推進動力の測定

平山 伝治^{**}・国分 元宏^{***}
岡村 貞夫^{****} 帆刈 勇喜男^{****}

Measuring of Power in Marine Propulsion

By Denji Hirayama, Motohiro Kokubun,
Sadao Okamura, Yukio Hokari

A new digital torsion meter has been developed by Akasaka Diesels Ltd. and Ono Sokki Co. The torsion meter was applied in an actual vessel and it was confirmed that the torsion meter of this type was available for practical use.

This paper describes the results obtained by analyzing the marine propulsion power measured in several Diesel ships. The test records show the change of navigating state clearly. By the steady running test under the calm weather condition, the increase of propulsion power due to the secular change of propulsive performance of vessel may be detected within the accuracy of 1%.

1. ま え が き

現在、船舶推進システムは、省エネルギーおよびより高度の自動化を達成するために、革新を要求されている。推進動力は、システムの信頼性向上のための技術情報としても、また船舶の経済的運航管理の情報としても、最も基礎的なデータである。ところが、過去に多数のねじり動力計が開発されてきたが、長期間にわたって運航管理の基準となしうる、信頼性のある測定装置は出現しておらず、また、推進動力データを運航管理に利用する技術も一般化していない。われわれは、過去のねじり動力計の問題点を究明し、精度と安定性について、以上の目的にかなう精密軸出力計を開発した¹⁾。

ここでは、この精密軸出力計を納入した船舶の試運転測定記録から、操船による負荷変動の特徴を明らかにした。そして、日常航海中、これらの不規則な負荷変動を回避する定常航走試験を行うことにより、船底汚損その他に起因する推進動力の経時変化が、約1%以上に達すれば、それを的確に測定できることを確かめた。

2. 精密軸出力計の構成

本軸出力計は、中間軸の一定長さのねじれ角を測定し

てトルクを求め、これと軸回転数の積から軸馬力を求める(付録1参照)。

図1はその全体構成図である。検出器は中間軸に直接取付けられ、軸のねじれに対応する位相差信号と軸回転数信号を出力する。演算器PM-488は、通常制御コンソール内に設置され、検出器からの信号を受けてデジタル演算し、トルク、軸回転数、軸馬力を、デジタル信号またはアナログ信号として、表示器または記録器に出力する。

本軸出力計は、検出器に独自の工夫をこらすとともに、統計理論を巧みに応用したデジタル信号処理によって、精度と再現性のいづれについても、きわめて安定であることに特徴がある^{2,3)}。

3. 精密軸出力計を装備した船舶の概要

表1は本軸出力計を装備した船舶の要目である。各船とも、主機はすべてディーゼル機関であり、A～Eは大形船、F、Gは中小形船である。

図2は中間軸に取付けられた検出器の一例である。図3は制御コンソール内に設置された演算器PM-488と分配器を示す。図4は制御コンソール盤面上のデジタル表示器である。

4. 計測結果

4.1 船の増減速中の伝達トルク 図5は、F船において、ねじり振動計試験中、同時に伝達トルクを計測した結果である。本船は可変ピッチプロペラを装備

* 原稿受付 昭和59年1月6日

ISME TOKYO '83講演(昭和58年10月5日)

** 正会員 平山技術士事務所(焼津市小川2407-2)

*** 正会員 (株)小野測器(東京都大田区矢口1-27-4)

**** 正会員 (株)赤阪鉄工所(焼津市中港3-3-11)

図1 精密軸出力計全体構成図

表1 精密軸出力計を装備した船舶の要目

船名	A 船	B 船	C 船	D 船	E 船	F 船	G 船
船種	撒積貨物船	LPG船	コンテナ船	タンカー	鉱石運搬船	漁業練習船	練習船
L_{pp} m	256.0	217.0	195.0	主機換装	285.0	62.0	就航船
B (MLD) m	43.0	36.6	32.2		47.5	12.6	
D (MLD) m	23.85	21.45	19.0		24.5	5.45	
トン数 t	133,357 DWt	53,171 DWt	32,953 DWt		179,618 DWt	1,293 GT	
試運転最大速力 kt	16.8	19.14	22.3		16.5	14.1	
主機関	Sulzer 6RLA90	Sulzer 6RLA90	Sulzer 6RLA90	B & W 6L90GFCA	Sulzer 6RLB90	阪神 6ELS32RG	神発 6UEC/105D
連続最大出力 kW	15000	15900	15000	15670	15000	1552	4560
同上軸回転数 rpm	90	98	90	93	90	204	175
同上軸トルク kN·m	1592	1548	1592	1608	1592	72.6	249
中間軸直径 mm	580	585	565	655	585	270	322
プロペラ	FPP	FPP	FPP	FPP	FPP	CPP	FPP

図2 中間軸に装備された検出器

図3 コンソール内に設置した演算器と分配器

図4 デジタル表示器(中央)

図5 F船のねじり振動計測時の伝達トルク

しているため、プロペラ翼角を19.5度一定に保持した場合と、翼角0度一定の場合の両方についてねじり振動計測を行った。各測定値は2～3分間隔で測定され、軸回転数安定後、約30～60秒間の平均値である。

図5において、プロペラ翼角19.5度の場合の、回転上昇時と下降時の記録は、増速時のトルクが減速時のトルクより大きい。これは、軸回転数変更後、船速が十分な定常状態に達する以前に記録を採取しているため、増速時にはトルクリッチ側に、減速時にはトルクプア側に負荷トルクが移動するためである。これに対し、プロペラ翼角0度の場合には、船速の影響がないので、回転上昇時と下降時のトルク値は一致している。

以上のように、同一軸回転数においても、船速に応じて伝達トルクが非定常に変化する現象は、軸回転数変更後や操舵の場合などに常に観測される。船体は巨大な慣性質量を有するから、軸回転数変更後船速が定常状態に達するには、大形船の場合には約30分を要する。したがって、船底汚損などによる推進抵抗の変化を、伝達トルクの変化として比較判定しようとする場合は、船速が十分な定常状態に達した後に測定する必要がある。

4.2 旋回中の推進動力の変化 図6は、単軸船であるC船の、旋回試験中の伝達トルク、軸回転数、軸馬力の記録である。ここで記録方法は、演算器PM-488

のサンプリング時間(測定値の平均化時間)を5秒にセットし、これにデジタルプリンタをつないで連続記録した。したがって、

$$\begin{aligned} (\text{記録時間}) &= (\text{サンプリング時間}) + (\text{演算時間}) + (\text{プリンタ動作時間}) \\ &= (5 \text{ s}) + (\text{約 } 20 \sim 30 \text{ ms}) + (\text{約 } 4 \text{ s}) \\ &= \text{約 } 10 \text{ s} \end{aligned}$$

である。つまり、約10秒毎に5秒間の平均値を記録した。

図6 C船の港内全速における旋回試験

図6は、港内全速負荷における旋回試験で、舵角15度に保持し、船体が180度旋回するまでの、右旋回と左旋回の記録である。この場合主機は調速機制御であるため、軸回転数は一定に保持され、トルクが変化する。ここで、操舵直後の伝達トルクの変化を、右旋回と左旋回について比較すると、際立った対称がみられる。すなわち、舵角変更直後、右旋回のときはトルクが急増し、左旋回のときには逆にトルクが急減する。そしてそれ以後は、旋回による船速低下にともなってトルクはいずれも漸増する。

以上のような、右旋回と左旋回との操舵直後における伝達トルクの対称的な変動は、操舵にともなう船尾伴流の変化と、プロペラの回転方向との関係から生ずるものと考えられる。

4.3 クラッシュ・アスターン, アヘッド試験

図7は, C船の後進試験時に, 伝達トルク, 軸回転数, 軸馬力の変化を, サンプル時間5秒でプリンタに記録した数値をプロットしたものである。まず常用出力12500 kW (トルク 1350 kN・m, 回転数 88 rpm) で前進中, 主機の燃料をカットすると, 惰力航走となり, プロペラは遊転し, いわゆるエンジブレキの状態となるため, 伝達トルクは負となる。やがて主機が後進に始動すると, 軸回転数は急速に零に低下した後, 回転方向が後進に変わる。そして, 船尾水流の乱れにともなってトルクは激しく変動する。

図8は, 後進72 rpmから急速に前進に変えた場合である。比較的高い軸回転数から反転したため, 前進に始動すると同時にトルクにピークがあらわれ, 軸系は急速に回転方向が変わる。以後は船体が停止するまでの間トルクリッチ状態となるが, 前進方向への船速の増加にともなって次第に定常値に落着く。

図7 C船のクラッシュ・アスターン試験

図8 C船のクラッシュ・アヘッド試験

4.4 軸回転数と軸馬力の関係 固定ピッチプロペラの場合

ペラの場合, 負荷トルクと駆動トルクが平衡した定常状態において, 伝達トルク T は軸回転数 N の2乗に比例し, ひいては, 軸馬力 SHP は軸回転数 N の3乗に比例する, いわゆる Propeller Law が知られている。すなわち

$$\left. \begin{aligned} T &\propto N^2 \\ SHP &\propto N^3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

本軸出力計による測定値について, (1) 式の関係を検討する。

測定値の吟味に際して, 結果の見通しを容易にするため, 回転比3乗負荷率 R_p

$$R_p = \left(\frac{N}{N_0} \right)^3 \times 100 (\%) \quad (2)$$

N : 測定平均回転数 (rpm)

N_0 : 連続最大出力回転数 (rpm)

を求め, x 軸に R_p をとり, y 軸に測定軸馬力をプロットする。ここで, 伝達トルク T と軸回転数 N は, 同時刻に, それぞれ独立に計測されているので, (1) 式の関係が成立すれば結果は直線になる。したがって, 線形回帰分析が可能となり, 回帰式

$$y = a + \beta x \quad (3)$$

ただし,

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \beta \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\beta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

n : 測定データ数

x : R_p

y : SHP

とすれば, 定数項 a は測定データから帰納された零点の残差をあらわす。すなわち, 測定装置の零点が正しく調整されており, かつ, 測定値に外乱がふくまれず, 3乗法則を厳密に満足する測定値が得られれば, 残差 $a=0$ となる。

回帰係数 β は主機の動作線の傾きをあらわす。すなわち, 船底汚損などによる負荷トルクの増大にともなって, その傾きが増加する。したがって, 新造時の平水中の特定の航走条件における β 値を基準値に選べば, 船体やプロペラの汚損による推進動力の経時変化を, β の変化として求めることができる。

また, 相関係数 r

$$r = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right\} \left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right\}}} \quad (4)$$

は, 回帰直線からの測定値のばらつきを示し, r

表2 標柱間速力試験の測定値の回帰分析結果

	定数項 α_t (kW)	回帰係数 β_t (kW/%)	相関係数 r_t		定数項 α (kW)	回帰係数 β (kW/%)	相関係数 r
A船	-161	137.2	0.9984	往	-280	136.8	0.99958
				復	-51	137.7	0.99995
B船	-26	135.0	0.9998	往	+13	134.9	0.99997
				復	-69	135.1	0.99987
C船	-27	126.7	0.9932	往	+7	124.5	0.99998
				復	-124	130.5	0.99997
D船	-173	151.4	0.9998	往	-106	150.0	0.99999
				復	-241	152.7	0.99999
E船	+35	135.3	0.9984	往	-318	139.0	0.99958
				復	+383	131.6	0.99830

$=1.0$ のとき、厳密に $SHP \propto N^3$ を満足する測定値が得られたことを意味する。したがって、相関係数が1.0に近いかな否かによって、各測定値が偶然的な外乱の影響をうけない、一様な条件下で測定されたかな否かが判定できる。

表2は、各船の標柱間速力試験における各負荷の軸回転数と軸馬力の平均値を、 x 軸に R_p をとり、 y 軸に軸馬力をとって、線形回帰分析した結果である。ここで左側の欄は、標柱間の往航平均値と復航平均値の、すべてのデータについて回帰分析したものである(添字 t をつける)。また右側の欄は、往航のみおよび復航のみにデータを分けて、それぞれ分析した結果である。

表2において、B船とD船の左欄は $r_t = 0.9998$ である。すなわち、標柱間航行中は、保針のためのあて舵により、通常3~5%のトルク変動があるが、その平均値は3乗

図9 B船の標柱間速力試験における
回転比3乗と軸馬力の関係

法則をよく満足することを示す。図9はB船の測定値を図示したもので、往航と復航の測定値はほとんど一直線上に分布している。これは同船の速力試験時の気象・海象が静穏であったためと考えられる。本船のようなめぐまれた条件の下で試験すれば、回帰係数 β 値の再現性について、1%以下が十分に期待できる。したがって、船底汚損などによる推進抵抗の変化が1%以上に達すれば、それを推進動力の変化として検知できる。

C船の場合は、往復の全データについての相関係数は $r_t = 0.9932$ でや

や劣る。しかし、往航のみおよび復航のみの測定値による相関係数は $r = 0.99997 \sim 0.99998$ であり、きわめてよい直線性を示す。これを図示すると図10のようになる。つまり、C船の往航と復航のデータには、風の影響が系統誤差としてふくまれていることを示す。しかし、往航と復航のそれぞれのデータは3乗法則をよく満足している。

図10 C船の標柱間速力試験における
回転比3乗と軸馬力の関係

実船において、日常航海中に行われる推進動力測定値には、船の姿勢や船底汚損のような、定常的で規則的な動力変化と、操船や気象・海象による負荷変動のような、非定常で不規則な動力変化とが重畳している。したがって、就航中の任意の測定値を直接比較したのでは、船底汚損による推進性能の低下を知ることは困難である。このため、不規則な負荷変動の影響を系統的に排除する試

験法が必要となる。

そのための試験は、軸回転数と軸馬力の関係が3乗法則を満足する事実を利用して可能となる。すなわち、十分に静穏な気象・海象条件を選んで、広い軸回転数範囲について定常航走試験を行い、その測定値を回帰分析する。その回帰係数 β 値を比較することによって、船底汚損などにもとづく規則的な推進動力増加を測定できる。また、定数項 α が零に近いかなにかによって、風浪による誤差がふくまれているかなにか、または測定装置の不測の零点移動の有無を点検できる。さらに、相関係数 r が1.0に近いかなにかによって、各測定値が一様な定常条件において得られたかなにかを推定できる。

船の新造時、代表的な喫水やトリムまたは傾斜において、回帰係数 β の基準値を求めておけば、これと同一条件で試験することにより、推進動力の経時変化を求めることができる。また、荒天による出力増加は、平水中の動作線からの増加分として求められる。

5. む す び

実船に装備された精密軸出力計による推進動力測定記録について報告した。これから経験されたことは、

- (1) 定常航走状態における測定軸回転数と測定軸馬力の関係は、大形船の場合、3乗法則をよく満足する^{*1}。
- (2) 操舵中や加速・減速中などの過渡状態の軸馬力は、3乗法則に対して不規則な偶然誤差をふくみ、相関係数を低下させる。したがって、定常状態における測定値が得られたかなにかは、回帰直線からのばらつきの程度で判定できる。
- (3) 船の進行に対して一定方向の風は、偏りをもたらす。しかし、十分に静穏な気象条件下で試験すれば、実用上その影響を回避できる。
- (4) 就航中、以上の諸条件を考慮した定常航走試験を行えば、回帰係数 β の再現性は誤差1%以下が期待できる。したがって、推進動力変化が1%以上に達する推進抵抗増加を検出できる。これは船舶の運航管理に有効な指針となる。

【謝辞】 本軸出力計の開発について(財)日本船用機器開発協会の助成を受けた。ここにあつく感謝の意を表します。また、本軸出力計をすすんでご採用いただき、性能を実証する機会を与えて下さった、各船主および各造船所の関係者の方々にあつくお礼申し上げます。

^{*1} 極低回転数における航走データをふくめて分析すると、3乗法則から若干ずれると言われているが、実船のデータでは、風浪の影響や僅かのあて舵などの外乱による誤差が、負荷率が低いほど大きく影響するので、これらの誤差をふくんだデータから指数を決定すると、3乗からのずれが目立ってくる。また、その後の測定資料によれば、可変ピッチプロペラを装備した小形船の例では、指数が3乗より若干高くなった。

文 献

- 1) 平山・ほか2名, 船機誌, 13-3(昭53-3), 219
- 2) 小野, 計測と制御, 10-6(昭46-6), 407
- 3) 平山, 技術資料, (昭56), 559, フジ・テクノシステム

付録1. 測定原理

この軸出力計は、トルク検出器と演算装置から構成されている。

トルク検出器は、図11に示すように、距離 l をへだてて軸に固定された一対の外歯歯車と、これと同心に外筒に固定された内歯歯車と、その側面に配置された永久磁石と、検出コイルとから構成されている。外筒はころがり軸受により軸に支えられているので、外筒を固定して軸を回転すれば、検出歯車の一歯ごとの歯先の空隙の変化に応じて磁束が変化し、検出コイルに正弦状の電圧が誘起される。軸が無負荷で回転しているときは、各検出コイルの出力信号の位相差は一定である。軸に負荷が加わると、両端の出力信号は、軸のねじれに対応する位相ずれを生じ、これは伝達トルクに比例する。

図11 検出器構造説明図

検出コイルの出力信号の位相ずれは、演算器でパルス数に変換され、電子カウンタの二重ゲートを経て処理され、直接平均伝達トルクを表示する。また、同一信号から軸回転数が得られ、軸馬力はこれらのデジタル演算により求められる。

付録2. 軸系のターニングによる摩擦トルク

検出器を組立てた後の零点の調整は、軸系を前進および後進にターニングしながら摩擦トルクを測定し、前進摩擦トルクと後進摩擦トルクの中央値を零点と決めている。この零点調整作業において、軸系の軸受摩擦トルクが測定される。表3はその結果である。A～E船はいずれも船尾機関で、軸系の長さに着しい相違はない。これらの各船のターニングによる摩擦トルクは、連続最大トルクの1%以下である。ターニングは極めておそい回転速度であるため、この値がそのまま主機運転中の軸受摩擦トルクを意味するものではなく、参考値である。

表3 ターニング中の軸系摩擦トルク

船名	A船	B船	C船	D船	E船
摩擦トルク kN・m	17.5	5.0	1.4	8.8	10.8
最大定格トルク に対する比率 %	1.1	0.33	0.09	0.55	0.69

〔質疑応答〕

質問者 埼玉大学 岩本昭一

〔質問〕 中間軸の横弾性係数にはどんな値を用いているか。また、そのような値を使う根拠は何か。

〔回答〕 軸材料が普通炭素鋼の場合、 $G=82.03\text{ GPa}$ (8365 kgf/mm^2)を使っている。その根拠は、(社)日本造船研究協会の第117研究部会による43本の測定結果、British Ship Research Associationによる中間軸68本の調査結果、および筆者らの G 値の測定結果(文献1)参照)は、いずれも上記の G 値に極めてよく一致する。また、3例の軸出力計の校正試験において、上記の G 値を用いたデジタル演算器の表示値と、校正付加トルクとの偏差は、いずれも0.15%FS以下であった。

質問者 住友重機械工業(株) 松田正康

〔質問〕 (1) 定常状態において、回帰係数を1%以内で検出できることから、このトルクメータが良い精度であることがわかる。そこで、主軸速度が急激に増減する不規則な変化、または主軸のねじり振動のような、過渡状態におけるこのトルクメータの精度と応答性について、著者らの意見を聞きたい。

(2) 本論文で、著者らは新船についての軸回転数と軸動力の関係を分析しているが、古い船についてのこれらの関係を分析しているか。もしあれば、新しい船と古い船についての回帰係数の相違を知りたい。

〔回答〕 (1) 船用デジタル演算器PM-488の標準仕様は、2秒、5秒、10秒のいずれかの平均値を、任意に選択して測定するようになっている。したがって、現象が定常か非定常にかかわりなく、選択した時間平均値が同一精度で測定される。

瞬間的な現象を測定する場合は、別に用意した演算装置を使用する。この場合の応答時間は、軸回転速度や検出器の仕様に関係するが、通常1ms程度に計画することができる。また、この場合の精度は、検出器の歯車のピッチ誤差と、軸のねじれ角との比に依存する。

(2) 古い船の測定値の回帰分析結果については、現在、船主に定常航走試験を実施することを依頼しているが、まだその測定データを入手していない。

質問者 三井造船(株) 西浦茂夫

〔質問〕 このねじり動力計が長時間1%以内の高い精度をもつことは注目に値します。このねじり動力計のメ

リットを、初期投資の補償として、船主に還元することが重要であると考えます。この点について、以下の質問をしたい。

(1) 燃料消費量の計測において、通常3%の公差が許容されている。精度1%以内で軸動力を検出することのメリットは何か。実際の航海でこのメリットを利用する具体的なアイデアがあれば御教示下さい。

(2) ねじり動力計の長時間にわたる十分な信頼性について、具体的にどのようにお考えですか。

〔回答〕 (1) ねじり動力計の精度が良ければ、より一層信頼できる情報処理ができると考えている。従来、船底汚損による年間の主機出力増加率は20~60%と言われてきたが、われわれはこの問題に対する有効な管理手段を持たなかった。推進動力情報の利用技術は今後開発される必要があるが、今のところ、次のような利用が期待できる。

- ① 船底汚損や気象・海象による推進動力増加の監視。
- ② 最適な船底掃除時期の選定による省エネルギー。
- ③ 船底塗料の効果の判定。
- ④ 主機関の過酷なトルクリッチ運転の防止。
- ⑤ 主機関性能の経時劣化の監視、および保守整備の指針。
- ⑥ プロペラ設計適否の判定。
- ⑦ 可変ピッチプロペラの動作点の適正化による省エネルギー。
- ⑧ 軸系トルク信号を利用した種々の制御。
- ⑨ プロペラ清掃効果の判定。

などである。

(2) 船舶の運航管理に使用するねじり動力計は、10年以上の信頼性が必要であると考えている。本精密軸出力計の1号機は、実船において2ケ年を経過した現在、なお安定に機能している。

質問者 東京商船大学 岡田 博

〔質問〕 (1) 実船において、無負荷時の電氣的位相差 $\alpha_0^{(1)}$ はどのようにして求めたか。

(2) 旋回運転中の伝達トルク(図6)はトルクリッチになっていると考えてよい。また、クラッシュ・アスターン(図7)、アヘッド(図8)の場合には、軸回転数の増減によって、トルクブアまたはトルクリッチになっていると判断してよい。

(3) 回帰係数 β 値の再現性が1%以下の誤差であるということは、トルク変動をふくめた実伝達トルク値を1%以下の誤差内で計測すると解してよい。

(4) 測定値に対するノイズの影響はあるか。

〔回答〕 (1) これは零点調整の問題です。付録2を参照して下さい。

(2) 図6における最大トルクは、船用負荷特性に対し、45%および52%トルクリッチである。また図7と図8では、エンジンプレーキの状態から103%トルクリッチの状態まで変化している。しかし、これらの値は主機の

操縦操作によって変わります。

(3) 言われるとおりです。工場における校正試験によれば、軸出力計自身の再現性は、いずれも誤差 0.1~0.3 % FS の範囲に入っています。

(4) 本方式では、信号の位相差を直ちに周波数に変換

するので、信号処理過程ではほとんどノイズの影響をうけない。しかし、入力信号に強力な外部ノイズが混入すると異常値を表示する。したがって、船内に強力なノイズがあるときは、適当な防止手段をとって、表示値にノイズの影響が全く現われないようにしている。