M　　14-95

No.
Date 58.3.20

風車推進について

別紙2部

内容

参照文献

T. Y. Wu, 13-th ONR Symp., Tokyo, 1980

概要

風車(何型でもよい)をまわしてその動力を直接又は間接(電気的に)に水中プロペラをまわして船を推進する方法が考えられる。

この方法では向風でも船は進むので少くともこの点では帆に較べて有利に見える。

しかしこの方式では風車によって動力を得、その動力を更にプロペラを介して推力にかえる訳であるからその2回の変換効率による損失は大きいと考えられるのに対し、帆では風の力を直接推力として利用するのでこの種の変換効率はなく、機構も単純そのもので有利と考えられる。

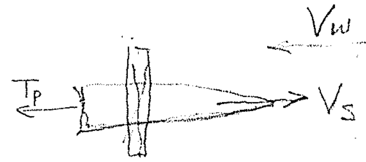
以下風力エネルギーの利用効率を目安として両者の比較を試みる。

詳細な計算がないので細かい所は不明であるが上述の考察の通り、風車推進では調整が複雑な割に効率の上限は限られているのに対し、帆では帆面積を大きくすれば効率が向上する。

1. 向風

向風では帆は推力を出せない。

風車ではどうか。



風速を V_W, 船速を V_s

風車の正面投影面積(プロペラ型ならDisc Area); A_M

水密度 ρ_w, 空気密度 ρ_a

船の抵抗 R_s, プロペラ推力 T_P, (船の風圧抵抗は無視する)

風車の抵抗 R_M, 風車の風から得る動力 P.

とすると力の平衡方程式は

$$R_M + R_s = T_P \qquad \cdots\cdots \quad (1.1)$$

動力については η_Tを伝達効率として

$$P = T_P V_s / \eta_T, \qquad \cdots\cdots \quad (1.2)$$

風車の風力利用効率 η_M とすると、

$$\eta_M = \frac{P}{\frac{\rho_a}{2} A_M (V_W + V_s)^3}, \qquad \cdots\cdots \quad (1.3)$$

またその流力的効率として

$$\eta_H = \frac{P}{R_M (V_W + V_s)}, \qquad \cdots\cdots \quad (1.4)$$

なる量を導入し、

$$R_M = \frac{\rho_a}{2} A_M (V_W + V_s)^2 C_M, \qquad \cdots\cdots \quad (1.5)$$

とすると

$$\eta_M = \eta_H C_M , \quad \text{------} \qquad (1.6)$$

船については 船体側面積 A_S について、

$$R_S = \frac{\rho_W}{2} A_S V_S^2 C_S , \quad \text{......} \qquad (1.7)$$

とし プロペラは適当に選ぶものとし、プロペラ効率も含めて 伝達効率 η_T を定義するものとする。($\eta_T \doteqdot \eta_P$)

(1.1)と(1.2)から T_P を消去して

$$(R_M + R_S) V_S = \eta_T P , \quad \text{------} \qquad (1.8)$$

(1.3), (1.5), (1.7)を代入して 整理すると

$$\eta_T \eta_M = \left[C_M + C_S \frac{\rho_W}{\rho_a} \frac{A_S}{A_M} \left(\frac{V_S}{V_S + V_W} \right)^2 \right] \frac{V_S}{V_S + V_W} , \qquad (1.9)$$

$V_S \ll V_W$ で 抵抗内第2項が無視出来るとすれば

$$\eta_T \eta_M \doteqdot \frac{C_M V_S}{V_W} = \frac{\eta_M}{\eta_H} \cdot \frac{V_S}{V_W} , \quad \text{...} \qquad (1.10)$$

となるので
$$\frac{V_S}{V_W} \doteqdot \eta_H \eta_T , \quad \text{----} \qquad (1.11)$$

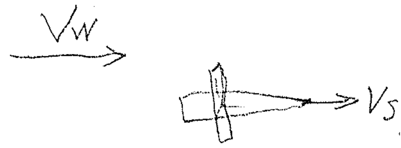
これは風車の抵抗だけに打勝って どれだけ進めるかを示す式であるが、かなり大きい値になるように見えるので やはり実際は 船の抵抗を無視出来ない。
V_S を大とするには (1.9) の第2項を小さくすればよく、
換言すれば (1.11) は理想最大速度である。

なお この時 η_M は常に最大となるよう風車の回転数を保つものと考えている。

2、追風

追風では (1.1)のかわりに

$$T_P = R_S - R_M \ , \quad \cdots (2.1)$$



(1.2)は同じで

$$\eta_T P = T_P V_S \ , \quad (2.2)$$

又

$$\eta_M = \frac{P}{\frac{\rho_a}{2} A_W (V_W - V_S)^2} \ , \quad (2.3)$$

$$\left.\begin{aligned} \eta_H &= \eta_M / C_M \ , \\ R_M &= \frac{\rho_a}{2} A_M (V_W - V_S)^2 C_M \\ R_S &= \frac{\rho_W}{2} A_S V_S^2 C_S \end{aligned}\right\} \quad (2.4)$$

等から

$$(R_S - R_M) V_S = \eta_T P \ , \quad \cdots (2.5)$$

$$\eta_T \eta_M = C_S \frac{\rho_W}{\rho_a} \frac{A_S}{A_M} \left(\frac{V_S}{V_W - V_S} \right)^3 - C_M \frac{V_S}{V_W - V_S} \ , \quad (2.6)$$

帆では 帆面積 A_F，帆に働く力を R_F とすると

$$R_F = \frac{\rho_a}{2} A_F (V_W - V_S)^2 C_F \ , \quad \cdots (2.7)$$

でこれと船の抵抗が釣合うとすると

$$R_F = R_S \ , \quad \cdots (2.8)$$

$$\frac{\rho_a A_F C_F}{\rho_W A_S C_S} = \left(\frac{V_S}{V_W - V_S} \right)^2 \ , \quad \cdots (2.9)$$

帆のなす仕事 P_F は

$$P_F = R_F V_S \ , \quad \cdots (2.10)$$

帆が A_F で受ける風力エネルギーは $\frac{\rho_a}{2}A_F(V_W-V_S)^3$ である

から，帆の風力利用効率は

$$\eta_F = \frac{P_F}{\frac{\rho_a}{2}A_F(V_W-V_S)^3} = \frac{C_F V_S}{V_W-V_S} \quad , \text{---} \quad (2.11)$$

(2.9)を代入すると

$$\eta_F = C_S\frac{\rho_W A_S}{\rho_a A_F}\left(\frac{V_S}{V_W-V_S}\right)^3 \quad , \quad (2.12)$$

風車の場合の風力利用効率は勿論 η_M であるが

プロペラを介在させる為に η_T だけおちて $\eta_M\eta_T$ となる。

それ故 (2.6) は風車の場合の風力利用効率と

考えてよく (2.12) と比較すべき量である。

明らかに両式第1項は等しく風車の場合は

右辺第2項だけ有利である。

なお (2.9) を (2.12) に代入すると

$$\eta_F = C_F\sqrt{\frac{\rho_a A_F C_F}{\rho_W A_S C_S}} \quad , \text{---} \quad (2.13)$$

つまり帆では帆の諸元と船体抵抗から風力利用

効率が上式で決まってしまうのに対し，風車では $\eta_M\eta_T$

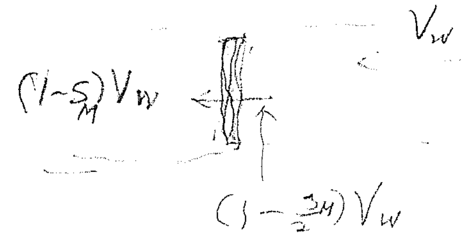
つまり風車の効率とプロペラの効率で定まるので夫々を

常に最大効率に保っておけば良い効率を確保できる。

3. 風車の運動量理論

η_M, η_T は荷重度によって決まる。

プロペラでは ($\eta_T = \eta_P$) として、



荷重度を

$$C_P = \frac{T_P}{\frac{\rho_W}{2} A_P V_S^2} , \quad \cdots \quad (3.1)$$

とおくと運動量理論では

$$T_P = \frac{\rho_W}{\cancel{2}} A_P V_S^2 \left(1+\frac{s_P}{2}\right) s_P , \quad \cdots \quad (3.2)$$

つまり

$$C_P = 2\left(\frac{s_P}{2}+1\right) s_P , \quad (3.2')$$

$$s_P = \sqrt{1+C_P} - 1 , \quad \cdots \quad (3.3)$$

推進効率は

$$\eta_P = \frac{1}{1+\frac{s_P}{2}} = \frac{2}{1+\sqrt{1+C_P}} , \quad (3.4)$$

風車では抵抗 R_M は、図から

$$R_M = \frac{\rho_a}{\cancel{2}} A_M V_W^2 \left(1-\frac{s_M}{2}\right) s_M , \quad \cdots \quad (3.5)$$

荷重度は (1.5) の定義と同じで

$$C_M = \frac{R_M}{\frac{\rho_a}{2} A_M V_W^2} = 2 s_M \left(1-\frac{s_M}{2}\right) , \quad \cdots \quad (3.6)$$

逆に

$$s_M = 1 - \sqrt{1-C_M} , \quad \cdots \quad (3.7)$$

輪が失ったエネルギーは単位時間に

$$P = \frac{\rho_a}{2} A_M V_W^3 \left(1-\frac{s_M}{2}\right)\left[1-(1-s_M)^2\right] , \quad \cdots \quad (3.8)$$

効率は(1.4)の定義と同じで…

$$\eta_H = \frac{P}{R_M V_W} = 1 - \frac{S_M}{2}, \quad \cdots \quad (3.9)$$

一方風力利用効率は(1.6)より上式と(3.9)から

$$\eta_M = \eta_H C_M = 2 s_M \left(1 - \frac{s_M}{2}\right)^2, \quad \cdots \quad (3.10)$$

(3.6), (3.7)から

$$Max[C_M] = 1, \quad Max[S_M] = 1, \quad \cdots \quad (3.11)$$

故(3.9), (3.10)からその時

$$\eta_H = \frac{1}{2}, \quad \eta_M = \frac{1}{2} \quad \cdots \quad (3.12)$$

(3.10)を最大とする点は

$$Max[\eta_M] = \frac{16}{27} \fallingdotseq .59 \quad \text{for} \quad s_M = \frac{2}{3}, \quad (3.13)$$

この時

$$\eta_H = \frac{2}{3}, \quad C_M = \frac{8}{9}, \quad \cdots \quad (3.14)$$

又(3.8)より

$$P = \frac{\rho_a}{2} A_M V_W^3 \left[2 s_M \left(1 - \frac{s_M}{2}\right)^2\right] \fallingdotseq \frac{.59}{2} \rho_a A_M V_W^3, \quad (3.15)$$

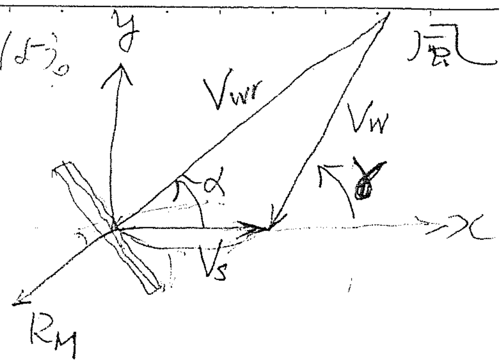
これは風車が静止している時の話で、動いていると少々異なって来る。

例えば V_s で風に向って動いているとその為に消費する動力を差引いた純動力は

$$P_N = P - R_M V_s \fallingdotseq \rho_a A_M (V_W + V_s)^3 s_M \left(1 - \frac{s_M}{2}\right)\left[1 - \frac{s_M}{2} - \frac{V_s}{V_W + V_s}\right], \quad (3.16)$$

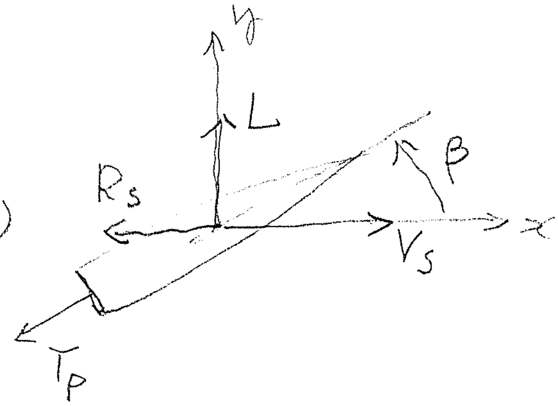
4. 横風

船はx軸方向にV_sの速度で進むとしよう。



風車は相対風速V_{wr}の方向に直角に向いて抗力をR_Mとしよう。

風速V_wは静止座標ではx軸とγの角をなすものとする。



$$V_{wr} = \sqrt{V_w^2 + V_s^2 + 2V_wV_s\cos\gamma}, \quad (4.1)$$

$$V_{wr}\sin\alpha = V_w\sin\gamma, \quad (4.2)$$

船は図のように船路とβなる角度の方向に向いており揚力Lと抗力R_sが働き、プロペラは推力T_Pをもつ。

力はただし

$$R_M = \frac{\rho_a}{2} A_M V_{wr}^2 C_M, \quad \cdots (4.3)$$

$$L = \frac{\rho_w}{2} A_S V_s^2 C_L(\beta), \quad \cdots (4.4)$$

$$R_S = \frac{\rho_w}{2} A_S V_s^2 C_D(\beta), \quad (4.5)$$

$$T_P = P\eta_T / V_s, \quad - \quad (4.6)$$

$$P = \frac{\rho_a}{2} A_M V_{wr}^3 \eta_M = \eta_H R_M V_{wr}, \quad (4.7)$$

$$\eta_M = \eta_H \cdot C_M, \quad \cdots (4.8)$$

x-方向の力の平衡は

$$R_M\cos\alpha + R_S = T_P\cos\beta = \eta_T\frac{P}{V_S}\cos\beta, \quad \cdots\cdots \quad (4.9)$$

y-方向では

$$R_M\sin\alpha = L + T_P\sin\beta = L + \frac{\eta_T P\sin\beta}{V_S}, \quad (4.10)$$

(4.9)から

$$\eta_T\eta_M\cos\beta = C_M\frac{V_S\cos\alpha}{V_{WR}} + \frac{\rho_W A_S}{\rho_a A_M}C_S\left(\frac{V_S}{V_{WR}}\right)^3, \quad (4.11)$$

(4.10)から

$$\eta_T\eta_M\sin\beta = C_M\sin\alpha\frac{V_S}{V_{WR}} - C_L\frac{\rho_W A_S}{\rho_a A_M}\left(\frac{V_S}{V_{WR}}\right)^3, \quad (4.12)$$

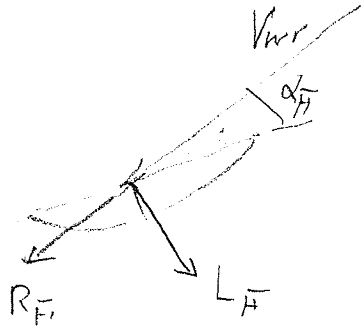
2式から

$$\eta_T\eta_M = \frac{V_S}{V_{WR}}\left[C_M\cos(\alpha-\beta) + \frac{\rho_W A_S}{\rho_a A_M}\left(\frac{V_S}{V_{WR}}\right)^2\left\{C_S\cos\beta - C_L\sin\beta\right\}\right], \quad (4.13)$$

$$\tan\beta = \frac{C_M\sin\alpha - C_L\dfrac{\rho_W A_S}{\rho_a A_M}\left(\dfrac{V_S}{V_{WR}}\right)^2}{C_M\cos\alpha + C_S\dfrac{\rho_W A_S}{\rho_a A_M}\left(\dfrac{V_S}{V_{WR}}\right)^2}, \quad (4.14)$$

帆の場合は R_M のかわりに図のように帆の迎角を

とると



$$\left.\begin{aligned} L_{\text{帆}} &= \frac{\rho_a}{2} A_{\text{帆}} V_{wr}^2 C_{L\text{帆}}(\alpha_{\text{帆}}) \\ R_{\text{帆}} &= \frac{\rho_a}{2} A_{\text{帆}} V_{wr}^2 C_{\text{帆}}(\alpha_{\text{帆}}) \end{aligned}\right\} \cdots (4.15)$$

で力の平衡は x 方向に

$$L_{\text{帆}} \sin\alpha - R_{\text{帆}} \cos\alpha = R_s \quad , \cdots (4.16)$$

y 方向には

$$L_{\text{帆}} \cos\alpha + R_{\text{帆}} \sin\alpha = L \quad , \cdots (4.17)$$

利用出来た仕事は $R_s V_s$ であるから風力利用効率は

$$\eta_{\text{帆}} = \frac{R_s V_s}{\frac{\rho_a}{2} A_{\text{帆}} V_{wr}^3} \quad , \cdots (4.18)$$

(4.16), (4.17) から

$$C_{L\text{帆}} \sin\alpha - C_{\text{帆}} \cos\alpha = \frac{\rho_w A_s}{\rho_a A_{\text{帆}}} C_s(\beta) \cdot \left(\frac{V_s}{V_{wr}}\right)^2 , \quad (4.19)$$

$$C_{L\text{帆}} \cos\alpha + C_{\text{帆}} \sin\alpha = \frac{\rho_w A_s}{\rho_a A_{\text{帆}}} C_L(\beta) \left(\frac{V_s}{V_{wr}}\right)^2 , \quad (4.20)$$

$$\eta_{\text{帆}} = C_s \cdot \frac{\rho_w A_s}{\rho_a A_{\text{帆}}} \left(\frac{V_s}{V_{wr}}\right)^3 \quad , \cdots (4.21)$$

なお (4.19) と (4.20) から

$$C_L(\beta)/C_s(\beta) = \frac{C_{L\text{帆}} \cos\alpha + C_{\text{帆}} \sin\alpha}{C_{L\text{帆}} \sin\alpha - C_{\text{帆}} \cos\alpha} \quad , \quad (4.22)$$

計算としては先ず α と V_{WR} をあらかじめ仮定してそのαに対し最適のα_Hをえらべば C_{LH}, C_H が決まるから一方船の polar Diagram により (4.22) から β が決まる。

所与の A_S, A_H ~~から~~ を (4.19), (4.20) に代入して V_S が決まる。(4.21) に代入すると η_H が定まる。

(4.19) を (4.21) に代入すると

$$\eta_H = \sqrt{\frac{\rho_a A_H}{C_S \rho_W A_S}} \left(C_{LH} \sin\alpha - C_H \cos\alpha \right)^{\frac{3}{2}} \quad , \quad (4.23)$$

となって帆船体の流力係数が与えられるとすると専ら帆面積の平方根に比例して効率が上がる。