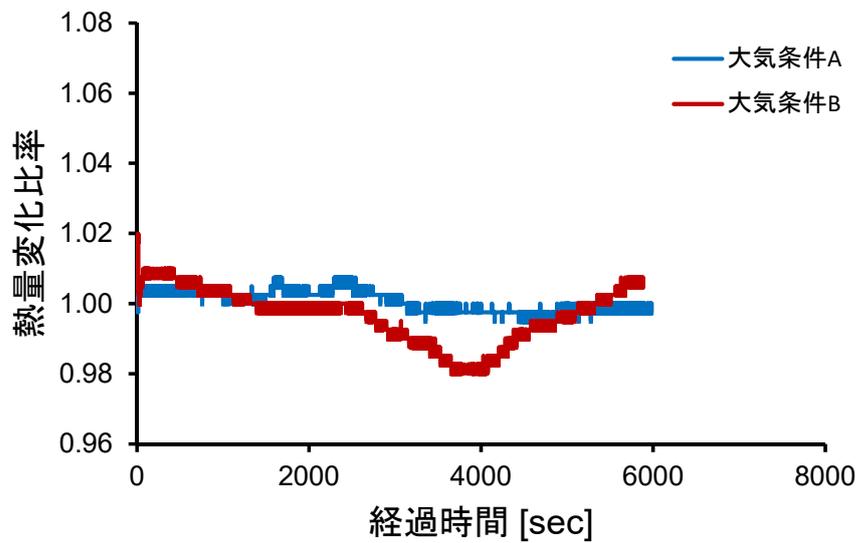


図 2-1-3-4 ガス運転時における燃料ガス熱量の変化

2-1-3-3 ディーゼル運転時の燃料消費率

ディーゼル／ガス試験機関においてディーゼル運転を行い、定常運転において軸馬力計の機関トルクの計測精度が燃料消費率に与える影響について試験を行った。

図 2-1-3-5 に機関トルクの誤差が燃料消費率に与える誤差を示す。各負荷率に相当する機関出力を X 軸に取り、機関トルクの誤差による燃料消費率の誤差を Y 軸に示す。

なお、機関トルクの誤差による燃料消費率の誤差は次のように算出した。

$$\text{燃料消費率の誤差} = \frac{\text{軸馬力計トルクによる燃料消費率} - \text{水動力計トルクによる燃料消費率}}{\text{水動力計の機関トルクによる燃料消費率}}$$

図 2-1-3-5 より、2-1-3-1 で述べたように軸馬力計による機関トルクと水動力計による機関トルクの誤差が約 4%存在することから、燃料消費率の誤差に与える影響も 4%以上存在する。負荷率が低くなるほど、誤差が大きくなることが確認できる。

また、大気条件の違いによる ISO 換算の有無が燃費に与える影響について調査するため、機関運転条件及び機関設定を一定とし、計測日すなわち、大気条件を変えて試験を行った。

2つの大気条件において ISO 換算の有無による燃料消費率の誤差を図 2-1-3-6 に示す。大気条件を X 軸に取り、大気条件 1 を基準とし、ISO 換算の有無による燃料消費率の誤差を Y 軸に示す。ISO 換算とは、試験時の大気条件における機関出力を標準大気条件における機関出力に換算して、燃料消費率を算出することである。

なお、燃料消費率の誤差は次のように算出した。

$$\text{燃料消費率の誤差} = \frac{\text{試験時の大気条件での燃料消費率} - \text{大気条件1での燃料消費率}}{\text{大気条件1での燃料消費率}}$$

図 2-1-3-6 より、ISO 換算無(無修正)では大気条件 1 から 2 になると燃料消費率の誤差がマイナス方向に変化しているのに対して ISO 換算すると燃料消費率の誤差はプラス方向に変化しており、燃料消費率の変化傾向が逆になることがわかる。

この結果から、ISO 換算が必要になることがわかった。すなわち、大気圧力、気温、相対湿度を計測することが必須であることが確認された。

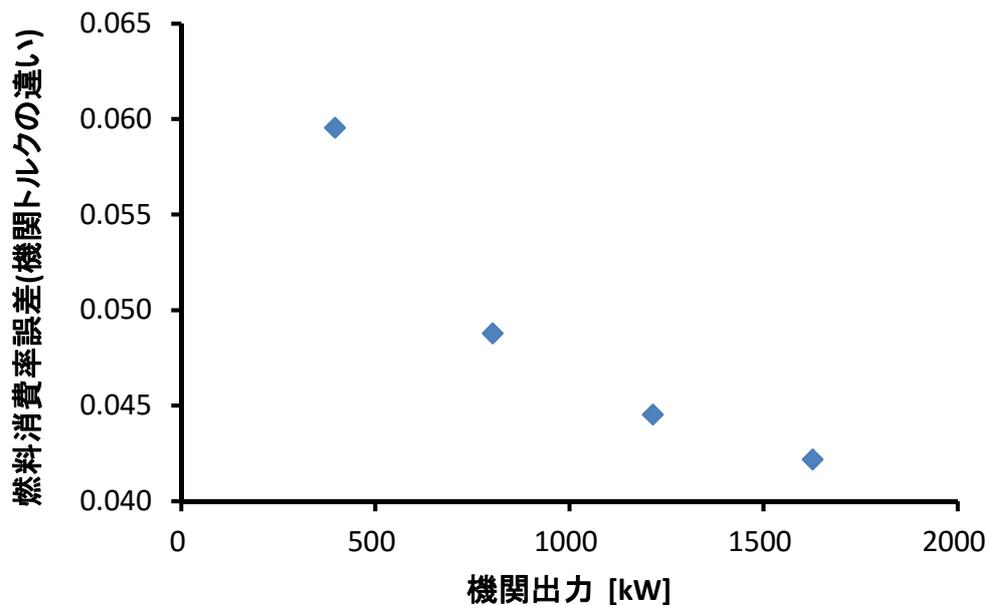


図 2-1-3-5 ディーゼル運転における機関トルクの誤差が燃料消費率に与える誤差

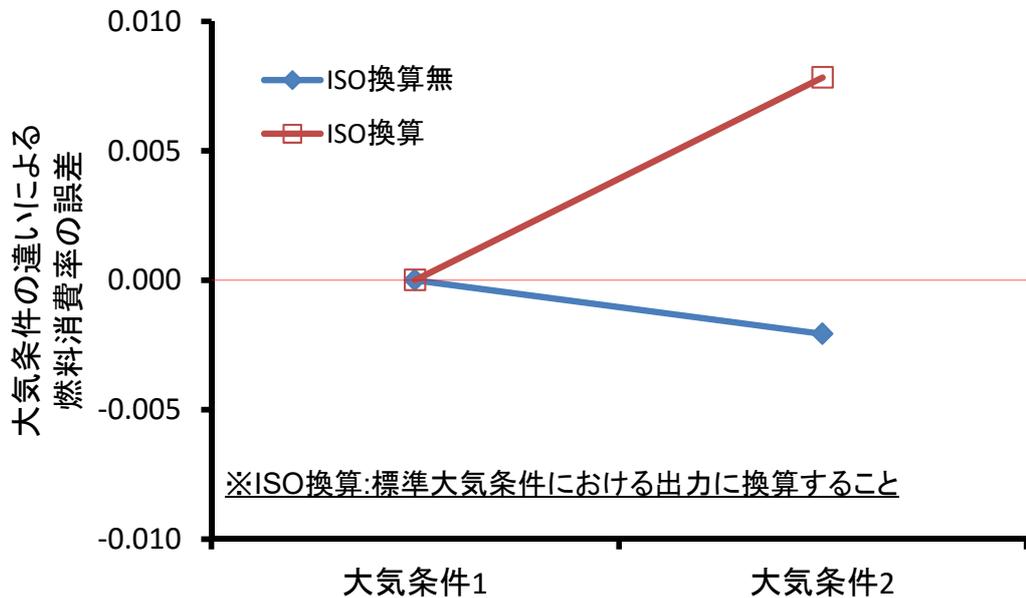


図 2-1-3-6 ISO 換算出力の有無が定格出力における燃料消費率に与える誤差

2-1-4 単体試験の検証

2-1-3 で実施した計測装置による機能単体試験結果から、次のことが確認された。

- ・ 軸馬力計を実船で使用する場合、機関製造工場において、校正された水動力計と軸馬力計を搭載する機関を運転し、水動力計と軸馬力計の機関トルクとの整合性を取る必要がある。
- ・ ガス運転時における燃料消費率を精度良く計測するためには燃料ガス熱量計が必須である。
- ・ 燃料消費率は大気条件の影響を受けるため、大気圧力、気温、相対湿度を計測し、得られた機関出力を ISO 換算出力に修正して燃料消費率を算出するべきである。

以上の内容を実施することで実船搭載の可能性が見えてきた。

2-2 モニタリング機能の開発

2-2-1 表示装置の設計

2-2-1-1 計測項目と表示項目

計測装置により計測するデータに基づいて、船内の表示装置で表示すべき表示項目とその計算方法について検討を行った。

1) 瞬時燃料消費量

瞬時燃料消費量の単位は、 $[l/h]$ あるいは $[kg/h]$ が一般的である。しかし船種によっては、より長期的な消費量を示す $[kg/Day]$ 、航行距離を基準とする $[kg/mile]$ も必要であることから、これらの表示も行えるようにした。

2) 積算燃料消費量

積算燃料消費量の積算値は、日毎、月毎、累計で集計されることが多いが、それ以外に航海単位や一回の作業単位での集計を乗組員が実施しているケースもある。このような用途にも対応できるように、任意のタイミングでリセット出来るトリップ積算値も演算し表示を行えるようにした。

3) 燃料消費率

現状の運航状態の燃料消費率を示す瞬時値ベースの燃料消費率、一定期間の平均となる積算値ベースの燃料消費率の双方を算出・表示できるようにした。また、ディーゼル燃料時の燃料消費率の単位は $[g/kW]$ 、ガス燃料時は $[kJ/kW]$ で表わされることが多いが、本システムのターゲットとなるディーゼル／ガス機関は双方の燃料を利用するので、それぞれの比較を行い易くするため、上記消費率に加えて、DF(デュアルフェューエル)燃料消費率と称して、燃料を問わず $[kJ/kW]$ の表示が出来るようにした。

4) 船速／航行距離

航行中の燃料消費量／燃料消費率を総合的に評価する上で、船速は合わせて見たい項目である。近年の船舶はGPS(グローバル・ポジショニング・システム)を搭載していることが多く、そこから通信により容易に船速を収集することが可能である。そこで、本システムでも船舶に搭載されたGPSからデータを得られることを前提に、船速(対地速度)が計測出来るようにした。また、船速の積算により航行距離も算出し表示を行えるようにした。

5) 機関室温度、相対湿度、大気圧

燃料消費量／燃料消費率をISO換算して同一条件で比較・評価できるように、機関室温度、相対湿度、大気圧も計測、表示を行えるようにした。

本システムの計測項目一覧を表 2-2-1-1、表示項目一覧を表 2-2-1-2 に示す。

表 2-2-1-1 計測項目一覧

No.	項目名称	単位	信号種別	標準
1	主機回転速度	[min ⁻¹]	4~20mA	◎
2	主機軸馬力	[kW]	4~20mA	◎
3	燃料油送り流量 (瞬時)	[kg/h]	0-10V	◎
4	燃料油戻り流量 (瞬時)	[kg/h]	0-10V	◎
5	ガス燃料瞬時流量 (瞬時)	[kg/h]	4~20mA	◎
6	ガス燃料発熱量	[MJ/Nm ³]	4~20mA	◎
7	パイロット油送り流量 (瞬時)	[L/h]	4~20mA	◎
8	パイロット油戻り流量 (瞬時)	[L/h]	4~20mA	◎
9	燃料油タンクレベル	[%]	4~20mA	△
10	LNG タンクレベル	[%]	4~20mA	△
11	燃料油送り流量 (積算)	[kg]	電圧積算パルス	◎
12	燃料油戻り流量 (積算)	[kg]	電圧積算パルス	◎
13	ガス燃料積算流量 (積算)	[kg]	積算パルス	◎
14	パイロット油送り流量 (積算)	[L]	積算パルス	◎
15	パイロット油戻り流量 (積算)	[L]	積算パルス	◎
16	補機燃料流量 (積算)	[L]	積算パルス	△
17	対地速度	[kt]	NMEA(通信方式名)	△
18	機関室温度	[°C]	4~20mA	△
19	大気圧	[hPa]	4~20mA	△
20	相対湿度	[%]	4~20mA	△
21	燃料油温度	[°C]	0-10V	△
22	燃料油密度	[g/cm ³]	0-10V	△

(◎・・・標準、 △・・・オプション)

表 2-2-1-2 表示項目一覧

No.	項目名称	単位	データ種別	標準
1	主機回転速度	[min-1]	瞬時	◎
2	主機軸馬力	[kW]	瞬時	◎
3	燃料油消費量	[kg/h]	瞬時 ([kg/D] 、 [kg/Mile])	◎
4	ディーゼルモード燃料消費率	[g/kWh]	瞬時	◎
5	ガス燃料消費量	[kg/h]	瞬時 ([kg/D] 、 [kg/Mile])	◎
6	ガス燃料発熱量	[kJ/Nm3]	瞬時	◎
7	パイロット油消費量	[L/h]	瞬時 ([kg/D] 、 [kg/Mile])	◎
8	ガスモード燃料消費率	[kJ/kWh]	瞬時	◎
9	DF 燃料消費率	[kJ/kWh]	瞬時	◎
10	CO2 排出量	[t/h]	瞬時	◎
11	燃料油タンクレベル	[%]	瞬時	△
12	LNG タンクレベル	[%]	瞬時	△
13	対地速度	[kt]	瞬時	△
14	燃料油消費量	[L]	積算 (日、月、累計、トリップ)	◎
15	ディーゼルモード燃料消費率	[g/kWh]	積算 (日、月、トリップ)	◎
16	ガス燃料消費量	[kg]	積算 (日、月、累計、トリップ)	◎
17	パイロット油消費量	[L]	積算 (日、月、累計、トリップ)	◎
18	ガスモード燃料消費率	[MJ/kWh]	積算 (日、月、トリップ)	◎
19	DF 燃料消費率	[MJ/kWh]	積算 (日、月、トリップ)	◎
20	補機燃料油消費量	[L]	積算 (日、月、累計、トリップ)	△
21	CO2 排出量	[t]	積算 (日、月、累計、トリップ)	◎
22	EEOI	[g/ton mile]	積算 (日、月、トリップ)	△
23	航行距離	[mile]	積算 (日、月、累計、トリップ)	△
24	機関室温度	[°C]	瞬時	△
25	大気圧	[hPa]	瞬時	△
26	相対湿度	[%]	瞬時	△
27	燃料油温度	[°C]	瞬時	△
28	燃料油密度	[g/cm3]	瞬時	△

(◎・・・標準、 △・・・オプション)

2-2-1-2 各種演算式

各表示項目の内部演算式の策定を行った。

以降、各演算式を示すがその際の表記は下記に従うものとする。

◎演算式の表記

[] 内は計測値

【 】内は定数（画面上から変更可能）

『 』内は別式

1) ディーゼルモード燃料消費率

$$\text{燃料消費率 [g/kWh]} = \frac{\text{[燃料油消費量 [kg/h]]} \times 1000}{\text{[主機軸馬力 [kW]]}}$$

2) ガスモード燃料消費率

$$\text{燃料消費率 [kJ/kWh]} = \frac{\text{[ガス燃料消費量 [kg/h]]} \times \text{『ガス燃料発熱量(質量) [kJ/kg]』} + \text{[パイロット油消費量 [kg/h]]} \times \text{【パイロット油発熱量 [kJ/kg]】}}{\text{[主機軸馬力 [kW]]}}$$

$$\text{ガス燃料発熱量(質量) [kJ/kg]} = \text{[ガス燃料発熱量 [MJ/Nm3]]} \div \text{『ガス密度 [kg/Nm3]』} \times 1000$$

$$\begin{aligned} \text{ガス密度 [kg/Nm3]} &= \left(\text{【7.00】 E-06} \times \text{[ガス燃料発熱量 [MJ/Nm3]]} \right)^2 \\ &+ \text{【2.15】 E-02} \times \text{[ガス燃料発熱量 [MJ/Nm3]]} \\ &- \text{【5.80】 E-02} \end{aligned}$$

3) D F 燃料消費率

$$\text{燃料消費率 [kJ/kWh]} = \frac{\text{[燃料油消費量 [kg/h]]} \times \text{【燃料油発熱量 [kJ/kg]】} + \text{[ガス燃料消費量 [kg/h]]} \times \text{『ガス燃料発熱量(質量) [kJ/kg]』} + \text{[パイロット油消費量 [kg/h]]} \times \text{【パイロット油発熱量 [kJ/kg]】}}{\text{[主機軸馬力 [kW]]}}$$

4) CO₂ 排出量

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 [t/h]} = \text{『燃料油 CO}_2 \text{ 排出量』} + \text{『LNG CO}_2 \text{ 排出量』} \\ + \text{『パイロット油 CO}_2 \text{ 排出量』} + \text{『補機燃料 CO}_2 \text{ 排出量』}$$

$$\text{燃料油 CO}_2 \text{ 排出量 [t/h]} = \text{【ディーゼル／ガスオイル CO}_2 \text{ 換算係数】} \\ \times \text{〔燃料油消費量 [kg/h] 〕} \div 1000$$

$$\text{LNG CO}_2 \text{ 排出量 [t/h]} = \text{【LNG CO}_2 \text{ 換算係数】} \times \text{〔燃料油消費量 [kg/h] 〕} \div 1000$$

$$\text{パイロット油 CO}_2 \text{ 排出量 [t/h]} = \text{【ディーゼル／ガスオイル CO}_2 \text{ 換算係数】} \\ \times \text{〔パイロット油消費量 [kg/h] 〕} \div 1000$$

$$\text{補機燃料 CO}_2 \text{ 排出量 [t/h]} = \text{【ディーゼル／ガスオイル CO}_2 \text{ 換算係数】} \\ \times \text{〔補機燃料消費量 [kg/h] 〕} \div 1000$$

5) EEOI

$$\text{EEOI [g/ton mile]} = \frac{\text{『CO}_2 \text{ 排出量』}}{\text{【実貨物重量 [t] 〕} \times \text{〔実航行距離 (mile) 〕}}$$

6) 各定数

$$\text{【燃料油密度 [kg/L] 〕} = 0.860 \text{ [kg/L]} \quad (\text{A 重油})$$

$$\text{【燃料油発熱量 [kJ/L] 〕} = 39100 \text{ [kJ/L]} \quad (\text{A 重油})$$

$$\text{【パイロット油密度 [kg/L] 〕} = 0.860 \text{ [kg/L]} \quad (\text{A 重油})$$

$$\text{【パイロット油発熱量 [kJ/kg] 〕} = 39100 \text{ [kJ/L]} \quad (\text{A 重油})$$

$$\text{【ディーゼル／ガスオイル CO}_2 \text{ 換算係数】} = 3.206 \text{ [t-CO}_2 \text{ / t-燃料]} \quad (\text{※1})$$

$$\text{【LNG CO}_2 \text{ 換算係数】} = 2.75 \text{ [t-CO}_2 \text{ / t-燃料]} \quad (\text{※1})$$

$$\text{【実貨物重量 [t] 〕} = 300 \text{ t} \quad (\text{総トン数})$$

(※1) IMO 発行のガイドライン (MEPC.1/Circ.684) による。

2-2-1-3 システム設計

1) 船舶側システム設計

船内での計測、演算および表示を行うために適したシステム構成の検討を行った。

計測に関しては一般的に対環境性・信頼性に優れていることから PLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）により行うこととした。しかし PLC が持つ演算機能では燃料消費率など複雑な演算を行うためには機能的に十分では無いことから、演算およびその結果の蓄積にはパソコンを用いることとした。

パソコンにはボックス型の FA（ファクトリー・オートメーション）用途のボックス型パソコン（PC）を利用することとし、振動への対策とし記憶媒体には回転体の無いシリコンディスク（SSD）を利用、また不意の電源切断にも備え UPS（無停電電源装置）を設けることとした。

表示に関して、タッチパネル表示器には船舶での利用に実績があるプログラマブル表示器をブリッジに設置し、船内各所でも船内 LAN を介してお客様所有のパソコンでの表示も可能な方式とした。タッチパネル表示器に表示させる内容は、操船しながらでも主機の出力状態、燃料消費量（率）など、確認を行いやすいよう棒グラフを含めた表示とし、パソコンでの表示は現在値の表示に加え、過去の運行時の状況も確認トレンドグラフ表示を行えるようにした。

各装置間の通信は LAN ケーブルにより、ネットワークルータを介して接続する構成とした。以降、本システムで使用するボックス型 PC を「監視 PC」、PLC を「データ計測 PLC」とし、それらを収納する筐体を「データ計測・収集ユニット」とする。

図 2-2-1-1 に船舶側システムのシステム構成を示す。

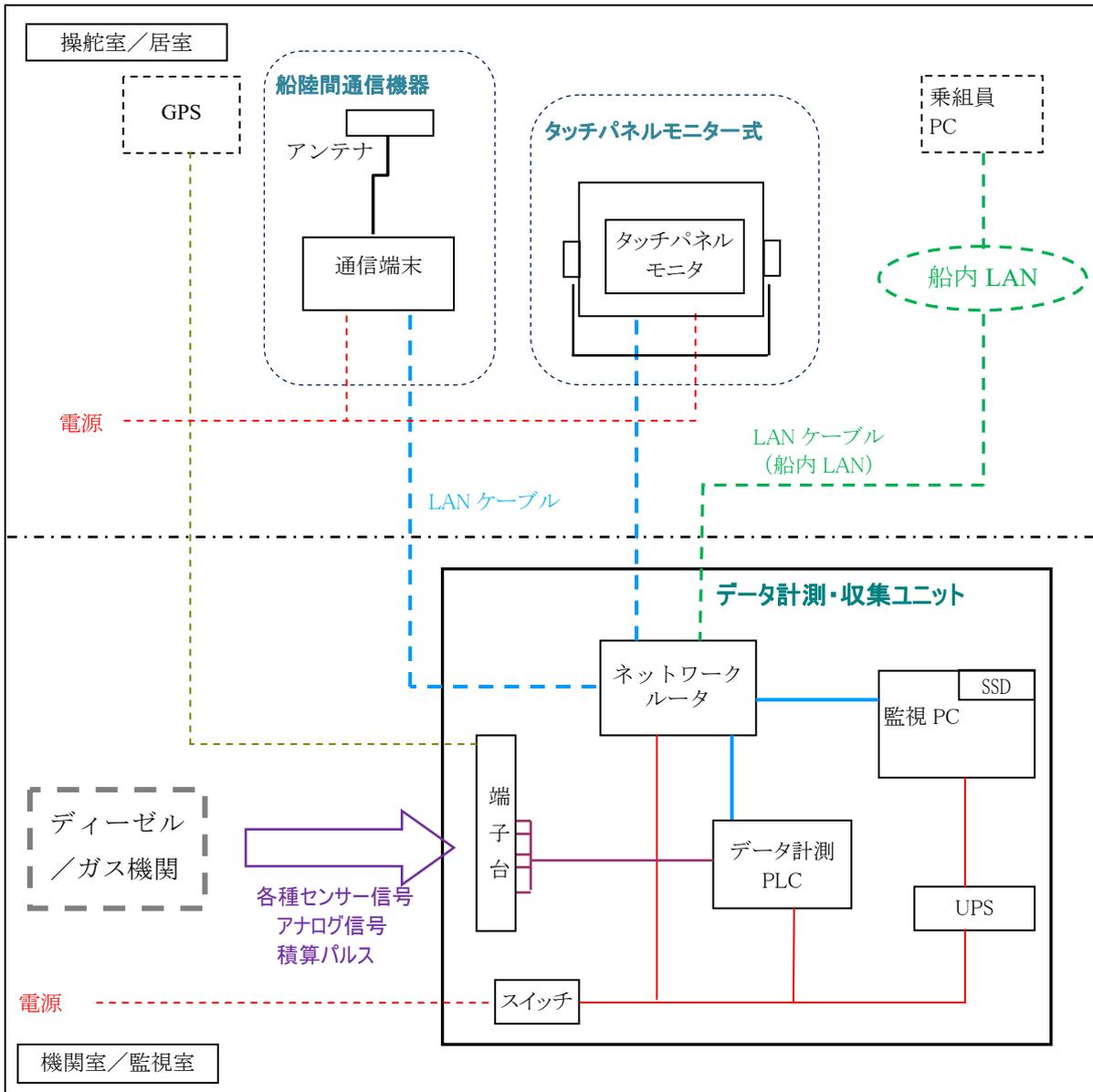


図 2-2-1-1 船舶側システム構成

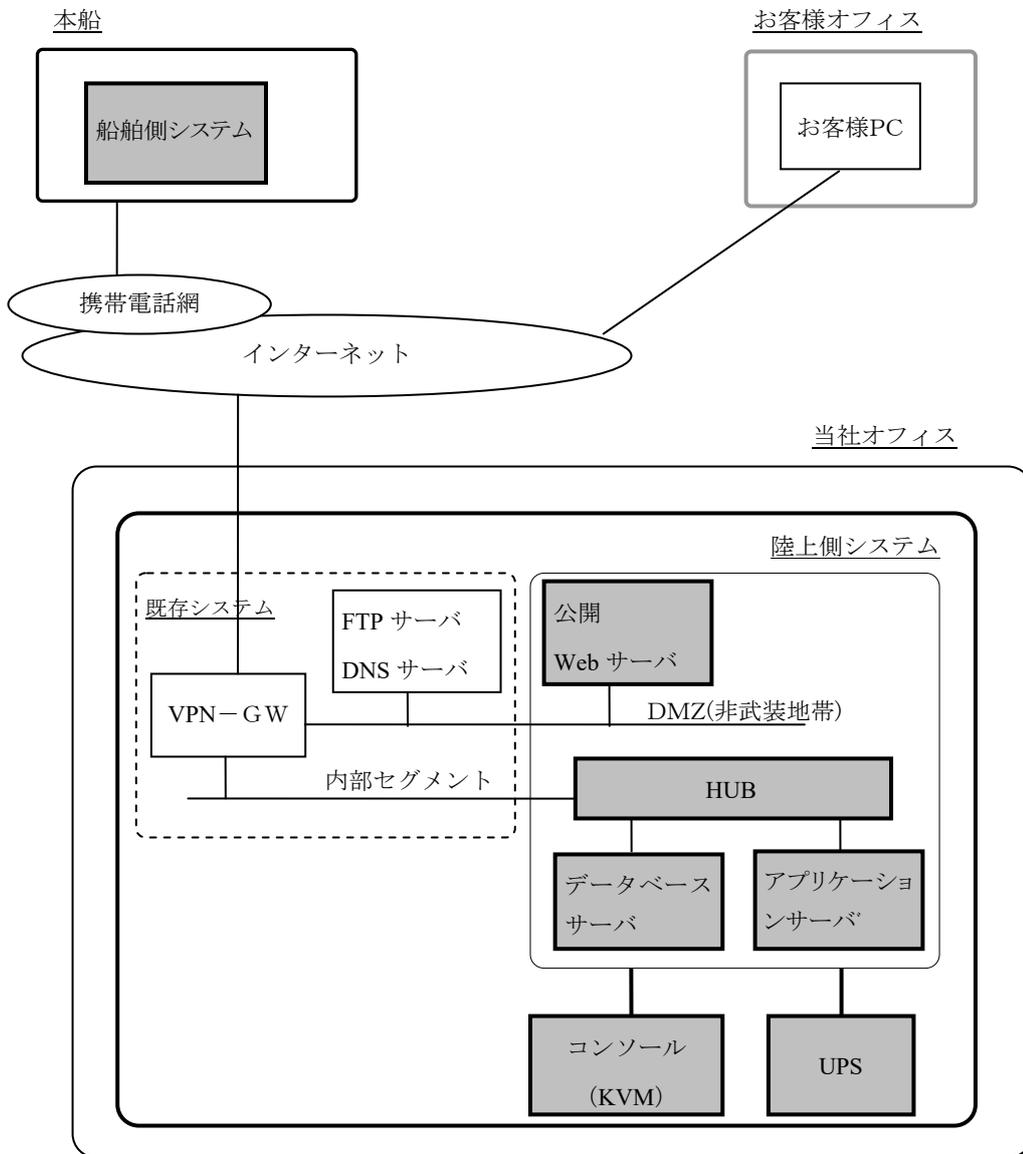
2) 陸上側システム設計

陸上側システムを構成する機器仕様の検討を行った。陸上側システムに必要なとされる機能は以下の通りとなる。

- ① 船舶側システムから送信された運転データ受信
- ② 受信した運転データをデータベースに保存・蓄積
- ③ インターネットを経由して、お客様オフィス内 PC での燃費関連データの Web 表示

これら機能実現するための陸上側システム構成を図 2-2-1-2 のようにした。なお今回ネットワーク環境や一部のハードウェアに関しては当社設備を利用し、構成することとした。主要装置の概要を以下に示す。

- (1) VPN-GW (仮想プライベートエリアネットワークゲートウェイ) [当社設備]
 - ・船舶側システムとのインターネット通信を VPN により暗号化を行い、セキュリティを確保する。
- (2) FTP (ファイル・トランスファー・プロトコル) サーバ、DNS (ドメイン・ネーム・システム) サーバ [当社設備]
 - ・船舶側システムから送信される運転データを FTP サーバにより受信する。
 - ・外部公開 Web サーバのドメイン名の解決を行う。
- (3) 公開 Web サーバ
 - ・Web サーバとしてインターネットを経由し、お客様 PC の Web ブラウザ上での燃費関連データ表示画面を提供する。
 - ・燃費関連データは『データベースサーバ』に蓄積されており、『アプリケーションサーバ』を経由して取得する。
- (4) データベースサーバ
 - ・データベースとして、船舶側システムから送信されてくる燃費関連データを蓄積・保存する。
- (5) アプリケーションサーバ
 - ・データベースサーバ、公開 Web サーバ、FTP サーバ間相互のデータ中継を行う。
- (6) UPS
 - ・停電時に各サーバを安全にシャットダウンさせるための無停電電源装置。
- (7) コンソール
 - ・各サーバ用のコンソール。KVM (Keyboard, Video and Mouse) スイッチ。



 図中の網掛け・太字の部分は、船舶燃費表示 表示装置専用の機器を示す。

図 2-2-1-2 陸上側システム構成

2-2-1-4 船陸間通信方式

船陸間通信方式について調査を行った。各種通信方式の特徴を表 2-2-1-3 に示す。

表 2-2-1-3 船陸間通信方式の特徴

通信方式	低軌道衛星	静止衛星	静止衛星	グローバルM2M (マシンtoマシン)サービス	携帯電話網(国内)
通信サービス	イリジウム	インマルサットFB (フリートブロードバンド)	VSAT (Very Small Aperture Terminal) 【複数キャリアから提供】	3G(第3世代携帯電話)／ GSM(global system for mobile communications)網 【複数キャリアから提供】	3G／ 4G(第4世代携帯電話)網 【複数キャリアから提供】
陸上側通信設備	専用サーバを介してEメールにより送受信を行う	インターネット	インターネット	専用線	インターネット
陸上側との通信方式	ATコマンドによりメッセージ通信	IP通信	IP通信	IP通信	IP通信
通信端末料金	16万円	100～200万円	300万円	6～11万円	4～5万円
船舶側通信料金	Type-A 月額基本 3,000円 1kByte 400円	スタンダードプラン 月額基本 65,000円(20MByteの無料通話を含む) 1kByte 3.25円	16kbpsプラン 使用無制限 310,000円/月	月額基本 2,030円(1MByteの無料通話を含む) 1kByte 2.03円	月額基本 4,500円 (2GByteの無料通話を含む)
カバーレジャリア	全世界(極地を除く)	全世界(極地を除く)	主要航路(太平洋、インド洋、地中海) サービス提供会社によってカバーエリアは異なる。	3G・GSM網が届く範囲(海外含む)	3G網が届く範囲(国内)

無線部の通信方式として衛星通信を利用した方式と携帯電話網を利用した方式がある。衛星通信を利用した方がカバーエリアは広がるがその分コストは上がり、通信速度は低速となる。また、陸上側の通信環境としてインターネットを利用した方式と専用線を必要とする方式があり、セキュリティ面で専用線を利用した方が安全ではあるが、その分のコストが上がる。

さらに船種によって航海するエリアが異なることから通信方式を一つに絞るのは現実的ではない。そこで本システムでは船舶側システム～陸上側システム間で IP 通信を行える方式、さらに陸上側システムの通信環境がインターネットとなる、「インマルサットFB」と「携帯電話網(国内)」を候補とした。

この2つの方式であればどちらを利用しても、船舶側システムと陸上側システム間の通信方法が IP (インターネットプロトコル) 通信で統一できると共に、アプリケーションも統一でき、さらに陸上側システムもインターネット環境があれば利用できるためイニシャルコストを抑えることができる。セキュリティに関してはインターネットを利用することになるので、心配される場合もあるが VPN を利用することにより、実用上では十分なセキュリティを確保できる。あとは搭載する船舶の航海エリアによりどちらを利用するか選べば良い。

本システムの試験を行うに際しては、設備の大きさやランニングコストを考慮し携帯電話網で評価を行うこととした。

2-2-1-5 機器選定および制作仕様策定

船舶側システム、陸上側システムとも使用する機器を選定し、それをもとに制作・一般仕様を定めた。

1) 船舶側システム

◎データ収集・計測ユニット

表 2-2-1-4 データ収集・計測ユニット制作・一般仕様

サイズ	650 (幅) × 450 (高さ) × 200 (奥行き) 以内
重量	35kg 以内
電源電圧	DC24V ± 10%
消費電力	70W 以下 (モバイルルータ、タッチパネルモニタ含まず)
入力信号	<p>● 1 基 1 軸仕様</p> <p>アナログ信号 : DC4-20mA × 12ch</p> <p>積算パルス : 無電圧接点 (50ms 以上) × 8ch</p> <p>NMEA : RS-422A × 1ch (オプション)</p> <p>● 2 基 2 軸仕様</p> <p>アナログ信号 : DC4-20mA × 20ch</p> <p>積算パルス : 無電圧接点 (50ms 以上) × 13ch</p> <p>NMEA : RS-422A × 1ch (オプション)</p>
通信 I/F	100BASE-TX (RJ-45) × 2ch (お客様 PC 接続用)
周囲条件	<p>周囲温度 : 0~40℃</p> <p>周囲湿度 : 20~85%</p> <p>設置場所 : 室内</p>

◎タッチパネルモニタ

表 2-2-1-5 タッチパネルモニタ制作・一般仕様

サイズ	モニタ部 : 233 (幅) × 178 (高さ) × 66 (奥行き) スタンド : 360 (幅) × 320 (高さ) × 130 (奥行き) 以内
画面サイズ	8 インチ
重量	モニタ部 : 1.5kg スタンド : 7.0kg 以内
電源電圧	DC24V ± 10%
消費電力	23W 以下
周囲条件	周囲温度 : 0~40℃ 周囲湿度 : 20~85% 設置場所 : 室内

◎モバイルルータ

表 2-2-1-6 モバイルルータ一般・仕様

サイズ	本体 : 127 (幅) × 81 (高さ) × 22 (奥行き) アンテナ : 70 (幅) × 34 (高さ)
重量	0.4kg
電源電圧	DC24V ± 10%
消費電力	10W 以下
周囲条件	周囲温度 : 0~40℃ 周囲湿度 : 20~85% 設置場所 : 室内

2) 陸上側システム

表 2-2-1-7 陸上側システム一般仕様

サイズ	計 1 1 U (サーバラック内に設置) <ul style="list-style-type: none"> ・外部 Web サーバ ・データベースサーバ ・アプリケーションサーバ ・ネットワーク HUB ・コンソール ・UPS
重量	150kg (サーバラックは含まない)
電源電圧	AC100V
消費電力	1960W 未満 (UPS 定格電力)
周囲条件	周囲温度 : 5~35℃ 周囲湿度 : 20~85% 設置場所 : 室内

2-2-2 表示装置の試作

策定した制作仕様に基づき、各装置の試作を行った。

1) 船舶側システム



図 2-2-2-1 データ計測・収集ユニット外観

図 2-2-2-2 データ計測・収集ユニット内部



図 2-2-2-3 タッチパネル表示器外観



図 2-2-2-4 モバイルルータ外観



図 2-2-2-5 タッチパネル表示器—現在値表示画面



図 2-2-2-6 タッチパネル表示器—積算値表示画面

数値表示

船舶: 船舶燃費表示装置

1 / 20ページ

データ日時: 2015-02-11 18:08:18

項目名	計測値	単位	状態
主機回転速度	0	min-1	
主機軸馬力	0	kW	
ガス燃料瞬時流量	0	kg/h	
ガス燃料発熱量	35.0	MJ	
パイロット油送り瞬時流量	0	kg/h	
パイロット油戻り瞬時流量	0	kg/h	
燃料油送り瞬時流量	0	kg/h	
燃料油戻り瞬時流量	0	kg/h	
燃料油温度	0.0	°C	
燃料油密度	0.000	kg/L	
対地速度	0.00	kt	
大気圧	500	hPa	
機関室温度	-40.0	°C	
相対湿度	0	%	
ガス燃料流量(積算)	0	kg	
パイロット油送り流量(積算)	0	kg	
パイロット油戻り流量(積算)	0	kg	
燃料油送り流量(積算)	0	kg	
燃料油戻り流量(積算)	0	kg	

表示項目変更 前ページ 次ページ ページ選択

図 2-2-2-7 Web 表示 - 数値表示画面

ヒストリカルトレンド

船舶: 船舶燃費表示装置

1 / 80ページ

60分間データ: 2015/02/17 17:00:00 ~ 2015/02/17 17:59:00

カーソル時間 2015/02/17 17:59:00

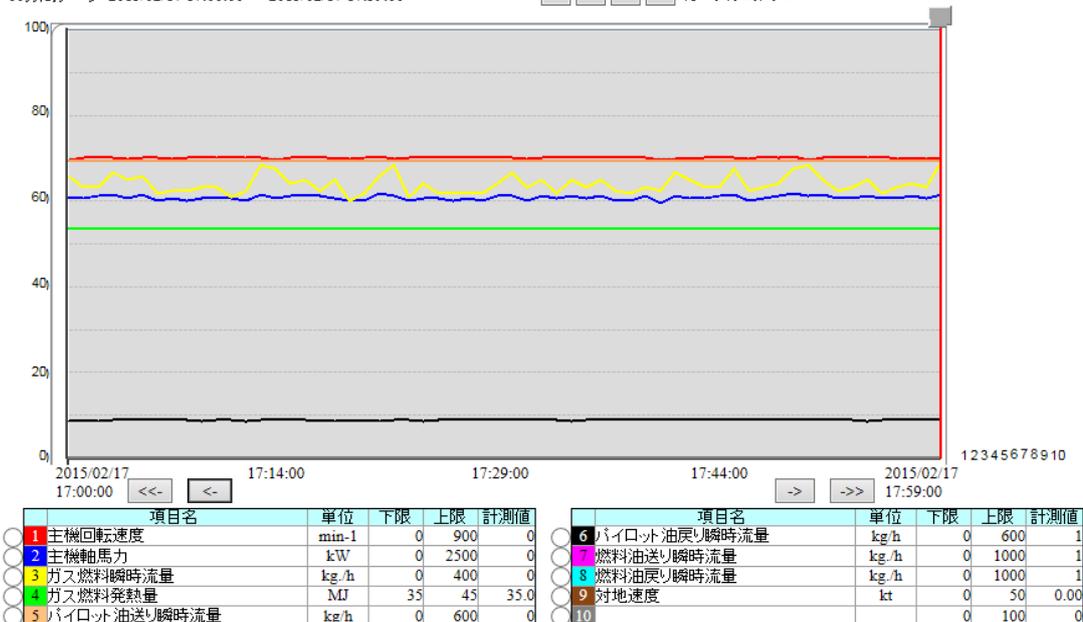


図 2-2-2-8 Web 表示 - トレンドグラフ画面

2) 陸上側システム



図 2-2-2-9 陸上側システム外観

2-2-3 表示装置の単体試験

試作した、船舶側システムおよび陸上側システムを結合し表示装置単体試験を実施した。



図 2-2-3-1 表示装置単体試験風景

1) 計測機能確認試験

計測装置と同じ仕様の信号を、信号発生器などを用いてダミー信号として与え、ダミー信号に応じた計測値がタッチパネル表示器に表示されることを確認した。

判定基準

- ・アナログ項目（4～20mA、0～10V 入力）：
 - ダミー信号に応じた理論値と表示装置の表示値が、計測範囲の±0.2%未満であること
- ・積算項目（積算パルス、電圧積算パルス入力）：
 - ダミー信号による入力したカウント値と、表示装置にてカウントした値が一致していること。
- ・NMEA 通信項目：
 - ダミー信号と、表示装置の表示値が一致すること。

表 2-2-3-1 計測機能確認試験結果

No.	項目名称	計測範囲	単位	信号種別	判定
1	主機回転速度	0～900	[min ⁻¹]	4～20mA	OK
2	主機軸馬力	0～2500	[kW]	4～20mA	OK
3	燃料油送り流量(瞬時)	0～1000	[kg/h]	0～10V	OK
4	燃料油戻り流量(瞬時)	0～1000	[kg/h]	0～10V	OK
5	ガス燃料瞬時流量(瞬時)	0～400	[kg/h]	4～20mA	OK
6	ガス燃料発熱量	35～45	[MJ/Nm ³]	4～20mA	OK
7	パイロット油送り流量(瞬時)	0～600	[kg/h]	4～20mA	OK
8	パイロット油戻り流量(瞬時)	0～600	[kg/h]	4～20mA	OK
9	機関室内室温	-40～60	[°C]	4～20mA	OK
10	大気圧	500～1100	[hPa]	4～20mA	OK
11	相対湿度	0～100	[%]	4～20mA	OK
12	燃料油温度	0～100	[°C]	0～10V	OK
13	燃料油密度	0～1	[kg/L]	0～10V	OK
14	燃料油送り流量(積算)	0～99999999	[kg]	積算パルス(電圧)	OK
15	燃料油戻り流量(積算)	0～99999999	[kg]	積算パルス(電圧)	OK
16	ガス燃料積算流量(積算)	0～99999999	[kg]	積算パルス(電圧)	OK
17	パイロット油送り流量(積算)	0～99999999	[kg]	積算パルス	OK
18	パイロット油戻り流量(積算)	0～99999999	[kg]	積算パルス	OK
19	対地速度	0～40	[kt]	NMEA 通信	OK

2) 演算および表示機能確認試験

ダミー信号により計測され計測値をもとに演算された結果が、仕様で定めた演算式による結果と一致しているかを確認した。また、タッチパネル表示器、船内 Web 表示、陸上側システムの Web 表示でも正しく表示される事を確認した。

表 2-2-3-2 演算および表示確認試験結果

No.	項目名称	単位	データ種別	演算結果	タッチ パネル	船内 Web 表示	陸上 Web 表示
1	主機回転速度	[min-1]	瞬時	OK	OK	OK	OK
2	主機軸馬力	[kW]	瞬時	OK	OK	OK	OK
3	燃料油消費量	[kg/h]	瞬時	OK	OK	OK	OK
4	ディーゼルモード燃料消費率	[g/kWh]	瞬時	OK	OK	OK	OK
5	ガス燃料消費量	[kg/h]	瞬時	OK	OK	OK	OK
6	ガス燃料発熱量	[kJ/Nm3]	瞬時	OK	OK	OK	OK
7	パイロット油消費量	[L/h]	瞬時	OK	OK	OK	OK
8	ガスモード燃料消費率	[kJ/kWh]	瞬時	OK	OK	OK	OK
9	DF 燃料消費率	[kJ/kWh]	瞬時	OK	OK	OK	OK
10	CO2 排出量	[t/h]	瞬時	OK	OK	OK	OK
11	燃料油タンクレベル	[%]	瞬時	OK	OK	OK	OK
12	LNG タンクレベル	[%]	瞬時	OK	OK	OK	OK
13	対地速度	[kt]	瞬時	OK	OK	OK	OK
14	燃料油消費量	[L]	瞬時	OK	OK	OK	OK
15	ディーゼルモード燃料消費率	[g/kWh]	積算	OK	OK	OK	OK
16	ガス燃料消費量	[kg]	積算	OK	OK	OK	OK
17	パイロット油消費量	[L]	積算	OK	OK	OK	OK
18	ガスモード燃料消費率	[MJ/kWh]	積算	OK	OK	OK	OK
19	DF 燃料消費率	[MJ/kWh]	積算	OK	OK	OK	OK
20	補機燃料油消費量	[L]	積算	OK	OK	OK	OK
21	CO2 排出量	[t]	積算	OK	OK	OK	OK
22	EEOI	[g/ton mile]	積算	OK	OK	OK	OK
23	航行距離	[mile]	積算	OK	OK	OK	OK
24	機関室温度	[°C]	瞬時	OK	OK	OK	OK
25	大気圧	[hPa]	瞬時	OK	OK	OK	OK
26	相対湿度	[%]	瞬時	OK	OK	OK	OK
27	燃料油温度	[°C]	瞬時	OK	OK	OK	OK
28	燃料油密度	[g/cm3]	瞬時	OK	OK	OK	OK

2-3 計測装置・表示装置結合試験

試作した表示装置と計測装置とを結合し、計測装置の指示値と表示装置の表示値が所定の誤差範囲内に納まる事を確認した。

判定基準

- ・アナログ項目（4～20mA、0～10V 入力）：
計測装置の指示値と表示装置表示値との差が、計測範囲の±0.2%未満であること
- ・積算項目（積算パルス、電圧積算パルス入力）：
計測装置指示値の一定時間のカウント値と、表示装置にてカウントされた値が一致していること。

表 2-3-1 計測装置・表示装置結合試験結果

No.	項目名称	計測範囲	単位	判定
1	主機回転速度	0～900	[min-1]	OK
2	主機軸馬力	0～2500	[kW]	OK
3	燃料油送り流量（瞬時）	0～1000	[kg/h]	OK
4	燃料油戻り流量（瞬時）	0～1000	[kg/h]	OK
5	ガス燃料瞬時流量（瞬時）	0～400	[kg/h]	OK
6	ガス燃料発熱量	35～45	[MJ/Nm ³]	OK
7	パイロット油送り流量（瞬時）	0～600	[kg/h]	OK
8	パイロット油戻り流量（瞬時）	0～600	[kg/h]	OK
9	機関室内室温	-40～60	[°C]	OK
10	大気圧	500～1100	[hPa]	OK
11	相対湿度	0～100	[%]	OK
12	燃料油温度	0～100	[°C]	OK
13	燃料油密度	0～1	[kg/L]	OK
14	燃料油送り流量（積算）	0～99999999	[kg]	OK
15	燃料油戻り流量（積算）	0～99999999	[kg]	OK
16	ガス燃料積算流量（積算）	0～99999999	[kg]	OK
17	パイロット油送り流量（積算）	0～99999999	[kg]	OK
18	パイロット油戻り流量（積算）	0～99999999	[kg]	OK

3. 平成26年度実施事項まとめ

平成26年度の目標としたいずれの項目も以下のとおり達成できた。

3-1 高精度計測技術の確立

- 1) 機関出力、燃焼条件、ガス性状分析データ、ガス燃料流量などから高精度にガス燃料消費量(率)を計測する方法の検討を行い、コリオリ式流量計、熱量計、軸馬力計、大気圧気温湿度変換器の組み合わせにより、精度よく計測する手法を考案した。また、計測器には JIS B8003 に示す許容誤差以内に入る機器を選定した。
- 2) 上記で選定した機器をディーゼル/ガス機関の試験機に設置した計測装置を試作し、単体試験により以下内容について検証・評価を行った。
 - ・軸馬力計と水動力系の比較により、軸馬力を精度よく計測する手法の実現性を確認した。
 - ・軸馬力計、コリオリ式流量計、ガス性状分析データ、大気圧気温湿度変換器の組み合わせにより、ガス燃料の流量を精度よく計測する手法の実現性を確認した。
 - ・軸馬力計、コリオリ式流量計、大気圧気温湿度変換器の組み合わせにより、燃料油流量を精度よく計測する手法の実現性を確認した。

3-2 モニタリング機能の開発

- 1) 計測した燃料油及びガス燃料の流量に基づいてモニタリング項目の選定、燃料消費量(率)、CO₂ 排出量など内部演算式、船陸間通信方式を検討し、機能仕様を策定した。
- 2) モニタリング、データ出力、船陸間通信に必要な船内側機器及び陸上側機器の選定を行った。
- 3) 上記機能仕様、選定した機器により表示装置を試作し、試作装置単体での試験を実施し、仕様に定めた計測、演算、表示が行えることを確認した。

3-3 計測装置・表示装置結合試験

試作した表示装置と計測装置とを結合し、機関の一定負荷での運転中において燃料消費量(率)の計測値及び CO₂ 排出量の算出値が、所定の誤差範囲内に収まる事を確認し、燃料消費量表示装置としての実現の可能性を得た。

4. 平成27年度実施事項

4-1 陸上総合試験

4-1-1 システム構成

表 4-1-1 に示す仕様のディーゼル／ガス試験機関を用いて、図 4-1-1-1 に示すように表示装置、工場設備に使用した計測機器類及びセンサーを配置して試験を実施した。

計測項目は機関回転速度、機関トルク、送りと戻りの燃料油流量、燃料ガス流量及び発熱量であり、これらからの信号出力を表示装置に取り込み、演算させ、表示装置に結果を出力させている。

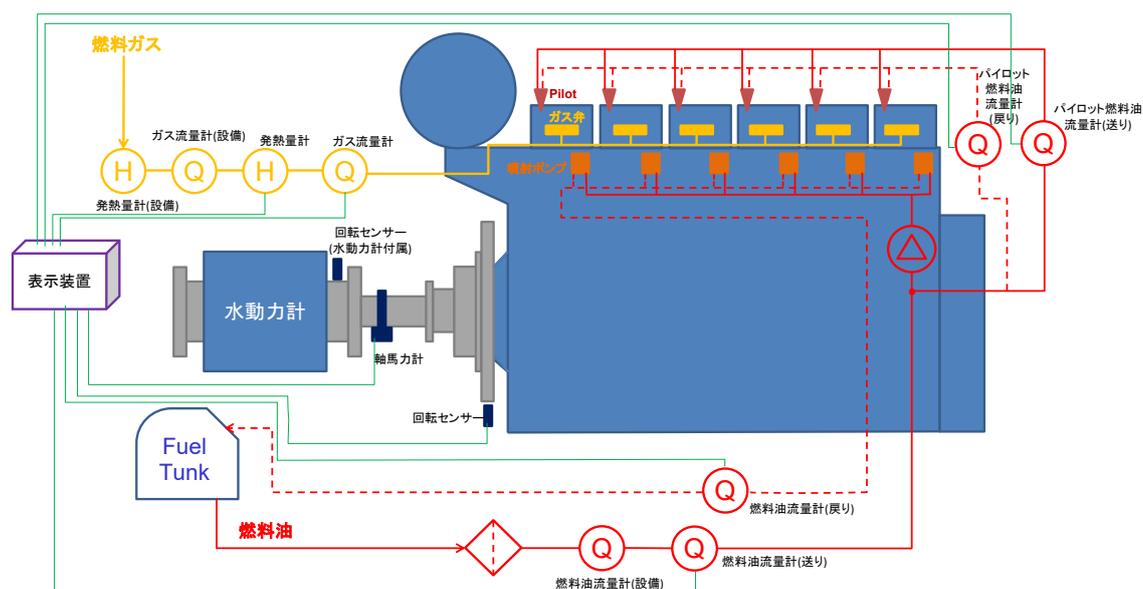


図 4-1-1-1 表示装置と計測装置の系統図

表 4-1-1 供試機関の諸元

シリンダー数	-	6
ボア	mm	280
機関回転速度	min ⁻¹	800
機関出力	kW	1920

4-1-2 試験内容・方法

図 4-1-2-1 に示すような負荷パターンにてガス燃料にてディーゼル／ガス試験機関を運転し、過渡状態及び定常状態における計測項目の挙動を計測した。

本研究開発で試験した表示装置の健全性もしくは課題を明確にするため、従来からディーゼル／ガス機関工場設備に搭載されている計測装置も同時に出力させ、両者のばらつき等を比較し、評価した。

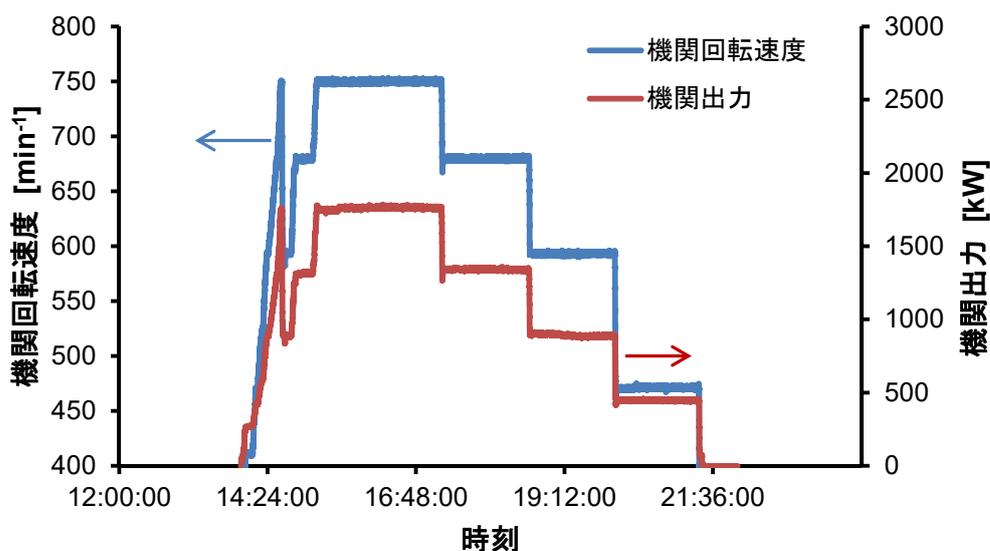


図 4-1-2-1 負荷運転パターンの一例

4-1-3 定常時と過渡時での誤差

定常*時及び過渡**時において計測機器の精度に与える影響を把握するため、定常及び過渡時のディーゼル運転において工場設備及び表示装置での機関回転速度及び機関出力の表示の違いをそれぞれ図 4-1-3-1、図 4-1-3-2 に示す。

図 4-1-3-1 及び図 4-1-3-2 から、定常時(図 4-1-3-1 及び図 4-1-3-2 中の青いひし形のプロット)には工場設備と表示装置において、機関回転速度及び機関出力とも数値が良く一致していることがわかる。しかし、負荷率を下げたり、上げたりする過渡時においては工場設備と表示装置における機関回転速度と機関出力が一致していないことがわかる。(図 4-1-3-1、図 4-1-3-2 中の赤い線)

図 4-1-3-3 に示すように時間が経つにつれ、工場設備による機関出力と表示装置による機関出力が異なる値になっていることがわかる。

過渡時は刻一刻と変化する数値について比較することになるため、各計測装置の応答性や安定性等の違いにより、過渡時において誤差が大きくなるものと考えられる。

従って、燃費を精度よく評価するには過渡時ではなく、定常時において長時間のサンプリングで平均した結果を用いることによって精度良い表示が可能である。

定常* : 機関回転速度及び機関出力を一定に維持した運転状態をいう。

過渡** : 定常運転から船用 3 乗特性上に機関回転速度及び機関出力を変化させている運転状態をいう。

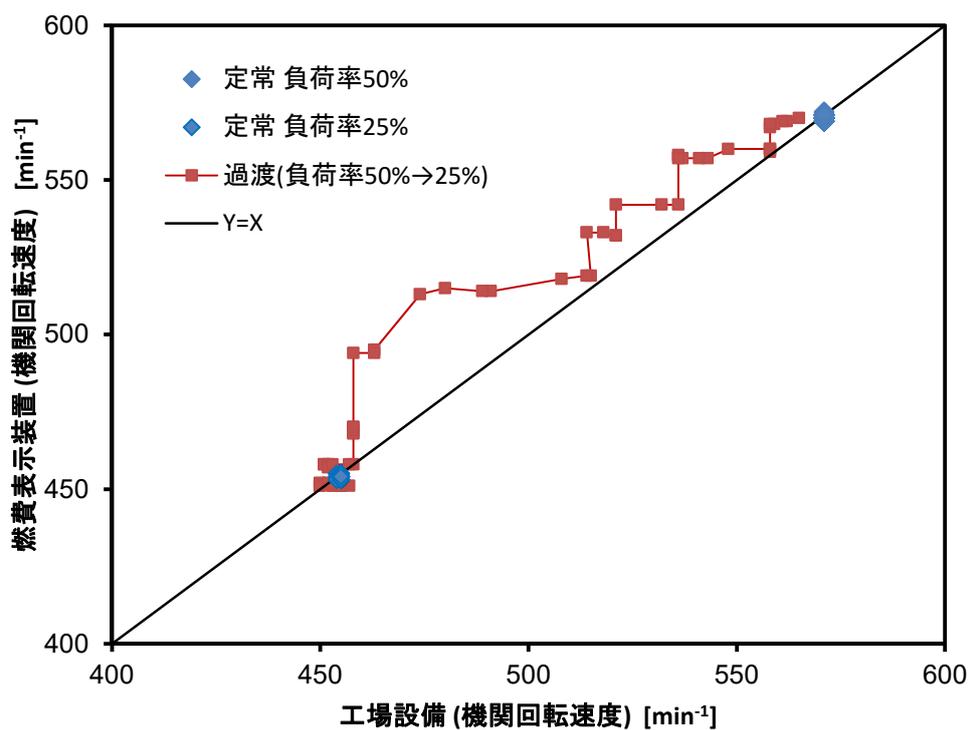


図 4-1-3-1 定常時と過渡時の機関回転速度の変化

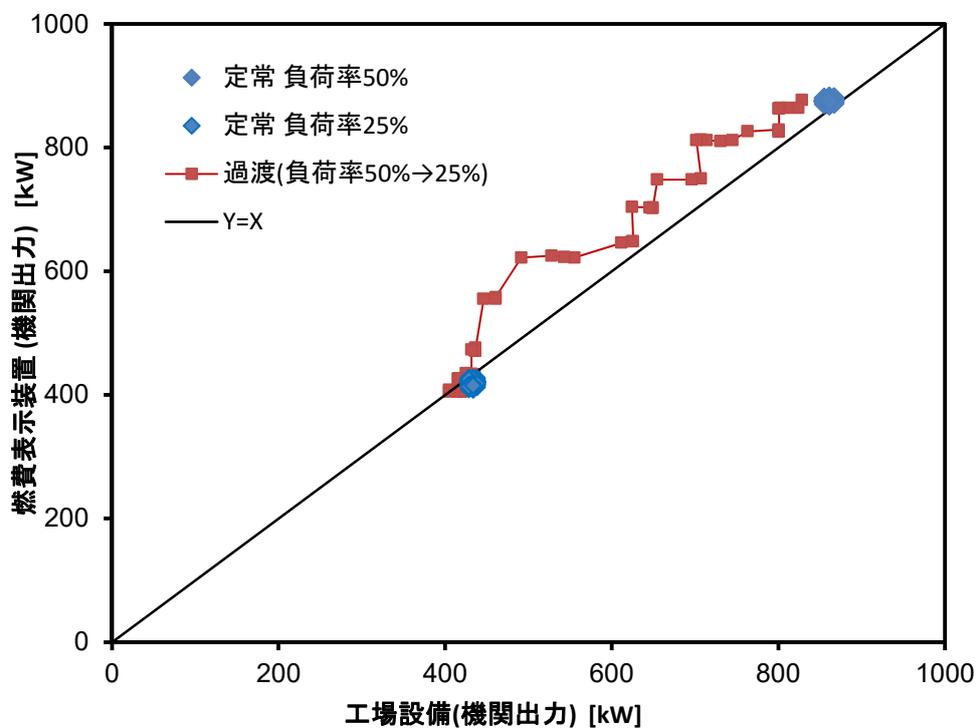


図 4-1-3-2 定常時と過渡時の機関出力の変化

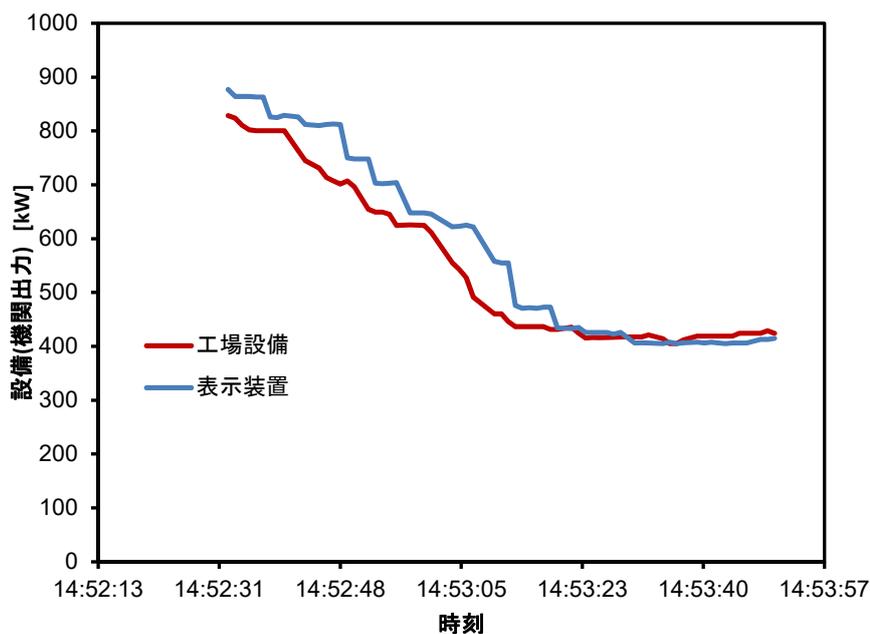


図 4-1-3-3 過渡時における機関出力の時間変化比較

4-2 総合試験評価

4-2-1 計測装置の評価とまとめ

4-2-1-1 計測装置の評価

工場設備の計測装置を正として、評価する。

1) 機関回転速度

計測日 A～D において表 4-2-1 に示す条件にて運転を行った。

工場設備の計測装置(水動力計付属の回転センサー)と表示装置(新たに取付けた回転センサー)における機関回転速度を比較した結果を図 4-2-1-1 に示す。図 4-2-1-1 より、機関回転速度については $Y = X$ (工場設備計測装置の機関回転速度と表示装置の回転速度が同じ) の関係性が確認でき、工場設備の計測装置における機関回転速度と表示装置における機関回転速度はよく一致していることがわかる。また、表示装置における機関回転速度のばらつき率を図 4-2-1-2 に示す。なお、ばらつき率は定常運転時において負荷が安定運転に入ってから 10 分間の 1 秒間隔の計測データの平均値及び標準偏差を求め、それらを(1)式に代入し、ばらつき率を算出した。他の要素(機関出力、燃料ガス発熱量等)にもこの式を用いて、ばらつきを評価する。

図 4-2-1-2 より、定常運転において機関回転速度のばらつきが 0.2% 以下であり、ほとんどばらつきがないことがわかる。

$$\text{ばらつき率} = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平均値}} \quad (1) \text{ 式}$$

『ばらつき率 ≤ 表 2-1-1-3 で示している JIS B8003 における許容誤差』であれば、「良」と判断する。

表 4-2-1 試験時の運転条件

計測日	定格機関回転速度 [min ⁻¹]	試験サイクル*
A	720	E3
B	720	E2
C	750	E3
D	800	E3

試験サイクル*: JIS B8008-4⁴⁾に記載する試験サイクルとは、機関の用途に定義され、船舶推進用では E3(プロペラ則による運転)と E2(機関回転速度一定:可変ピッチプロペラ用)がある。

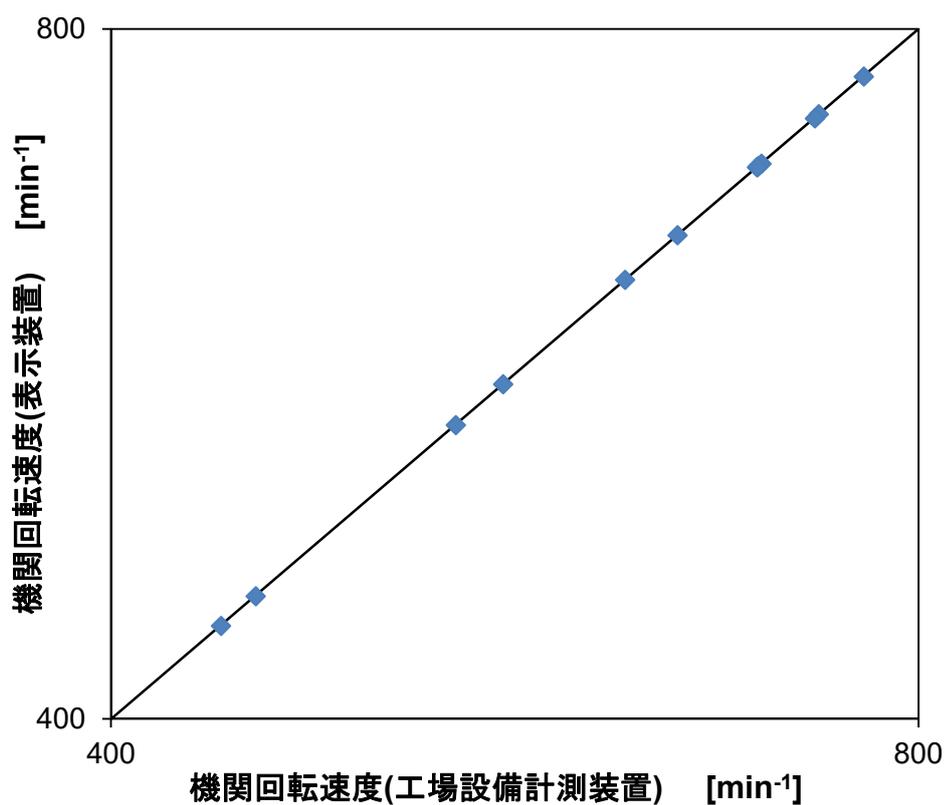


図 4-2-1-1 定常運転における機関回転速度の精度

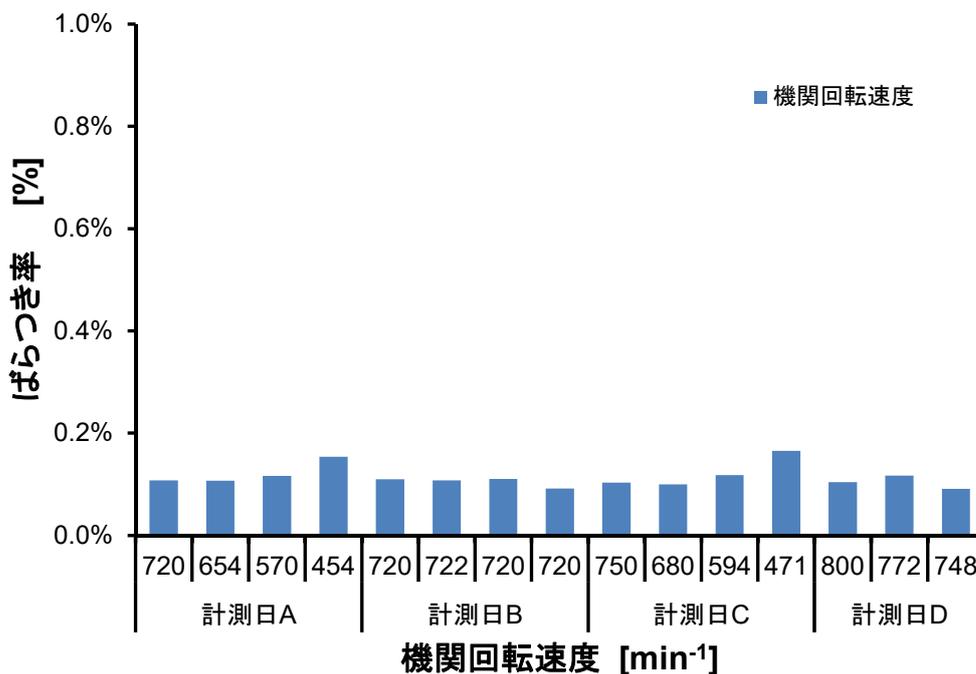


図 4-2-1-2 定常運転における機関回転速度のばらつき率比較

2) 機関出力

工場設備の計測装置(水動力計)と表示装置(軸馬力計)における機関出力を比較した結果を図 4-2-1-3 に示す。図 4-2-1-3 より、機関出力については $Y = X$ (工場設備計測装置の機関出力と表示装置の機関出力が同じ) の関係性が確認でき、工場設備計測装置における機関出力と表示装置における機関出力はよく一致していることがわかる。また、表示装置における機関出力のばらつき率を図 4-2-1-4 に示す。

図 4-2-1-4 より、計測日 C 以前におけるデータでは負荷率が低いほど、ばらつきが 1% を超えているが、軸馬力計に調整不足があったためであり、再調整を行った結果、図 4-2-1-4 中の計測日 D のデータはばらつきが抑えられていることを確認できる。

但し、精度を維持するにはディーゼル/ガス機関の運転前に定期的なゼロ点等の調整が必要である。

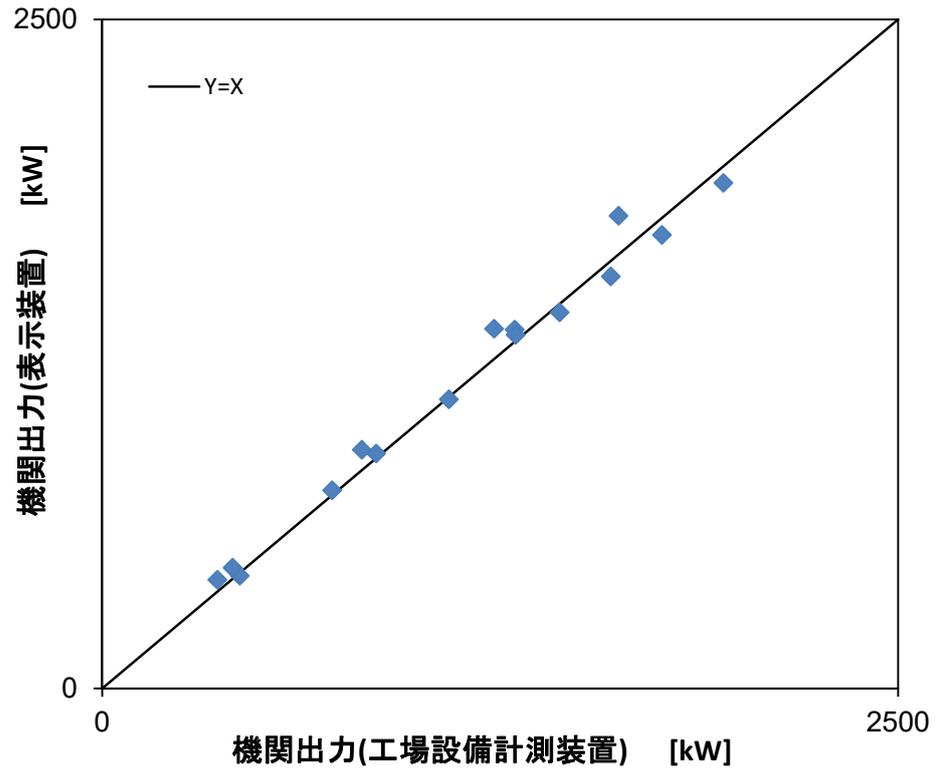


図 4-2-1-3 定常運転における機関出力の精度

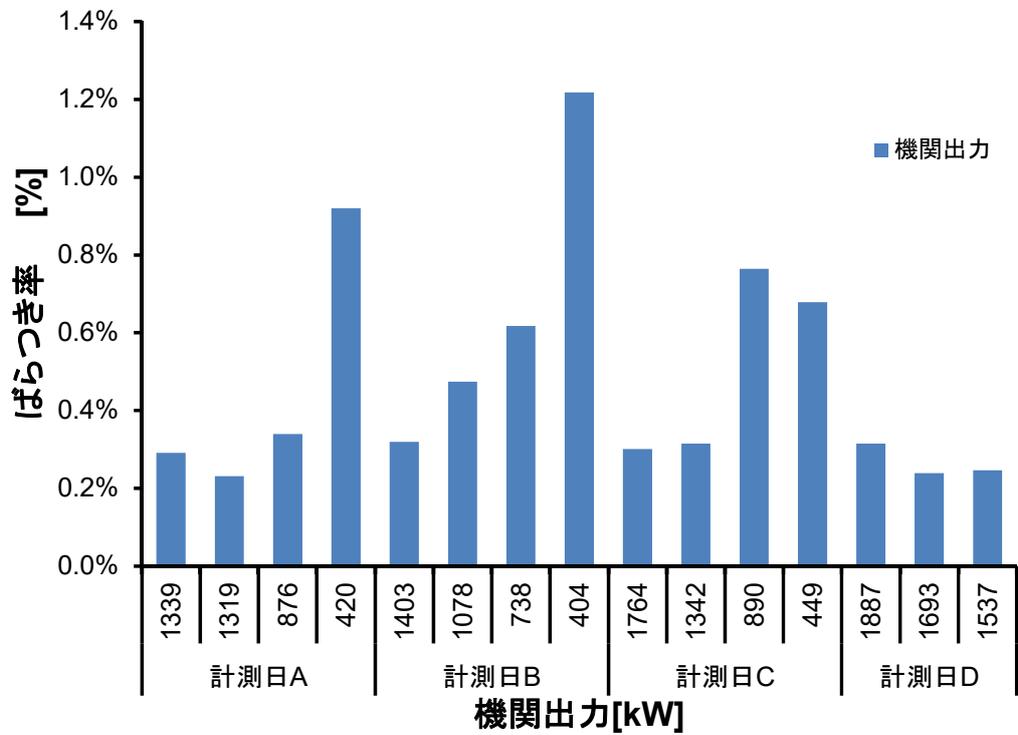


図 4-2-1-4 定常運転における機関出力のばらつき率比較

3) 燃料ガス発熱量

船用用途としてのディーゼル／ガス機関における燃料ガスは LNG(液体天然ガス)が主流であり、本供試試験においても燃料ガスは LNG を使用するため、LNG のタンク残量、燃料ガスの消費量によって、燃料ガスの発熱量が変動することがわかっており、燃料消費量に影響を与えるため、燃料ガス発熱量の誤差について試験する。

工場設備の計測装置(燃料ガス発熱量計)と表示装置(新たに設置した燃料ガス発熱量計)における燃料ガス発熱量を比較した結果を図 4-2-1-5 に示す。図 4-2-1-5 より、燃料ガス発熱量については $Y = X$ (工場設備計測装置の燃料ガス発熱量と表示装置の燃料ガス発熱量が同じ)の関係性が確認でき、工場設備計測装置における燃料ガス発熱量と表示装置における燃料ガス発熱量はよく一致していることがわかる。また、表示装置における燃料ガス発熱量のばらつき率を図 4-2-1-6 に示す。

図 4-2-1-6 より、定常運転において燃料ガス発熱量のばらつきが最大で 0.5%であり、燃料ガス発熱量のばらつきはほとんどないことがわかる。

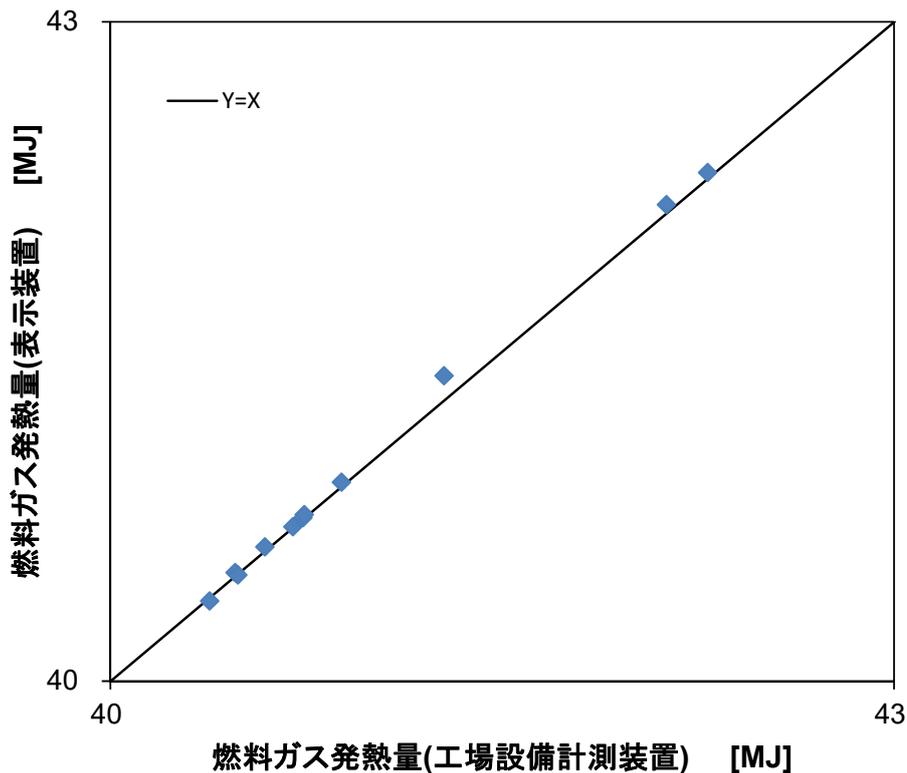


図 4-2-1-5 定常運転における燃料ガス発熱量の精度

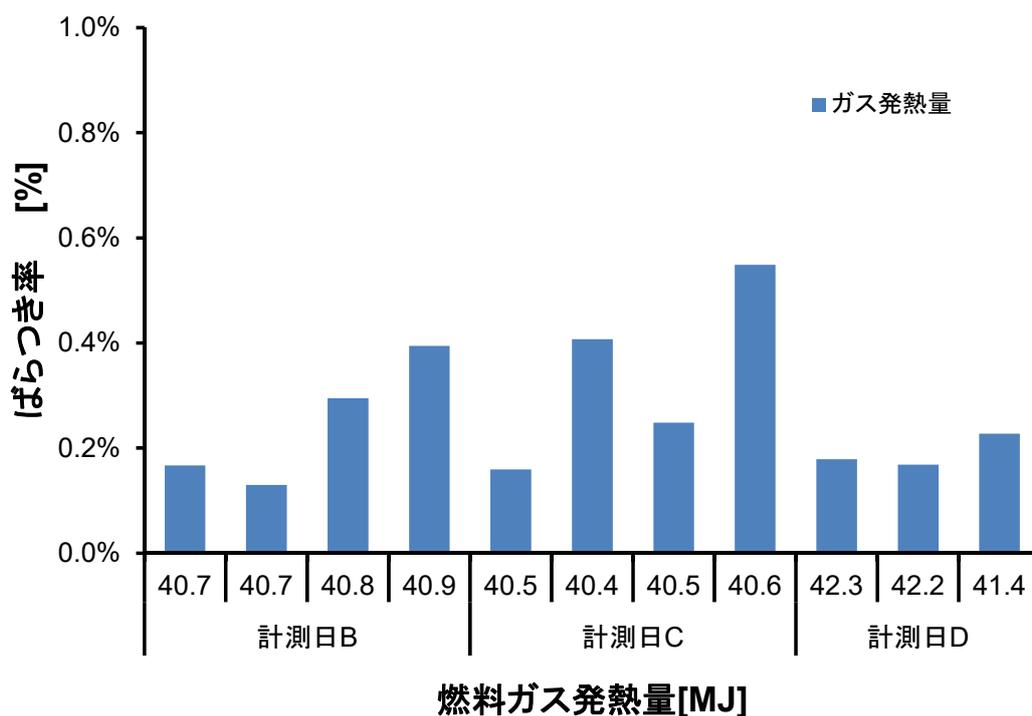


図 4-2-1-6 定常運転における燃料ガス発熱量のばらつき率比較

4) 燃料ガス流量

工場設備の計測装置(燃料ガス流量計)と表示装置(本試験用に設置した燃料ガス流量計)における燃料ガス流量を比較した結果を図 4-2-1-7 に示す。図 4-2-1-7 より、燃料ガス流量について、計測日 B における計測データは計測機器の調整不足及び不具合のため、 $Y = X$ (工場設備計測装置の燃料ガス流量と表示装置の燃料ガス流量が同じ)の正比例関係から外れていることがわかる。計測機器の再調整以降は $Y = X$ の正比例関係が確認できる。

また、表示装置における燃料ガス流量のばらつき率を図 4-2-1-8 に示す。

図 4-2-1-8 より、計測日 B において設備側の燃料ガス流量計の調整不良のため、設備側の流量計と表示装置側の流量計との誤差が大きくなったが、その燃料ガス流量計を調整することによって、それ以降の燃料ガス流量についてはばらつきが小さくなることを確認した。

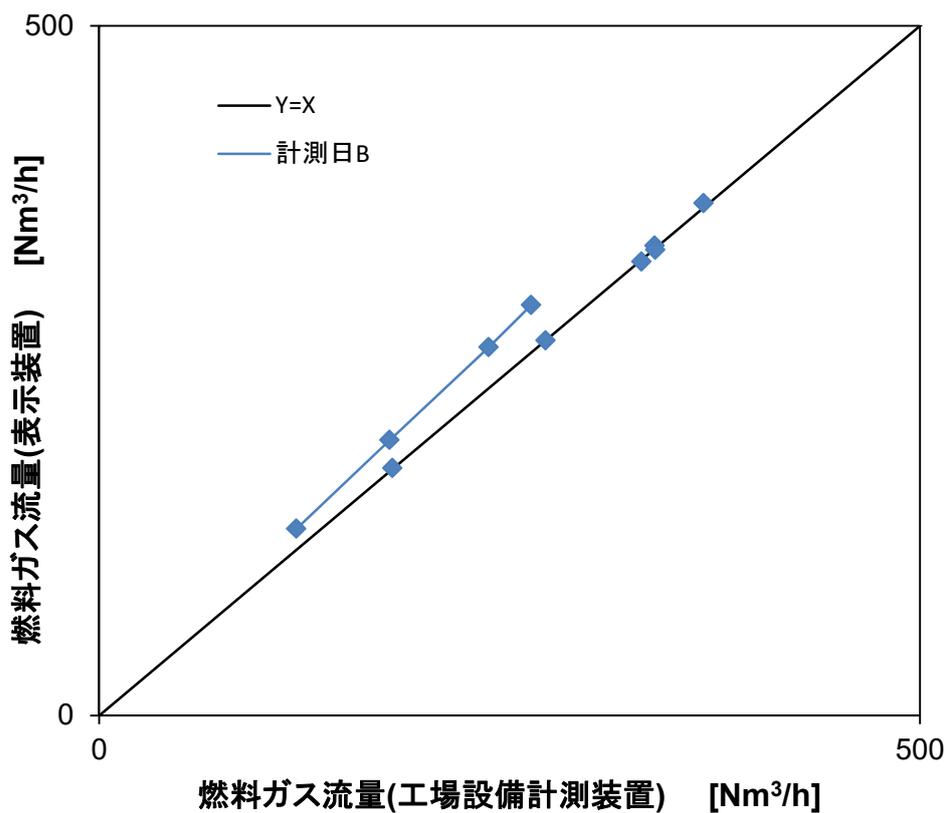


図 4-2-1-7 定常運転における燃料ガス流量の精度

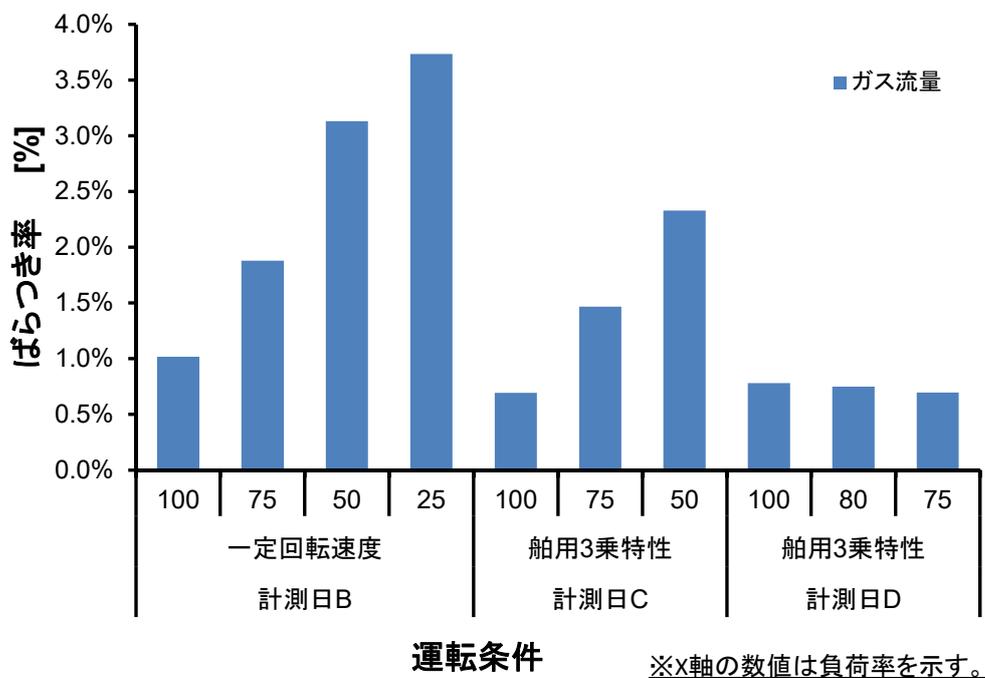


図 4-2-1-8 定常運転における燃料ガス流量のばらつき率比較

5) 燃料油流量

燃料油流量計は本装置において非常に重要な計測機器であり、より良い精度が求められることから、燃料油流量計のレイアウト、数量と精度の関係を明確にするため、表示装置における燃料油消費量(送り、戻り共)のばらつきを調査した。その結果を図 4-2-1-9 に示す。

図 4-2-1-9 より、送り側の燃料油消費量のばらつきよりも戻り側の燃料油流量のばらつきが大きいことがわかる。これは図 4-2-1-10 に示すように定常運転において戻り側の流量が変動しているためであり、戻り側の流量計をなくし、図 4-2-1-11 に示すように送り側の燃料油流量計 1 台とすることで、図 4-2-1-12 に示すようにばらつきがなく、安定した値となることが確認できた。

従って、送り側の燃料油流量計 1 台とし、燃料油配管系統を変更した方が計測精度及びコスト面を考慮すると良いことを確認した。

今回は質量方式の燃料油流量計を用いたが、容積式燃料油流量計が一般的である。

そこで、流量計の種類による燃料消費率に与えるリスクについて燃料油性状の違いを例題として調査した。

工場の燃料油補給時に石油供給業者から入手する燃料油性状のうち、密度、発熱量、セタン価の年間変化を図 4-2-1-13 ～ 図 4-2-1-15 に示す。図 4-2-1-13 ～ 図 4-2-1-15 から、燃料油を補給する場所や時期によって燃料油性状、とりわけ燃料油密度、発熱量、セタン価*が変化することから、これらは燃料消費率に大きな影響を与える。

そのうち、密度については容積式流量計を採用した場合、密度を一定として、燃料消費率を計算した場合、図 4-2-1-13 に示すように密度の変化に伴い、燃料消費率に対する誤差が生じ、正確な燃料消費率を表示することができなくなる。

従って、質量式流量計を採用することによって密度の影響を打ち消すことが可能である。

また、発熱量及びセタン価の変化にはどんな流量計でも無関係に燃料消費率に影響を与えるため、これらの変化が燃料消費率の誤差となることを把握する必要がある。

セタン価*:JIS 2280-4⁵⁾により、ディーゼル燃料を規定のエンジン試験で標準燃料と比較して得られる着火性の尺度といい、この値が大きいほど、着火性が良いことを意味する。

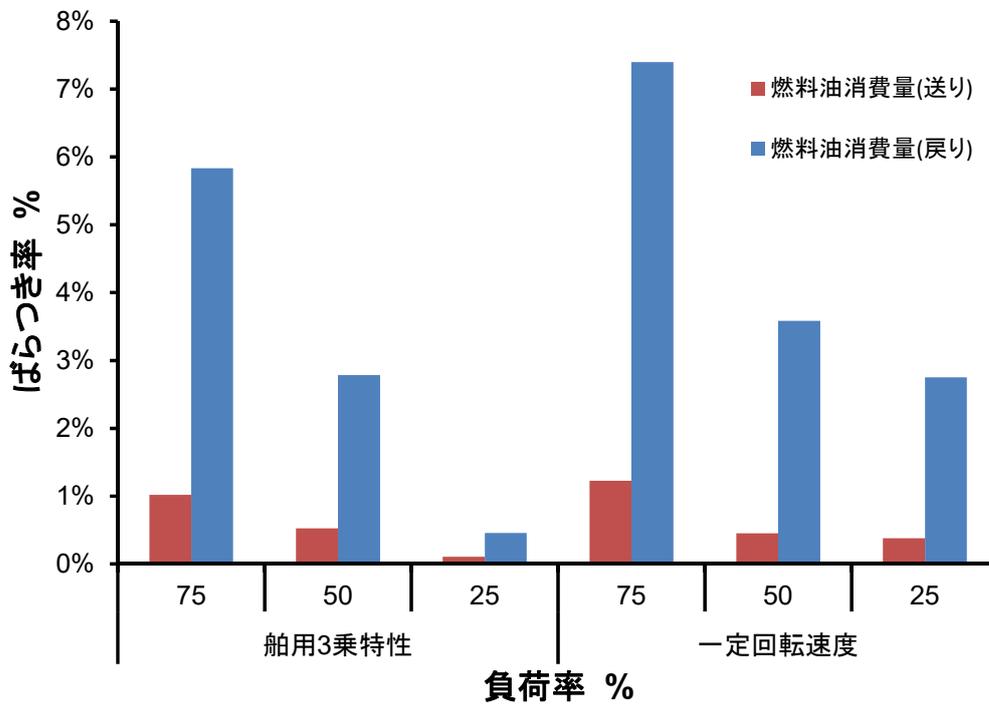


図 4-2-1-9 燃料油消費量のばらつき

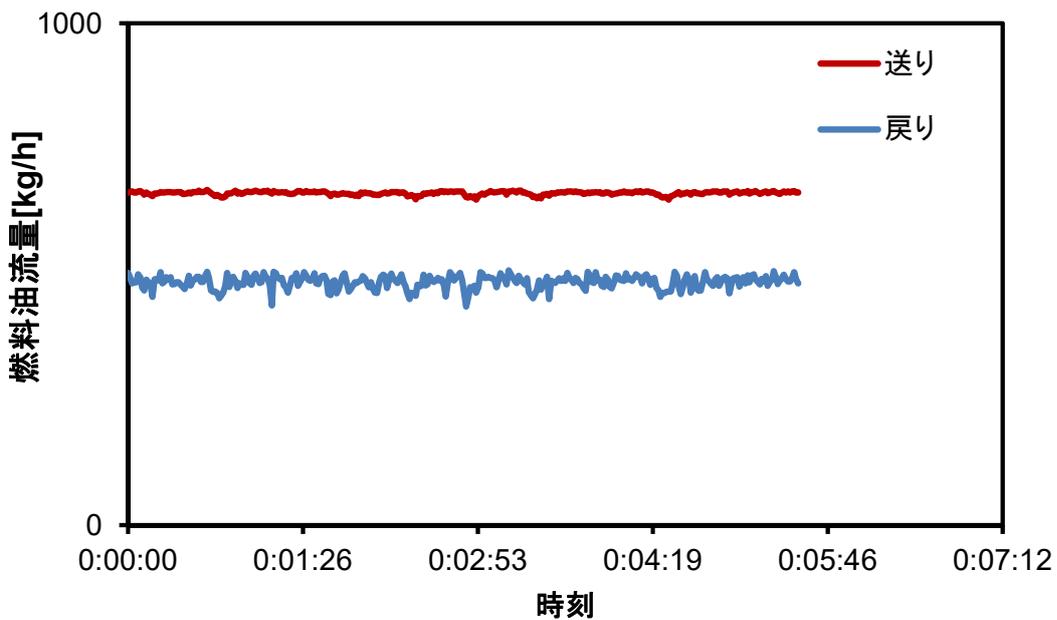


図 4-2-1-10 定常運転時における燃料油流量計(送、戻)の挙動

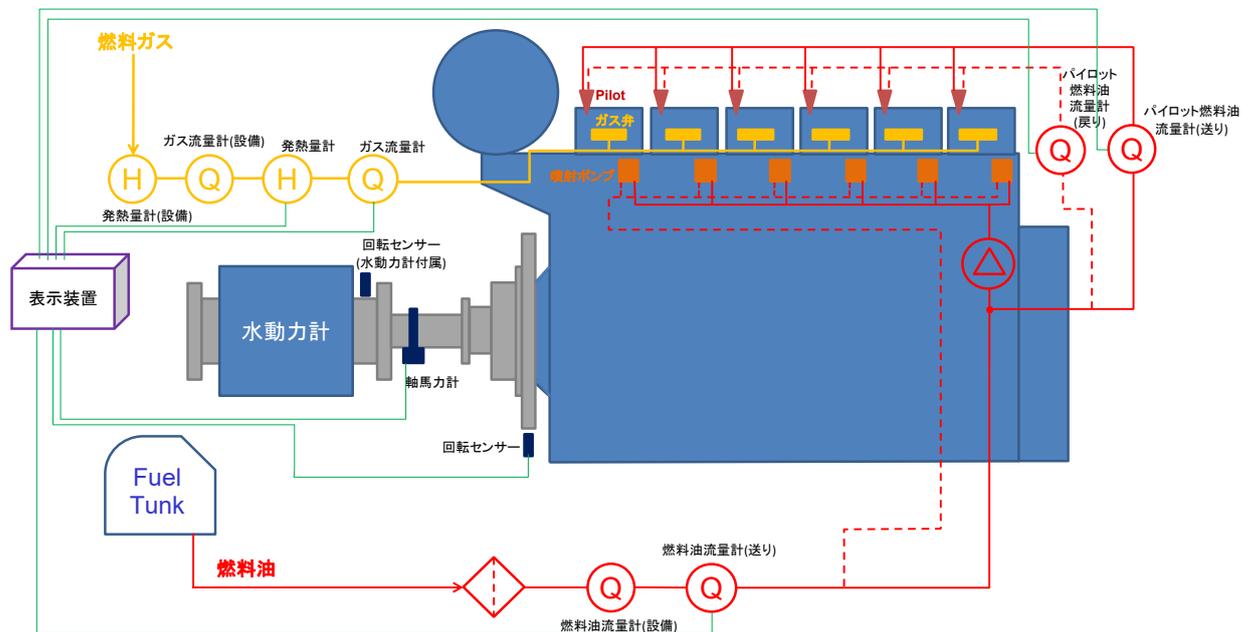


図 4-2-1-11 燃料油流量測定方法 (F0 系統図 改良型)

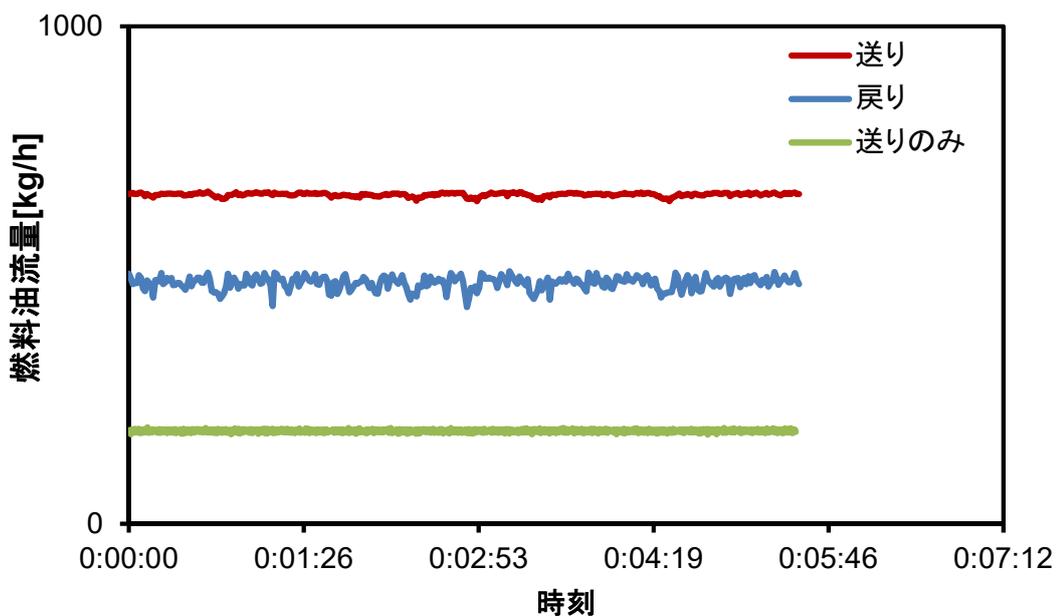


図 4-2-1-12 定常運転時における燃料油計測システムの違いによる流量挙動

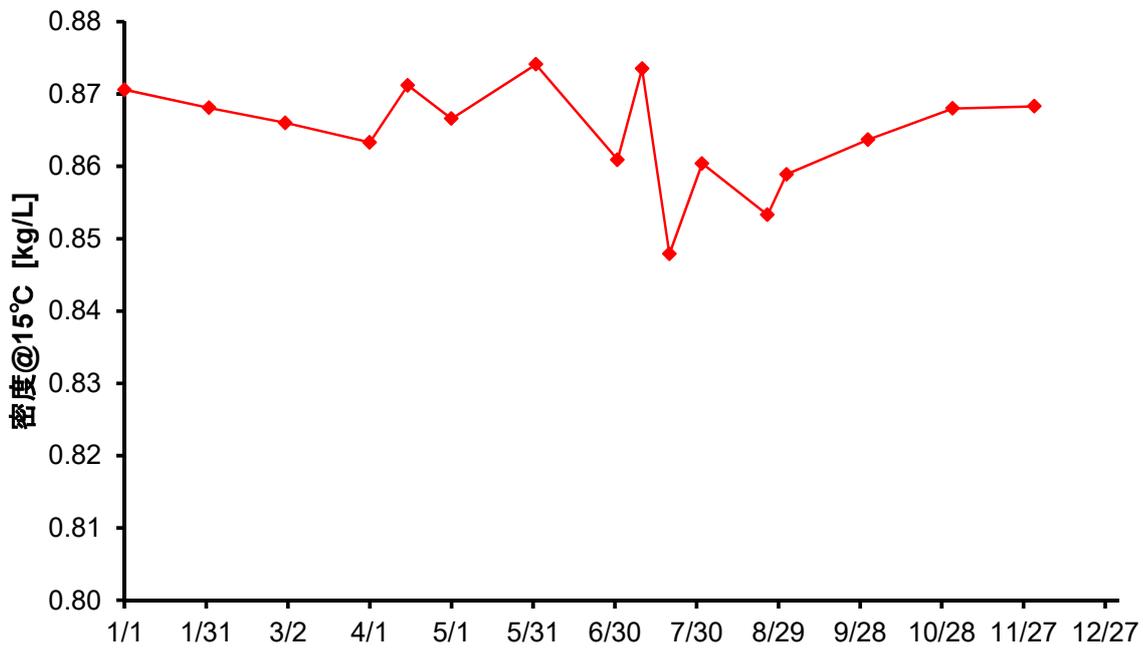


図 4-2-1-13 年間の燃料油密度変化

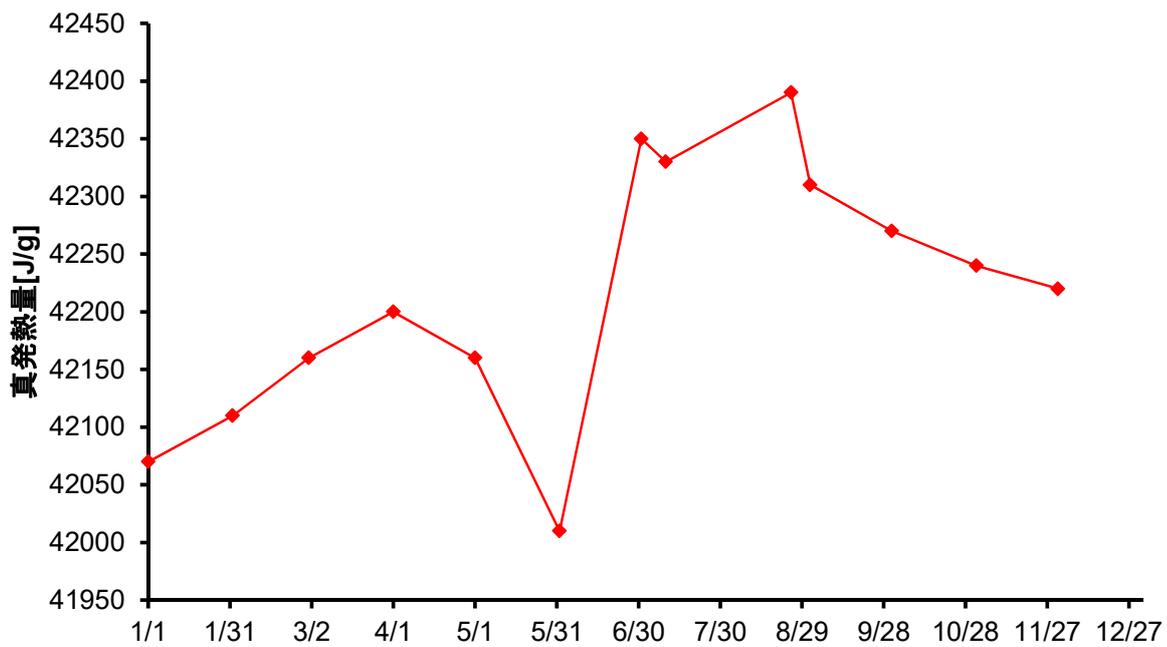


図 4-2-1-14 年間の燃料油真発熱量変化

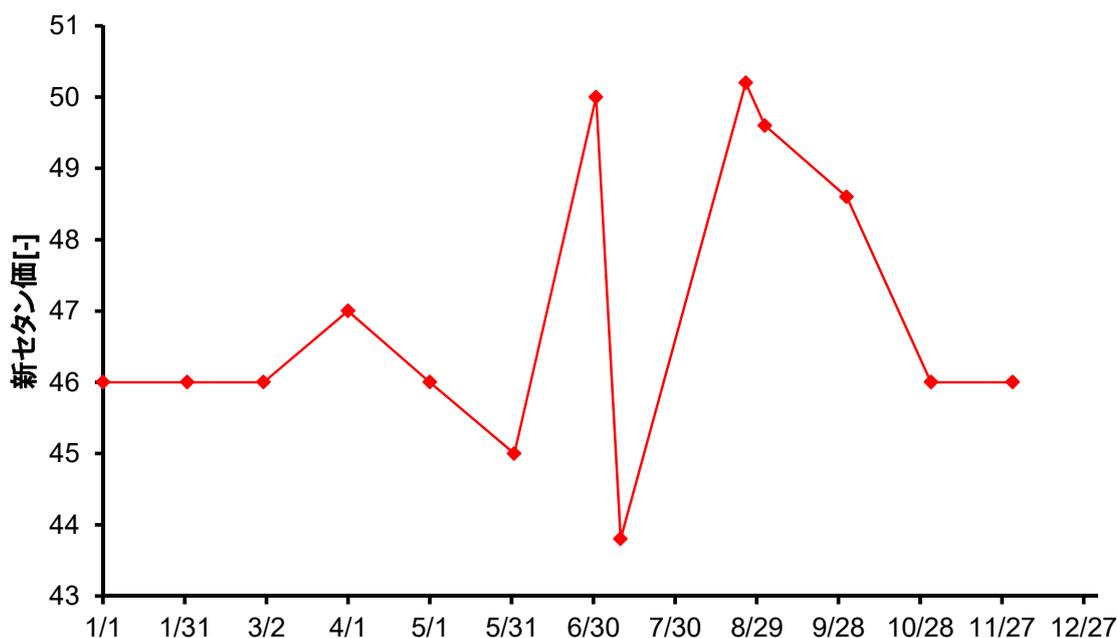


図 4-2-1-15 年間の燃料油セタン価変化

6) パイロット燃料油消費量

本研究開発で使用したディーゼル／ガス試験機関はパイロット噴射用の噴射システムが搭載され、ガスモードにて運転時に燃料油を少量パイロット噴射させ、燃料ガスを点火させている。

ガスモード運転時におけるパイロット燃料油消費量を工場設備の流量計とパイロット用の流量計と同時に計測し、その結果の比較を行った。その結果を図 4-2-1-16 に示す。図 4-2-1-16 より、工場設備の流量計と比較すると表示装置に接続された燃料油流量計による流量は若干低くなっているが、 $Y = X$ (工場設備計測装置のパイロット量と表示装置のパイロット量が同じ) の比例関係が確認できる。

ガスモードにおける燃費評価は燃料油の消費量を含める必要があり、パイロット流量は燃料ガスの流量、すなわち、発熱量と比較して、数パーセントに過ぎない。

パイロット流量は非常に少ないため、工場設備の設備 (図 4-2-1-11 中の燃料油流量計 (設備)) 及び表示装置で使用した流量計 (図 4-2-1-11 中のパイロット燃料油流量計 (送り、戻りの差)) で測定可能かを調査した。各流量計の測定範囲及び誤差を表 4-2-2 に示す。また、各流量計における流量と誤差の関係を図 4-2-1-17 に示す。

これらの表、図から測定する流量範囲が小さいほど、計測誤差が大きくなることがわかり、ディーゼル／ガス試験機関におけるパイロットの流量範囲を図 4-2-1-17 中に記載すると誤差は A 社、B 社共に大差はなく、0.3～0.9% となることがわかる。

従って、ガスモード、ディーゼルモードでも全体の燃料消費量の発熱量に対して数パーセントのパイロット燃料油発熱量であり、そのパイロット流量の誤差が±0.3%~0.9%としても大きな影響はないと考えられる。

例えば、パイロット流量(発熱量換算)で全体の3%とすると、最大誤差は±0.9%であるため、2.973%~3.027%となり、誤差は±0.027%程度であり、影響度は少ない。

以上のことから、パイロット用の燃料油流量計(送り、戻り)は必要なく、ディーゼル用燃料油流量計で代用可能と考える。

但し、ディーゼル用燃料油流量計はパイロット流量が測定範囲内にあり、その範囲において誤差が±1%以内である条件を満たす必要がある。

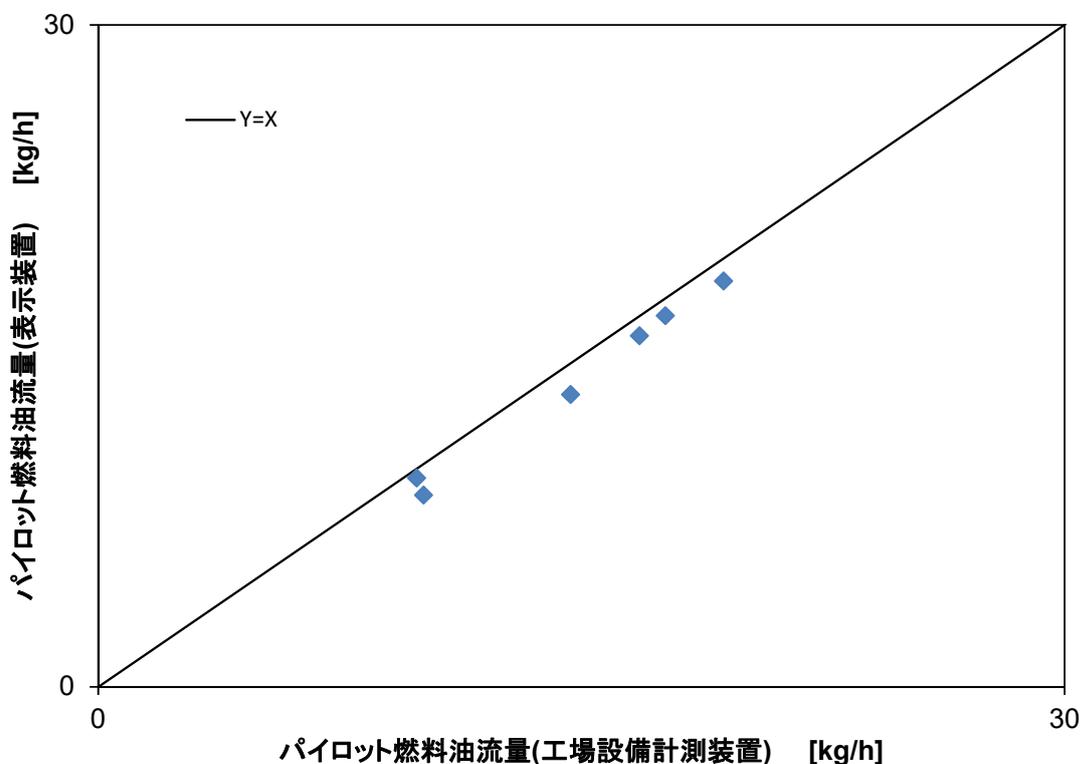


図 4-2-1-16 定常負荷域におけるパイロット噴射量の計測精度

表 4-2-2 燃料油流量計の誤差に関する仕様

	A 社		B 社	
測定範囲	常用質量流量 [kg/h]	1~1090	常用質量流量 [kg/h]	~400
誤差	<27 kg/h	±0.027/流量*100%	<20 kg/h	±0.03/流量*100%
	27~1090 kg/h	読取値の±0.1%	20~400 kg/h	読取値の±0.15%

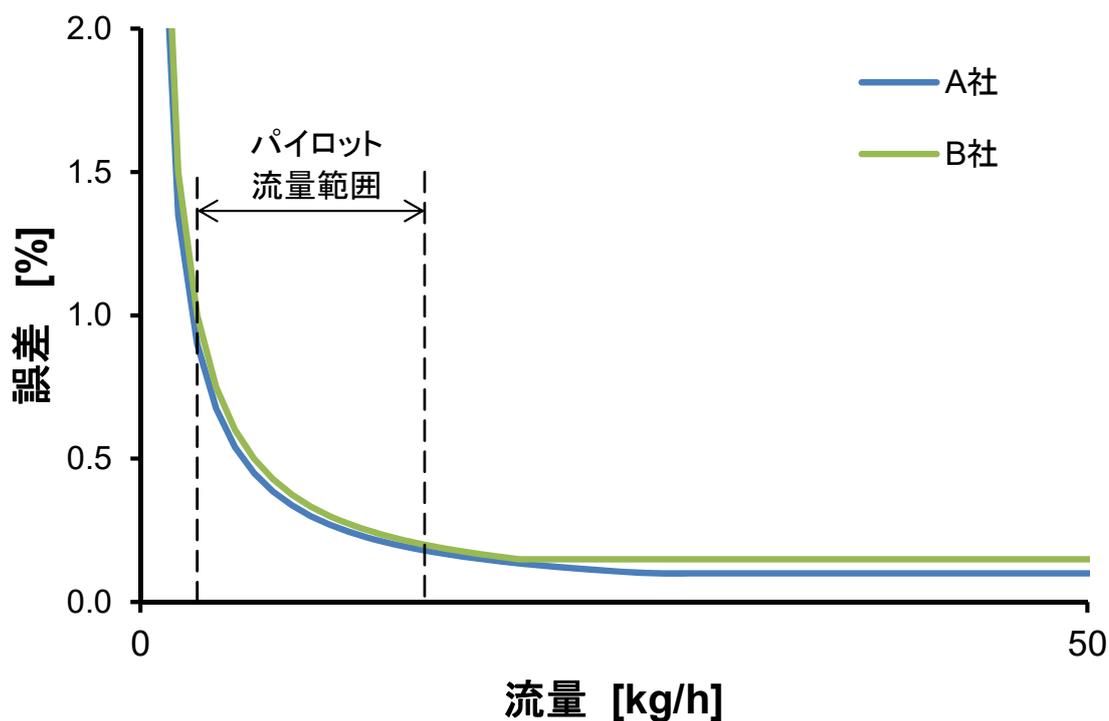


図 4-2-1-17 各燃料油流量計の誤差

4-2-1-2 まとめ

陸上総合試験及び総合試験評価における結果から次のことが確認され、商用化に向けての方向付けが完了した。最終的なシステムを図 4-2-1-18 に示す。

- ・計測精度及びコスト削減の観点から燃料油の戻りライン中の流量計は不要であり、戻りラインを送りラインの流量計下流に戻すよう配管する。
- ・パイロット燃料油だけを計測する流量計は不要であり、ディーゼル運転時の燃料油流量計を使用する。但し、ディーゼル用燃料油流量計はパイロット流量が測定範囲内にあり、その範囲において誤差が±1%以内である条件を満たす必要がある。
- ・負荷変動時の燃料消費率については機関出力、燃料流量の計測誤差が大きく、定常運転時の燃料消費率よりも誤差が大きいものと認識する必要がある。しかし、計測機器を含め、同一の船舶において同一の表示装置を使用している場合、負荷変動時の燃料消費率においても、過去の運航データとの相对比较により燃料消費率低減効果を評価可能と考える。

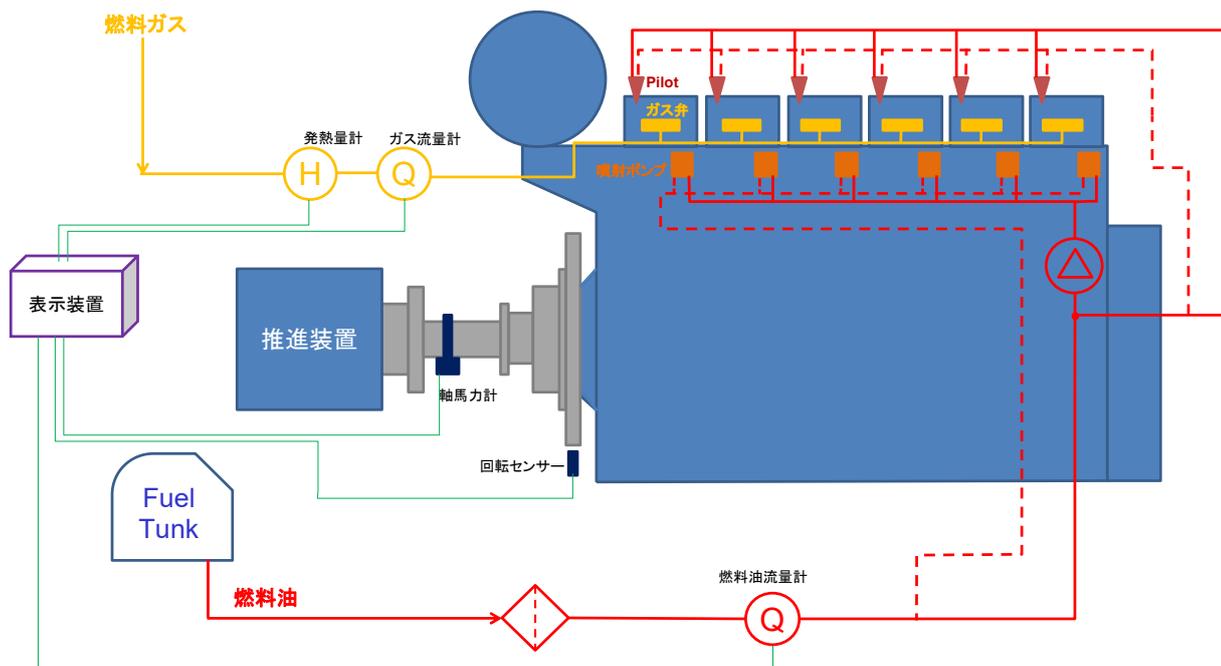


図 4-2-1-18 商用に向けたシステム

4-2-2 表示装置の評価

4-2-2-1 各種演算値の評価

平成 26 年度に実施した計測装置・表示装置結合試験により、機関が一定負荷の運転における各計測値および演算値が所定の誤差範囲に納まることを確認できた。そこで陸上総合試験では、負荷の変動を含んだ運転状態における燃料消費率、CO2 排出量など各種演算値の評価を行った。

確認時の運転方法は負荷の変動およびディーゼル運転・ガス運転の一方もしくは双方を含む運転とした。また、各種演算値の評価方法を以下に示す。

評価方法

- ・積算値ベースの演算値：

本装置で算出した日ごとの演算結果と計測データ（生値）から仕様の演算式により算出した結果とで差が無いことを確認する。なお、算出時に機関出力など瞬時値のみを計測している項目を用いる際は、1 日の平均を用いて演算を行っている。

- ・瞬時値ベースの演算値：

本装置で算出した演算結果と計測データ（生値）から仕様の演算式により算出した結果とで差が無いことを確認する。

- ・その他：

必要に応じて演算値ごとにデータの大きさ、変化量などについて妥当であるか確認する。

1) 燃料消費率（積算値）の評価

算出した燃料消費率（積算値）は表 4-2-2-1 に示すとおり、仕様で定めた演算式 [2-2-1-2 項 1)、2)、3)] による演算結果と差が無いことを確認した。

表 4-2-2-1 燃料消費率（積算値）の演算結果

演算項目	[表示装置算出値]と [計測データからの演算結果] との差	計測データ(一部省略)				判定
		燃料油消費量 [kg]	ガス燃料消 費量[kg]	ガス燃料発 熱量(平均) [MJ/Nm3]	運転時間[h] 上段:ディーゼル 下段:ガス	
ディーゼルモード燃料消費率[g/kWh]	0.0	621	—	—	3.4 0.0	OK
ガスモード燃料消費率[kJ/kWh]	0	17	243	40.1	0.0 1.1	OK
DF燃料消費率[kJ/kWh]	0	382	380	39.8	2.0 1.9	OK

ここで使用燃料に関わらずディーゼル/ガス機関がどの程度効率よく運転できているかの指標となる、DF 燃料消費率*について更に評価を行うことにした。負荷パターン、使用燃料でどのように燃料消費率が変化するかを確認するため、図 4-2-2-1 に示すように、運転方法が異なるなる試験日 E~試験日 H に計測した 1 日平均の機関負荷率**と、DF 燃料消費率とを機関性能データとともにプロットし比較したグラフを図 4-2-2-2 に示す。

DF 燃料消費率*：ディーゼル燃料・ガス燃料を含めて、熱量単位で算出した燃料消費率[kJ/kWh]の本装置での表示名称。以降、本書では特にことわりがない限り、「DF 燃料消費率」と「燃料消費率」は同義として扱うものとする。

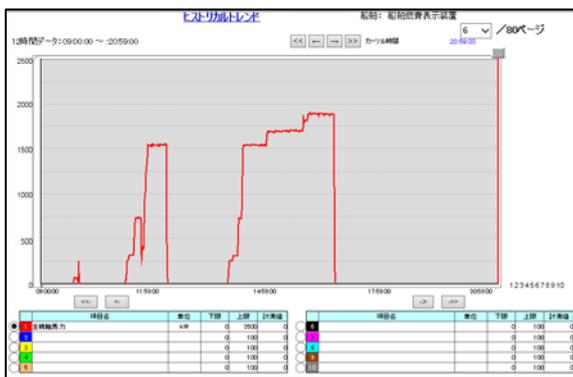
機関負荷率**：定格の機関出力[kW]（本装置内表示名称は「機関軸馬力」）を 100% とした、機関出力の割合。本書では、使用箇所に応じて「機関出力」と「負荷率」をそれぞれ用いているが、読み替えても意味は変わらない。



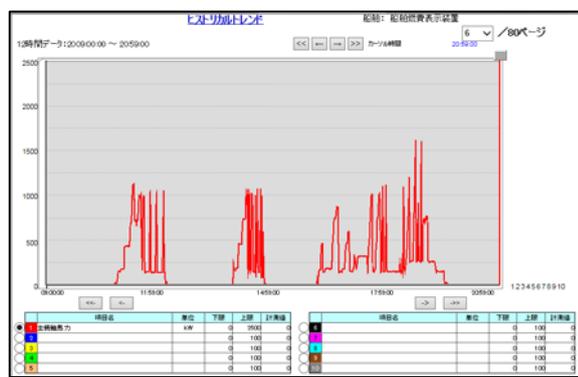
[計測日 E] (試験サイクル : E2、E3
ディーゼル運転)



[計測日 F] (試験サイクル : E2
ディーゼル/ガス運転)



[計測日 G] (試験サイクル : E3
ディーゼル/ガス運転)



[計測日 H] (試験サイクル : E3 (負荷変動多)
ディーゼル/ガス運転)

図 4-2-2-1 検証時の負荷パターン

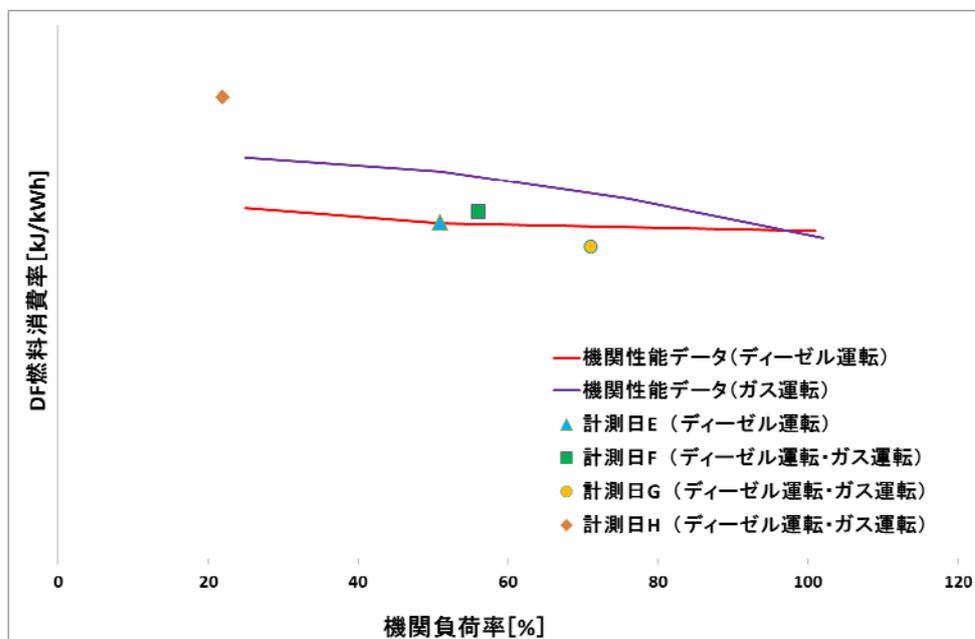


図 4-2-2-2 DF 燃料消費率と機関性能データ

図 4-2-2-2 を見ると、計測日 H のように本装置で計測した燃料消費率と機関性能データに大きな差があるデータがある。また、計測日 E～G に関しては一見、機関性能データ（ディーゼル運転）に近いように見えるが、計測日 F、計測日 G はガス運転を含んでおり機関性能データ（ガス運転）とは差がある。これらの原因としては、以下 1-1) ～1-5) のように各計測日、および機関性能データ計測時ではそれぞれ運転方法が異なることが要因として挙げられる

- 1-1) 機関負荷率／使用燃料の違い
- 1-2) 負荷変動の量・大きさの違い
- 1-3) 機関出力・回転速度の関係
- 1-4) 経時変化等によるエンジン性能の変化
- 1-5) A 重油の発熱量の違い

1-1) 機関負荷率／使用燃料の違い

1 日の平均負荷率の大きさにより燃料消費率は異なり、図 4-2-2-2（機関性能データ）に示すよう一般的には機関負荷率が大きいほど、燃料消費率は小さくなる。また、ディーゼル運転時とガス運転時での燃料消費率は異なるので、1 日におけるディーゼル運転、ガス運転の割合により燃料消費率も変わってくる。このことから燃料消費率を評価する際は、平均負荷率に加え、ディーゼル運転とガス運転の割合もあわせて評価する必要がある。

1-2) 負荷変動の量・大きさの違い

1 日の平均機関負荷率が同じであっても、図 4-2-2-1 [計測日 G] に示すように負荷変動が少なく定常状態が多い運転に比べると、図 4-2-2-1 [計測日 H] に示すように負荷変動が多く含まれる運転の方が燃料消費率は大きくなる。このことから燃料消費率を評価する際は、負荷変動の量・大きさもあわせて評価する必要がある。

1-3) 機関出力・回転速度の関係

機関出力が同じであっても、その時の回転速度によって、燃料消費率は異なる。機関性能データで示される燃料消費率は船用 3 乗特性上のもものとなり、図 4-2-2-3 に示すように 3 乗特性よりも機関出力が大きい領域では、機関性能データに比べ燃料消費量は多くなり、3 乗特性よりも機関出力が小さい場合は、燃料消費量が少なる傾向にある。ただし、エンジン毎の特性によりこの限りでは無い。これらのことより、燃料消費率を評価する際は、機関出力と回転速度の分布もあわせて評価する必要がある。

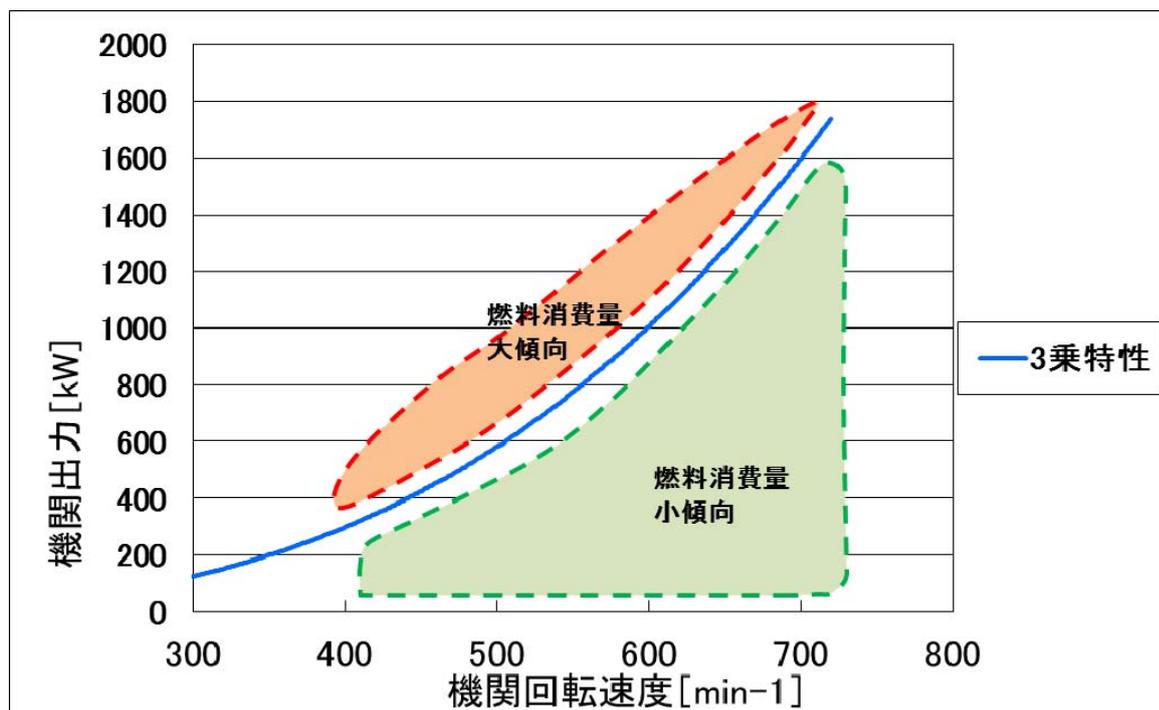


図 4-2-2-3 機関出力、回転速度と燃料消費率の関係の概念図

1-4) 経時変化等によるエンジン性能の変化

エンジンの主要部品の汚れ、摩耗、劣化、およびそれらの是正のための部品交換、調整などによる性能変化により、燃料消費率は影響を受け変化する。このことより経年変化による燃料消費率の変化を把握する必要がある。

1-5) 燃料油発熱量の違い

燃料ガスは発熱量を測定しているが燃料油に関しては測定していない。4-2-1-1 項 5)で述べたように、燃料油の発熱量、セタン価は給油時期や産出国の違いにより変化し、燃料油消費量はその影響を受ける。このことより燃料消費率の評価の際は、その時点における発熱量、セタン化を把握しておく必要がある。

これら要因は、相互に作用しており各要因が燃料消費率にどの程度影響をおよぼしているかを定量化するのは困難である。

以上のことから日ごとの燃料消費率（積算値）は、機関出力に対して消費した燃料の割合を示す効率相当にはなるが、運転方法により変動するので機関性能の評価を行うには適さない事がわかる。機関性能を評価するには同一条件のデータのみを抽出し、それを時系列で表して評価する方法などが考えられる。

2) 燃料消費率（瞬時値）の評価

算出した燃料消費率は表 4-2-2-2 に示すとおり、仕様で定めた演算式 [2-2-1-2 項 1)、2)、3)] による演算結果と差がない事を確認した。また、燃料消費率（瞬時値）のトレンドグラフを図 4-2-2-4 に示す。

表 4-2-2-2 燃料消費率（瞬時値）の算出結果

演算項目	[表示装置算出値]と [計測データからの演算結果] との差	計測データ(一部省略)			判定
		燃料油消費量 [kg]	ガス燃料消費 量[kg]	ガス燃料発 熱量 [MJ/Nm3]	
ディーゼルモード燃料消費率[g/kWh]	0.0	111	—	—	OK
ガスモード燃料消費率[kJ/kWh]	0	13	181	40.3	OK
DF燃料消費率[kJ/kWh]	0	25	291	39.9	OK

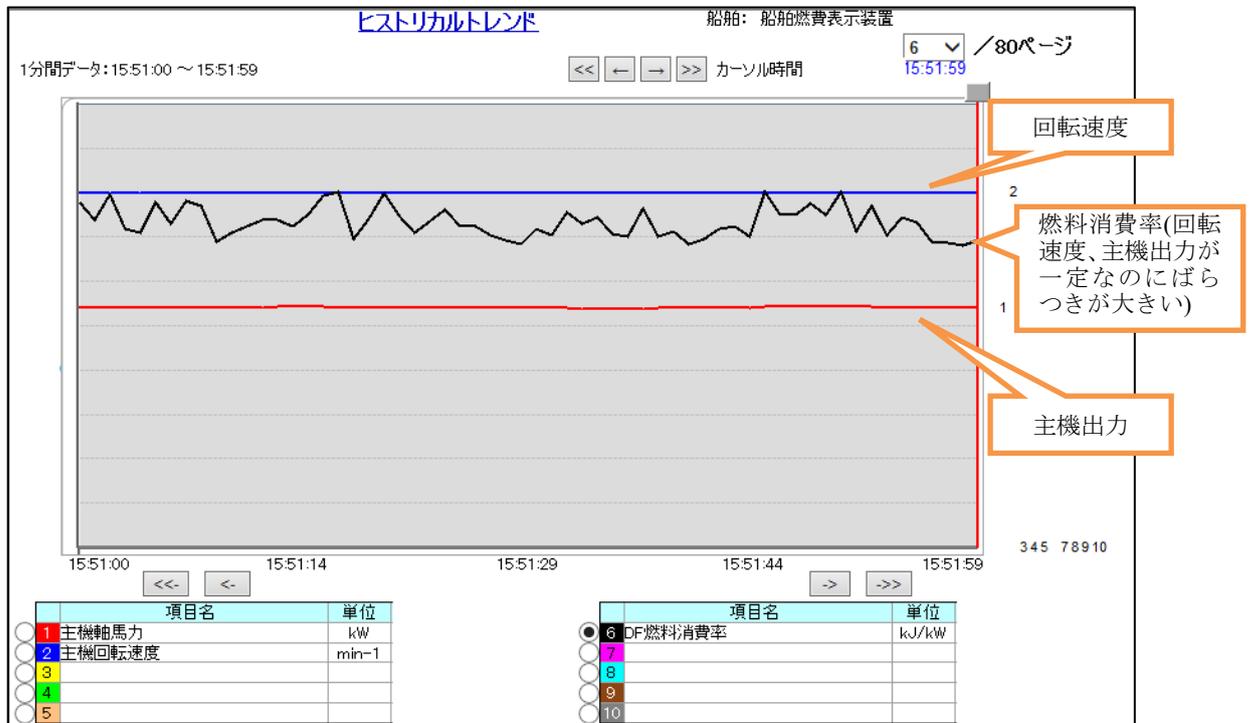


図 4-2-2-4 燃料消費率（瞬時値）のトレンドグラフ

図 4-2-2-4 に示されるように、機関出力が一定にも関わらず燃料消費率のばらつきが大きいことが確認された。図 4-2-2-5 にて燃料消費率の算出に関連する計測項目とあわせてトレンドグラフで確認すると、燃料油流量の変化と連動して、燃料消費率が変化していることが確認できた。これは 4-2-1 項 5) での検証結果より、燃料油戻り流量のばらつきの影響を受けているものと判断できる。

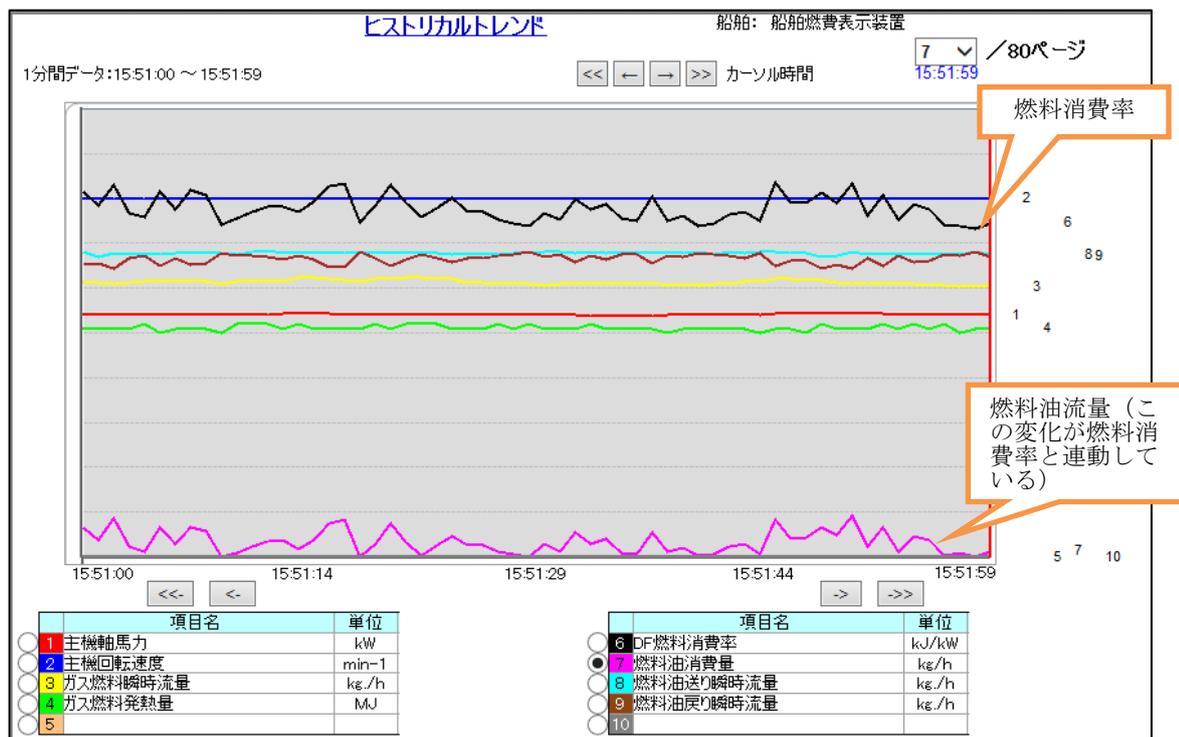


図 4-2-2-5 燃料消費率（瞬時値）と関連する計測項目のトレンドグラフ

これらのことから、燃料消費率（瞬時値）はばらつきが大きいので、それを加味したうえで数値だけではなくトレンドグラフなどと合わせて評価を行う必要がある。また、ばらつきに関しては、移動平均により取り除くことも可能であるが、平均区間をいくつにするかをばらつきの大きさ・周期などにより決める必要がある。図 4-2-2-6 に燃料消費率をいくつかのパターンで移動平均した結果を示す。この図から、移動平均は 20 区間（20 秒間）程度が好ましいと読み取れるが、平均区間が長くなると過渡時の応答も鈍くなるので燃料消費率を評価する目的によってはもっと短いほうが良い場合もある。

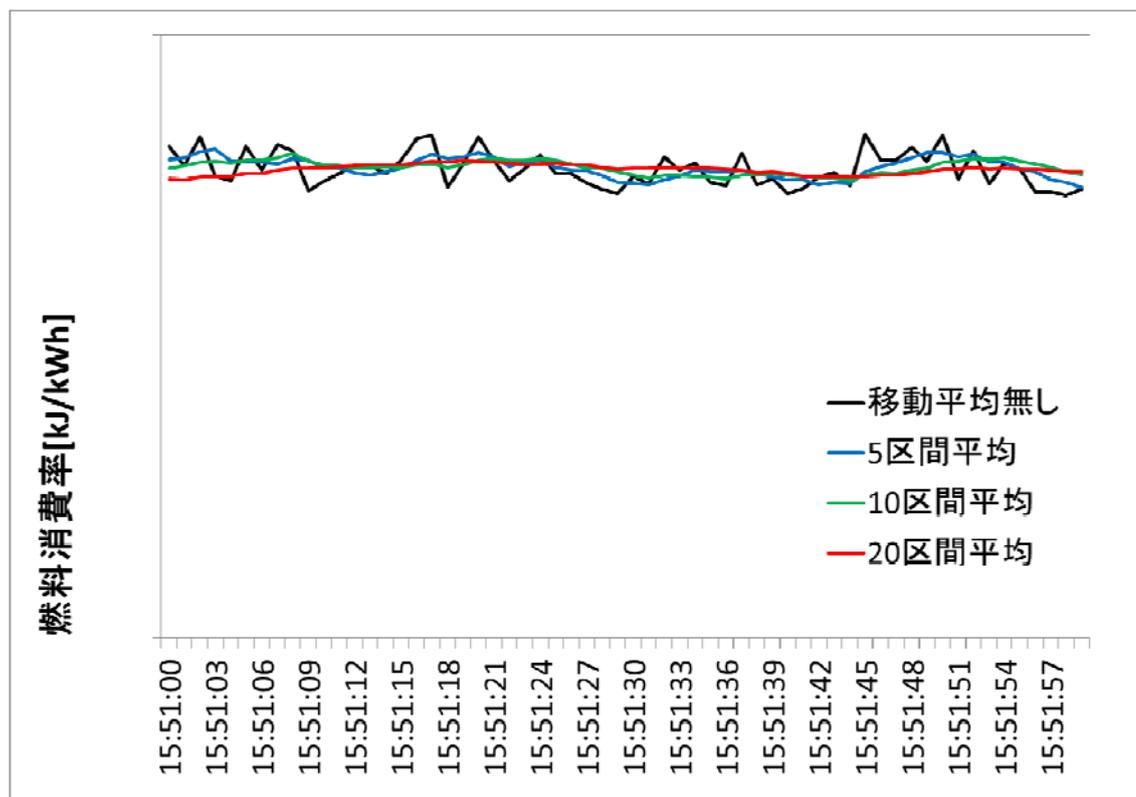


図 4-2-2-6 燃料消費率（瞬時値）の移動平均結果

3) CO2 排出量（積算値）の評価

算出した CO2 排出量（積算値）は表 4-2-2-3 に示すとおり、仕様で定めた演算式 [2-2-1-2 項 4)] による演算結果と差が無いことを確認した。

表 4-2-2-3 CO2 排出量（積算値）の算出結果

演算項目	[表示装置算出値]と [計測データからの演算結果] との差	計測データ				判定
		燃料油消費量 [kg]	ガス燃料消費 量[kg]	ガス燃料発熱 量(平均) [MJ/Nm3]	運転時間[h] 上段:ディーゼ ル 下段:ガス	
CO2排出量(ディーゼル運転)[t]	0.000	621	-	-	3.4 0.0	OK
CO2排出量(ディーゼル/ガス運転)[t]	0.000	34	881	41.7	1.3 3.0	OK

4) CO2 排出量（瞬時値）の評価

算出した CO2 排出量（瞬時値）は表 4-2-2-4 に示すとおり、仕様で定めた演算式 [2-2-1-2 項 4)] による結果と差が無いことを確認した。また、CO2 排出量（瞬時値）のトレンドグラフを図 4-2-2-7 に示す。

表 4-2-2-4 CO2 排出量（瞬時値）の算出結果

演算項目	[表示装置算出値]と [計測データからの演算結果] との差	計測データ			判定
		燃料油消費量 [kg/h]	ガス燃料消費 量[kg/h]	ガス燃料発熱 量 [MJ/Nm3]	
CO2排出量(ディーゼル運転)[t/h]	0.000	314	-	-	OK
CO2排出量(ガス運転)[t/h]	0.000	31	278	39.5	OK

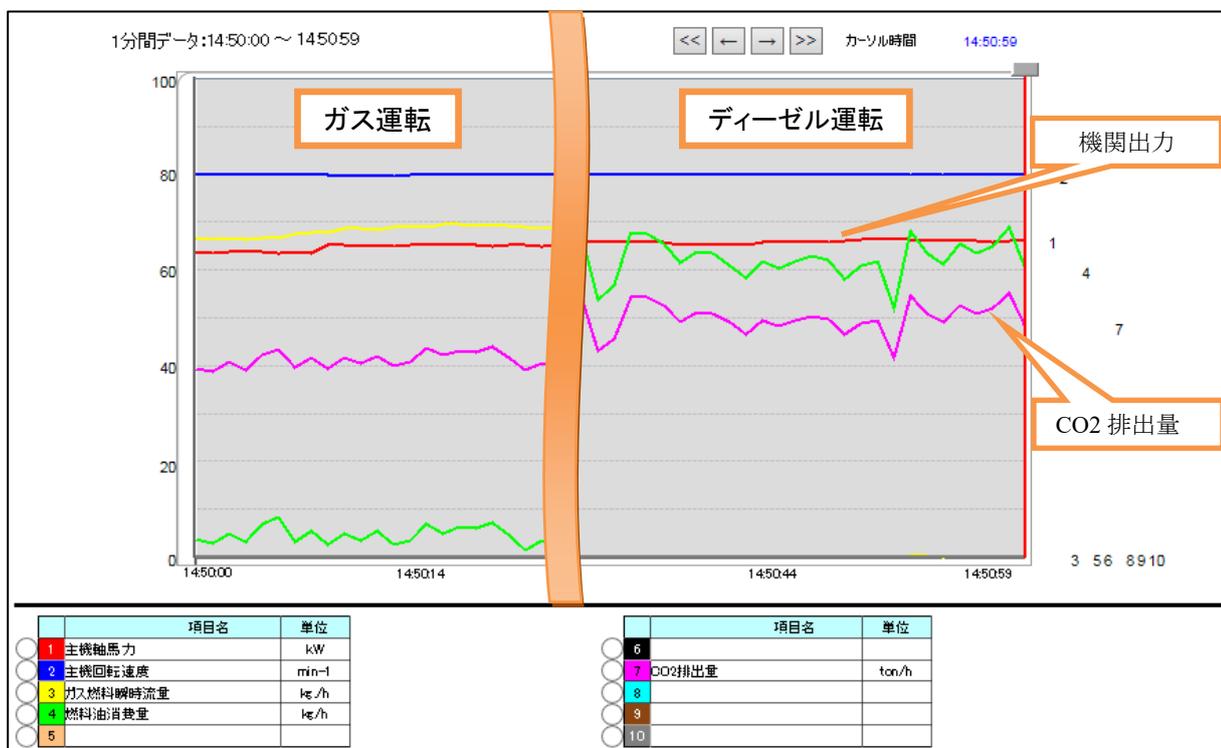


図 4-2-2-7 CO2 排出量（瞬時値）のトレンドグラフ

表 4-2-2-4 および図 4-2-2-7 からわかるように機関出力が同じであれば、ディーゼル運転時に比べ、ガス運転時の方が CO2 排出量は小さくなる。これは同一の機関出力時に必要とする燃料油消費量に対する CO2 排出量に比べ、燃料ガス消費量に対する CO2 排出量の方が少ないためである。

5) まとめ

表示装置の各種演算機能は、定常状態、過渡状態での負荷パターンにおいても、仕様通り正しく演算できることを確認した。

4-2-2-2 表示装置の連続安定稼働性（可用性）評価

計測装置に用いられている流量計などの機器に比べると、表示装置に用いられているPCやタッチパネル表示器、通信機器などの連続安定稼働性（可用性）は低いと云える。本装置では、PCにFA用途のものを採用するなど、耐環境性については船舶での利用に十分耐え得るものを採用しているが、連続安定稼働性能は内部のソフトウェアによって影響することもあり、実際の使用に近い状態で一定期間以上稼働させないと評価が行なえない。

そこで表示装置の長時間の運用において、機器の電源の入り切りが必要となる障害など、実運用上致命的な問題が生じないことの確認を目的として、連続安定稼働性能評価を行った。評価内容を以下に示す。

連続安定稼働性評価内容

1) 評価時のシステム構成

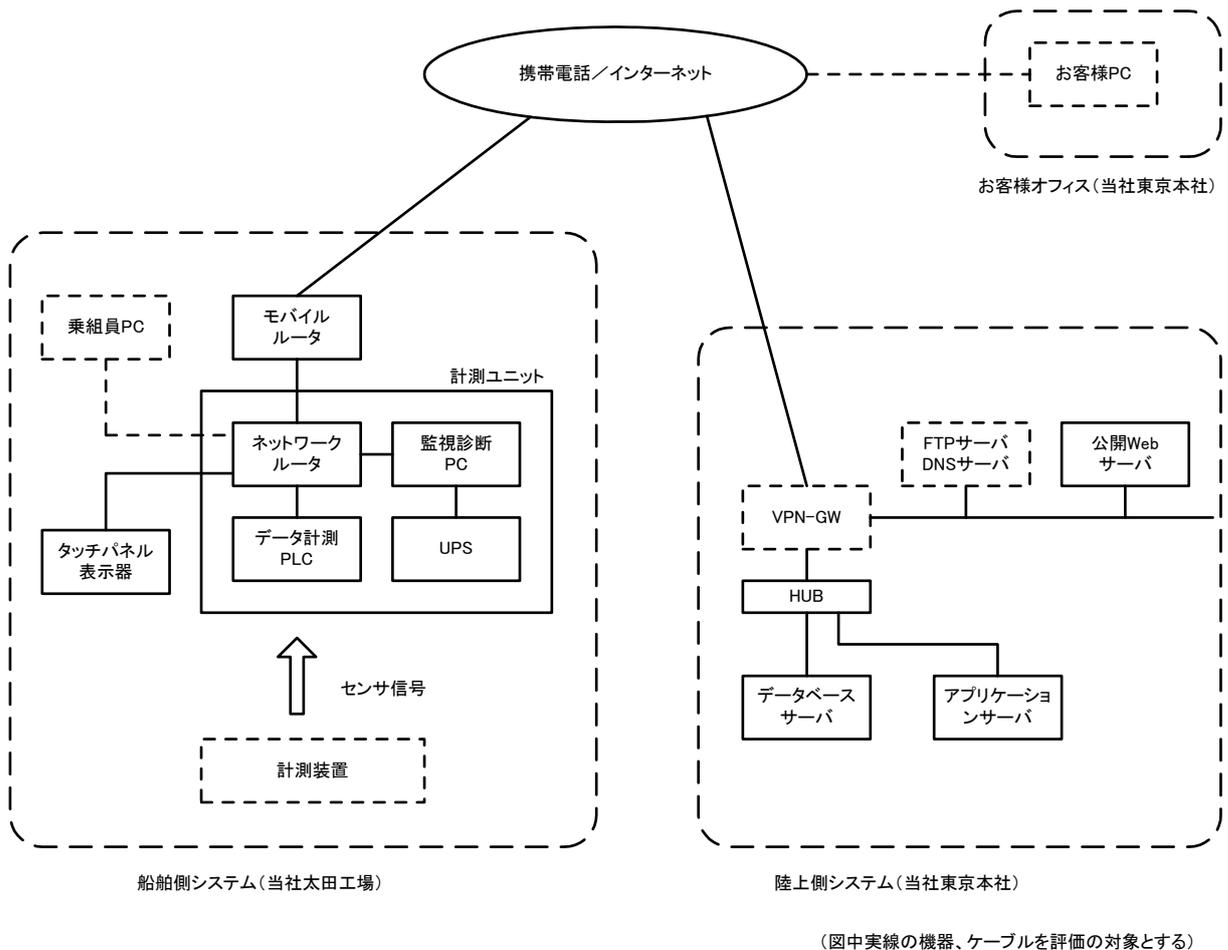


図 4-2-2-8 連続安定稼働性評価時のシステム構成

2) 評価方法（条件）

- ・陸上側システムは、評価期間中常時電源 ON とする。
- ・船舶側システムは、船種による運用方法の違いを考慮して、評価期間中常時電源 ON のパターン A と、朝電源 ON し、夕方電源 OFF を行うパターン B の二通りに対して実施する。
- ・評価期間はパターン A、パターン B で各一ヶ月間とする。
- ・図 4-2-2-8 に示す各装置が正常に動作していることを確認するため、期間中は以下の操作を計 20 回以上実施し、操作が完了することにより、各装置が正常であるものと判断する。

操作①：船舶側システムのタッチパネルモニタで、現在の計測データが表示されていることを確認する。

操作②：船舶側システムの乗組員 PC から監視画面を表示し、現在の計測データが表示されていることを確認する。

操作③：陸上側システムへお客様 PC から接続し、現在の計測データを表示できることを確認する。

- ・陸上側システム～船舶側システムの船陸間通信接続が維持されることを確認するため、アプリケーションサーバから監視診断 PC へ 1 分毎に接続確認を行い通信状況の確認を行う。10 分以上継続する通信断がなければ正常であるものと判断する。

3) 評価結果

表 4-2-2-5 表示装置耐久性評価結果

パターン	確認項目	実施回数	成功[回]	失敗[回]	判定	備考
パターンA	操作①	20	20	0	OK	評価期間日数: 32日間
	操作②	20	20	0	OK	
	操作③	20	20	0	OK	
	船陸間通信	10分以上の通信断回数: 0回			OK	
パターンB	操作①	20	20	0	OK	評価期間日数: 34日間 電源入切回数: 23回
	操作②	20	20	0	OK	
	操作③	20	20	0	OK	
	船陸間通信	10分以上の通信断回数: 0回			OK	

表 4-2-2-5 に示す通り、電源 ON のままでの連続運用（パターン A）、および日々電源の入り切りを行う運用（パターン B）のいずれも評価期間中に障害などは発生せず、実際の運用にも十分耐え得るものと判断できる。

4-3 改良設計変更

4-3-1 運転方法の可視化

1) 現状の課題

4-2-2-1 項 1) の評価により、実際の運転では、機関出力や回転速度の変動があり、燃料消費率は、定常負荷の工場試験時のものとは異なる結果となる。しかし、その値は実際の機関出力に対して利用された燃料の効率を示すものであり、どのような運転によってその結果に至ったかを把握することは、省エネ運航支援に繋がる。また、実際の運用においては、エンジンの経年変化により燃料消費率が影響を受ける場合もある。現状、運転データからそれら进行评估するには、トレンドグラフから分析を行うしかなかく作業効率が良くない。

2) 改良・設計変更

運転方法を視覚的に評価し易いよう、以下の表示機能を追加した。

2-1) 回転速度－機関出力分布表示機能

横軸に機関回転速度、縦軸に機関出力の分布図を、船用 3 乗特性とともに表示することにより、運転領域の把握を目的とした表示機能を追加した。その画面イメージを図 4-3-1-1 に示す。

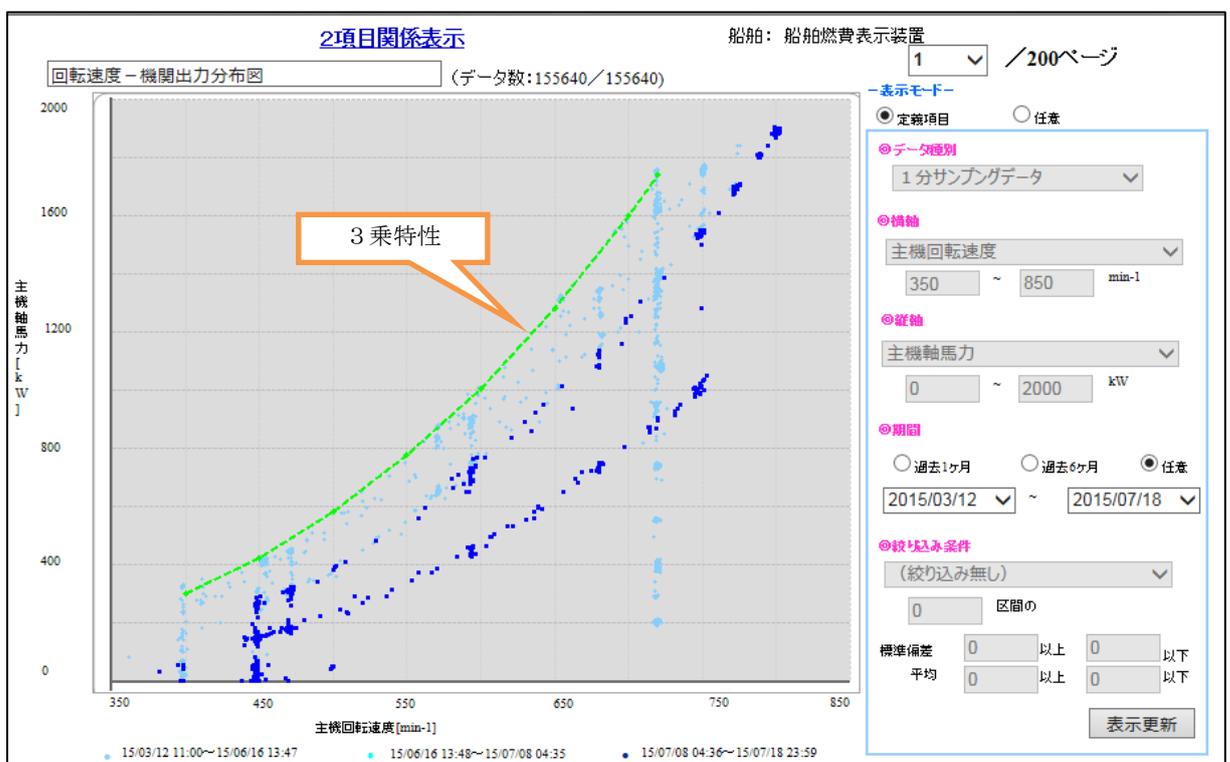


図 4-3-1-1 回転速度－機関出力分布表示画面

2-2) 機関出力のヒストグラム表示機能

ある期間において、機関出力毎の運転時間の割合、およびディーゼル運転、ガス運転の割合の把握を目的としたヒストグラム表示を追加した。図 4-3-1-2 に画面イメージを示す。

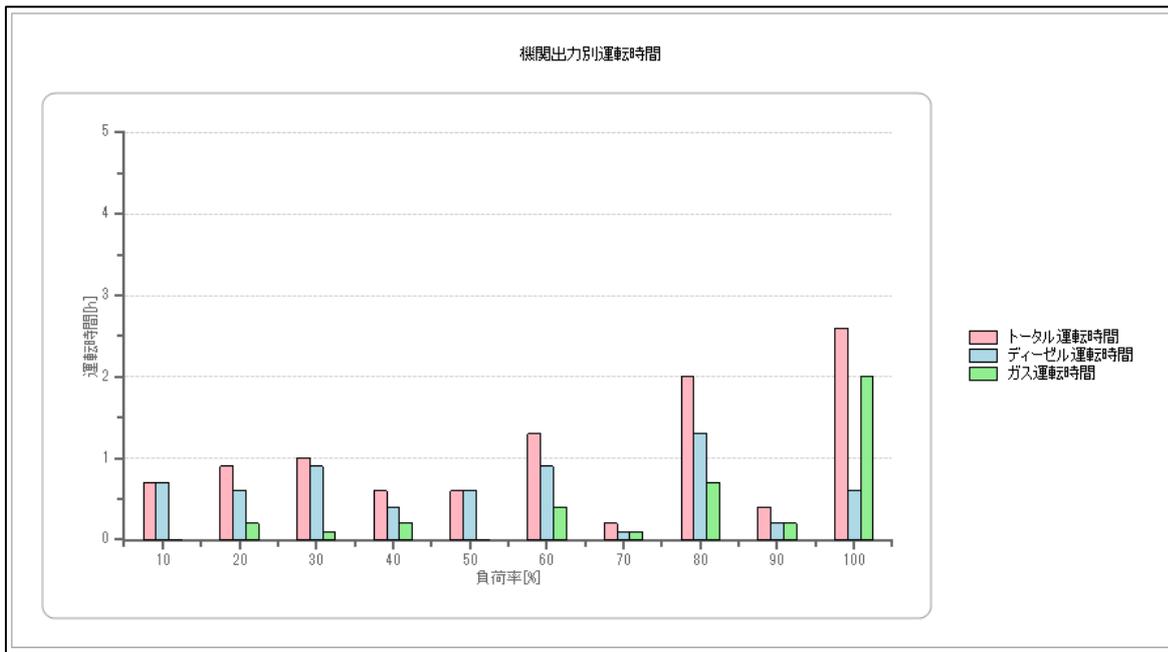


図 4-3-1-2 機関出力のヒストグラム表示画面

2-3) 機関出力ー燃料消費率の分布表示機能

横軸に機関出力、縦軸に燃料消費率（瞬時）の分布を、機関性能データとともに表示。また、定常状態の運転データを抽出することにより、機関性能の経年変化の把握を目的とした表示機能を追加した。図 4-3-1-3 に画面イメージを示す。

ただし、4-2-1-1 項 5)で述べているように発熱量、セタン価といった燃料油性状により、燃料油消費率は影響を受け変化する。本装置では、発熱量に関しては画面より入力することにより燃料消費率算出時に補正することができるが、セタン価の変化は取り除くことができず、その変化は誤差として残ってしまう。

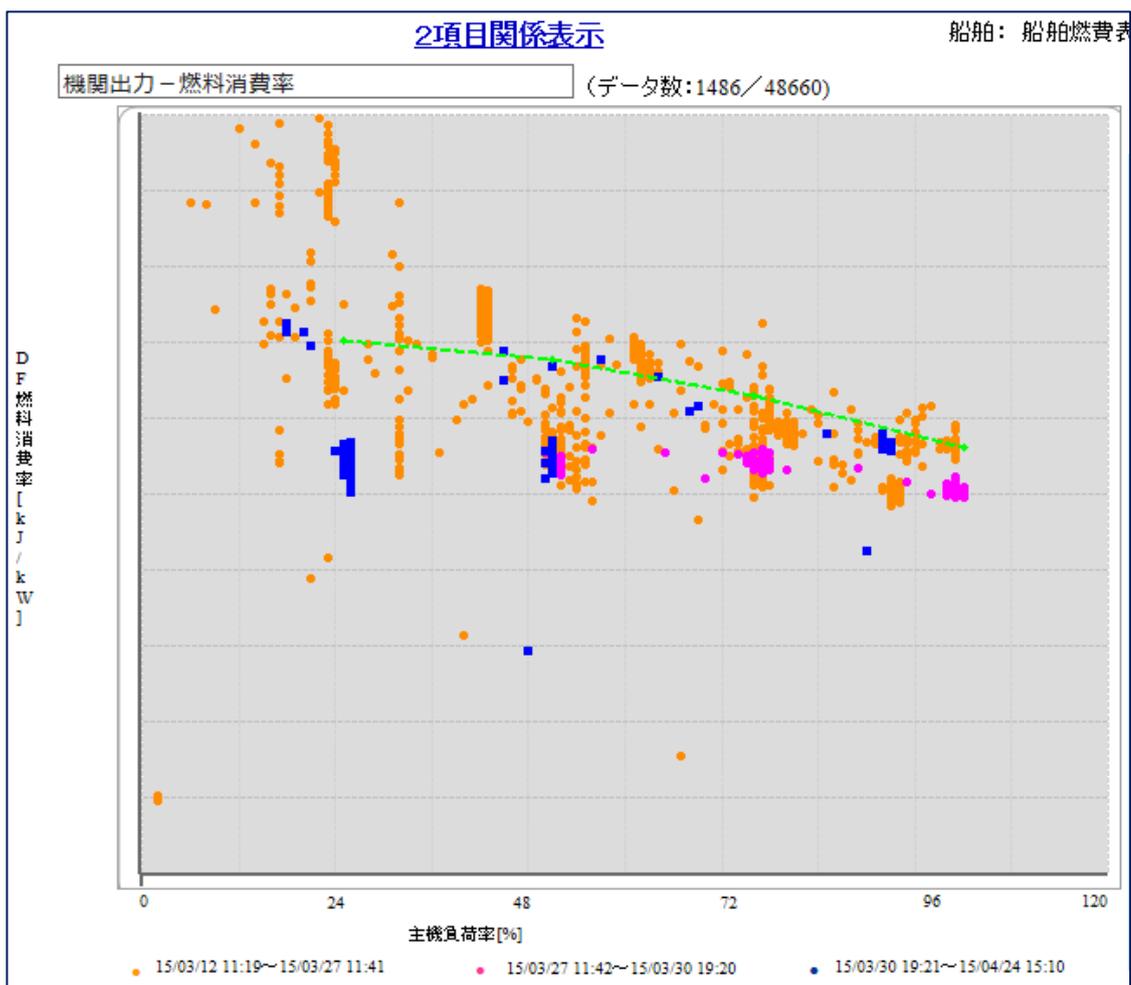
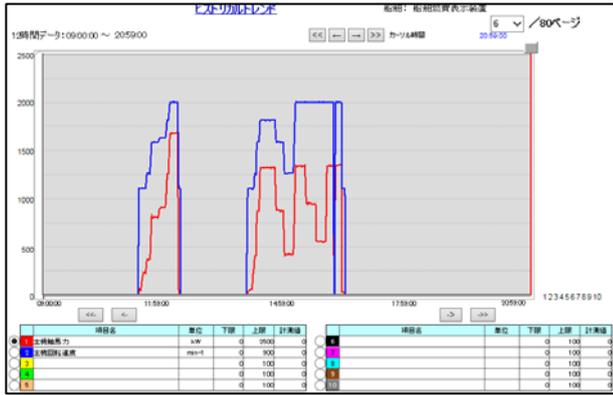


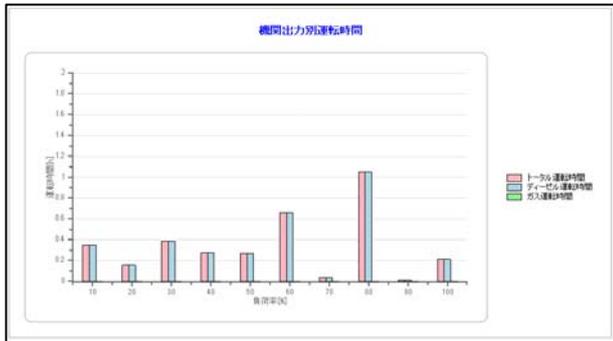
図 4-3-1-3 機関出力－燃料消費率の分布表示画面

4-3-2 運転方法可視化のための追加機能評価

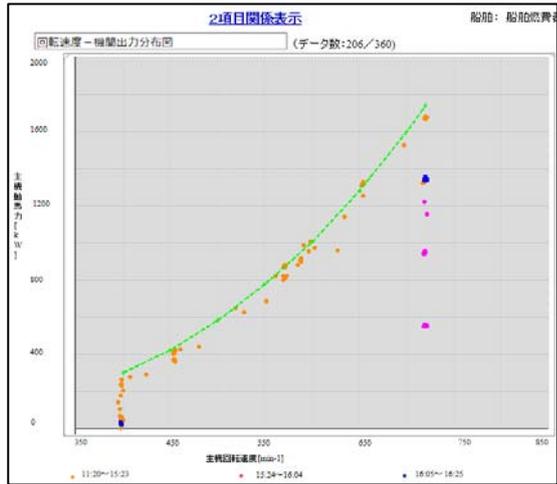
4-2-2-1 項 5)で DF 燃料消費率の評価を行った際の運転データ（計測日 E～H）を用いて、計測日毎の運転内容の違いがどのように表わされるかを確認した。計測日 E～H の機関出力、回転速度のトレンドグラフおよび、「回転速度－機関出力分布表示機能」、「機関出力のヒストグラム表示機能」による表示結果を図 4-3-1-4、図 4-3-1-5 に示す。各計測日毎の運転データの比較結果を表 4-3-1-1 に示す。



(機関出力トレンド表示)



(機関出力別運転時間)

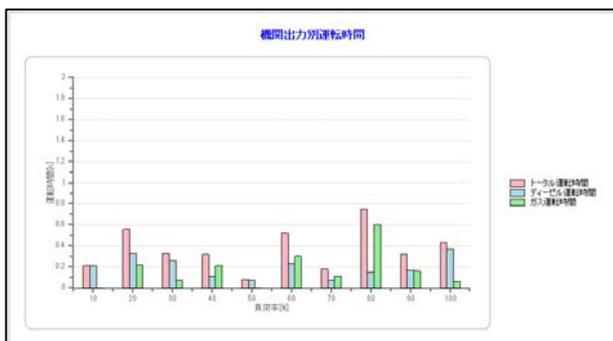


(回転速度－機関出力分布図表示)

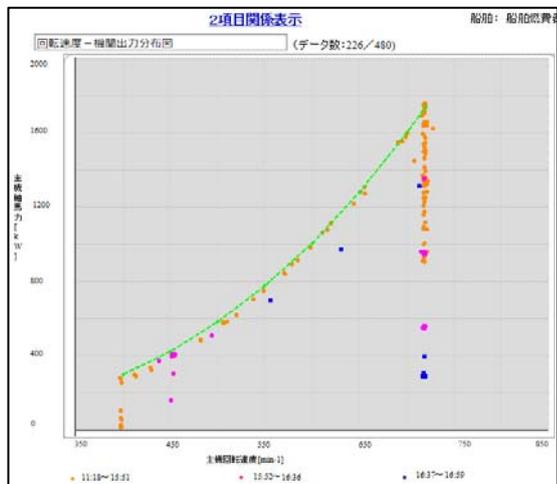
計測日 E



(機関出力トレンド表示)



(機関出力別運転時間)



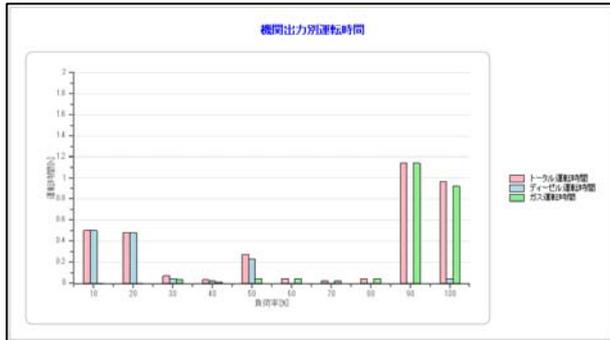
(回転速度－機関出力分布図表示)

計測日 F

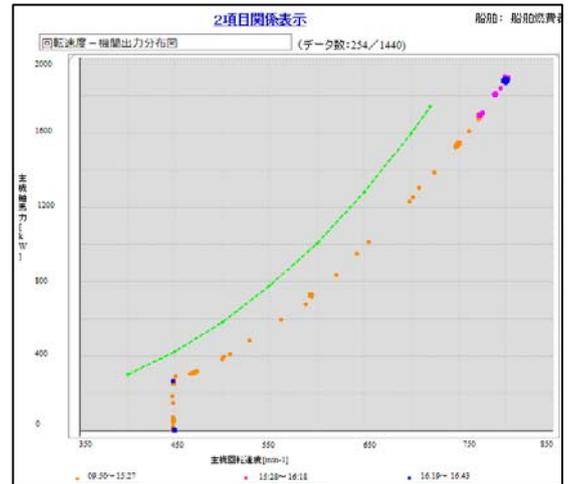
図 4-3-1-4 追加機能による運転データ表示結果 1 (計測日 E、計測日 F)



(機関出力トレンド表示)

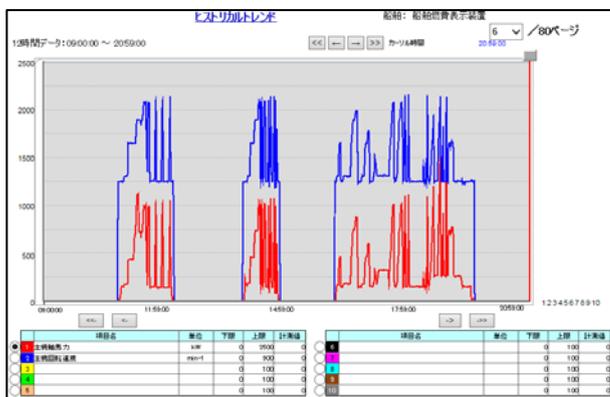


(機関出力別運転時間)

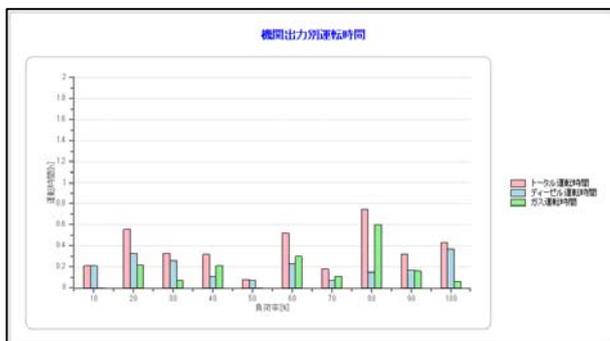


(回転速度－機関出力分布図表示)

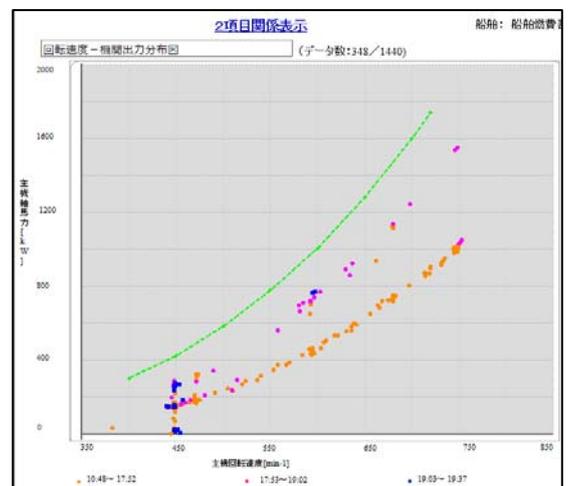
計測日 G



(機関出力トレンド表示)



(機関出力別運転時間)



(回転速度－機関出力分布図表示)

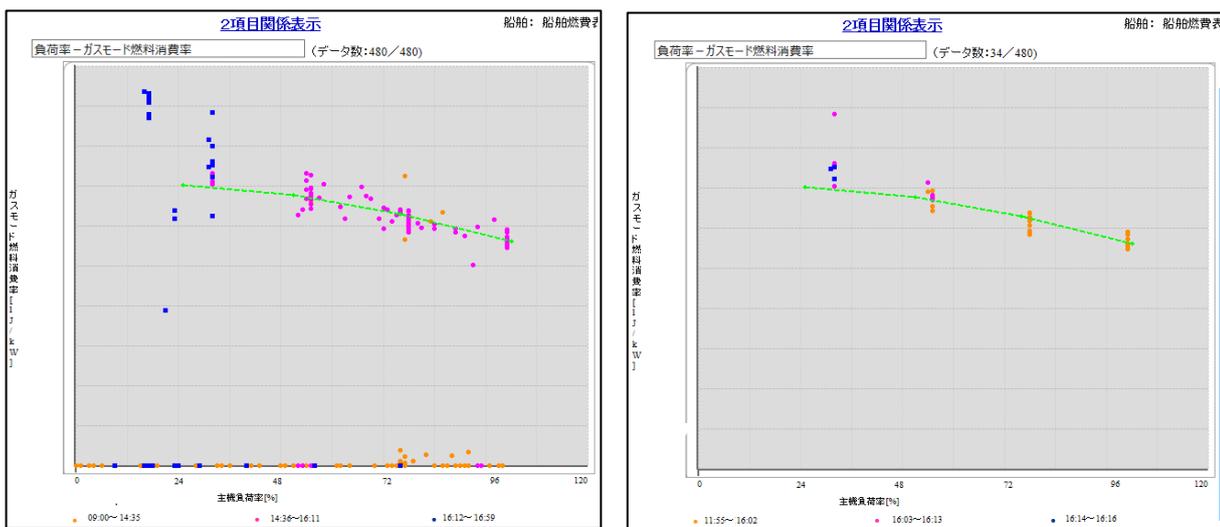
計測日 H

図 4-3-1-5 追加機能による運転データ表示結果 2 (計測日 G、計測日 H)

表 4-3-1-1 追加機能による運転データ表示結果の比較

比較項目	計測日E	計測日F	計測日G	計測日H
機関出力の変化	比較的少ない	比較的少ない	少ない	多い
機関出力と回転速度	3乗特性上の運転が7割、回転速度一定で3乗特性未満での運転が3割程度ある。	回転速度一定で、3乗特性未満での運転が大半を占める。	ほとんど3乗特性未満で運転	ほとんど3乗特性未満で運転
機関出力毎の運転時間	特に偏り無し。	特に偏りなし。	特に偏りなし。	特に偏りなし。
使用燃料の割合	ガス運転：0割 ディーゼル運転：10割	ガス運転：5割 ディーゼル運転：5割	ガス運転：7割 ディーゼル運転：3割	ガス運転：6割 ディーゼル運転：4割
燃料消費率 (図4-2-2-2より)	機関性能データ(ディーゼル)に近い値となっている。	機関性能データ(ガス)より小さく、機関性能データ(ディーゼル)よりも若干大きい値となっている。	機関性能データ(ガス)、機関性能データ(ディーゼル)よりも小さい値となっている。	機関性能データ(ディーゼル)、機関性能データ(ガス)よりも、極端に大きくなっている。
運転方法が燃料消費率に及ぼしたと考えられる要因	機関出力が3乗特性上の院展が多かったことで、燃料消費率は機関性能データに近い値となったものと考えられる。	機関出力が3乗特性未満で、出力変動も比較的小さいことから、燃料消費率は小さくなったものと考えられる。	機関出力が3乗特性未満で、出力変動も少ないことから、燃料消費率が小さくなったものと考えられる。	機関出力が3乗特性未満であるが、それ以上に機関出力の変動の多さが、燃料消費率を大きくする要因となったものと考えられる。

「機関出力ー燃料消費率分布表示機能」にて、計測日 F のガス運転時の全データと定常状態に絞ったデータを比較時したものを図 4-3-1-6 に示す。定常状態のデータのみを抽出することにより、機関出力の変動を取り除いた機関性能に近い燃料消費量が表されることが読み取れる(図では、燃料油流量のばらつきの影響を受け、その範囲での変動はある)。これを過去のデータとあわせて比較することにより、機関性能の変化を把握できるものと期待できる。



[全データ]

[定常状態のデータ]

図 4-3-1-6 機関出力ー燃料消費率分布表示の評価

これらの結果より、燃料消費率の変化を評価するにあたって、トレンドグラフだけでは、非効率な運転状況や機関性能の把握が、新たに追加した機能（表示画面）をあわせて参照することにより、効率的に行えるようになり、省エネ運航支援に繋がるものと期待できる。

5. 平成27年度実施事項まとめ

5-1 陸上総合試験

- ・ディーゼル／ガス機関に制作した装置を接続し、複数の負荷パターンで運転し、過渡状態および定常状態における計測項目の挙動を確認した。
- ・表示装置で過渡状態を含んだ運転状態における燃料消費率、CO₂排出量など各種演算値の評価を行った。
- ・表示装置の連続稼働性の評価を行った。

5-2 総合試験評価

陸上総合試験及び総合試験評価における結果から次の事が確認され、商用化へ向けての方向付けが完了した。

- 1) 計測精度及びコスト削減の観点から燃料油の戻りライン中の流量計は不要であり、戻りラインを送りラインの流量計下流に戻すよう配管する。
- 2) パイロット燃料油だけを計測する流量計は不要であり、ディーゼル運転時の燃料油流量計を使用する。但し、ディーゼル用燃料油流量計はパイロット流量が測定範囲内にあり、その範囲において誤差が±1%以内である条件を満たす必要がある。
- 3) 負荷変動時の燃料消費率については機関出力、燃料流量の計測誤差が大きく、定常運転時の燃料消費率よりも誤差が大きいものと認識する必要がある。しかし、計測機器を含め、同一の表示装置を使用している場合、負荷変動時の燃料消費率についても、過去の運転データとの相対比較により、燃料消費率低減効果を評価出来るものとする。
- 4) 表示装置での燃料消費率、CO₂排出量などの演算機能は、定常状態、過渡状態での負荷パターンにおいても、仕様通りに正しく演算できることを確認した。
- 5) 表示装置の連続稼働性能は、実運用においても十分耐え得る性能であることを確認した。

5-3 改良・設計変更

実際の運転では、機関出力や回転速度の変動やエンジンの経年変化もあり、燃料消費率は、定常負荷の工場試験時のものとは異なる結果となる。表示装置でそれら原因を評価するには、トレンドグラフから分析するしかなく作業効率が良くないことから、より視覚的に確認できるよう「回転速度－機関出力分布表示」、「機関出力ヒストグラム表示」、「機関出力－燃料消費率分布表示」といった新たな表示機能の追加を行った。

5-4 設計変更の反映および評価

- ・トレンドグラフと新たに追加した表示機能をあわせて参照することにより、より効率的に燃料消費率の評価を行えるようになった。

6. 事業成果

6-1 事業最終目標

- (1) 燃料消費量（率）の高精度計測技術を確立し、省エネ・EEOI に対応可能な出力機能を有する、ディーゼル／ガス機関対応の燃料消費量表示装置を開発する。
- (2) 燃料消費量（率）のモニタリングは陸上でも可能とし、陸上支援により陸上からの迅速で柔軟な省エネ運航支援ができるものとする。

6-2 事業成果

前項 (1) の事業目標に対し、次の成果を得た。

- 1) コリオリ式流量計および大気圧気温湿度変換器の組み合わせによりディーゼル燃料の流量を精度よく計測する手法を考案し、実機試験によりその妥当性が確認された。
- 2) コリオリ式流量計、熱量計、および大気圧気温湿度変換器の組み合わせによりガス燃料の流量を精度よく計測する手法を考案し、実機試験によりその妥当性が確認された。
- 3) 前記流量計測手法および軸馬力計との組み合わせにより、精度よい燃料消費量の計測方式を考案し、実機試験でその妥当性を確認され、結果として、高精度計測技術を確立することができた。
- 4) また、上記計測技術および省エネ・EEOI に対応可能な CO2 排出量の表示機能を搭載した燃料消費量表示装置を試作し、実機試験でその性能を確認することにより、設計の妥当性を確認できた。

前項 (2) の事業目標に対し、次の成果を得た。

- 1) 前記表示装置にインターネット回線を利用した遠隔通信機能を装備し、工場（群馬県太田市）にあるエンジン／燃料消費量表示装置から、本社（東京都千代田区）サーバにデータを逐次送り、陸上から燃料消費量(率)のモニタリングが可能であることを確認した。

上記より、当初の事業目標を達成することができた。

7. 今後の予定

7-1 商品化へ向けての検討事項

(1) 運用およびサービス提供方法

陸上側システムの運用においては、日々の保守業務・機器の更新・光熱費など、船舶側システムの運用においては、定期的に計測装置の校正を行う必要があるなどランニングコストが必要となる。

お客様へモニタリング機能を提供（以降、「サービス提供」とする）するにあたっては、これらランニングコスト、運用体制、当システムの責務を明確にしたうえで、サービス提供費用を決める必要があるため、これらの検討を行う。

また、長期的な運用を考えると、陸上側システムには設備増強の容易さや、自然災害に対する備えに優れているクラウドサービス*を利用するという選択肢もあるので、これもあわせて検討を行う。

クラウドサービス*：通信事業者などが、ネットワークを経由してコンピュータ資源を提供するサービス。

(2) 船陸間通信

船舶の航海エリアによっては、船陸間の通信に衛星通信の利用が必要となるが、携帯電話に比べると、イニシャルコスト・ランニングコストともはるかに高額となる。一方、近年ではインターネット/Eメール利用環境を保有した船舶も多いため、船舶のインターネット設備を、本システムで利用して船陸間でのデータ送信方法することの実現性の検討、それにあたっての制約事項などの確認を行う。

(3) 実船での検証

船種・運航方法により、主機機関への負荷のかかり方は大きく異なる。様々な船舶において本システムの搭載を可能にするため、船種・運航方法および航海エリアの異なる、いくつかの船舶に本システムを搭載し動作の検証を行う。

(4) 制御システムとのデータ授受

ガス/ディーゼル機関の場合、機関制御のために、機関出力や燃料ガス熱量の計測装置が設置され機関制御システムに取り込まれている場合がある。その際、本システムのために計測装置を設置すると冗長となり、設置スペースも必要となるため、機関制御システムとの連携する方法を検討する。

7-2 商品化予定

上記検討事項（7-1 項）を解決のうえ、2018 年度末での商品化を目標としてすすめる。

8. 参考文献

- 1) JIS B8003:2005 内燃機関—機関出力の決定方法及び測定方法—共通要求事項
- 2) JIS B8002-1:2005 往復動内燃機関—性能—第 1 部：出力・燃料消費量・潤滑油消費量の表示及び試験方法—一般機関に対する追加要求事項
- 3) JIS K2249-4:2011 4.3 温度に対する密度換算及び容量換算の基本式
- 4) JIS B8008-4:2009 往復動内燃機関—排気排出物測定—第 4 部：各種用途の定常状態における試験サイクル
- 5) JIS K2280-4:2013 石油製品—オクタン価，セタン価及びセタン指数の求め方—第 4 部：セタン価



「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)日本舶用工業会

〒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>