(昭和 23 年 11 月 造船協會秋季講演会に於て講演)

燃料消費最小の航法と經濟馬力の決定について

正員 工學士 谷 口 中

Abstract

On the method of the navigation with minimum fuel consumption
and the determination of the economical horse-power of ship

By Kaname. Taniguti, *Kogakushi, Member*

The author proved that the method of navigation with minimum fuel consumption is to navigate with constant horse-power inspite of the sea condition, when a ship goes on a given route with a given time, and that the constant service horse-power is approximately equal to the one corresponding to the given mean-speed and the daily meaned "sea-margin" of the route. With this theorem, he proposes the resonable method to determinate and to criticize the economical horse-power (or designed horse-power) of liner.

内 容

緒 論

1. 燃料消費量最小の航法
2. 航海馬力の算定
3. 經濟馬力の定め方について
4. 計算例

緒 論

或一定の航路を或一定の航海時間で航海する場合に、その航海の方法はいろいろあり得る。例えば最も極端な場合を考えて見てもその航海期間中の海象状態の如何に不拘馬力一定で走する方法、風ざた日には早く走つておいて荒れた日には速度を落して走する方法、又はその逆、或いは又海象の状態の如何に不拘速度乃至は回轉速度を出来るだけ一定に保つ様にして航走する方法等いろいろの航海方法があり得る。之等いろいろの航海方法のうちでこの航海中に消費する燃料の總量を最小ならしめる様な航走方法は如何なるものであろうか。こうした問題は重要であるに不拘、今迄に發表されたものがない様であるので簡単な考察を行つて見た。

その結果、航路と航海時間とが與えられた場合に全燃料消費量を最小ならしめる航法は、海象状態の如何に不拘馬力一定で航海する方法であるという定理を導いた。

次に定期船の經濟馬力とは如何なるものかがよく問題にされるがこの概念はかなりあいまいでその定義を明確に下すことは困難であつた。然し乍ら上の定理を應用する事により、與えられた船が與えられた航路で與えられた任務につく場合の經濟馬力は之迄より一層合理的に確定する事が出来、又之と關連して所謂常用最大馬力(又は定格馬力)の概念も合理的な解釋が與えられると思考される。

依つて茲に之等の結果を發表して御批判を仰ぐ次第である。

1. 燃料消費最小の航法

航路及び時期が與えられれば(例えば南水洋捕鯨漁場への航路等)この航路上における天候の分布はほぼ定まる。即ち過去の統計資料によつてこの航路上における天候状態の對距離分布を推定する事が出来る。今航路の全長を L_0 としこのうち例えば海象階級(風波の状態を綜合した海象状態を適當な段階に分けたもの) s のもとで航海すべき距離を L とすると海象状態の分布曲線

$$L=L(s) \quad (1.1)$$

$$\text{但し } \int_0^\infty L ds = L_0 \quad (1.2)$$

は第1圖の如く推定する事が出来る。第1圖は南氷洋の捕鯨漁場への往復航路に對する海象狀態の分布曲線を

海象狀態分布曲線の1例

第 1 圖

$$C = \int_0^\infty \gamma P \frac{L}{V} ds \quad (1.4)$$

となる。而して上述した所により

$$L=L(s)$$

$$P=P(V, s)$$

$$\gamma=\gamma(P, P_0) \quad (\text{但し } P_0=\text{經濟馬力})$$

であるから、今考えている問題は積分(1.3)を一定として積分(1.4)を minimum ならしめる如き未知函數 V (又は P) を求めると云う通常の條件附變分法の問題に歸する。従つて V は次の Euler の微分方程式の解として求められる。

$$\frac{\partial}{\partial V} \left[\gamma P \frac{L}{V} + \lambda_0 \frac{L}{V} \right] = 0 \quad (1.5)$$

茲に λ_0 は條件(1.3)から定められる未定常數である。(1.5)を解くために P, γ を次の形に假定する。

$$P=k(s) \cdot V^n \quad (n>1, \text{普通 } n \approx 3) \quad (1.6)$$

$$\gamma = \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^m \quad (1.7)$$

但し P_0 の定義から γ は $P=P_0$ に於て minimum になるものとする。即ち

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial P} \right)_{P=P_0} = - \left[\sum \frac{m \gamma_m}{P_0} \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^{m-1} \right]_{P=P_0} = 0$$

$$\text{i. e. } \gamma_1 = 0$$

従つて(1.7)の級數表示に於て實は $m=1$ の項は缺けているものとする。級數(1.7)はその physical meaning から當然一様收斂級數と考えてよいであろう。(1.6)及び(1.7)を(1.5)に代入して

$$\frac{\partial}{\partial V} \left[\left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^m \right\} k V^n \frac{L}{V} + \lambda_0 \frac{L}{V} \right] = 0$$

$$\text{i. e. } \frac{\partial}{\partial V} \left[k V^{n-1} L \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^m + \lambda_0 \frac{L}{V} \right] = 0$$

$$\therefore (n-1)kV^{n-2}L \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^m + kV^{n-1}L \sum_{m=2}^{\infty} \left\{ m \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^{m-1} \left(-\frac{n k V^{n-1}}{P_0} \right) \right\} - \lambda_0 \frac{L}{V^2} = 0$$

その航海記録から求めたものである。

さて海象階級 s の場合に出す速力を V とするとこの海象階級 s のもとで航走する時間は

$$\frac{L ds}{V}$$

であるから、この航路を航走するに要する全時間 T は

$$T = \int_0^\infty \frac{L}{V} ds \quad (1.3)$$

となる。而して海象階級 s のもとで速力 V を出すための馬力は単一に定まる(載荷状態は與えられているものとする)故之を P とし、機關の燃料消費率(毎時毎馬力當りの燃料消費量)を γ とすると海象階級 s のもとで消費する燃料は

$$\gamma \cdot P \cdot \frac{L}{V} ds$$

であるからこの航路全體で消費する燃料の總量 C は

兩邊に $\frac{V^2}{L}$ を乗じて

$$(n-1)kV^n \sum_0^\infty \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^m + n \frac{k^2 V^{2n}}{P_0} \sum_2^\infty m \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^{m-1} - \lambda_0 = 0$$

kV^n に (1.6) を代入すると

$$(n-1)P \sum_0^\infty \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^m - n \frac{P^2}{P_0} \sum_2^\infty m \gamma_m \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)^{m-1} - \lambda_0 = 0 \quad (1.8)$$

この (1.8) 式には未知函數 P の外はすべて既知の常數で s の函數を全く含んでいない。従つて未知函數 P は實は常數でなければならない。即ち

$$P = \text{constant}$$

之即ち求むる解で「燃料消費最小の航法は s に無關係に馬力一定で航海する事である」と云う事を示すものである。この一定の航海馬力 P は (1.8) を解いて得らるべきものであるが又次の如くして容易に求める事が出来る。(1.3) と (1.6) とより

$$T = \int_0^\infty \frac{L}{[P/k]^{1/n}} ds$$

P は s に無關係に一定であるから

$$T = \frac{1}{P^{1/n}} \int_0^\infty L k^{1/n} ds$$

$$\therefore P = \frac{1}{T^n} \left[\int_0^\infty L(s) \{k(s)\}^{1/n} ds \right]^n \quad (1.9)$$

L, k, T が與えられれば之に應ずる最も經濟的な航海馬力 P は (1.9) によつて算定出来る。

以上の考察の結果は、馬力 P が (1.6) 式の如く V の多次パラボラの單一項で表わさざれば γ の形には無關係に成立する。 P が V^n の單一項で表わせない場合は (1.8) への變換に於て $k(s)$ が消えない爲上述の如き簡潔な結果が得られない。然し乍ら實際問題としては $n=3$ 程度の値を取る事によりかなりの V の範圍に亘つて馬力 P は (1.6) の形に近似せしめ得るから、前述の馬力一定の定理は實際の場合にも近似的に眞であると云つて差支ないであらう。

又以上の考察に於ては燃料消費に基く排水量の變化の馬力に及ぼす影響を全く無視している。通常の場合この影響は無視して差支ないと考えられる。又抵抗増加に基く推進器荷重増加の爲に主機の種類によつては發生馬力が低下するけれども今はその影響は考慮せず、荷重如何に不拘、同じ馬力の發生が可能であると假定している。

2. 航海馬力の算定

航海馬力 P を (1.9) 式で算出する代りに、若し一週期間(例えばLinerならば1年間、捕鯨船隊ならば1往復等)の Sea-margin (實際航海時の船體抵抗の、無風無汚損の場合の船體抵抗に對する増加の割合)の全算術平均 $\bar{M}$ が分つてゐる時は $\bar{M}$ を用いて直ちに P の近似値を求める事が出来る。

即ち平均の Sea-margin $\bar{M}$ 、平均速力 $\bar{V}$ (航路の長さを與えられた航海時間 T で除して得られる)に對する馬力 P を求むれば之が近似的に求むる航海馬力である。(第2圖参照) この事は次の如く簡単に證明する事が出来る。

第 2 圖

一般に SHP (又は BHP 等) が一定の場合には V と Sea-margin M との関係は近似的に次の如く双曲線で表わす事が出来る。(第 2 圖参照)。

$$V = \frac{p}{M + \alpha} \quad (2.1)$$

茲に p は馬力 P の函数であり、 M は海象階級 s の函数である。(2.1) を (1.3) に代入して

$$T = \int_0^\infty \frac{L(M + \alpha)}{p} ds \quad (2.2)$$

(2.1) 式で平均速力 $\bar{V} = L_0/T$ に對應する Sea-margin を $\bar{M}'$ とすると

$$\bar{M}' = \frac{p}{\bar{V}} - \alpha$$

$$\text{i.e. } \bar{M}' = \frac{p}{L_0/T} - \alpha$$

之に (2.2) を代入すると

$$\bar{M}' = \frac{p}{L_0} \int_0^\infty \frac{L(M + \alpha)}{p} ds - \alpha$$

p は馬力 P のみの函数であり、航海馬力は s に無關係に一定であるから p も亦 s には無關係に一定で、 α も亦同様であるから上式は次の如くなる。

$$\begin{aligned} \bar{M}' &= \frac{p}{L_0} \left(\frac{1}{p} \int_0^\infty L M ds + \frac{\alpha}{p} \int_0^\infty L ds \right) - \alpha \\ &= \frac{1}{L_0} \int_0^\infty L M ds, \quad \left[\because \int_0^\infty L ds = L_0 \right] \\ \therefore \bar{M}' &= \frac{\int_0^\infty L M ds}{\int_0^\infty L ds} \end{aligned} \quad (2.3)$$

航海成績解析の 1 例

平均の Sea-Margin 及び Sea-Margin と海象階級との関係

第 3 圖

事が出来、又實際就役の實績からこの船の設計出力のとり方が果して妥當であるかどうかの批判を行う事が出来る。

先ず例として關釜或いは青函の如き比較的短距離の liner について考察を行う事とする。航路が短いから各回の航海中は海象状態は一定と考えて差支えないであろう。この航路に於ける過去幾年間かの氣象統計から一年間の總航海回数の海象状態の階級 s に對する平均の頻度分布圖を作る。即ち s の階級の海象状態のもとで航海

即ち $\bar{M}'$ は一週期間の全航海に對し各々の海象階級 s に對應する Sea-margin M を、その海象階級のもとで航行すべき航程だけの weight を附して平均せるものである。近似的には日々の航走距離を同じと見れば航海中の毎日の Sea-margin を一週期間の全航海日數に對し算術平均せるもの即ち $\bar{M}$ となる。従つて

$$\bar{M}' = \bar{M} \quad (2.4)$$

故に一週期間の全航海の Sea-margin の算術平均 $\bar{M}$ が分つてゐる時は第 2 圖に示す如くして直ちに所要の航海馬力 P を求める事が出来る。 $\bar{M}$ はその航路の航海成績の解析から求める事が出来る。

航海成績解析結果の 1 例として南氷洋の捕鯨漁場往復航海の解析結果を示せば第 3 圖の如くである。

3. 經濟馬力の定め方について

1. で述べた定理を應用する事により、定まつた航路に就役する船舶の經濟馬力(設計出力)を合理的に定める

之は圖式積分と試行法によつて簡単に解く事が出来る。

航路が長く一航海の海象状態が一樣と考えられない場合も1で述べた定理により航海馬力 P は一定とすべきであるからこの P に對應する平均の海象状態を考える事が出来る。この平均の海象状態をとる事により、この

する回数を調べて之を s の上に置點して第4圖の如き頻度曲線が得られる。第4圖は昭和15年の瀬戸内海航路の頻度曲線(海象階級としてビュフォートの風力階級をとる)を例として示せるものである。

一年間の總航海回数を N , 分布密度を n とすると

$$N = \int_0^{\infty} n ds \quad (3.1)$$

$$\text{又は } dN = n ds \quad (3.2)$$

である。liner であるから發着の時間は定められてをり従つて航海時間 T は一定である。この場合最も經濟的な航法は馬力一定の航海法であるから毎回の航海馬力はその航海の海象状態のみの函數として定まる事となる。(排水量はほぼ一定と假定している)。與えられた航海時間 T , 海象階級 s に對しこの様に定まる航海馬力を

$$P = P(s)$$

とし、燃料消費率を

$$\gamma = \gamma(P, P_0) \quad (3.3)$$

とする。茲に P_0 は之から定めようとする設計馬力である。 γ を P/P_0 の函數としてその一例を示せば第5圖の如くである。然るときは1回の航海で消費する燃料は $\gamma \cdot P \cdot T$ であり、海象階級 s のもとで航海すべき航海回数は dN であるから一年間の全航海で消費する燃料の總量 C は次の如くなる。

$$C = \int_N \gamma P T dN = \int_0^{\infty} \gamma P T n ds$$

$$\text{i.e. } C = T \int_0^{\infty} \gamma(P, P_0) \cdot P(s) \cdot n(s) ds \quad (3.4)$$

扱、設計馬力 P_0 は C を minimum ならしめる様に選ぶのが最も合理的であると考えられる。依つて設計馬力 P_0 は次の式に依つて定められる。

$$\frac{\partial C}{\partial P_0} = T \int_0^{\infty} \frac{\partial \gamma}{\partial P_0} P \cdot n \cdot ds = 0 \quad (3.5)$$

場合も上に述べた航路の短い場合と全く同様に論ずる事が出来る。従つて航路及びその海象状態が與えられれば設計出力(經濟馬力) P_0 は (3.5) の式によつて單一に確定する事が出来、式 (3.5) を以て設計出力(經濟馬力)を定義するのが合理的であると考えられる。

又現實の船の實績に式 (3.5) を適用する事により、その船の設計出力のとり方が果して妥當であるかどうかを批判する事が出来る。

liner の主機馬力の決定に對しては (3.5) によつて考えられる P_0 を經濟馬力とし、定期を保持すべき最惡の海象階級に對應する航海馬力 P を常用最大馬力(定格馬力)とする如く主機の出力を定めるのが最も合理的であると考えられる。

尙又航路の長さと考えられた航海時間とより求められる平均の對水速力が所謂航海速力であり、無風無汚損の状態で前記經濟出力に對して得られる速力との航海速力との差が之迄概念的に唱えられて來た就役の speed margin であり、又一航海中に起り得る海象状態の差が最大の場合にその航海馬力に對して到達される最大速力と航海速力との差が船型選定時に考慮される speed margin であると考えるのが合理的ではないかと思う。

4. 計 算 例

1. 上で述べた定理による馬力一定の航海法と他の航海法との燃料消費の比較の一例として次の如き場合について計算を行つて見る。

船體 第3圖に引用した長さ 150 m, 航海平均排水量 20,400 t の鯨工船。海象階級に對する Sea-margin は第3圖により、Sea-margin に對する軸馬力は第2圖により與えられるものとする。

航路 第1圖に引用した全航程 13,507 哩の南永洋往復航路。

燃料消費率 第5圖の最上の曲線を使用し、且 $P_0=2,000$ SHP とする。

航海法 (1) 軸馬力一定で航海する。SHP= $P_0=2,000$ SHP。

(2) 速力一定で航海する。但し主機最大馬力 2,500 SHP と假定し之以上の軸馬力を要する荒天には軸馬力が 2,500 を越えぬ様速力を落す。

(3) 主機最大軸馬力を 3,000 と假定する以外は (2) と同様の方法で航海する。

尙 (2), (3) 共に (1) と平均航海速力は同じになる様にする。

計算結果

以上の條件のもとに (1.3) 式を數値積分して航海法 (1) による平均航海速力を求めると

$$\bar{V}=9.05 \text{ kn}$$

となる。この値は 2. で述べた航海馬力の近似算法により第2圖から $\bar{M}=0.553$, SHP=2,000 に對して得られる $\bar{V}$ の値と完全に一致してをり 2. の近似算法が十分役立つ事を示している。

(2), (3) の航海法による平均航海速力及び燃料消費量を (1.3) 式及び (1.4) 式を數値積分して求め、航海法 (1) による平均航海速力 9.05 kn と同じ平均航海速力の場合に對する燃料消費量を内挿し (1) の場合と比較すれば下表の如くなる。

航 海 法	平均航海速力	全燃料消費量	全燃整消費量の割合
(1) SHP=2,000	9.05 kn	1,513 t	1.00
(2) $V=9.28$ kn, 但し SHP $\leq$ 2,500	//	1,527	1.01
(3) $V=9.22$ kn, 但し SHP $\leq$ 3,000	//	1,561	1.03

即ちその差は僅かであるが馬力一定の航海法が燃料消費の少ない事を示している。尙最大馬力と P_0 との比が大きい程燃料消費量は大きくなつてゐるが之は (最大馬力)/ $P_0=1$ の場合には (2) 又は (3) の航海法は (1) と全く同じものになってしまう事から考へて當然の事である。

討 論

○木下 昌雄君 只今の御講演は所謂操船者、及運航業者以外に造船造機の設計者として sea-margin を定める上に大變参考になつたと思いますが、只今拜聴致しまするに $P=k(s)V^n$ がこの結論を得るのに一番重要であ

ると思われます。例えば同じ Beaufort 風度 2 の時でも向い風と追い風とで P は可成り異つて來ます。御承知の様に Beaufort 風度は絶対風速を表わして居りますから、絶対風向と船の進路とのなす角に依つて、その影響が大いに異り簡単に $k(s)$ と置き得ない譯であります。しかもこの風の影響は量的に可成り大きく例えば本論文で例示された第一日新丸の南氷洋航行中に遭遇した真正面からの Beaufort 7 の風に依つては、船速 6.26 節でありましたが酷い風ではこの風のための（それに依る波浪の影響は暫くおき）E. H. P 即ち抵抗が 2 倍以上にも増した事があります。然もこれ丈の風でも若し相對風向が正横附近だとすれば、風抵抗のみを考えれば影響はない譯ですし、追風だと寧ろ gain になる筈です。更にこの風による波浪の影響を考えますと、矢張り波浪の進路と船の進路との關係が問題で、これに依つて起される rolling, pitching の角度が問題になつて來ます。私の得た結論ではこの場合 pitching の方が支配的影響を及ぼす様であります。然し南氷洋へ行く長い期間での pitching の角の平均と云うものは事實上取れない。長い期間であるから大数の法測で mean が取れるんだと云うならばいいが、季節風が卓越して來ると向い風ばかり、又は追風ばかりと云う場合があり、實際上困ります。斯様にこの $k(s)$ が問題であります。

○谷 口 中君 實はこの式は考え易くする爲に $f(s)$ としていますが $M(\text{sea-margin})$ の函數と考えると同じであります。問題は s (海階級)と M との關連いかんと云う事になります。 s を構成する要素はいろいろありますが、夫等相互の間には航路や時期によつて平均的にはある一定の關係があるためだろうと思います。事實第 3 圖に於ても個々の點は非常に散在しています。その平均が之であります。然し異なる航路や時期並に船型に對しては s の代表要素として風力階級を取つた場合と、波浪階級を取つた場合とは直接比較する事は出来ませんでしょう。海象の影響は非常に complex なので差當つては取るべき階級は何でもよく、適當な階級を取つて考えれば好いのではないのでしょうかと思います。

○木下 昌雄君 結局 M が s 即ち風力階級又は波浪階級等の函數と考えるのが味噌であつて、斯様に考えた場合には他の factor のために相當點の散ばり即ち巾をもつて來るが、考えている航海が長期間なので平均としてとれると云う事なのですね。

○谷 口 中君 そうです。それで liner などでは一年と云う長い期間を取るべきだと思います。又 propeller の汚損等に依る効率低下も margin としてこの中に含まれています。

○山本 善之君 南極航路の様な場合、假定の様な氣象の分布は致しますか。之に對し速度を時々刻々に如何にすべきでしょうか。

○谷 口 中君 こゝで考えている經濟馬力のきめ方は航海をする前に天候を推定して IP をきめる事になります。この推定が違つた場合には何うすべきかと云う事は又別の問題です。實際問題として南氷洋の様に長い期間の時は終りに適當な修正が必要だろうと思います。

○木下 昌雄君 その場合には最初に出かける時に考えていた一定馬力の値を修正すれば好いと思います。海象状態は予想曲線を書いておいて、毎日前日までの差を計算して置いて、翌日からのをもう一度予想し直して改めて一定馬力の値を求めて行けば好いでしょう。

○山本 善之君 氣象の分布は平均を取れば良いと云う性質のものではないと思いますが、之に對して何うお考えですが。私は近代統計學の素養を持ちませんので、良く分りませんが最近の統計のゆき方は少し違ふと思います。

○木下 昌雄君 元來の成立ちが $P = k(s)V^n$ の式であり、この式がそれだけの幅の mean なのだから何日間で行き着くか、又は燃料消費量は幾何等かと云う結論に對する $\pm$ の allowance はあるべきで、この式のもつ誤差は當然その儘結論に對する誤差に利いて來る譯です。

○山本 善之君 私には分らない様になりましたから此の質問はやめますが、この統計の扱い方には疑問があります。

○榊原 鉦止君 經濟馬力の calculation ですがもう既に actual design に當つて御提案の方法で calculate しているのですか。そうすると大變實際上良い効果があります。

○谷 口 中君 未だそこまでは行つて居りません。

○榊原 鉦止君 在來の新計畫船の計畫馬力が御提案の方法で當つて見て、その就航 route に對し overestimate しているか、小さすぎるか調べて頂いたら面白いと思います。

○谷口 中君 私もやつて見度いと思います。航路は第2圖の南氷洋行き捕鯨船に對して前年の data を使つて、この方法で馬力を決めました。この時はエンジンを取代えましたので、取代えた主機の經濟馬力をどの程度にすべきかと云う問題に對してゞありました。