

EEDIと荒天下性能 一過去の教訓に学ぶ一

正会員 一色 浩*

EEDI and Performance of a Ship under Rough Weather
— Teachings from the Past —

by Hiroshi Isshiki, Member

Key Words: EEDI, Teaching from Past, Muskie Act, Rough Weather, Speed Drop, Safety of Ship, Wave Energy

1. 緒 言

EEDI (Energy Efficiency Design Index : エネルギー効率化設計指標、さらに COP21

時と共に激しく変化する社会の要請に常に誠実かつ適切に応えねば、企業が生き残ることはできない。世界的規模で進展する地球温暖化による地球環境破壊を如何に食い止めるかが、人類史上における最大の問題になっている。造船産業に突きつけられているのは、IMOのEEDI(エネルギー効率化指標)規定である。CO2排出を、2013年を基準にして2015年10%、2020年20%、2025年30%削減するという大変厳しいものである。

かつて自動車産業には、マスクー法という厳しい排ガス規制が課された。この規制をクリアすることは不可能といわれたが、ホンダを筆頭とする日本企業はこれに正々堂々と果敢に挑戦して、大成功を収めた。これにより日本の自動車産業が大発展を遂げたといわれている。このような過去の経験は我々に貴重な教訓を与えてくれるのではなからうか？

EEDIを満足するためには、主機の出力を削減せざるを得なくなるであろう。したがって、先ず第一に平水中の推進性能を一層向上させねばならない。しかし、主機出力を大幅に減らすと、荒天中での速力減が課題となり船の安全航行が難しくなる可能性があり、荒天下での安全性確保が課題となろう。本論では、荒天下に豊富に存在する波や風といった自然エネルギーを活用して、この課題を克服する可能性を論ずる。特に波エネルギーの利用に焦点を合わせる。

参考文献1-12)にあるように、荒天中で波エネルギーを推進エネルギーに変換して、荒天中の速力減に対抗することは原理的に可能である。具体的には、船首に設置された小さな水中翼を使うことが出来る。船首水中翼は船の運動と抵抗増加を減らし、翼自体も推力を発生する。このような二つの要因により、波浪中での船の速力減を緩和することにより、船の航行の安全性を向上できよう。

荒天中の安全確保の目的には、小さな翼で良いということは以下の理由による。例えば、Beaufort 10の海象下で向かい波という条件は、通常考えられる最も厳しい条件である。1/3有義波高 $H_w^{1/3}$ は9m、波長は206.3mである。このような海象での波エネルギーは極めて大きい。小さな翼でも大きな抵抗増加を大きく減少できる。参考文献10)に依れば、水中翼により30%の主機出力減を回復することを考えると、水中翼による浸水面積の増加は、

一方、神戸大学の笹健児準教授の概算によると、ばら積み貨物船がBeaufort 8以上の荒れた海象に遭遇する確率は8%とのことである。このことは、平水時に翼を船体内に格納しなくても、荒天下で得られる利得が平水下の損失をカバーできることを示唆する。しかし、翼の大きさは通常のフィン・スタビライザ程度のものであるので、フィン・スタビライザと同様に平水時には船体内に格納でき、平水時の推進性能をなんら損なうものではない。最近、安川¹¹⁾は興味深い実験を行った。それは、いかの頭のような形状のフィンを内海コンテナ船模型(実船長:80m)の船首に設置して、波浪中の運動・推進性能を調べたものである。本来の目的はブリッジの上下加速度を減少させる狙いであったが、実波長が1.2m以上のときに明瞭な波浪中の抵抗増加減少が得られている。この翼付き内海コンテナ船は実際に建造されて、日本沿岸で運航されているとのことである。

2. マスクー法による厳しい自動車排ガス規制

1963年大気浄化法が米国議会で制定された。酸性雨対策やオゾン層の保護が目的で、自動車の排出ガスや二酸化硫黄排出量の削減、フロンや四塩化炭素の全廃が主な内容である。1970年、77年、90年に大幅な改正がなされている。

1970年大気浄化法改正法は最も有名なもので、通称**マスクー法(Muskie Act)**と呼ばれる。その内容は以下のような極めて厳しいものであった。

(1) 1975年以降に製造する自動車の排気ガス中の一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)の排出量を1970-1971年型の1/10以下にする。

(2) 1976年以降に製造する自動車の排気ガス中の窒素酸化物(NOx)の排出量を1970-1971年型の1/10以下にする。

(3) 達成しない自動車は期限以降の販売を認めない。

レシプロエンジンでは1972年に日本車メーカーのホンダがCVCCエンジンを開発してクリアし、翌1973年にはマツダのロータリーエンジンもクリアした。日本では1973年にマスクー法の目標値を完全達成した。

しかし、“ビッグスリー”側(GM、フォード、クライスラー)からの反発も激しく、1973年4月にマスクー法は1年間の実施延期、翌1974年6月には1970年改正法修正法が成立し、マスクー法の正規規制値は実質的な廃案とされた。修正規制値の適用も更に2年間延期された。アメリカ本土においては1995年に、マスクー法で定められた基準に達した。

2012年、韓国の現代自動車と傘下の起亜自動車が、アメリカ国内で販売したヒュンダイ・サンタフェなどで燃費の過大表示を行っていたことが発覚した。2014年11月3日、アメリカ司法省と環境保護局は、両自動車会社

* (有)数理解析研究所

原稿受付 平成28年3月25日

春季講演会において講演 平成28年5月26,27日

©日本船舶海洋工学会

が大気浄化法に違反したとして、制裁金として過去最高額となる1億ドルを支払うことで和解した。

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A7%E6%B0%97%E6%B5%84%E5%8C%96%E6%B3%95>

ビッグ3をはじめ世界の自動車メーカーが「実現は不可能」とさじを投げたハードルを、四輪事業に参入したばかりのホンダが世界で初めてクリアした。1973年3月に米国で開かれたEPAの公聴会で、1975年にマスキー法をクリアできると証言したのはホンダと、ロータリーエンジンの開発に成功した東洋工業だけだった。CVCC技術はまずトヨタに供与され、その後ビッグ3のフォードやクライスラーも取り入れた。

1973年10月に発生した第1次オイルショックでガソリン価格が高騰すると、発売されたCVCC搭載のホンダ「シビック」をはじめ、燃費性能に優れた日本車は米国への輸出を急激に拡大。55年には生産台数で米国を一気に抜き去り、世界に躍り出た。CVCCの快挙は、環境技術が競争力を左右するという、今日に至る自動車産業の流れを決定付けた。

<http://www.sankei.com/column/news/141101/clm1411010008-n4.html>

以下のことから、ブレークスルーは意外なところにあることが分かる。ホンダが基にしたのは、ロシアの技術であった。副室式燃焼室は、燃料供給や着火方法こそ異なるが、予燃焼室式や過流室式といった熟成されたディーゼルエンジン技術の応用である。CVCCについては、旧ソ連の副室式エンジンに関する技術論文に基づいている。

余談であるが、研究開発に1兆円の予算が投じられた増殖炉・文殊は廃炉の瀬戸際にある。しかし、真偽は定かでないが、最近ロシアで商業化に成功したという話題がネット上に流れている。その内容は、「ロシアが2015年12月10日、ベロヤルスク原発の高速増殖炉「BN-800」が商業的に電力供給を開始し、その出力は880MW」というものである。

<http://www.businessnewsline.com/news/20151211125515000.0.html>

3. フォルクスワーゲン社のカンニング

最近、フォルクスワーゲン社の米国の排気ガス試験におけるカンニングが発覚して大きな話題になった。

今回の最大の問題点は「Defeat Device (ディフィート・デバイス)」の使用だった。ディフィートとは無効化という意味で、このデバイスには排出ガスの室内試験の時だけ浄化装置を有効に作動させ、実際にユーザーが使う時は浄化装置が無効になるという悪質なプログラムが組み込まれていた。いうなればテストに受かるためのカンニングのようなもので、欧米では反社会的行為としての使用が禁止されている。

空気中には窒素が78%も含まれるので、どうしてもNOxを大量に生成しやすい。ガソリンエンジンもNOxを排出するが、三元触媒という優れた浄化装置で処理できる。だが、ディーゼルはこの三元触媒が使えない。そこで白金触媒や尿素水を使った触媒を使い、さらにEGR(排気ガス還元装置)を使って排気ガスをシリンダーに戻す装置が必要となる。しかし、NOxの浄化装置をフルに使うと、燃費やエンジンの性能に影響してしまう。ここが問題だった。

「NOxと燃費」、あるいは「NOxと走りの性能」は二律背反の関係にある。燃費をよくするとNOxが発生しやすく、NOxを減らすと燃費が悪く、さらに走行性能が低下する。燃費や走りはユーザーにとって重要だし実感として分かる。だが、NOxは無味無臭で、排出を理解し

づらい。フォルクスワーゲンは排ガス試験のときだけ起動するプログラムを忍ばせたのだ。

<http://autoc-one.jp/volkswagen/special-2518780/>

上述のようなインチキ事例は、残念ながら日本にもある。東洋ゴム工業の免振装置に関するもの、旭化成建材の不正くい打ちに関するものである、理研のSTAP細胞事件である。STAP細胞事件では、論文発表者の中から疑惑告発があったのは唯一の救いであるが、自殺者まで出しながら最後はうやむやで、再発の余地を残している。いづれも企業ぐるみとは言いつれず、担当者レベルとも考えられるが、このようなインチキ事例は激しい競争の中で増加傾向にあると考えられる。

4. 主機出力削減と荒天下運航の安全確保

EEDIに伴い問題となる船の運航性能は、平水中性能と波浪中性能に分かれる。平水中ではより一層の推進性能の向上が求められる。波浪中では大き過ぎる速力減による航行の安全性の問題、すなわち波浪中での操縦性能の問題がある。大きな速力減を緩和する推進性能の向上は、省エネの観点だけでなく、安全性の問題にも直結している。また、乗り心地の向上も強く望まれることであろう。

波浪中の航行性能を確保する一つの方法はウェザールーチングであるが、操縦性能やスピード低下に対する革新的技術の開発も望まれるところである自然エネルギーの利用は有力な方向と思われる。

5.1 波エネルギーの利用

波浪中では大変大きな減速が起きて、船の安全性を脅かす。一方、Table 1に示されるように、荒天下には波や風のエネルギーが豊富に存在する。EEDIによる主機出力の減少分を、自然エネルギーを船の推進に利用することによりカバーしようとするのは、ごく自然な発想であろう。本論では波エネルギーの利用に焦点を合わせる。

Table 1. Sea state and natural energy

Beau- fort		U Wind (kn)	λ (m)	H _{1/3} (m)	T Wav (s)
6	雄風	22~27	69.82	3.0	6.69
7	強風	28~33	92.97	4.0	7.72
8	疾強風	34~40	127.8	5.5	9.05
9	大強風	41~47	162.3	7.0	10.2
10	全強風	48~55	206.3	9.0	11.5
11	暴風	56~63			
12	颶風 (ぐふう)	64以上			

Fig. 1 に波エネルギーを推進に利用する場合のイメージを示す。



Fig. 1 Install of an extractable bow fin in a bow bulb

5.2 簡単な推算

著者が日立造船技研に在職中に行った波力推進の実験結果⁸⁾に基づいて、簡単な推算¹⁰⁾を行った。その結果によれば、荒天下に波浪による速力減を過大にしないという目的に、すなわち EEDI による主機出力 30%削減による速力減少分を波力推進で取り戻すという目的に限定すれば、船首に通常のフィンスタビライザ程度の大きさの小さな翼を設置すれば良い。

翼が小さいので平水時に格納する必要がないと思われるが、平水時の抵抗増加があってはならないということであれば、船首バルブ内に格納すれば良い。

上述の簡単な推論結果はすでに発表されているので、今回はストリップ法によるより詳しい計算結果を報告する¹⁰⁾。

5.3 ストリップ法による計算結果

向かい波中における翼付き船の運動性能（運動性能と推進性能）を、ストリップ法を用いて検討した。

翼付き船の運動は、船体に翼を付加した運動を、通常のストリップ法を用いて検討した。

運動方程式としては、船のヒープ振幅を Z 、船のピッチ振幅を Θ 、翼のピッチ振幅を θ として、下記のものを用いた。

船のヒープ運動：

$$\begin{aligned} & \left(-(m_{11} + m_{33})\omega_e^2 + c_{11} + i(n_{11} + n_{33})\omega_e \right) Z \\ & + \left(-(m_{12} - l_s m_{33})\omega_e^2 + c_{12} + i(n_{12} - l_s n_{33})\omega_e \right) \Theta \cdot \\ & + \left(-m_{34}\omega_e^2 + i n_{34}\omega_e \right) \theta = F_{wh} + F_{wf} \end{aligned} \quad (14)$$

船のピッチ運動：

$$\begin{aligned} & \left(-(m_{21} - l_s m_{33})\omega_e^2 + c_{21} + i(n_{21} - l_s n_{33})\omega_e \right) Z \\ & + \left(-(m_{22} + l_s^2 m_{33})\omega_e^2 + c_{22} + k_p + i(n_{22} + l_s^2 n_{33})\omega_e \right) \Theta \cdot \\ & - k_p \theta = -F_{wf} l_s + M_{wh} \end{aligned} \quad (15)$$

翼のピッチ運動：

$$\begin{aligned} & \left(-(m_{21} - l_s m_{33})\omega_e^2 + c_{21} + i(n_{21} - l_s n_{33})\omega_e \right) Z \\ & + \left(-(m_{22} + l_s^2 m_{33})\omega_e^2 + c_{22} + k_p + i(n_{22} + l_s^2 n_{33})\omega_e \right) \Theta \cdot \\ & - k_p \theta = -F_{wf} l_s + M_{wh} \end{aligned} \quad (16)$$

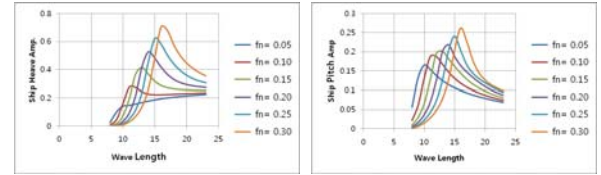
以下の計算においては、Table 2 に示される計算パラメータを用いた。

Table 2 Particulars of hull and foil

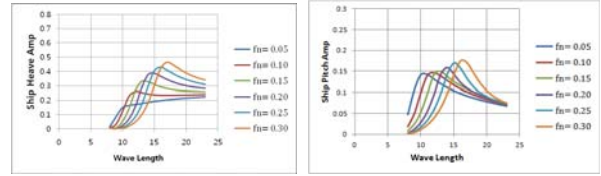
Hull	Hull form: Wigley Length=10m; Breadth=1.81m; Draft=0.65m Cb=0.715; Long. Rad. of gyr./Ship lgth.=0.25
Foil	hs=0.3875m; c=0.366m; Area=0.1418m ² ls=-5.0~+5.0m: ctr of grav. to foil pivot point s x _G =-2.5~+2.5m: cg l ₁ =0.183m: s to foil geometric center l ₂ =-0.915m: s to foil lift center mf=ρ(hs)c Foil is fixed to the ship hull.
Unit	Length: m; Time: s; Force: Kgf

6.1 翼の効果

船の重心はミッドシップに、翼は船首にあるものとする。Fig. 2 は翼のある場合とない場合の船の運動を示す。そのときの抵抗増加と翼の推力を Fig. 3 に示す。翼を付けることにより、船のヒープとピッチはかなり減少する。抵抗増加も大幅に減少する。翼が小さいので、翼推力はそれほど大きくない。正味の抵抗増加は、「抵抗増加－翼推力」で定義される。

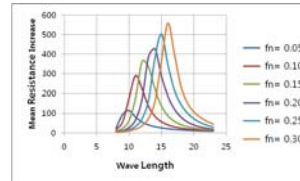


(a) Without a foil ($x_G=0.0$)

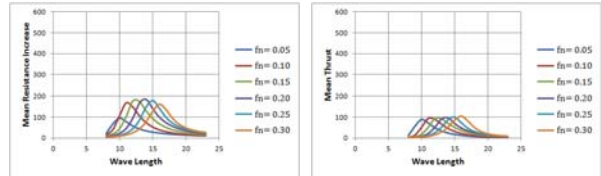


(b) With a foil ($x_G=0.0, l_s=5.0$)

Fig. 2 Ship motion



(a) Without a foil ($x_G=0.0$)

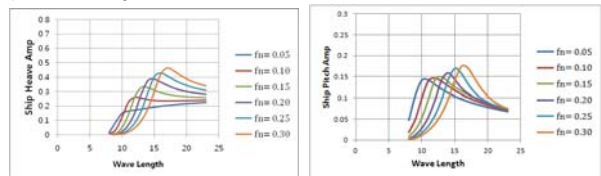


(b) With a foil at bow ($x_G=0.0, l_s=5.0$)

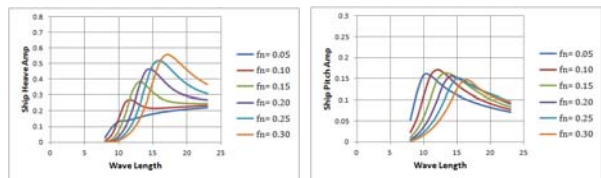
Fig. 3 Resistance increase and foil thrust

6.2 翼位置の検討

翼を船首に付けた場合と船尾につけた場合を比較する。Fig. 4 に示されるように、前者の運動は後者の運動よりも小さい。Fig. 5 に示されるように、抵抗増加は逆の傾向を示す。要するに、翼は船尾よりも船首に付けるほうが効果的である。

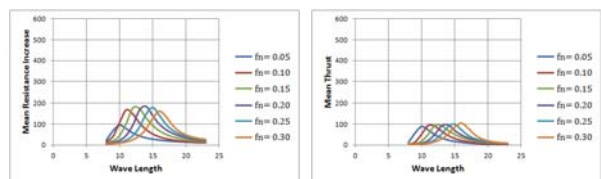


(a) With a foil at bow ($x_G=0.0, l_s=5.0$)

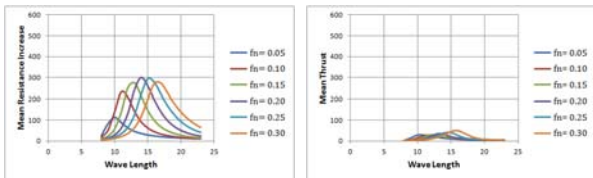


(b) With a foil at stern ($x_G=0.0, l_s=-5.0$)

Fig. 4 Ship motion



(a) With a foil at bow ($x_G=0.0, l_s=5.0$)



(b) With a foil at stern ($x_G=0.0, l_s=-5.0$)

Fig. 5 Resistance increase and foil thrust

6. 結言

激しく変化する時代の要請に応えられない企業は衰退する。これまで日本の産業は多くの困難を克服してきた。この貴重な体験から以下のような教訓を得た。

- (1) 不誠実に対応すると、大きなシッペ返しにあう。日本人は正々堂々と戦う。そういう形で武士道が生きているのではないか。
- (2) ブレークスルーは意外なところにある。
- (3) 今世紀の終わりには炭酸ガス排出ゼロまで行く？
… 化石燃料から決別することになろう
- (4) 省エネと自然エネルギーの活用が益々重要になる。
- (5) 荒天時船舶運航の安全確保には自然エネルギーを利用すべきであろう。
- (6) 古典的な工学の知識が大切である。計算力学万能は無駄が多いし危険でもある。

参考文献

- 1) Wave Energy for propelling Craft - Nothing New -, *The Naval Architect*, (Nov/1973), pp.239.
- 2) M. A. Abkowitz, The effect of antipitching fins on ship motions, *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 67 (1959) 210-252
- 3) T. Y. Wu, Extraction of flow energy by a wing oscillating in waves, *J. Spacecr. Rockets*, xx (1972) 66-78
- 4) E. Jakobsen, The foilpropeller, wave power for propulsion. *The Second International symposium on Wave & Tidal Energy*, BHRA Fluid Engineering (1981) 363-368
- 5) H. Isshiki, M. Murakami, A Theory of Wave devouring propulsion (3rd report) - An experimental verification of thrust generation by a passive-type hydrofoil propulsor -, *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*, No.154 (1983) 125-135.
- 6) H. Isshiki, M. Murakami, Y. Terao, Thrust generation by a hydrofoil driven by waves - A basic aspect of wave ship propulsion, *5th International Symposium & Exhibit on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) held at Tokyo*, (Apr. 1986).
- 7) H. Isshiki, S. Naito, An application of wave energy - Thrust generation by a hydrofoil in waves-, "*Current Practices and New Technology in Ocean Engineering*" Symposium, ASME's Ocean Engineering Division held at New Orleans, (1986).
- 8) H. Isshiki, Wave energy utilization into ship propulsion by fins attached to a ship, *Proceedings of the Fourth (1994) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan (Apr/1994) 508-521
- 9) S. Naito, H. Isshiki, Effect of bow wings on ship propulsion and motions, *Applied Mechanics Review*, 58(4) (2005) 253-268
- 10) H. Isshiki, Utilization of Wave Energy To Improve Propulsive and Seakeeping Performances of a Ship in Rough Weather, *Asian Journal of Engineering and Technology*, Volume 03, Issue 06 (2015).
- 11) H. Yasukawa, S. Ikezoe & E. Koike, Improvement of service performance of a Ship by Horizontal Fins, read at *Meeting of The Japan Society of Naval Architects and Engineers* (2013) in Japanese

- 12) E. Bockmann, S. Steen, Experiments with actively pitch-controlled and spring-loaded oscillating foils, *Applied Ocean Research*, 48 (2014) 227-235
- 13) J. Gerritsma and W. Beukelman, Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship, *I. S. P.*, Vol. 19, No. 217 (1972).
- 14) H. Maruo, Resistance in Waves, 60th Anniversary Series, Vol. 8, *The Society of Naval Architect of Japan*, (1963).
- 15) M. Takagi, R. Hosoda and Y. Higo, An Investigation of Gerritsma's Formula of the Resistance Increase by Energetics, *Kansai Society of Naval Architects*, Japan, No. 170, (1978).