

実船における出力の計測に関する研究

津田 稔*¹・前田和幸*¹・三好佳廣*²・小松和也*²

Study on Measurement of Main Engine Output on Voyage

Minoru Tsuda*¹, Kazuyuki Maeda*¹, Yoshihiro Miyoshi*², and Kazuya Komatsu*²

Though accurate measurement of an engine output on voyage is very important for effective operation and suitable maintenance of a ship, it is difficult to confirm the precision of the measurement system. In order to clarify the method of accurate measurement of the engine output and verify the system, the engine output of a 2342GT/2795kW ship was measured by following three methods. At first, the engine output was measured by using indicated mean effective pressure (Pmi). And the second, it was measured by using dynamometer equipped with intermediate shaft. And the third, it was measured by using fuel oil consumption. The result from the examinations are as follows: (1) In the case of measuring the engine output by using Pmi, first, frictional mean effective pressure (Pmf) is calculated from the result of shop test. And second, the measurement accuracy of the output improves by using mechanical efficiency (η_m) obtained by following formula: $\eta_m = 1 - (Pmf/Pmi)$ (2) In the case of measuring the engine output by using fuel oil consumption, the measurement accuracy of the output improves by clarifying the relation between fuel oil consumption and indicated mean effective pressure, and adding mechanical efficiency to the result. (3) As a result that engine output was measured by three kind of methods in this experiment, the measurement error values of the engine output were within $\pm 2\%$ in the normal operating condition of the engine.

1. まえがき

船舶における大気汚染物質の排出規制は、国際海事機関 (IMO) においてMARPOL条約付属書VIとしてNO_x、燃料中の硫黄分の規制が2005年5月から発効し、今後は粒子状物質 (PM) に及ぼうとしている。船舶から排出される大気汚染物質は、出力・時間あたりの排出量 [g/kW・h] を用いて評価されるため、これらの排出特性を明らかにしたり低減策を検討する場合、正確な軸出力を計測する必要がある¹⁾。また、連続的に出力の計測を行うことは船舶の運航管理上も重要である²⁾。出力の計測は陸上試運転においては検定された動力計を用いて行われ、主機関が船舶に搭載された後は、①指圧線図による方法、②軸馬力計による方法、③燃料消費量による方法等が用いられるが、いずれの方法においても計測値の精度を確認することは困難であるため、十分な活用がなされていないのが実状である。

本研究では、水産大学の練習船耕洋丸を用いて、まず上記3種類の方法により主機関の出力を計測するとともに、それぞれの方法における計測精度について検討した。次に、各計測値を船用特性上の値と比較することによりそれぞれの方法における計測精度を明らかにした。さらに、これらの方法を漁船に適用した場合について検討した。

2. 実験装置と出力の計測方法

実験には、船用2サイクルディーゼル機関と可変ピッチプロペラを備えた水産大学の練習船耕洋丸を用いた。Fig. 1に供試船舶の写真を示し、Table 1に主要目を示す。また、Fig. 2に実験装置の概要を示す。

実験は夏の日本海 (小樽~下関航海中) において海上の平穏な時に、主機関の回転数を146, 171, 205, 209, 215, 218rpmに設定し、それぞれの回転数において翼角を変更することにより負荷率を変化させ、次に示すような3種類

2005年1月11日受付. Received January 11, 2005.

* 1 水産大学海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

* 2 水産大学練習船耕洋丸 (Training Ship Koyo-maru, National Fisheries University)

の方法で主機関の出力を計測した。またこれと同時に、筒内圧力、燃料消費量及び供試船舶の運航データ（船速、翼角、回転数、相対風速・風向等）を計測した。

2.1 指圧線図による出力の計測

指圧線図から出力を求めるために、まず、各シリンダのインジケータコックに筒内圧力センサー（kistler）を取り付け、燃焼解析装置（小野測器：CB-566）とクランク角度検出装置を用いることによって指圧線図を採取し、図示平均有効圧力 P_{mi} （150サイクルの平均値）を求めた。次に、 P_{mi} と行程容積 V_s 、機関速度 n から算出された図示出力 N_i と機械効率 η_m を用いて次式により出力 N_{ec} を算出した。

$$N_{ec} = N_i \cdot \eta_m = P_{mi} \cdot V_s \cdot (n/60) \cdot \eta_m \quad \dots (1)$$

式（1）より、指圧線図から求める出力 N_{ec} の計測精度を向上させるためには、 P_{mi} と η_m の精度を向上させる必要があることがわかる。

P_{mi} の計測精度を向上させるために、実験に先立ちダイヤルゲージをピストンスカート下端にあてて、BDC付近において0.2度毎にピストンの位置とクランク角度との関係を探り、BDCにおいてクランク軸先端に取付けた角度検出装置からBDC信号が燃焼解析装置に入力されるようにした。また筒内圧力センサーは、実験前に重錘型圧力検定装置による検定を行ったものを使用した。

η_m は、摩擦出力を N_f 、正味平均有効圧力を P_{me} 、摩擦平均有効圧力を P_{mf} とすると次式により表される。

$$\eta_m = N_{ec} / (N_{ec} + N_f) = P_{me} / (P_{me} + P_{mf}) \quad \dots (2)$$

また、 $P_{mf} = P_{mi} - P_{me}$ $\dots (3)$ であるので、式（2）は次のように表すことができる。

$$\eta_m = (P_{mi} - P_{mf}) / P_{mi} = 1 - P_{mf} / P_{mi} \quad \dots (4)$$

Fig. 3に、供試機関の陸上試運転における機関速度と P_{mf} の関係を示す。 P_{mf} は同一機関速度においてはほぼ一定の値を示し、機関速度の増加とともに増大するとされている³⁾。図において P_{mf} の値は183rpmから230rpmまでは増加傾向を示すが、146rpmの値は183、209、218rpmの値よりも高い。また、230rpmにおける定回転特性（発電機特性）の値も一定ではない。そこで本研究ではFig. 3より P_{mf} の平均値を求め、この値を式（4）に代入することにより各負荷率における機械効率を算出した。なお、船舶から排出される大気汚染物質は特に船舶が集中する港内や狭水道において特に問題視されており、このような海域では主機関の速度を一定とした可変ピッチプロペラの翼角制御による運航も行われるため、本研究では船用特性と定回転



Fig. 1. Experimental Ship "Koyo Maru".

Table 1. Specifications of Experimental Ship

Length(over all)	81.40 m
Breadth	13.00 m
Depth	8.40 m
Gross Tonnage	2342 ton
Trial Speed	15.67 knot
Main Engine	
Type	6UET45/75C
Output	2795 kW
Engine Speed	230 rpm
Bore	450 mm
Stroke	750 mm
P_{me}	1.02 MPa
Date of Delivery	June/1978

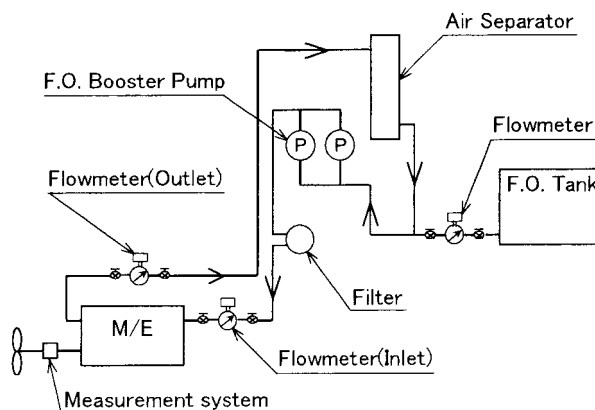


Fig. 2. Outline of experimental equipment.

特性の両方についての検討を行った。Table 2 に、陸上試運転において計測されたPmiに上記の方法を適用して求めた出力Necと、動力計を用いて計測された出力Nemの値を比較した結果を示す。表において、NemとNecとの誤差は、
(a) の船用特性においては全ての負荷率において±3%以内となっている。(b) の定回転特性においては負荷率50%以上では±3%以内となっている。

2.2 軸馬力計による出力の計測

Fig. 4 に中間軸に設置した光学式軸馬力計の計測原理を示す。図において、中間軸に長さLの間隔で設置された二つの固定リングの一端に、光源と受光センサーを有する振計本体が取り付けられ、他端にミラーが取り付けられている。出力がゼロの時は、光源から発した光はミラーで反射され、受光センサー上の0点にあたる。出力に比例して軸が振れるとミラーがδだけ移動し、光線はm点にあたる。この0点とm点との距離から振れ量δを求め、次式によりトルクQと出力Nemを求めた。

$$Q = \frac{\pi D^4 G}{32} \cdot \frac{K_s (V_m - V_0)}{L \cdot R} \quad [N \cdot m]$$

$$Nem = 2 \pi n Q / 60 \quad [W]$$

上式において、Dは中間軸の直径 (m)、Gは中間軸の横弾性係数 (Pa)、Ksはセンサーの検定常数 (m/V)、Lは固定リング間長 (m)、Rは軸心から光軸線までの距離 (m)、Vmは振計出力の計測値 (V)、V0は振計出力のゼロ値 (V)、nは軸回転数 (rpm) を表す。

2.3 燃料消費量による出力の計測

燃料消費量は、Fig. 2 に示すように、主機関の入口側（機関に供給される流量）と出口側（主機関に消費されずに戻る流量）に設置した流量計（オーバル形流量計、計測精度±0.5%）の流量差と燃料温度により算出した。出力と燃料消費量には相関があるため、燃料ポンプのラック目盛りの値から出力を算出する方法が用いられている²⁾。これは、燃料の燃焼に比例してPmiが増加することを利用した方法であるが、式(1)より、燃料消費量と直接的な相関があるのはNecではなくNiであるため、Necを求めるにはNiにηmを乗じる必要がある。Fig. 5 に、陸上試運転における燃料消費量とNiの関係を示す。図に示すように両者には良い相関があるため、近似式を用いて燃料消費量からNi-fuelを求め、この値に式(4)から求めたηmを乗ずることにより出力Ne-fuelを算出した。Table 3 に、陸上試運転において計測された燃料消費量に上記の方法を適用して

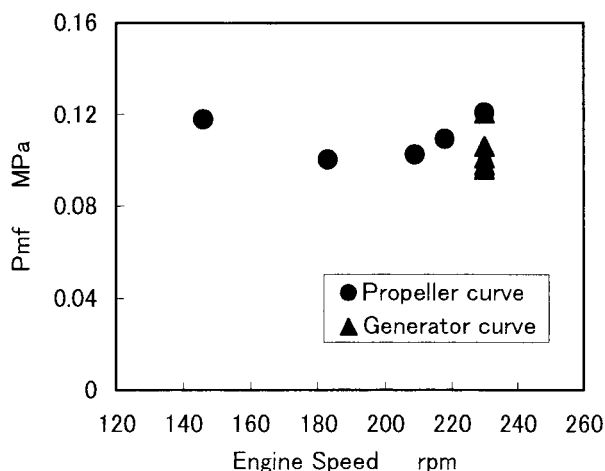


Fig. 3 . Relationship between Engine Speed and Pmf.

Table 2 . Comparison of Measured Ne and Calculated Ne by Pmi

(a) Propeller Curve

Load	%	25	50	75	85	100
Engine Speed	rpm	146	183	209	218	230
Measured Ne	kW	702	1400	2098	2380	2793
Calculated ηm	%	79.4	85.5	88.6	89.5	90.6
Calculated Ne	kW	720	1385	2085	2384	2832
Error	%	2.5	-1.1	-0.6	0.2	1.4

(b) Generator Curve

Load	%	25	50	75	85	100
Engine Speed	rpm	230	230	230	230	230
Measured Ne	kW	699	1397	2095	2377	2793
Calculated ηm	%	69.6	82.3	87.6	89.0	90.6
Calculated Ne	kW	674	1365	2077	2376	2831
Error	%	-3.6	-2.3	-0.9	0.0	1.4

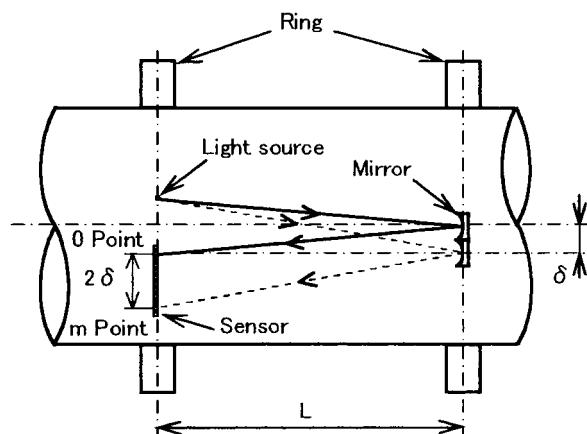


Fig. 4 . Engine Output Measurement System.

求めた出力 N_{e-fuel} と、動力計を用いて計測された出力 N_{em} の値を比較した結果を示す。表において、 N_{em} と N_{e-fuel} との誤差は、船用特性上の全ての負荷率において $\pm 3\%$ 以内となっている。

3. 結果と考察

3.1 計測精度の検討

まず、指圧線図による方法について検討する。出力は式(1)により算出されるが、前章で述べたように、 P_{mi} の計測に際しては実験直前に燃焼解析装置へ入力するピストン位置の詳細な確認と圧力センサーの検定を行うとともに、 P_{mi} を用いて算出した機械効率を使用している。 V_s と n は信頼できる値である。このようにして求めた N_{ec} の値を「出力は機関速度の3乗に比例する」という船用特性⁴⁾と比較することにより計測精度の検討を行った。

本実験はドック出し後の船体が清浄な時期に行い、実験時における海況は極めて穏やかで無風に近かったため、機関速度と出力にはプロペラ特性が適用できるものと考えられる。Fig. 6に、本実験で得られた機関速度と出力の関係を船用特性の値と比較した結果を示す。図中の破線は船用特性上の値を示し、実線は計測値を最小二乗法の曲線で近似したものである。図に示すように、出力は機関速度の3乗に比例して増加しており、その相関係数は0.997である。このように、本実験における計測値は船用特性上の値とほぼ同じ傾向を示し、相関もよいことから、出力の計測精度は高いものと考えられる。

次に、軸馬力計による方法について検討する。この方法は理論的な根拠はあるものの、現在のところ、軸に設置後は検定する方法が無いため、他の方法で計測された値と比較することにより精度を求めることになる。

最後に、燃料消費量による方法について検討する。この方法は、燃料消費量と図示出力との関係式に機械効率を加味して出力を求めるものであるが、関係式の誤差が加算されるため、指圧線図による方法よりも精度が低下する。

以上の結果より、本実験範囲においては指圧線図による方法を用いて計測した出力が最も信頼できる値であるものと考えられる。

3.2 各計測値の比較

Fig. 7に、機関速度と前述の3種類の方法によって求めた出力の関係を示す。図において、いずれの方法によって求めた出力も機関速度のほぼ3乗に比例して増大してお

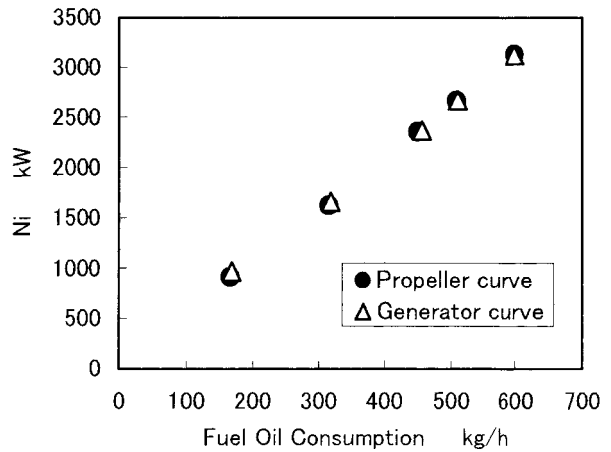


Fig. 5. Relationship between Fuel Oil Consumption and N_i .

Table 3. Comparison of Measured N_e and Calculated N_e by FO Consumption

Load	%	25	50	75	85	100
Measured N_e	kW	702	1400	2098	2380	2793
Measured FOC	kg/h	166.6	316.4	450.3	508.7	599.0
Calculated N_i	kW	907	1671	2355	2653	3114
Calculated η_m	%	79.4	86.0	88.6	89.5	90.5
Calculated N_e	kW	720	1437	2087	2374	2819
Error	%	2.5	2.6	-0.5	-0.3	0.9

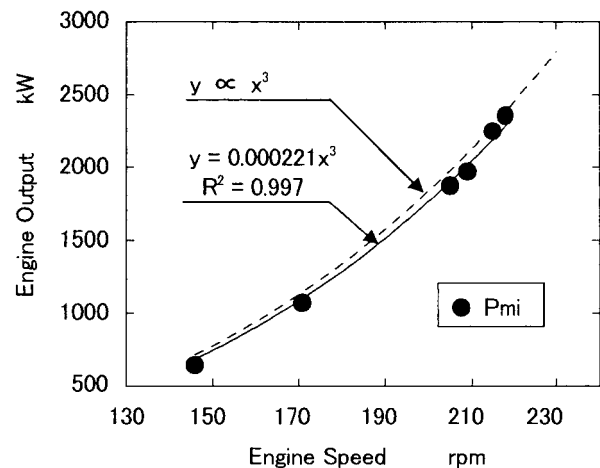


Fig. 6. Relationship between Engine Output by Pmi and Propeller curve.

り、その値はほぼ同じである。Table 4 に機関速度と前述の3種類の方法によって求めた出力の関係の詳細を示す。この表は、指圧線図による方法をベースとして、これに対する軸馬力計による方法と燃料消費量による方法の誤差を示している。この表を用いて、まず各計測方法による出力の値を比較すると、通常航海時に使用する負荷率38%以上においてはいずれの方法を用いてもその値は図示平均有効圧力による方法に対して±2%以内であるが、負荷率23%時においてはその差が大きくなっている。この結果より、図示平均有効圧力による方法で求めた出力が正しく計測されていれば、いずれの方法を用いても負荷率38%以上の航行中における出力の計測精度は±2%以内であるといえる。

3.3 漁船への適用と今後の課題

前節までに、比較的大型の船舶における主機関出力の計測結果について述べたが、本節では、これらの方法を漁船のほぼ半数を占める動力漁船⁵⁾に適用した場合について検討する。ほとんどの動力漁船に用いられている小形高速機関は通常指圧線図の採取装置が無いため、指圧線図による方法は使えない。また、機関室が狭く中間軸の長さも短いため、軸馬力計の取り付けも困難である。このため、燃料消費量による方法が最適と考えられる。Fig. 8 に、供試機関における図示出力の変化に対する陸上試運転時と実験時における燃料消費量の変化を示す。供試船舶は就航以来既に25年が経過しているが、図示出力に対する燃料消費量の関係はほとんど変化していない。このことから、陸上試運転時に燃料消費量と図示出力の関係を求めておき、これに機械効率を加味することにより精度の高い出力を算出できるものと考えられる。また、機械効率の経年変化を明らかにすることにより、陸上試運転時の燃料消費量と出力の関係を用いて、より精度の高い出力を算出することが出来る。また、陸上試運転の結果と実船を用いた今回の実験結果共に低回転域(146rpm)における誤差の値が大きくなったが、これはFig. 3の説明で述べたようにPmfの値が正しくないことに起因する可能性がある。今後は、機械効率の経年変化を明らかにするとともに、陸上試運転においてPmfの値を正しく把握しておく必要があるものと考えられる。

なお、本実験は出力の計測精度を明らかにすることを目的として、供試船舶のドック出し後の船体が清浄な時期に行ったため、実験時における海況は極めて穏やかで無風に近い状態であったが、今後は船体汚損時、強風下、時化等の状態での実験を繰り返し行い、船舶の全ての運航時における出力の計測精度を確認する必要がある。

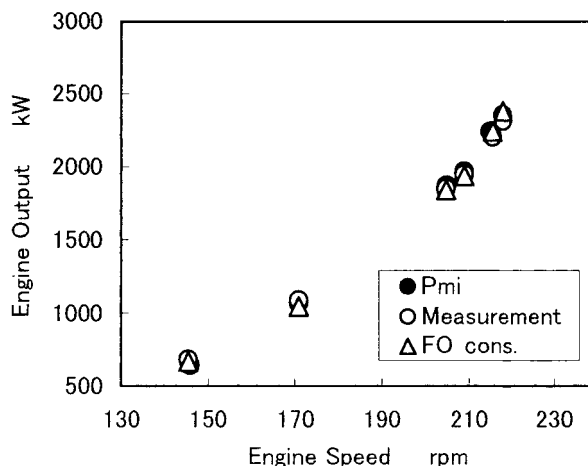


Fig. 7. Relationship between Engine Speed and Engine Output.

Table 4. Experiment Result

Engine Speed	rpm	146	171	205	209	215	218
①Output <Pmi>	kW	639	1069	1868	1963	2240	2350
Engine Load (Output by Pmi)	%	23	38	67	70	80	84
②Output <Measurement>	kW	680	1083	1847	1942	2203	2312
(②-①)/①	%	6.4	1.3	-1.1	-1.1	-1.6	-1.6
③Output <FO cons.>	kW	667	1048	1846	1941	2244	2383
(③-①)/①	%	4.4	-2.0	-1.2	-1.1	0.2	1.4

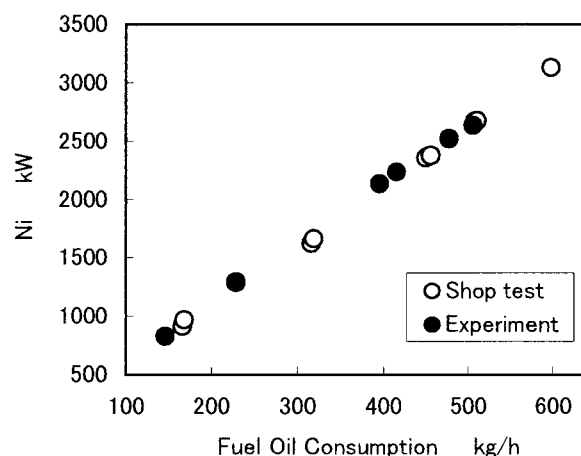


Fig. 8. Relationship between Fuel Oil Consumption and Ni.

4. まとめ

比較的大型の船舶を用いて通常用いられている3種類の方法により出力を計測し、出力の計測精度について検討するとともに、船用特性上の値と比較することにより計測精度を明らかにした。その要点は次のとおりである。

- (1) 指圧線図を用いて出力を計測する場合、陸上試運転の結果から摩擦平均有効圧力を算出し、次式によって求めた機械効率を用いることにより、全ての運転状態における出力の計測精度が向上する。

$$\eta_m = 1 - P_{mf} / P_{mi}$$

- (2) 燃料消費量を用いて出力を計測する場合、まず燃料消費量と図示出力の関係を明らかにし、これに機械効率を加味することにより、出力の計測精度が向上する。
- (3) 本実験において3種類の方法により出力を計測した結果、通常の航行状態（負荷率38%以上）における計測誤差は、いずれの方法を用いても±2%以内である。

おわりに、本実験に際しご協力をいただきましたMH I マリンエンジニアリング株式会社、株式会社倉本計器精工所および水産大学の練習船耕洋丸（船長：田渕清春氏）の乗組員諸氏に謝意を表します。

文 献

- 1) K. Maeda, K. Takasaki, T. kirihata and M. Tsuda : Proc. of the 23rd CIMAC, 562-569 (2001) .
- 2) N. Habata and T. Nakashima : Proc. of the 6th International Symposium on Marine Engineering, ISME2000-TS-55, 339-342 (2000) .
- 3) 大道寺 達：ディーゼル機関ハンドブック，初版，日刊工業新聞社，東京，1964
- 4) 大串雅信：理論船舶工学（下巻），第10版，海文堂，東京，1990.
- 5) 2003年（第11次）漁業センサス結果概要，農林水産省統計情報部，2004.