

## 荒天時の航行における出力と船速及び燃料消費量の変化

津田 稔<sup>1†</sup>, 前田和幸<sup>1</sup>, 小松和也<sup>2</sup>, 三好佳廣<sup>2</sup>

### Evaluation of the Effect of Rough Seas on Engine Output, Ship Speed and Fuel Consumption

Minoru Tsuda<sup>1†</sup>, Kazuyuki Maeda<sup>1</sup>, Kazuya Komatsu<sup>2</sup> and Yoshihiro Miyoshi<sup>2</sup>

We acquired data on the relationships between engine output, ship speed and fuel consumption, and used these data to evaluate the operation of ships. In order to clarify the effect of rough seas on the engine output, ship speed and fuel consumption and to evaluate methods for reducing fuel consumption, the engine output and the ship speed of a 2342ton/2795kW ship during an ocean voyage were measured using a dynamometer and a doppler log, respectively; wind data was also analyzed for the voyage. In addition, fuel consumption is discussed in the light of these results. The following conclusions were arrived at: (1) When the wave scale increased by one, the engine output increased by about 3%, the ship speed decreased by about 3% and the fuel consumption increased by about 6%. (2) There is a good correlation between an increase in the relative wind speed and a reduction in the ship speed. (3) The route that minimizes the fuel consumption can be determined from the relative wind speed and relative wind direction data.

**Key word**: engine output, ship speed, rough sea, sea condition, reduction of fuel consumption

#### 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2005年からNO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>に対する規制が行われており、2006年から粒子状物質 (PM) に対する規制が検討されている。また、これと並行して各国、各地域においても独自の規制が検討されているが、実船における排出実態に関する報告は少ない<sup>1)~3)</sup>。船舶から排出される大気汚染物質は通常、出力・時間あたりの排出量 [g/kWh] で評価されるため、これらの排出特性を明らかにする場合、航行中の船舶における軸出力を計測する必要がある。また、出力は燃料消費量に比例するため、航行中の船舶において精度の高い軸出力を連続して計測することは船舶の運航管理上も重要となる。著者らは夏の日本海において、海上の穏やかな状態における軸出力の計測精度を検討した。その結果、通常の運航状態 (負荷率38%以上) における計測誤差は±2%以内になることを明らかにした<sup>3)</sup>。

しかし、船舶における大気汚染物質の排出特性を検討したり、出力の計測値を運航管理に用いたりする場合、海上が穏やかな状態で航行する場合に加え、荒天時における特性も明らかにする必要がある。これまでの報告によれば、NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM等の大気汚染物質は燃料消費量と相関がある<sup>1)~3)</sup>が、外洋の荒天航行時においては船体抵抗が増加するため、通常航行時に比べて同一の機関回転数での航行に要する出力が増加するとともに、船速が低下する。その結果、航行距離に対する燃料消費量も増加し、大気汚染物質もその分だけ増大するものと考えられる。

本研究では、まず、軸馬力計を設置した水産大学校の練習船耕洋丸を用いて、南太平洋方面の遠洋航海時において実船実験を行い、海況が出力と船速に及ぼす影響を明らかにするとともに、その原因について検討した。次に、これらの結果を用いて、海況が燃料消費量に及ぼす影響を明らかにするとともに、その低減方法について検討した。

2007年1月9日受付, Received January 9, 2007.

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

2 水産大学校練習船耕洋丸 (Training Ship Koyo Maru, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (corresponding author): tuda@fish-u.ac.jp

## 2 実験装置と方法

実験には、低速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。その写真をFig. 1に示し、主要目をTable 1に示す。主機関の軸出力を測定するために、全光学式軸馬力計(MHIマリンエンジニアリング, TOTOM, ねじり検出精度0.25%)を用いた。この軸馬力計の測定原理をFig. 2に示す<sup>9)</sup>。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。出力がゼロの場合は、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 $\delta$ 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 $\delta$ を求め、次式によりトルクQと出力Neを求めた。

$$Q = \frac{\pi D^3 G}{32} \cdot \frac{K_s (V_m - V_0)}{L \cdot R} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad \dots (1)$$

$$N_e = 2 \pi n Q / 60 \quad [\text{W}] \quad \dots (2)$$

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。

また、これと同時に風浪階級表<sup>10)</sup>に基づく風浪階級(以後、これを海況と記す)を、風向・風速計(日本エレクトリック・インスルメント:N162D)により風向と風速を、ドップラーログ(日本無線:JLN-615)により船速を、燃料流量計(日東精工:RC25CFF-P5)により燃料消費量を、GPS(日本無線:JLR-7700MK II)により船舶の位置を計測した。なお、燃料消費量は一定量の燃料を消費する時間と燃料油の温度を計測し、密度換算と容積換算を行って算出した。

実験は、Fig. 3に示すように中・南部太平洋及び日本沿岸海域において、耕洋丸主機関の回転数を170rpmと205rpmに設定し、翼角を19.7度一定にした状態で、Suva~Auckland~Noumea~Saipan~下関における航行時において一日につき5~6回の計測を行った。海況はTable 2に示すように、海の状態、波高によって0~9まで区分<sup>11)</sup>され、本実験範囲は1~7の海況であった。海況1、4、7の写真をFig. 4に示す。

燃料油は市販のA重油を用いた。Table 3に供試燃料油の性状を示す。



Fig. 1. Experimental Ship "Koyo Maru"

Table 1. Specifications of Experimental Ship

Ship's Name		Koyo Maru	
Length (overall)	m	81.40	
Breadth	m	13.00	
Depth	m	8.40	
Gross Tonnage	ton	2342	
Trial Speed	knot	15.7	
Main Engine		6UET 45/75C	
Type			
Output	kW		2795
Engine speed	rpm		230
Pme	MPa		1.02
Bore	mm		450
Stroke	mm	750	
Date of Delivery		June/1978	

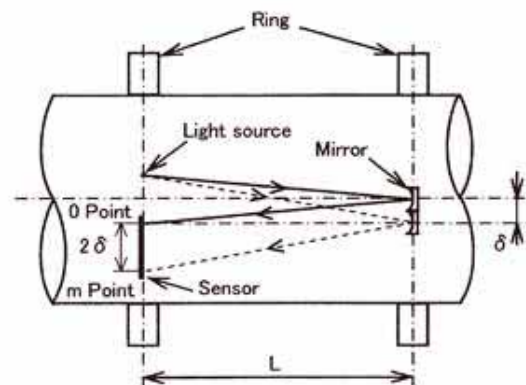


Fig. 2. Engine Output Measurement System

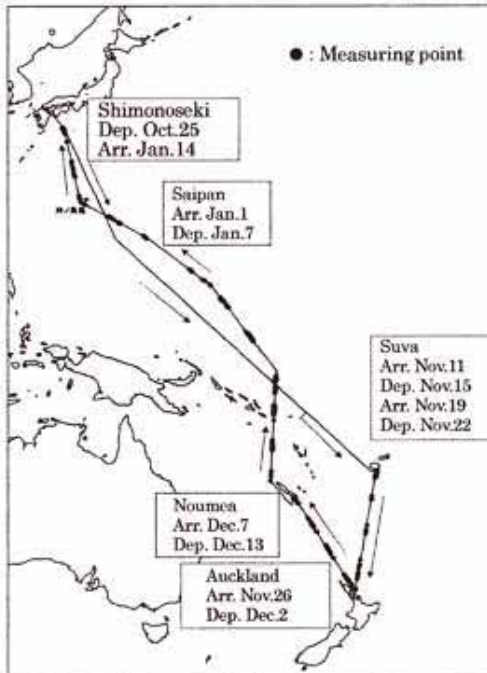


Fig. 3 . Measuring point

Table 2 . Wave Scale (Sea Condition)

Wave Scale (Sea Condition)	State of Sea	Height of Wave (m)
0	Calm (Glassy)	0
1	Rippled (Very Smooth)	0~0.1
2	Smooth (Wavelets)	0.1~0.5
3	Slight	0.5~1.25
4	Moderate	1.25~2.5
5	Rough	2.5~4
6	Very Rough	4~6
7	High	6~9
8	Very High	9~14
9	Phenomenal	14~

Table 3 . Fuel Properties

Fuel Properties	Marine Diesel Oil	
Density	(g/cm <sup>3</sup> )	0.8528
Kinematic Viscosity	(mm <sup>2</sup> /s)	2.461(50°C)
Flash Point	(°C)	65.0
Constituent	C (mass%)	86.1
	H (mass%)	13.1
	S (mass%)	0.79
	N (mass%)	0.01
Residual Carbon	(mass%)	0.01



(a) Sea Condition 1



(b) Sea Condition 4



(c) Sea Condition 7

Fig. 4 . Sea Condition

### 3 実験結果と考察

#### 3.1 出力の計測

実船において出力を計測する場合、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がある<sup>2)</sup>。本実験においては軸馬力計を用いて出力の計測を行ったが、軸馬力計は実船に取り付けた後は検定が行えない。そこで、本研究ではまず、出力と燃料消費量は相関があることから、陸上試運転時における出力と燃料消費量の関係との比較を行うことにより計測精度を確認した。Fig. 5 に軸馬力計を用いて計測した出力（以後、これを出力と記す）と燃料消費量の関係を示す。この図において、出力と燃料消費量との関係は陸上試運転時に、検定された水動力計を用いて計測したものとほぼ同じである。次に、③燃料消費量による方法から求めた出力との比較を行うことにより計測精度を確認した。Fig. 6 に出力と燃料消費量による方法から求めた出力の関係を示す。この図において、②軸馬力計による方法と、③燃料消費量による方法という異なる2つの方法を用いて求めた出力の値はほぼ同じである。

以上の結果より、本実験において計測した出力は信頼できる値であると考えられる。なお、陸上試運転時における出力に対して計測値にばらつきがあるのは、本実験においては海況が1～7に変化しているため、これに伴って機関の運転状態が変わったためと考えられる。

#### 3.2 海況が出力と船速に及ぼす影響

Fig. 7 に海況と出力の関係を示す。図中の破線は最小二乗法による一次の近似線である。各海況における誤差が大きいのは、Table 2 に示したように海況を段階的に区切っているためと考えられる。この図より、170rpm、205rpmのいずれの回転数においても海況の増加とともに出力は増大している。205rpmの場合は海況が1増加する毎に出力は約2%増加し、170rpmの場合は、海況が1増加する毎に出力は約3%増加し、海況7においては海況1と比較すると約18%増加している。

Fig. 8 に海況と船速の関係を示す。図中の破線は最小二乗法による一次の近似線である。この図より、170rpm、205rpmのいずれの回転数においても海況の増加とともに船速は低下している。205rpmの場合は海況が1増加する毎に船速は約3%減少し、170rpmの場合は、海況が1増加する毎に船速は約2%低下し、海況7においては海況1と比較すると約14%低下している。

海況の増加に伴う出力の増加量と船速の低下量については述べたが、その原因について検討する。

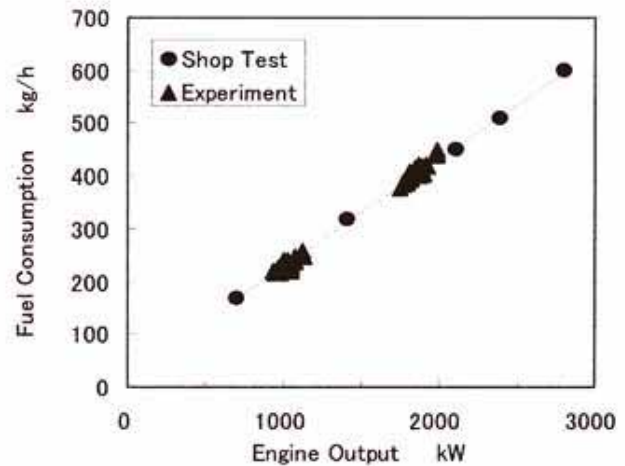


Fig. 5. Relationship between Engine Output and Fuel Consumption

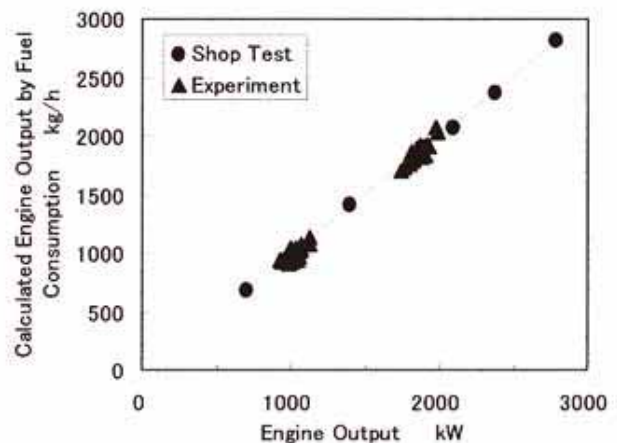


Fig. 6. Relationship between Engine Output and Calculated Engine Output by Fuel Consumption

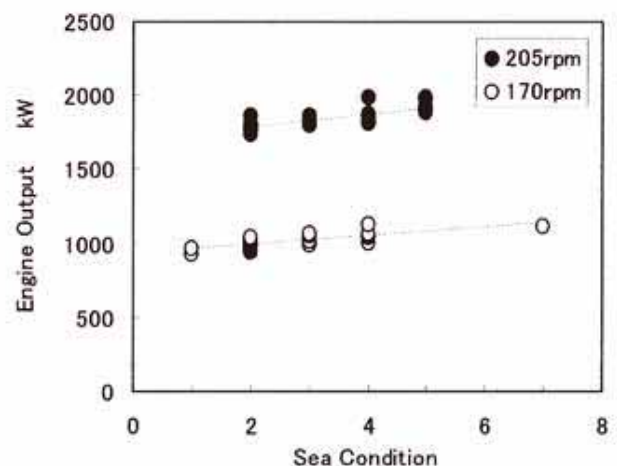


Fig. 7. Change in Engine Output on Sea Condition

Fig. 9 に海況と絶対風速の関係を示す。海況と絶対風速には相関があり、ビューフォート風力階級<sup>3)</sup>に示されるように絶対風速の増加とともに波高が高くなるものと考えられる。

船舶が平水中を航行するときに必要な動力(出力)Pは、全抵抗を $R_T$ 、摩擦抵抗を $R_F$ 、造波抵抗を $R_W$ 、渦抵抗を $R_U$ 、空気抵抗を $R_A$ 、船速をV、プロペラ効率を $\eta_p$ とすると次式により表される<sup>4)</sup>。

$$P \propto (R_T \cdot V) / \eta_p \quad \dots (3)$$

$$R_T = R_F + R_W + R_U + R_A \quad \dots (4)$$

さらに、船舶が荒天中を航行する場合は、風圧や波および船体動揺などのために船体の受ける抵抗が静穏な平水中より増加するので、式(4)に波および船体動揺による抵抗増加 $R_{sw}$ 、風による空気抵抗増加 $R_{aw}$ 、その他の原因による抵抗増加 $R_{ot}$ が加わり、船体の受ける抵抗が増加する<sup>5)</sup>とともに、ピッチングやローリングのため船尾やプロペラ周辺の水の流れが乱れるため渦抵抗 $R_U$ が増加し、プロペラ効率 $\eta_p$ は減少するものと考えられる。Fig. 7 の170rpmの場合において、海況7の出力は海況1の出力より約18%増加し、Fig. 8の船速については約14%減少している。これは、式(3)、(4)においてプロペラ効率の変化が少ないと考えると、船体の受ける抵抗が増加したためと考えられる。また、船舶が受ける抵抗は、絶対風速に加え絶対風向にも影響を受けるものと考えられる。この関係を明らかにするために、データ数が比較的多い海況3の170rpmの場合について検討する。Fig.10に絶対風速と船速の関係を示し、Fig.11に絶対風向と船速との関係を示す。Fig.10において、絶対風速の増加とともに船速は低下しており、絶対風速が1 m/s増加する毎に船速は約0.6%低下し、絶対風速が15m/sにおいては絶対風速5 m/sの場合より約6% (0.7 knot) 低下している。また、Fig.11において、絶対風向の値が小さくなる(正面から風を受ける)ほど船速は低下しており、絶対風向が10deg.減少する毎に船速は約0.6%低下し、絶対風向が8 deg.においては絶対風向75deg.の場合より約4% (0.5knot) 低下している。これらの結果より、航行中の船舶においては絶対風速と絶対風向による船体の受ける抵抗の増加割合を計算することができる。

Fig.10において、絶対風速が0 m/sの場合の船速を12.2 knotとし、絶対風速が15m/sの場合の船速を11.1knotとして、絶対風速の増加による船速の低下割合を計算するとともに、この値を用いて修正した船速の値をTable 4に示す。この表において、船速の計測値は11.3 ~ 11.9knotと0.6knotの差があるが、修正された船速の値は12.0 ~

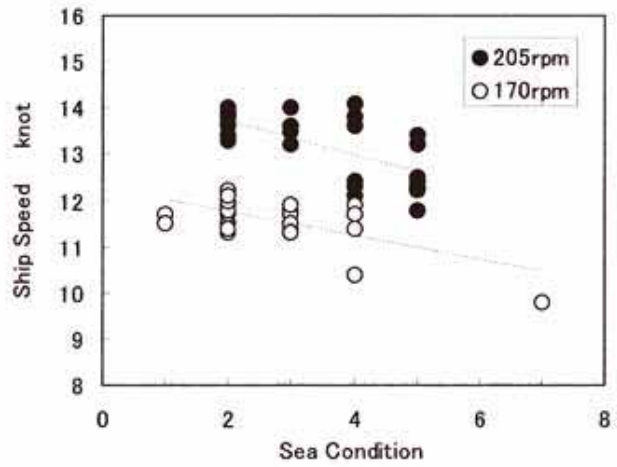


Fig. 8. Change in Ship Speed on Sea Condition

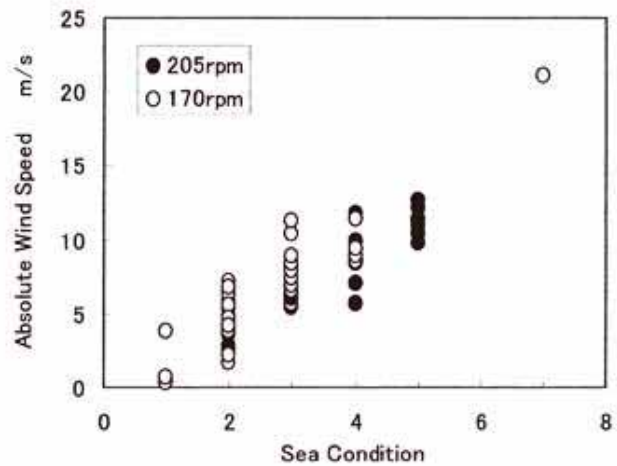


Fig. 9. Relationship between Sea Condition and Absolute Wind Speed

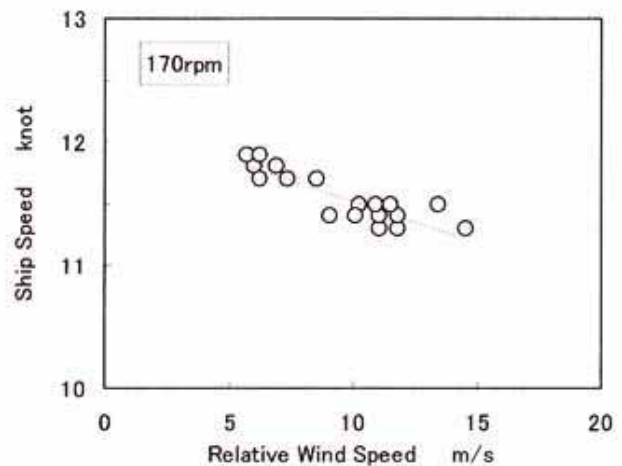


Fig. 10. Relationship between Relative Wind Speed and Ship Speed at Sea Condition 3 (170rpm)

Table 4. Calculated Ship Speed (Sea condition 3, 170rpm)

Measured Ship Speed	knots	11.3	11.3	11.3	11.3	11.4	11.4	11.4	11.4	11.5	11.5
Relative Wind Speed	m/s	11.0	11.8	11.8	14.5	9.0	10.1	11.0	11.8	10.2	10.9
Decrease of Ship Speed	knots	-0.7	-0.8	-0.8	-1.0	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7
Corrected Ship Speed	knots	12.0	12.1	12.1	12.3	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2

Measured Ship Speed	knots	11.5	11.5	11.7	11.7	11.7	11.8	11.8	11.9	11.9	
Relative Wind Speed	m/s	11.5	13.4	6.2	7.3	8.5	6.0	6.9	5.7	6.2	
Decrease of Ship Speed	knots	-0.8	-0.9	-0.4	-0.5	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	
Corrected Ship Speed	knots	12.3	12.4	12.1	12.2	12.3	12.2	12.3	12.3	12.3	

12.4knotと約半分の差となっている。今回はデータ数が比較的多い170rpmの海況3の相対風速のみを用いた修正を行ったが、今後データ数を更に増やすとともに詳細な解析を行うことにより、船速の低下割合を推計できる。

### 3.3 海況が燃料消費量に及ぼす影響

船舶の運航時における燃料消費量を検討する場合、通常航海時間当たりの燃料消費量 [kg/h] を用いるが、荒天時には船速が低下し航海時間が長くなるため、航行距離当たりの燃料消費量 [kg/(n・mile)] で評価する必要がある。また、現在国際的な規制の対象となっているNOx, SOx, PMは燃料消費量と相関があり、地球温暖化ガスであるCO<sub>2</sub>は燃料消費量に比例する。さらに、昨今の燃料油価格の上昇は船舶運航者や漁業経営者の経営を圧迫する状態をもたらしているため、燃料消費量を低減することは、大気汚染物質の低減につながるとともに、運航管理、漁業経営上も有効である。

Fig.12に、本実験範囲内において計測されたデータを基に、海況と1000海里を航行する際に必要な燃料消費量との関係を算出した結果を示す。この図より、いずれの機関回転数においても海況の増加とともに航行距離当たりの燃料消費量は増加しており、170rpmの場合は海況が1増加する毎に燃料消費量は約6%増加し、海況7においては海況1と比較すると30%以上増加している。荒天時には、式(4)の造波抵抗 $R_w$ 、渦抵抗 $R_e$ 、空気抵抗 $R_a$ が増加するが、そのほとんどは造波抵抗 $R_w$ と考えられる<sup>10)</sup>。造波抵抗 $R_w$ は船速 $V$ の二乗に比例する ( $R_w \propto V^2$ ) ため、船速が大きいかほどその影響が大きい。図において、205rpmのほうが、燃料消費量の増加割合が大きいのは、船体を受ける抵抗が増加することにより船速が低下するとともに燃料消費量が増加するためである。このことから、荒天時には機関回転数を抑えて(船速を落として)航行すること

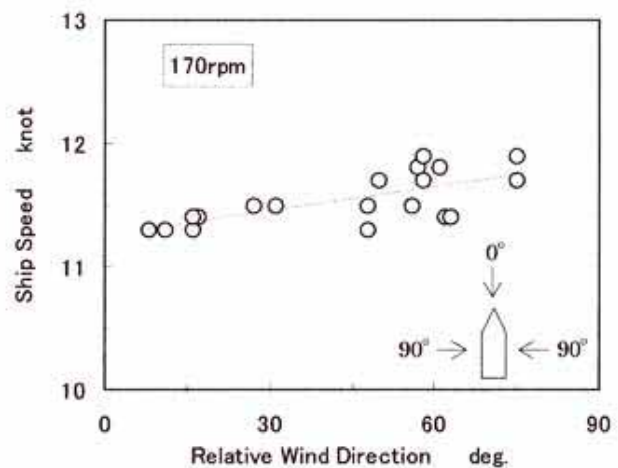


Fig.11. Relationship between Relative Wind Direction and Ship Speed at Sea Condition 3 (170rpm)

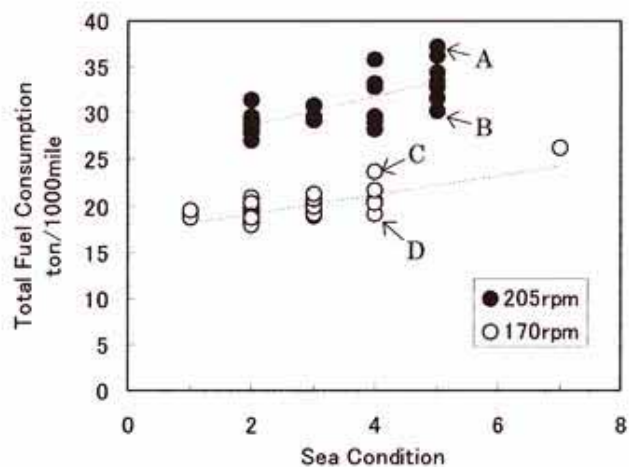


Fig.12. Change in Total Fuel Consumption on Sea Condition

により造波抵抗を含む全抵抗の増加を抑え燃料消費量の低減を図ることができると言える。また、図中のAとBを比較すると、同じ回転数と海況でも、必要な燃料に2割以上の差がある。図中のAにおける各計測値は、相対風向49deg., 相対風速15.8m/s, 船速11.8knot, 出力1987kWで、Bにおける各計測値は、相対風向65deg., 相対風速11.5m/s, 船速13.4knot, 出力1894kWである。このように同じ海況でも、相対風向が船首側になるほど、相対風速の値が大きいほど船速が低下するとともに燃料消費量が増大するため、1000海里を航行する際に必要な燃料消費量に大きな差を生じる。170rpmの場合のC, Dにおいても同様のことが言える。また、Fig.10, 11にも示したように、船速は相対風向・風速に大きな影響を受けるため、これらに対する最適方向が存在する可能性がある。このように風向と風速などの気象・海象情報を基に船舶の運航形態を考慮した推薦航路の情報を提供するサービス<sup>2)</sup>があるが、これは特定の海域における瞬時の情報には対応できていない。そこで相対風向や相対風速が船速や出力に及ぼす影響をリアルタイムで計測し、これを用いて燃料消費量が最小となる航路を決定することができる。

#### 4 まとめ

本研究では、外洋を航行する船舶が荒天に遭遇した場合、出力と船速がどのように変化するかを明らかにするとともにその原因について検討した。また、これに伴う燃料消費量の変化を明らかにした。本実験範囲における要点は次のとおりである。

- (1) 海況の増加とともに出力は増大する。205rpmの場合は海況が1増加する毎に出力は約2%増加し、170rpmの場合は約3%増加し、海況が7になると海況1と比較すると約18%増加する。
- (2) 海況の増加とともに船速は低下する。205rpmの場合は海況が1増加する毎に船速は約3%減少し、170rpmの場合は約2%減少し、海況が7になると海況1と比較すると約14%低下する。
- (3) 海況の増加とともに航行距離当たりの燃料消費量は増

加し、170rpmにおいては海況が1増加する毎に燃料消費量は約6%増加する。また、海況7においては海況1と比較すると30%以上増加する。

- (4) 船速の低下は相対風向・風速と相関があるため、相対風向・風速を観測することにより船速の減少値を推計できる。
- (5) 相対風向や相対風速が、船速や出力に及ぼす影響をリアルタイムで計測し、これを用いて燃料消費量が最小となる航路を決定することができる。

おわりに、本研究のデータ採取に際しご協力をいただいたMHIマリンエンジニアリング株式会社、耕洋丸（船長：田淵清春氏）の乗組員諸氏、当時学生の太田教規君（現：内海造船株式会社）ならびにデータ解析に際しご助言をいただいた濱口正人教授に謝意を表します。

#### 文 献

- 1) 前田和幸, 安成幹男, 日笠純扶, 森下晋一: 船用機関学会誌, 28, 31-37 (1993).
- 2) Maeda K, Takasaki K, Kirihata T and Tsuda M: Proc. of the 23rd CIMAC, 562-569 (2001).
- 3) 津田 稔, 前田和幸, 三好佳廣, 小松和也: 水大校研報, 53, 191-196 (2005).
- 4) Maeda K, Wakuri Y, Takasaki K and Morishita S: Proc. of 22nd CIMAC, 729-738 (1998).
- 5) Maeda K, Takasaki K, Masuda K, Tsuda M and Yasunari M: Proc. of 24th CIMAC, No. 107 (2004).
- 6) 池田 勉, 倉本繁男: 船用機関学会誌, 27, 624-628 (1992).
- 7) 船舶気象観測指針改訂第6版: 気象庁, (2004).
- 8) 面田信昭: 船舶工学の基礎, 成山堂書店, 東京, (1978).
- 9) ウェザー・ルーティング研究グループ編著: ウェザー・ルーティングー気象情報に基づく最適航法ー, 成山堂書店, 東京, (1992).
- 10) 野原威男: 航海造船学, 海文堂, 東京, (2003).